

重塑低液限粉土水盐迁移试验研究*

冉武平¹, 李爽¹, 王亚强¹, 孙誉²

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆土木工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆民航专业工程质量监督站, 新疆 乌鲁木齐 830016)

摘要: 由于水盐迁移而引发的土壤盐渍化现象极为明显, 而目前关于不同供给源下水盐迁移特性的研究不多, 制约了低液限粉土路基结构设计。根据新疆盐渍土地区的实际工况, 选择氯盐为研究对象, 考虑水盐供给源的影响, 通过室内土柱试验对低液限粉土路基的水盐迁移规律展开研究。结果表明: 低液限粉土的水盐迁移过程在达到平衡状态后, 会在土体中形成水盐积聚层; 水分迁移是引起盐分迁移的最主要因素; 当盐分由底部盐溶液供给时, 15 d的迁移高度就达130 cm; 当盐分单纯由盐渍土供给时, 则迁移现象不显著, 因此低液限粉土路基不宜用于地下水水位较浅的盐渍土地区, 且阻断地下水能够有效降低水盐迁移水平。

关键词: 路基工程; 低液限粉土; 水盐迁移; 供给源

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.03.18.0001

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)02-0229-06

引文格式: 冉武平, 李爽, 王亚强, 等. 重塑低液限粉土水盐迁移试验研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(2): 229-234.

英文引文格式: RAN W P, LI S, WANG Y Q, et al. Experimental study on water and salt migration of remodeled low liquid limit silt[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(2): 229-234.

Experimental Study on Water and Salt Migration of Remodeled Low Liquid Limit Silt

RAN Wuping¹, LI Shuang¹, WANG Yaqiang¹, SUN Yu²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Xinjiang Civil Engineering Technology Research Center, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China; 2. Xinjiang Civil Aviation Professional Engineering Quality Supervision Station, Urumqi Xinjiang 830016, China)

Abstract: The soil salinization caused by water salt migration is very obvious, but there are no research results on the characteristics of water salt migration under different supply sources, which restricts the structure design of low liquid limit silt subgrade. According to the actual working conditions in saline soil area of Xinjiang, chlorine salt is selected as the research object, considering the influence of water and salt supply source, the water and salt migration law of low liquid limit silty clay subgrade is studied by indoor soil column test. The results show that: the water-salt accumulation layers will be formed in soil after the water-salt migration process of low liquid limit silt reaches equilibrium state; water migration is the most important factor of salt migration; if salt is supplied by bottom salt solution, the migration height of 15 d is 130 cm; if salt is supplied by artificial saline soil, the migration phenomenon is not obvious, so low liquid limit silt subgrade should not be used in saline soil area with shallow groundwater level and blocking groundwater can reduce water-salt migration level effectively. The research results can provide some theoretical basis and technical support for the design of low liquid limit silt subgrade structure.

Key words: subgrade engineering; low liquid limit silt; water-salt migration; supply sources

0 引言

中西部地区盐渍土分布十分广泛, 加之气候环境复杂、盐渍化严重, 故而在自然环境以及人为因素的影响下, 路基易发生次生盐渍化, 导致道路产生一系列病害, 严重影响道路的稳定性和耐久性^[1]。此外, 中西部地

* 收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768070)。

作者简介: 冉武平(1977-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事道路工程方面的研究, E-mail: rwp@xjnu.edu.cn

区还广泛分布着低液限粉土,这类土具有稳定性差、力学性能不良以及毛细现象显著等不良工程特性.由于其促进毛细水上升,则会加速水盐迁移进程,使道路在短期内就出现各类工程病害^[2,3].且这些病害造成的路基损伤是不可恢复的,一旦发生,很难根治^[4].因此,开展低液限粉土路基的水盐迁移规律研究是十分必要的.

