

DOI: 10.11779/CJGE2023S10024

斥水砂-黏混合土的基本物理力学性质

杨 松¹, 黄英豪^{*2}

(1. 北部湾大学建筑工程学院, 广西 钦州 535011; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 斥水土具有许多优良的性质, 目前在利用斥水土方面主要针对斥水性砂土, 为扩展斥水土的应用范围, 对斥水砂-黏混合土进行了一系列物理力学试验, 结果表明: 斥水黏土的松散土样在等温条件下吸附稳定后, 表现出了明显斥水不均匀性, 而斥水黏土与斥水砂土混合样则呈现斥水均匀性。2 种土样击实后均表现为斥水均匀性。亲水土的土水特征曲线位置要高于斥水土, 但不会出现基质吸力由“吸引”变为“排斥”情况, 亲水黏土斥水化后黏聚力会有所降低。亲水或斥水黏土中加砂减小了土体的黏聚力, 但增加了内摩擦角。黏土中加入亲水或斥水砂并不会引起二者强度的明显差异。斥水土与亲水土物理力学性质的差异主要是由于黏土颗粒吸附及斥水性黏土团聚体的存在造成的。斥水黏土加入斥水砂将极大拓展斥水土的应用范围, 将为斥水土的进一步推广和应用提供相应的试验基础。

关键词: 斥水土; 吸附; WDPT; 基质吸力; 抗剪强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0029-05

作者简介: 杨 松(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事非饱和土力学等方面的教学和科研。E-mail: ysliff007@126.com。

Basic physical and mechanical properties of water repellent sand-clay mixed soil

YANG Song¹, HUANG Yinghao²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011 China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The water repellent soil has many excellent properties. At present, its use is mainly aimed at the water repellent sand. In order to expand the application scope of the water repellent soil, a series tests are carried out. The results show that the loose soil samples of the mixture of the water repellent clay exhibit obvious non-uniformity of water repellency after adsorption stability under isothermal conditions, while the mixture of the water repellent clay and sand exhibits uniformity of water repellency. Two kinds of soils are uniformly repelled after compaction. The position of soil-water characteristic curve of the hydrophilic soil is higher than that of the water repellent soil, but there is no change of matric suction from "attraction" to "exclusion". The cohesion of hydrophilic clay will be reduced after water repellency. Adding hydrophilic sand or water repellent sand does not cause the difference of shear strength. The difference of physical and mechanical properties between the water repellent soil and the hydrophilic soil is mainly due to the adsorption of clay particles and the existence of water repellent clay aggregates. The addition of the water repellent clay and sand greatly expands the application scope of the water repellent soil. The research results may provide the corresponding test basis for the popularization and application of the water repellent soil.

Key words: repellent soil; absorption; WDPT; matric suction; shear strength

0 引 言

天然土颗粒表面被有机物覆盖或土颗粒中含有斥水性物质时, 土壤将由亲水变为斥水^[1]。天然斥水土在自然界中比较常见, 如经历过森林火灾的林地、松树林下的土壤、再生水灌溉后的农田等。斥水土壤的研究主要集中在农业与环境领域, 当土壤由亲水变为斥水后, 降雨难以渗入土壤内部, 作物根部得不到水分的补充, 会造成出苗率降低或农作物减产等^[2]。如果土壤斥水性分布不均匀, 则可能形成优先流通道,

增加地下水污染的风险^[3], 因此如何使土壤由斥水变成亲水则成为土壤学领域的研究重点, 即斥水土修复。斥水土修复主要包括物理修复、化学修复和生物修复^[4], 其中最常见也是最简单的修复方法是在斥水土壤中加入黏土进行修复, 天然黏土矿物亲水性很好, 并且具有巨大的比表面积, 土壤的斥水性随着黏土的加入量

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51879166, 41867038)

收稿日期: 2023-07-05

*通信作者 (E-mail: yhhuang@nhri.cn)

