

DOI: 10.11779/CJGE201701001

大气-植被-土体相互作用：理论与机理

吴宏伟

(香港科技大学, 香港)

摘 要: 植物是天然的工程师, 拥有防止浅层滑坡和地表侵蚀的潜能, 并具备低投入、易养护、绿色环保和生态平衡等优点。目前国内外的研究和工程实践大多只考虑植物根系的力学加筋作用, 而忽略了更为重要的水力作用。植物蒸腾能增加土体吸力, 从而降低土体渗透系数且增加抗剪强度, 所以能提高边坡稳定性和防止地表侵蚀。笔者的跨学科研究团队结合高等非饱和土力学理论和植物特征, 从根本上研究了大气-植被-土体的相互作用机理; 提出了新的理论模型, 可预测植被土的持水能力; 构建了考虑植物根系形状影响的地下水渗流与地表径流耦合运移的新模型; 推导了计算植被边坡吸力分布与稳定性安全系数的解析解, 引入了指数形、三角形、均布形和椭圆形 4 种典型的根系形状; 并自主研发了用于离心机模型试验的人造根, 能够模拟不同形状的植物根系的水力作用和力学加筋作用, 并利用其揭示了根系形状对边坡的变形与破坏机理的影响。为保证研究的基础性和实用性, 选取了百慕大草和鸭脚木树两种代表性植物, 并考虑了种植间距与真菌等因素的影响。主要研究结果揭示: ①植物在干燥与降雨条件下均能明显提高土体吸力, 提高边坡稳定性; ②植物引起的土体吸力可以用叶片面积指数和根表面积系数等植物特征参数量化, 并且鸭脚木树的叶片面积指数和根表面积系数之间存在着线性关系; ③真菌能显著提高植物根系的抗拉强度, 加强植物的力学加筋作用; ④所研究的 4 种根系形状中, 指数形根最有利于提高边坡稳定性。上述研究包括室内试验、现场监测、离心机试验和理论建模等方面, 建立了一套科学合理的理论框架与测试方法, 并为植物护坡的工程实践和“海绵城市”的建设提供科学依据。型

关键词: 大气-植被-土体相互作用; 植物护坡; 非饱和土; 吸力; 根系形状

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)01-0001-47

作者简介: 吴宏伟 (1962 -), 男, 香港科技大学土木及环境工程学系讲座教授, 英国剑桥大学丘吉尔学院海外院士, 香港科学工程院院士, 国家教育部长江学者讲座教授。主要从事大气-植被-土体相互作用的理论与机理、非饱和土状态相关的力学特性及其理论、泥石流及边坡稳定性问题、土与结构相互作用规律及机理等领域的研究与教学。迄今在国际著名刊物发表 200 余篇 SCI 论文, 并受邀在六大洲近 30 个国家的国际会议和研讨会作特邀演讲和主题报告 80 余次, 编写了英文学术专著《Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering》和《Soil-structure Engineering of Deep Foundations, Excavations and Tunnels》。目前担任国际土力学及岩土工程学会 (ISSMGE) 的评奖委员会主席及学会公报总编辑。E-mail: cecwwng@ust.hk。



Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms

Charles Wang-Wai Ng

(The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: Plants are sophisticated and intelligent natural construction materials. They can be used for enhancing the stability of shallow soil slopes and minimizing surface erosion. It is evident that the use of plants can be low-cost, sustainable (almost maintenance free) and environmentally friendly. Not only can plant roots provide mechanical reinforcement, they can also induce soil suction via evapotranspiration (hydrological effects) to increase soil shear strength and to reduce water permeability for minimizing rainfall infiltration in the ground. Most previous researches have mainly focused on the mechanical effects of roots, while the mechanisms and contributions of induced soil suction to slope stability are often ignored. A multi-disciplinary research team led by the author has carried out an in-depth study on the mechanisms of atmosphere-plant-soil interactions based on the advanced theories of unsaturated soils and plant

基金项目: 香港特别行政区研究资助局协作研究金项目 (HKUST9/CRF/09 和 HKUST6/CRF/12R); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2012CB719805)

收稿日期: 2016-12-13

characteristics. New constitutive models are developed to estimate the water retention ability of vegetated soils and to simulate conjunctive surface and subsurface transient flow considering different root architectures. In addition, a new analytical model is derived to calculate soil suction induced by roots having one of four architectures (i.e., exponential, triangular, uniform and parabolic distributions with depth) and thereby to predict the factor of safety of vegetated soil slopes. Moreover, a novel artificial model root system is developed to simulate both mechanical and hydrological effects of roots in centrifuge. The influences of root architectures on induced suction, slope stability and deformation mechanisms are investigated. The experimental and theoretical results reveal that (1) vegetated soil is able to retain higher suction than bare soil under both drying and wetting conditions; (2) for *Schefflera heptaphylla* (Ivy tree), a commonly found plant species in many Asian countries, there is a linear relationship between root area index and leaf area index, which in turn has an approximately linear relationship with evapotranspiration-induced soil suction; (3) fungi can significantly increase root tensile strength and therefore enhance the mechanical reinforcement effects of roots; (4) among the four types of roots investigated, the exponential one induces the highest suction and hence is the most effective in stabilizing shallow soil slopes. Through extensive laboratory testing, field monitoring, centrifuge modelling and theoretical analysis, this study has established a theoretical framework, developed a novel testing technique in centrifuge and contributed towards the fundamental understanding of atmosphere-plant-soil interactions. The findings from this study also provide a scientific basis for the design of vegetated soil slopes.

Key words: atmosphere-plant-soil interaction; vegetated slope; unsaturated soil; suction; root architecture

0 引言

在中国经济飞速发展、大量土木工程兴建的过程中, 植被的破坏导致了一些岩土工程问题的出现。例如, 降雨导致了大量浅层边坡破坏 (深度为 1~2 m) 和地表侵蚀, 北方地区出现了沙尘暴等恶劣天气, 不仅破坏了生态环境, 也威胁了人民生命财产安全^[1]。

近年来, 植被护坡的理念在国内外引起了高度关注^[2-3], 其核心是大气-植被-土体相互作用系统。该系统由土、植物、碳、真菌、细菌等组成, 涉及到大气学、土壤学、景观生态学、植物学、岩土工程等多学科的交叉应用。与传统的护坡方式相比, 植物护坡具有低投入、低养护的特性, 又能够保护环境, 美化生态景观。研究大气-植被-土体相互作用的机理和植物护坡的关键技术, 符合国家“十三五”期间提出的加强“蓝绿”布局的思想, 有利于实现可持续发展的长远目标。

(1) 植物护坡的非饱和土理论基础

为了研究大气-植被-土体之间的相互作用, 首先要理解非饱和土的相关理论。根据热力学基本理论可知, 非饱和土中总吸力 s_T 可表示为^[4-7]

$$s_T = -\frac{RT}{v_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{u_v}{u_{v1}}\right) = -\frac{RT}{v_{w0}\omega_v} \left[\ln\left(\frac{u_v}{u_{v1}}\right) + \ln\left(\frac{u_{v1}}{u_{v0}}\right) \right], \quad (1)$$

式中, R 为通用气体常数, T 为热力学温度, v_{w0} 为水的比体积 (密度的倒数), ω_v 为水的摩尔质量。毛细管中 (土体孔隙可近似于毛细管) 充满土中水时, 水面是弯曲的, 称为弯液面; 而当同一土中水放在较

大的容器中时, 则水面是平的。 u_v 为土中水弯液面上方的部分蒸汽压; u_{v1} 为同一土中水在较大容器中液面上方的部分蒸汽压; u_{v0} 为同一温度下纯水平面上方的饱和蒸汽压。

式 (1) 表明土体的总吸力是由基质吸力 $s = u_a - u_w$ (等式第二行第一项, u_a 和 u_w 分别为孔隙气压力和水压力) 和渗透吸力 π (等式第二行第二项) 两部分组成, 本研究侧重于基质吸力。在土体和植物体内的基质吸力和渗透吸力的共同作用下, 植物的蒸腾作用将土体水分通过植物的根系和木质部传递到叶片。

目前在国内外岩土工程边坡设计中并没有从工程角度综合考虑植物的作用, 主要是因为对植物护坡的机理缺乏全面深刻的认识。尽管已有一些国内外学者研究了植物根系的力学特性, 并提出了相应的根系加筋模型^[8-9], 然而这样的研究并不全面。植物不仅可以根系的力学特性增强浅层土质边坡的稳定性, 还可以通过蒸腾作用吸收土体水分, 在土体内产生吸力, 从而改变土体的工程性质。一方面, 非饱和土抗剪强度可表示为^[10]

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[(\tan \phi') \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right]. \quad (2)$$

式中 c' 为土体的有效黏聚力; $\sigma_n - \sigma_a$ 为土体净法向应力; $u_a - u_w$ 为土体基质吸力; ϕ' 为土体的有效内摩擦角; θ 为体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率。

根据式 (2) 右边第三项, 蒸腾作用产生的土体吸

力可以增强土体的抗剪强度。另外, 吸力也提高了土体的剪胀特性^[11], 从另一个角度进一步增强土体的抗剪强度。研究表明增强土体抗剪强度能够有效地控制地表水力侵蚀, 增强边坡稳定性^[12-13]。

另一方面, 非饱和土的渗透系数可表示为^[7, 14]

$$k(s) = k_s \frac{\int_{\ln s}^b \frac{\theta(e^y) - e(s)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln s_{ave}}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy}, \quad (3)$$

式中, s 为土体基质吸力 ($u_a - u_w$), $b = \ln(10^6)$, k_s 为饱和渗透系数, y 为关于吸力积分的虚拟变量, θ' 为 θ 的导数。

图1展示了土体渗透系数随吸力的变化, 可见非饱和土的渗透系数随着吸力的增长而降低。这是因为在非饱和土中孔隙水是亲水介质, 空气是疏水介质, 所以水只能通过孔隙水占据的空间流动。当土体吸力增大时, 土体含水率降低, 土体的渗透系数也相应减小。土体渗透系数的减小能够有效降低降雨入渗量, 从而使土体维持较高的吸力水平, 增强了土体的抗剪强度。

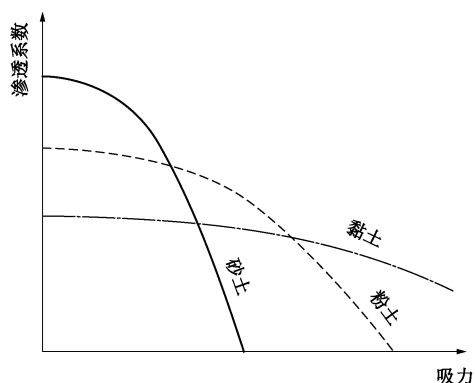


图1 土体渗透系数随吸力变化的示意图

Fig. 1 Relationship between water permeability and suction

由以上分析可知, 植物的水力作用 (即植物的蒸腾作用会增加土体吸力, 从而增加土体抗剪强度并且降低渗透系数) 能够提高浅层边坡稳定性, 减小地表侵蚀, 可见植物是天然的工程师。

(2) 关键科学问题与研究方案

目前国内外缺乏利用植物水力作用 (式(2)、(3)) 护坡的基本理论框架, 有许多关键科学问题有待研究, 如植物种类 (乔木、灌木、草本植物等)、植物根系形状、种植间距、树龄对植物吸水速率及土体吸力的影响; 植物特征 (植物叶片面积指数 (Leaf Area Index, LAI)、根表面积指数 (Root Area Index, RAI)、植物生物量 (plant biomass) 等) 与土体吸力的关系。此外, 植物在生长过程中, 真菌 (例如丛枝真菌)、细菌 (例如根瘤菌) 与植物是互惠共生的关系。一方面他

们从植物体内获得自身生长所需的能量, 另一方面能够帮助植物吸收水分以及营养物质^[15]。而且, 这种共生体系会产生多种分泌物到土体中, 从而改变土体的性质。这种共生体系对植物根系抗拉强度、吸水能力以及土体吸力的影响也尚不清楚。

笔者的研究团队近些年系统地深入研究了大气-植被-土体的相互作用 (图2)。通过理论模型、室内试验、现场大型试验以及离心机试验揭示了不同根系的根系对土体的吸力、持水能力、渗透特性的影响规律。提出了考虑植物根系形状对浅层边坡稳定性影响的新理论计算方法。本研究侧重于植物的水力作用, 同时兼顾了微生物影响下的力学加筋作用。主要研究了百慕大草 (*Cynodon dactylon*, Bermuda grass) 和鸭脚木树 (*Schefflera heptaphylla*, Ivy tree) 两种代表性植物。利用植物的特征参数 (例如 RAI、LAI) 来量化不同根系形状的植物水力作用以及力学加筋作用, 为植物护坡的工程实践提供科学依据。

本文第1节分析了大气-植被-土体相互作用系统的能量平衡、水分平衡以及碳和营养元素的循环; 第2节揭示了大气作用下植物的水分吸收及运输机理; 第3节总结了可量化水力作用的植物特征参数; 第4节阐明了植物对土体吸力分布、持水能力和入渗规律的影响, 同时提出了植被土的持水能力曲线 (Soil Water Retention Curve, SWRC) 理论模型; 第5节研究了在真菌作用下植物根系的抗拉强度 (与植物力学加筋作用相关); 第6节构建了引入植物根系形状影响的地下水渗流与地表径流耦合运移的新模型; 推导了计算植被边坡吸力分布与稳定性安全系数的解析解; 第7节自主研发了用于离心机模型试验的人造根, 揭示了不同根系形状的植物对边坡稳定性的影响规律; 最后一节总结了本研究的重要成果, 并对未来提出了展望。

1 大气-植被-土体间的能量、水分平衡以及碳和营养元素循环

植物对土体的水力作用, 主要表现为水分在大气、植物与土体之间的交换, 而植物的生长状况是决定水分交换效率的重要因素之一^[16]。植物的健康生长, 需要适量的光照、水分、碳和各种营养元素, 来通过光合作用和新陈代谢合成所需的糖类和各种蛋白质。所以, 适量的能量与养分来源, 是植物发挥水力作用的前提和关键。本节介绍了植物利用能量吸收水分、碳和营养元素的生理过程, 以及大气、植物与土体之间能量、水分、碳和营养元素的自然循环, 为后文的理论模型、环境对植物的影响和土体改良等内容建立了基础。

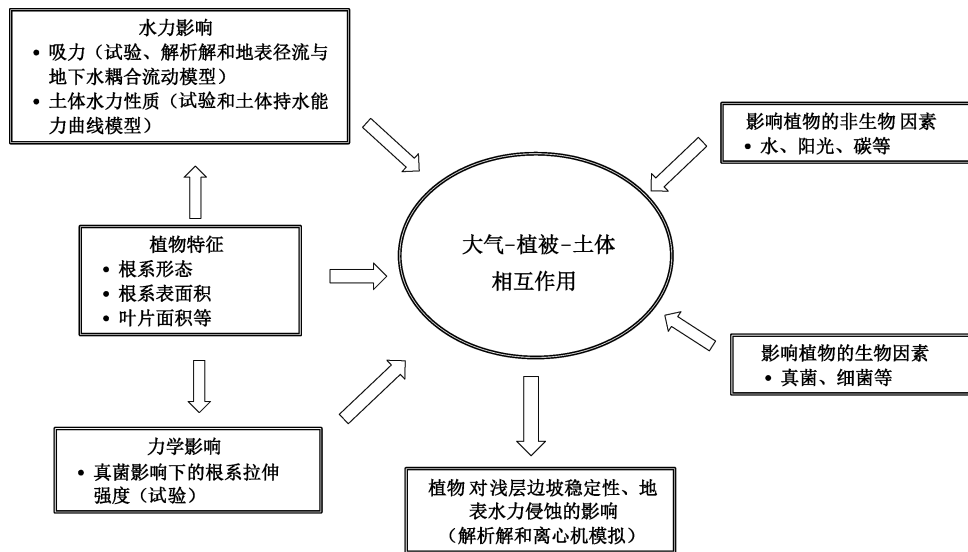


图2 大气-植被-土体相互作用的研究方案

Fig. 2 Research strategy for investigating atmosphere-plant-soil interactions

1.1 大气-植被-土体的能量平衡

植物的光合作用、蒸腾作用和土体中水的蒸发都需要吸收能量。植物的光合作用直接决定了植物的成长状况,土体水分蒸发量与植物蒸腾量不仅对于农业科学具有重要意义(如指导灌溉),对于利用植物加固边坡亦具有重要作用,如计算植物蒸腾,从而预测土体吸力的变化。如果可以计算或者测量土体蒸发和植物蒸腾所消耗的能量,就可以得到相应的土体蒸发或者植物蒸腾的水量。因此有必要研究大气-植被-土体的能量平衡。能量的变化会引起水的状态改变,如水从液态变为气态(水分蒸发),因此能量平衡和水的平衡是相互关联的。大气-植被-土体的水平衡详见1.2节介绍。

图3展示了大气-植被-土体表面的热量组成主要元素。热量传递有热传导、对流传热和辐射传热3种基本方式。以地表上方含植物区域(图中ABCD区域)为研究对象,该区域所得到的能量主要是太阳辐射、大气热辐射和空气的显热通量(地表与大气之间的热传导、由风引起的热对流或者湍流引起的热通量;显热仅引起体系内物体温度的变化,但是没有相变)。由于地表和叶面反射,一部分热量以反射辐射(reflected radiation)的形式反射回大气,另一方面,地面与植物以长波热辐射(long-wave radiation)的形式释放能量到大气中。Blight^[17]提出了大气-土体的能量平衡方程,在其基础上,笔者及团队将其扩展为大气-植被-土体的能量平衡,根据能量守恒定律,得到ABCD区域的热量平衡方程:

$$(R_{\text{solar}} + R_{\text{atmo}} + F_{\text{air}}) - R_{\text{out}} = \Delta S_{\text{air}} + \Delta S_{\text{plant}} + \Delta S_{\text{reac}} \quad (4)$$

式中 R_{solar} 和 R_{atmo} 分别为净流入 ABCD 区域的太阳热辐射和大气热辐射; F_{air} 为净流入 ABCD 区域的空气的显热通量; R_{out} 为流出 ABCD 区域的热量(详见式(5)); ΔS_{air} 和 ΔS_{plant} 分别为 ABCD 区域内空气与植物的热容量变化(由于空气和植物温度变化引起); ΔS_{reac} 为植物新陈代谢反应(光合作用和呼吸作用;详见1.4节产生的能量变化。式(4)的物理意义为净流入 ABCD 区域的热量,一部分引起该区域内空气和植物温度的变化($\Delta S_{\text{air}} + \Delta S_{\text{plant}}$),另一部分通过植物的新陈代谢反应(光合作用吸收太阳辐射而呼吸作用产生热量)而存在于该体系内。

式(4)中流出 ABCD 区域的热量 R_{out} 为

$$R_{\text{out}} = \Gamma_{\text{plant}} + \Gamma_{\text{soil}} + \Gamma_{\text{air}} + F_{\text{soil}} + L_{\text{plant}} + L_{\text{soil}} + R_{\text{lr}} \quad (5)$$

式中 Γ_{soil} , Γ_{plant} 和 Γ_{air} 分别为 ABCD 区域内的地面、植物和大气通过反射热辐射净流出的热量; F_{soil} 为大气和植物的热量通过 AD 边从 ABCD 区域流出到土体的热通量(引起土体温度变化以及提供土体中细菌和真菌的新陈代谢活动,如细菌和真菌的呼吸作用);潜热(latent heat)是指在等温等压下引起物体相变吸收或放出的热量; L_{plant} 为植物蒸腾潜热(引起叶面水分蒸发或者冷凝的热量); L_{soil} 为地面蒸发潜热(引起土体表面水分蒸发或者冷凝的热量); R_{lr} 为 ABCD 内,植物与地面通过长波热辐射流出 ABCD 区域的热量。

式(5)中,地面蒸发潜热 L_{soil} 和热通量 F_{soil} 决定土体通过地面蒸发损失的水分,从而对土体的吸力有直接的影响。植物蒸腾潜热 L_{plant} 对植物蒸腾作用有直接影响,从而影响土体吸力。相比于文献[17],式(4)、(5)引入了植物对能量平衡的影响(如 ΔS_{plant} 、 ΔS_{reac} 和 Γ_{plant})。

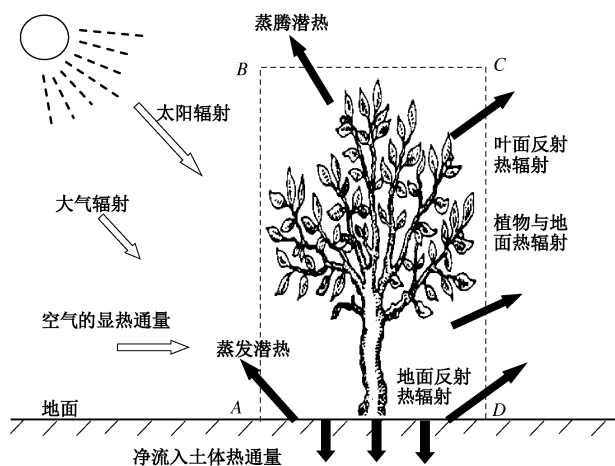


图3 大气-植被-土体能量平衡主要构成元素

Fig. 3 Major components of atmosphere-plant-soil energy balance

1.2 大气-植被-土体的水分平衡

地球上的水循环是一个持续的动态系统。在各种推动力作用下(如太阳辐射和地球引力),水循环的各组成部分不停地运动着,形成全球范围的海陆间循环。海洋和陆地之间的水交换是这个循环的主线。在太阳能的作用下,海洋表面的水蒸发到大气中形成水汽,水汽随大气环流运动,一部分进入陆地上空,在一定条件下形成雨雪等降水;大气降水到达地面后转化为地下水、土体水和地表径流,地下水流动和地表径流最终又回到海洋,由此形成水的动态循环。

在水循环中,大气和土体的相互作用对于岩土工程领域的研究者和工程师而言,是一个非常重要的研究领域。很多岩土工程事故都是由于降雨引起的。由于水的入渗,引起土体状态的改变,如孔隙水压力增加或者土体吸力降低,从而引起土体抗剪强度的降低(式(2);文献[7, 18]),最终酿成工程灾难事故,如滑坡和隧道塌方^[17]。

植物可以有效降低由于地表径流或者风力侵蚀导致的土体流失^[1]。如沙尘暴,是由于干旱和风力的共同作用下,植物无法大范围生长以固定土体而导致的。当土体失去植被覆盖的时候,降雨产生的地表径流常常导致土体流失,从而导致土层变薄,土体荒漠化。在风力侵蚀的进一步作用下,产生沙尘暴,直接破坏生态平衡,降低人民生活质量。

图4展示了影响植被土体中水分平衡的主要构成元素。当降雨量超过土体入渗量,多余的降雨形成地表径流(surface run-off)。入渗的雨水,以地下水流动的方式流动到相邻土体范围,导致土体水分的增加,进而降低吸力。在有植被的土体中,植物通过根系吸水,以满足植物生理活动(如光合作用和呼吸作用)的需要。根系吸收的水通过植物叶面的气孔释放到大

气中,该过程称为植物蒸腾作用(plant transpiration)。研究表明植物蒸腾作用释放的水分占到根系吸收的水分的95%左右^[19]。另外裸露地表部分的水也会通过土体的蒸发(soil evaporation),将液态水转化为水蒸气,释放到大气中。土体的蒸发与植物的蒸腾之和称为蒸散(Evapotranspiration, ET)^[20],该过程的能量主要来源于太阳辐射和大气辐射(图3)。

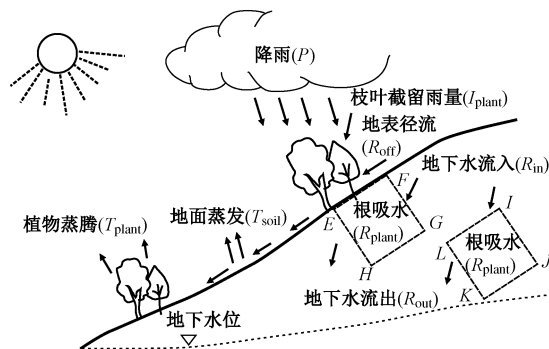


图4 大气-植被-土体水分平衡的主要构成元素

Fig. 4 Major components of atmosphere-plant-soil water balance

基于水的质量守恒定律,同时考虑大气、土和植被的相互作用,得到土体与大气接触区域EFGH(如图4所示,EFGH为土体与大气接触面)的水分平衡方程:

$$(P - I_{\text{plant}} - R_{\text{off}} - \Delta W_{\text{pond}}) + (R_{\text{in}} - R_{\text{out}}) - (T_{\text{soil}} + R_{\text{plant}}) = \Delta S_{\text{soil}} + \Delta S_{\text{plant}} \quad (6)$$

式中 P 为降水量, I_{plant} 为植物枝叶截留的降雨量, R_{off} 为地表径流净流出EF的水量, ΔW_{pond} 为EF边上积水量的变化, R_{in} 为地下水渗流入EFGH区域的水量, R_{out} 为地下水渗流出EFGH区域的水量, T_{soil} 为土体蒸发, R_{plant} 为通过根系吸水流出EFGH的水量, ΔS_{soil} 和 ΔS_{plant} 分别为EFGH区域内土体和植物储留的水量,植物对土体持水能力的影响详见下文。

式(6)的左侧描述净流入EFGH区域土体中的水分,其中 $(P - I_{\text{plant}} - R_{\text{off}} - \Delta W_{\text{pond}})$ 为通过地表(EF边界)净流入EFGH区域的降雨量, $(R_{\text{in}} - R_{\text{out}})$ 为EFGH相邻土体的水分通过地下水渗流净流入EFGH区域的水量, $(T_{\text{soil}} + R_{\text{plant}})$ 为通过土体蒸发 T_{soil} 与通过根系吸水 R_{plant} 流出EFGH区域的水量。式(6)的物理意义为净流入植被土中的水量等于土体和植物储留水量的变化。

此外,对于非地表的区域IJKL(如图4所示,该区域与大气没有直接接触面,且在根系区内),考虑水的质量守恒定律,可以得到IJKL区域的水分平衡方程:

$$R_{\text{in}} - (R_{\text{plant}} + R_{\text{out}}) = \Delta S_{\text{soil}} + \Delta S_{\text{plant}} \quad (7)$$

式中,左侧描述净流入IJKL区域土体中的水分,包括

地下水渗流入 $IJKL$ 与流出土体水量之和(包括通过根系吸水流出 $IJKL$ 的水量 R_{plant} 与地下水渗流出 $IJKL$ 区域的水量 R_{out}), 右侧的两项之和描述土体和植物储留的水量变化。与式(6)不同的是, 式(7)中没有考虑降雨净流量(式(6)中 $(P - I_{\text{plant}} - R_{\text{off}} - \Delta W_{\text{pond}})$), 这是由于 $IJKL$ 区域位于土体内部, 与大气没有接触面, 但是降雨会改变土体吸力分布, 从而影响 $IJKL$ 区域地下水渗流量 (R_{in} 和 R_{out})。如果 $IJKL$ 为非地表区域且在根系区外, 那么其水分平衡中无需考虑植物的影响 (R_{plant} 和 ΔS_{plant}), 其余部分与式(7)一样。

微生物也在一定程度上影响水分平衡。微生物与植物相互作用, 在根际土中产生有机质。这些有机质可以减缓水分的散失, 增加土体的储水能力^[21] (式(6)、(7)中 ΔS_{soil})。

式(6)、(7)从整体上描述了考虑大气与植被作用的土体水分平衡, 为建立后文中的大气、植物和土体间水分交换的理论模型奠定了基础, 其中的各个项(如地表水径流、植物蒸腾作用等)亦和后文介绍的植被的生物量、水分的吸收、光合作用、呼吸作用以及土体中水分的流动(渗透系数)有着紧密的联系。

1.3 碳循环

地球生态系统中碳的循环, 直接影响到植被的生长。例如, 大气中二氧化碳的含量直接影响植被的光合作用(详见1.4节)。而碳在不同环境中(如大气、海洋和陆地等)的转化对植被的影响也至关重要。从全球的角度看, Schimel^[22]对碳的储存进行了总的阐述, 碳主要储存于深海区域、土壤、植被、海洋表层海水、大气和海洋中溶解的有机碳(图5)。碳的储备, 在陆地区域占的比率很大。提高土壤中的含碳量, 就是减少温室气体在大气中含量的尝试之一。陆地系统中, 植物和微生物控制着碳在土壤中的含量(图6)。植物通过光合作用, 利用大气中的二氧化碳, 将其转变为糖类后一部分储存在体内, 而其余部分将被利用。这一部分由碳转化而来的糖类, 有的会通过根部分泌物(root exudates)的形式, 被转移到土壤中被微生物(细菌和真菌等)所利用。微生物会寄生或共生于植物根系而获取植物中的碳。植物和微生物进行生命活动的时候, 将会产生二氧化碳进而释放到大气中而形成碳的循环。

1.4 植物的光合作用和呼吸作用

光合作用是植物、藻类和某些细菌, 利用光能将二氧化碳、水或者硫化氢转化为碳水化合物化合物的过程。这个过程的关键参与者, 是植物内部的叶绿体, 它在阳光(包括蓝光, 波长425~450 nm; 黄光和红光, 波长600~700 nm)的作用下, 把经由叶片气孔进入

叶子内部的二氧化碳和由根部吸收的水转变成葡萄糖, 同时释放出氧气^[23]:

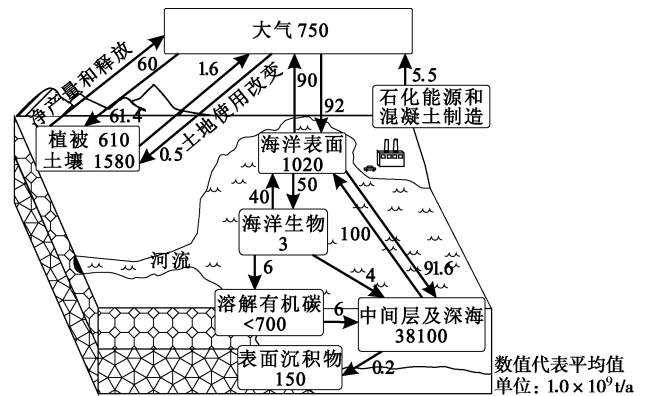
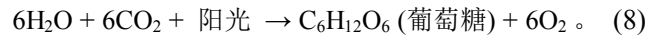


图5 全球范围内的碳循环简图(修改自文献[22])

Fig. 5 Carbon cycling in a global scale (after Ref. [22])

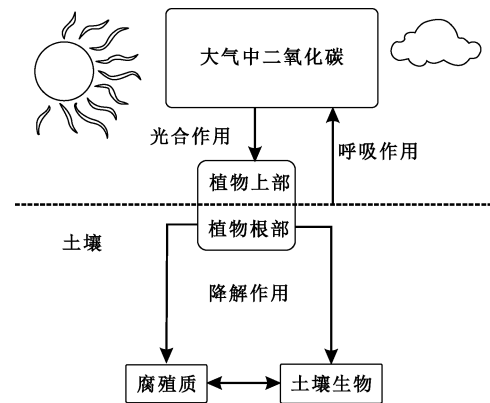
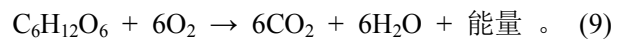


