

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-13

土层结构对非饱和毛细水盐运移的影响

吕擎峰¹, 单小康², 赵彦旭³, 贾博博¹, 杲 斐³

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410000; 3. 中国铁建二十一局集团有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要:层状土层之间孔隙结构和水力学性质的不连续性对土体水盐运移有显著影响。基于现场调查, 设计了两种不同粒径土层二元结构组合(黄土-砂质粉土和黄土-粉质黏土)的室内土柱试验, 通过模型试验讨论了不同地下水补给条件下土层结构对毛细水分布和盐分累积的影响。试验结果表明: 在毛细水补给条件下, 黄土-砂质粉土构成的上细下粗型土层结构有利于毛细水盐运移, 经过 60 d 蒸发后, 其表层 SO_4^{2-} 含量是上粗下细型土柱的两倍。在无毛细水补给条件下, 砂质粉土层中水盐向上迁移总量和迁移速率大于粉质黏土层, 最终上细下粗型土柱中上覆土层各层位离子含量均大于上粗下细型土柱。研究结果为层状土区盐渍土病害的防治提供了试验参考。

关键词: 土层结构; 毛细作用; 水盐运移; 土柱试验

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2021)04-0099-07

Influence of soil layer structure on unsaturated capillary water and salt transport

LYU Qingfeng¹, SHAN Xiaokang², ZHAO Yanxu³, JIA Bobo¹, GAO Fei³

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410000, China; 3. China Railway 21st Bureau Group Co., Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The discontinuity of pore structure and hydraulic properties between layered soils has a significant influence on the transportation of water and salt. Based on the field investigation, the laboratory soil column tests of two soil layer binary structure combinations (loess-sandy silt and loess-silty clay) were designed. Through the model tests, the influence of soil layer structure on capillary water distribution and salt accumulation under different groundwater supply conditions was discussed. The test results show that under the condition of capillary water supply, the upper-fine and lower-coarse soil layer structure composed of loess-sandy silt is beneficial to capillary water and salt transportation. After 60 days of evaporation, the surface content of the upper-fine and lower-coarse soil column is twice of the upper-coarse and lower-fine soil column. Under the condition of no capillary water supply, the total amount and rate of upward migration of water and salt in the sandy silt layer is greater than that of the silty clay layer, and finally the ion content of each of the overlying soil layer in the upper-fine and lower-coarse soil column is greater than the upper-coarse and lower-fine soil column. The research results provide experimental reference for the prevention of saline soil disease in layered soil areas.

Keywords: soil layer structure; capillary action; soil column test; water and salt transport

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878322); 甘肃省科技重大专项(19ZD2FA001); 中国铁建研发计划项目(2019-B08)

第一作者: 吕擎峰(1971-), 男, 甘肃白银人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: lvqf@lzu.edu.cn

0 引言

土体沉积受搬运介质和搬运方式的影响,往往形成不同土层结构的层状土体。层状土层之间孔隙结构和水力学性质的不连续性^[1-3],导致层状土体和均质土体的水盐运移规律存在显著差异。

层状土体的水盐运移规律在土壤学领域已经取得了一些研究成果。李韵珠等^[4]指出壤土中的黏土夹层对水盐运移具有阻滞作用。史文娟等^[5]通过室内土柱试验发现不同层位的夹砂层对水盐运移存在抑制或促进作用。HUANG 等^[6]发现砂土和砂黄土互层结构可以限制水分向上运移,抑制土体蒸发。李毅等^[7]认为砂土夹层和黏土夹层均有阻水作用。黏土的阻水能力源于其低渗透性,砂土层的阻水能力则是因为孔隙水由细粒土层向砂土层运移时存在滞后效应,因此在层状土层界面处水分运移均会出现停滞^[8-9]。张莉等^[10]研究发现在壤土中设置砂层能够加速上覆土层脱盐和抑制下伏土层返盐,该方法较依赖于降雨的淋滤作用,对于旱半干旱地区的适用性还有待研究。ALIMI 等^[11]设计了冲积土和黏质砂土以及冲积土和黏土的双层土柱试验,结果表明黏土层的阻渗能力更强,而黏土层厚是延迟溶质转移的关键因素。LIU 等^[12]对不同土体的水分和溶质含量进行了长期监测,发现均质土中水盐入渗较快,而层状土中水流受阻,盐分在局部累积。

