

DOI: 10.11779/CJGE202007010

植被对土质覆盖层水分运移和存储影响试验研究

焦卫国¹, 詹良通², 季永新³, 贺明卫¹, 刘振男¹

(1. 贵州理工学院土木工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006)

摘要: 植被在土质覆盖层水分存储-释放环节中扮演重要的角色, 对防渗能力有重要的影响。在填埋场现场建设了大尺寸黄土土质覆盖层试验基地(长×宽: 30 m×20 m), 在基地不同测试区种植了植被并进行了土质覆盖层现场降雨试验。实测验证了黄土土质覆盖层最大储水能力; 分析了有植被条件下黄土土质覆盖层水分运移和渗透特性; 对比了植被条件对覆盖层水分运移和储水能力的影响。结果表明: ①有植被条件黄土土质覆盖层可用储水量理论值 S_{fac} 为 278.32 mm, 实测值 S'_{fac} 为 259.82 mm, 实测值比理论值小 18.50 mm (小 6.65%); ②植被种植增大了根系生长区的渗透系数, 无植被条件饱和渗透系数 k_s 为 8.27×10^{-5} cm/s, 有植被条件饱和渗透系数 k_s 大于 8.27×10^{-5} cm/s。无植被时水分首先在覆盖层浅部土层存储, 随着降雨的继续逐渐下渗至深层土; 有植被时水分在土层全断面存储; ③须根系、初期植被条件对毛细阻滞覆盖层储水能力影响较小。有植被条件实测可用储水量 S'_{fac} 为 259.82 mm, 无植被条件为 251.95 mm, 前者仅比后者大 7.87 mm (大 3.12%)。有植被条件实测总储水量 S'_{fac} 为 381.90 mm, 无植被条件为 374.03 mm, 前者比后者大 7.87 mm (大 2.10%)。有、无植被条件黄土土质覆盖层储水能力接近, 一方面是由于须根植被根系深度分布较浅 (0~50 cm); 另一方面是由于植被生长时间短未能经历一个完整的生长周期对土体结构影响不显著。

关键词: 垃圾填埋场; 土质覆盖层; 植被; 须根; 水分运移; 储水能力

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)07-1268-08

作者简介: 焦卫国(1983—), 男, 博士, 副教授, 从事非饱和土力学, 环境土工方面的研究和教学工作。E-mail: 805810460@qq.com。

Experimental study on effects of vegetation on water transport and storage in soil cover

JIAO Wei-guo¹, ZHANG Liang-tong², JI Yong-xin³, HE Ming-wei¹, LIU Zhen-nan¹

(1. School of Civil Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 2. Geotechnical Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Guizhou Construction Science Research and Design Institute of CSCEC Co., Ltd., Guiyang 550006, China)

Abstract: Vegetation plays an important role in water storage and release of soil cover and in impermeable capability of soil. A large-scale loess soil cover (30 m×20 m) is built in field. The vegetation is planted in different areas and rainfall tests are carried out. The maximum water storage capacity is measured. The water transport, saturated permeability coefficient, effects of vegetation on water transport and storage capacity are analyzed and compared. The results show that: (1) The theoretical value of available water storage with vegetation is 278.32 mm, the measured one is 259.82 mm, and the latter is 18.5 mm (6.65%) smaller than the former. (2) The vegetation increases the saturated permeability coefficient of root growth area. It is 8.267×10^{-5} cm/s without vegetation, and is more than 8.267×10^{-5} cm/s with vegetation. Without vegetation, water is stored in shallow soil layer firstly and gradually infiltrates into deep soil, but it is stored in the whole section of soil with vegetation. (3) The fibrous root and initial vegetation have some influences on water storage capacity of soil cover. The available water storage measured in the tests is 259.82 mm with vegetation and 251.95 mm without vegetation. The former is only 7.87 mm (3.12%) larger than the latter. The total water storage measured in the tests is 381.90 mm with vegetation and 374.03 mm without vegetation. The former is only 7.87 mm (2.10%) larger than the latter. The water storage capacity of soil cover with or without vegetation is similar. It may be that, on one hand, the vegetation with fibrous root system is shallow (0~50 cm), on the other hand, the short growth period of vegetation has no significant effects on soil structure.

Key words: landfill; soil cover; vegetation; fibrous root; water transport; water storage capacity

基金项目: 黔科合基础项目 ([2017]1079, [2017]1513-4); 黔科合 (LH字 [2016]7096); 中建四局科技研发项目 (CSCEC4B-2015-KT-03); 六盘水市科技支撑计划项目[52020-2018-01-04]
收稿日期: 2019-05-03

0 引言

当前中国有上千座生活垃圾填埋场面临库容饱和急需封场治理。黏土覆盖层、复合覆盖层因黏土涨缩开裂、防渗膜穿刺以及土-膜界面滑移或胀气鼓包等导致长期防渗效果不佳。土质覆盖层基于非饱和土水分的存储、运移特性并结合表层土体和植被腾发作用而实现防渗功能, 其造价较传统复合覆盖层更低^[1-2]。目前, 在北美广大的中西部干旱与半干旱地区有广泛的应用。