图6 植物和土壤微生物对陆地碳循环起的关键作用(修改自文献[24])

Fig. 6 Key roles of plants and soil microorganisms in regulating carbon cycle (after Ref. [24])

植物的呼吸作用是在氧气的参与下, 植物把光合作用产物(糖类)转变成生命过程(新陈代谢)所需的能量。参与呼吸作用的氧气, 一部分来自光合作用(水分子中的氧元素), 另一部分则来自空气。呼吸作用和光合作用是一个相反的过程^[25]:



式(8)中植物吸收的水分, 一部分用于葡萄糖的合成作为生长所需的能量, 另一部分储存在植物体内(即式(6)、(7)中的 ΔS_{plant}), 而更多的水分会直接通过植物的蒸腾作用从土壤转移到大气中(即图4中的 T_{plant})。式(8)描述的过程将在细胞内进行, 产生的过多水分(式(9)中的 H_2O)将通过蒸腾作用转移到大气中(T_{plant})。

综合式(6)~(9), 由于植物的作用, 生态系统中的水和碳得以循环。散失到大气中的水分经过凝结,

将通过降雨的方式回到植物-土壤体系中(式(6)中的 P)。植物光合作用的同时,还需要进行呼吸作用(式(9))得以把光合作用合成的葡萄糖转化为能量来维持生命活动。呼吸作用产生的二氧化碳和水分会通过叶片的气孔散失到大气中(式(9))。光合作用主要在白天发生,受太阳辐射强度影响,而呼吸作用在全天都能正常进行,这使得在不同强度的太阳辐射下,尤其是白天和黑夜,植物的水分吸收能力有着显著的差异。植物在白天和黑夜对土体产生的不同水力作用将在第4节作进一步阐述。

1.5 营养元素循环

生态系统中主要的营养元素包括氮、磷和硫,以及其它微量元素的循环(如镁、锌和铁等)。营养对植物的生长至关重要,不良的植被生长会降低植被对土体的水力作用,易导致地表侵蚀和边坡失稳等问题。

(1) 氮循环

根据 Galloway 等^[26]和 Lu 等^[27]的描述,氮循环是描述自然界中氮单质和含氮化合物之间相互转换过程的生态系统的物质循环。空气中含有大约 78% 的氮气,占有绝大部分的氮元素。氮是许多生物过程的基本元素;它存在于所有组成蛋白质的氨基酸中,是构成诸如 DNA 等核酸的四种基本元素之一。

如图 7 所示,在植物中,大量的氮元素被用于制造可进行光合作用供植物生长的叶绿素。加工(或者固定)是将气态的游离态氮转变为可被有机体吸收的化合态氮的必经过程。一部分氮元素由闪电所固定,同时绝大部分的氮元素被非共生或共生的固氮细菌所固定。这些细菌拥有可促进氮和氢化合成氨的固氮酶,生成的氨再被这种细菌通过一系列的转化以形成自身组织的一部分。一些固氮细菌,例如根瘤菌,生长在豆科植物(例如豌豆或蚕豆)的根瘤中,和植物建立了一种互利共生的关系,为植物生产氨以换取糖类。因此可通过栽种豆科植物使氮素贫瘠的土地变得肥沃。氮肥料的添加(硝酸根离子或铵离子的形式)也会影响氮循环。

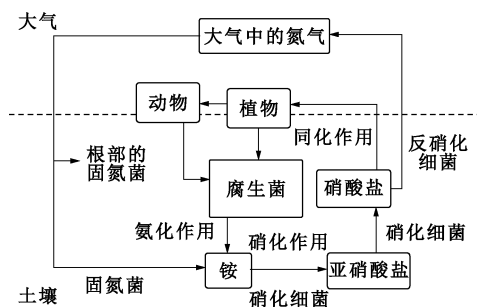


图 7 生态系统中的氮循环

Fig. 7 Nitrogen cycling in ecosystem

当植物根系从土壤中吸收硝酸根离子或铵根离子时,会降低土壤渗透吸力。渗透吸力和基质吸力的总和为总吸力(式(1))。在生态系统中,土壤的渗透吸力是一个变化的过程。当雨水较少时,土壤中盐分浓度变高而渗透吸力增加;当雨水增加时,盐分被稀释从而降低了渗透吸力。第2节和第4节将详细阐述植物如何吸收水分、养分和植物对土体吸力的影响。

氮元素的缺乏,会导致叶片叶绿素的减少,使得叶片发黄。这样势必影响植物的光合作用和呼吸作用,阻碍植物生长,导致生物量减少,生物量(例如花、果实、根等)的多少对防风固沙十分重要。生物量的减少又反过来影响植物的吸水,这样土体的抗剪强度降低而渗透系数增大,对边坡稳定性产生不良影响(正如引言中式(2)、(3)的表述),形成一个恶性循环。

(2) 磷循环和硫循环

图 8 展示了磷在生态系统中的循环。首先,磷会随着土壤的侵蚀、风化、化学反应、人工添加、大气沉降和有机物降解(植物和动物等)等的过程,形成可以溶解的磷酸根形式存在于水或土壤中,增大了土壤渗透吸力。该吸力会提高土壤的抗剪强度,降低土壤的渗透系数,从而提高土体稳定性,更能抵抗水土流失、风力侵蚀和边坡失稳问题。这部分磷也会通过植物吸收和微生物固定的方式,成为生物体的一部分,形成一个循环过程。在植物体内,磷元素是用以合成遗传物质,从而主导蛋白质的合成,对细胞新组织的生长至关重要,也影响植物内部能量的转化。缺乏磷元素的植物将会植株矮小和发育不良^[28]。磷元素的缺乏势必降低植物的光合作用和影响呼吸作用。

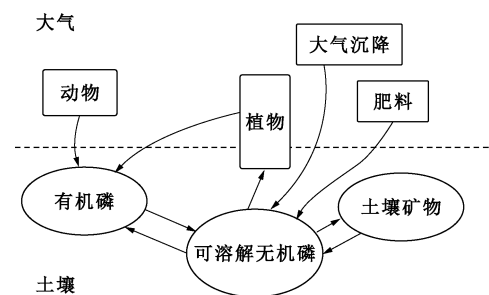


图 8 生态系统中的磷循环

Fig. 8 Phosphorus cycling in ecosystem

与之类似,硫也有一个在生态系统中的循环(图9)。根据 Kellogg 等^[29]的描述,在生态系统中,硫的存在形式主要包括土壤里的硫酸盐、硫元素和有机硫,以及空气中的二氧化硫或含硫悬浮物。这几种形式的硫,在生物和化学的作用下相互转化。存在于空气中的硫会通过沉降进入土壤(如火山灰),形成硫酸盐。硫酸盐进而被植物吸收,或者在细菌的作用下转化成

硫单质。一部分硫酸盐将会在水的冲刷下被带入河流和大海。植物吸收土壤中的硫酸盐, 转化为有机硫化物, 同时在其它动物体内转化并排泄到土壤中形成另外一部分有机硫化物。被细菌分解的有机硫化物变成硫酸盐又重新回到土壤中^[29-30]。硫元素在植物体内是多种蛋白质、荷尔蒙和维生素的组成要素之一。硫元素的缺乏会导致叶片的枯黄, 必要的生命物质无法合成, 从而影响植物的生长。

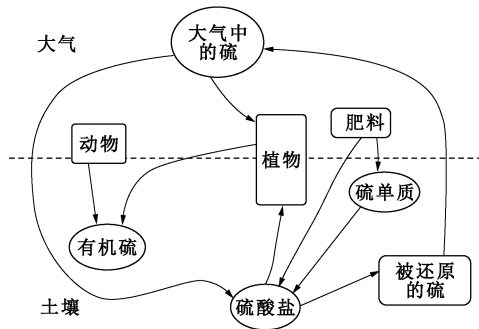


图9 生态系统中的硫循环

Fig. 9 Sulfur cycling in ecosystem

以上所介绍的水、能量和营养元素的循环, 是生态系统平衡的主要机理。它们对于生态系统中的动物、植物和微生物的平衡是十分重要的。反之, 动物、植物和微生物也影响着能量、水和营养的循环。对于植物而言, 能量、水和营养是植物能够生长繁衍的基本要素。要利用植物为工程服务, 首先就要了解植物在整个地球生态系统中所扮演的角色和其相关机理。

2 维管植物的水分吸收及运输机理

植物包括乔木、灌木、草本、蕨类及绿藻等, 目前已鉴定的植物超过 35 万种^[31]。根据植物在体内运输水分组织的不同, 它们可被分为维管植物 (vascular plants) 和非维管植物 (non-vascular plants)。维管植物包括乔木、灌木、草本和蕨类植物等; 是指通过维管束组织 (木质部 xylem 和韧皮部 phloem) 由根部运输水分和养分到植物其它部分 (如茎部和叶片)。非维管植物包括绿藻等, 缺乏有关运输组织。在工程领域的研究与实践中, 一般会用到乔木、灌木和草本这类维管植物 (以下简称为植物), 因此下文将集中介绍它们的水分吸收及运输机理。

水分是植物生长中主要的非生物性限制因素, 而绝大部分的水分是通过根部的根毛从土壤中吸收。根毛是指根尖表皮上的毛状物, 是根部系统中具有最高渗透性的部分, 并且被认为是植物吸收水分的主要部分, 特别是草本植物。植物需要不断吸收水分, 是因为植物的蒸腾作用, 使水分不断流失, 植物需要通过根系不断吸收水分来避免脱水^[19]。而植物的蒸腾速率

是由大气环境 (例如太阳辐射、大气湿度和风速等) 和叶片表面的气孔开合进行控制的。在进行光合作用时 (式 (8)), 植物必须打开气孔以得到二氧化碳进行光合作用, 因此增大了蒸腾速率, 加快根系的吸水速率。增加的根系吸水主要用于蒸腾作用的消耗, 当植物获得一个二氧化碳分子的同时平均会损失 400 个水分子, 这代表由根部吸收的水分 95% 都会失去^[19]。植物不仅仅在白天进行蒸腾作用, 由于呼吸作用, 植物会在夜间打开叶片气孔, 因此夜间也会产生蒸腾作用, 进而使植物仍可从土体吸收水分。但是夜间的蒸腾率通常是白天的 5%~15%, 这是因为夜晚的光辐射较少^[32-33]。

2.1 植物水分吸收机理

植物根部是个复杂的网络系统, 由多根长短粗细不一的根组成。根首先由末梢生长, 并长出非木质细根 (non-woody fine root) 负责水分运输和养分运输^[34]。植物的吸水能力和根部的吸水面积有关, 一些植物能通过真菌建立共生体系, 以增加根系统的吸水面积, 该内容会在第 4 节介绍。

当根部吸收水分时, 水分首先会穿过表皮 (epidermis), 然后穿越皮质 (cortex) 和内皮层 (endodermis) 移向根部的中心, 最后到达木质部导管 (xylem)。根据已有的研究^[35-36], 水分运输到木质部有三种途径 (图 10 中 a、b 和 c)。a 为细胞质外通道 (在细胞壁的连接组织内), 是指在细胞外, 不经过细胞本身的通道; b 为同质通道 (通过细胞质连续性和胞间连丝), 指的是细胞壁或细胞膜 (细胞的一部分) 中的通道, 但不经过细胞质; 而 c 则是细胞间通道 (由位于细胞膜的水通道蛋白介导), 是指跨越细胞壁、细胞膜再通过细胞质的通道。

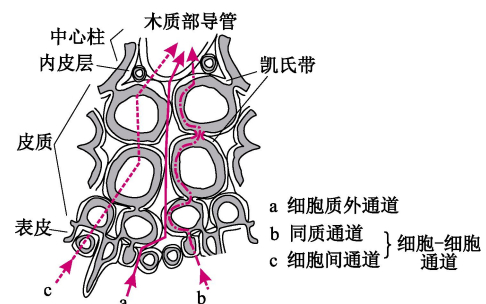


图10 水和溶质在根中运输途径剖面图 (修改自文献[35])

Fig. 10 Cross section of transportation pathways of water and solutes inside roots (after Ref. [35])

流体的长距离运输主要通过木质部, 木质部压力驱动水流动是通过质体和共质体的路径被运输。另一方面, 通过不断地改变植物根系组织渗透速率 (例如调节细胞溶质的盐浓度), 保持植物的水分平衡^[36-37],

该过程涉及跨细胞路径，由水通道蛋白介导运输^[36]。

2.2 植物水分运输机理

根部吸收的水分到达木质部后，会继续由根部向植物其它部分运输，当水分到达茎部后，水分会被运输到叶片的主厚叶脉（vein），随着叶脉的分枝分散到叶肉细胞（mesophyll cell；进行光合作用的地方）内（图 11）^[38]。

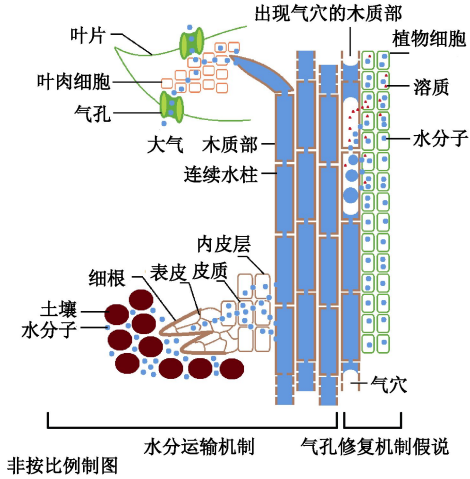


图 11 水分运输机理和气穴修复机理微观示意图

Fig. 11 Schematic diagram of transporting water and cavitation repairing mechanism (microscopic)

当根部吸收的水到达植物叶片后，95%根系吸收的水分通过蒸腾作用散失到大气中^[39]。水从植物根部运输到叶片（图 12 (a)），可以简化成一维模型来描述，如图 12 (b)^[40]。由于主要运输水分的木质部是多孔介质，水从植物根系底部运输到叶片的过程可由达西定律描述：

$$v = -ki \quad (10)$$

式中， v 为水的流动速度， k 为植物的渗透系数， i 为树根与树叶间的水力梯度，

$$i = \frac{(\psi_1 + L_2) - (\psi_r - L_1)}{L_1 + L_2} \quad (11)$$

式中， L_1 和 L_2 为根系和树干的长度（如图 12 (b)）， ψ_1 和 ψ_r 为树叶和树根总吸力对应的水头（包括渗透吸力和基质吸力对应的水头，详见式 (1)）。式 (11) 中，植物中水分运移的高度（ $L_1 + L_2$ ）主要由木质部导管细胞壁间的毛细力决定^[39]，而毛细管上升高度主要受植物中输水毛细管半径影响^[6]，

$$h_c = \frac{2T_s \cos \omega}{\rho_w g R_s} \quad (12)$$

式中， h_c 为毛细高度， T_s 为水的表面张力， R_s 为植物中输水毛细管的半径， ρ_w 为水的密度， g 为重力加速度， ω 为接触角，描述物质的亲水特性，植物细胞壁的接触角通常可假设为 0° ^[39]。在 20°C 时，水在毛细

管中上升的高度为

$$h_c = \frac{1.49 \times 10^{-5} (\text{m}^2)}{R_s} \quad (13)$$

式中， h_c 和 R_s 的单位为 m ，分子的常数单位为 m^2 。

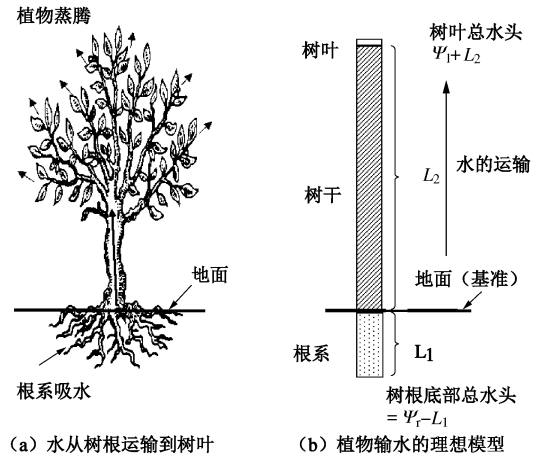


图 12 水从树根运输到树叶的示意图和植物输水的理想模型示意图（修改自文献[40]）

Fig. 12 Schematic diagrams of idealized water transportation model (after Ref. [40])

木质部导管的半径范围为 $8 \sim 500 \mu\text{m}$ 之间。相应的，水上升的高度范围是 $0.03 \sim 1.86 \text{ m}$ （根据式 (13) 计算）。这样的毛细高度仅可以用来描述矮植物。对于较高的植物，比如树高是 30 m ，根据式 (13) 计算得出木质部导管平均半径仅为 $0.5 \mu\text{m}$ ，该数值比观测到的木质部导管半径小，这样木质部导管大小则无法让水分上升到 30 m 的高度。但是，木质部导管的细胞壁有许多微小孔隙，这些孔隙形成了许多更为细小的毛细管，可以让水分上升得更高。这些细胞壁间隙大约为 5 nm ^[39]，根据式 (13)，理论上能让水上升到 3 km 。

在植物木质部导管内具有相当大的负压时，水会产生气穴现象（cavitation）从而阻碍水分的传导。对此，植物发展出一套气穴修复的机理。

2.3 木质部气穴的修复

植物内部水上升高度增高，木质部吸力增大时，产生气穴的可能性就会增加。气穴会降低植物的渗透系数 k 及树根与树叶间的水力梯度 i （式 (10)），从而阻碍水的传导^[41]。试验结果表明，植物的渗透系数的降低取决于气穴发展程度，植物中气穴可以降低植物的渗透系数一个数量级^[39]。

植物有较高的几率产生气穴，对此植物发展了一套机理来进行修复^[42]。植物一方面通过关闭气孔来减少蒸腾；另一方面，植物长出新的木质部去替代已经产生气穴的木质部，或者利用其修复系统去减少木质部的的气穴^[43]。

当木质部导管内有气泡时, 会引发周围细胞分泌溶质进入导管。由于木质部导管内渗透梯度增加, 使水从周围的纤维和薄壁细胞转移到有气泡的导管内。当木质部导管完全被水充填时, 木质部内部液压压缩其中的气泡直到被溶解到溶质中, 或者进入到管壁周围的输水微通道(图11)。

渗透作用(osmosis)对修复木质部气穴也起到非常重要的作用。渗透作用是指在渗透膜两边的溶液具有不同的溶质浓度时, 水分会由浓度较低的区域流向浓度较高的区域。渗透作用在植物生命活动中起到至关重要的作用^[44]。比如光合作用中, 叶片的气孔的开合就是由渗透作用控制保卫细胞(guard cell)的膨胀和缩小达到开合气孔的目的^[45]。根部吸收水分的过程中, 水分可以通过叶片水分蒸腾产生的负压进入根系到达木质部和其它部位。根细胞本身还可以根据细胞外的溶液浓度, 调节细胞内溶质的浓度, 便可产生渗透吸力使得水分由土壤进入细胞之内^[44]。

3 植物特征的基本参数

除了大气作用, 植物的水分吸收与运输能力也取决于植物个体的特征。从工程应用角度而言对可靠易测量的植物特征参数的研究较为缺乏, 这些参数可以用来量化描述植物特征与土体吸力、土体抗剪强度和渗透系数之间的关系。缺乏这些参数主要是因为复杂的大气-植被-土体之间的相互作用关系, 例如, 植物蒸腾作用引起的土体内部吸力分布不仅与气候条件(例如温度、湿度和光照强度)有关, 同时与植物的特征参数相关。植物根系的生长受到诸多因素的影响, 例如重力、温度、土体含水率、营养物质、土体密度、微生物和植物品种等。无论植物对土体的水力作用还是力学加筋作用, 不同的根系形状对地表侵蚀以及浅层边坡稳定都有着重要影响。

要评估不同植物个体对土体吸力的影响, 笔者将植物叶片与根系特征科学地参数化, 并用于分析植物蒸腾作用引起的土体吸力分布, 理解植物不同根系形状对土体吸力分布的影响规律^[46-47]。本节主要介绍在分析植物蒸腾作用及土体吸力分布研究中所使用的具体参数、理论依据及其测量方法, 为植物影响下的土体吸力分布分析提供研究基础。常用的植物特征参数包括叶片面积指数(LAI)、根表面积指数(RAI)、植物生物量(plant biomass)、根系体积比(Root Volume Ratio, R_v)以及根系横截面积比(Root Area Ratio, RAR)。

3.1 叶片面积指数(LAI)

叶片作为植物主要的光合作用器官(吸收 CO_2 ,

释放出 O_2)与蒸腾作用发生部位, 其面积直接影响植物个体的蒸腾速率和光合作用效率^[48]。叶片面积指数(LAI)定义为单位土地面积下叶片的总单面投影面积(图13), 可以科学地描述场地的叶片面积密度, 是一个无量纲参数。很明显, 当植物的叶片面积指数较大时, 叶片获得的光照能量也越大, 叶片表面的气孔越多, 植物的蒸腾也相对较高。同时到达地表的光照能量就会因叶片所阻相应降低, 地表蒸发作用降低。根据植物叶片获得的光照能量与叶片面积指数之间的关系, 可以有效地分析不同植物因叶片特征的不同而产生的蒸腾速率的差异, 进而分析其引起的土体水分或者吸力的变化^[47, 49-52]。

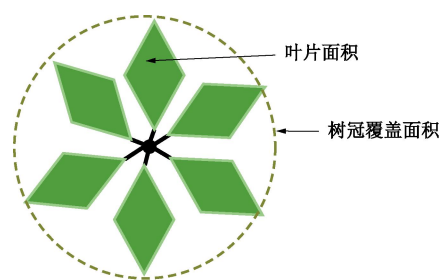


图13 植物叶片面积指数的测量

Fig. 13 Measurement of Leaf Area Index (LAI)

叶片面积指数可利用图像分析法测量^[53], 可通过高分辨率相机拍摄为照片, 利用计算机分析叶片在照片上的投影面积, 然后统计植物叶片的总面积, 除以树冠覆盖的地表面积, 即可得到该植物的叶片面积系数。

3.2 根表面积指数(RAI)

根系作为植物从土体吸收水分的器官, 其在不同位置的分布情况对土体吸力在不同位置与深度的高低有显著作用。根表面积指数定义为在特定深度纵向截面上根系表面积与水平方向上根伸展区域的面积的比值。RAI是一个无量纲参数, 被用来分析植物根系生长以及营养物质和水分的吸收^[52, 54]。需要注意的是, 这里考虑的根系的直径都是小于2 mm, 因为该直径范围内的根系是吸水的主要器官^[55]。当根系直径大于2 mm时, 根系内部液态水在高负压下容易汽化产生气穴, 减少了可供液态水流动的通道, 渗透性变差; 而直径小于2 mm的根毛则不仅与土体接触面积更大, 其表皮与输水导管的渗透性均更高^[56]。

测量根系表面积指数RAI时, 先将植物的根系整体挖出。根系周边的泥土用特定设计的冲洗仪器冲洗^[57]。该种冲洗方法产生的水流冲击力较小, 可以在冲洗的过程中尽可能减少对植物根系的破坏。根表面积指数同样可以通过图像分析法测量^[58], 如图14所示。在测量的过程中, 运用高分辨率相机360°方向

拍摄植物的根系，不同方向拍摄的图像通过叠加可以生成三维空间中一张完整的根系照片。然后将所生成的图像格栅化，每个格栅的大小等同于像素的大小。将特定深度内（10 mm）所有含有根系的格栅累加起来，并根据一个转换系数（通常每毫米相当于 12 个像素），可以得到植物根系的面积。植物根系在水平方向上的横截面积确定方法如下：通过测量植物根系在水平方向上的最大延伸长度（图 14），该最大延伸长度即作为横截圆面积的直径，最后根据求圆面积公式计算得到植物根系水平面积。将特定深度（10 mm）内植物根系的外表面积除以根系在水平方向上的拓展面积即可得到在该深度范围内的平均根系表面积指数 RAI。

$$RAI = \frac{\sum_{i=1}^n \pi d_i \Delta h}{\frac{\pi D_r^2}{4}} \quad (14)$$

式中， Δh 为计算的深度范围，通常取 10 mm， D_r 为根系在水平方向最大延伸直径， d_i 为第 i 个根系的直径，其中根系的总数目为 n 。在该图像处理过程中所产生的误差为 5% 左右^[53, 59]。这些误差主要是由于在确定根系水平方向延展面积上假设了圆形的区域。试验表明，植物的根表面积指数 RAI 会同时影响土体吸力分布^[54]与持水能力曲线^[60]。

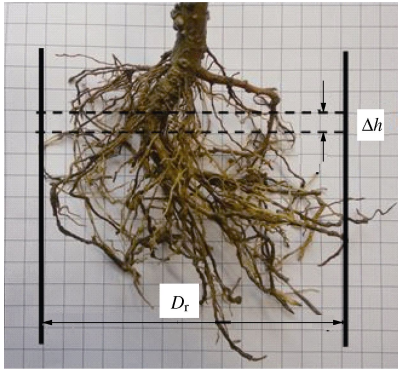


图 14 植物根表面积指数的定义与测量

Fig. 14 Definition and measurement of Root Area Index (RAI)

3.3 根系体积比 (R_v)

根系体积比（无量纲）是量化根系体积的参数，定义为单位体积土体内植物根系的体积：

$$R_v = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4} \Delta h}{\frac{\pi D_r^2}{4} \Delta h} \quad (15)$$

测量根系体积比的方法主要有两种。第一种是浸水法，将植物根系浸入灌满水的容器中，容器中排出水的体积即为根系的体积。该方法假设植物根系在

浸水过程中吸收的水分可以忽略。另外一种是通过图像分析计算法^[58]。通过图像分析法可以测得根系的长度和直径，进而可以间接算得植物根系的体积比。根系体积比可用于分析植物根系对土体水力特性的影响^[60]。

3.4 根系横截面积比 (RAR)

根系横截面积比定义为在某一深度水平横截面上所有植物根系的总横截面积 A_r (m^2) 和占该深度上土体总横截面积 A (m^2) 的比例^[61]。

$$RAR = \frac{A_r}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4}}{\frac{\pi D_r^2}{4}} \quad (16)$$

根系横截面积比 RAR（无量纲）主要用来量化根系对土体抗剪强度的影响。当边坡失稳，土体受到剪应力作用时，根系提供了部分抗剪强度，而这与根系的横截面积比直接相关。

测量根系面积比 RAR 时，先将植物的根系挖出。具体将根系从土体中挖出的方法与测量根表面积系数 RAI 时一样。在测量根系横截面积比时，在深度方向每隔 50 mm 测量一次。在每一个深度截面上，用游标卡尺对植物根系的直径进行测量。然后将植物根系按直径 0.5 mm 进行归类，并对每一直径范围内的根系数量进行统计。在计算 RAR 时，假设每根植物根系都是圆柱体状。需要注意的是直径小于 0.5 mm 的根系可以忽略掉，因为它们不容易被测量，同时所占的比重较小。在测量的过程中，如果有根系断裂或者丢失，会低估测量的结果。如果用这样的测量结果来计算根系土的抗剪强度，会使得计算得到的结果偏保守。

3.5 植物生物量 (plant biomass)

植物生物量是指在某个面积或者体积的生物体，由微生物、植物或动物所产生有机物的总质量^[62]。对于控制地表侵蚀、增强边坡稳定性而言，植物的生物量大小直接影响土壤的持水特性和植物根部的力学加筋作用。例如，生物量较大的植物，叶片面积较大，光合作用时吸收 CO_2 的能力也越强，蒸腾量会增加^[63]，而根部所需要吸收的水分也相应增加，这将导致土壤中的含水率比生物量较小的植物所在土壤的含水率较低，提高了土壤中吸力，从而提高土壤的抗剪强度（稳定性）。与此同时，植物根部也提供力学加筋作用，越大的生物量，将提供越高的根系横截面积比（RAR），较高的根面横截积比能够提高根部-土壤体系的抗剪强度，从而从另一个方面控制地表水力侵蚀、提高浅层边坡的稳定性^[8, 64]。

对生物量的测量，根据不同的试验目的，有不同的方法。生物量可以分为地上部分和地下部份。地上

部分主要包括茎和叶子,而地下部分则为根部。生物量的测量,是测量植物的所有部份的干重。根据试验目的的不同,可以分开测量植物各个部分的干重,比如分别测量叶片,茎部和根部的干重。测量前的干燥,一般是把收集到的植物放入 60℃ 的烘箱内 72 h 以达到恒定重量后进行测量^[65]。

4 植物对土体水力特性的影响机理

为了充分利用植被来控制地表侵蚀、提高边坡稳定性,大气-植被-土体的相互作用机理有待研究。例如,植被怎样产生额外的土体吸力,在湿润季节如何维持土体吸力。同时植物根系如何改变土体的持水能力,进而影响土体的吸力、抗剪强度和渗透系数都有待研究(式(1)~(3))。本节主要通过室内试验和现场试验研究植物对土体水力特性的影响。在研究植物的水力作用时,考虑了不同植被类型、不同根系形状对土体吸力、持水能力曲线以及渗透系数的影响,并用植物的特征(例如 LAI、RAI 等)来定量分析植被土中的吸力变化。针对实际应用,研究了不同土体压实度、种植密度以及混合种植对土体吸力以及渗透系数的影响。同时也提出考虑根系影响的土体持水能力曲线理论模型。植物的这些特性对于控制地表水力侵蚀和提高浅层边坡稳定有着重要的意义。

室内试验在香港科技大学大气环境控制室(atmospheric-controlled room)进行,该环境控制室能有效地控制温度、湿度以及植物生长所需的光照强度(图 15)。试验中温度范围为 21℃~25℃,湿度范围为 50%~60%,人工太阳光辐射能约为 5 MJ/m²/d。现场试验在香港科技大学生态公园(HKUST Eco-Park)进行。香港科技大学生态公园主要由两块试验场地组成。其中一块是面积为 10 m×6 m 的平地,另一块是 2 m 高的边坡,边坡由 22° 和 33° 两种不同坡度组成(图 16)。

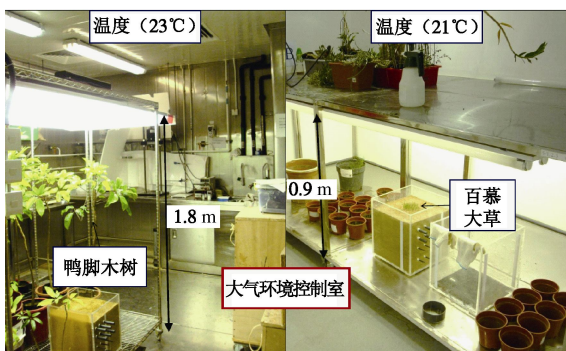


图 15 香港科技大学的两间大气环境控制室

Fig. 15 Atmospheric-controlled rooms in HKUST

试验中主要研究了百慕大草和鸭脚木树两种植

物。选择这两种植物主要是由于这两种植物在大部分亚洲地区较为普遍,同时也由于这两种植物有很强的抗旱特性^[66]。因此这两种植物比较适合亚热带地区的植物护坡与修复。试验用土为全风化花岗岩残积土(Completely Decomposed Granite, CDG),在中国华南地区、香港、东南亚部分地区较为常见,属于粉砂^[67],该土在边坡工程中很常见。