层状土层水盐运移规律研究不仅与土壤水盐管理相关,同时涉及地基承载力计算、隐伏岩溶塌陷和路基盐胀等工程问题^[13-16]。目前层状土层水盐运移研究侧重于讨论入渗过程的水盐动态变化,而针对层状土层毛细水盐运移研究尚且不足。本文基于某高铁路基上拱变形处的现场调查,设计了两种不同粒径土层二元结构组合(黄土-砂质粉土和黄土-粉质黏土)的室内土柱模型试验,讨论了不同地下水补给条件下土层结构对土体毛细水分布和盐分累积的影响。研究结果旨在为层状土区硫酸盐病害防治提供试验依据。

1 试验背景

西北地区某高铁路基上拱变形处的地层剖面和水盐分布如图 1 所示,表层覆盖薄层砾石土,上覆粉质砂土层,层厚约 80 cm,下伏厚层圆砾石土层。粉质砂土层的含水率和离子含量均高于下伏圆砾石土层,40 cm 层位处盐分聚积,SO₄²⁻和Cl⁻含量接近 2%,下伏圆砾石土层离子含量则非常低。由于区域内地下水埋深较大(约 9 m),而且粗粒土中毛细上升高度较小,距地表

400 cm 土层中基本没有地下毛细水补给,驱动盐分运移的水分主要来源于降雨入渗和地表径流。

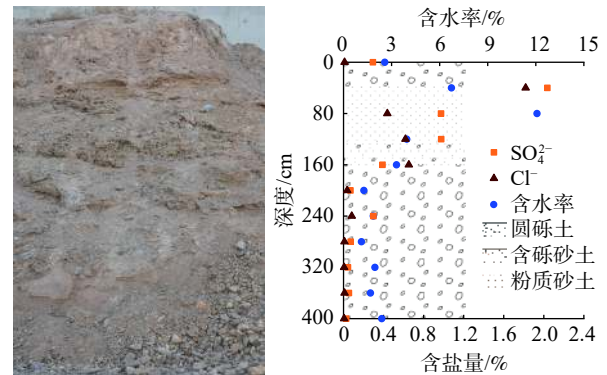


图 1 上拱变形处土层结构与水盐垂直分布图

Fig. 1 The soil layer structure and water-salt distribution in heave site

由图 2 可知,未上拱变形处剖面上覆砂砾土层,下伏粉质黏土层,含水率和Cl⁻含量在界面处呈断层式分布。上覆粗粒土层含水率约 0.5%~2%,Cl⁻含量均小于 0.08%;下伏细粒土层含水率在 9%~13%之间,Cl⁻含量均大于 0.57%。SO₄²⁻在深度 120~400 cm 土层中含量较高,深度 0~80 cm 土层中含量较低。SO₄²⁻和Cl⁻最大含量均小于 1%,盐分未发生局部聚积,且表层含盐量较低。下伏粉质黏土层的毛细上升高度较大,有利于地下毛细水补给,通过下伏土层含水率较大推测距地表 400 cm 土层内有一定的毛细水补给。

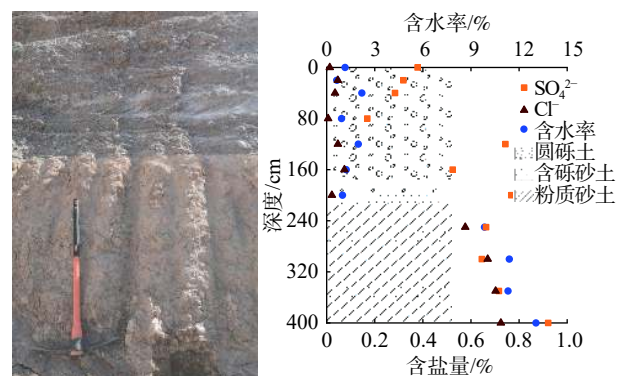


图 2 未上拱变形处土层结构与水盐垂直分布图

Fig. 2 The soil layer structure and water-salt distribution in contrast site

上拱变形处土层呈上细下粗型结构,盐分在上覆细粒土层中聚积,而未上拱变形处土层呈上粗下细型结构,盐分主要储存在下伏细粒土层中,离子分布较为均一,表层土体未发生盐分聚积现象。上述现象表明土层结构对水盐分布存在显著影响,而水盐分布的差异性对硫酸盐病害发育存在潜在影响。