而降低^[5]。

斥水土也有其有利的一面^[6], 如有利于土壤团聚体的稳定性、固定土壤的有机碳、减少深层土壤的水分蒸发、抑制膨胀土开裂。斥水土阻止水分入渗对农作物生长是有害的, 但对提高土体的强度却是有利的, 通常非饱和土的强度要大于饱和土, 阻止降雨入渗可以保持土体处于非饱和状态, 从而提高边坡等土工结构的稳定性。Kim 等^[7]利用斥水砂土作为边坡的防渗层, Gupta 等^[8]的研究表明铺盖 2 cm 厚的斥水砂土能使下层土壤保水率达到 90% 以上, 覆盖斥水砂土能促进半干旱地区的植物生长。斥水土的应用主要针对斥水砂土, 与黏土相比, 砂土斥水要容易很多, 另外黏土作为斥水土的改良剂, 其本身的斥水性研究较少。然而, 斥水砂土在应用时存在明显缺陷, 如斥水砂土存在明显的临界含水率, 即当斥水砂土中含有少量水分就会使其斥水性消失^[9]。另一方面, 斥水砂土在较低含水率下处于松散状态, 土体强度很低, 难以承受荷载。

针对斥水砂土的这些缺陷, 本文对斥水砂-黏混合土的基本物理性质进行了研究, 包括斥水砂-黏混合土的水蒸气吸附试验, 击实试验、松散样和击实样的滴水穿透时间 (WDPT) 试验、基质吸力测量试验及抗剪强度试验, 通过这些研究将为扩宽斥水土的应用提供相应试验基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验用土为黏土和砂土, 将土样取回风干压碎后过 2 mm 筛备用, 黏土塑性指数为 28.4, 比表面积为 81.3 m²/g, 砂土比表面积 3.45 m²/g。斥水土的制备采用混合制样法, 十八胺作为斥水剂, 把十八胺充分碾碎呈粉末状加入风干土样充分搅拌 (图 1 (a)), 搅拌均匀后将其放置到室外阳光下晾晒 3 d。黏土和砂土斥水化后采用滴水穿透时间 (WDPT) 测试其斥水度, 斥水土样均需达到极度斥水级^[10]。最终确定的砂土十八胺的加入量为 0.06 g/kg, 黏土十八胺的加入量为 0.8 g/kg。

1.2 试验方案

设计 5 种混合土配制方案, 试样代号、界限含水率及初始 WDPT 如表 1 所示, 为确定 S3, S4, S5 混合土样的斥水稳定性, 先进行不同湿度下这 3 种混合土水蒸气吸附试验, 通过击实试验确定各土样的最优含水率及最大干密度, 在最优含水率和最大干密度条件下开展压实样 WDPT 试验、基质吸力测量试验和直剪试验。

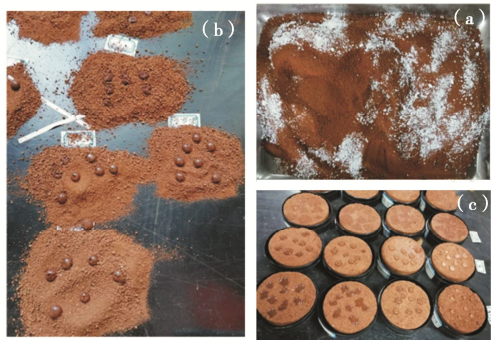


图 1 亲水土样混合十八胺及 WDPT 试验

Fig. 1 Mixture of octadecamine in water repellent soil and WDPT tests

土壤斥水性测量采用滴水穿透时间法 (WDPT), 用滴管在试样表面的不同位置滴上 7~9 滴去离子水, 每个水滴的体积大概是 50 μL, 用秒表记录每个水滴完全渗入土样所用的时间。图 1 (b) 为松散土样的 WDPT 试验, 图 1 (c) 为击实土样的 WDPT 试验

由于黏土具有巨大的比表面积, 使黏土具有吸附性, 尤其是吸附空气中的水气, 而斥水土的斥水性和水分密切相关, 为此设计了斥水土的吸附试验, 以此研究人工斥水土放置在自然环境中的斥水稳定性, 试验方法及步骤如下: 把干燥的 S3, S4, S5 各取 20 g 土样放入配有不同浓度 NaCl 溶液的密封容器, 设计 0, 30%, 60%, 100% 4 组 NaCl 溶液浓度, 以此控制容器内的相对湿度, 把密封容器放入恒温箱, 恒温箱温度控制为 25℃, 每隔 24 h 称一次土样, 当土样的质量出现正负波动, 则认为土样吸附稳定, 把土样取出进行 WDPT 试验。