关于水盐迁移的研究主要针对农业用地,学者们大都借助试验手段研究盐渍土地区水盐迁移规律及其对农作物生长的影响^[5-8].随着1855年Fick扩散定律、1856年达西定律的提出,1931年Richards^[9]把达西定律引入到多孔介质土壤非饱和和流动,国内外学者将现有研究成果引入道路结构问题中,对路基土中水分、盐分的迁移开展了大量研究^[10,11].张宏^[12]介绍了农业工程和路基工程领域关于水盐迁移与运移机理的有关成果,并对路基土的盐渍化问题进行了深入研究.邵磊^[13]分别对非盐渍化粉土、弱盐渍化粉土及砾类土展开研究,得到了水盐在不同路基土中的迁移规律,并提出隔断层设置技术.毛爱民^[14]调查了新疆硫酸盐渍土地区道路的中心线和左、右路肩部位的含盐量.张堃^[15]通过填筑粉土路基试验段以及开展竖管试验,研究了不同地下水埋深及矿化度条件下的路基内水盐迁移及聚集规律.秦李林^[16]研究了广源高速公路低液限粉土路基的施工关键技术,证明了低液限粉土作为高速公路路堤填料能够满足路基施工质量标准.另外,还有研究表明水的摩尔浓度和溶质的浓度也会对水盐迁移产生影响^[17-21].由于溶质对水分子的吸附作用,使得溶液的活度降低,溶质浓度越高,活度越小^[22,23].从已有的研究成果来看,影响水分迁移的外界因素主要包括温度、降水及地下水埋深等,内部因素主要是初始含水率、初始含盐量及压实度等,但都未涉及路基本部水盐供给源对其迁移的影响.

基于此,在国内外相关研究成果的基础上,本文从水盐迁移和扩散规律的表征入手,针对低液限粉土填料开展室内土柱试验,重点研究低液限粉土路基在不同水盐供给源下的水盐分布特性和规律.预期成果对于低液限粉土用于盐渍土地区道路的结构设计具有一定的学术意义和工程应用价值,并且能为路基工程预防路基盐渍化提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自新疆乌鲁木齐市典型道路路基填料,按照《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)要求进行比重试验、颗粒分析试验、界限含水率试验及击实试验,确定土样的基本物理参数,如表1所示.另外,为明确低液限粉土在不同水盐供给源下的迁移特性,采用“干土加盐溶液”法配置人工盐渍土,并将所有制备好的土样放入密封的塑料桶中以减少水分散失,静置一昼夜后备用.

表 1 土样的基本物理性质指标
Tab 1 Basic physical properties of test soil samples

最佳含水率(%)	最大干密度(g/cm ³)	液限(%)	塑限(%)	塑性指数	土样分类
11.66	1.99	17.6	7.9	9.7	低液限粉土

1.2 试验方法

试验系统由PVC管材、传感器及底座组成.PVC管材的外径为20 cm,壁厚0.4 cm;沿高度方向每隔10 cm钻三个并排、直径为5 mm的监测孔;顶部用塑料袋封口,模拟路面结构引起的覆盖效应.传感器选用NH148土壤温-湿度-盐分传感器,其通过测量介电常数反映土壤的真实水分含量,再通过测定其电导率和温度求得盐度,温度测量精度为±0.5 °C,湿度测量精度为±2%,盐分测量精度为±3 mg/L.数据可自动采集、记录.

盐渍土地区路基次生盐渍化的发生过程一般分为两种情况:一种是含盐地下水随着土体内的孔隙不断向上迁移,携带盐分进入全部换填后的素土路基中,导致盐分聚集在路基土中;另一种是盐渍土地基中的盐分进入换填后的素土路基,导致路基次生盐渍化.不同情况下的水盐迁移过程也不相同,因此,本次试验选择两种盐分供给源,分别为盐溶液供给源和盐渍土供给源.初始含水率控制为4%;压实度根据《公路路基施工技术规范JTGF10—2006》中的土质路基压实度标准,选用路基最低控制标准90%;盐分选用氯化钠分析纯试剂;人工配置盐渍土的含盐量根据《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)中对盐渍土的划分标准,选择2%,属中盐渍土;盐溶液浓度同样控制为2%.