2 试验设计与方法

2.1 试验设计

根据现场调查情况设计了室内土柱试验, 其装置如图 3 所示, 由多层有机玻璃筒和补水瓶组成。有机玻璃筒内径 20 cm, 高度分为 40 cm 和 10 cm 两种, 中间用法兰盘连接。模拟试验土柱上覆土层厚 30 cm, 下伏土层厚 10 cm, 现场调查发现区域内地下水含盐量较低, 盐分主要分布在土层中, 因此将下伏土层设置为质量分数 5% 的含盐土层。含盐土层下方根据不同的地下水条件设置不同隔断层, 标准砂层模拟有毛细水补给的情况, 卵砾石层则模拟无毛细水补给的情况, 隔离层的另一作用是防止含盐层的盐分扩散至蒸馏水中。

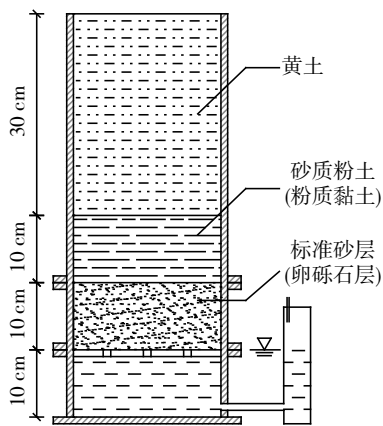


图 3 试验装置

Fig. 3 Test apparatus

试验组设计如表 1 所示。上覆土层均为洗盐后的黄土, 下伏土层分别为砂质粉土和粉质黏土, 黄土-砂质粉土构成上细下粗型土层结构, 黄土-粉质黏土构成上粗下细型土层结构, 土柱 IA 和 IB 中存在毛细水补给, II A 和 II B 中则无毛细水补给。

表 1 试验组设计
Table 1 Test group design

| 土柱编号 | IA | IB | II A | II B |
|------|------|------|------|------|
| 上覆土层 | 黄土 | 黄土 | 黄土 | 黄土 |
| 下伏土层 | 砂质粉土 | 粉质黏土 | 砂质粉土 | 粉质黏土 |
| 隔断层 | 标准砂层 | 标准砂层 | 卵砾石层 | 卵砾石层 |

试验黄土取自甘肃省兰州市东岗镇, 砂质粉土与粉质黏土由洗盐后的黄土掺石英砂和黄土掺高岭土得到。三种土样的基本参数见表 2, 颗分曲线见图 4。

土样以分层夯实的方式填入有机玻璃筒中, 上覆黄土层采用 15% 最优含水率和 90% 的压实度, 即干密度

表 2 试验土样的物理性质

Table 2 Physical properties of soil samples

| 土样 | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 | 最大干密度/(g·cm ⁻³) | 最优含水率/% |
|------|------|------|------|-----------------------------|---------|
| 黄土 | 27.2 | 18.2 | 9.0 | 1.80 | 15.0 |
| 砂质粉土 | 21.4 | 13.5 | 7.9 | 2.00 | 12.0 |
| 粉质黏土 | 30.6 | 19.5 | 11.1 | 1.73 | 17.0 |

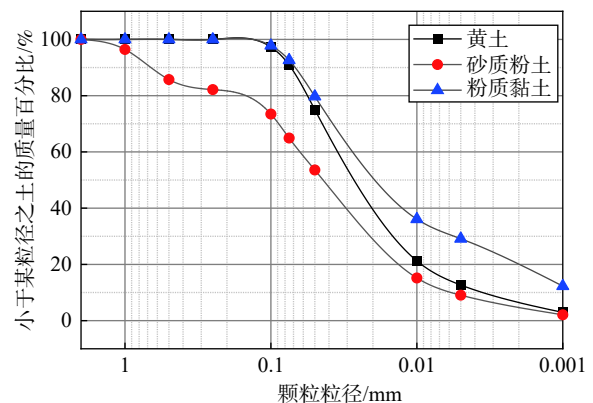


图 4 试验土样的粒径分布曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves of soil samples

1.62 g/cm³, 下伏土层的含水率与上覆土层保持一致, 考虑到不同土样的天然孔隙比存在显著差异, 因此干密度通过统一的压实度进行控制, 压实度均设置为 90%, 砂质粉土层夯实干密度为 1.8 g/cm³, 粉质黏土层夯实干密度为 1.56 g/cm³。