表 1 交叉混合土样的配比、界限含水率和 WDPT

Table 1 Proportions, limit water contents and WDPT of cross-mixed soil samples

试样代号	S1	S2	S3	S4	S5
土样配比	亲水黏土	亲水黏土+30%亲水砂	亲水黏土+30%斥水砂	斥水黏土	斥水黏土+30%斥水砂
液限/%	59.8	45.6	45.3	54.2	43.1
塑限/%	31.4	28.7	28.5	30.9	27.6
塑性指数 I_p	28.4	16.9	16.8	23.3	15.5
初始 WDPT	1	1	2	>3600	>3600

击实试验采用轻型标准击实仪, 每种土样分别准备 5 份, 各加入不同水分, 保湿静置 24 h 后进行击实试验。为得到不同含水率的土样, 把击实试验得到的土样进行抽气饱和, 饱和后通过在室内静置让其自然蒸发不同时间得到不同含水率的试样, 静置好的试样还需要密封后再静置不小于 24 h 以保证试样水分分布均匀。在此基础上再进行基质吸力测量试验、击实样 WDPT 试验和直剪试验。基质吸力测量试验采用滤纸法, 直剪试验分别在 100, 200, 300, 400 kPa 条件下

进行快剪。

2 结 果

2.1 亲水-斥水混合土的基本物理性质

各土样从吸附试验开始到吸附平衡需要 30~40 d, 吸附平衡后不同湿度环境下的 WDPT 如图 2 所示, 土壤的斥水性对湿度变化不敏感, S3 试样静置吸附后, 斥水度有所提高, 但并不明显, 从初始的小于 2 s 提高到 3~4 s, 仍然处于亲水范畴。S4 试样吸附平衡后同一试样的斥水性表现出明显的不均匀性, 即有的点可能极度斥水, 有的点则可能亲水, 而在吸附试验前其斥水性很均匀。S5 试样在吸附前和吸附后都保持了均匀的斥水性, 吸附前和吸附后均为极度斥水。

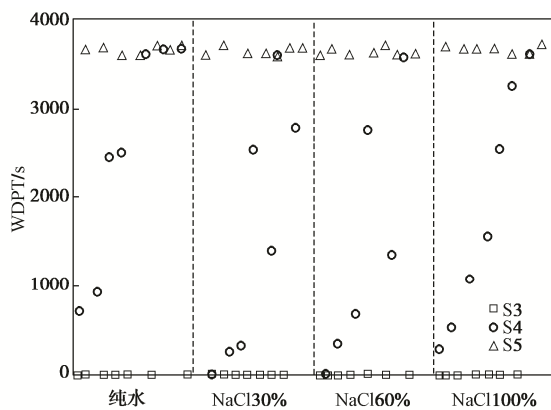


图 2 吸附平衡后 S3, S4, S5 松散土样的 WDPT

Fig. 2 WDPT of loose soil samples S3, S4 and S5 after adsorption stability

5 种土样的击实曲线如图 3 所示。含砂的 3 种试样 S2, S3 和 S5 击实曲线要高于不含砂的 S1 和 S4, 即: 黏土加砂后最优含水率减小, 最大干密度增大。不加砂的 2 种黏土样 S1 和 S4 最优含水率大致相等, 均为 32% 左右, 但亲水试样 S1 斥水化后最大干密度从 1.39 g/cm^3 下降到 1.34 g/cm^3 , 加砂混合土样的最优含水率也基本一致, 均为 30% 左右, 亲水加砂混合样 S2 部分斥水化或完全斥水化后, 干密度从 1.51 g/cm^3 分别下降为 $1.42, 1.43 \text{ g/cm}^3$ 。斥水化对最优含水率基本没影响, 但会小幅度降低试样的最大干密度。

5 种试样的土水特征曲线 (SWCC) 如图 4 所示, 根据各试样 SWCC 的变化规律可大致分为 3 个区域, 第一个区域为均匀变化区, 其基质吸力的变化范围为 $0 \sim 600 \text{ kPa}$, 在该区域内各试样的基质吸力随含水率的减小线性增加, S1 的 SWCC 最高, S2 次之, 依次类推, S5 的 SWCC 位于最下方, 表明当试样基质吸力相同时, S1 所对应的含水率最大而 S5 所对应的含水率最小。第 2 个区域为交叉影响区, 该区域基质吸