植被在土质覆盖层水分释放环节中扮演重要的角色, 对其防渗性能有重要的影响^[3-7]。长期服役过程中, 植被靠蒸腾作用加速水分的释放和排空以迎接下一次降雨, 从而减小渗漏量改善其防渗效果。植被蒸腾作用主要受生物量、根系深度和密度、叶面积等因素的影响。Albright等^[8]在湿润气候区覆盖层顶部种植植被后渗漏量小于12 mm/a。William等^[9]对腾发覆盖层和黏土覆盖层进行了4 a的监测对比, 发现腾发覆盖层渗漏量(201 mm)显著低于黏土覆盖层渗漏量(292 mm), 因植物的存在减少了水分渗漏。Melchior等^[10]在德国进行了长达18 a的监测表明, 灌木可以显著提高蒸散量降低渗漏量, 但同时也监测到了水分沿着根系的优先渗透。随后Fayer等^[11]、Bohnhoff等^[12]的研究也均表明长期服役过程中植被可减小渗漏量改善防渗性能。

最大储水能力和降雨前初始含水率是决定某场降雨土质覆盖层是否发生渗漏的两个关键因素。两者间的差值反映了一场降雨前土质覆盖层还可容纳的储水量。显然, 上述长期服役过程中植被的蒸腾作用加速了水分的释放和排空, 使其在某场降雨之前能腾空出更大的储水空间。这是植被改善土质覆盖层防渗效果的机理所在。然而对于某一单场降雨, 植被对土质覆盖层水分渗透、存储的影响却不都是正向且积极的。因为许多学者均观察到水分沿着植被根系的优先流^[10], 甚至已有大量数据表明植被根系可增大土层渗透性。如Waugh等^[13]、Devitt等^[14]、Song等^[15]、Bordoloi等^[16]和李雄威等^[17]均发现种植植被后土体饱和渗透系数大于裸土。但与此同时也有部分学者发现植物根系能减小土体的渗透系数。如Jotisankasa等^[18]、Ni等^[19-20]、程鹏^[21]、周腾等^[22]的研究则表明, 幼龄植株或植被种植初期能降低土壤饱和渗透系数。其认为幼龄植株的健康根系会占据土壤的孔隙空间, 从而阻塞水流路径。以上研究表明: 植被条件对土质覆盖层渗透性的影响与植被种类、根系形态等密切相关, 而对土质覆盖层最大储水能力的影响尚无定论, 还需进一步研究。

笔者在西安江村沟垃圾填埋场建设了大尺寸土质

覆盖层试验基地, 根据当地气候条件种植了植被。在试验基地进行了有植被条件下的覆盖层降雨试验, 对降雨试验中覆盖层水分运移规律、渗透特性和土层最大储水能力进行了测试和验证; 对有、无植被条件下土质覆盖层中水分运移特性、渗透系数和储水能力开展了对比分析并评估了植被条件对其的影响。

1 材料和方法

1.1 覆盖层尺寸、结构、土性参数和测试元件

在西安市江村沟垃圾填埋场建设了现场大型毛细阻滞覆盖层试验基地。试验区垃圾边坡坡度14.8°, 垃圾填埋龄期3~5 a。覆盖层尺寸(长×宽): 30 m×20 m, 核心测试区(长×宽)为24 m×10 m, 左右边界各预留5 m为核心测试区与周边环境的过渡区, 过渡区与核心测试区土层结构和土性一致(图1)。核心测试区底部及四周设置HDPE土工膜(隔断其与周边的水气联系并形成一个独立水文测试单元)。覆盖层结构剖面详见图2。其中细粒土层总厚0.90 m, 从上到下依次为: 30 cm厚植被土层(黄土和堆肥料混合, 干密度为1.35 g/cm³), 60 cm厚黄土核心储水功能层(干密度为1.45 g/cm³)。细粒土层之下为碎石层(厚15 cm, 粒径0.5~2 cm)。



图1 土质覆盖层现场试验基地(有植被条件)

Fig. 1 Field test base of soil cover (with vegetation)

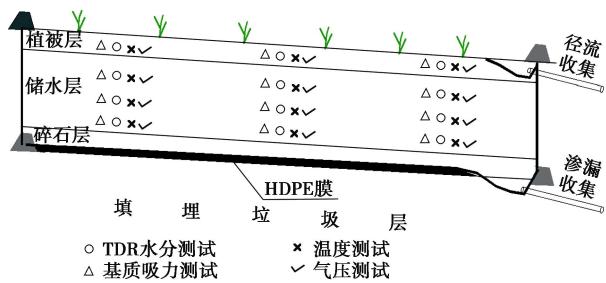


图2 覆盖层土层结构和仪器埋设剖面

Fig. 2 Structure of soil cover and embedment of instruments

覆盖层细粒土黄土取自江村沟垃圾填埋场北侧边坡Q₃地层。根据颗粒和液塑限指标可知该黄土属粉质黏土(详见表1)。室内采用体积压力板仪分别测试了

干密度为 1.35, 1.45 g/cm³, 基质吸力范围为 0~1500 kPa 黄土的吸湿和脱湿过程土水特征曲线, 采用变水头法测试了以上两种干密度黄土的饱和渗透系数。限于篇幅黄土土水特征曲线(SWCC)、渗透系数等土水特性详见文献[23]。

表 1 黄土基本参数

Table 1 Parameters of loess

土样 名称	界限粒径含量/%			$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p
	>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm			
Q ₃ 黄土	2.21	71.83	26.00	36.7	22.0	14.7