2.2 试验过程

试样制作完成后在室内进行蒸发试验, 分别在 10, 20, 40, 60 d 取样, 前三次通过筒壁上的预留取样孔进行取样, 取样深度为 0, 7, 14, 21, 28, 32, 36, 40 cm; 60 d 时拆除土柱取样, 并增加 2, 4 cm 取样深度, 土样采用烘干法进行含水率测定。取 10 g 干土样按照土水比 1 : 5 配成土水混合溶液, 在 SHZ-88 型振荡器上振荡 30 min, 将震荡后的土悬液放入 TDL-SA 型离心机中离心 30 min, 用针管抽出离心管上部清液, 经过 0.45 μm 孔径微孔膜过滤, 得到土样浸出液, 采用 DIONEX 公司生产的 ICS-2500 型离子色谱仪测定 60 d 土样浸出液中的易溶盐离子含量。

3 试验结果与分析

3.1 毛细水补给土柱的水分运移

毛细水补给土柱 IA 和 IB 含水率沿深度分布结果见图 5, 两组试验土柱含水率在 10 d 时已经基本稳定, 试验周期内同一层位的含水率略有波动, 整体分布趋势没有显著变化。土柱 IA 和 IB 上覆黄土层的含水率随

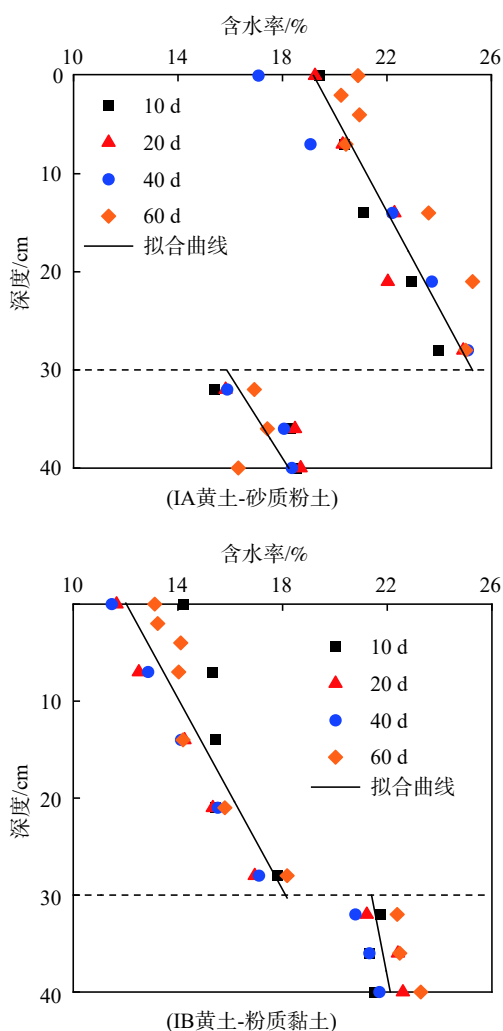


图 5 毛细水补给土柱含水率沿深度分布
Fig. 5 Distribution of water content along depth with capillary water supply

深度增大整体呈线性增大,拟合线性曲线的斜率分别为 4.94 和 4.93,含水率梯度基本一致。IA 土柱上覆土层中的各层位含水率均大于 IB,非饱和导水率 $K(\theta)$ 和扩散率 $D(\theta)$ 均为含水率的连续增函数,因此 IA 土柱上覆土层中的导水率和扩散率均大于 IB,IA 土柱毛细水运移速率较大。含水率较大时,砂质粉土层的导水率远大于粉质黏土,毛细水通过砂质粉土层向黄土土层运移相对较为容易;而粉质黏土层孔隙小,导水率低,水分运移速率缓慢,对土柱整体的水分运移存在阻滞作用。

IA 和 IB 土柱含水率在土层界面处发生突变,IA 土柱界面处 32 cm 与 28 cm 含水率沿深度减小方向增加 8.1%~9.1%,IB 土柱含水率减少 3.6%~4.2%,界面含水率变化存在差异。含水率的突变是土层孔隙结构的不连续性导致的,从吸力角度考虑,当土柱的含水率达到平衡状态时,土体吸力与孔隙水势能具有连续性,

