

文章编号:1673-9469(2025)06-0038-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.005

## 复杂冻融循环条件下土体水盐迁移规律试验研究

朱丽<sup>1</sup>,高毅仁<sup>2</sup>,郭晶<sup>1</sup>,李耀宗<sup>3,4</sup>,杜功<sup>1</sup>,寇晓康<sup>3\*</sup>

(1. 国家能源集团朔黄铁路发展有限责任公司原平分公司,山西原平 034100;2. 石家庄铁道大学  
交通运输学院,河北石家庄 050043;3. 石家庄铁道大学土木工程学院,河北石家庄 050043;  
4. 晋州市交通运输局公路站,河北晋州 052260)

**摘要:** 为研究土体中的水盐迁移规律,以砂质黄土为研究对象,开展了无压补充0.8%和1.5%浓度的硫酸钠溶液条件下,冻融、冻融-蒸发和冻融-蒸发-降雨3种工况下的冻融循环试验,探究了冻融、蒸发和降雨过程中土体的水盐迁移规律,对试验土柱的温度、水分和电导率在不同工况下的变化规律进行了分析。研究表明:冻融循环下土体温度变化存在滞后现象,土体温度变化幅度随土体深度增大而减小;3种工况下土体含水率和电导率均呈周期性变化,冻融循环结束后土体水、盐含量均增大,蒸发作用使盐分随水分向上迁移并导致土柱顶部盐分过饱和析出,降雨作用使土柱上部盐分随水分向下迁移;在相同工况下,补给溶液浓度高时更有利于上部土体的盐分积累,当无压补充0.8%浓度盐溶液时,在3种工况下,土柱上部电导率的增长量分别为0.12、0.31、0.45 dS/m,当无压补充1.5%浓度盐溶液时,3种工况下土柱上部电导率增长量依次增至0.27、0.36、0.52 dS/m;土体盐分变化受到温度、浓度梯度和作用时间的综合影响,冻融-蒸发-降雨循环下上部土体电导率增长最多。

**关键词:** 土力学;冻融循环;蒸发;降雨;水盐迁移

**中图分类号:** TU449

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Water and Salt Transport Law of Soil Under Complex Freeze-Thaw Cycle Conditions

ZHU Li<sup>1</sup>, GAO Yiren<sup>2</sup>, GUO Jing<sup>1</sup>, LI Yaozong<sup>3,4</sup>, DU Gong<sup>1</sup>, KOU Xiaokang<sup>3\*</sup>

(1. Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd. Yuanping Sub-company, Yuanping, Shanxi 034100, China;  
2. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;  
3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;  
4. Jinzhou City Transport Bureau Highway Management Station, Jinzhou, Hebei 052260, China)

**Abstract:** To study the water-salt migration patterns in soil, using sandy loess as the research object, we conducted freeze-thaw, freeze-thaw-evaporation, and freeze-thaw-evaporation-rainfall three types of cycle tests under the conditions of unpressurized supplementation of 0.8% and 1.5% concentration sodium sulfate solution. We explored the water-salt migration patterns of the soil during freeze-thaw, evaporation, and rainfall processes, and analyzed the changes in temperature, moisture, and conductivity of the test soil column with respect to the working conditions. The results show that there is a lag phenomenon in the temperature changes of the soil during freeze-thaw cycles, and the amplitude of temperature changes decreases with the increase of soil depth. In all three working conditions, the moisture content and conductivity of the soil show periodic changes. After the freeze-thaw cycle, the water and salt contents of the soil increase. Under evaporation conditions, the salt is transported upward with water and causes oversaturation precipitation at the top of the soil column. Under rainfall conditions, the salt in

收稿日期:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378453)

第一作者:朱丽(1983—),女,安徽五河人,硕士,高级工程师,从事土木工程方面的研究。

\* 通信作者:寇晓康(1987—),男,河北定州人,博士,副教授,从事冻土变化监测方面的研究。

the upper part of the soil column moves downward with water. Under the same working conditions, a higher concentration of the replenishing solution is more conducive to the accumulation of salt in the upper soil layer. When the unpressurized replenishing solution is 0.8% concentration, the increase in conductivity of the upper part of the soil column in the three working conditions is 0.12, 0.31, and 0.45 dS/m respectively. When the unpressurized replenishing solution is 1.5% concentration, the increase in conductivity of the upper part of the soil column in the three working conditions increases successively to 0.27, 0.36, and 0.52 dS/m. The changes in soil salt content are influenced by the combined effects of temperature, concentration gradient, and action time. Under the freeze-thaw-evaporation-rainfall cycle, the increase in conductivity of the upper soil layer is the greatest.