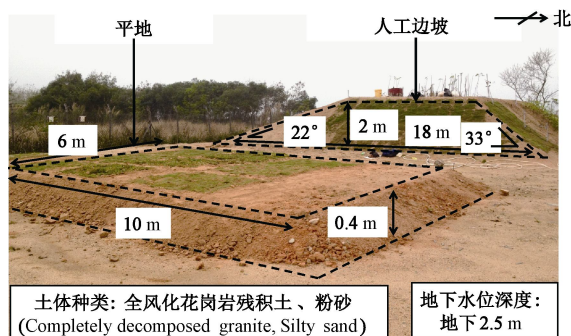


图 16 香港科技大学生态公园全景

Fig. 16 Overview of HKUST Eco-Park

4.1 大气作用对植被土吸力的影响

(1) 植物蒸腾与土体蒸发对土体吸力影响比较

土体的吸力不仅受植物蒸腾影响,同时也与土体表层蒸发有关。目前关于植物蒸腾与土体蒸发对土体吸力影响的比重尚不清楚。为了比较植物蒸腾与土体蒸发对土体吸力的影响,进行了 12 组室内试验,其中 10 组是具有不同叶片面积指数(LAI)和根系面积指数(RAI)的鸭脚木树,另外两组是裸露土^[54]。所有试验都在大气条件一致的环境控制室中进行,每天的光照时间是 24 h。试验中考虑了两种植被情况:裸露土、树植被土。其中裸露土分为没有蒸发作用、考虑蒸发作用两种情况;植被土分为只有植物蒸腾作用、同时考虑植物蒸腾与土体蒸发作用两种情况。试验时间为一周,在干燥过程中利用张力计监测土体深度 30, 70, 140 和 210 mm 处的吸力变化。

图 17 表明,对于裸露土,当没有蒸发作用时,经过一星期后土体的吸力变化幅度较小。最大变化发生在深度为 30 mm,土体的吸力从 0 增长到 3 kPa。这主要是在重力作用下土体内部水分进行了重新分布,导致了局部范围内吸力的小幅度的重新分布。当裸露土考虑蒸发作用时,最大吸力达到了 17 kPa。对于树植被土,当仅考虑植物蒸腾作用而忽略地表土体蒸发作用时,根系范围内的最大吸力达到 21 kPa,比裸露土在蒸发作用下相同深度处的吸力大 13 kPa。这表明植物的蒸腾作用可以很明显地提高土体的吸力水平。当树植被土同时考虑植物蒸腾作用与土体蒸发作用时,在根深范围内引起的土体吸力(27~31 kPa)比仅有植被蒸腾作用引起的土体吸力(20~21 kPa)高

35%~47%。这其中增加的比例与植被的叶片面积指数 (LAI) 密切相关^[54]。当植被的叶片面积指数较高时, 发生蒸腾作用的叶片气孔总数也较多, 导致植物的吸水能力显著增强^[68]。与此同时土体蒸发作用明显降低, 这主要是由于达到地面的太阳光辐射能量被叶片所阻而大幅度下降^[52]。

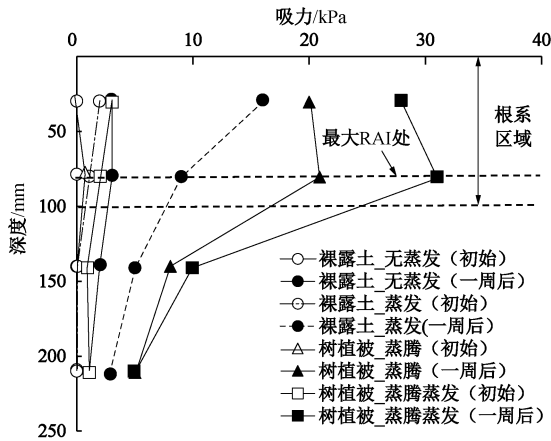


图 17 干燥过程中植被土与裸露土之间吸力随深度分布比较^[54]
Fig. 17 Distributions of suction with depth in bare and vegetated soils during drying^[54]

在植被蒸腾过程中, 受根系表面积指数影响的吸水能力分布是引起土体吸力分布变化的关键因素^[54]。图中可以看出植被土的最大吸力位于最大 RAI 深度处。该深度处考虑蒸腾蒸发影响的植被土的最大吸力比仅有蒸发的裸露土大 23 kPa, 根据式 (2) 可知这样的额外吸力可以使得土体的抗剪强度增加 6.2 kPa。很显然这对控制地表土体侵蚀以及浅层稳定有着重要的意义。需要注意的是对于树植被土同时考虑土体蒸发以及植物蒸腾作用得到的吸力并不能直接由叠加土体蒸发产生的吸力与植物蒸腾产生的吸力得到。因为植物蒸腾作用以及土体蒸发作用均受到土体吸力大小的影响, 即两者之间存在耦合作用。

(2) 模拟白天和黑夜状况下植物对土体吸力的影响

白天和黑夜影响着植物的光合作用和呼吸作用, 然而对于怎样影响土体的吸力变化尚不清楚。本研究的目的是比较白天 (有光照) 和黑夜 (没有光照) 条件下浸水对植被土体吸力的影响^[69]。该试验在香港科技大学环境控制室进行 (图 15), 试验所用植物为鸭脚木树。为了模拟黑夜的情况, 将环境控制室的灯光关闭 12 h。另一系列试验在灯光打开条件下进行 (试验系列 2), 考虑植物蒸腾的影响。所有试验箱在浸水试验前建立相似的初始吸力分布 (见图 18)。试验总共分为两个阶段进行, 对于试验系列 1, 首先将环境控制室内的灯光关掉 (持续时间 12 h), 在所有试验箱

表面控制 6 mm 常水头浸水, 这相当于香港地区百年一遇的降雨强度^[70]。去除表面水后, 将所有试验箱静置 12 h, 观察黑暗条件下在 30, 80, 140 和 210 mm 深度上吸力变化。对于系列试验 2, 不同的是在整个试验过程中灯光都是处于打开状态, 其它试验步骤与第一个系列试验相同。

图 18 可以看出, 在试验开始前, 白天和黑夜条件下的浸水前初始吸力分布较为接近。由于常水头浸水入渗, 土体的吸力都表现出降低的趋势, 其中在根部范围内的降低幅度最大。浸水过程中树植被土在白天光照条件下, 植物在根部范围内维持的吸力比在黑暗条件下高 5~10 kPa。这表明在白天光照条件下, 植物的蒸腾作用有效地提高了土体吸力。相比白天光照条件, 在黑夜条件下, 植物的光合作用以及植物蒸腾作用较弱^[71-72], 所以土体根部范围内维持的吸力相对较低。然而在浸水试验中, 白天和黑夜条件对根部范围以下土体的吸力变化基本没有影响。这表明在浸水过程中考虑植物的蒸腾作用对于植被土的吸力影响主要局限于根深范围内, 对根深范围以下的影响可以忽略。

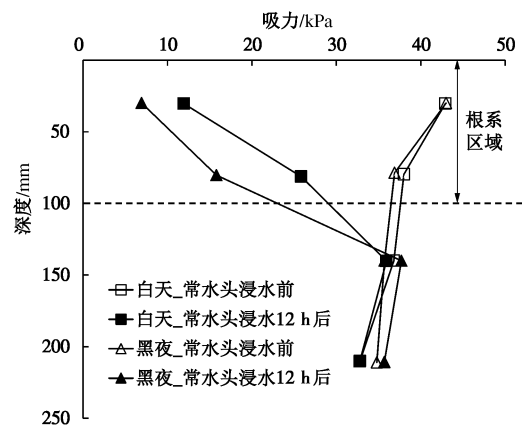


图 18 白天和黑夜条件下植被土体吸力的变化^[69]

Fig. 18 Distributions of suction with depth in vegetated soil under day and night conditions^[69]

4.2 植物种类和特征对土体吸力的影响

(1) 草植被对土体吸力的影响

由式 (2) 可知, 土体吸力对抗剪强度有着重要影响, 然而草植被对土体的吸力影响规律尚不清楚。本试验在香港科技大学环境控制室进行 (图 15), 试验总共分为 4 组。其中 3 组是百慕大草植被土, 另一组裸露土作为参照组^[73]。试验过程中利用张力计监测土体吸力变化。图 19 实心数据点显示的降雨前吸力分布 (即蒸腾 20 d 后的土体吸力分布)。通过 20 d 的植物蒸腾试验后发现, 草植被土中的最大吸力可以达到裸露土的 1.3 倍, 这也使得土体的抗剪强度增加了 30% 左右 (根据式 (2))。同时草植被土的吸力影响范围可

以达到草根深度的 3 倍以上。Pollen-Bankhead 等^[74]通过现场试验发现草植被土的吸力可以达到边坡土的 2 倍。这表明当考虑草植被的蒸腾作用进行护坡固沙时,草植被不仅在根系深度范围内,而且在根深范围下都能有效的增大吸力,增强土体的抗剪强度,减小渗透系数。根据式(3)计算可知,草植被蒸腾产生的额外吸力可以将土体渗透系数减小一个数量级。

在 20 d 的干燥试验后,紧接着在地表进行高度为 6 mm 的常水头浸水试验,相当于香港地区百年一遇的降雨^[70]。结果发现草植被土在根部范围内维持的吸力与裸露土相似。在深度为 30 mm 处,即使浸水前草植被土的吸力比裸露土大 80 kPa,浸水后两者的吸力都降到 60 kPa。然而在草根范围以下,草植被土维持着较高的吸力。在深度为 80 mm 处,降雨后草植被土维持的吸力比裸露土高 40 kPa 左右。根据式(2)计算可知,40 kPa 的吸力增量对应于土体的抗剪强度增量为 10 kPa。当浸水前的吸力越高时,经历相当于百年一遇的降雨后,相比于裸露土,草植被土根部以下维持的吸力也越高。草植被维持的较高吸力对于降雨过程中增强土体抵抗水力侵蚀以及提高边坡的稳定性有着重要的意义。

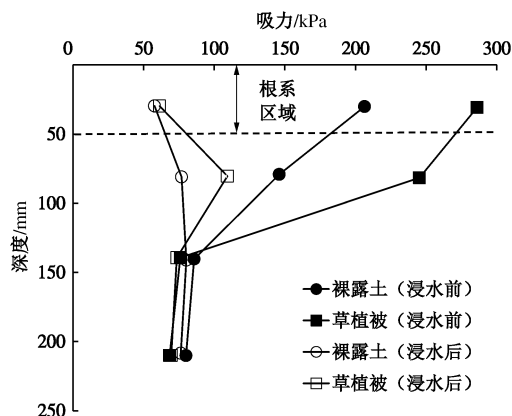


图 19 降雨前后土体吸力随深度分布的比较^[73]

Fig. 19 Distributions of suction with depth before and after rainfall^[73]

(2) 树草混合种植对土体吸力的影响

树草混合种植增强了生态物种多元化,然而其对土体吸力、渗透系数以及地表土体侵蚀的影响并不清楚。本现场试验是在香港科技大学的生态园进行,试验是由 4 块水平区域组成,每块区域大小为 1.5 m×1.5 m。其中 3 块区域都是树草混合种植,另一块是裸露土,作为对照试验^[75]。试验开始前将不同植被土饱和,然后经历自然干燥和降雨。试验过程中对 100, 250, 450 mm 深度处的吸力进行了监测。

图 20 显示了降雨后植被土深度 100 mm 处维持的吸力与植被土饱和渗透系数之间的关系。选择深度为

100 mm 主要是因为该深度位于植物根系深度范围内,以便分析植物根系引起的土体渗透系数的变化对土体维持吸力的影响。从图中可以看出,在半对数坐标中,不管是树草混合植被还是树植被,随着植被土渗透系数的增大,降雨后土体维持的吸力都表现出线性减小的趋势。降雨后当土体渗透系数相同时,树植被维持的吸力大于树草混合植被。例如当土体渗透系数为 1.0×10^{-6} m/s 时,树植被维持的吸力为 40 kPa,而树草混合植被维持的吸力只有 20 kPa。这表明相比于树植被,树草混合植被维持吸力的能力相对较低。虽然在实际护坡固沙工程中,可以优先考虑树植被,但是需要注意的是在大自然中一般都是以树草混合种植的形式存在。

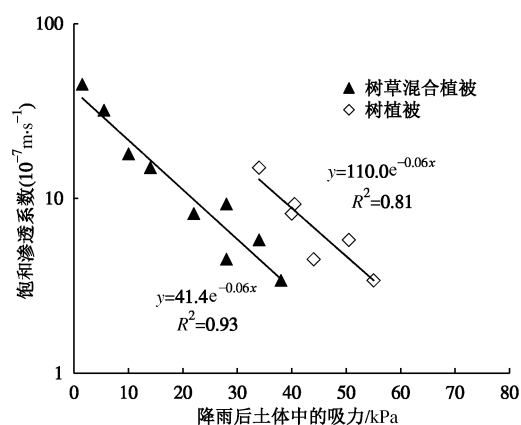


图 20 降雨后维持的吸力与土体的饱和渗透系数之间的关系^[75]

Fig. 20 Correlation of preserved suction after rainfall with saturated water permeability^[75]

(3) 植物种植间距对土体吸力的影响

在考虑植物护坡以及控制地表侵蚀时,植物种植密度是一个重要参数。不同的种植间距对土体的吸力影响尚不清楚。为了研究植物种植密度对植物生长以及吸力分布的影响,在香港科技大学环境控制室进行了试验。试验中所用的植物是鸭脚木树。该试验考虑了 3 种植间距: 60 mm (S60)、120 mm (S120) 和 180 mm (S180)。试验过程中进行了两个不同位置的吸力监测,分别为植物根部正下方(R)和两植物中间位置(M)。同一种种植间距分别进行了 3 次重复性试验,以考虑植物生长的不均一性^[47]。

图 21 显示了吸力随深度的分布。图中显示,当植物的间距由 180 mm 减小到 60 mm 时,根部所产生的最大吸力会增大 3.5 倍 (20~70 kPa)。不同间距下植物根部正下方(R)的吸力大小与两植物中间位置(M)的吸力分布较为相似(不超过 5 kPa)。在根深度范围内,深度为 50 mm 的吸力总是大于深度为 100 mm 的吸力。这主要是由于在深度为 50 mm 时的根系面积指

数 (RAI) 较大^[52]。由本文 2.1 节可知, 植物的吸水能力与根系表面积密切相关, 较大的根系表面积对应着较高的吸水能力。

从图 21 中可以看出, 种植间距为 60 mm 时, 鸭脚木根系深度只有 125 mm, 在所研究的 3 种植间距中是最小的 (种植间距为 120, 180 mm 时根系深度分别为 146, 160 mm), 但是吸力的影响深度是最大的 (大于 350 mm)。用吸力的影响深度与植物根系深度之间的比值来表示吸力影响范围时发现, 种植间距 60 mm 时的吸力影响范围大于根系深度的 2.8 倍, 而种植间距 180 mm 时的吸力影响范围只有根系深度的 1.5 倍左右。这表明植被土的吸力影响范围随着种植间距的增大而逐渐加深。这主要是由于种植间距较小时 (例如 60 mm), 植物之间争夺水分较为激烈, 根部范围内与根部以下之间较大的水力梯度导致了水分的向上运移, 吸力的深度影响范围扩大。

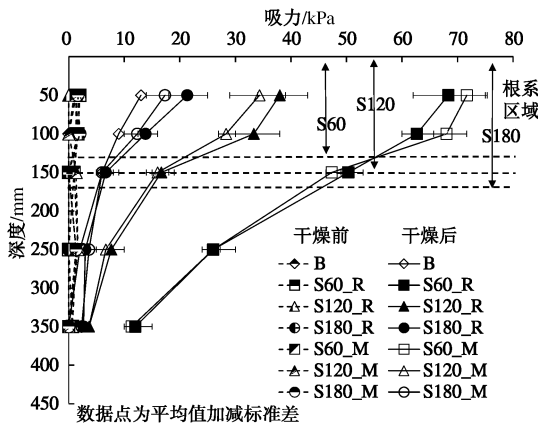


图 21 种植间距对土体吸力分布的影响^[47]

Fig. 21 Effects of planting spacing on induced soil suction^[47]

(4) 植物 LAI、RAI 与土体吸力之间的关系

在大气-植被-土体相互作用下, 植物的特征参数 (LAI、RAI 等) 能否用来量化描述土体吸力变化有待研究。为了量化研究植物特征与土体吸力之间的关系, 针对 18 株鸭脚木进行了室内研究^[52]。该系列试验在香港科技大学环境控制室进行 (图 15)。试验共分为 3 个阶段: 第一阶段将土体完全饱和; 第二阶段将试验箱在环境控制室中干燥 2 d; 第三阶段在各试验箱进行常水头为 6 mm 的浸水试验, 浸水时间为 1 min。试验过程中对深度为 30, 80, 140 和 210 mm 处的吸力变化进行了测量。

图 22 显示了该植物的叶片面积指数 (LAI) 与根表面积指数 (RAI) 之间存在着线性关系。RAI/LAI 之间的比值小于 1, 这表明当 LAI 从 0.9 增长到 3.1 时, RAI 的增长幅度较小。而 Butler 等^[76]通过研究云杉 (*Picea sitchensis*) 发现, 当 LAI 增长 1.7 倍时, RAI

的增长幅度达到了 4 倍。这种差别的主要原因是室内试验中, 有规律的浇灌使得土体水分充足, 土体含水率保持在田间持水率附近, 植物根系较易吸收土体内部的水分。根据 Sperry 等^[77]和 Reich^[78]的研究表明, RAI/LAI 比值越高, 植物树干中导管内的负压力越小, 越不容易产生气穴, 从而避免导管渗透性的下降, 植物抵抗干旱的能力增强。本文中较低的 RAI/LAI 比值则表明该植物生长的土体饱和度较高。以上结果表明, 控制土体适当的含水率有利于植物根系生长的最大化, 从而可以充分发挥植物根系增强土体吸力的作用, 对增强土体抗剪强度和维持边坡稳定性有着重要意义。

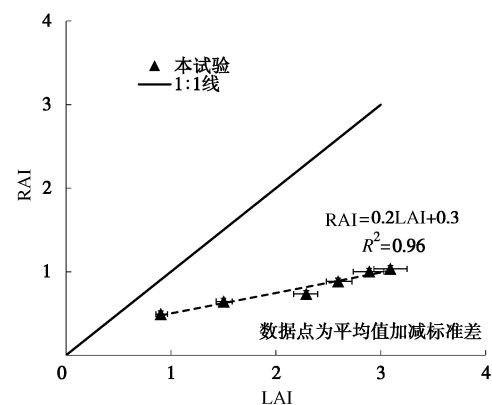


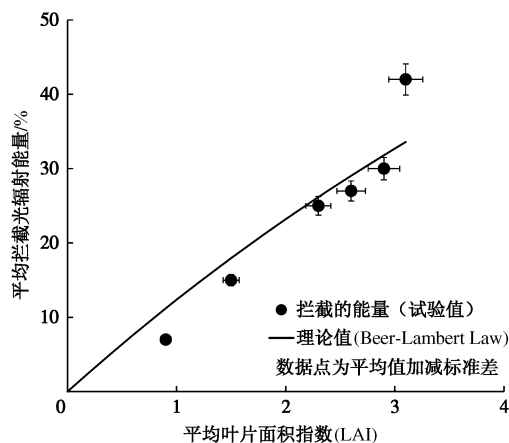
图 22 RAI 与 LAI 之间的关系^[52]

Fig. 22 Relationship between RAI and LAI^[52]

图 23 显示了叶片截获的辐射能量与叶片面积指数 (LAI) 之间的关系。当 LAI 从 0.9 增长到 3.1 时, 截获的能量从 7% 增长到 42%。当叶片面积指数 LAI 较高时, 叶片面积较大, 截取的辐射能量较高 (见 3.1 节), 植物的光合作用和呼吸作用越明显, 蒸腾速率也越大。植物蒸腾速率与 LAI 指数之间的关系, 可用 Beer-Lambert law 公式表示^[79]

$$PT = PET(1 - \exp(-\xi \cdot LAI)) \quad (17)$$

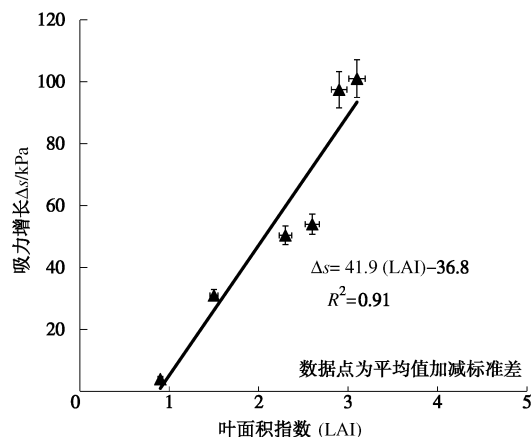
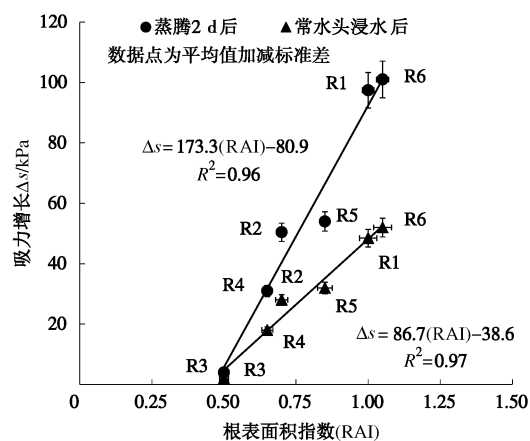
式中, PT 为植物的潜在蒸腾速率, PET 为潜在地表蒸发速率与潜在植物蒸腾速率的总和, 具体计算方法参见 Penman-Monteith 公式^[80], 模型系数 ξ 与植物叶片截获的辐射能量相关。在测量植物叶片截获的辐射能量时, 将光能辐射仪分别置于叶片顶部以及叶片底部, 两者所测得的差值即为植物叶片截获的辐射能量。通过本文的实测数据标定发现, 当模型中的 ξ 取值为 0.13 时, 试验中的观测值与 Beer-Lambert 公式^[79]模型的预测值较为接近。Beer-Lambert 公式^[79]表示植被的叶片面积指数 LAI 是控制植物吸收光照辐射的主要参数。LAI 越大, 吸收光能的能力越高。这表明增加植物的叶片表面积能够有效的增加植物的蒸腾作用, 从而提高土体的吸力水平。

图 23 拦截的光辐射能量与 LAI 之间的关系^[52]Fig. 23 Relationship between intercepted solar radiation and LAI^[52]

为了研究植物蒸腾作用对土体吸力的影响,图 24 中纵坐标轴表示植被土与裸露土之间的差值 Δs ,该吸力的测量深度为 80 mm。 Δs 表示植物产生的额外吸力,该额外吸力可以有效的增加土体的抗剪强度,降低土体的渗透系数^[7],从而减缓地表水力侵蚀。 Δs 与 LAI 之间的线性关系表明 Δs 随着 LAI 的增大而增长。这与图 23 的结论一致,图 23 表明较大的叶片面积意味着植被能够吸收更多的太阳辐射能量,从而增加了植物的蒸腾量。Jarvis 等^[68]通过研究表明,植物的蒸腾量取决于环境饱和蒸汽差(即环境空气水蒸气压力与饱和水蒸气压力之差)、叶片面积指数 LAI 以及植物的气孔导度。由于本试验在环境控制室进行,温度、光照、湿度保持不变,因此环境饱和蒸汽差可认为是一定值。同时由于试验中所研究的土体吸力范围小于 100 kPa,在这样低吸力的范围内植物的气孔导度可以近似认为不变。因此由式(17)可知本试验条件下,植物的蒸腾速率完全取决于植物的叶片面积指数 LAI,并与之成线性关系。这表明当植物具有较大的叶片面积以及叶片面积指数时,其控制边坡稳定性、抵抗土地地表侵蚀的能力也越强。

图 25 显示了常水头浸水试验后 Δs 与根系面积指数 RAI 之间的关系。浸水试验水头为 6 mm,这相当于香港地区百年一遇的降雨^[70]。对于某一特定的 RAI,降雨后的 Δs 一定小于降雨前的 Δs ,这主要是由于在降雨的过程中,雨水入渗导致土体吸力的降低。同时从图中可以看出,与 Δs 与 LAI 之间的线性关系相似,降雨前在蒸腾作用下 Δs 与 RAI 也存在着良好的线性关系。这表明植物的吸水能力与根系的表面积有很大关系,当植物具有较大的根系表面积时,产生的土体吸力也较高。有趣的是在降雨过后,土体中维持的吸力水平也与根系表面积有着紧密的关系。RAI 越大意味

着土体维持吸力的能力越强。

图 24 蒸腾作用下吸力增长与 LAI 之间的关系^[52]Fig. 24 Relationship between evapotranspiration-induced suction increment and LAI^[52]图 25 常水头浸水前后土体吸力增长与平均根系表面积指数之间的关系^[52]Fig. 25 Relationship between suction increment and RAI before and after ponding^[52]

综合 Δs 与 LAI 或者 RAI 之间的关系,可以发现, LAI 和 RAI 是控制土体蒸腾吸力的两个关键参数。这主要由于 LAI 直接影响叶片表面总气孔导度,RAI 反映了植物根部的吸水面积。同时,对于该研究的树种,存在一个阈值 LAI (~ 1.0) 和 RAI (~ 0.5),当 LAI 或者 RAI 的值小于相应的阈值时,植物的吸力作用可以忽略。例如图 25 中的 R3 数据点,不管是在蒸腾后还是降雨后, Δs 的值都是接近 0。这表明在利用鸭脚木树植被护坡时,为了充分发挥植被的水力作用,所选用植物的 LAI 应大于 1.0,RAI 应大于 0.5。

4.3 土体状态对植被土持水能力的影响与模拟

(1) 压实度对植被土持水能力、吸力维持的影响
土体压实度不仅影响着土体水力特征(例如土体持水能力曲线和渗透系数^[18]),也影响着土体中吸力的变化。这对增强浅层边坡稳定、控制地表水力侵蚀有着重要的意义。另一方面,土体压实度对植被生长

有抑制作用^[81]。图 26 显示了压实度对百慕大草植被根系深度的影响。可以看出不管是室内试验还是现场试验, 随着压实度的增大, 根系深度逐渐减小。室内试验表明, 当压实度从 70% 增大到 95% 时, 根系深度减小了 35% (从 194 mm 减小到 125 mm)。当室外土体压实度从 80% 增长到 100% 时, 根系深度减小了 30% (从 100 mm 减小到 70 mm)。这主要是因为较高的土体压实度加大了根系生长过程的力学阻力^[82], 同时降低了土体内含氧量^[83]。因此需要找到一个最优压实度, 既能满足工程需要, 又能促进植物的生长。

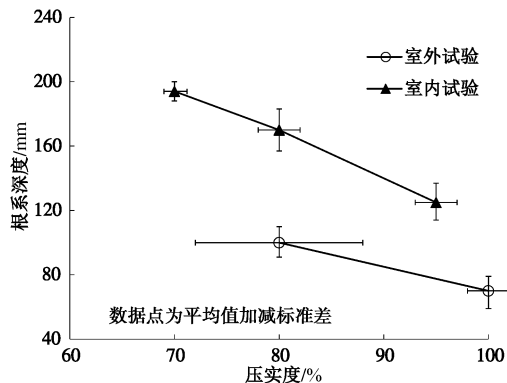


图 26 土体压实度对植物根系深度的影响

Fig. 26 Effects of degree of compaction on root depth

当植被与不同压实度土体共同作用时, 土体的持水能力怎样变化尚不清楚。图 27 显示了不同压实度下植被对土体持水能力曲线的影响^[84]。本试验在香港科技大学环境控制室进行, 主要研究增湿土体持水能力曲线。试验中考虑了 70%, 80% 和 95% 3 种不同的土体压实度, 裸露土和草植被土两种土体。在试验开始时, 保证每种情况下有着相近的初始吸力分布, 然后进行降雨试验, 这样就避免了不同初始吸力的影响。在降雨的过程中, 测量不同深度的吸力以及含水率的变化。将同一时刻的体积含水率以及吸力联系起来就可以得到该土体在该工况下的持水能力曲线。为了便于比较, 文献中粉砂土在压实度为 90% 时的持水能力曲线被用来作为参考, 该持水能力曲线是由稳态法测得的^[85]。

对于裸露土, 研究发现当吸力范围为 20~60 kPa 时, 压实度为 80% 和 95% 时的体积含水率较相似, 但都比压实度为 70% 时高。这与 Romero 等^[86]和 Ng 等^[87]发现的结果一致, 即当土体压实度较大时, 干密度较大, 对应的持水能力也相对较高。当植物根系存在于压实度为 80% 以及 95% 的土体中时, 测得的体积含水率要高于压实度为 80% 或者 95% 压实度的裸露土。需要注意的是对于压实度为 95% 的裸露土以及植被土, 测得的体积含水率以及吸力在深度为 80 mm 处基本没有变化, 这主要是由于在降雨过程中吸力的影响深度小于 80 mm。当植物根系存在于压实度为 80% 和

95% 的土体中时, 植被土的持水能力高于裸露土。这可以用 Ng 等^[60]提出的新模型来解释。当植物根系占据土体孔隙时, 土体孔隙减小, 毛细管半径减小, 持水能力增强。相反, 当压实度为 70% 时, 植被土的持水能力低于裸露土。植被与压实度对土体持水能力的这种影响规律对于非饱和和浅层边坡稳定计算有着重要意义。

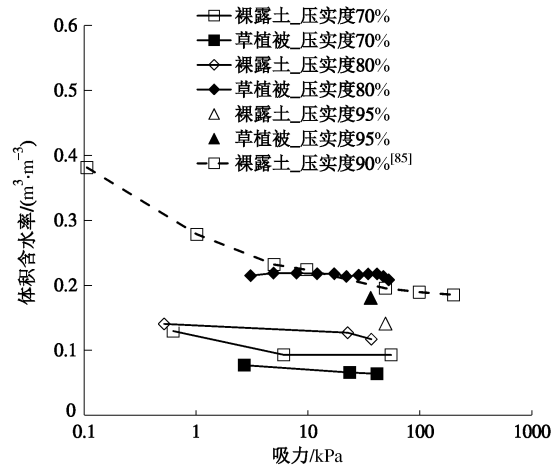


图 27 不同植被土在不同压实度下的持水能力比较^[84]

Fig. 27 Measured SWRC of vegetated soils under different degrees of compaction^[84]

图 28 显示了不同压实度下植被土与裸露土在降雨过程中的吸力变化。降雨前不同植被土初始吸力分布较为接近。试验过程中施加的降雨强度为 100 mm/h, 降雨历时 1 h, 这相当于香港地区十年一遇的降雨^[70]。选择深度为 30 mm 的吸力变化主要是由于该深度位于植被根部深度范围内, 可以直接分析植物根系对吸力的影响。当土体的压实度是 70% 时, 无论植被土还是裸露土中的吸力都表现出了迅速降低的趋势, 最后土体的吸力都变为 0 kPa。

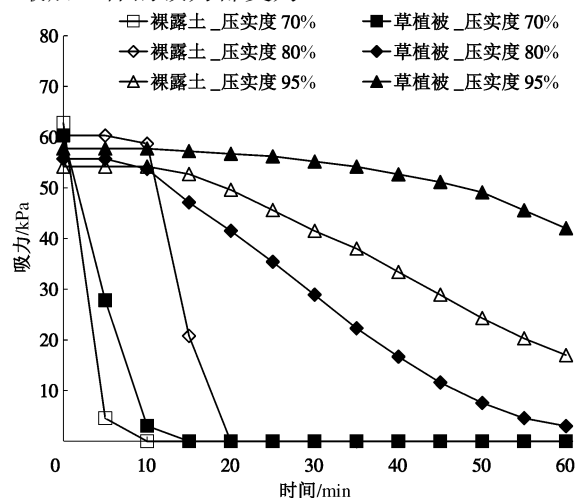


图 28 降雨过程中不同植被土中的吸力变化^[84]