根据不同水盐供给源方式设置两个土柱:土柱A高150 cm,全部装填低液限粉土,底部每隔2 cm钻直径为5 mm的透水孔,并在底座内加入配置好的盐溶液,确保水位始终高于底部圆孔2 cm,以便盐溶液无压力地进入

土柱中; 土柱B高200 cm, 下部50 cm装填人工配置盐渍土, 上部150 cm装填低液限粉土. 两个土柱的设计局部示意图如图1、图2所示.

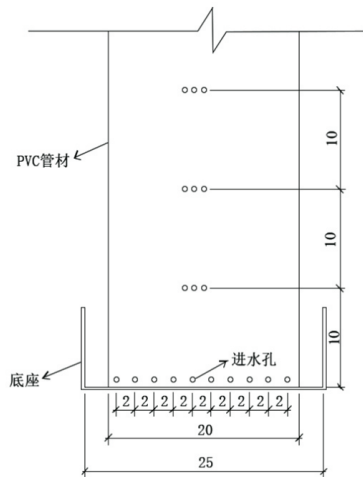


图 1 土柱A局部示意图 (单位: cm)

Fig 1 Local schematic diagram of Soil columns A (unit: cm)

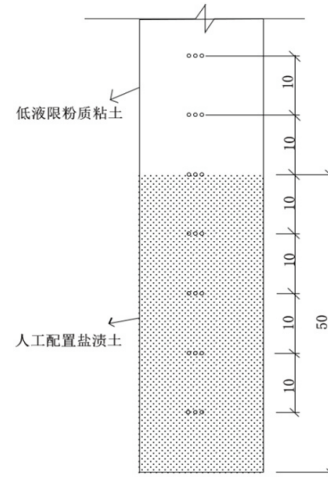


图 2 土柱B设计局部图 (单位: cm)

Fig 2 Local schematic diagram of Soil columns B (unit: cm)

在装样前先将所有土样烘干, 然后按照对应的含水率进行配制, 根据预设的压实度分层装入PVC管中, 每层装土厚度为5 cm, 利用标准击实锤对试验土体进行击实, 以达到预设的压实度并能保证整个土体压实的均匀性. 对压实后的土柱每孔位置处的水盐进行监测, 以此状态作为水盐迁移的初始状态. 数据监测在前12 h内每90 min进行一次, 以后每12 h进行一次, 每次都在数据稳定时进行读数, 试验持续观测周期为15天.

2 结果与分析

2.1 盐溶液供给源下的水盐迁移特性分析

为探究在盐溶液供给源下低液限粉土的水盐迁移时空分布特性, 对距离土柱底部不同高度处的水盐含量进行分析, 作各孔位水盐时程曲线如图3所示, 空间分布曲线如图4所示.