**Key words:** soil mechanics; freeze-thaw cycle; evaporation; rainfall; water and salt migration

盐渍土广泛分布在我国西北季节性冻土区<sup>[1]</sup>,受降雨、蒸发和大气温度等因素的影响,土体内温度和水分会发生变化,引发水盐迁移<sup>[2-4]</sup>,进而导致冻胀<sup>[5]</sup>、盐胀<sup>[6]</sup>、溶陷和腐蚀等病害。因此,研究土体的水盐迁移规律,可为盐渍土地区的工程建设提供科学依据与理论支撑。

在单向冻结试验中,温差驱动土体未冻结区域水分向冻结区域迁移,导致土体冻结部分含水量升高,未冻结区域含水量降低。随着冻结时间的增加,冻结锋面逐渐向下发展。盐分的分布与含水量分布相似,印证了“盐随水走”的迁移规律。针对单向冻结下的水盐迁移,周凤玺等<sup>[7]</sup>研究了粗粒硫酸盐渍土的水盐迁移规律,发现单向冻结试验中水盐迁移速度更快,且孔隙越大越利于迁移;肖泽岸等<sup>[8]</sup>研究了水盐补给时氯化钠盐渍土的水盐迁移规律,建立了水盐迁移数值模型。在冻融循环作用下,土体冻结深度随冻融循环次数的增加而增加,水分和盐分向土体表面聚集,冻融过程中水分迁移主要受温度梯度、未冻水含量和土水势的影响,盐分迁移主要受浓度梯度引起的对流和扩散影响<sup>[9]</sup>。余云燕等<sup>[10]</sup>开展了无压补给盐溶液条件下的冻融循环试验,发现循环结束后水分和盐分在冻结区增大,盐渍土的冻胀变形随温度呈周期性变化;张玉芝等<sup>[11]</sup>探究了初始含水率对粗粒填料水分迁移特征的影响,发现初始含水率越大,土体冻结深度越稳定,而外界补水量、水分迁移高度则与初始含水率负相关。在蒸发过程中,水分携带盐分迁移,水汽相变导致土体盐分累积。蒸发初期土体中的盐分向顶部聚集,引发土壤盐碱化。顶部盐分结晶会堵塞土体孔隙,从而降低蒸发速率。Lai等<sup>[12]</sup>在盐渍土蒸发试验的基础上,建立了非饱和盐渍土的介质传递模型,得到了孔隙水蒸发作用下土壤颗粒与孔隙流体之间的温差;Zhang等<sup>[13]</sup>开展了浅层盐渍土蒸发试验,

发现有地下水补给时,土体表面盐分累积更迅速,微观结构中可见明显的盐分结晶。在降雨作用下,水分向土柱内迁移,土体表层盐分向下迁移。肖泽岸等<sup>[14]</sup>研究了冻融和干湿循环下盐渍土的水盐迁移规律,发现蒸发使盐分向土体表面聚集,降水使表层盐分向下迁移,干湿循环是土体盐胀破坏的主要原因;Jia等<sup>[15]</sup>探究了融雪和降雨对冻融过程中水盐迁移的影响,发现降雨会影响整个土柱含水率,而融雪仅影响土体上部。

目前,对土体水盐迁移已开展了大量的研究,考虑了单向冻结、冻融循环、蒸发和降雨等因素对土体水盐迁移规律的影响,但是大多只考虑了一种或两种因素的作用,对冻融循环、蒸发和降雨等多因素综合作用下土体水盐迁移规律的研究相对较少。为此,本文对非饱和土进行了无压补充盐溶液条件下的冻融循环、冻融-蒸发循环和冻融-蒸发-降雨循环试验,分析冻融、蒸发、降雨条件下水盐迁移规律。

## 1 试验材料及试验设计

### 1.1 试验材料

试验土样取自西北某高速铁路基病害段。根据工程地质勘察报告,该路段土质为砂质黄土,呈浅黄色(图1),土质较均匀,结构稍密,手搓有砂感,具孔隙,呈稍湿至潮湿状态,其级配曲线见图2。依据规范<sup>[16]</sup>对土样进行室内土工试验测试,结果表明,该砂质黄土的最优含水率为12.3%,最大干密度为2.049 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 水盐迁移试验

本文通过室内试验,研究了无压补充盐溶液条件下冻融、冻融-蒸发和冻融-蒸发-降雨3种工况对水盐迁移的影响。首先,按最优含水率(12.3%)配制砂质黄土,将土样搅拌均匀后密封闷料24 h,以



图1 砂质黄土

Fig. 1 Sandy loess

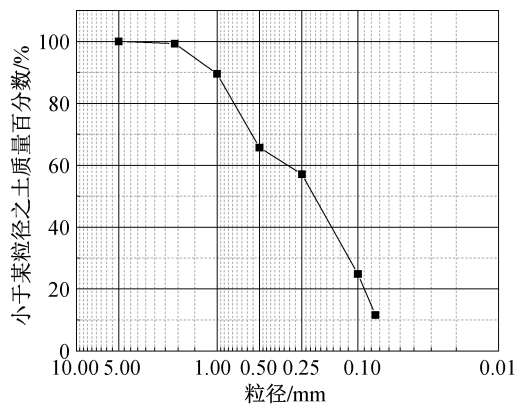


图2 级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curve

确保土样中的水分均匀分布;其次,将土样分层装入设计好的试样桶中,各层填筑高度分别为 3.5、5.0、5.0、5.0、3.5 cm,试样总高度为 22 cm;接着,将填筑好的土柱放在恒温试验箱内,使土柱温度达到 5 ℃;最后,在土柱底部连接装有不同浓度盐溶液的马氏瓶,并将马氏瓶进气管底部与土柱底部调整为相同高度,使补水状态为无压状态,即可开始不同工况下的循环试验。