现场布设了降雨模拟装置。装置由喷头群、供水管、流量计、压力表、阀门和潜水泵组成, 水源为自来水。试验中根据流量计读取总降雨量; 底部 HDPE 膜、预埋的 PPR 管和集水池等收集渗漏量; 坡面土梁围堰、HDPE 管等收集坡面径流量。核心测试区坡顶、坡中和坡脚不同深度分别埋设了 TDR、张力计、气压表和温度传感器等(图 2)。同一剖面 TDR 和张力计成排间隔布置, 埋设深度依次为 15, 35, 60, 85 cm。张力计采用 Soil moisture 公司之 jet-filled 2725 型; TDR 探头为自制三针式, 信号测试仪为北美 Campbell 公司之 TDR100。后文分析图例中, 符号 “T” 为基质吸力, “W” 为体积含水率, “R₁, R₂, R₃” 分别表示坡顶、坡中和坡脚。“15, 35, 60, 85” 表示仪器埋设深度(cm)。其中深度 15 cm 的仪器位于表层植被土中(植被土厚 30 cm); 85 cm 的仪器位于黄土-碎石交界面之上 5 cm 的黄土层中。此外, 现场设有小型气象站实时监测气候条件。

1.2 植被参数

根据西北气候条件确定土质覆盖层植被种植方案。核心测试区“四季青+黑麦草+早熟禾”3 种草混种, 质量比例为 4:3:3。过渡区“紫花苜蓿+四季青”两种草混种, 质量比例为 7:3。植被种植后进行了人工施肥和灌溉并对生长状况进行监测。过渡区边坡中部设置 1 个监测点记为“植被#1”(图 3(a)); 核心测试区分别在坡顶、坡中和坡脚设置“植被#2、#3 和 #4”监测点, 在监测点竖立固定标尺每日测量草长并拍片记录(图 3(b))。



(a) 过渡区植被情况(紫花苜蓿+四季青, 比例7:3)



(b) 核心测试区植被(四季青+黑麦草+早熟禾, 比例4:3:3)

图 3 覆盖层不同测试区植被生长情况

Fig. 3 Vegetation growth in different test areas of soil cover

对核心测试区草皮自然生长状态分别高 5, 10, 20 cm 条件下的叶面积指数和湿质量进行了测定。由图 4 和表 2 可见: 在 1 m² 草皮面积中, 植被叶湿质量随自然高度的增加而增加。自然状态高 5 cm 时, 植被叶湿质量为 0.18 kg 叶面积为 0.39 m², 叶面积指数为 0.39; 自然状态高 25 cm 时, 植被叶湿质量为 1.1 kg 叶面积为 2.67 m², 叶面积指数为 2.67。本次现场降雨试验前, 核心测试区叶面积指数 2.80, 过渡区 3.20。过渡区四季青因受紫花苜蓿生长胁迫几乎全部凋零。

表 2 单位面积植被叶湿质量、叶面积和叶面积指数

Table 2 Leaf wet mass, leaf area and leaf area index per unit area of vegetation

植被高度/cm 叶片拉直长	自然状态	质量/kg	叶面 积/m ²		叶面积 指数
			6~7	15~20	
6~7	5	0.18	0.39	0.39	0.39
15~20	10	0.49	1.16	1.16	1.16
24~27	20	1.10	2.67	2.67	2.67

*核心测试区植被参数。

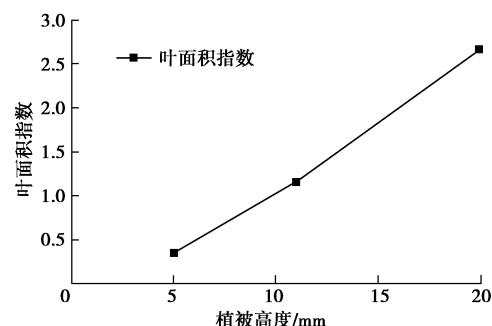


图 4 核心测试区植被叶面积指数与植被自然高度间关系

Fig. 4 Relationship between leaf area index and natural height of vegetation in core test area

对核心测试区和过渡区植物根系深度进行了测试(图 5)。过渡区紫花苜蓿为直根系, 由一明显的主根和各级侧根组成, 主根发达粗壮且深入土层。核心测试区为四季青+黑麦草+早熟禾混种, 3 种植物均为须根, 由许多粗细相近的不定根组成。测试结果表明: 降雨试验前, 过渡区紫花苜蓿根系在 38~55 cm; 核心测试区 3 种草混合根系最长达 45 cm。其中 3~20 cm 为根系密集分布的主要深度区; 25~35 cm 为根系较

密分布的次要深度区; 35~45 cm 偶见有根系分布。



图 5 核心测试区植被根系分布深度观测

Fig. 5 Observation of root depth of vegetation in core test area

2 现场降雨试验

2.1 降雨试验盖层水量分配

对核心测试区和过渡区均进行了降雨强度为 2.98~3.00 mm/h 的等强度降雨试验。试验中水量平衡:

$$P = R + S + P_r + E \quad (1)$$

式中 P 为降雨量, R 为坡面径流量, S 为土层存储量, P_r 为渗漏量, E 为试验期腾发量 (裸土蒸发+植被蒸腾)。其中, 降雨量 P 通过流量计读取; 坡面径流量 R 、渗漏量 P_r 为现场称量实测; 土层存储量 S 通过 TDR 实测含水率后经土层厚度积分算出。蒸发量 E 可经式 (1) 水量平衡或气候条件计算得出。TDR 和张力计可实时测试黄土层基质吸力和体积含水率 (频率: 1 次/120 min); 坡面径流量、渗漏量产生时间和流量现场实时跟踪监测。