30 cm 处上下界面的吸力大小一致;由于不同土层的颗粒大小、孔隙分布存在差异,同一土体吸力对应的不同土层的体积含水率存在一特定差值,这一差值在土体中表现为土层界面含水率突增或突降。

为了更好的分析和解释界面含水率的变化差异,通过 Arya-Paris 模型^[17]和 Fredlund-Xing 模型^[18]拟合了试验中三种土层的土水特征曲线。将土层的颗粒分布、干密度和颗粒密度代入 AP 模型预测出多个吸力与体积含水率对应点,再由 FX 模型拟合得到完整的土水特征曲线(图 6)。

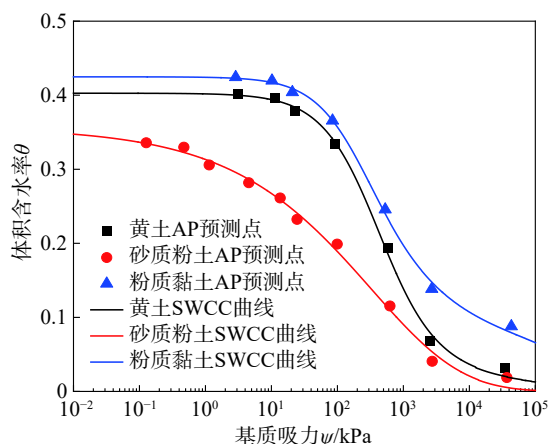


图 6 三种土层的土水特征曲线
Fig. 6 Soil-water characteristic curves of three kinds of soil layers

同一吸力对应的三种土层体积含水率不同,细粒土的体积含水率均大于粗粒土的体积含水率。土层之间的含水率差值除了与土层性质有关,还随吸力变化。低吸力段,黄土-砂质粉土的含水率差值较大;高吸力段,黄土-粉质黏土的含水率差值较大。IA 和 IB 土柱土层界面处的含水率较大,吸力较小,因此 IA 土柱的界面含水率差值大于 IB。

3.2 毛细水补给土柱的盐分运移

60 d 时土柱主要离子垂直分布情况如图 7, IA 和 IB 离子整体分布均呈“Γ”型,盐分在表层聚积。土柱中 SO_4^{2-} 的初始值较大,表层 SO_4^{2-} 含量大于 Na^+ ,IA 土柱表层 SO_4^{2-} 含量高达 15.64%,IB 土柱表层 SO_4^{2-} 含量约 7.69%,仅为 IA 土柱的 1/2,IB 土柱其他层位的 SO_4^{2-} 含量均高于 IA。 Na^+ 分布情况与 SO_4^{2-} 一致,IA 土柱表层 Na^+ 含量大于 IB,其他层位则小于 IB。两组土柱 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的分布差异表明在相同的时间内,IA 土柱向上的盐分迁移更为剧烈,表层积盐更多,上细下粗型土层结构相对于上粗下细型结构更有利于土体盐分运移和表层盐分积累。

土层结构对水分运移的影响直接导致了盐分运移

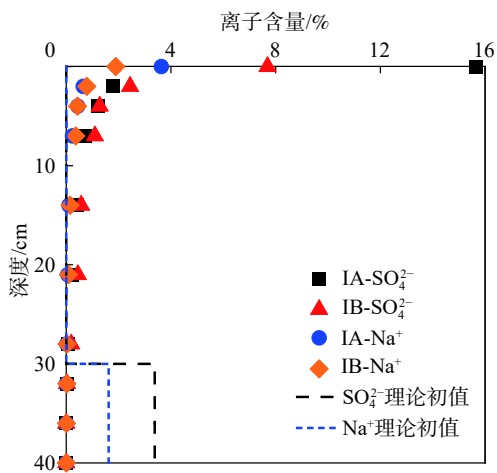


图 7 毛细水补给土柱 60 d 离子分布情况

Fig. 7 Ions distribution on the 60th day with capillary water supply

的差异, 下伏砂质粉土层的存在加速了土柱的毛细水盐运移, 导水率较低的粉质黏土层则阻碍了毛细水盐运移。除了对水分运移的影响, 黏土颗粒较强的吸附性也延缓了土体中的溶质运移, 黏粘土颗粒比表面积较大, 结合水膜较厚, 结合水膜中的离子需要先扩散至毛细水中, 后随着毛细水迁移, 这一过程降低了含盐层的脱盐速率, 表层盐分积累速率相应减小。通过 60 d 表层的泛盐现象可以直观的看出两组土柱的积盐差异(图 8), IA 土柱表层的盐壳厚度较大, 表层积盐较多, IB 土柱表层盐壳则较薄, 盐结晶较少。由于硫酸盐结晶膨胀, 土柱表层土体隆起, 表面发生盐胀破坏。