水盐迁移测试系统如图 3 所示。试样桶采用内径 20 cm、外径 22 cm、壁厚 1 cm、高 34 cm 的亚克力桶,试样桶外部包裹保温材料,在距离土体底部 3.5、8.5、13.5、18.5 cm 处分别开孔并埋设传感器。传感器采用 5TE 水热盐传感器,体积含水率精度为  $\pm 1\%$ ,温度精度为  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ,电导率精度为 0.01 dS/m。冷浴盘采用具有良好导热性的合金材料制成,下冷浴盘额外设有一个马氏瓶补水口和一个排气口。将马氏瓶上部塞紧,当盐溶液流出时,马氏瓶顶部会形成真空,此时空气仅能从玻璃管进入,玻璃管下口为接触空气点,只要溶液液面不低于玻璃管下口,

其静水压即可保持恒定。将马氏瓶的玻璃管下口与土柱底部设置为相同高度,基于连通器原理,溶液可在土体的毛细作用和温度梯度作用下实现无压补充。

试验研究了无压补给 0.8% 和 1.5% 浓度的硫酸钠溶液条件下,冻融循环、冻融-蒸发循环和冻融-蒸发-降水循环 3 种工况对水盐迁移的影响。冻融循环过程为在土体达到恒温 5 ℃ 后,将上冷浴盘温度调节为  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ,下冷浴盘温度为 5 ℃,然后进行土样冻结,冻结持续时间为 24 h。冻结完成后,将上冷浴盘温度调节为 5 ℃,进行土体融化过程,融化持续时间为 12 h,每个循环周期共计 36 h。冻融-蒸发循环过程设置在冻融循环融化阶段结束后,将上冷浴盘取出,采用辐射灯模拟蒸发,温度设为 35 ℃,持续时间为 6 h,每个循环周期共计 42 h。冻融-蒸发-降雨循环过程设置在蒸发作用后,使用喷壶洒水模拟降雨,在 1 h 内进行 3 次洒水,降雨强度为 2.87 mm/h(属中雨强度),随后静置下渗,持续时间为 6 h,每个循环周期共 48 h。每种工况进行 5 次循环。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 土柱温度变化

3 种工况下土柱不同高度的温度变化曲线如图 4 所示。0.8% 和 1.5% 浓度溶液下的土柱温度变化规律相似,本文以 1.5% 浓度溶液为代表,分析土柱的温度变化规律。

随着外界环境温度的改变,不同工况下土柱不同高度的温度均呈周期性变化。其中,18.5 cm 高度处的温度变化受环境影响最显著,3.5 cm 高度处温度变化受环境影响最小。随着土柱深度的增加,温度变化存在滞后现象<sup>[17]</sup>,且变化幅度逐渐减小。

冻结过程中,温度变化曲线分为两个阶段:迅速降温阶段,土柱温度在 8 h 内快速下降,之后降温速率趋于平缓;缓慢降温阶段,土柱温度缓慢降低并逐渐趋于稳定。融化过程中,温度变化曲线同样分为两个阶段:迅速升温阶段,土柱温度在 2 h 内迅速上升,之后升温速率趋于平缓;缓慢升温阶段,土柱升温缓慢并最终趋于稳定。蒸发作用时,打开辐射灯后土柱表面温度迅速上升,土柱内部温度均出现明显的升高。在降雨作用后,土柱表面温度又出现迅速下降,而土柱 3.5、8.5 cm 高度处的温度没有明显变化。