表 3 和图 6 为本次降雨试验测得的降雨量和覆盖层各水量分配情况。由图 6 可见, 降雨试验从 11 月 17 日持续到 11 月 23 日历经 6 d。总降雨量 P 为 194.85 mm, 土层存储量 S (含腾发量) 为 157.81 mm, 占本次总降雨量的 80.99%, 坡面径流量 R 为 0 mm。11 月 23 日降雨停止后, 渗漏一直持续到 12 月 2 日, 累计渗漏量 P_r 为 37.04 mm, 占总降雨量的 19.01%。

2.2 覆盖层基质吸力和体积含水率

图 7 为降雨试验覆盖层坡顶 (R1) 不同位置、不同深度土层孔隙水压力 (基质吸力) 随时间变化曲线。图例中符号意义同 1.1 节。由图 7 可见: 降雨初期 (11 月 18 日) 埋深 15 cm 土层孔压从 -60 kPa 上升至 -23 kPa, 而埋深 35 cm 以下土层孔压基本不变。随着降雨持续, 20 日—22 日不同深度土层孔压均有显著的上升。降雨结束后各深度土层孔压基本达到 0 kPa, 其中底部 85 cm 土层孔压明显高于其它深度土层, 达到 10 kPa。

表 3 现场降雨试验覆盖层各水量分配

Table 3 Distribution of water in field rainfall experiments (mm)

日期	坡面 径流	土层存储 (包含蒸发量)	渗漏	累计 降雨
11-17	0	0	0	0
11-18	0	36.63	0	36.63
11-19	0	41.73	0	41.73
11-20*	0	105.88	2.45	108.33
11-21	0	114.47	7.18	121.65
11-22	0	174.15	14.1	188.25
11-23*	0	174.5	20.35	194.85
11-24	0	169.4	25.45	194.85
11-25	0	165.4	29.45	194.85
11-26	0	162.45	32.4	194.85
11-27—12-02	0	157.81	37.04	194.85
累计值	0	157.81	37.04	194.85
百分率/%	0	80.99	19.01	100

注: *11 月 20 日出现渗漏, 11 月 23 日降雨停止, 雨停后渗漏继续到 12 月 2 日。

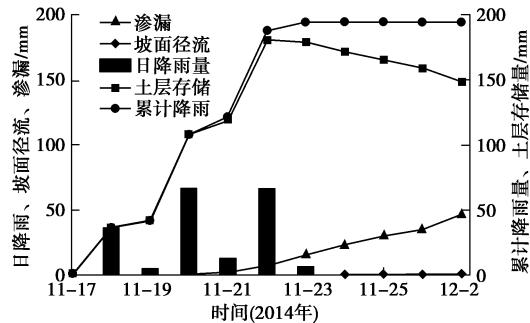


图 6 现场降雨试验覆盖层各水量分配和变化规律

Fig. 6 Distribution of water in field rainfall experiments

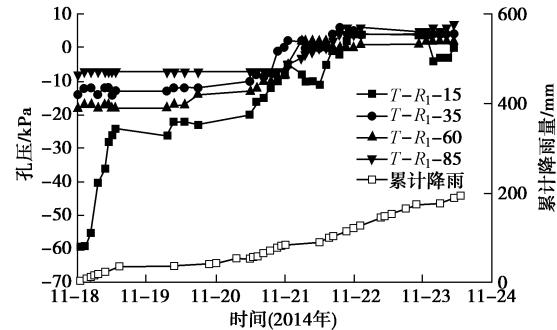


图 7 坡顶孔压随降雨时间变化

Fig. 7 Variation of pore water pressure with rainfall time

图 8 是降雨试验期间覆盖层坡顶不同位置、不同深度土层体积含水率随时间变化曲线 (图例中 W 表示体积含水率, 其余同前)。由图可见: 降雨初期 (11 月 18 日) 埋深 15 cm 土层水份由 23% 上升至 33%, 埋深 35 cm 土层含水率仅上升 2%, 而其余更深土层则几乎不变。这与水份在土体中逐渐由表层向下渗透移到深层有关。21 日—22 日降雨较少, 埋深 15 cm 土层含水率有明显的下降。推测一方面是由于表层土蒸发和植被蒸腾作用失水; 另一方面由于表层土中过多的水份在重力作用下二次迁移和再分布向深层土下渗有关。