力的变化范围为 $600 \sim 900 \text{ kPa}$, 在该区域内各试样 SWCC 出现交叉, 没有出现明显的规律性。第 3 个区域为各试样的残余区。

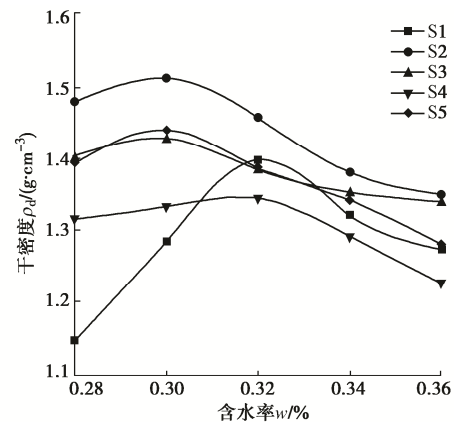


图 3 各土样的击实曲线

Fig. 3 Compaction curves of soil samples

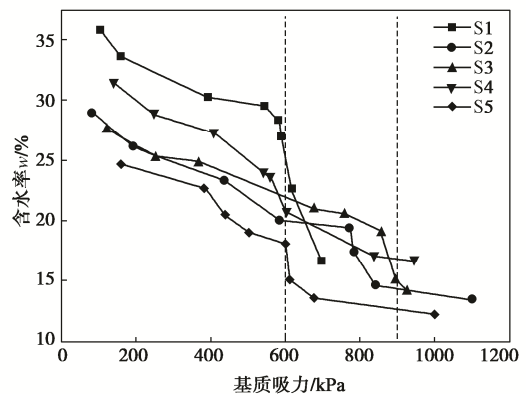


图 4 各土样的土水特征曲线

Fig. 4 Soil-water characteristic curves of soil samples

击实样脱湿条件下 WDPT 随含水率的变化关系如图 5 所示, S3 击实样在各个含水率下始终保持亲水状态。S4 和 S5 的初始含水率为最优含水率, 初始状态下 S4 和 S5 就表现出一定的斥水性, 从初始状态开始, 随含水率的减小, WDPT 会出现峰值, 峰值过后 2 种试样的斥水性减小, 亲水性增加, 当含水率减小到 3% 左右时, 两种试样的斥水度都突然增加, 从轻微斥水突然变成极度斥水, 形成第二个峰值。S4 击实试样的斥水性与散土试样相比, 同一时刻试样各点的斥水性要明显均匀很多, S5 的散土试样和击实试样同一时刻各点的斥水性都比较均匀。

2.2 亲水-斥水混合土的强度特性

各试样抗剪强度与法向应力间近似直线关系。从各试样的抗剪强度线中难以区分亲水或斥水试样, 各斥水混合样和斥水试样的抗剪强度和亲水试样比并没有明显降低。亲水试样或斥水试样的抗剪强度线均与含水率密切相关。

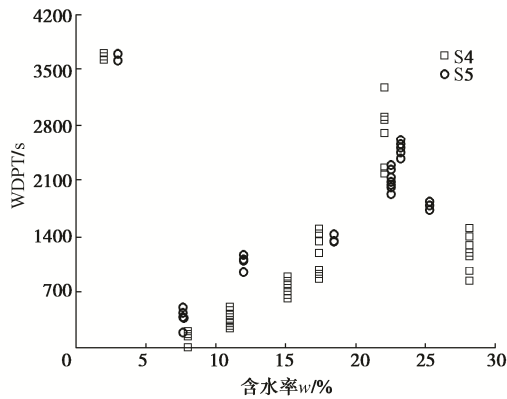


图5 击实样的 WDPT 随含水率变化

Fig. 5 Variation of WDPT of compacted samples with water content

各试样强度参数随含水率的变化关系如图 6 所示,亲水黏土试样 S1 的黏聚力 c 与含水率关系曲线位置最高,斥水黏土 S4 次之,且这 2 条曲线在含水率较大和较小时比较接近,表明黏土斥水化后黏聚力会降低,但当含水率较小或较大时,减小程度有限。黏土加砂后其黏聚力会明显减小,但斥水作用对其影响并不明显,含水率较大时各试样的黏聚力更接近。各试样的内摩擦角的变化规律则与黏聚力变化规律明显不同,黏土试样加砂后能增大其内摩擦角,2 种黏土试样的内摩擦角与含水率关系曲线位置相对较低,但当含水率大于最优含水率时,各试样的内摩擦角大小差距明显减小。