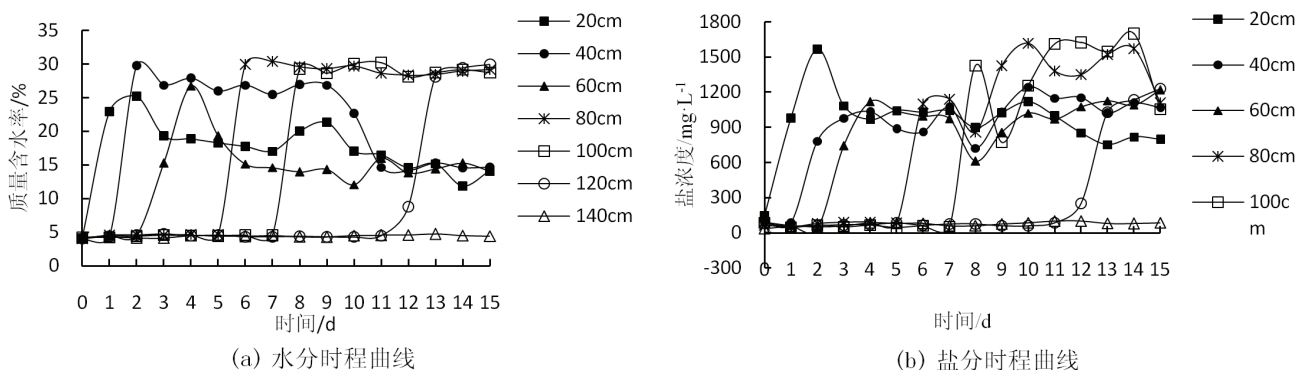


图 3 土柱A各孔位水盐时程曲线

Fig 3 The time curves of water and salt in each hole of the A soil column

由图3 (a) 可知, 土柱A中20 cm、40 cm和60 cm处的水分迁移趋势随时间推移先是快速上升, 达到峰值后开始上下波动, 后出现缓慢下降趋势, 这是因为该处距离盐溶液较近, 水分在向上迁移积聚到一定程度后, 致使该处与上部的湿度梯度不断增大, 从而加剧了水分向上迁移, 致使该位置处的湿度减小, 出现下降; 而80 cm、100 cm和120 cm处的质量含水率达到最大后没有出现下降趋势, 究其原因主要是随着高度增加向上和向下迁移势都有所降低, 从下部迁移来的水分和向上部迁移的水分几乎达到一致, 这也说明水分迁移达到了平衡状态. 由

图3 (b) 可以明显地观察到盐分迁移趋势与水分迁移趋势一致. 此外, 土柱80 cm和100 cm处达到的水盐峰值较其他位置的大, 这是由于在下部水盐不断向上迁移的过程中, 随着高度的增加, 基质吸力不断减小, 导致土柱80 cm~100 cm处出现水盐积聚层, 故水盐峰值较大.

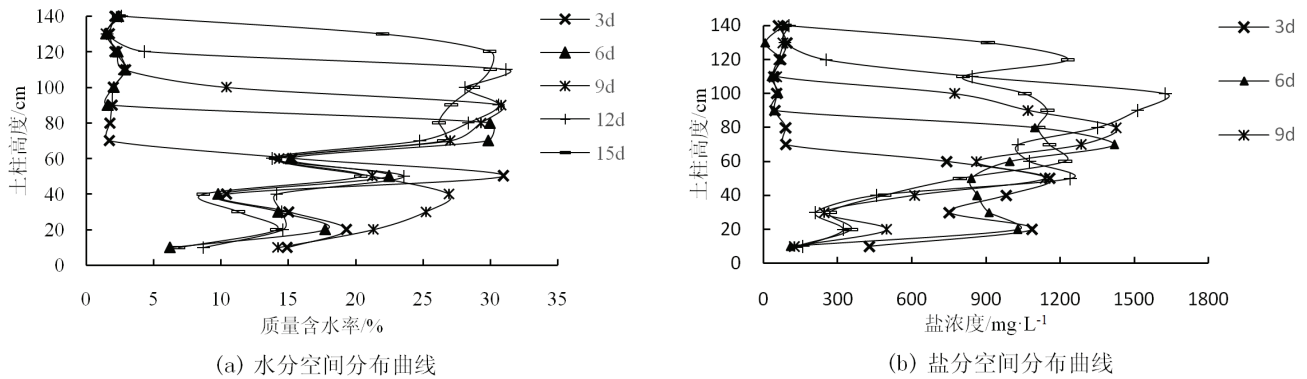


图 4 土柱A各孔位水盐空间分布曲线

Fig 4 The distribution curves of water and salt in each hole of the A soil column

由图4 (a) 可知, 质量含水率随土柱高度的增加呈现不断波动趋势, 说明低液限粉土的水盐迁移过程受到基质吸力、溶质吸力与重力的多重影响, 极不稳定; 土柱A中的水分在3 d时的迁移高度达到60 cm, 6 d达到80 cm, 9 d达到100 cm, 12 d达到110 cm, 15 d达到130 cm, 说明在低液限粉土中水分向上迁移的速度很快. 由图4 (b) 可知, 盐分在各时段的迁移高度与水分迁移高度一致; 3 d和6 d的迁移速率大于其他三个时间点的迁移速率, 说明低液限粉土前期盐分迁移速率较快, 后逐渐减小, 这是因为前期盐分随水分向上迁移产生较大的浓度梯度, 随着盐分不断迁移, 浓度梯度逐渐减小, 导致盐分迁移速率减小.