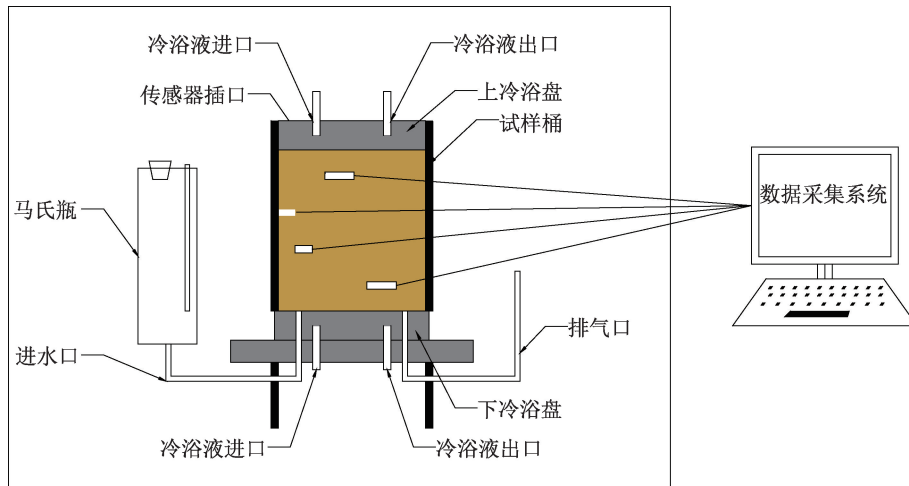


图 3 水盐迁移试验测试系统  
Fig. 3 Water and salt migration test system

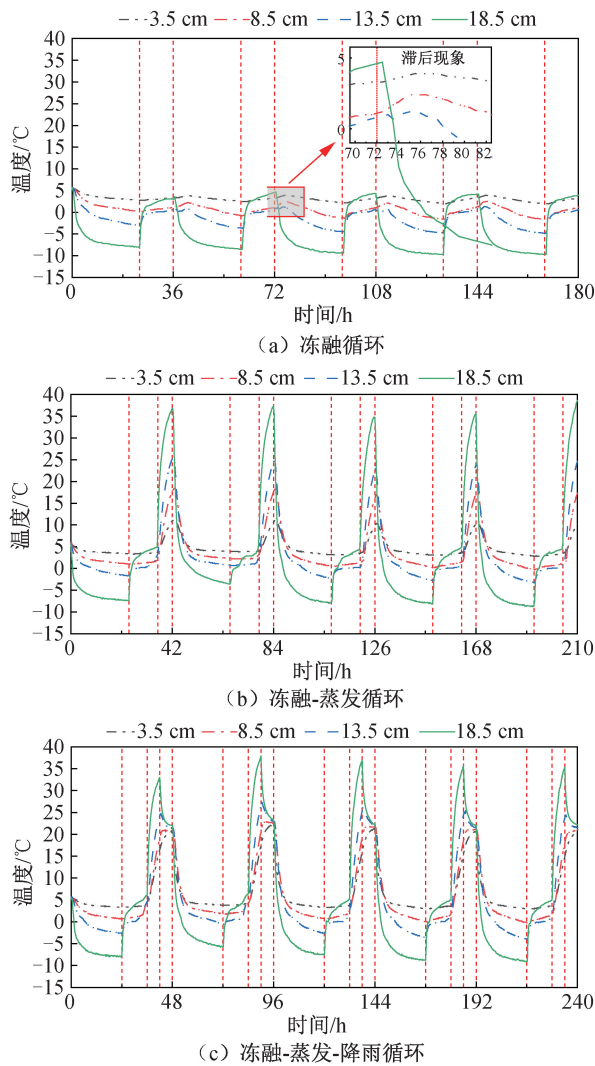


图 4 土柱不同高度温度变化曲线  
Fig. 4 Temperature variation of soil column at different heights

### 2.2 土体含水率变化

图 5 为 1.5% 浓度溶液条件下土柱含水率的变化曲线。整体来看,每种工况下土柱含水率均出现周期性变化。在土柱顶部温度从 5 °C 下降到 -15 °C 的过程中,土柱上部的水分冻结成冰,导致 13.5、18.5 cm 高度处未冻结水含量显著降低,土柱内未冻土与冻土之间产生土水势差<sup>[18]</sup>,从而驱动下部水分向上迁移,导致融化后土柱上部的含水率高于初始含水率,蒸发阶段含水率缓慢降低,降雨阶段含水率有所增大。土柱 3.5 cm 高度处含水率变化较小,结合图 4 可知,该处土体温度变化幅度最小,且温度始终高于 0 °C,因此含水率没有明显的变化。在冻融-蒸发循环工况下(图 5(b)),蒸发作用使土柱温度迅速上升,土柱上部水分蒸发导致含水率下降,进而引发下部水分向上迁移。温度升高增强了土体的毛细作用<sup>[19]</sup>,导致底部盐溶液向上迁移,因此土柱下部含水率有所升高。在冻融-蒸发-降雨循环工况下(图 5(c)),降雨作用使 3.5 cm 高度处土体含水率进一步增大。

当溶液浓度为 1.5% 时,不同循环次数下土柱含水率分布见图 6。由图 6 可知,多次循环后土柱含水率变化逐渐趋于稳定。在冻融循环工况下(图 6(a)),随着循环次数的增加,循环周期结束后土柱上部含水率略低于中部,这是由于土柱上部融化时,中部尚未完全融化,从而阻碍了上部的水分向下迁移,在土柱中部出现水分滞留层,因此该处含水率高于上部。在冻融-蒸发循环工况下(图 6(b)),辐射灯高温照射促使土柱上部的水分蒸发,导致其含水率降低,土柱中部水分向上迁