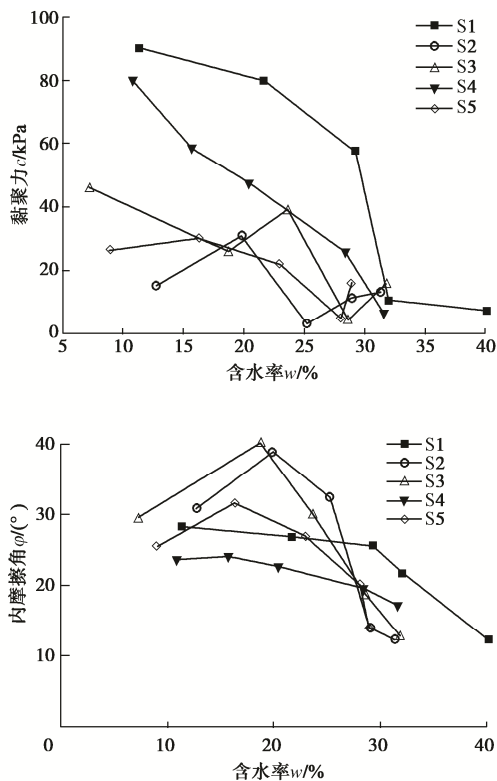


图6 强度参数随含水率变化关系

Fig. 6 Variation of strength parameters with water content

3 讨 论

3.1 斥水土的吸附性与基质吸力

斥水土和亲水土一样,都发生了吸附,固体材料发生吸附的主要影响因素为比表面积、温度、压强等。黏土颗粒有巨大的比表面积,因此其具有很好的吸附性,当斥水土颗粒吸附了空气中的水蒸气,水蒸气会以结合水的形式存在,结合水包裹了斥水的土颗粒,此时的斥水土颗粒也会变得亲水。如图 7 所示,混合土样中由于砂土比表面积小,其吸附作用很小,因此砂土能一直保持斥水,而少量的斥水颗粒也会使土壤表现出斥水,因此才会出现图 3 中 S4 斥水不均匀, S5 斥水均匀的现象。

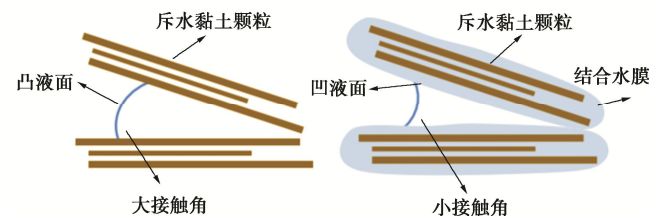


图7 斥水性黏土颗粒间的接触角

Fig. 7 Contact angles of water repellent clay

在很多模型计算中,当土颗粒具有较大接触角时,土颗粒中的基质吸力会由“吸引”变成“排斥”^[11],这与试验结果相矛盾^[12],本文的基质吸力测量试验中也没有出现基质吸力为“正”的情况,事实上,这些理论模型在计算时的接触角采用的是干燥土壤的初始接触角,但当土壤出现吸附后,斥水土颗粒中的凸液面变成了凹液面(图 7),接触角变小,此时的基质吸力不会出现“排斥”情况。虽然如此,试验表明斥水土的土水特征曲线与亲水土相比会整体下移,即相同的基质吸力斥水土所对应的含水率较小,这是由于在斥水土中出现了斥水土团聚体,如图 8 所示,亲水土制备斥水土时,一些亲水土团聚体被斥水物质包裹,此后的干湿循环过程中水分很难进入斥水团聚体内部,团聚体内部存在干燥颗粒与气体,因此相同的基质吸力条件下,斥水土所对应的含水率偏低。