2.2 盐渍土供给源下的水盐迁移特性分析

同样针对土柱B的水盐含量进行分析, 得出盐渍土供给源下低液限粉土的水盐迁移时空分布特性, 试验结果如图5、图6所示. 由图5的时程曲线可知, 土柱B的水盐迁移整体趋势与土柱A相比较不显著: 水分几乎未发生迁移; 而盐分虽发生了迁移, 但迁移量较少, 说明当土柱底部无水分供应、盐分仅由盐渍土供给时, 低液限粉土在15 d内基本未发生明显迁移, 即阻断地下水能够有效地阻碍低液限粉土水盐迁移进程. 由图5 (b) 可知, 随着时间的推移, 土柱高度越高, 水盐含量越低, 这是由于该状态下的盐分主要受重力影响, 不能继续向上迁移, 故出现高度越高, 迁移量越少的现象.

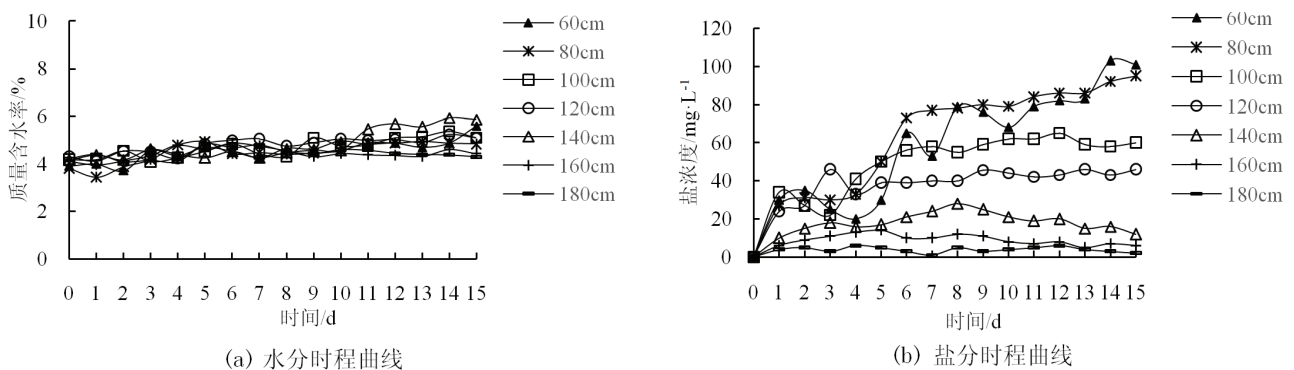


图 5 土柱B各孔位水盐时程曲线

Fig 5 The time curves of water and salt in each hole of the B soil column

由图6的空间分布曲线可知, 土柱B中水盐含量随土柱高度的增加波动显著, 但各孔位质量含水率和盐浓度的变化量较少, 说明土柱B内部存在迁移现象, 只是由于没有水源供给, 导致水盐含量波动范围较小. 由图6 (b) 可知盐分整体有缓慢向上迁移的趋势, 说明下部盐渍土中的盐分会缓慢迁移至上部无盐分的低液限粉土中, 但迁移量较少, 说明水分迁移是引起盐分迁移的最主要因素.