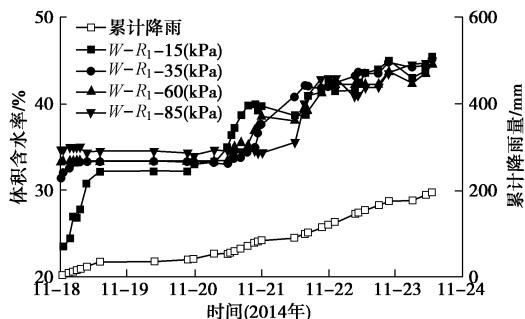


图 8 坡顶体积含水率随降雨时间变化

Fig. 8 Variation of volumetric water content with rainfall time

3 讨论与分析

3.1 数据校核

现场大尺寸降雨试验与室内模型试验不同,因持续时间长、直接暴露于自然气候条件下(风、日光直接照射等)必须考虑降雨期间腾发水量。现场降雨试验中覆盖层土层实际储水量有两种计算方法(表3)。一是基于式(1)的水量平衡;由总降雨量扣除坡面径流量、渗漏量和降雨试验期腾发水量可得土层实际储水量(S_1)。二是通过TDR探头测试不同深度土层体积含水率,再由含水率与土层厚度积分而算出土层实际储水量(S_2)。方法一中,试验期腾发量包括降雨期间喷头喷出的雨滴蒸发、覆盖层表层饱和裸土蒸发和植被蒸腾作用3部分。纵有独立设置的气象站对覆盖层所处局部环境进行气象监测,也难以准确计算。因此,试验期腾发量参考了国家气象台泾河气象站11月18日—12月2日间的自由水面蒸发量+下垫面为草类植被的潜在蒸腾量(数据来源于中国国家气象信息共享网)。方法二中纵使在覆盖层坡顶、坡中和坡脚3个剖面不同深度埋设了12支TDR,但因覆盖层体量和尺度较大,仍可能不会有误差。表4是以上两种算法土层实际储水量的差异对比,可见两种算法在渗漏停止日土层存储量有一定差异。考虑到方法一中腾发量的不确定性,后文统一采用TDR实测法。

表4 土层实际存储量分析

Table 4 Analysis of actual storage of soil layer (mm)

日期	大事件	参考腾发量	土层实际储水量		差异 $\Delta S = S_1 - S_2$
			水量平衡法 S_1	TDR 实测法 S_2	
11-18	降雨开始	4.00	—	—	—
11-20	渗漏开始	13.40	92.48	89.97	2.51
11-23	降雨结束	19.00	155.50	148.40	7.10
11-26— 12-02	渗漏停止	32.70	125.11	118.30	6.81

3.2 植被条件对降雨入渗(水分运移)的影响

现场覆盖层试验基地共进行了两次降雨试验。第一次在6月23日表层土为裸土无植被条件,文献[23]对无植被条件下的水份运移和最大储水能力进行了分析。第二次(即本次试验)是11月18日有植被条件。

两次试验相隔150 d,降雨模拟装置、雨强、土层测试元件等均与第一次无植被条件相同。两次有、无植被降雨试验期间,覆盖层所经历的自然气候(降雨)条件和各深度土层含水率变化如下图9(图中“ R_1 ”表示坡顶,其余符号同前)。由图可见6月—11月西安累计降雨459.98 mm,其中9月单月降雨近250 mm,特别是9月8日—17日连续降雨182.7 mm。此外,6月—12月西安气温变化较大,7月最高温度达35℃~38℃,12月最高温度约10℃~15℃。两次降雨试验期间没有经历冻融事件。7月中旬第一次无植被降雨试验后种植了植被,期间进行了松土、遮阴、灌溉和施肥等草皮护理。两次降雨试验前初始状态:无植被条件覆盖层土体平均体积含水率为27.59%,总储水量248.3 mm;有植被条件覆盖层土体平均体积含水率为31.11%,总储水量为280.0 mm。

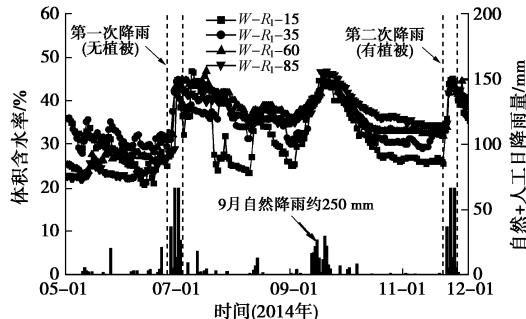


图9 有、无植被条件两次降雨事件期间自然气候—降雨情况
Fig. 9 Natural climate rainfall experienced by cover in two rainfall events (with and without vegetation)

图10,11为覆盖层有植被条件降雨试验中,坡中剖面(R_2)不同深度基质吸力和体积含水率随降雨天数的变化规律。图12为无植被条件降雨试验中,坡中剖面(R_2)基质吸力的变化规律。由图11可见:有植被条件降雨前初始状态表层土(-15 cm)基质吸力在-50~-60 kPa间,显著低于于其它深度吸力值。而无植被条件下,表层土基质吸力约-30 kPa且不同深度土层吸力差别不大。这是由于有植被条件下:3~25 cm是四季青+黑麦草+早熟禾3种草类根系密集分布的主要深度,因根系吸水导致土层基质吸力较低(图10中体积含水率也相应较低)。随着降雨开始在初期2~3 d(无植被6月26日与有植被11月19日对比),无植被条件60 cm深度以下土层孔压变化较小,60 cm以上变化则较大;而有植被条件60 cm深度以上和以下土层孔压变化均较大。这与植物根系分布土体渗透系数增大,更多水分下渗导致土体全截面孔压增大有关。随着降雨的继续渗漏发生日(无植被6月29日与有植被11月20日对比),同样有植被条件不同深度土层孔压均有较大幅度增加而无植被条件则表现为60 cm以下土层大幅度增加。有、无植被条件不同深度土层孔压的增加规律反映了水份在其中的运移和存储情