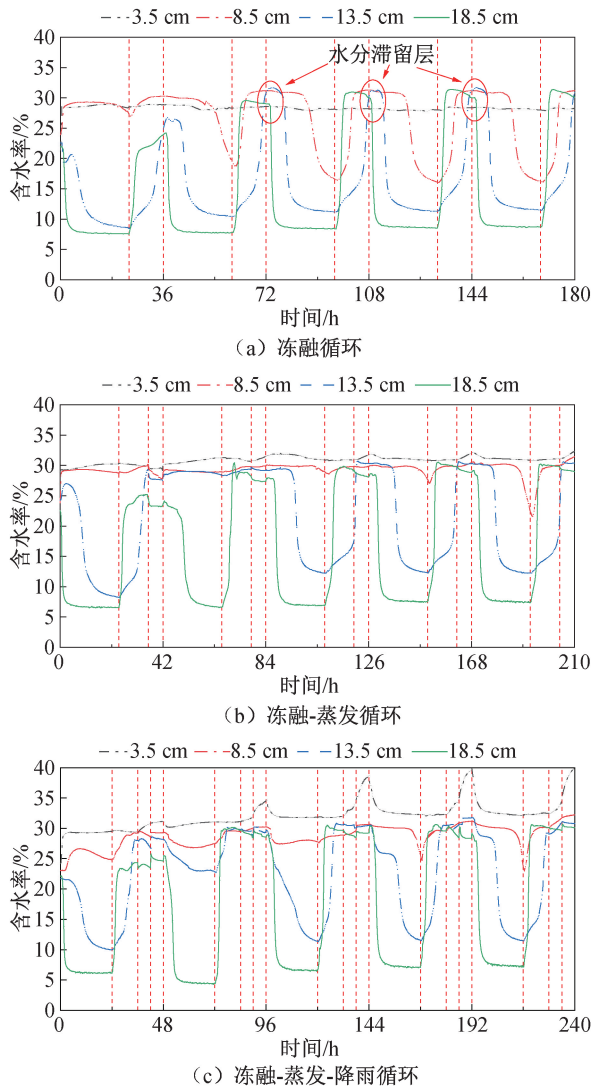


图5 土柱不同高度含水率变化曲线

Fig. 5 Variation of water content at different heights of soil column

移,此时原有的水分滞留层消失。由于土柱底部有溶液补给,土体含水率不会出现显著下降。在冻融-蒸发-降雨循环工况下(图6(c)),降雨使水分在重力驱动下向土柱下部迁移并累积,因此3.5 cm高度处的含水率明显大于冻融循环和冻融-蒸发循环工况。

外界盐溶液补给量见图7。在相同工况条件下,0.8%、1.5%浓度溶液的补给量接近,因此本文选取1.5%浓度溶液为代表,分析不同工况下的溶液补给情况。

在冻融循环工况下,溶液补给量随时间的增加呈递增趋势,但增加速率逐渐减小,最大补给量为628 g。溶液补给量随温度变化也表现出一定周期性规律:当土柱上部温度降低时,溶液补给量增加;当温度上升时,溶液补给量减小。在冻融-蒸发和冻

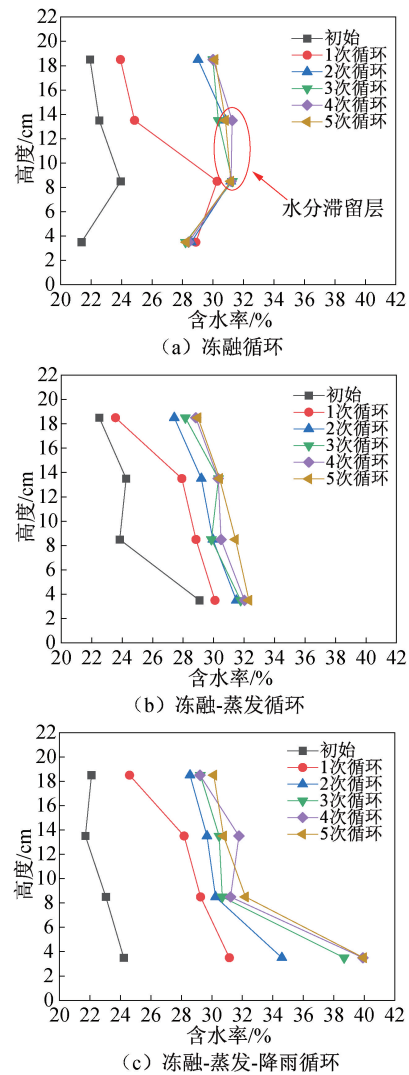


图6 不同循环次数下土柱含水率分布图

Fig. 6 Distribution of soil moisture content under different cycles

融-蒸发-降雨循环工况下,溶液补给量明显增大,最大补给量分别为2 889、2 473 g,且溶液补给量增加速率未见减缓。冻结时土柱上部温度下降导致水分冻结成冰,土水势差驱动水分向上迁移,促使溶液补给量增加;升温后冰体融化,土水势差值减小,溶液补给量因而减缓。蒸发作用使土体含水率降低,促进溶液补给,蒸发作用结束后紧随的冻结作用增大了温度梯度,同样促进溶液补给量增加。在冻融-蒸发-降雨循环工况下,蒸发后紧随降雨,使土体含水率增加、温度降低,溶液补给量趋于平缓。尽管降雨后冻结作用也会增大温度梯度,但温度梯度小于冻融-蒸发循环工况,因此冻融-蒸发-降雨循环工况最终溶液补给量小于冻融-蒸发循环工况。