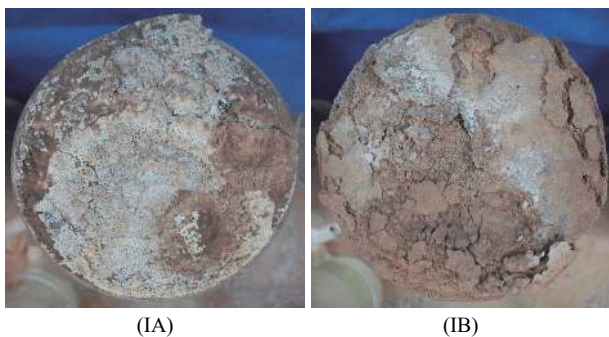


图 8 毛细水补给土柱 60 d 表层积盐情况

Fig. 8 Surface salt accumulation on the 60th day with capillary water supply

3.3 无毛细水补给土柱的水分运移

土柱 II A 和 II B 中设置了卵砾石层隔断毛细水补给, 模拟了地下水埋深较大或毛细水上升高度较小条件下的水盐运移, 其含水率结果见图 9。II A 和 II B 土柱随着试验进行, II A 和 II B 土柱整体含水率逐渐降低, 在 40 ~ 60 d 时, 含水率变化非常小, 表明土柱中的水分

散失速率减小。一方面是因为随着表层一定深度土层含水率的减小, 蒸发速率降低; 另一方面则由于孔隙水含量的减小, 毛细作用减弱, 孔隙水主要受短程吸附作用, 以薄膜水的形式附着在土颗粒表面, 水分运移速率大幅降低, 因此土柱内部的水分散失速率减小。

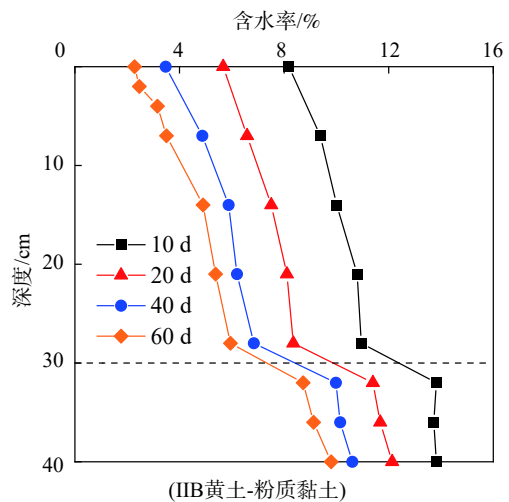
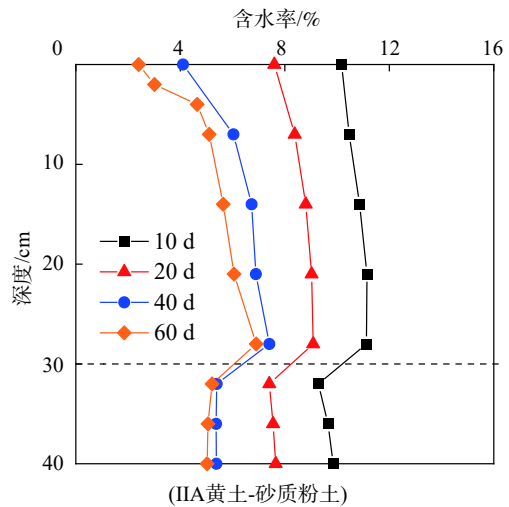


图 9 无毛细水补给土柱含水率沿深度分布曲线

Fig. 9 Distribution of water content along depth without capillary water supply

土柱 II A 和 II B 深度 30 cm 土层界面处的含水率变化趋势与毛细水补给土柱一致, 但含水率差值大小存在显著差异。II A 土柱界面含水率差值保持在 1.68% ~ 2.01% 之间, II B 土柱保持在 2.78% ~ 3.14% 之间。由图 6 已知在高吸力状态下, 黄土-砂质粉土土层界面含水率差值小于黄土-粉质黏土, 因此 II B 土柱界面含水率差值大于 II A。砂质粉土层的水分向上覆黄土层迁移相对较多, 在 10 ~ 40 d 内, II A 土柱上覆黄土层的整体含水率以及表层含水率明显大于 II B, 在 40 ~ 60 d 时,