况。无植被时水分首先在浅部土层存储, 随着降雨的继续水份逐渐下渗至深层土体。有植被条件下, 不同深度土层含水率几乎呈一致的增加。这表明有植被条件水分向下运移速度较无植被条件快。经分析可能有如下两方面的原因: ①植物根系在土中的生长对土体理化性质有改良作用; ②部分植物根系以及草类植物中伴生昆虫在土体中的活动导致根系分布区渗透系数增大。

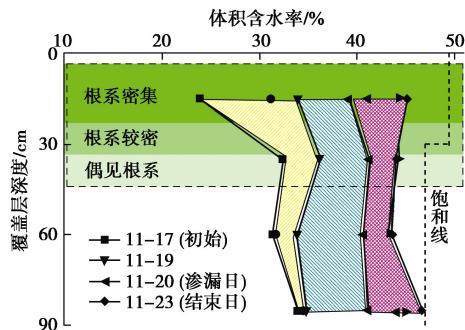


图 10 有植被条件降雨试验典型日期坡中剖面土层体积含水率
Fig. 10 Volumetric water content of middle slope on typical date in rainfall experiments with vegetation

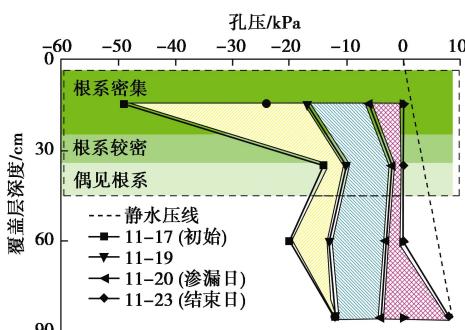


图 11 有植被条件降雨试验典型日期坡中剖面土层孔压
Fig. 11 Pore water pressure of middle slope on typical date in rainfall experiments with vegetation

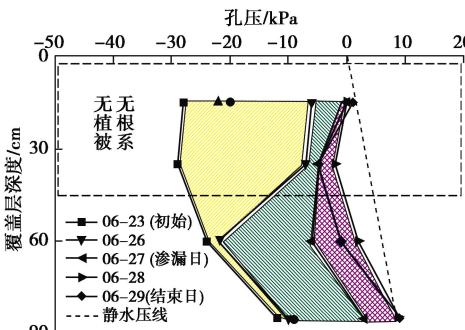


图 12 无植被极端降雨试验坡中不同深度土层孔压随典型降雨天数变化规律
Fig. 12 Pore water pressure of middle slope on typical date in rainfall experiments without vegetation

此外, 有、无植被条件下覆盖层的坡面径流量有一定差异。第一次无植被条件试验期间产生了坡面径流, 坡面径流流速为 0.061 h。由总降雨量扣除坡面径流, 测算黄土饱和入渗率为 8.097×10^{-5} cm/s。本次有

植被条件降雨试验全程无坡面径流产生, 测算黄土饱和入渗率应大于 8.267×10^{-5} cm/s。这一方面可能由于植被冠层截留, 另一方面可能因种植植被后表层黄土饱和渗透系数增加有关。

3.3 植被条件对覆盖层储水能力的影响

已有研究^[24-26]表明: 毛细阻滞覆盖层渗漏发生时细-粗粒土交界面的基质吸力为粗粒土进水值 φ_b , 交界面上细粒土底层含水率为 θ_b , 以交界面为起点细粒土基质吸力沿厚度方向呈线性增加(即厚度 Z 处基质吸力为 $Z + \varphi_b$)。毛细阻滞覆盖层最大储水量 S_{foc} 为

$$S_{foc} = \int_0^L \theta(z + \varphi_b) dz, \quad (2)$$

式中, L 为细粒土层厚度, φ_b 粗粒土进水值, $Z + \varphi_b$ 为以交界面为起点细粒土层厚度 Z 处基质吸力, $\theta_{(z+\varphi_b)}$ 为细粒土体积含水率和基质吸力间的关系(如 V-G 模型)。利用渗漏时刻土层总储水量 S_{foc} 扣除植被维持生存的最低储水量 S_{fm} (枯萎点所对应储水量)可获得毛细阻滞覆盖层的可用储水量 S_{fac} 。

本次降雨试验对有植被条件覆盖层储水能力进行了实测和验证。图 13 是根据式(2)毛细阻滞覆盖层储水理论评估本次有植被条件降雨试验覆盖层储水能力的情况。其中, 理论储水率剖面由式(2)渗漏时刻土层基质吸力分布并根据现场黄土吸湿土水特征曲线对应含水率而来; 实测储水率剖面由现场 TDR 实测黄土土层含水率而来。由图 13 可见: 0~65 cm 深度土层 TDR 实测含水率为 41.4%~43.0%; 85 cm 深度土层 TDR 实测含水率为 38.13%。而该毛细阻滞覆盖层理论储水分布为: 黄土层含水率从粗-细粒土界面(90 cm 深度土层)的 43.1% 向表层递减至 41.1%。由理论值和实测值对比: 15~65 cm 土层, 实测含水率比理论含水率高 0.30%~0.94%。65~85 cm 深度土层, 实测含水率剖面比理论含水率剖面低 0.53%~4.95%。由以上含水率剖面经土层厚度积分可分别计算理论储水量和实测储水量。经计算该黄土覆盖层可用储水量理论值 S_{fac} 为 278.32 mm, 实测值 S_{fac} 为 259.82 mm, 实测值比理论值小 18.5 mm (6.65%)。