### 2.3 土体盐分变化

图8为无压补充1.5%浓度盐溶液时土柱

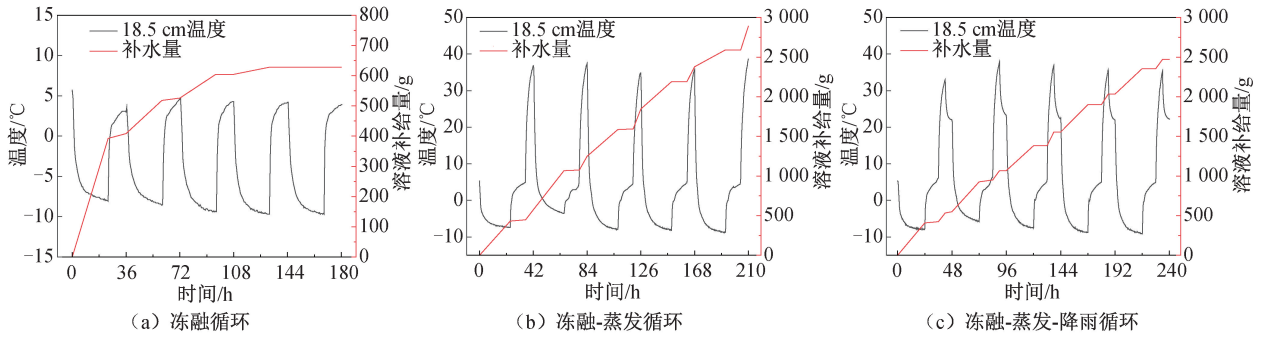


图 7 盐溶液补给量

Fig. 7 Supply volume of the salt solution

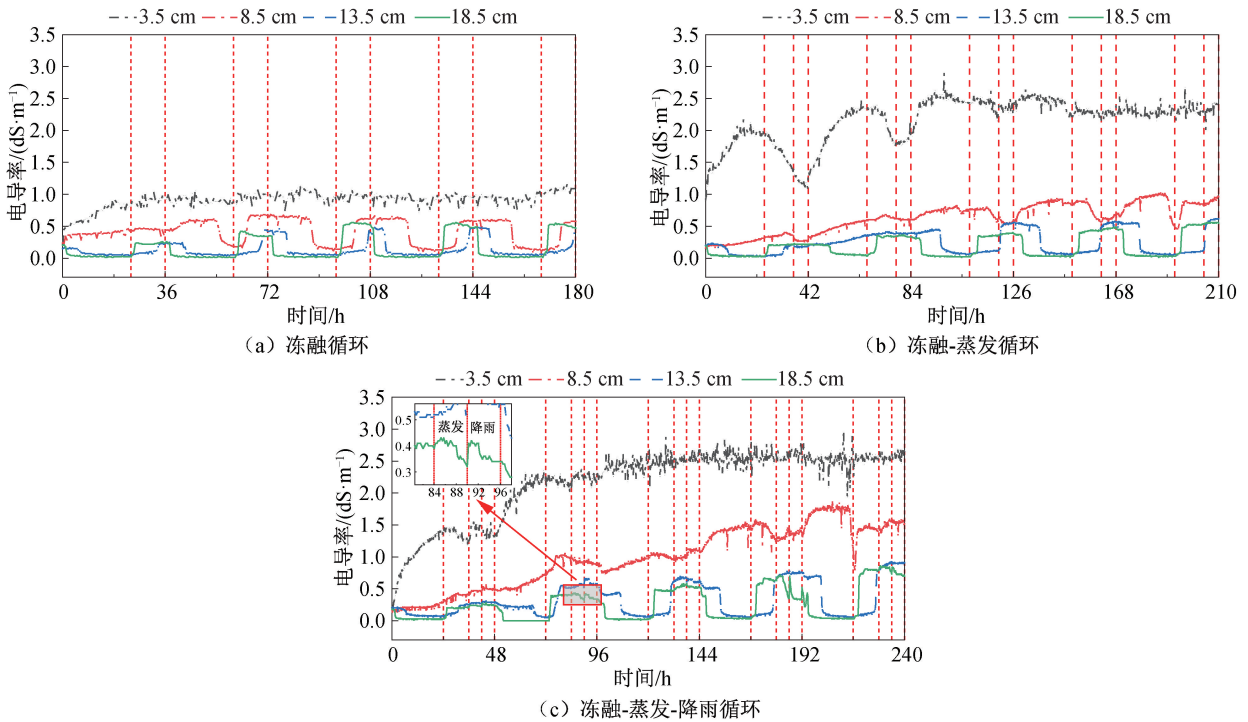


图 8 土柱电导率变化曲线

Fig. 8 Variation curve in soil column conductivity

电导率的变化曲线。土体电导率<sup>[20]</sup>与土体含水率和其中溶解盐的含量有直接关系。在 13.5、18.5 cm 高度处,电导率呈周期性变化,温度降低时电导率减小,温度升高时电导率增大,并随循环次数的增加逐渐增大。

在冻融循环工况下(图 8(a)),电导率易受温度影响,降温时,土体中的水分冻结成冰,未冻水含量下降,导致 13.5、18.5 cm 高度处的电导率明显降低。冻结过程中,盐分随着水分向冻结锋面迁移,融化后土柱上部的电导率增大。土柱下部电导率增加是由于土体的盐分浓度低于补充盐溶液的浓度,浓度梯度促使盐溶液中的盐分向土体扩散。在冻融循环工况下,土柱 3.5 cm 高度处温度变化幅度很小,当土体和盐溶液浓度达到平衡

后,该处的电导率不再明显增大。在冻融-蒸发循环工况下(图 8(b)),辐射灯照射促进水分向上蒸发,盐分随之向上迁移,达到土柱顶部后,蒸发作用导致土柱顶部盐分过饱和析出,电导率呈现先增大后减小的趋势。在冻融-蒸发-降雨循环工况下(图 8(c)),降雨使析出的盐分溶解,并在重力作用下随水分向下迁移,导致 18.5 cm 高度处电导率先增大后减小。