Fig. 28 Variations of suction with time in different vegetated soils under rainfall^[84]

相反,当压实度为80%和95%时,土体的吸力响应都有延迟,这与土体较低的渗透系数有关。压实度较高土的渗透系数一般都小于压实度较低土的渗透系数^[86]。从图中可以看出,相比于裸露土,植被土的吸力响应时间更长,在响应时间内维持的吸力更大。当土体的压实度为80%时,降雨进行到20 min时草植被土维持的吸力比裸露土维持的吸力高40 kPa,但是在降雨结束后两者之间的差异只有3 kPa。这是因为在降雨初始阶段,裸露土的入渗速率大于草植被土,土体内部吸力急剧下降并趋于0 kPa^[84],而草植被土较低的入渗速率使得其吸力变化较为缓慢。随着降雨入渗的进行,草植被土中的吸力也逐渐降低,最终维持的吸力与裸露土趋于一致。然而,当土体的压实度为95%时,降雨过程中草植被土与裸露土之间的差异随着降雨入渗的进行越来越大。降雨结束之后,压实度为95%的植被土维持着最高的吸力,比相同压实度下的裸露土还要高出25 kPa。压实度为80%时降雨后的吸力基本趋近于0。

以上分析可以发现,在所研究的3种压实度中(70%, 80%, 95%),压实度为95%的植被土有着最大的吸力维持能力。这表明在考虑利用百慕大草植被护坡固沙时,为了使边坡土体在降雨过程中维持较高的吸力,从而增强浅层边坡的稳定性,土体的压实度应选择95%。95%的压实度不仅足以确保百慕大草的生长^[47, 54, 84],也能达到护坡固沙的目的。

(2) 考虑植物根系作用的土体持水能力曲线模拟

植物不仅影响土体的吸力,同时也影响土的水力特性(土体持水能力以及土体的渗透系数)。很多试验结果表明^[69, 84, 88-90],植物根系能够有效地降低土体的入渗速率,同时提高土体的持水能力。根系引起的这种土体水力特性的改变很大程度上是由于根系占据了土体内部的孔隙,从而导致土体孔隙减小,持水能力上升。土体持水能力作为边坡瞬态稳定分析中的重要参数,考虑植物根系对其影响的模型能够帮助正确分析降雨过程中植被土体中的吸力变化,从而合理分析植被对浅层边坡稳定和土体抗侵蚀能力的影响。

根据土体的三相图,植物根系占据土体孔隙孔体积的概念,根系土的孔隙比可以表示为

$$e = \frac{e_0 - R_v(1 + e_0)}{1 + R_v(1 + e_0)}, \quad (18)$$

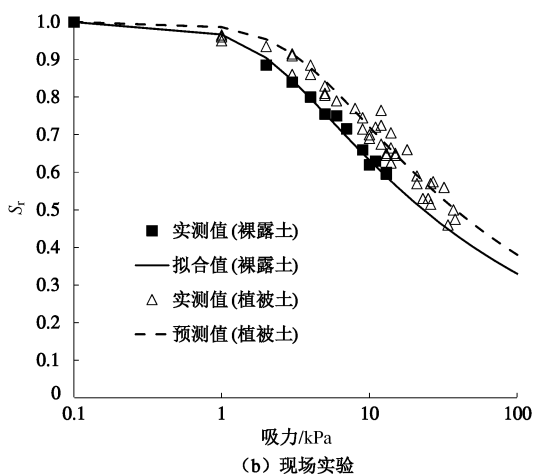
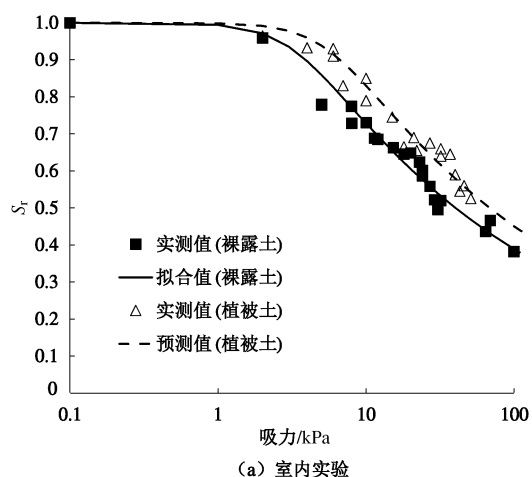
式中, e_0 为裸土的孔隙比, R_v 为根系体积比(定义及其测量方法见3.3节)。 R_v 取决于植物的种类,同时也随着土体深度而变化。

为了模拟植物根系对土体持水能力曲线的影响, Gallipoli 等^[91]提出了以土体孔隙比为函数的方程:

$$S_r = \left[1 + \left(\frac{se^{m_1}}{m_3} \right)^{m_2} \right]^{-m_1}, \quad (19)$$

式中, S_r 表示土体的饱和度, s 是土体的吸力, m_1 , m_2 和 m_3 都是无量纲参数, m_1 和 m_2 控制着土体持水能力曲线的基本形状, m_3 和 m_4 与进气值(Air Entry Value, AEV)相关。如果已知裸露土的土体持水能力曲线以及根系体积比 R_v 就能够很好的预测植被土的土体持水能力曲线,从而科学的进行浅层边坡的瞬态稳定分析。

为了验证这个模型的可行性以及有效性,本文进行了一组室内试验和一组现场试验,得到了裸露土和植被土的土体持水能力曲线。试验的具体方法和试验步骤可参考 Ng 等^[60]。同时 Leung 等^[69]发表的室内试验结果也用来对本文提出的模型进行验证。图29显示了模型的预测值与试验实测值之间的比较。可以看出,预测值较好的吻合了试验实测值。植物根系的存在有效的提高了土体的进气值,然而对土体脱水率几乎没有影响。这表明当利用植被护坡、控制地表土体侵蚀时,植物根系能够提高土体的持水能力。本文提出的考虑植物根系作用的土体持水能力曲线模型能够用来分析边坡稳定中的土体水力参数,从而更科学合理地研究植物根系对浅层边坡稳定的影响。



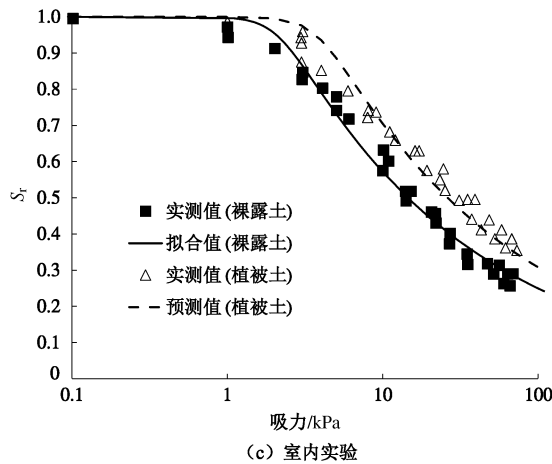


图 29 植被土与裸露土的持水能力曲线的试验值与预测值之间的比较^[60, 69]

Fig. 29 Comparison between measured and predicted SWRCs of vegetated and bare soils^[60, 69]

4.4 植物根系对入渗速率的影响

(1) 现场试验植物根系对土体入渗速率及吸力的影响

土体的入渗速率和渗透系数是影响降雨过程中边坡土体吸力变化的重要因素; 同时土体的入渗速率也会影响边坡的地表径流, 从而影响地表水力侵蚀。为了研究植物根系对土体入渗速率的影响, 在香港科技大学生态植物园进行了现场双环入渗试验。试验中考虑了两种不同的植被土: 鸭脚木树植被、百慕大草植被以及裸露土, 双环试验按照 ASTM D3385-09^[92]规范进行。在试验过程中, 施加的常水头是 100 mm, 试验持续时间为 2 h^[93]。为了便于比较, 试验开始前不同植被土中的初始吸力分布保持一致。

图 30 显示了现场试验中植被种类对累计入渗水量的影响。对于裸露土, 累计入渗水量随着时间逐步增长, 但增长的速率逐渐减小。浸水试验 1 h 后, 累计入渗水量的增长速率随着时间呈线性增长趋势, 这表明土体入渗达到稳态流状态。树植被和草植被的累计入渗水量表现出相同的变化趋势, 并且两种植被土之间的累计入渗水量较为接近。在达到稳态流后, 草植被和树植被土的累计入渗水量比裸露土小 50% 以上。这表明土体中根系对减小入渗水量有着重要的影响。

图 30 显示了入渗速率随时间的变化。树植被、草植被和裸露土的入渗速率都随着时间表现出指数型递减趋势。当土体入渗达到稳态时, 植被土的入渗速率小于裸露土。对于草植被土而言, 入渗速率总是低于裸露土。试验开始时两者之间的差距最大 (45%), 但是该差距随着时间逐渐减小。当比较草植被和树植被土的入渗速率时, 发现两者之间并没有明显的差异。

需要注意的是裸露土的稳态入渗速率接近于实验室内测得的 CDG 饱和渗透系数。

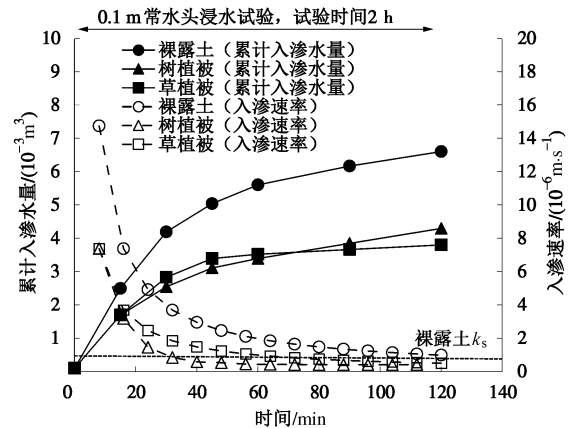


图 30 现场条件下不同植被土中入渗速率随时间的关系^[93]

Fig. 30 Variations of infiltration with time in different vegetated soils^[93]

为了解释植被土入渗速率较小的现象, 将含有植物根系土样取出并测量其孔隙比, 具体的试验步骤参照 Leung 等^[93]。结果发现, 含有植物根系的土体孔隙比 (~ 0.53) 相比于裸露土 (~ 0.62) 较小, 该与式 (18) 的理论计算相吻合。这主要是由于在植物根系生长的过程中, 植物根系占据了土体的孔隙。两种植被土相似的孔隙比表明, 植物根系占据土体孔隙从而对土体渗透系数的影响机理也是较为相似^[88, 94-95]。需要注意的是该试验得出的结论是基于两种植被种类在特定的植物年龄以及气候条件下得到的。

图 31 显示了该双环入渗试验过程中裸露土、草植被和树植被土的孔隙水压力分布。浸水试验前, 裸露土和两种植被土的孔隙水压力分布较为接近。裸露土浸水试验 2 h 后, 3 个深度 (0.1, 0.3 和 0.5 m) 的孔隙水压力都增加了大约 10 kPa。这表明浸水试验的影响深度达到 500 mm 以下。对于草植被和树植被土, 浸水后的孔隙水压力分布较为接近。可以看出, 植被土在不同深度维持的孔隙水压力都低于裸露土。Ng 等^[84]通过室内试验对同样草植被土进行 1 h 的降雨试验发现, 草植被维持的吸力高于裸露土。Ng 等^[52]也得到了相似的结论。图 31 中显示, 草植被土和树植被土在深度为 0.5 m 处的孔隙水压力变化较小。这表明, 该浸水试验中孔隙水压力的影响深度位于 0.3~0.5 m 深度之间, 比在裸露土的影响深度小, 这主要是由于植被土的入渗速率小于裸露土 (图 30)。以上试验结果表明, 植被土可以有效的减小土体入渗速率, 使土体维持较低的孔隙水压力 (较高的吸力), 这对增强浅层边坡稳定有着重要的意义。

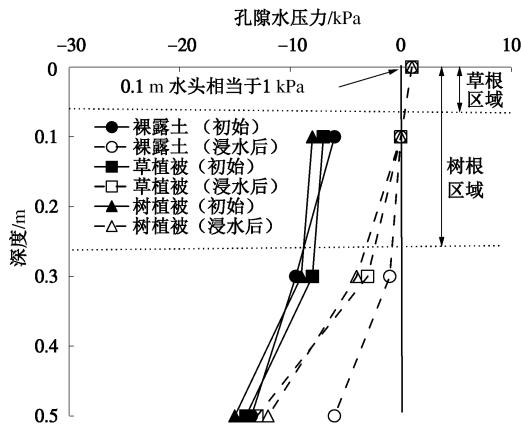


图 31 浸水前后土体孔隙水压力分布^[93]

Fig. 31 Distributions of pore water pressure with depth before and after ponding^[93]

(2)植物对三层覆盖系统吸力分布及防渗性能的影响

大气-植被-土体相互作用的另一个重要应用体现在垃圾填埋场覆盖系统。一般的，垃圾填埋场终场覆盖系统均设置有植物来进行美观方面的考虑，然而并未对植物在覆盖系统中的水力特性进行深入研究。基于前几节的试验结果，植物根系能够吸水并在土中产生吸力，从而降低土的渗透系数。Ng 等^[96]研发了一种新型毛细阻滞型垃圾填埋场覆盖系统，其土层从上至下依次是粉土层、砾砂层和黏土层，此新型覆盖系统主要是利用不同土层间渗透系数的差异来进行防渗的，关于此新型覆盖系统的详细原理请参见专利 Ng 等^[96]。笔者研究团队对此新型覆盖系统分别进行了室内一维土柱试验^[97]和室内二维模型试验^[98]，验证结果显示此新型覆盖系统能够在湿润地区有效降低雨水入渗。本节主要研究在此新型覆盖系统上面种植灌木鹅掌藤 (*Schefflera arboricola*) 对其防渗性能的影响。如图 32 所示为室内种植有鹅掌藤的一维土柱入渗试验示意图。本试验共设置了两个尺寸及土层均相同的土柱，一个为种植灌木鹅掌藤的植被土柱，另一个为无植被土柱。此两个土柱所用试验土层从上至下依次为植被土层、粉土层、砾砂层和黏土层。试验中土柱顶部采用常水头 (100 mm) 边界来模拟降雨入渗，在入渗的不同时刻进行吸力和入渗量测量，入渗量可对应不同的降雨周期，其中常水头由马氏瓶提供，不同时刻入渗量由电子天平测定。

图 33 是从饱和状态开始干燥过程中裸露土柱和植被土柱实测吸力分布。两土柱中各深度处的初始吸力均为 0。干燥 20 d 和 30 d 后，两土柱上部 600 mm 深度内吸力均有小幅度增加，尤其是在上部 200 mm 根系区域内增加较为明显。

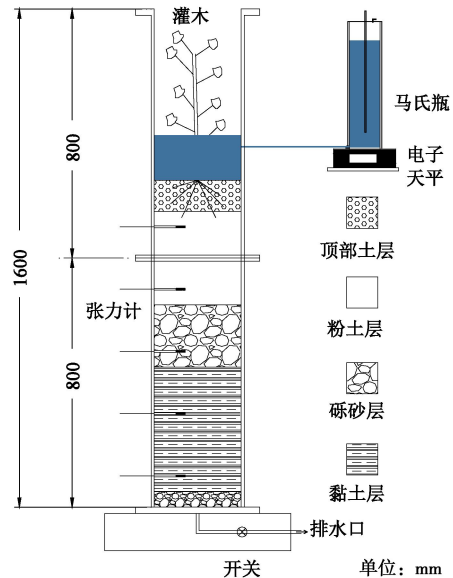


图 32 种植有灌木的一维入渗土柱试验示意图

Fig. 32 Schematic diagram of vegetated soil column with shrub

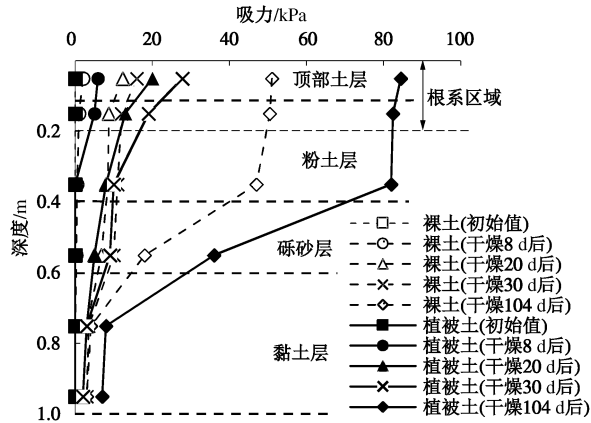


图 33 干燥过程裸土土柱和有植被土柱吸力沿深度分布

Fig. 33 Distributions of suction with depth in bare and vegetated soil columns during drying

这是因为植被的蒸腾作用在根系区域范围内更为显著。干燥 104 d 后，这两个土柱中实测吸力有了大幅增加。因为植物蒸腾作用，在土柱上部 200 mm 范围中 (根系区域内)，植被土柱中吸力明显高于无植被土柱中吸力，其中在 50 mm 深度处有植被土柱吸力约为 51 kPa，无植被土柱为 85 kPa，这种吸力差异是因为植物根在蒸腾作用下吸水从而在土柱顶部土层产生了更高吸力。在 200~350 mm 范围内，随着深度增大，两土柱吸力均有少许降低，其中在 350 mm 处有植被土柱吸力为 85 kPa，而裸露土柱仅为 47 kPa，这是由于此区域受到了上部根系区域的影响所致。而对于底部黏土层，即使在干燥 104 d 后土柱中吸力仍无明显的提高，这表明在干燥过程中，与裸露土柱相比，植被土柱既能够在覆盖系统上部土层产生更高吸力从而降低覆盖系统渗透系数，又不会增大底部黏土层干燥

开裂的可能性, 因为三层覆盖系统底部黏土层可以很好的被上部土层所保护。

图 34 为增湿过程中裸露土柱和植被土柱中实测吸力分布。图中也画出了实测的根系区域深度 200 mm。湿化过程开始前, 经过 104 d 干燥后的植被土柱中的初始吸力均高出相应裸露土柱中吸力, 尤其是顶层土和粉土层, 这是由于根系区域主要位于顶部土层。由式 (3) 可知, 较高的初始吸力对应较低的渗透系数, 进而可以降低雨水入渗。

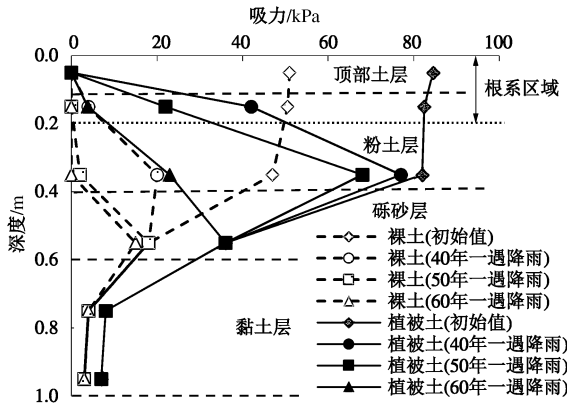


图 34 湿化过程裸土土柱和有植被土柱吸力沿深度分布

Fig. 34 Distributions of suction with depth in bare and vegetated soil columns during wetting

经过 40 年一遇降雨湿化后, 两个土柱中上部土层 150 mm 深度处 (根系区域内) 均能保持一定吸力, 其中裸露土柱可以保持 4 kPa 吸力, 植被土柱可以保持 42 kPa 吸力。在 350 mm 深度处 (根系区域下部), 裸露土柱和植被土柱分布能保持吸力 20 kPa 和 77 kPa。经过 50 年一遇降雨后, 植被土柱可以保持的吸力远远大于裸露土柱所能保持的吸力。

经过 60 年一遇降雨后, 裸露土柱砾砂层中的吸力开始由 18 kPa 降低为 15 kPa。然而, 在相同时刻的植被土柱中, 150 mm 和 350 mm 深度处的吸力仍能分别保持 4 kPa 和 23 kPa, 砾砂层和黏土层中吸力保持不变。这说明在经历 60 年一遇降雨后, 裸露土柱中两层毛细阻滞覆盖系统 (粉土层/砾砂层) 已经失效, 但植被土柱中两层毛细阻滞覆盖系统 (粉土层/砾砂层) 仍然有效, 这主要由于植被土柱中的灌木产生的初始吸力高于裸露土柱中的初始吸力所致。因此, 两层毛细阻滞覆盖系统在植被土柱中的有效性优于在裸露土柱的有效性, 这也充分说明了鹅掌藤可以大大增强三层覆盖系统的防渗性能。

5 土壤改良剂对植物-土壤体系的影响

在考虑植被水力作用的同时, 植物根系的力学特

性也在护坡固沙过程中发挥了重要的作用。在土体施加剪切力时, 土受到的剪切应力通过根的表面摩擦力而转化为对根的拉力^[99]。由于植物根系的抗拉性, 土体的强度得到了有效的加强^[100]。Wu 等^[8]提出了考虑植物根系力学特性影响的土体剪切强度模型, 至今仍得到广泛应用^[101-102]。在该模型中, 由于土体根系引起的土体剪切强度增量 ΔS 表示为

$$\Delta S = T_r(RAR)(\sin \omega + \cos \omega \tan \varphi') \quad (20)$$

式中, T_r 为根系的抗拉强度, φ' 为土体的有效内摩擦角, ω 为根系在剪切过程中的弯曲角度, RAR 为根系横截面积比。

该模型做出以下 5 个假设^[99, 103-104]: ①根纤维垂直于剪切平面, 且被剪切区域的厚度在剪切过程中保持不变; ②所有根的变形是依据线弹性理论计算; ③土的摩擦角在有根与无根是保持一致的; ④根的拉力形变非常小; ⑤与土的应力发展是完全同步的。

从 Wu 等^[8]的模型可以看出, 土体根系引起的土体抗剪强度的增量很大程度上取决于根系的力学特性 (即抗拉强度)。为了研究植物根系力学特性对土体抗剪强度的影响, 植物根系本身的抗拉力学特性有待研究。

对于利用植物进行加固边坡而言, 良好的植物长势是首要因素。土壤的压实度、有机物和营养元素的含量等是影响植物生长的重要因素。但是, 有相当部分的人造边坡 (包括普通边坡和尾矿边坡) 上的土壤性质不适合植物的生长。此时, 人们便考虑使用土壤改良剂如堆肥 (compost)、有机肥 (organic fertilizer) 和生物固体 (biosolid) 来改善土壤性质。土壤改良剂包括生物性与非生物性两种类型。有的改良剂可以改善植物的生长, 有的则直接改变土壤物理和化学特性。这些势必对植物水分的吸收、根系结构和强度以及土体水力特性产生深远影响。

5.1 丛枝真菌对香根草根抗拉强度的影响

微生物也是显著影响植物根部结构和性质的因素之一。科学家在古老的化石中 (约四亿年前) 便发现植物与丛枝真菌 (Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF) 的共生现象^[15], 如今有 90% 的陆生植物都与 AMF 形成密切的共生关系, 在生态系统中起着极为重要的作用^[15]。由于 AMF 和植物的互惠共生关系, 该真菌从植物体内获得葡萄糖为自身所用, AMF 除了能够帮助植物吸收水分, 氮和磷之外^[15]还能够显著改变植物多种基因的表达^[105]。例如 AMF 能够显著提高纤维素合成酶^[23, 106]的表达 (图 35)。

根据以上的分析, 笔者研究团队展开了丛枝真菌是否能够提高植物根部的纤维素 (cellulose) 含量, 从而提高其抗拉强度 (tensile strength) 的研究。

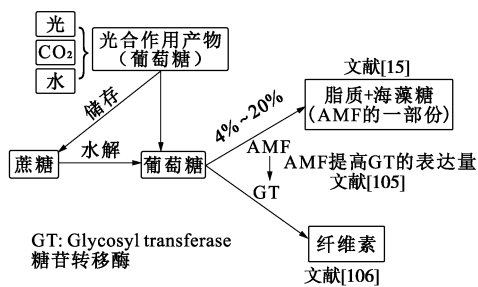


图 35 丛枝真菌对碳分布和纤维素合成的影响

Fig. 35 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on carbon distribution and cellulose biosynthesis

由于香根草 (*Chrysopogon zizanioides*) 被广泛的应用于边坡固定, 同时有研究报道其能够与丛枝真菌产生共生关系^[107], 所以本研究采用该植物作为研究对象。该研究采用了 3 种广泛存在的丛枝真菌 (*Rhizophagus intraradices* (Ri)、*Funneliformis mosseae* (Fm) 和 *Glomus aggregatum* (Ga))。用于种植香根草的土壤的压实度为 95%, 3 个丛枝真菌品种分别接种到香根草的根部 (图 36), 每一个处理均有 5 个重复 (图 37), 同时非接种的空白对照 (NM) 也包括在内。经过 8 个月的生长, 香根草的上部和根部被分开且分别称重。每个处理大约有 350 条根被随机抽取出来进行抗拉强度试验。得到的数据进行了方差分析和事后比较 (Duncan's multiple range test) 以分析差异的显著性。



图 36 丛枝真菌接种到香根草根部

Fig. 36 AMF inoculation to vetiver grass

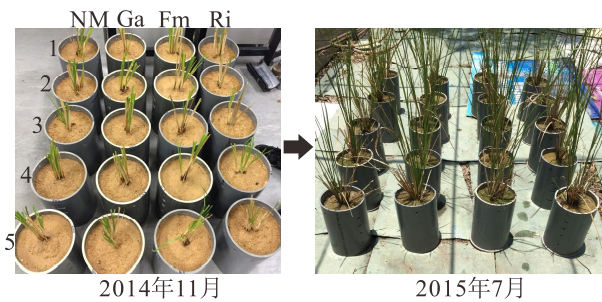


图 37 3 种丛枝真菌接种后以及经历八个月后的生长情况

Fig. 37 Three inoculated AM species after growing for eight months

接菌的香根草的根部生物量明显高于非接菌的处理 (图 38) (具有统计显著性 $P < 0.05$)。但是上部生物量只有 Ga 处理显著提高 ($P < 0.05$) 其生物量, 而 Ri 和 Fm 处理则无明显统计学意义的提升。在拉力测试中, 随着拉力的不断提高, 表皮 (cortex) 会先破裂, 此时中心柱 (stele) 会承受全部的拉力直至破坏。对于 NM、Ga、Ri 和 Fm 处理, 分别有 170、242、257 和 225 条根成功进行拉力测试。接菌后的香根草根, 抗拉强度得到明显的提高 ($P < 0.05$), 平均值大约有 25~50 MPa 的提高量, 标准差从 16~80 MPa 不等。而且当把根部按照不同直径分开研究时, 发现较细小的根的抗拉强度提高的较多 (图 39)。

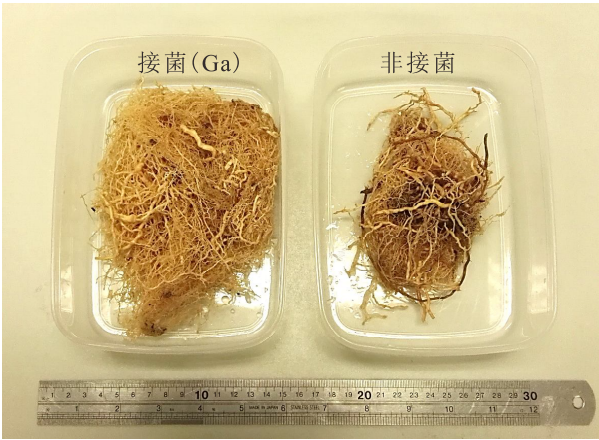


图 38 接菌和非接菌的香根草根部对比

Fig. 38 Comparison of roots with and without AMF treatment

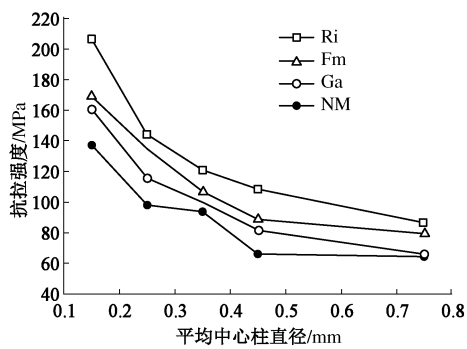


图 39 不同丛枝真菌对不同直径的香根草根部抗拉强度的影响对比

Fig. 39 Effects of AMF on root tensile strength derived from different classes of diameter

丛枝真菌显著提升香根草的根部重量 ($P < 0.05$), 但是没有提高茎叶部分生物量。丛枝真菌的接种能够提高香根草根部的抗拉强度, 效果最明显的是 Ri, 其次 Fm 和 Ga; 根据式 (20), 丛枝真菌结合香根草的种植, 能够进一步提高根部的抗拉强度 (即式中的 T_r), 最终提高植物边坡的稳定性。

5.2 生物炭对植物生长的影响

生物炭 (biochar) 是一种通过高温热解 (pyrolysis) 制成的木炭, 其主要成份是碳分子。有机物质 (如花生壳、小麦秸秆和木屑等) 于高温无氧的环境中进行热能化学分解便得到生物炭^[108]。自古以来生物炭在农业中被用作土壤改良剂, 通过提高土体储水力、吸附有毒物质 (例如重金属、杀虫剂等) 和提升泥土酸碱度等作用促进农作物生长。除了农业用途, 近年生物炭亦被作为“碳汇” (carbon sequestration), 以固定大气中的碳来减缓全球暖化。由于经过高温热解过程, 有机物质中碳分子会被截存于生物炭逾千年, 这有助减少碳排放及延缓由温室效应导致的地球全球暖化^[109]。近年来, 生物炭作为一种土壤改良剂, 逐渐受到国际上的重视并用于改善农田土壤性质, 甚至用于修复受污染的土壤和水体。

近期, 生物炭的研究领域从农业及环境科学扩展至环境工程方面, 特别是生物炭在垃圾填埋场中的应用^[110-112]。虽然生物炭在工程中具有广泛应用潜力, 但现时缺乏添加生物炭对植物和土体相互作用的相关了解。笔者及团队展开了生物炭对植物生长的影响的初步研究。

本研究采用的植物为鸭脚木树, 而土壤为 CDG。在土中添加 1% (体积比) 的木屑生物炭, 以对比无添加的情况。每个情况各有 3 个重复, 以考虑植物个体之间的差异。本试验在室外进行, 每天给植物浇水一次, 每 7 d 测量一次植物高度, 试验周期为 42 d。

初步试验结果表明在 42 d 后, 种植在添加了木屑生物炭的 CDG 中的鸭脚木树的高度显著增加 (图 40)。与初始条件相比, 对照组的高度增加了约 21% (标准差 15%~31%), 而试验组则增加了约 37% (标准差 19%~44%)。这表明生物炭可促进植物生长 (由植物株高表示), 但需要进一步的研究生物炭对植物和土的相互作用效应。