由降雨前土层中的初始储水量与本次降雨试验实测储水量之和可求得渗漏时刻覆盖层总储水量 S_{foc} 。表 5 为覆盖层两次极端降雨试验中, 分别在有、无植被条件下的理论总储水量 S_{foc} 、理论可用储水量 S_{fac} 、实测总储水量 S_{foc} 和实测可用储水量 S_{fac} 的对比情况。由表可见: 有植被条件实测可用储水量 S_{fac} 为 259.82 mm, 无植被条件为 251.95 mm, 前者仅比后者大 7.87 mm (3.12%)。对比文献[20]研究结果, 在添加生物炭并种植植被半年(180 d)后, 通过测试土水特征曲线分析计算后得出土层有植被可用储水量比无植被条件大(数据范围为 1.8%~35.8%)。此外, 有植被条件

实测总储水量 S_{foc} 为 381.90 mm, 无植被条件为 374.03 mm, 前者比后者大 7.87 mm (2.10%)。以上有、无植被条件实测储水能力对比结果说明初期植被条件对土质覆盖层储水能力影响较小, 甚至有植被条件还略大于无植被条件, 分析可能有如下原因:

(1) 本文植被条件为须根根系、深度分布较浅且没有经历一个完整的凋零—茂盛生命周期, 对土体结构影响不显著。

(2) 无植被降雨试验是覆盖层首次经历极端降雨, 覆盖层中下部和底层黄土从施工结束到降雨之前土层含水率较低。施工完毕初期土体结构均匀性较差, 压实过程中原状黄土存在结构未被扰乱的团聚体等。由此优先流现象发生的可能性较大。而有植被条件经历了多次降雨过程, 底部土层含水率较高团聚体在水分反复的浸润作用下已经消散, 土层结构均匀。

(3) 有、无植被条件覆盖层初始含水率不同。本次有植被条件覆盖层含水率稍高, 土体吸湿过程中经历的水力路径和起点略高 (吸湿滞回曲线起点含水率更高), 导致黄土土水特征曲线 (或储水能力) 略有差异。

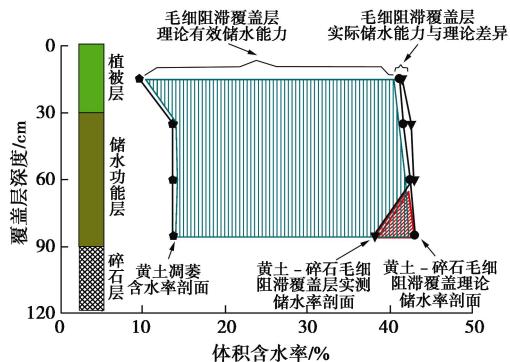


图 13 有植被条件土质覆盖层实测储水能力分析

Fig. 13 Analysis of measured water storage capacity of soil cover with vegetation

表 5 有、无植被条件可用储水能力、总储水能力实测值对比

Table 5 Comparison of measured values of available water and total water storage capacities with and without vegetation

参数	理论值 /mm	实测值/mm		有、无植被对比
		有植被	无植被	
可用储水量 S_{fac}	278.32	259.82	251.95	有植被比无植被大 3.12%
总储水量 S_{foc}	400.40	381.90	374.03	有植被比无植被大 2.10%

4 结 论

在西安江村沟垃圾填埋场建设了大尺寸土质覆盖层试验基地并根据当地气候条件种植了植被。在试验基地进行了有植被条件下的覆盖层降雨试验; 对降雨试验中覆盖层水分运移、渗透系数和最大储水能力进行了测试和验证; 对有、无植被条件下土质覆盖层中水分运移特性和储水能力开展了对比分析。主要得到

以下 3 点结论。

(1) 有植被条件覆盖层实测储水能力与理论计算值对比分析表明: 该黄土覆盖层可用储水量理论值 S_{fac} 为 278.32 mm, 实测值 S_{fac} 为 259.82 mm, 实测值比理论值小 18.5 mm (小 6.65%)。

(2) 种植植被后增大了根系生长区的渗透系数。无植被条件饱和渗透系数为 8.267×10^{-5} cm/s; 有植被后其饱和入渗率大于 8.267×10^{-5} cm/s。无植被时水分首先在浅部土层存储, 随着降雨的继续水份逐渐下渗至深层土体。有植被条件下, 不同深度土层含水率几乎呈一致的增加, 水分在土层全断面存储。

(3) 初期植被 (须根根系) 条件对毛细阻滞覆盖层储水能力影响较小。有植被条件实测可用储水量 S_{fac} 为 259.82 mm, 无植被条件为 251.95 mm, 前者仅比后者大 7.87 mm (大 3.12%); 有植被条件实测总储水量 S_{foc} 为 381.90 mm, 无植被条件为 374.03 mm, 前者比后者大 7.87 mm (大 2.10%)。这一方面是由于植被须根根系仅在坡面以下 0~50 cm 范围; 另一方面植被生长时间短, 未能经历一个完整的生长周期对土体结构影响不显著有关。

致 谢: 感谢浙江大学建筑工程学院环境土工课题组对本文试验提供的支持与帮助。

参 考 文 献:

- [1] DWYER S F. Construction overview of six landfill cover designs[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2000.
- [2] HAUSER V L, WEAND B L, GILL M D. Natural covers for landfills and buried waste[J]. J Environ Eng, 2001, 127(9): 768 - 775.
- [3] 张文杰, 耿 潘. 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶工作机理及性能分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 454 - 459. (ZHANG Wen-jie, GENG Xiao. Performance and mechanism of capillary-barrier evapotranspiration cover of landfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 454 - 459. (in Chinese))
- [4] 张文杰, 林 午, 董林兵. 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶模型试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1263 - 1268. (ZHANG Wen-jie, LIN Wu, DONG Lin-bing. Model test of a capillary barrier evapotranspiration cover for landfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1263 - 1268. (in Chinese))
- [5] 赵 慧, 刘川顺, 王 伟, 等. 垃圾填埋场腾发覆盖系统控制渗滤效果的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9): 86 - 89. (ZHAO Hui, LIU Chuan-shun, WANG Wei, et al. Study of leachate control effect of evapotranspiration landfill cover system[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(9): 86 - 89. (in Chinese))

- Chinese))
- [6] 陆海军, 采茂田, 张金利. 垃圾填埋场传统封顶和 ET 封顶的比较研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 509 – 514. (LU Hai-jun, LUAN Mao-tian, ZHANG Jin-li. Research on comparision between traditional compacted clay and evapotranspiration cover systems of landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 509 – 514. (in Chinese))
- [7] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 含非饱和导排层的毛细阻滞覆盖层长期性能分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, **53**(6): 1101 – 1109. (JIAO Wei-guo, ZHAN Liang-tong, JI Yong-xin, et al. Analysis on long-term performance of capillary-barrier cover with unsaturated drainage layer[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, **53**(6): 1101 – 1109. (in Chinese))
- [8] ALBRIGHT W H, BENSON C H, GEE G W, et al. Field water balance of landfill final covers[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(6): 2317 – 2332.
- [9] WILLIAM E S, MUNK J, WILLIAM J. Four-year performance evaluation of a pilot-scale evapotranspiration landfill cover in southcentral Alaska[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, **82**: 1 – 7.
- [10] MELCHIOR S, SOKOLLEK V, BERGER K, et al. Results from 18 years of in situ performance testing of landfill cover systems in Germany[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010(8): 815 – 823.
- [11] FAYER M J, GEE G W. Multiple-year water balance of soil covers in a semiarid setting[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, **35**(1): 366 – 377.
- [12] BOHNHOFF G L, OGORZALEK A S, BENSON C H. Field data and water-balance predictions for a monolithic cover in a semiarid climate[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2009, **135**(3): 333 – 348.
- [13] WAUGH W J, SMITH G M. Effects of Root Intrusion at the Burrell, Pennsylvania, Uranium Mill Tailings Disposal Site[R]. Grand Junction: US Department of Energy, 1997.
- [14] DEVITT D A, SMITH S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a mojave desert ecosystem[J]. Journal of Arid Environments, 2002, **50**(1): 99 – 108.
- [15] SONG L, LI J H, ZHOU T, et al. Experimental study on unsaturated hydraulic properties of vegetated soil[J]. Ecol Eng, 2017, **103**: 207 – 216.
- [16] BORDOLOI S, GARG A, SREEDEEP S, et al. Investigation of cracking and water availability of soil-biochar composite synthesized from invasive weed water hyacinth[J]. Bioresour Technol, 2018, **263**: 665 – 677.
- [17] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 植被作用下膨胀土渗透和力学特性及堑坡防护机制[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 85 – 91. (LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Permeability and mechanical characteristics of expansive soil and cut slope protection mechanism under vegetation action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 85 – 91. (in Chinese))
- [18] JOTISANKASA A, SIRIRATTANACHAT T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function[J]. Can Geotech J, 2017, **54**: 1612 – 1622.
- [19] NI J J, CHEN X W, NG C W W, et al. Effects of biochar on water retention and matric suction of vegetated soil[J]. Géotechnique Lett, 2018, **8**: 124 – 129.
- [20] NI J J, BORDOLOI S, SHAO, et al. Two-year evaluation of hydraulic properties of biochar-amended vegetated soil for application in landfill cover system[J]. Science of the Total Environment, 2020, **712**, 136486.
- [21] 程鹏, 李锦辉, 宋磊. 生态边坡的水力和力学特性分析: 试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(10): 1901 – 1907. (CHENG Peng, LI Jin-hui, SONG Lei. Hydraulic and mechanical characteristics of ecological slopes: experimental study[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(10): 1901 – 1907. (in Chinese))
- [22] 周腾. 含根系土体水力特性的试验与理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. (ZHOU Teng. Experimental and Theoretical Research of Hydraulic Properties of Root-Containing Soil[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese))
- [23] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 黄土-碎石毛细阻滞覆盖层储水能力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1149 – 1157. (JIAO Wei-guo, ZHAN Liang-tong, JI Yong-xin, et al. Experimental study on the effect of vegetation on water transport and storage in soil cover[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 1149 – 1157. (in Chinese))
- [24] KHIRE M V, BENSON C H, BOSSCHER P J. Capillary barriers: design variables and water balance[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(8): 695 – 708.
- [25] AUBERTIN M, CIFUENTES E, APITHY S A, et al. Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**: 1146 – 1164.
- [26] TAMI D, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, **41**: 814 – 830.