当溶液浓度为 1.5%时,不同循环次数下土柱电导率分布图见图 9。由图 9 可知,在 5 次循环结束后,3 种工况土体电导率均呈现自上而下逐渐增大的分布趋势。随着循环次数的增加,土体电导率逐渐增大,土柱下部的电导率增长速度最快。

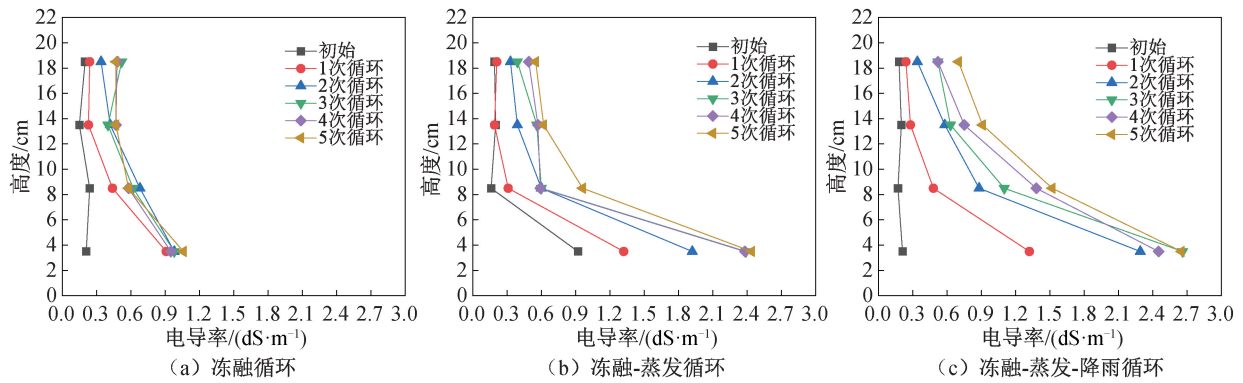


图9 不同循环次数下土柱不同高度电导率

Fig. 9 Soil conductivity distribution under different cycles

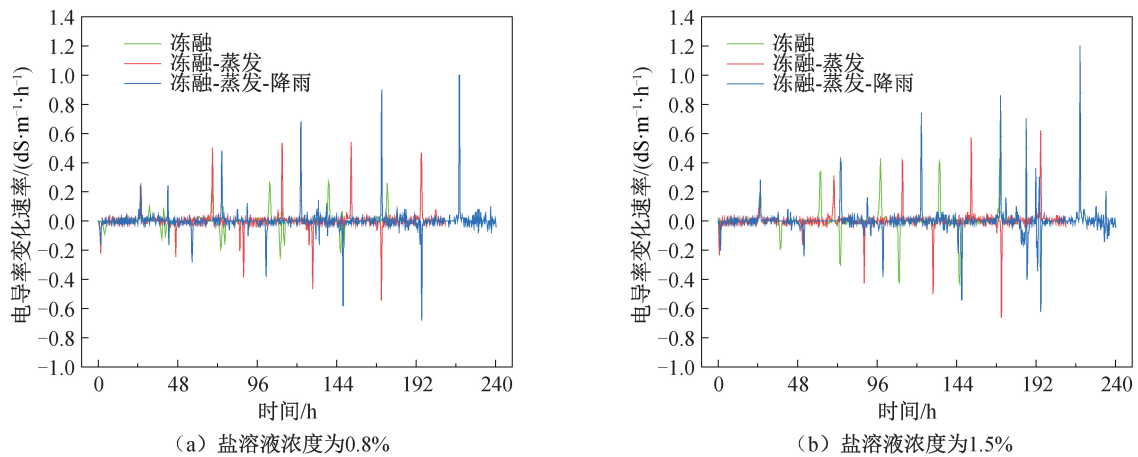


图10 土体18.5 cm处电导率变化速率

Fig. 10 Variation rate of conductivity at 18.5 cm of soil

当无压补充0.8%浓度盐溶液时,在冻融循环、冻融-蒸发循环、冻融-蒸发-降雨循环工况下,土柱18.5 cm高度处电导率的增量分别为0.12、0.31、0.45 dS/m;当无压补充1.5%浓度盐溶液时,3种工况下该处的电导率均有所增大,依次增至0.27、0.36、0.52 dS/m。其中,冻融-蒸发-降雨循环工况下土柱18.5 m高度处电导率增量最大。此外,在相同循环条件下,补充盐溶液浓度越高,越有利于盐分向上部迁移<sup>[21]</sup>。

图10为无压补充不同浓度盐溶液时土柱18.5 cm高度处电导率变化速率图。由于3种工况的周期时长不同,电导率变化速率峰值并未出现在相同位置。整体来看,电导率变化速率呈波动变化,并在降温和升温过程中出现峰值,温度变化通过影响土体未冻水含量,进而影响电导率的变化。在融化时,3种工况下电导率变化速率峰值明显不同,在冻融循环和冻融-蒸发循环中,土柱升温时电导率变化速率峰值在3次循环后趋于稳定,且冻融-蒸发循环下的峰值明显大于冻融循环。而在冻融-蒸发-降