II A 土柱下伏土层的含水率变化极小,上下土层之间的水分运移基本停止,而 II B 土柱下伏土层的含水率在该时间段内仍在减小,说明 II A 土柱水分运移速率明显大于 II B,主要原因是孔隙结构变化导致土水性质的差异,其次则因为黏土颗粒的短程吸附作用较强,结合水膜较厚,粉质黏土层中的薄膜水含量相对于砂质粉土层较多,而毛细水含量较少。

3.4 无毛细水补给土柱的盐分运移

无毛细水补给土柱 60 d 离子分布如图 10 所示。土柱表层的 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的含量小幅增大,但并未发生表层积聚,无毛细水补给条件下,土柱中的水分运移速率逐渐降低直至接近停止,因此盐分的上升高度有限,并未全部迁移至表层。II A 土柱上覆黄土层中各层位的 SO_4^{2-} 含量均大于 II B,下伏含盐层的 SO_4^{2-} 含量则小于 II B, Na^+ 分布趋势与 SO_4^{2-} 一致。II A 土柱下伏含盐层 60 d 的 SO_4^{2-} 含量相比于初始值降低了 64%, II B 降低了 45%。试验结果表明在无毛细水补给条件下,上细下粗型土柱下伏含盐层水盐向上的迁移总量和迁移速率均大于上粗下细型土柱。

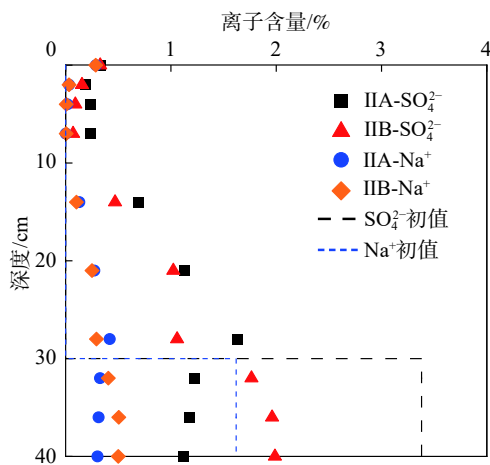


图 10 无毛细水补给土柱 60 d 离子分布情况

Fig. 10 Ions distribution on the 60th day without capillary water supply

如图 11 所示,由于 II A 和 II B 土柱表层盐分未发生聚积,表层并没有盐壳生成,但随着含盐量的提高,表层均产生了一定程度的酥碱。

4 结论

(1)层状土层之间孔隙结构和水力学性质的不连续性对土体水盐运移有显著影响,细粒土层具有较好的持水和持盐特性。上细下粗型土层结构盐分在上覆土层中聚积,浅层高含盐量土体的存在增加了盐渍土病害发

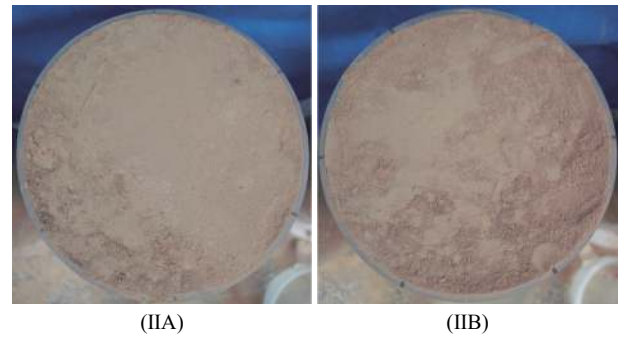


图 11 无毛细水补给土柱 60 d 表层积盐情况

Fig. 11 Surface salt accumulation on the 60th day without capillary water supply

生的几率;上粗下细型土层结构盐分在下伏细粒土层中分布较为均一,上覆粗粒土层含盐相对较少。

(2)毛细水补给条件下,上细下粗型土层结构有利于毛细水盐运移;60 d 时上细下粗型土柱表层盐分积聚现象更加显著,表层 SO_4^{2-} 含量是上粗下细型土柱的两倍。