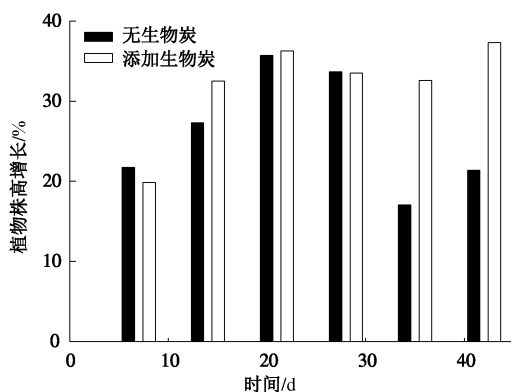


图 40 生物炭添加到的土壤中对鸭脚木树株高的影响

Fig. 40 Biochar effects on shoot height of *Schefflera heptaphylla*

6 植被边坡吸力分布与稳定性理论模型

近些年植被在岩土工程中的应用得到了越来越广泛的关注。植物的根系吸水, 可以降低土体孔隙水压力^[73, 113-114], 从而提高土体的抗剪强度同时降低土体的渗透系数^[7, 115-116]。因此, 从岩土工程角度来看, 植物有助于减小雨水入渗, 减少侵蚀和提高浅层边坡稳定, 并且是一个可持续且环境友好的方法^[117-119]。

本节介绍笔者及团队推导的新解析解, 该解析解首次考虑不同植物根系形状对土体孔隙水压力分布及边坡稳定的影响, 为实际工程应用中, 考虑植物的水力作用对边坡稳定性的设计提供了一种新的方法。

6.1 植被边坡吸力分布理论模型

(1) 非饱和土中考虑植物的孔隙水运移

非饱和土中孔隙水的运移是基于水的质量守恒, 在 Richards 方程的基础上, 考虑了植物根系吸水影响, 具体表达形式为

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = -\nabla v_w + S(\psi, z) \quad , \quad (21)$$

式中, θ_w 为体积含水率, v_w 为水的渗透速度, ψ 为水头, t 为时间, $S(\psi, z)$ 为根系吸水。式中左边的第一项描述土体内水质量的变化率。右边第一项描述地下水的渗流, 第二项描述根系吸水。非饱和土渗流 v_w 可以由达西定律描述为^[120]

$$v_w = -k_{rw} \frac{k_i}{\mu_w} (\nabla P_w + \gamma_w \nabla z) \quad , \quad (22)$$

式中, k_i 为土体固有渗透系数, k_{rw} 为相对渗透系数方程, P_w 为孔隙水压力, γ_w 为水的重度, z 为垂直坐标轴 (以向上为正), μ_w 为水的黏度系数。

(2) 考虑不同根系形状的根系吸水理论方程

为了填补考虑不同植物根系形状吸水对孔隙水压力影响的解析解的空白, 笔者及团队推导了新解析解, 引入不同植物根系形状对吸水的影响 (本研究中考虑了均布形、三角形、指数形和椭圆形 4 种根系形状)。植物根系吸水通常通过非饱和土孔隙水运移方程中加入一个汇项来表示^[114, 121-123]。在本研究中, 植物根系吸水表述如下^[124]:

$$S(\psi, z) = F(\psi)G(z)T_p \quad , \quad (23)$$

式中, T_p 为植物蒸腾速率, $G(z)$ 为植物形状函数。 $F(\psi)$ 为 Feddes 公式, 式 (23) 描述了吸力与根系吸水之间的关系,

$$F(\psi) = \begin{cases} \frac{\psi}{\psi_{os}} & (\psi \leq \psi_{os}) \\ 1 & (\psi_{os} < \psi \leq \psi_{ws}) \\ \frac{\psi_{wilt} - \psi}{\psi_{wilt} - \psi_{ws}} & (\psi_{ws} < \psi \leq \psi_{wilt}) \end{cases} \quad (24)$$

式(24)的函数图形如图41所示, ψ_{os} 为厌氧点的土体吸力, 当吸力低于厌氧点, 由于氧气供应不足, 根系吸水很微弱; ψ_{ws} 为根系吸水降低点, 当土体吸力高于 ψ_{ws} 的时候, 由于土体吸力的增加, 根系从土体中吸水越来越困难; ψ_{wilt} 为植物萎蔫点, 当土体吸力低于该值的时候, 植物根系无法从土体中吸收水分, 从而导致植物萎蔫。

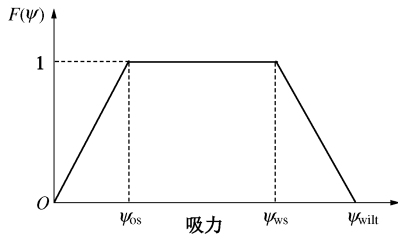


图41 吸力对根系吸水的影响 (修改自文献[124])

Fig. 41 Effects of suction on root water uptake (after Ref. [124])

笔者及团队率先发现了椭圆形根系^[93], 为了研究不同根系吸水对孔隙水压力影响, 本团队又推导了新解析解用于研究不同根系形状对孔隙水压力的影响。图42为不同植物的根系形状, 在本研究中将其分别理想化为4种不同的根系形状(图43), 分别为均布形、三角形、指数形和椭圆形根系形状。为了方便比较, 图中各种根系形状的根长与总面积一样。均布形根系面积随着深度均匀分布, 三角形根系面积随着深度线性减少, 指数形根系面积随着深度呈指数变化, 椭圆形根系面积随深度椭圆变化。从图中可以直观的看出不同根系随深度变化趋势, 其中指数形和三角形根系在地表处根系密度明显多于均布形和椭圆形根系^[46]。

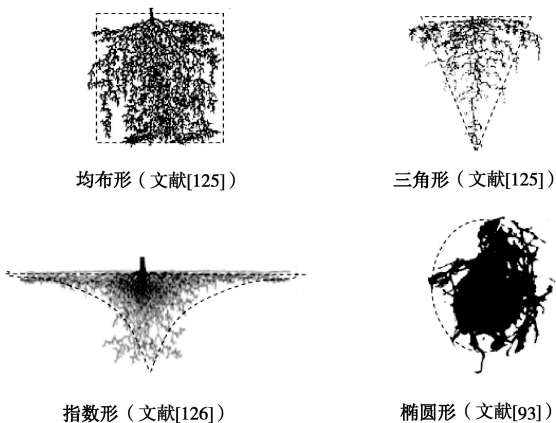


图42 不同的植物根系形状^[46]

Fig. 42 Different root architectures^[46]

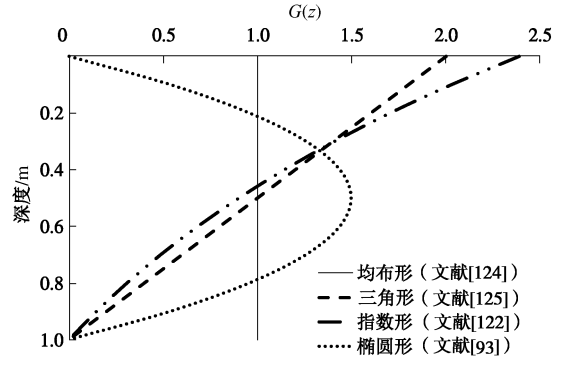


图43 不同的植物根系分布函数^[46]

Fig. 43 Simulated different normalized root architecture functions^[46]

$$G(z) = \begin{cases} \frac{1}{L'_2} & \text{(均布形)} \\ \frac{2}{L'_2} \left(\frac{z' - L'_1}{L'_2} \right) & \text{(三角形)} \\ \frac{\exp(z' - L'_1) - 1}{\exp(L'_2) - L'_2 - 1} & \text{(指数形)} \\ \frac{2}{L'_2} \left[\frac{3((z' - L'_1)L'_2 - (z' - L'_1)^2)}{L'_2} \right] & \text{(椭圆形)} \end{cases} \quad (25)$$

式中, L'_1 和 L'_2 分别为无根区域的垂直长度与根长度。各个根的面积一致。

(3) 考虑植物根系形状影响的非饱和无限边坡孔隙水压力解析解

考虑图44所示的无限植被边坡。假设地下水位在斜坡的底部, 此外, 孔隙水压力的等值线与坡面平行。通过上述两个假设, 无限边坡的非饱和渗流可以简化为垂直于边坡面的一维渗流问题。采用 Zhan 等^[127]相类似的方法, 但是加入汇项 $S(\psi, z')$ 考虑植物根系吸水的影响, 可以得到考虑植被影响的非饱和渗流控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial z'} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z'} \right) + \frac{\partial k}{\partial z'} \cos \beta - S(\psi, z') H(z' - L'_1) = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (26)$$

式中, k 为土体非饱和渗透系数, θ_w 为土体体积含水率, β 为坡角, t 为时间, z' 为垂直于边坡面的坐标(图44), $H(z' - L'_1)$ 为 Heaviside 方程^[128],

$$H(z' - L'_1) = \begin{cases} 1 & (L'_1 < z' \leq (L'_1 + L'_2)) \\ 0 & (0 \leq z' \leq L'_1) \end{cases} \quad (27)$$

式中, L'_1 和 L'_2 分别指垂直于坡面的无根区域和有根区域的长度(图44)。

式(26)中, $S(\psi, z')$ 具体表达式为第6.1节式(23)。考虑了4种典型根系形状的影响(图42), 即根系随

深度均匀、线性、指数和椭圆分布 (由式 (25) 描述)。在式 (26) 中, 基于 Ghestem 等^[126]和 Danjon 等^[129-130]的观察结果, 假设根系垂直于边坡生长, 该假设也采用于研究植物根系吸水的其他文献中^[114]。

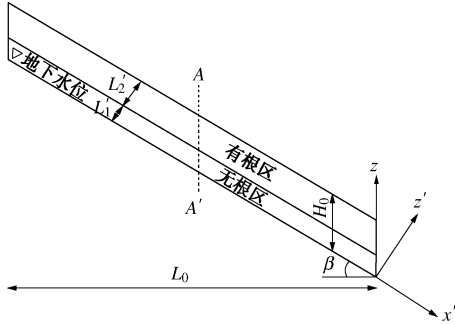


图 44 含植物根的无限边坡示意图^[46]

Fig. 44 Schematic diagram of an infinite vegetated slope^[46]

土体非饱和渗透系数和土体持水能力曲线由下式描述^[131]:

$$k = k_s \exp(\alpha \psi) \quad (28)$$

$$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(\alpha \psi) \quad (29)$$

式中, k_s 为土体饱和渗透系数, θ_s 和 θ_r 分别为饱和和体积分含水率和残余体积分含水率, α 为土体减饱和系数 (desaturation coefficient)。需要指出的是, 式 (28)、(29) 不能很好地描述接近饱和的土体特性。但是由于数学上的简便, 上述两式广泛应用于推导非饱和土渗流控制方程 (式 26) 的解析解。此外, 本研究忽略了土体持水能力曲线的干湿循环效应, 即式 (28)、(29) 中对干湿循环采用相同的常数。

将式 (28)、(29) 代入式 (26) 中, 可以得到如下线性偏微分控制方程:

$$\frac{\partial^2 k^*}{\partial z^{*2}} + \alpha \cos \beta \frac{\partial k^*}{\partial z} - \alpha S(z') H(z' - L_1') = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)}{k_s} \frac{\partial k^*}{\partial t} \quad (30)$$

并定义如下变量:

$$\left. \begin{aligned} z^* &= z' \cos \beta, \\ L^* &= L' \cos \beta, \\ L_1^* &= L_1' \cos \beta, \\ L_2^* &= L_2' \cos \beta, \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} k^* &= k / k_s, \\ q_0^* &= q_0 / k_s, \\ q_1^* &= q_1 / k_s. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

式中 L' 为垂直于坡面的边坡总深度 ($L' = L_1' + L_2'$); k^* 为相对渗透系数; q_0 和 q_1 分别为稳态和瞬态情况下坡面的流量 (如蒸发量或者降雨量), 可以为常数或者

时间的函数。将式 (31)、(32) 代入式 (30), 可以得到考虑植物根系吸水的非饱和渗流控制方程:

$$\frac{\partial^2 k^*}{\partial z^{*2}} + \alpha \frac{\partial k^*}{\partial z} - \frac{\alpha S\left(\frac{z^*}{\cos \beta}\right) H\left(\frac{z^*}{\cos \beta} - \frac{L_1^*}{\cos \beta}\right)}{k_s \cos^2 \beta} = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r) \partial k^*}{k_s \cos^2 \beta \partial t} \quad (33)$$

坡底边界为常水头边界:

$$k^*|_{z^*=0} = \exp(\alpha \psi_0) \quad (34)$$

式中, ψ_0 为底部边界的水头。

稳态情况下的坡面为流量边界 (蒸发或者降雨):

$$\left[\frac{\partial k^*}{\partial z^*} + \alpha k^* \right]_{z^*=L^*} = -\alpha q_0^* \quad (35)$$

瞬态情况下的坡面为降雨边界条件:

$$\left[\frac{\partial k^*}{\partial z^*} + \alpha k^* \right]_{z^*=L^*} = -\alpha q_1^* \quad (36)$$

对于上述边界条件, 笔者的团队推导了稳态和瞬态的解析解, 具体推导过程详见 Ng 等^[46]。稳态下得到的非饱和孔隙水压力分布解析解如下所示:

$$u_w = 10\alpha^{-1} \ln \left\{ \exp[\alpha(\psi_0 - z^*)] + \frac{q_0}{k_s} [\exp(-\alpha z^*) - 1] + \frac{\alpha}{k_s \cos^2 \beta} \int_0^{L^*} G(z^*, x^*) S\left(\frac{x^*}{\cos \beta}\right) H\left(\frac{z^*}{\cos \beta} - \frac{L_1^*}{\cos \beta}\right) dx^* \right\} \quad (37)$$

式 (37) 的右边第一项代表静水状态 (hydrostatic state) 下的孔隙水压力分布, 第二项描述坡面流量变化对孔隙水压力的影响, 第三项描述根系吸水的影响。瞬态情况下, 得到的非饱和孔隙水压力分布解析解如下所示:

$$u_w = 10\alpha^{-1} \ln \left\{ k_0^* + 8 \frac{\cos^2 \beta}{(\theta_s - \theta_r)} \exp \left[\frac{\alpha(L^* - z^*)}{2} \right] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\lambda_n^2 + \frac{\alpha^2}{4} \right) \sin(\lambda_n L^*) \sin(\lambda_n z^*)}{2\alpha + \alpha^2 L^* + 4L^* \lambda_n^2} G(t) \right\} \quad (38)$$

$$G(t) = \int_0^t [q_0 - q_1(\tau)] \exp \left[-\frac{\cos^2 \beta}{\theta_s - \theta_r} \left(\lambda_n^2 + \frac{\alpha^2}{4} \right) (t - \tau) \right] d\tau \quad (39)$$

式 (38) 中 k_0^* 为初始值, 取为植被边坡稳态孔隙水压力, 如附录中式 (A1) 到 (A4) 所示, λ_n 为方程 $\sin(\lambda L^*) + \left(\frac{2\lambda}{\alpha} \right) \cos(\lambda L^*) = 0$ 的第 n 个正根。

式 (38) 中右边第一项为考虑根系吸水的初始孔隙水压力分布, 第二项描述降雨对孔隙水压力的影响。更多信息详见附录。

6.2 根系形状对吸力分布的影响

为了更加深入了解根系形状对吸力（负孔隙水压力）的影响，笔者及团队进行了一些参数分析。采用坡度为 40° 的无限边坡，其中边坡的竖直深度为 5 m，植物根系竖直长度为 0.5 m。土体类型是 CDG。CDG 的水土特征参数如下^[132]：土体饱和渗透系数为 2.2×10^{-6} m/s，渗透函数的减饱和系数是 1.1 m^{-1} ，饱和体积含水率 θ_s 和残余体积含水率 θ_r 分别为 0.45 和 0.05。蒸腾率为 6.6 mm/d ^[133]。

图 45 展示了稳态干燥气候下（例如北京）植物根系形状对吸力分布的影响。本节中，如无特别说明，图中深度为竖直深度。正如预期的那样，裸坡的吸力是最低的。裸坡的最大吸力在坡面，其值为 29 kPa。相比之下，有植被的坡面的吸力大约为裸坡的 2 倍。文献中室内试验发现，有植被土的吸力大约为裸土的 1.5~3 倍^[73-74]。室内试验（图 17，21，25）表明植被产生较高吸力。在考虑的 4 种植根系中，指数形根系形状在坡面产生的吸力（负孔隙水压）最大，其值为无植被坡吸力的 1.3 倍。其次分别为三角形、均布形和椭圆形根系形状。这表明根系为指数形的植物应当优先用于提高和维持土体吸力，降低渗透，增加土体抗剪强度，提高浅层边坡稳定性。基于植物根系形状对吸力的影响，可以将考虑的四种植物根系形状分为两组，一组为指数形和三角形根系形状，另一组为均布形和椭圆形根系形状。这两组根系对吸力分布的不同影响主要是由于根系随着深度的不同分布引起（图 43）。如对于指数形根系形状，大多数根分布于靠近坡面的地方，因而其在靠近坡面的地方吸水也相应多，从而产生最大的吸力。计算结果表明，三角形或者指数形形状通过根系吸水能产生更高的吸力（降低渗透系数提高土体非饱和抗剪强度），从而能更有效地提高浅层边坡稳定性。

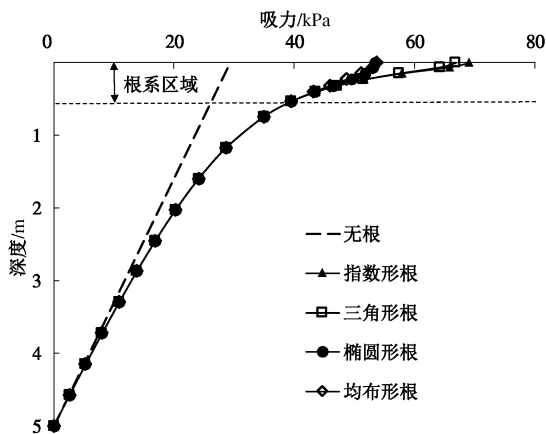


图 45 稳态干燥情况下植物根系形状对吸力分布的影响^[46]

Fig. 45 Influences of root architecture on suction distributions under drying conditions at steady state^[46]

如图 45 示，植物根系吸水不仅影响有根区，还影

响无根区的孔隙水压力分布。根系吸水的影响范围大约为根长度的 5 倍。Leung 等^[133]通过现场植被全风化粗颗粒凝灰岩（Completely Decomposed Tuff，CDT）边坡的研究，发现根系的影响范围为根长的两倍。此外，基于室内试验发现对于种植于 CDG 中的百慕大草，根系吸水的影响范围大于根长的 3 倍。

图 46 展示了降雨强度为 181 mm/d（十年一遇）且降雨时间为 24 h^[134]情况下，孔隙水压力随时间的变化。随着降雨的开始，土体吸力降低。经过 0.1 h 的降雨，指数形根系形状的边坡吸力仍然比椭圆形根系形状的高。在 0.3 m 深度处，二者最大相差 5 kPa。经过 0.5 h 的降雨，不同根系形状下的吸力分布几乎一样。随着降雨的进行，裸坡和植被坡的吸力的差异逐渐消失。经过 6 h 的降雨，植被坡和裸坡在坡面的吸力分别为 18 kPa 和 16 kPa。在深度约为 0.7 m 处，植被坡和裸坡吸力最大的差别为 7 kPa。经过 24 h 降雨后，植被坡的吸力仍比裸坡吸力高 1~2 kPa。这些计算结果表明，在降雨情况下，植被坡（含有指数形根和椭圆形根）的吸力仍然高于裸坡，有助于提高边坡稳定性。

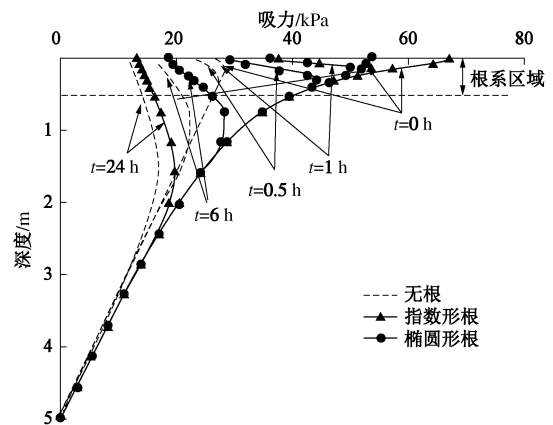


图 46 瞬态降雨对吸力分布的影响^[46]

Fig. 46 Influences of rainfall intensity on suction distributions at transient state^[46]

6.3 植被边坡稳定性理论模型

(1) 考虑植物水力影响的边坡安全系数解析解

基于上述推导的吸力（负孔隙水压力）分布的解析解，笔者团队进一步分析植物的水力作用对边坡稳定性的影响。

非饱和土的剪切强度由扩展莫尔-库仑准则描述（Extended Mohr-Coulomb criterion）^[6]。考虑平行于坡面的力的平衡，边坡安全系数（Factor of Safety (FOS)）可表述为^[127]

$$F_s = \frac{(c' - u_w \tan \phi_b)}{\left[\gamma_d (H_0 - z) + \gamma_w \int_z^{H_0} \theta_w dz \right] \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (40)$$

式中 γ_d 为土的干重度; γ_w 为水的重度; u_w 为孔隙水压力; 稳态和瞬态情况下分别由式 (37)、(38) 计算; z 为铅直坐标, 以向上为正 (如图 44 所示); H_0 为边坡铅直方向的厚度; ϕ_b 为描述非饱和土剪切强度随负孔隙水压力变化的角度; u_a 和 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力。需要指出的是非饱和土剪切强度是吸力 (负孔隙水压力) 的非线性函数^[135]。但是考虑到非饱和边坡稳定性中, 吸力值一般较小 (100 kPa 左右), 出于简化的目的, 在推导过程中采用了一个常量的 ϕ_b 。根据式 (40) 可以计算得到边坡有植被和裸露边坡安全系数, 在一定条件下两者安全系数比值见图 47, 48。

(2) 降雨对植被边坡稳定性的影响

基于 6.2 节的结果, 笔者及其团队开展了一系列参数分析用于研究土体根系吸水对浅层边坡稳定性影响。包括不同根系形状, 不同降雨强度等。在参数分析中坡度为 35° , 竖直厚度为 5 m 的无限边坡被用于研究植被对边坡稳定性的影响。土体类别为 CDG, (干密度为 15 kN/m^3 ^[136])。土体的抗剪强度参数如下, 有效黏聚力为 10 kPa, 有效内摩擦角为 38° , ϕ_b 值为 15° 。土体水土特征参数详见 6.2 节。蒸腾速率为 4.5 mm/d ^[133]。出于对问题的简化, 40% 的降雨量为地表径流^[137], 考虑地表径流和地下水耦合流动分析详见 6.4 节。6.2 节中讲到, 在给定的相同条件下 4 种根形状对吸力的影响可以分为两组, 其中指数形和三角形分为一组, 均布形和椭圆形为一组。指数形可以引起最大的吸力而椭圆形导致的吸力最小。

本研究中指数形和椭圆形根系用于研究植被根系吸水对浅层边坡稳定研究。为了合理的比较, 降雨前所有边坡都假定到达稳定状态。图 47 展示了降雨过程中, 植被边坡和裸土边坡稳定安全系数的比值。在初始条件下, 指数形根系形状的植被边坡的安全系数的比值为椭圆形根系形状的 1.2 倍。降雨 1 h ($t=1 \text{ h}$), 指数形与椭圆形根系形状的安全系数比值的差异逐渐减小, 这是由于二者的吸力差异随着降雨逐渐减小 (图 46)。虽然降雨 1 h 后, 靠近坡面的有根区域安全系数比值显著减小, 但是在 0.5 m 深度处植被土的安全系数比裸土边坡的高了 15%。此外, 由于降雨入渗尚未到达无根区, 无根区的安全系数比值没有变化。随着降雨继续进行, 无根区的安全系数比值也开始减小。在降雨结束的时 ($t=24 \text{ h}$), 植被边坡的安全系数仍比裸土的高了 2% 左右。降雨 24 h 后, 植被边坡的吸力仍然大于裸土边坡 (图 46)。该计算结果表明, 在降雨初期, 指数形根系形状能更有效的提高浅层边坡稳定安全系数。但随着降雨的继续, 不同根系形状的安

全系数差异逐渐减小。

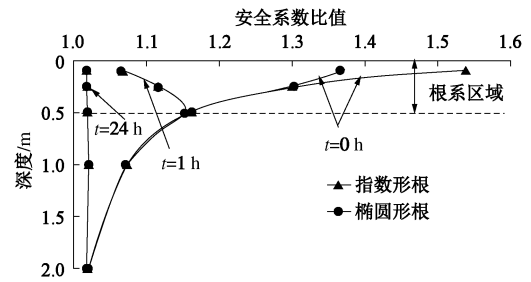
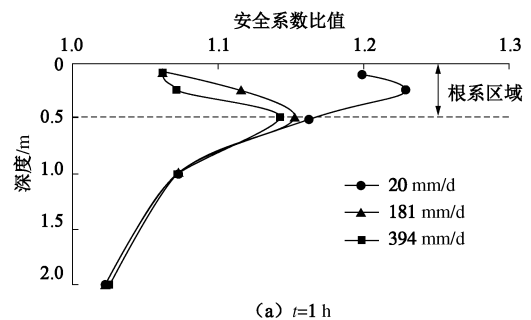


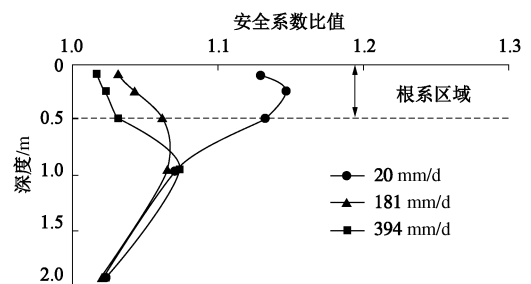
图 47 瞬态降雨 (181 mm/d) 24 h 后植树边坡与裸坡的安全系数比值^[138]

Fig. 47 Computed ratios of FOS in vegetated to bare soil slope immediately after rainfall intensity of 181mm/day for 24 hours^[138]

之前的计算结果表明, 降雨中, 植被可以提高边坡稳定性。为了更加深入研究不同降雨强度对植被边坡稳定性影响, 3 种不同降雨强度 (20 mm/d, 一年一遇; 181 mm/d, 十年一遇; 394 mm/d, 百年一遇) 分别表示小雨, 中雨和强降雨, 用于研究不同降雨强度下植被对浅层边坡稳定性研究。根据图 47 的结果, 得到椭圆形根较指数形根更危险。因此, 图 48 展示植被边坡 (椭圆形根) 和裸露边坡在不同降雨强度下边坡安全系数的比值。图 48 (a) 说明在降雨 1 h 后, 植被边坡的安全系数比裸露边坡高。降雨强度为 20 mm/d, 植被边坡根系区比裸露边坡安全系数高 16%~22%。图 48 (b) 展示了降雨 4 h 后, 无根系区到深度 1 m 处安全系数降低。在降雨强度为 181 mm/d 和 394 mm/d 的情况下, 在深度 1 m 的位置, 植被边坡的安全系数仍然大于裸露边坡其值大约为 7%。



(a) $t=1 \text{ h}$



(b) $t=4 \text{ h}$

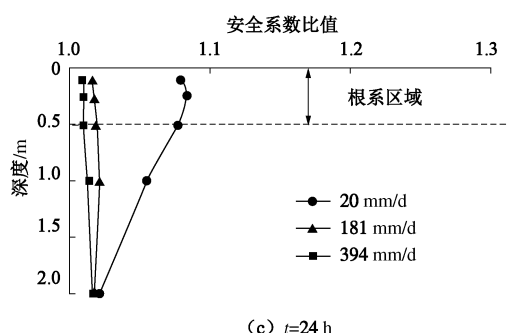


图 48 瞬态椭圆形根系植被边坡和裸露边坡在不同降雨强度下的安全系数比值^[138]

Fig. 48 Computed ratios of FOS in parabolic rooted to bare soil slope immediately after different rainfall intensities for 24 hours^[138]

图 48 (c) 展现了降雨强度为 20 mm/d, 降雨 24 h 后在根系区内植被边坡的安全系数比裸露边坡大 10%, 无根区 (深度 2 m) 植被边坡安全系数比裸露边坡大 3%。甚至, 在降雨强度为 394 mm/d, 降雨 24 h 后, 植被边坡的安全系数比裸露边坡的安全系数大 2%。这些结果表明, 降雨情况下, 在根系区内, 植物根系水力作用边坡稳定性的作用随着降雨强度和降雨时间的增加而减少。但是在长时间降雨下, 相比于根系区内的吸力, 无根区植物根吸水产生的吸力能够得到较好的保持, 从而有助于提高边坡稳定性。现场试验^[93]也表明无树植被或草植被在降雨过程中根系区域以外维持较高吸力。

6.4 考虑植物的地表径流与地下水耦合流动

在目前的边坡渗流分析中, 地表径流与地下水的耦合流动常常被忽略, 此外植物对地表径流和地下水耦合流动的作用尚不清楚。Yen^[139]在新的坐标系下建立了陡坡地表水流动模型, 如图 49 所示。对于一维地表水流动问题, 笔者采用 Yen^[139]提出的控制方程组, 如式 (41)、(42) 所示, 该方程组适用于坡度较缓的河渠等。

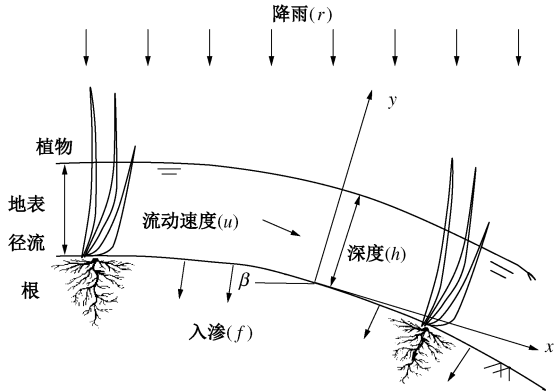


图 49 考虑植物作用的地表径流与地下水耦合流动示意图
Fig. 49 Illustration of conjunctive surface and subsurface flow with vegetation

由地表径流的质量守恒可得:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} = r - f \quad , \quad (41)$$

式中, x 坐标沿着地表的切线方向指向坡底, t 为时间, h 为地表积水深度, u 为断面平均流速, r 为降雨强度, f 为入渗率。

由地表径流的动量守恒可得

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t} + \frac{\partial (u^2 h)}{\partial x} + gh \cos \beta \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{GS} - S_f) \quad , \quad (42)$$

式中, β 为斜坡与水平面的夹角, S_{GS} 为底坡降 ($S_{GS} = \sin \beta$), 描述地表径流的驱动力, S_f 为摩阻坡降, 描述单位长度地表摩擦等造成的能量损耗, g 为重力加速度。

Morita 等^[140]认为, 坡地径流通常处于低雷诺数区段, 建议采用达西-魏斯巴赫 (Darcy-Weisbach) 公式确定摩阻坡降 S_f :

$$S_f = f_d \frac{u^2}{8gh} \quad , \quad (43)$$

式中, f_d 为摩阻系数, 反映流动过程中流体能量的耗散。由文献^[141] f_d 可以表示为

$$f_d = \frac{8gn}{h^{1/6}} \quad , \quad (44)$$

式中, n 为曼宁系数 (糙率), 是综合反映土体表面粗糙情况对水流影响的一个系数, 主要受地表不规则性 (如地表凹凸起伏)、地表土种类、地表障碍物 (如碎屑沉积物) 以及植被的影响^[141-142]。其中植物的影响主要来自植物的密度, 植物相对于流速的分布与植物的种类等。因此考虑上述各种因素的曼宁系数的计算公式是非常困难的, 通常采取实测值进行计算。Engman^[141]在收集了文献数据的基础上, 给出了如表 1 的建议值。