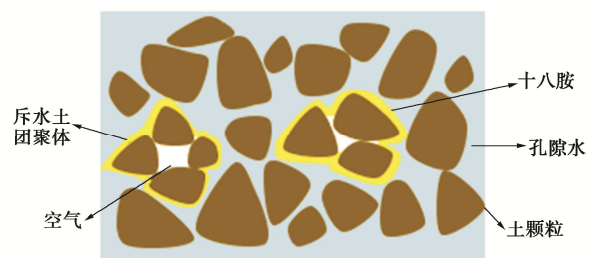


图8 斥水土团聚体

Fig. 8 Water repellent soil aggregates

3.2 斥水土的应用展望

斥水砂土应用时因为要采用干燥松散砂土, 松散干燥砂土强度低, 应用环境受限, 这就极大限制了其应用范围。斥水黏土由于吸附会导致斥水不均匀, 且制备斥水黏土要消耗大量的斥水剂, 因此极大限制了斥水黏土的应用推广。把斥水砂土和斥水黏土混合起来, 就能发挥二者的优势, 与干燥斥水砂土相比, 其强度提高, 并且斥水范围明显扩大, 即使在较大含水率条件下也具有一定的斥水性; 与斥水黏土相比, 其斥水性分布更加均匀, 斥水剂用量由于砂土的存在也明显减少。因此斥水砂土和斥水黏土的混合物更有利于应用推广, 限于篇幅, 本文没有考虑斥水砂土和斥水黏土的最优配比及颗粒级配的影响。

4 结 论

(1) 斥水黏土和斥水黏土斥水砂土混合样的松散土样在等温条件下吸附稳定后, 表现出了明显斥水不均匀, 而斥水黏土与斥水砂土混合样则呈现斥水均匀性。2 种土样击实后均表现为均匀斥水。

(2) 斥水土的土水特征曲线与亲水土相比位置较低, 但不会出现基质吸力由“吸引”变为“排斥”情况, 相同的基质吸力条件下, 亲水土壤所对应的含水率较大, 而斥水土壤所对应的含水率较小, 这是由于斥水土壤中存在斥水团聚体, 水分难以进入。

(3) 亲水黏土斥水化后黏聚力会有所降低, 亲水或斥水黏土中加砂减小了土壤的黏聚力, 但增加了内摩擦角, 加入亲水砂或斥水砂并不会引起强度的明显差异。

参考文献:

- [1] DIEHL D. Soil water repellency: dynamics of heterogeneous surfaces[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, **432**: 8-18.
- [2] 李 毅, 商艳玲, 李振华, 等. 土壤斥水性研究进展[J]. *农业机械学报*, 2012, **43**(1): 68-75. (LI Yi, SHANG Yanling, LI Zhenhua, et al. Advance of study on soil water repellency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, **43**(1): 68-75. (in Chinese))
- [3] RYE C F, SMETTEM K R J. The effect of water repellent soil surface layers on preferential flow and bare soil evaporation[J]. *Geoderma*, 2017, **289**: 142-149.
- [4] MÜLLER K, DEURER M. Review of the remediation strategies for soil water repellency[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **144**(1): 208-221.
- [5] LEELAMANIE D A L, KARUBE J. Water-dependent repellency of model soils as affected by clay[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, **57**(1): 7-10.
- [6] YANG B J, BLACKWELL P S, NICHOLSON D F. A numerical model of heat and water movement in furrow-sown water repellent sandy soils[J]. *Water Resources Research*, 1996, **32**(10): 3051-3061.
- [7] KIM B S, REN D J, PARK S W, et al. Establishing selection criteria of water repellent sandy soils for use in impervious layer of engineered slope[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, **293**: 123551.
- [8] GUPTA B, SHAH D O, MISHRA B, et al. Effect of top soil wettability on water evaporation and plant growth[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, **449**: 506-513.
- [9] 杨 松, 黄剑峰, 罗茂泉, 等. 斥水性砂土水-气形态及其对斥水-亲水转化的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(11): 247-252. (YANG Song, HUANG Jianfeng, LUO Maoquan, et al. Pore water-air configurations in water repellent sandy soil and its effects on transformation of hydrophilicity to hydrophobicity[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(11): 247-252. (in Chinese))
- [10] DEKKER L W, DOERR S H, OOSTINDIE K, et al. Water repellency and critical soil water content in a dune sand[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(6): 1667-1674.
- [11] 孙银磊, 汤连生, 刘 洁. 非饱和土微观结构与粒间吸力的研究进展[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(4): 1095-1122. (SUN Yinlei, TANG Liansheng, LIU Jie. Advances in research on microstructure and intergranular suction of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(4): 1095-1122. (in Chinese))
- [12] KARATZA Z, BUCKMAN J, MEDERO G M, et al. Evolution of meniscus structures in hydrophobic granular systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **603**: 126954.

(编校: 胡海霞)