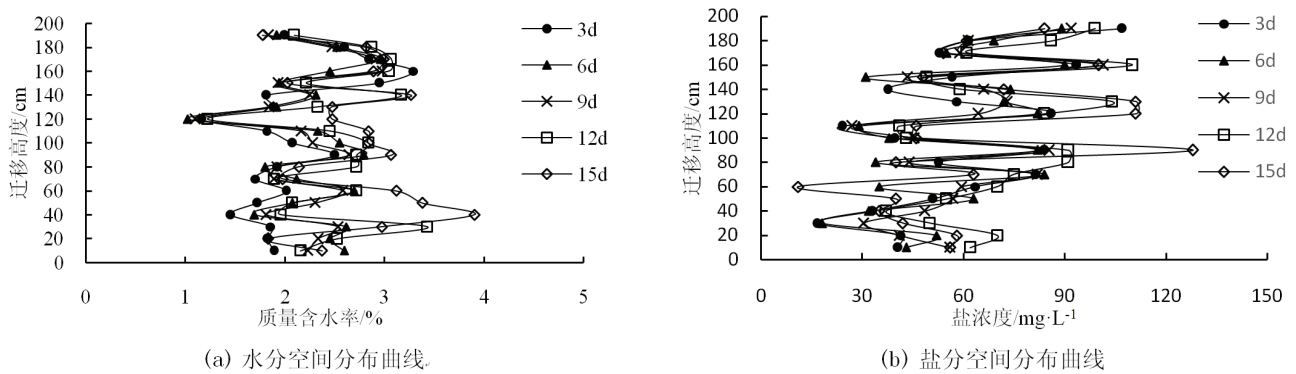


图 6 土柱B各孔位水盐空间分布曲线
Fig 6 The distribution curves of water and salt in each hole of the B soil column

3 结论

(1) 低液限粉土水盐迁移过程受到基质吸力、溶质吸力与重力的多重影响,在达到平衡状态后,水盐会在土体中储存、扩散,形成水盐积聚层。

(2) 当盐分由底部盐溶液供给时,水分和盐分迁移趋势一致,且迁移速率极快,15 d的迁移高度就达130 cm;距底部水源较近的土体达到的水盐含量最大值较距水源较远的土体小,且达到最大值后逐渐减小,而距水源较远的土体达到最大值后逐渐稳定。

(3) 当盐分由底部盐渍土供给时,水盐虽有迁移,但迁移量较少,且迁移现象不明显,说明盐分向上迁移的主要动力来自水分迁移。

(4) 盐溶液供给源下的低液限粉土水盐迁移较盐渍土供给源显著,即底部有水分供给时的水盐迁移速率远大于无水分供给,因此阻断地下水能够有效地阻碍低液限粉土水盐迁移进程。

参考文献:

- [1] 叶鸣,潘蕾,张远芳.多因素耦合下天然亚硫酸盐渍土盐-冻胀特性试验[J].河南科学,2019,37(8):1276-1282.
YE M, PAN L, ZHANG Y F. Experimental study on salt-frost heave characteristics of natural sulfite saline soil under the effects of multi-factors[J]. Henan Science, 2019, 37(8): 1276-1282. (in Chinese)
- [2] 杨红霞.低液限粉土工程特性与路基填筑施工技术[J].路基工程,2006(4):93-95.
YANG H X. Engineering characteristics of low liquid limit silt and subgrade filling construction technology[J]. Subgrade Engineering, 2006(4): 93-95. (in Chinese)
- [3] 党延兵,李成才.靖安高速公路延安段低液限粉土填料路堤施工技术的研究与实践[J].公路,2005(8):71-74.
DANG Y B, LI C C. Research and practice of embankment construction techniques of low liquid limit silt filler on Yan-An section of Jing-An expressway[J]. Highway, 2005(8): 71-74. (in Chinese)
- [4] 庞明.盐渍土地区公路自然区划研究[D].西安:长安大学,2007.
PANG M. Study on the natural regionalization for highway in saline soil area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [5] 赵文举,马宏,豆品鑫,等.不同覆盖模式下土壤返盐及水盐运移规律[J].干旱地区农业研究,2016,34(5):210-214.
ZHAO W J, MA H, DOU P X, et al. Soil resalinization and water-salt movement under different mulching modes[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 210-214. (in Chinese)
- [6] 李毅.覆膜条件下土壤水、盐、热耦合迁移试验研究[D].西安:西安理工大学,2002.
LI Y. Experimental studies on the coupled movement of soil water, salt, and heat transfer under plastic mulch[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [7] 郭志雯,熊芸玲,梁玉祥.不同条件下土壤控制体中水盐运移规律研究[J].现代农业科技,2016(8):201-203+215.
GUO Z W, XIONG Y L, LIANG Y X. Research on the water-salt movement rule in soil under different conditions[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(8): 201-203+215. (in Chinese)
- [8] 王文华.吉林省西部地区盐渍土水分迁移及冻胀特性研究[D].长春:吉林大学,2011.
WANG W H. A study on the moisture content migration and characteristics of frost heaving of saline soil in the western of Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