表 1 地表径流的曼宁系数 (修改自文献^[141])

Table 1 Manning's roughness coefficient for overland flow (after Ref. [141])

地表情况		推荐值	数值范围
裸土	砂	0.01	0.010~0.016
	卵石	0.02	0.012~0.03
	黏土-粉土	0.02	0.012~0.033
植被	蓝草草皮	0.45	0.39~0.63
土	百慕大草	0.41	0.30~0.48

式 (41)、(42) 共同描述了考虑植物影响的地表径流。此外, 地下水流动的控制方程详见式 (21), 其中植物对地下水流动的影响通过根系吸水 (式 (21) 中) 来考虑, 同时考虑了不同植物根系形状 (式 (25))。

式 (21)、(41)、(42) 共同描述了考虑植物作用下的地表水与地下水耦合渗流分析。笔者及其团队利用有限元方法对式 (21)、(41)、(42) 进行了求解, 求解方法详见汤有光等^[143]。与汤有光等^[143]不同的是, 式 (21)、(41)、(42) 中考虑了植物对地表径流以及地下水流动的影响。在此节中, 由于地表径流的存在, 坡面存在正孔隙水压力, 由于吸力 ($u_a - u_w$) 为正值, 因此此节中, 计算结果以孔隙水压力表示。

笔者及其团队利用所开发的程序, 对图 44 所示的植被边坡进行了考虑地表水和地下水耦合作用的渗流分析。斜坡长 100 m, 根系形状为指数形, 土体参数与边界条件与 6.2 节一样, 初始值为稳态情况下, 指数形根只考虑根系吸水的孔隙水压力分布 (图 45)。由于式 (41)、(42) 适用于坡度较小的边坡, 因此在此算例中坡度为 3° 。降雨强度为 89 mm/h, 降雨时间 3 h (对应于十年一遇的暴雨水平^[143]), 降雨结束后继续模拟 1 h。笔者及团队开展了两种工况的数值模拟, 第一种工况仅考虑了地下水渗流分析 (式 (21), 没有考虑地表水的流动 (式 (41)、(42)))。在此种工况下, 坡面的边界条件与 SEEP/W^[144]一样, 即当坡面孔隙水压力小于零的时候, 坡面为恒定的降雨边界条件; 当孔隙水压力大于等于零的时候, 坡面为常水头边界条件, 孔隙水压力为零 (即不考虑地表径流的影响)。第二种工况为考虑了地表水和地下水耦合作用的渗流分析。通过比较这两种工况, 可以得到地表水与地下水耦合作用对孔隙水压力以及边坡安全系数的影响。

图 50 展示了降雨过程中孔隙水压力沿着 A—A' 截面 (图 44) 的分布。在降雨过程结束后 0.1 h, 在深度 1 m 以上, 不考虑地表径流得到的孔隙水压力要比考虑地表径流得到的小 (吸力大)。如在地表, 不考虑地表径流得到的孔隙水压力为 -6 kPa 左右, 而考虑了地表径流得到的孔隙水压力为 0 kPa 左右。这表明不考虑地表径流, 会高估浅层土体的负孔隙水压力, 从而高估边坡浅层稳定安全系数 (图 51)。这是由于经过 3 h 强降雨后, 土体表面产生地表径流。这部分地表径流在降雨结束后仍存在于地表, 在土体表面产生入渗量, 增大土体孔隙水压力。在不考虑地表径流影响的数值模拟分析中, 降雨结束后, 土体表面的入渗量为 0, 因此得到的孔隙水压力小。当降雨结束后 1 h, 不考虑地表径流得到的孔隙水压力略小于考虑了地表径流的结果。这是由于考虑地表径流地下水的耦合作用, 水分入渗较多, 斜坡孔隙水压增加较快。

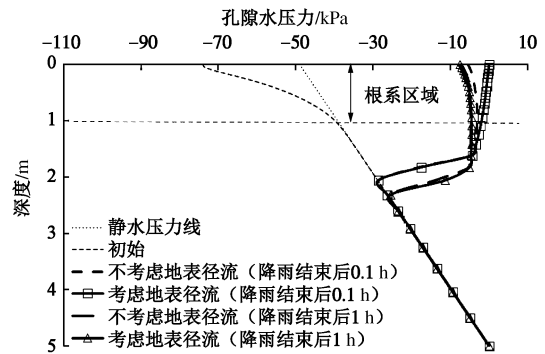


图 50 地表径流对植被土 (指数形根) 孔隙水压力分布的影响

Fig. 50 Effects of surface flow on distribution of pore-water pressure for vegetated slope with exponential root architecture

图 51 展示了植被边坡沿着 A—A' 截面, 不考虑地表径流 (前述工况一) 与考虑地表径流 (前述工况二) 下边坡安全系数比值。边坡安全系数由式 (40) 计算。从图中可见, 在降雨结束后 0.1 h, 在深度小于 2 m 的时候, 不考虑地表径流与考虑地表径流下边坡安全系数比值大于 1, 且随着深度的减小而增加。这表明不考虑地表径流与地下水的耦合流动高估了边坡安全系数。在靠近边坡表面部分, 不考虑耦合流动的工况的安全系数比考虑耦合流动的高了大概 10%。这是由于考虑了地表径流影响的时候, 降雨结束后坡面仍然有地表径流的存在, 因此坡面的孔隙水压力为正值 (约为 0.013 kPa, 如图 50 所示), 而忽略地表径流影响下, 孔隙水压力约为 -5 kPa。这表明, 对于浅层边坡稳定性分析, 不考虑地表径流与地下水耦合流动会高估了边坡安全系数。

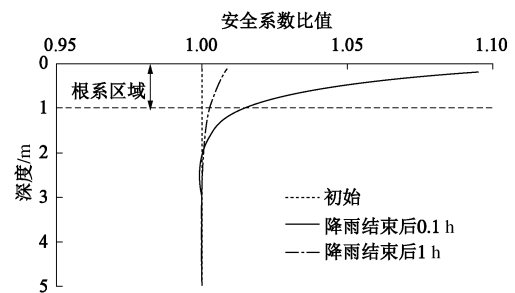


图 51 植被边坡 (指数形根系) 不考虑地表径流与考虑地表径流下边坡安全系数比值

Fig. 51 Comparison between ratios of FOS with and without consideration of surface runoff

7 离心机试验和数值模拟

离心机试验技术已经被广泛运用在边坡工程稳定性研究^[145]。使用离心机模型进行边坡稳定性研究的主要优点是, 可以通过提高模拟的重力加速度级别 (g-level), 让小尺度物理模型处在与原型相应的力学

状态下,从而有效模拟原型边坡的稳定性。Sonnenberg 等^[146]使用离心机在 15g 状态下,采用真实的植物,研究植物对边坡的加固作用。在试验开始前,植物的枝叶部分被全部切掉,植物的蒸腾作用为零。因此他们的试验仅能研究植物的力学加筋作用。从第 4 节和第 6 节可知,植物蒸腾作用可以提高土体吸力,但是植物蒸腾作用产生的吸力与植物的力学加筋对边坡的稳定性影响尚未清楚。离心机试验技术提供了比现场试验更好的控制测试环境,能更好地了解土体与植物相互作用对边坡稳定的影响机理。

植物具有不同的根系形状(6.1 节图 42)。在目前研究中,根系形状对植物加固边坡的影响尚不清楚,特别是其对根系吸水提高边坡稳定性的影响。一些研究团队尝试用理想化几何形状的人造根来研究其抗拔能力^[147-149]和在离心机中量化根的力学性能对边坡稳定性影响^[150]。但是这些研究忽略了根系吸水对边坡稳定性的影响。

本节阐述笔者及其团队开发的运用于离心机中的新型人造根系统,以及利用其所开展的离心机模拟试验^[116]。试验中首次研究了不同根系形状的力学加筋机理与根系吸水对边坡稳定性的影响。所有的离心机试验都是在香港科技大学离心机实验室开展的。

本节首先介绍了开发的新型人造根系统的工作原理及其在 1g 和 15g 试验下的有效性的验证,在此基础

上利用离心机试验研究模拟植物根形状和蒸腾作用对根抗拔强度的影响,为分析人造根系统的力学加筋和水力作用对边坡稳定影响垫定了基础。最后开展了人造根加固边坡的离心机试验研究,不仅研究了根系的力学加筋作用,更重要的是研究了根形状对植被边坡孔隙水压力分布及稳定性的影响。

在边坡中,坡面由于降雨产生正孔隙水压力,因为吸力为 $(u_a - u_w)$ (式 (1)),不允许为负值,所以在本节中吸力用负孔隙水压力来表示。

7.1 试验材料和方法

(1) 物理模拟植物根系吸水的新型人造根系统
图 52 展示了新型人造根系统的基本组成^[116]。它主要由中空管状的醋酸纤维 (Cellulose Acetate, CA) 材料组成,长度为 100 mm,内径和外径分别为 4 mm 和 6 mm。醋酸纤维管的一端由环氧树脂紧密无空隙地黏结到中空的金属接头上。金属接头的另一端为气体快速接头,以便于连接到真空系统。醋酸纤维管的另一端由橡胶密封,并用环氧树脂将连接口的缝隙严实黏结。醋酸纤维材料不仅具有较大的进气值 (100 kPa),可以有效模拟降雨过程中土体所能保持的吸力;此外该材料也能较好的模拟植物根系的力学特性,该材料的抗拉强度为 31 MPa,弹性模量为 83 MPa。在 15g ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) 条件下,离心机试验相似比见表 2。

表 2 离心机试验相似比 (15g)

Table 2 Summary of scaling factors relevant to this study at 15g					
物理量		量纲	缩放系数 (模型/原型)	模型值	原型值 ^①
人造根几何尺寸	长度	L	1/N	50 mm	750 mm
	外径	L	1/N	6 mm	90 mm
	内径	L	1/N	4 mm	60 mm
	横截面积 A	L^2	$1/N^2$	$1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
	惯性矩 I	L^4	$1/N^4$	$5.1 \times 10^{-11} \text{ m}^4$	$2.6 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
人造根特性	人造根的抗拉强度 σ_t ^②	M/LT^2	1	$3.1 \times 10^4 \text{ kPa}$	$3.1 \times 10^4 \text{ kPa}$
	人造根的弹性模量 E	M/LT^2	1	$8.3 \times 10^4 \text{ kPa}$	$8.3 \times 10^4 \text{ kPa}$
	根的轴向刚度 EA	ML/T^2	$1/N^2$	$1.3 \text{ kPa} \cdot \text{m}^2$	$2.9 \times 10^2 \text{ kPa} \cdot \text{m}^2$
	根的抗弯刚度 EI	ML^3/T^2	$1/N^4$	$4.2 \times 10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{m}^4$	$2.2 \times 10^{-1} \text{ kPa} \cdot \text{m}^4$
	过滤器的进气值	M/LT^2	1	100 kPa	100 kPa
	过滤器水力传导系数 ^③	L/T_{diff}	N	$2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	$1.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
土体-大气界面	降雨强度 ^③	L/T_{diff}	N	1050 mm/h	70 mm/h
渗流	水流速 ^②	L^3/T_{diff}	1/N	实测值	
	渗透系数 ^②	L/T_{diff}	N		
	水力梯度 ^②	无量纲	1		
	吸力 ^③	M/LT^2	1		

注: ①原型尺寸在 15g (例如: $N = 15$); ②动态条件下时间 (T) 的缩放系数为 $1/N$, 扩散条件下时间的缩放系数 ($1/N^2$); ③文献[153, 154]。



(图中所有长度均为模型尺寸)

图 52 一种新的由高进气值醋酸纤维组成的人造根^[116]

Fig. 52 Overview of a new root model using cellulose acetate as a high AEV porous filter^[116] (in model scale)

笔者及其团队利用所研发的新型人造根系统, 模拟 3 种主要根系形状^[151], 分别为直根形、心形和板状形 (图 53)。本节中的直根形和心形根分别与第 6 节中的均布形根和指数形根 (图 42) 类似。这 3 种根形状分别对应 3 种香港本地植物: 鸭脚木树 (*Rhodomyrtus tomentosa*) 和毛稔 (*Melastoma sanguineum*)。这 3 种植物广泛应用于边坡绿化和边坡生态恢复工程^[66]。图 53 中长度为原型尺寸 (原型与离心机模型的相似比为 15)。直根形、心形根的长为 0.75 m, 板形根的根长为 0.1 m。本研究所采用的根形状的根面积比 (RAR) 与现场真实根的测量结果一致 (图 54), 这表明本研究对根的简化是合理的。

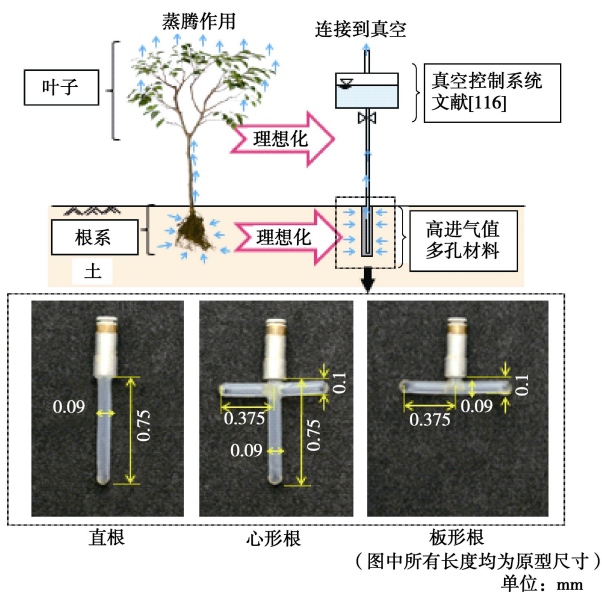
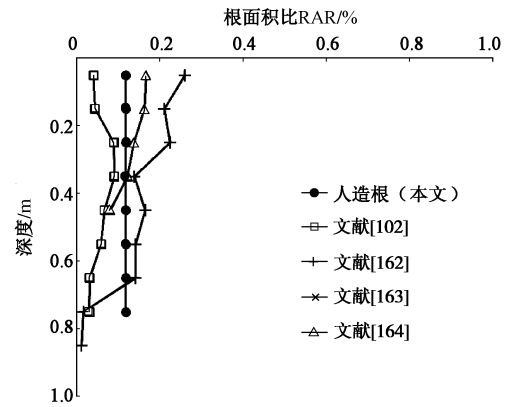
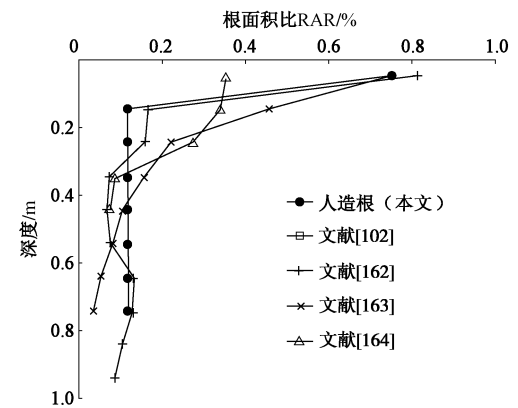
(图中所有长度均为原型尺寸)
单位: mm图 53 3 种代表性根系形状在人造根系统中的简化^[116, 149]

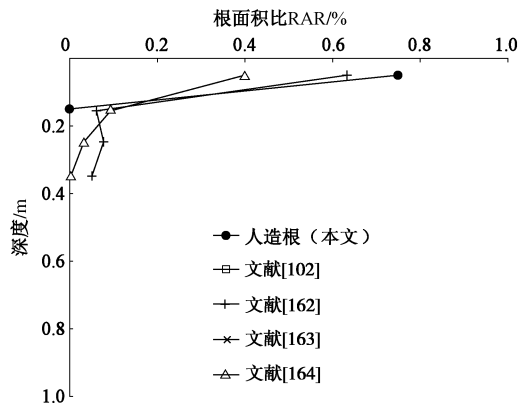
Fig. 53 Idealisation and simplification of plant root systems with three representative architectures^[116, 149]



(a) 直根形 (tap-shaped)



(b) 心形根 (heart-shaped)



(c) 板形根 (plate-shaped)

图 54 原型尺寸下人造根系统和现场真实根的 RAR 的比较^[149]

Fig. 54 Comparison of RAR profiles of root models (in prototype scale) and real roots in the field^[149]

(2) 试验土体及性质

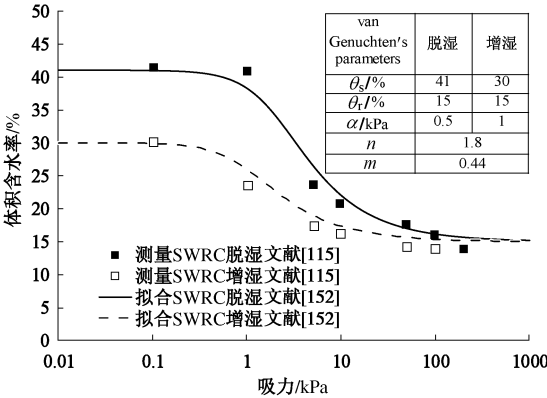
试验中所用的土体为 CDG。除非特别说明, 试验中土体压实度为 95%。初始质量含水率为 15.1%。土体以及人造根的水力参数如表 3 所示。图 55 (a) 为压力板试验测得的 CDG 干湿循环的 SWRC, 每条 SWRC 由 van Genuchten^[152]提出的表达式拟合, 拟合参数 (α , n 和 m) 如图 55 (a) 所示。图 55 (b) 展示了干湿路径下由 van Genuchten^[152]提出的方法预测的非饱和和渗透系数方程, 其中饱和和渗透系数为实测值。

表 3 土和人造根参数以及有限元渗流-边坡稳定性分析输入的参数^[119]

Table 3 Summary of soil and root properties and input parameters used for finite element seepage-stability analysis^[119]

参数	值	单位	参考文献
土体物理性质	重度 γ_t	20	kN/m ³
	比重 G_s	2.59	—
	最大干密度	1890	kg/m ³
	最优含水率	15.1	标准击实试验 ^[156]
	砂含量 (≤ 2 mm)	56.8	%
	粉土含量 (≤ 63 μ m)	39.1	
	黏土含量 (≤ 2 μ m)	4.1	
	D_{10}	0.005	
	D_{30}	0.041	mm
	D_{50}	0.081	
	D_{60}	0.115	
	塑限 w_p	22.7	室内试验
	液限 w_L	32.8	
	塑性指数 I_p	10.1	
土体力学特性	有效黏聚力 c'	0	kPa
	极限状态摩擦角 ϕ'_c	37	Hossain 等 ^[157]
	剪胀角 ϕ_d	5	
	杨氏模量 E	35	MPa
	泊松比 ν	0.26	
土体水力特性	饱和渗透率 k_s	1×10^{-7}	m/s
	进气值 (AEV)	1	kPa
	饱和含水率 θ_s		%
	残余含水率 θ_r		
	基于 van Genuchten ^[152] 的拟合参数	α	详见图 55
		n	kPa ⁻¹
人造根力学特性		m	—
	抗拉强度 σ_t	3.1×10^4	kPa
	杨氏模量 E	8.3×10^4	kPa
人造根水力特性	人造根与土体接触的摩擦角	34	Kanchoom 等 ^[149]
	饱和渗透系数 k_s	2×10^{-6}	m/s
人造根水力特性	进气值 (AEV)	100	kPa
			Ng 等 ^[116]

这些水力特性参数用于人造根加固的模型边坡的瞬态渗流分析（详见 7.4 节）。



(a) 实测和拟合的土的特水能力曲线

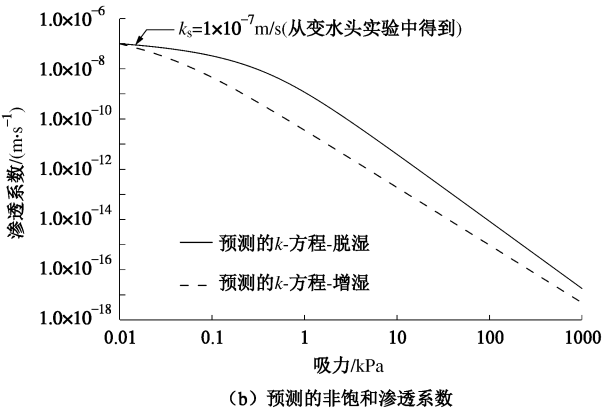


图 55 CDG 的水力参数^[119]

Fig. 55 Measured and fitted SWRCs and predicted water permeability function of CDG ^[119]

(3) 土-人造根接触面的性质

为了分析离心机中人造根拉拔试验, 笔者及研究团队开展了直剪试验, 得到了土-人造根接触面的性质。在不同法向应力下, 开展了 4 个接触面的直剪试验, 得到试验结果如图 56 所示, 从而得到土-人造根接触面的峰值摩擦角与极限摩擦角 (34°) 比土-真实根的值 ($36.1^\circ \sim 37.9^\circ$) 略小^[149]。这表明所开发的人造根系统能较好地模拟土-根接触面的性质。

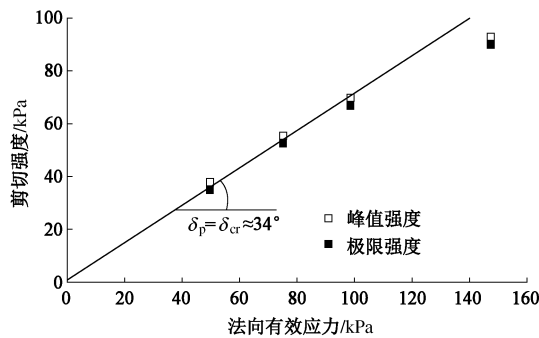


图 56 土-人造根接触面峰值强度与极限强度的强度包线^[149]

Fig. 56 Peak and ultimate interface strength of soil-root model^[149]

7.2 新型人造根系统模拟植物根系吸水

此节阐述笔者及团队对新开发的人造根系统模拟植物根系吸水的验证, 所采用的人造根如图 52 所示。开展了 1g 和 15g 情况下的验证试验, 详见文献[116, 149]。

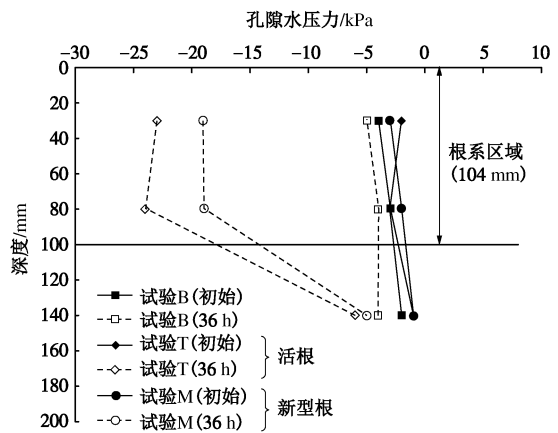
(1) 验证新型人造根模拟植物根系吸水

为了证明新型人造根能够产生吸力, 笔者及团队在 1g 情况下开展了 3 组试验^[116, 149], 分别为裸露土(试验 B)、人造根系统(试验 M)和植被土(试验 T, 鸭脚木树)。试验中用到了边长为 300 mm 的立方体模型槽, 试验中土体压实度为 80%, 初始质量含水率为 12%。试验 M 和试验 T 组在模型槽中心分别装有人造根系统(模拟 100 mm 根长)以及一棵鸭脚木树(根长 104 mm)。各组试验裸露土的土体表面均由塑料膜覆盖, 从而防止蒸发所产生的吸力增加。

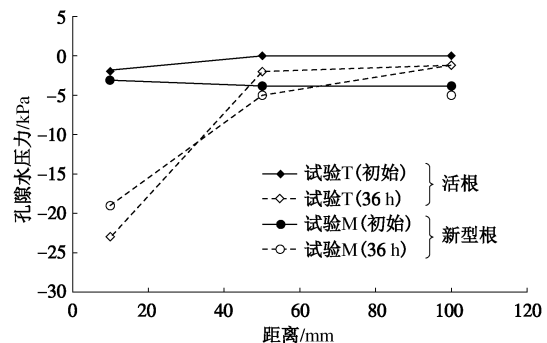
图 57 (a) 比较了 1g 情况下, 裸露土、人造根系统和植被土中所产生的垂直方向的孔隙水压力分布。各组试验初始的孔隙水压力基本一样。36 h 后, 试验 B 负孔隙水压力略微增加(少于 2 kPa)。这是由于一部分水通过试验模型槽底部的开孔流失。与此相对应, 试验 T 和试验 M 在深度 140 mm 以上负孔隙水压力均有较大增加。这是分别由于植物的蒸腾作用引起的根系吸水和对人造根系统施加的真空压力引起。

虽然土体水通过模型槽底部开孔的向下流动也会引起一部分负孔隙水压力的增加, 但是由试验 B 可见这部分的值是非常小的(小于 2 kPa)。人造根系统(试验 M)和植被土(试验 T)产生的负孔隙水压力分布

形状是类似的。真实根产生的最大负孔隙水压力比人造根大了大约 20%。从图中可见, 对于人造根系统和真实根, 在根系区域以外, 仍然有较大的负孔隙水压力的产生。



(a) 垂直孔隙水压力分布



(b) 水平孔隙水压力分布

图 57 在 1g 情况下新的人造根系统(试验 M)和实际植被(试验 T)所产生的孔隙水压力的比较^[116]

Fig. 57 Comparison of measured (a) vertical and (b) horizontal distributions of induced pore-water pressure between the new root system (Test M) and living tree (Test T) at 1g^[116]

图 57 (b) 比较了人造根系统(新型根, 试验 M)和真实根(活根, 试验 T)中所产生的水平方向的孔隙水压力分布。图中距离为测量点到人造根的水平距离。所有的测量点都位于深度 30 mm 处。对于真实根(试验 T), 在距离根 10 mm 处负孔隙水压力达到最大值, 随着水平距离的继续增大, 负孔隙水压力减小。人造根系统(试验 M)产生的负孔隙水压力的分布趋势与真实根(试验 T)类似。这表明在 1g 情况下, 新开发的人造根系统能良好地模拟真实植物根系吸水。

(2) 在 15g 情况下新型人造根系统模拟植物根系吸水

图 58 展示了离心机模型中在 15g 情况下人造根系统(试验 C)、1g 情况下真实根(试验 T)以及 1g 情况下人造根系统(试验 M)产生的孔隙水压力分布。

此外,还将本研究得到的孔隙水压力分布与3个现场实测的结果进行比较。在离心机模型里面,孔隙水压力的相似比为1.0。从图58中可见,36 h后,试验C,试验T和试验M所得到的孔隙水压力分布是类似的。

图58中,根区内的负孔隙水压力值要大于根系区域以下的结果。但是在15g下离心机模拟的人造根系统的负孔隙水压力要小于1g情况下的结果。这主要是由于15g下,土体的应力增加,导致孔隙比降低引起土体的渗透系数显著减小。所选的3个现场试验都是在种有树或灌木的平地开展的^[159, 161]。土体为砂土,根形状大致为直根形,与本文中人造根系统类似。此外,各个现场案例的初始孔隙水压力分布与人造根系统试验类似(试验C,试验M),也是经过36 h的干燥过程后测量孔隙水压力分布。从图中可见,在15g情况下,人造根系统产生的负孔隙水压力与3个现场案例的结果大致一样。这表明新开发的人造根系统能够在离心机中较好的模拟现场植物根系吸水产生的负孔隙水压力。

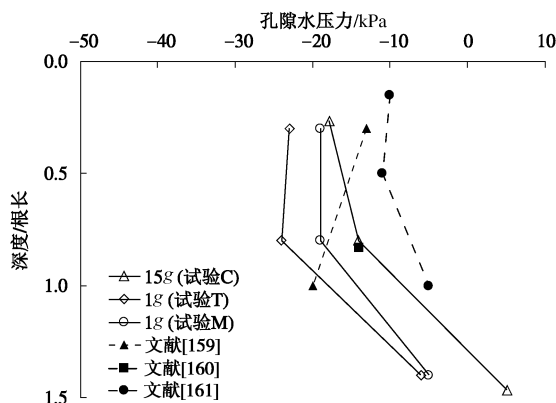


图58 干燥36 h后1g Test M, 15g Test C 和现场实测孔隙水压力分布的比较^[116]

Fig. 58 Comparison of the distributions of pore-water pressure after 36 hours of drying period^[116]

7.3 离心机试验研究根形状和蒸腾作用对根抗拔强度的影响

目前植物蒸腾作用和根系形状对植物抗拔强度的影响尚不清楚。本节采用所开发的人造根系统,研究根形状和蒸腾作用对根抗拔强度的影响^[149]。

(1) 离心机模拟根抗拔试验准备

图59展示了离心机模型以及测量点的分布。土体从坡底到坡顶分6层击实。当土体击实到第1层、第3层和第5层的时候,人造根系统安置于土体表面(人造根系统分布如图59(a))。其它土层相继击实以确保每个人造根和土体接触良好。人造根间距为1.73 m(原型尺寸),从而确保人造根系统的RAR与图54所示的现场植物RAR值一致。试验中未控制地下水

位。模型槽的底部为不透水边界。试验中降雨在土体表面产生的地表径流直接通过模型槽边角地方的管道排掉。模型槽表面由盖子遮住,以减小试验中由于离心机转动产生风导致的蒸发影响。当模型槽安装好后,所有人造根系统都连接到真空系统,以模拟植物蒸腾作用。土体孔隙水压力变化由孔压传感器(Pore Pressure Transducers, PPTs (Druck PDCR-81))测得。孔压传感器的分布如图59(b)所示。

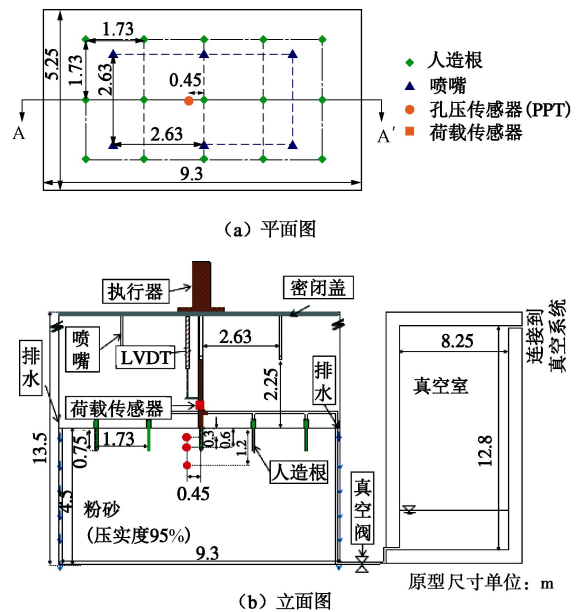


图59 离心机模型以及测量点的布置^[149]

Fig. 59 Top view and cross section A-A' of a typical centrifuge model and instrumentation for testing tap-shaped roots^[149]