(3)无毛细水补给条件下,下伏砂质粉土层水盐向上迁移总量和迁移速率大于下伏粉质黏土层,60 d 时,上细下粗型土柱上覆土层各层位离子含量均大于上粗下细型土柱。

参考文献 (References) :

- [1] MILLER D E, GARDNER W H. Water infiltration into stratified soil [J] . *Soil Science Society of America Journal*, 1962, 26(2): 115 - 119.
- [2] B C S, PARKIN G W, DYCK M. Flow and transport in layered soils [J] . *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91: 127 - 132.
- [3] LI Y, REN X, HILL R, et al. Characteristics of water infiltration in layered water-repellent soils [J] . *Pedosphere*, 2018, 28(5): 775 - 792.
- [4] 李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟 [J] . *土壤学报*, 2004, 41(4): 493 - 502. [LI Yunzhu, HU Kelin. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation [J] . *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 493 - 502. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究 [J] . *农业工程学报*, 2005, 21(9): 23 - 26. [SHI Wenjuan, SHEN Bing, WANG Zhirong, et al. Water and salt transport in sand-layered soil underevaporation with the shallow under ground water table [J] . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(9): 23 - 26. (in Chinese with English abstract)]

- [6] HUANG M B, BRUCH P G, BARBOUR S L. Evaporation and water redistribution in layered unsaturated soil profiles [J] . *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(1): 1 - 14.
- [7] 李毅,任鑫,ROBERT H. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响 [J] . *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 485 - 490. [LI Yi, REN Xin, ROBERT H. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils [J] . *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 485 - 490. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 赵宇龙,李明思,陈绍民,等. 滴灌条件下层状土壤滞盐作用的试验研究 [J] . *灌溉排水学报*, 2015, 34(6): 29 - 34. [ZHAO Yulong, LI Mingsi, CHEN Shaomin, et al. Retardation effect of layered soil to salt transfer under drip irrigation [J] . *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(6): 29 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 范严伟,黄宁,马孝义,等. 应用HYDRUS-1D模拟砂质夹层土壤入渗特性 [J] . *土壤*, 2016, 48(1): 193 - 200. [FAN Yanwei, HUANG Ning, MA Xiaoyi, et al. Simulation of infiltration characteristics in soil with sand interlayer using HYDRUS-1D [J] . *Soils*, 2016, 48(1): 193 - 200. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张莉,丁国栋,王翔宇,等. 隔沙层对盐碱地土壤水盐运动的影响 [J] . *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 197 - 200. [ZHANG Li, DING Guodong, WANG Xiangyu, et al. Effect of sand layer on soil water and salt movement in saline land [J] . *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 197 - 200. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ALIM ICHOLA I, GAIDI L. Study of the hydric behaviour of double-layered columns of unsaturated soils - Analysis of water and suction profiles during infiltration tests [J] . *E3S Web of Conferences*, 2016, 9: 11014.
- [12] LIU B X, WANG S Q, KONG X L, et al. Soil matric potential and salt transport in response to different irrigated lands and soil heterogeneity in the North China Plain [J] . *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(12): 3982 - 3993.
- [13] ZETTL J D, BARBOUR S L, HUANG MINGBIN, et al. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils [J] . *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(2): 133.
- [14] 吴福,江思义,刘庆超,等. 广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性评价 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 83 - 91. [WU Fu, JIANG Siyi, LIU Qingchao, et al. Evaluation of susceptibility of Karst collapse in urban planning area of Guilin City of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 83 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 房浩,李巧灵,雷晓东,等. 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析 [J] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 153 - 160. [FANG Hao, LI Qiaoling, LEI Xiaodong, et al. Applicability of geophysical survey methods for the main controlling factors of deep covered Karst collapse in plain areas [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 153 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈再,彭述权,胡毅夫,等. 上隔下疏型硫酸盐渍土路基盐胀模型试验研究 [J] . *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(1): 248 - 254. [CHEN Zai, PENG Shuquan, HU Yifu, et al. Model test research on salt expansion of partition above and channelize below sulfuric acid saline soil roadbed [J] . *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(1): 248 - 254. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ARYA L M, PARIS J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data [J] . *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(6): 1023 - 1030.
- [18] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve [J] . *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521 - 532.