- [9] RICHARDSLA. Capillary conduction of liquids in porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318-333.
- [10] HELCIO RB ORLANDE, RENATO M, COTTA. Bayesian estimation of the hydraulic and solute transport properties of a small-scale unsaturated soil column[J]. *Journal of Hydrology & Hydromechanics*, 2016, 64(1): 30-44.
- [11] WARDAL, KACHANOSKIRG, ELRICKDE. Analysis of water and solute transport away from a surface point source[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 699-706.
- [12] 张宏, 闫晓辉, 何灵灵, 等. 水盐迁移模式及运移机理研究进展[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1): 106-111.
ZHANG H, YAN X H, HE L L, et al. Progress in water-salt migration model and mechanism[J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2017, 48(1): 106-111. (in Chinese)
- [13] 邵磊. 察尔汗盐湖地区路基水盐迁移规律与隔断层设置技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
SHAO L. Study on subgrade water and salt migration law and cut off layer setting technology in Qarhan Salt Lake area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [14] 毛爱民, 田小平, 吴立坚, 等. 自然环境下盐渍土路基水盐分布与迁移[J]. *公路交通技术*, 2013, 2: 5-7.
MAO A M, TIAM X P, WU L J, et al. Distribution and migration of water and salt in roadbeds on salty soil in natural environment[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2013, 2: 5-7. (in Chinese)
- [15] 张堃. 黄泛盐渍土地区路基水盐迁移及隔断技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
ZHANG K. Research on the capillary water rise and salinity transport in the soil of subgrade and construction techniques in the Yellow River flood field[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [16] 秦李林. 低液限粉土路基填料施工技术研究[J]. *施工技术*, 2016, 45(10): 104-107+112.
QIN L L. Study on construction technology of low liquid limit silt subgrade filling[J]. *Construction Technology*, 2016, 45(10): 104-107+112. (in Chinese)
- [17] BIN G H, HE P, ZHAN G Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 675-681.
- [18] SHAFIQUE U, ANWAR J, ALI MUNAWAR M, et al. Chemistry of ice: Migration of ions and gases by directional freezing of water[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2011: S1878535211000736.
- [19] GARDNERWR, HILLELD, BENYAMINIY. Post-irrigation movement of soil water. 1. Redistribution[J]. *Water Resource Research*, 1970, 6: 851-8619.
- [20] LAI Y, PEI W, ZHANG M, et al. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78: 805-819.
- [21] RAD M N, SHOKRI N. Nonlinear effects of salt concentrations on evaporation from porous media[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(4): 4403.
- [22] 张虎元, 姜啸, 王锦芳, 等. 壁画地仗中盐分的毛细输送机制研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(1): 1-11.
ZHANG H Y, JIANG X, WANG J F, et al. A study on the mechanism of capillary-driven transport of soluble salt in mural plaster[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(1): 1-11. (in Chinese)
- [23] BIGGAR J W, NIELSEN D R. Chloride-36 Diffusion during Stable and Unstable Flow through Glass Beads1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1964, 28(5): 591.

责任编辑: 赵新科