(2) 人造根抗拔强度的离心机试验结果

a) 根系形状对孔隙水压力分布的影响

图60展示了离心机试验中模拟降雨后孔隙水压力沿深度的分布。降雨强度70 mm/h,降雨2 h后(十年一遇),在根区域内,直根形和心形根所保持的土体负孔隙水压力值趋势一致(图60(a)和图60(b)),在根系区内,负孔隙水压力随深度的增加而增大,相反的,在根系区外负孔隙水压力随深度增加而减小。吸力最大值大概位于根系深度位置。降雨强度为70 mm/h,降雨8 h后(千年一遇),直根形和心形根区域内产生了2 kPa左右的正孔隙水压力。板形根产生正孔隙水压力如图60(c)所示,大于直根形和心形根的孔隙水压力。

b) 负孔隙水压力对抗拔强度的影响

图61展示在降雨2 h和降雨8 h后直根形的力-位移曲线。当负孔隙水压力存在的时候(直根形-2),达到峰值所需要的位移和峰值抗拔强度值比饱和(直根形-8)的情况高大概60%。到达峰值之后,抗拔强度随着土-人造根接触面的减少而减小。当负孔隙水压

力存在的时候(直根形-2), 土体剪胀随着负孔隙水压力增加而增加^[11, 165], 从而导致人造根法向应力增加, 最终导致非饱和(直根形-2)情况下的抗拔强度大于饱和情况(直根形-8)。

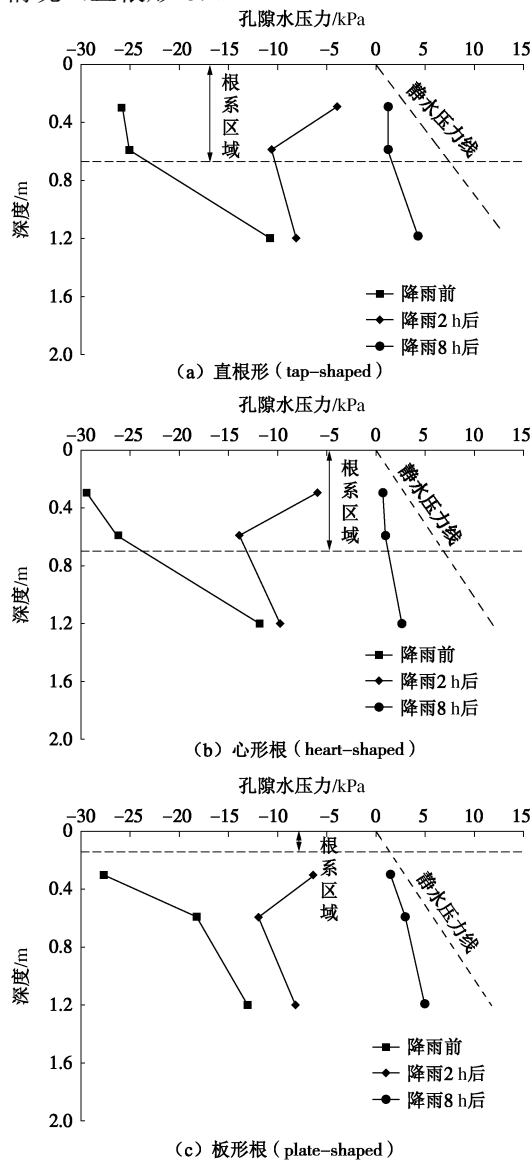


图 60 降雨后孔隙水压力沿深度的分布^[149]

Fig. 60 Distributions of pore water pressure along depth after rainfall^[149]

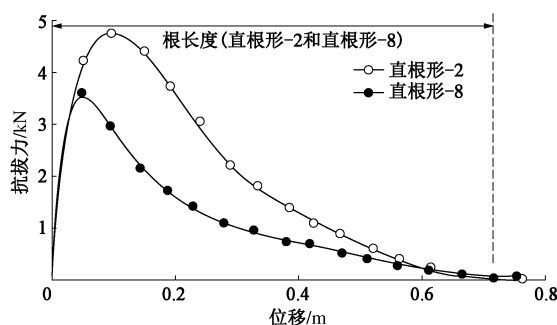


图 61 降雨 2 h 与 8 h 后直根形的抗拔力的比较^[149]

Fig. 61 Comparison of measured pull-out resistance of tap-shaped roots after rainfall durations of 2 hours (T-2) and 8 hours (T-8)^[149]

c) 根形状对抗拔力的影响

图 62 展示了降雨 8 h 后直根形、心形根和板形根的抗拔力的比较。心形根的峰值抗拔力 (3.9 kN) 略大于直根形 (3.5 kN, 直根形)。此外, 心形根 (H) 峰后抗拔力比直根形降低得更快。由于降雨后直根和心形根的孔隙水压力分布类似 (如图 60 (a) 和 60 (b) 所示), 二者抗拔力的差异主要由心形根的两个分支引起。但是, 由图 62 可见, 二者抗拔力的差异很小, 因此心形根的两只水平分支对抗拔力的影响比较小, 这是由于水平分支位于土体的浅层, 土体压力较小 (2 kN 左右)。板形根 (P) 的抗拔力为 1.2 kN, 远小于直根形和心形根。峰值之后, 抗拔力降低速率比另外两种根形更大。这主要是由于板形根只有两个水平分支, 且埋在浅层土体, 从而法向应力较小。这与 Nilaweera 等^[166]的现场试验结果相吻合, 他们发现大叶木槿 (*Hibiscus macrophyllus*, 类似心形根) 的抗拔力约为 4 kN, 比大叶糖胶树 (*Alstonia macrophylla*, 类似板形根) 大了 50%。

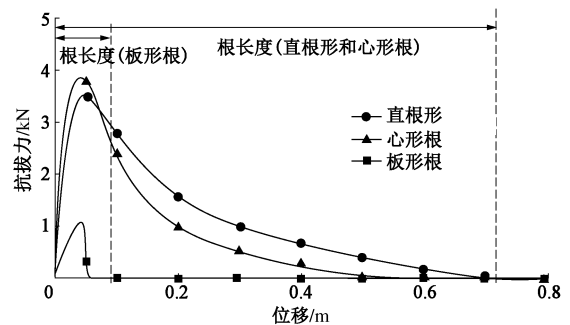


图 62 降雨 8 h 直根形 (T)、心形 (H) 和板形根 (P) 的抗拔力的比较^[149]

Fig. 62 Comparison of measured pull-out resistance of tap (T)-, heart (H)- and plate (P)-shaped roots after 8 hours of rainfall^[149]

7.4 离心机试验模拟植被边坡中根形状对孔隙水压力及稳定性的影响

本节简要阐述利用新开发的人造根系统开展的离心机模型边坡试验结果, 本试验中首次同时研究了植物力学加筋作用与水力作用, 详细内容可参考文献 [119]。总共开展了 3 组离心机试验, 分别研究直根形、心形根和板形根对模拟的植被边坡孔隙水压力分布及稳定性的影响。模型边坡坡角为 45° 和 60° 。对于每一组离心机试验, 首先用人造根系统模拟“植物蒸腾作用”产生的负孔隙水压力, 再施加人工降雨。模拟的重力加速度为 $15g$ 。

(1) 离心机植被边坡模型 (45°) 和测量点分布 边坡面上均匀分布着 15 个人造根 (每列 3 个, 每行 5 个)。本节中的尺寸均为原型尺寸。所有的人造根均垂直于边坡面, 人造根的间距为 1.73 m。在此间距

下, 模型试验的 RAR 与现场真实根的测量结果一致 (图 54)。离心机试验从坡底到坡顶分 6 层击实, 步骤与第 7.3 节一样。每个人造根系统通过塑料导管连接到真空系统上 (图 63)。人工降雨施加在边坡面上。通过 6 个固定在模型箱上的喷嘴 (图 63), 可以产生水雾, 从而模拟降雨。使用雾状的降雨可以减少雨滴对土体的冲击引起的边坡土体侵蚀 (soil erosion) [167]。在每个边坡模型安装了 4 个孔压传感器, 如图 63 所示的 P1~P4。

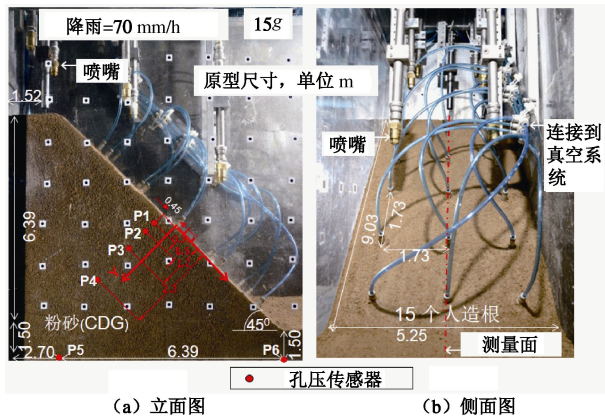


图 63 离心机模型与测量点布置^[119] (45° 边坡)

Fig. 63 (a) Elevation and (b) side view of a 45° slope model and instrumentation in centrifuge^[119]

(2) 瞬态渗流以及模型植被边坡 (45°) 稳定性的数值模拟

本研究采用有限元程序 SEEP/W^[144] (控制方程详见式 (21)) 开展瞬态渗流分析, 研究离心机模型边坡中孔隙水压力的变化。不同于第 6 节 (采用汇项 (式 (21)) 来模拟根系吸水), 此处人造根与坡面的交界处, 设置为常水头 (其值为试验中施加的真空压力对应的水头, 如图 64 (a) 所示), 这是为了直接模拟人造根系统的根系吸水 (水力作用)。采用梁单元模拟人造根系统的力学加筋作用 (如图 64 (b))。人造根的力学和水力参数详见表 3。采用有限元程序 SIGMA/W^[168] 和强度折减法^[169-170] 确定边坡安全系数。

图 64 展示了心形人造根边坡的有限元模型。对于渗流分析, 模型的边界条件以及人造根系统根据离心机模型试验设定。每根人造根的材料参数如表 2 所示。对于边坡稳定性分析, 侧边界条件设置为只允许上下移动, 边坡底部为固定边界条件。土体假设为理想弹塑性材料, 采用由 Vanapalli 等^[10] 提出的扩展莫尔库仑理论 (见式 (2))。

(3) 人造根加固的模型边坡 (45°) 离心机试验结果

对于所有的试验, 当坡度为 45° 时, 即使经过 8 h

的降雨 (70 mm/h, 千年一遇^[149]), 边坡均未破坏。这是由于根系的力学加筋作用与水力作用。必须指出的是 CDG 的临界状态角为 38°^[132], 小于坡度 45°。

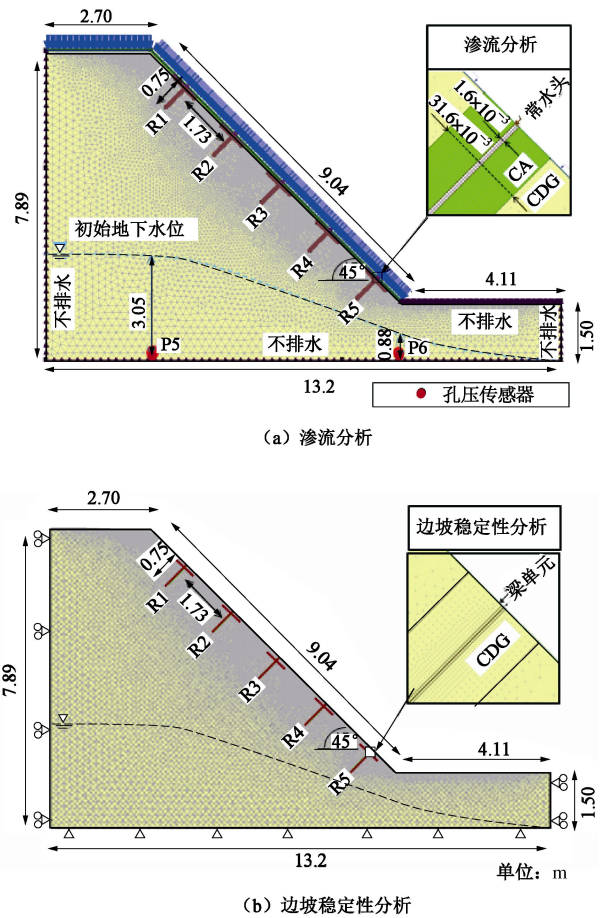


图 64 含有心形根的 45° 边坡有限元模型网格^[119]

Fig. 64 Typical finite element mesh of 45° slope reinforced by heart-shaped roots^[119]

a) 降雨过程中根系形状对负孔隙水压力分布影响

图 65 展示了模拟植物蒸腾作用前后, 实测和计算的孔隙水压力沿着根深度的分布。各组试验的初始条件都类似。如图 65 (a) 所示, 当模拟植物蒸腾作用后 (在人造根系统上施加了 95 kPa 的真空压力), 在根区内, 直根形沿着根深度分布的负孔隙水压力测量值从 20 kPa 增大到 26 kPa。在根区以下 (1.2 m 以下), 负孔隙水压力只增加了 2 kPa 左右。对于含有心形根的边坡 (图 65 (b)), 在 0.3 m 处, 心形根的负孔隙水压力比直根形的高了大概 15%。这是由于心形根比直根形多了两个分支 (图 53), 这两个分支有助于产生大的负孔隙水压力。但是, 由于这两个分支仅仅位于浅层 (0.1 m 深度处), 其影响深度仅到 0.3 m 处。因此在 0.6 m 深度处, 心形根和直根所产生的负孔隙水压力类似。对于含有板形根的边坡 (图 65 (c)), 人造根对负孔隙水压力的影响主要在浅层范围 (0.3 m

深度左右)。图 65 中 3 种人造根形状下, 模拟“植物蒸腾”前后, 计算值和实测值一致。这表明渗流有限元分析能较好模拟试验中的孔隙水压力变化, 从而为后续的边坡稳定性分析提供合理的孔隙水压力分布结果。

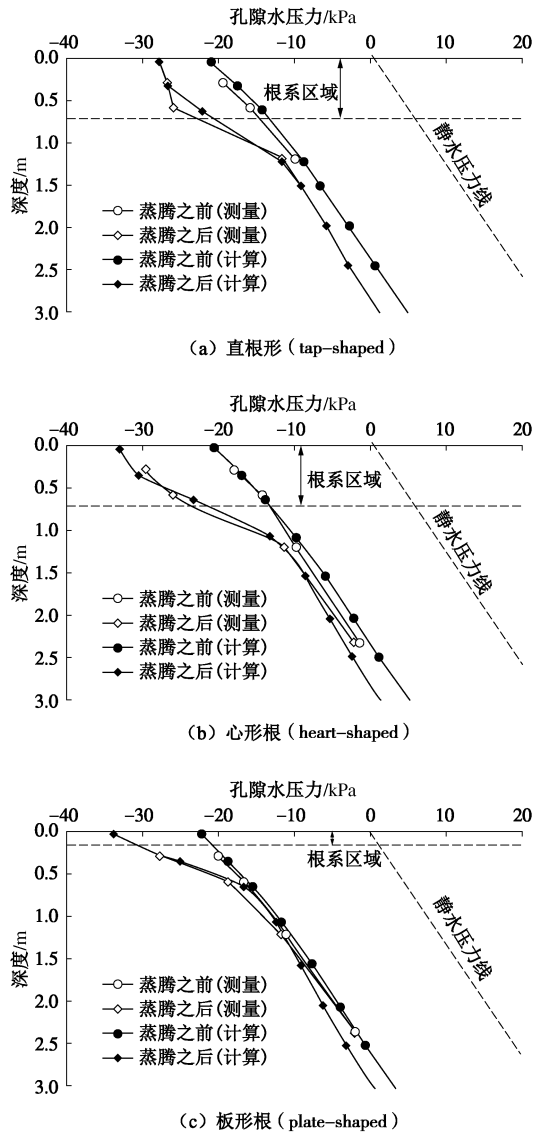


图 65 模拟植物蒸腾作用前后 45° 模型边坡的实测和计算的孔隙水压力沿着根深度的分布^[119]

Fig. 65 Comparison of measured and computed pore water pressure with depth before and after “transpiration” for 45° reinforced slope^[119]

图 66 展示了降雨 2 h 和 8 h 之后, 不同形状人造根加固的边坡沿着根深度的孔隙水压力分布的测量和计算值。各组试验的初始孔隙水压力为模拟“植物蒸腾作用”后的结果 (图 65)。对于含有直根形的边坡 (图 66 (a)), 经过 2 h 降雨 (十年一遇), 在 0.3 m 深度处, 负孔隙水压力显著减小。但是在根区域以下, 负孔隙水压力略微减小。靠近边坡表面, 测量的负孔

隙水压力为 5 kPa, 计算值与测量值总体上趋势一致。当降雨时间为 8 h (千年一遇), 孔隙水压力沿着深度持续增大。但是, 在根区域内, 孔隙水压力随着深度的增加趋势小于根区域以下。在根区域的浅层范围内, 仍然保持有 2 kPa 左右的负孔隙水压力。在 1.2 m 深度处, 孔隙水压力为 4 kPa。这表明了人造根可以有效地模拟植物蒸腾作用对孔隙水压力分布的影响。图 67 (a) 展示了有限元模拟得到的直根形人造根加固的边坡孔隙水压力等值线分布。从图中可见, 降雨 8 h 后, 人造根周围的区域能够保持一定的负孔隙水压力。在根区域以下, 模拟的蒸腾作用对孔隙水压力的影响较小。

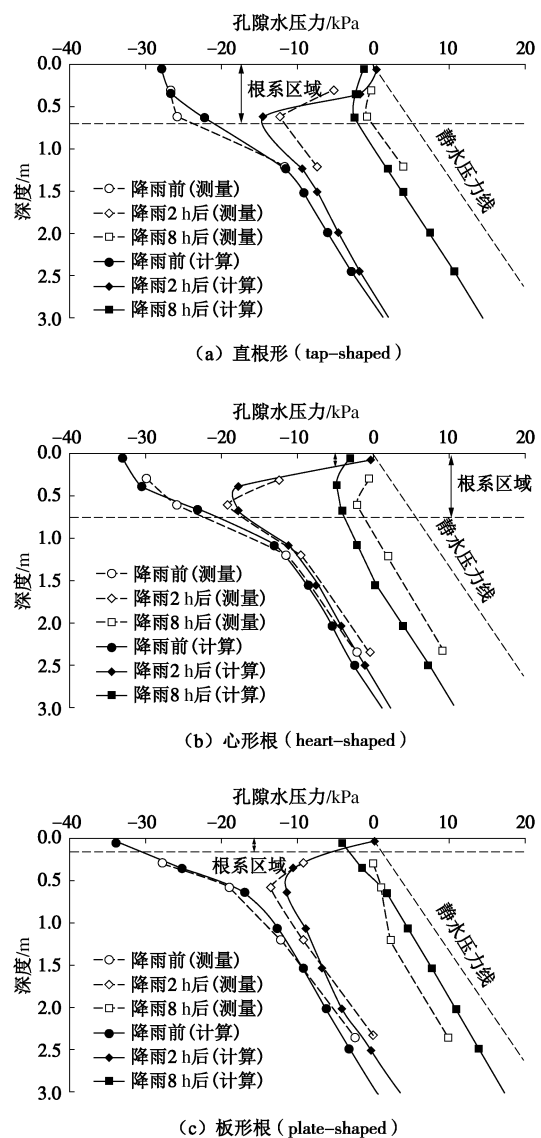


图 66 降雨 2 h 和 8 h 之后 45° 模型边坡的实测和计算的孔隙水压力沿着根深度的分布^[119]

Fig. 66 Comparison of measured and computed pore water pressure along depth before rainfall and after 2 and 8 hours of rainfall in 45° reinforced slope models^[119]

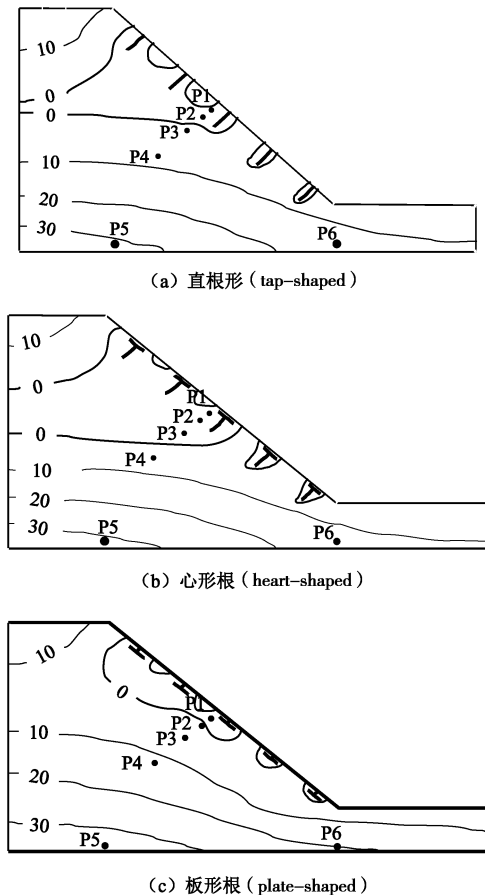


图 67 降雨 8 h 之后数值模拟得到的 45° 模型边坡沿着根深度的孔隙水压力等值线 (kPa) 分布^[119]

Fig. 67 Computed pore water pressure contour (kPa) after 8 hours of rainfall in 45° reinforced slope models^[119]

对于心形根加固的边坡 (图 66 (b)), 测量的孔隙水压力分布与直根形类似。降雨 8 h 后, 在根区域内, 直根形和心形根均能保持 2~3 kPa 的负孔隙水压力。但是, 由图 67 (b) 所示, 心形根比直根形能产生更大的负孔隙水压力。这表明心形根的两个分支使得模拟的植物蒸腾作用能影响到更深的地方。与直根形类似, 心形根加固的模型边坡在根区域以下也形成了地下水位。数值模拟在点 P5 和 P6 计算得到的正孔隙水压力与离心机试验测量值一致。

对于板形根加固的边坡 (图 66 (c)), 降雨 2 h 后, 测量的孔隙水压力分布的趋势和直根形以及心形根类似。但是, 随着降雨的继续, 板形根加固边坡仅在根区域内能保持一定的负孔隙水压力。根区域以下均为正孔隙水压力。测量区域以外的孔隙水压力分布如图 67 (c) 所示, 板形根周围所保持的负孔隙水压力的数值和分布范围均比直根形和心形根的小。这主要是由于板形根没有垂直于坡面的根分布, 且板形根平行于坡面的根埋深较浅。

b) 根形状对边坡 (45°) 稳定性的影响

基于上一节中得到的降雨过程中各个根形状加固边坡的负孔隙水压力分布, 图 68 展示了各个不同时段计算得到的模型边坡的安全系数: ①开始模拟蒸腾作用之前 (模型边坡在 15g 下固结完成时段); ②施加模拟蒸腾作用完成之后; ③模拟 8 h 降雨之后。在模拟蒸腾作用开始之前, 所有的离心机模型边坡的安全系数均大于 1.0。当开始模拟蒸腾作用的时候, 每种根形状加固的边坡的安全系数都稍微增加 (增加量小于 4%)。这是由于模拟蒸腾作用下, 人造根产生的负孔隙水压力 (图 65) 提高了非饱和土的抗剪强度。

降雨 8 h 后, 所有边坡的安全系数均显著降低, 但是其值仍然大于 1.0。这与离心机试验中, 降雨 8 h 后, 模型边坡仍然保持稳定一致。心形根加固的边坡的安全系数是所考虑的 3 种根形状里面最大的。这是由于心形根在降雨后保持的负孔隙水压力最大 (图 66), 此外, 心形根的抗拔力也大于其他两个根 (图 62)。板形根加固的边坡的安全系数是最小的 (稍大于 1.0)。这主要是由于板形根保持的负孔隙水压力最小 (图 66), 浅层边坡稳定性主要归功于土体自身的抗剪强度以及人造根的力学加筋作用。此外, 由于板形根没有垂直于坡面的根, 其抗拔力仅仅是心形根和直根形的 1/3 左右 (图 62)。图 68 也展示了数值模拟中不考虑植物蒸腾作用的安全系数。对于各种根系形状, 其值均小于 1.0, 这表明模型边坡有潜在的滑坡可能。从图 68 中可见, 不管是哪种根系形状, 忽略模拟的植物蒸腾作用会低估边坡安全系数 (多达 50%)。

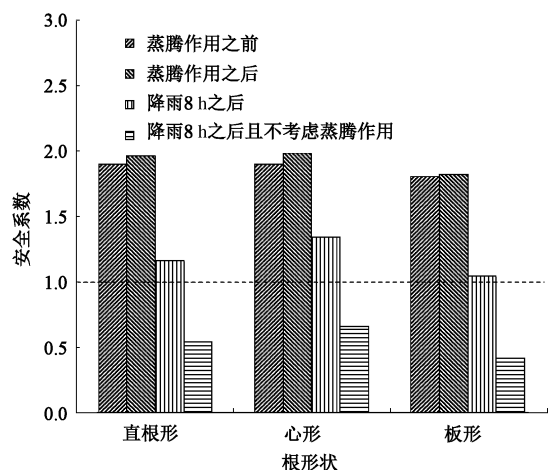


图 68 不同形状人造根加固的 45° 边坡稳定安全系数^[119]

Fig. 68 Computed values of FOS for 45° slope reinforced by different root architectures^[119]

(4) 根形状对边坡 (60°) 破坏机理的影响

为了研究根形状对边坡破坏机理的影响, 开展了另外两个类似的离心机模型试验, 研究直根形和心形根对 60° 边坡稳定性的影响。图 69 和图 70 分别显示

了在强降雨后 (70 mm/h, 持续 8 h; 千年一遇), 直根形和心形根加固边坡的破坏机制。从图 69 可见, 对于直根形加固的边坡, 降雨结束后, 边坡产生明显的整体破坏。但是对于心形根加固的边坡 (图 70), 边坡破坏的范围要远小于直根形加固的边坡。

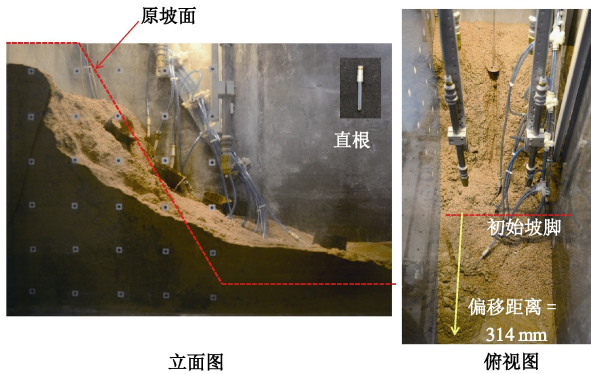


图 69 破坏后机制 (60° 边坡, 直根形, 尺寸为模型尺寸)

Fig. 69 Post-failure mechanisms (60° slope reinforced with tap-shaped roots, model scale)

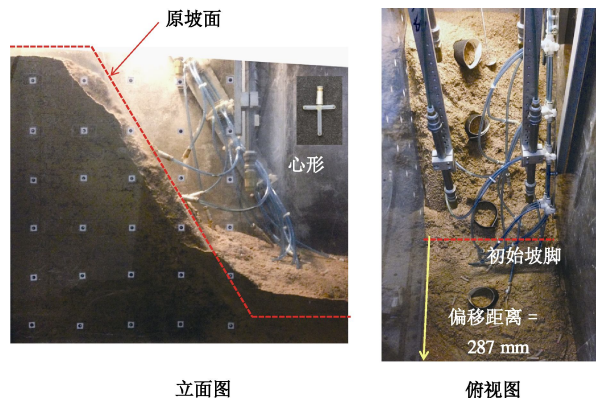


图 70 破坏后机制 (60° 边坡, 心形根, 尺寸为模型尺寸)

Fig. 70 Post-failure mechanisms (60° slope reinforced with heart-shaped roots, model scale)

相对于直根形, 心形根加固的边坡可以减少边坡破坏范围并缩短约 10% 的边坡偏移距离。这是由于心形根在降雨后保持的负孔隙水压力比直根形大 (图 66), 此外心形根的抗拔力也大于直根形 (图 62)。这表明心形根的两个分支使得模拟的植物蒸腾作用的影响范围更深。很明显, 工程设计中应重视植物蒸腾作用并应合理选择植物根形状。

8 结 语

为了研究大气-植被-土体相互作用以及植被在护坡中的作用机理, 笔者的跨学科研究团队开展了一系列室内试验、现场试验和理论模拟研究, 并自主研发了用于离心机模型试验的人造根, 能够模拟不同形状的植物根系的水力作用和力学加筋作用。笔者及团队

主要研究了两种代表性植物 (百慕大草和鸭脚木树) 和 4 种重要的根系形状 (指数形、三角形、均布形和椭圆形); 揭示了大气-植被-土体相互作用下不同形状的植物根系对土体水力特性 (包括吸力变化、持水能力及渗透特性) 的影响规律; 同时利用植物的特征参数 (RAI 和 LAI 等) 来量化不同根系形状的植物对土体水力特性的影响; 首次提出了引入根系作用的土体持水能力的理论方程; 建立了能模拟植物根系形状影响的地下水渗流与地表径流耦合运移的新模型; 通过离心机试验揭示了不同根系形状对边坡的变形和破坏机理的影响; 推导了计算植被边坡吸力分布和稳定性安全系数的解析解, 并在此基础上提出了考虑植物根系形状对浅层边坡稳定影响的新理论计算方法, 可直接应用于植被边坡的分析与设计。

大自然为人类提供了一个和谐美好的生活环境, 应该倍感珍惜并加以保护。科研人员应加强跨学科合作, 全面深入地认识大自然 (比如植物适应并改造环境的奥秘), 让人与自然更加和谐相处。植物是天然的工程师, 利用其改进工程实践绿色环保, 可持续性强, 具有巨大潜力和广阔空间。中国自然科学基金委员会在 2016 年 6 月正式发布了《国家自然科学基金“十三五”发展规划》, 明确指出基金委在未来五年将重点支持与“绿色” (如利用植物护坡固沙、减少水土流失和建设“海绵城市”) 和“蓝色” (以海洋为代表) 相关的交叉学科研究。该政策必将在全国范围内大力促进本领域的研究工作, 带来更多突破性进展, 为全球的可持续发展提供科技支撑。

致 谢: 感谢土力学和岩土工程界各位同行的信任, 让我有幸成为今年黄文熙讲座的主讲人; 感谢陈云敏院士邀请我参与他主持的“973”项目, 让我能顺利完成本文的部分研究工作。同时我要特别感谢我的毕业博士生对本次讲座做出的贡献, 包括赵仲辉教授、詹良通教授、陈锐博士、徐洁博士、梁钧博士、周超博士、Ankit Garg 博士、Viroon Kamchoom 博士、刘坚博士、冯嵩博士和陈中奎博士。我也要感谢我的博士生倪钧钧、陈勋文、刘红位、王子健、黄子峰、Sandar Lin、Eric Woon 为撰写本文各章节给予的帮助; 感谢博士生苏培桑、高志顺、穆青翼、程青与硕士生谢萌瑶、王冉、卫佳琦、邓汇龙对本文提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] ZOU X K, ZHAI P M. Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over Northern China[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109**: D03104.
- [2] MORGAN R P C. Soil erosion and conservation[M]. 2nd ed. Harlow: Longman, 1995.

- [3] LEE E H, JOHN B J. Examining the impact of wind and surface vegetation on the Asian dust occurrence over three classified source regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2009, **114**: D06205.
- [4] EDLEFSEN N E, ANDERSON A B. Thermodynamics of soil moisture[J]. *Hilgardia*, 1943, **15**: 31 – 298.
- [5] RICHARDS L. Measuring of the free energy of soil moisture by psychrometric technique using thermistors[C]// *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*. Butterworths, 1965: 39 – 46.
- [6] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley, 1993.
- [7] NG C W W, MENZIES B. Advanced unsaturated soil mechanics and engineering[M]. London: Taylor & Francis, 2007.
- [8] WU T H, MICKINELL III W P, SWANSTON D N. Strength of tree-roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, **16**: 19 – 33.
- [9] POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. *Water Resources Research*, 2005, **41**: W07025.
- [10] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHI D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, **33**: 379 – 392.
- [11] NG C W W, ZHOU R Z B. Effects of soil suction on dilatancy of an unsaturated soil[C]// *Proceeding of the 16th ICSMGE*. Osaka, 2005, **2**: 559 – 562.
- [12] GYSSELS G, POESEN J, BOCHET E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review[J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, **29**(2): 189 – 217.
- [13] ZHU H, ZHANG L M. Evaluating suction profile in a vegetated slope considering uncertainty in transpiration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, **63**: 112 – 120.
- [14] FREDLUND D G, XING A, HUANG S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**: 533 – 546.
- [15] SMITH S E, READ D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2008.
- [16] WHITE P J, BROWN P H. Plant nutrition for sustainable development and global health[J]. *Annals of Botany*, 2010, **105**(7): 1073 – 1080.
- [17] BLIGHT G E. Interactions between the atmosphere and the earth[J]. *Géotechnique*, 1997, **47**(4): 715 – 767.
- [18] NG C W W, PANG Y. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2000, **126**(2): 157 – 166.
- [19] MCELDRONE A J, CHOAT B, GAMBETTA G A, et al. Water uptake and transport in vascular plants[J]. *Nature Education Knowledge*, 2013, **4**(5): 6 – 18.
- [20] GARDNER W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. *Soil Science*, 1960, **89**(2): 63 – 73.
- [21] AUGÉ R M. Water relations drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Mycorrhiza*, 2001, **11**(1): 3 – 42.
- [22] SCHIMEL D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, **1**(1): 77 – 91.
- [23] MORAN L A, HORTON R A, SCRIMGEOUR G, et al. Principles of biochemistry[M]. 5th ed. Boston: Prentice Hall, 2011.
- [24] ONTL T A, SCHULTE L A. Soil carbon storage[J]. *Nature Education Knowledge*, 2012, **3**(10): 35.
- [25] BUCHANAN B B, GRUISSEM W, RUSSELL L J. Biochemistry & Molecular Biology of Plants[M]. Maryland: American Society of Plant Physiologists, 2009.
- [26] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889 – 892.
- [27] LU M, YANG Y, LUO Y, et al. Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition: a meta-analysis[J]. *New Phytologist*, 2011, **189**(4): 1040 – 1050.
- [28] SCHACHTMAN D P, REID R J, AYLING S M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell[J]. *Plant Physiology*, 1998, **116**(2): 447 – 453.
- [29] KELLOGG W W, CADLE R D, ALLEN E R, et al. The sulfur cycle[J]. *Science*, 1972, **175**(4022): 587 – 596.
- [30] JØRGENSEN B B. The sulfur cycle of a coastal marine sediment (Limfjorden Denmark)[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(5): 814 – 832.
- [31] THE PLANT LIST. [DB/OL]. The plant list, a working list of all plant species: statistics. <http://www.theplantlist.org>. 2013.
- [32] CAIRD M A, RICHARDS J H, DONOVAN L A. Nighttime stomatal conductance and transpiration in C₃ and C₄ plants[J]. *Plant Physiology*, 2007, **43**(1): 4 – 10.

- [33] DAWSON T E, BURGESS S S O, TU K P, et al. Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems[J]. *Tree Physiology*, 2007, **27**(4): 561 – 575.
- [34] MCCULLY M E. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1999, **50**(1): 695 – 718.
- [35] STEUDLE E. Water uptake by plant roots: an integration of views[J]. *Plant Soil*, 2000, **226**(1): 45 – 56.
- [36] MAUREL C, VERDOUCQ L, LUU D T, et al. Plant aquaporins: membrane channels with multiple integrated functions[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, **59**(1): 595 – 624.
- [37] MAUREL C, CHRISPEELS M J. Aquaporins a molecular entry into plant water relations[J]. *Plant Physiology*, 2001, **125**(1): 135 – 138.
- [38] SACK L, TYREE M T. Leaf hydraulics and its implications in plant structure and function[M]// HOLBROOK N M, ZWIENIECKI M A, eds. *Vascular Transport in Plants*. London:Elsevier Academic Press, 2005: 93 – 114.
- [39] NOBEL P S. *Physicochemical and environmental plant physiology*[M]. London: Academic Press, 2009.
- [40] WHEELER T D, STROOCK A D. The transpiration of water at negative pressures in a synthetic tree[J]. *Nature*, 2008, **455**(7210): 208 – 212.
- [41] TYREE M T, SPERRY J S. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, **40**(1): 19 – 36.
- [42] HACKE U G, STILLER V, SPERRY J S, et al. Cavitation fatigue. Embolism and refilling cycles can weaken the cavitation resistance of xylem[J]. *Plant Physiology*, 2001, **125**(2): 779 – 786.
- [43] BRODERSEN C R, MCELDRONE A J, CHOAT B, et al. The dynamics of embolism repair in xylem: in vivo visualizations using high-resolution computed tomography[J]. *Plant Physiology*, 2010, **154**(3): 1088 – 1095.
- [44] LODISH H, BERK A, MATSUDAIRA P, et al. *Molecular cell biology*[M]. 5th ed. New York:W H Freeman & Company, 2003.
- [45] SCHROEDER J I, ALLEN G J, HUGOUVIEUX V, et al. Guard cell signal transduction[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2001, **52**(1): 627 – 658.
- [46] NG C W W, LIU H W, FENG S. Analytical solutions for calculating pore-water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, **52**(12): 1981 – 1992.
- [47] NG C W W, NI J J, LEUNG A K, et al. Effects of planting density on tree growth and induced soil suction[J]. *Géotechnique*, 2016, **66**(9): 711 – 724.
- [48] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 1948, **193**(1032): 120 – 145.
- [49] LADEKARL U L, NØRNBERG P, RASMUSSEN K R, et al. Effects of a heather beetle attack on soil moisture and water balance at a Danish heathland[J]. *Plant and Soil*, 2001, **229**(1): 147 – 158.
- [50] BLIGHT G E. Desiccation of a clay by grass, bushes and trees[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2005, **23**(6): 697 – 720.
- [51] SAHA S, STRAZISAR T M, MENGES E S, et al. Linking the patterns in soil moisture to leaf water potential stomatal conductance growth and mortality of dominant shrubs in the Florida scrub ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2008, **313**(1): 113 – 127.
- [52] NG C W W, GARG A, LEUNG A K, et al. Relationships between leaf and root area indices and soil suction induced during drying-wetting cycles[J]. *Ecological Engineering*, 2016b, **91**: 113 – 118.
- [53] RASBAND W S. ImageJ[CP/DK]. United State National Institutes of Health, Bethesda, Maryland. <http://imagej.nih.gov/ij>, 2011.
- [54] GARG A, LEUNG A K, NG C W W. Comparisons of soil suction induced by evapotranspiration and transpiration of *S. heptaphylla*[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, **52**(12): 2149 – 2155.
- [55] JACKSON R B, MOONEY H A, SCHULZE E D. A global budget for fine root biomass surface area and nutrient contents[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, **94**: 7362 – 7366.
- [56] SEGAL E, KUSHNIR T, MUALEM Y, et al. Water uptake and hydraulics of the root hair rhizosphere[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, **7**(3): 1027 – 1034.
- [57] SMUCKER A J M, MCBURNEY S L, SRIVASTAVA A K. Quantitative separation of roots from compacted soil profiles by the hydropneumatic elutriation system[J]. *Agronomy Journal*, 1982, **74**(3): 500 – 503.

- [58] LÓPEZ B, SABATÉ S, GRACIA C A. Vertical distribution of fine root density, length density, area index and mean diameter in a *Quercus ilex* forest[J]. Tree Physiology, 2001, **21**(8): 555 – 560.
- [59] MIKULKA J, GESCHEIDTOVÁ E, BARTUŠEK K. Evaluation of errors in manual image processing[C]// Progress in Electromagnetics Research Symposium(PIERS) Proceeding. Suzhou, 2011: 84 – 86.
- [60] NG C W W, NI J J, LEUNG A K, et al. A new and simple water retention model for root-permeated soils[J]. Géotechnique Letters, 2016, **6**(1): 106 – 111.
- [61] GRAY D H, LEISER A T. Biotechnical slope protection and erosion control[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1982.
- [62] MCNAUGHT A D, WILKINSON A. Compendium of Chemical Terminology - International Union of Pure and Applied Chemistry Recommendations[M]. 2nd ed. Oxford: Wiley, 1997.
- [63] KIRSCHBAUM M U F. Direct and indirect climate change effects on photosynthesis and transpiration[J]. Plant Biology, 2004, **6**: 242 – 253.
- [64] SIMON A, COLLISON A J C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, **27**: 527 – 546.
- [65] CORNELISSEN J H C, LAVOREL S, GARNIER E, et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. Australian Journal of Botany, 2003, **51**: 335 – 380.
- [66] HAU B C H, CORLETT R T. Factors affecting the early survival and growth of native tree seedlings planted on a degraded hillside grassland in Hong Kong, China[J]. Restoration Ecology, 2003, **11**(4): 483 – 488.
- [67] ASTM. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)[S]. West Conshohocken PA: American Society for Testing and Materials, 2010.
- [68] JARVIS P G, MCNAUGHTON K G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region[J]. Advances in Ecological Research, 1986, **15**: 1 – 19.
- [69] LEUNG A K, GARG A, NG C W W. Effects of plant roots on soil–water retention and induced suction in vegetated soil[J]. Engineering Geology, 2015a, **193**: 183 – 197.
- [70] LAM C C, LEUNG Y K. Extreme rainfall statistics and design rainstorm profiles at selected locations in Hong Kong[R]. Royal Observatory, Hong Kong, 1995.
- [71] SIDLE R C, PEARCE A J, O'LOUGHLIN C L. Water Resource Monographs 11 Hillslope Stability and Land Use[M]. Washington D C: American Geophysical Union, 1985.
- [72] SNYDER K A, RICHARDS J H, DONOVAN L A. Night-time conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night?[J]. Journal of Experimental Botany, 2003, **54**(383): 861 – 865.
- [73] NG C W W, WOON K X, LEUNG A K, et al. Experimental investigation of induced suction distributions in a grass-covered soil[J]. Ecological Engineering, 2013, **52**: 219 – 223.
- [74] POLLEN-BANKHEAD N, SIMON A. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: is mechanical root-reinforcement the whole story?[J]. Geomorphology, 2010, **116**(3/4): 353 – 362.
- [75] NI J J, LEUNG A K, NG C W W, et al. Investigation of plant growth and transpiration-induced suction under mixed grass-tree conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016. DOI: 10.1139/cgj-2016-0226.
- [76] BUTLER A J, BARBIER N, ČERMÁK J, et al. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest[J]. Tree Physiology, 2010, **30**(6): 705 – 714.
- [77] SPERRY J S, ADLER F R, CAMPBELL G S, et al. Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model[J]. Plant Cell & Environment, 1998, **21**: 347 – 359.
- [78] REICH P B. Root-shoot relations: optimality in acclimation and adaptation or the 'Emperor's New Clothes'[M]// Plant Roots: Hidden Half. New York: Marcel Dekker Inc, 2002: 205 – 220.
- [79] RITCHIE J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research, 1972, **8**: 1204 – 1213.
- [80] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements food and agriculture organization's irrigation and drainage paper.56[R]. Rome Italy: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [81] UNGER P W, KASPAR T C. Soil compaction and root growth: a review[J]. Agronomy Journal, 1994, **86**(5): 759 –

- 766.
- [82] BENGOUGH A G, MULLINS C E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses[J]. *Soil Science*, 1990, **41**: 341 – 358.
- [83] LIPIEC J, HAKANSSON I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, **53**: 87 – 94.
- [84] NG C W W, LEUNG A K, WOON K X. Effects of soil density on grass-induced suction distributions in compacted soil subjected to rainfall[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014a, **51**(3): 311 – 321.
- [85] HO M Y, NG C W W, HO K K S, et al. State-dependent soil water characteristic curves of weathered soils[C]// In *Proceedings of Unsaturated Soils 2006*. Phoenix, 2006, **2**: 1302 – 1313.
- [86] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability water retention and microstructure of unsaturated compacted boom clay[J]. *Engineering Geology*, 1999, **54**(1/2): 117 – 127.
- [87] NG C W W, LEUNG A K. Measurements of drying and wetting permeability functions using a new stress-controllable soil column[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2012, **138**(1): 58 – 68.
- [88] GABRM A, AKRAN M, TAYLOR H M. Effect of simulated roots on the permeability of silty soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 1995, **18**(1): 112 – 115.
- [89] HUAT B B K, ALI F H J, LOW T H. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, **24**(5): 1293 – 1306.
- [90] ARAVENA J E, BERLI M, GHEZZEHEI T A, et al. Effects of root-induced compaction on rhizosphere hydraulic properties – X-ray microtomography imaging and numerical simulations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(2): 425 – 431.
- [91] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(1): 105 – 112.
- [92] ASTM. Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer[S]. West Conshohocken PA: American Society for Testing and Materials, 2009.
- [93] LEUNG A K, GARG A, COO J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity[J]. *Hydrological Processes*, 2015b, **29**(15): 3342 – 3354.
- [94] BUCZKO U, BENS O, HÜTTL R F. Changes in soil water repellency in a pine-beech forest transformation chronosequence: influence of antecedent rainfall and air temperatures[J]. *Ecological Engineering*, 2007, **31**(3): 154 – 164.
- [95] SCANLAN C A, HINZ C. Insight into the processes and effects of root induced changes to soil hydraulic properties[C]// *19th World Congress of Soil Science Soil Solutions for a Changing World*. Brisbane, 2010: 41 – 44.
- [96] NG C W W, XU J, CHEN R. All-weather landfill soil cover system for preventing water infiltration and landfill gas emission: U.S. 9101968 B2[P]. 2015.
- [97] NG C W W, COO J L, CHEN Z K, et al. Water infiltration on a new three-layer landfill cover system[J]. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 2016, **142**(5).
- [98] NG C W W, LIU J, CHEN R, et al. Physical and numerical modeling of an inclined three - layer (silt/gravelly sand/clay) capillary barrier cover system under extreme rainfall[J]. *Waste Management*, 2015, **38**: 210 – 221.
- [99] GRAY D H, SOTIR R B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control[M]. New York: Wiley, 1996.
- [100] THORNE C. Effects of vegetation on river bank erosion and stability[M]. Chichester: Wiley, 1990.
- [101] ABERNETHY B, RUTHERFURD I D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement[J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**: 63-79.
- [102] ADHIKARI A R, GAUTAM M R, YU Z, et al. Estimation of root cohesion for desert shrub species in the Lower Colorado riparian ecosystem and its potential for streambank stabilization[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **51**: 33 – 44.
- [103] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, **41**(5): 843 – 849.
- [104] WALDRON L J, DAKESSIAN S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. *Soil Science*, 1981, **132**(6): 427 – 435.
- [105] FIORILLI V, CATONI M, MIOZZI L, et al. Global and cell-type gene expression profiles in tomato plants colonized by an arbuscular mycorrhizal fungus[J]. *New Phytologist*,

- 2009, **184**(4): 975 – 987.
- [106] TAYLOR N G. Cellulose biosynthesis and deposition in higher plants[J]. New Phytologist, 2008, **178**(2): 239 – 252.
- [107] WONG C C, WU S C, KUEK C, et al. The role of mycorrhizae associated with vetiver grown in Pb-/Zn-contaminated soils: greenhouse study[J]. Restoration Ecology, 2007, **15**(10): 60 – 67.
- [108] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London: Earthscan, 2009.
- [109] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, **11**(2): 395 – 419.
- [110] CHEN X W, WONG J T F, NG C W W, et al. Feasibility of biochar application on a landfill final cover - a review on balancing ecology and shallow slope stability[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **23**(8): 1 – 15.
- [111] WONG J T F, CHEN Z K, NG C W W, et al. Gas permeability of biochar-amended clay: potential alternative landfill final cover material[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **23**(8): 7126 – 7131.
- [112] WONG J T F, CHEN Z K, CHEN X W, et al. Soil-water retention behavior of compacted biochar-amended clay: a novel landfill final cover material[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016: 1 – 9.
- [113] INDRARATNA B, FATAHI B, KHABBAZ H. Numerical analysis of matric suction effects of tree roots[J]. Geotechnical Engineering, 2006, **159**(2): 77 – 90.
- [114] NYAMBAYO V P, POTTS D M. Numerical simulation of evapotranspiration using a root water uptake model[J]. Computers and Geotechnics, 2010, **37**(1): 175 – 186.
- [115] DE BAETS S, POESEN J, KNAPEN A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, **32**(9): 1323 – 1345.
- [116] NG C W W, LEUNG A K, KAMCHOOM V, et al. A novel root system for simulating transpiration-induced soil suction in centrifuge[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2014b, **37**(5): 1 – 15.
- [117] REES S W, ALI N. Tree induced soil suction and slope stability[J]. Geomechanics and Geoenvironment, 2012, **7**(2): 103 – 113.
- [118] GREENWOOD J R, NORRIS J E, WINT J. Assessing the contribution of vegetation to slope stability[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2004, **157**(4): 199 – 207.
- [119] NG C W W, KAMCHOOM V, LEUNG A K. Centrifuge modelling of the effects of root geometry on transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes[J]. Landslides, 2015: 1 – 14.
- [120] CHILDS E C. An introduction to the physical basis of soil water phenomena[M]. London: Wiley, 1969.
- [121] HOPMANS J W, BRISTOW K L. Current capabilities and future needs of root water uptake and nutrient uptake modeling[J]. Advances in Agronomy, 2002, **77**: 103 – 183.
- [122] RAATS P A C. Uptake of water from soils by plant roots[J]. Transport in Porous Media, 2007, **68**(1): 5 – 28.
- [123] EL MAAYAR M, PRICE D T, CHEN J M. Simulating daily, monthly and annual water balances in a land surface model using alternative root water uptake schemes[J]. Advances in Water Resources, 2009, **32**(9): 1444 – 1459.
- [124] FEDDES R A, KOWALIK P J, ZARADNY H. Simulation of field water use and crop yield[M]. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978.
- [125] LYNCH J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995, **109**(1): 7 – 13.
- [126] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability[J]. Bioscience, 2011, **61**(12): 869 – 879.
- [127] ZHAN T L, JIA G W, CHEN Y M, et al. An analytical solution for rainfall infiltration into an unsaturated infinite slope and its application to slope stability analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, **37**(12): 1737 – 1760.
- [128] POLYANIN A D. Handbook of linear partial differential equations for engineers and scientists[M]. London: Chapman & Hall/CRC, 2002.
- [129] DANJON F, BARKER D H, DREXHAGE M, et al. Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability[J]. Annals of Botany, 2008, **101**(8): 1281 – 1293.
- [130] DANJON F, KHUDER H, STOKES A. Deep phenotyping of coarse root architecture in *R pseudoacacia* reveals that tree root system plasticity is confined within its architectural model[J]. PloS ONE, 2013, **8**(12): e83548.
- [131] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the

- unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. *Soil Science*, 1958, **85**(4): 228 - 232.
- [132] CHIU C F. Behaviour of unsaturated loosely compacted weathered materials[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2001.
- [133] LEUNG A K, NG C W W. Analyses of groundwater flow and plant evapotranspiration in a vegetated soil slope[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, **50**(12): 1204 - 1218.
- [134] NG C W W, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, **22**(1): 1 - 28.
- [135] GAN Z, ZHOU Z, LIU W. Vertical distribution and seasonal dynamics of fine root parameters for apple trees of different ages on the loess plateau of China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, **9**: 46 - 55.
- [136] ZHAI Y, LAW K T, LEE C F. Shear behaviour of CDG loose fill under undrained triaxial compression[C]// *Symposium on Slope Hazards and Their Prevention*. Hong Kong, 2000: 338 - 343.
- [137] NG C W W, WANG B, TUNG Y K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, **38**(5): 1049 - 1062.
- [138] LIU H W, FENG S, NG C W W. Analytical analysis of hydraulic effect of vegetation on shallow slope stability with different root architectures[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **80**: 115 - 120.
- [139] YEN B C, CHOW V T, AKAN A O. Stormwater runoff on urban areas of steep slope[R]. Environmental protection technology series, Environmental Protection Agency. No. 600/2/77-168, Washirgion D C, 1977.
- [140] MORITA M, YEN B C. Modeling of conjunctive two-dimensional surface-three-dimensional subsurface flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 2002, **128**(2): 184 - 201.
- [141] ENGMAN E T. Roughness coefficients for routing surface runoff[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1986, **112**(1): 39 - 53.
- [142] ARCEMENT G J, SCHNEIDER V R. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains[R]. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2339, Denver, 1989.
- [143] 汤有光, 郭轶锋, 吴宏伟, 等. 考虑地表径流与地下渗流耦合的斜坡降雨入渗研究[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(9): 1347 - 1352. (TUNG Y, KWOK Y, NG W W C, et al. A preliminary study of rainfall infiltration on slope using a new coupled surface and subsurface flow model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(9): 1347 - 1352. (in Chinese)).
- [144] GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. Seepage modeling with SEEP/W an engineering methodology[CP]. 4th ed. Calgary, 2009a.
- [145] NG C W W, ZHANG L M, WANG Y H. Physical modelling in geotechnics two volume set[C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*. Hong Kong, 2006.
- [146] SONNENBERG R, BRANSBY M F, HALLETT P D, et al. Centrifuge modelling of soil slopes reinforced with vegetation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, **47**(12): 1415 - 1430.
- [147] STOKES A, BALL J, FITTER A H, et al. An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting[J]. *Annals of Botany*, 1996, **78**(4): 415 - 421.
- [148] MICKOVSKI S B, BENGOUGH A G, BRANSBY M F, et al. Material stiffness branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, **58**(5): 1471 - 1481.
- [149] KAMCHOOM V, LEUNG A K, NG C W W. Effects of root geometry and transpiration on pull-out resistance[J]. *Géotechnique Letters*, 2014, **4**(4): 330 - 336.
- [150] SONNENBERG R, BRANSBY M F, BENGOUGH A G, et al. Centrifuge modelling of soil slopes containing model plant roots[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **49**(1): 1 - 17.
- [151] KÖSTLER J N, BRUCKNER E, BIBELRIETHER H. Die Wurzeln der Waldbäume. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 1968. (in German)
- [152] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [153] TAYLOR R N. Geotechnical centrifuge technology[M]. London: Taylor and Francis, 1995.
- [154] DELL'AVANZI E, ZORNBERG J G, CABRAL A. Suction profiles and scale factors for unsaturated flow under increased gravitational field[J]. *Soils and Foundations*, 2004, **44**(3): 1 - 11.

- [155] HO M Y. Governing parameters for stress-dependent soil-water characteristics conjunctive flow and slope stability[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2007.
- [156] BSI. BS 1377-4:1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes, Compaction-related tests[S]. London: British Standards Institution, 1990.
- [157] HOSSAIN M A, YIN J H. Shear strength and dilative characteristics of an unsaturated compacted completely decomposed granite soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(10): 1112 – 1126.
- [158] ZHOU Z B. Centrifuge and three-dimensional numerical modelling of steep CDG slopes reinforced with different sizes of nail heads[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2008.
- [159] CAMP C R, KARLEN D L, LAMBERT J R. Irrigation scheduling and row configurations for corn in the southeastern coastal plain[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1985, **28**(4): 1159 – 1165.
- [160] CLOTHIER B E, GREEN S R. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water[J]. 1994, **25**(1): 1 – 12.
- [161] MYERS J M, HARRISON D S. Soil moisture distribution in a sprinkler irrigated orange grove[C]// Proceedings of the Florida State Horticultural Society. Florida, 1976, **89**: 23 – 26.
- [162] BISCHETTI G B, CHIARADIA E A, SIMONATO T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy Northern Italy[J]. Plant Soil, 2005, **278**(1-2): 11 – 22.
- [163] DE BAETS S, POESEN J, REUBENS B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008, **305**: 207 – 226.
- [164] LEUNG T Y. The use of native woody plants in slope upgrading in Hong Kong[D]. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2014.
- [165] CHIU C F, NG C W W. A state-dependent elastoplastic model for saturated and unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2003, **53**(9): 809 – 829.
- [166] NILAWEERA N S, NUTALAYA P. Role of tree roots in slope stabilization[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, **57**: 337 – 342.
- [167] CAICEDO B, TRISTANCHO J. A virtual rain simulator for droplet transport in a centrifuge[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010), Zurich, 2010: 99.
- [168] GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. Stress-deformation modeling with SIGMA/W an engineering methodology[CP]. 4th ed. Calgary, 2009b.
- [169] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 1999, **49**(6): 835 – 840.
- [170] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, **49**(3): 387 – 403.

附录：稳态考虑不同根系形状的孔隙水压力解析解

(1) 均布形根

$$k_0^* = \begin{cases} A + \frac{1}{k_s \cos^2 \beta} \frac{T_p}{L_2'} [\exp(-az^*) - 1] (L^* - L_1^*) & \text{(根区外)} \\ A + \frac{1}{k_s \cos^2 \beta} \frac{T_p}{L_2'} \left\{ [\exp(-az^*) - 1] (L^* - z^*) + \exp(-az^*) [z^* - L_1^* - a^{-1} \exp(az^*) + a^{-1} \exp(aL_1^*)] \right\} & \text{(根区内)} \end{cases} \quad (A1)$$

式中, $A = \exp[a(\psi_0 - z^*)] + q_0 [\exp(-az^*) - 1] / k_s$ 。

(2) 三角形根

$$k_0^* = \begin{cases} A + \frac{1}{k_s \cos^2 \beta} \frac{2T_p}{L_2'^2} [\exp(-az^*) - 1] \left[\frac{(L^{*2} - L_1^{*2})}{2 \cos \beta} - L_1' L^* + L_1' L_1^* \right] & \text{(根区外)} \\ A + \frac{a}{k_s \cos^2 \beta} \frac{2T_p}{L_2'^2} \left\{ \frac{1}{a} [\exp(-az^*) - 1] \left(\frac{L^{*2} - z^{*2}}{2 \cos \beta} - L_1' L^* + L_1' z^* \right) + \frac{\exp(-az^*)}{a} \left[\frac{1}{a^2 \cos \beta} \exp(aL_1^*) (aL_1^* - 1) - \frac{1}{a^2 \cos \beta} \exp(az^*) (az^* - 1) - L_1' z^* + L_1^* L_1' - \frac{L_1^{*2} - z^{*2}}{2 \cos \beta} - \frac{L_1'}{a} \exp(aL_1^*) + \frac{L_1'}{a} \exp(az^*) \right] \right\} & \text{(根区内)} \end{cases} \quad (A2)$$

(3) 指数形根

$$k_0^* = \begin{cases} A + \frac{T_p}{k_s \cos^2 \beta} \frac{1}{\exp(L'_2) - L'_2 - 1} [\exp(-az^*) - 1] \left\{ L'_1 - L^* + \cos \beta \exp(-L'_1) \left[\exp\left(\frac{L^*}{\cos \beta}\right) - \exp\left(\frac{L'_1}{\cos \beta}\right) \right] \right\} & \text{(根区外)} \\ A + \frac{T_p}{k_s \cos^2 \beta} \left\{ \frac{\exp(-az^*) - 1}{\exp(L'_2) - L'_2 - 1} \left[z^* - L^* + \cos \beta \exp(-L'_1) \left(\exp\left(\frac{L^*}{\cos \beta}\right) - \exp\left(\frac{z^*}{\cos \beta}\right) \right) \right] + \right. \\ \frac{\exp(-az^*)}{\exp(L'_2) - L'_2 - 1} \left[L'_1 - z^* - \frac{\exp(aL'_1) - \exp(az^*)}{a} - \cos \beta \exp(-L'_1) \left(\exp\left(\frac{L'_1}{\cos \beta}\right) - \exp\left(\frac{z^*}{\cos \beta}\right) \right) \right] - \\ \left. \frac{\cos \beta \exp\left(\frac{z^*}{\cos \beta} - L'_1 + az^*\right)}{a \cos \beta + 1} + \frac{\cos \beta \exp\left(\frac{L'_1}{\cos \beta} - L'_1 + aL'_1\right)}{a \cos \beta + 1} \right\} & \text{(根区内)} \end{cases} \quad (A3)$$

(4) 椭圆形根

$$k_0^* = \begin{cases} A + \frac{1}{k_s \cos^2 \beta} \frac{6T_p}{L_2^6} [\exp(-az^*) - 1] \left[\frac{(L^* - L'_1)(2L'_1 + L'_2)(L^* + L'_1)}{2 \cos \beta} - L'_1(L^* - L'_1)(L'_1 + L'_2) - \frac{(L^* - L'_1)(L'^2 + L^* L'_1 + L'^2)}{3 \cos^2 \beta} \right] & \text{(根区外)} \\ A + \frac{1}{k_s \cos^2 \beta} \frac{6T_p}{L_2^6} \left\{ [\exp(-az^*) - 1] \left[\frac{(L^* + z^*)(2L'_1 + L'_2)(L^* - z^*)}{2 \cos \beta} - \frac{(L^* - z^*)(L'^2 + L^* z^* + z'^2)}{3 \cos^2 \beta} - L'_1(L^* - z^*)(L'_1 + L'_2) \right] + \right. \\ \exp(-az^*) \left[z'^2 \left(\frac{L'_1}{\cos \beta} - \frac{z^*}{3 \cos^2 \beta} \right) - z^* L_1'^2 + L_1^* L_1'^2 + L_1'^2 \left(\frac{L_1^*}{3 \cos^2 \beta} - \frac{L'_1}{\cos \beta} \right) - \frac{L_1'^2 L_2'}{2 \cos \beta} - \right. \\ \frac{L_2'}{a^2 \cos \beta} \exp(az^*)(az^* - 1) + L_1^* L_1' L_2' + \frac{L_2'}{a^2 \cos \beta} \exp(aL_1^*)(aL_1^* - 1) + \frac{L_2' z'^2}{2 \cos \beta} - z^* L_1' L_2' - \\ \frac{L_2' L_1'}{a} \exp(aL_1^*) + \frac{L_2' L_1'}{a} \exp(az^*) + \frac{\exp(az^*)}{a^3 \cos^2 \beta} (L_1'^2 a^2 \cos^2 \beta + 2aL_1' \cos \beta - 2L_1^* z^* a^2 \cos \beta + z'^2 a^2 - \\ \left. \left. 2az^* + 2) - \frac{\exp(aL_1^*)}{a^3 \cos^2 \beta} (L_1'^2 a^2 - 2a^2 L_1^* L_1' \cos \beta - 2aL_1^* + L_1'^2 a^2 \cos^2 \beta + 2aL_1' \cos \beta + 2) \right] \right\} & \text{(根区内)} \end{cases} \quad (A4)$$