雨循环中,土柱升温时电导率变化速率峰值在5次循环后仍呈增长的趋势。

进一步分析表明,不同工况下土柱3.5 cm高度处电导率有所不同,在补充相同浓度盐溶液的条件下,土柱下部电导率在冻融循环工况最小,在冻融-蒸发-降雨循环工况最大。蒸发作用使土柱下部温度升高,在浓度梯度和温度的共同作用下,盐分易向土体迁移,进而导致在下一个循环过程中土柱上部电导率变化速率增大。在蒸发和降雨作用下,土柱下部温度没有明显变化。在相同温度梯度下,蒸发、降雨作用时长为12 h,大于仅蒸发作用时长,所以冻融-蒸发-降雨循环下土柱下部电导率大于冻融-蒸发循环,冻融-蒸发-降雨循环下电导率增长速率最快。

### 3 结论

1) 3种循环工况下土体含水率均先增大后趋于稳定。随着循环次数的增加,土柱上部含水率

逐渐增大。冻融作用是驱动水分向上迁移的主要因素,蒸发作用使土柱上部含水率下降,促使土体水分向上部迁移,降雨作用使水分在土柱下部聚集。

2)在补充盐溶液条件下,3种循环工况均会导致土体电导率增大。蒸发作用使土柱中部盐分随水分向上迁移,土柱上部电导率增大,盐分析出后电导率降低。降雨作用使析出盐分溶解,并向下迁移,导致土柱上部电导率先增大后减小。

3)土体盐分变化受温度、浓度梯度和作用时间的综合影响,冻融-蒸发-降雨循环作用下土柱上部电导率增长量最大,盐溶液浓度越高,越有利于盐分在土柱上部累积。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG J, LAI Y, ZHAO Y, et al. Study on the mechanism of crystallization deformation of sulfate saline soil during the unidirectional freezing process[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, 32(1): 102-118.
- [2] ZHOU L Z, ZHOU F X, YING S, et al. Study on water and salt migration and deformation properties of unsaturated saline soil under a temperature gradient considering salt adsorption; numerical simulation and experimental verification[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 134: 104094.
- [3] ZHANG J, LAI Y, LI J, et al. Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118868.
- [4] ZHANG S S, ZHANG J S, GUI Y L, et al. Deformation properties of coarse-grained sulfate saline soil under the freeze-thaw-precipitation cycle[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 177: 103121.
- [5] 仝伟华, 顾相涛, 岳祖润, 等. 多年冻土区铁路桥台-路基水热力耦合数值分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(4): 52-58.  
TONG W H, GU X T, YUE Z R, et al. Numerical analysis of hydrothermal coupling between railway abutment and roadbed in permafrost regions[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 41(4): 52-58.
- [6] 邓彩虹, 郝广延, 吴勇刚, 等. 粗颗粒盐渍土工程特性与路基改良方法研究进展[J]. *公路*, 2025, 70(6): 25-31.  
DENG C H, HAO G Y, WU Y G, et al. Research progress on engineering properties and improvement methods of coarse-grained saline soil[J]. *Highway*, 2025, 70(6): 25-31.
- [7] 周凤玺, 杨金银, 巨文涛, 等. 粗颗粒硫酸盐渍土水盐迁移规律及变形特性研究[J]. *冰川冻土*, 2024, 46(1): 199-210.  
ZHOU F X, YANG J Y, JU W T, et al. Study on water and salt migration and deformation characteristics of coarse-grained sulfate saline soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, 46(1): 199-210.
- [8] 肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 单向冻结过程中 NaCl 盐渍土水盐运移及变形机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 1992-2001.  
XIAO Z A, LAI Y M, YOU Z M. Water and salt migration and deformation mechanism of sodium chloridesoil during unidirectional freezing process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11): 1992-2001.
- [9] BING H, HE P, ZHANG Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 675-681.
- [10] 余云燕, 罗崇亮, 崔文豪, 等. 冻融循环下盐渍土-质传递及盐冻胀机理[J]. *西南交通大学学报*, 2025, 60(5): 1090-1097+1120.  
YU Y Y, LUO C L, CUI W H, et al. Heat-mass transfer and salt-frost heave mechanism of saline soil under freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2025, 60(5): 1090-1097+1120.
- [11] 张玉芝, 刘文龙, 王海永, 等. 冻融循环作用下含水率对粗颗粒填料水分迁移影响的宏细观试验研究[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(2): 591-601.  
ZHANG Y Z, LIU W L, WANG H Y, et al. Macro-micro experimental investigation of the initial water content influence on water migration of coarse-grained soil subjected to freezing and thawing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(2): 591-601.
- [12] LAI Y M, WEN W, PEI W S, et al. A novel transport model to predict the moisture-heat-gas-salt behavior in unsaturated saline soil under evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127052.
- [13] ZHANG X, YE P, WU Y, et al. Experimental study on simultaneous heat-water-salt migration of bare soil subjected to evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127710.
- [14] 肖泽岸, 赖远明. 冻融和干湿循环下盐渍土水盐迁移规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3738-3746.  
XIAO Z A, LAI Y M. Study on water and salt transfer mechanism in saline soil under freezing-thawing and dry-wet conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3738-3746.
- [15] JIA B, CHEN W, CHEN H, et al. Effects of snowmelt

- and rainfall infiltration on the water and salt migration of earthen sites during freeze-thaw process [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2023, 17(4): 573-584.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2010[S]. 北京:中国铁道出版社,2011. Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for soil test of railway engineering: TB 10102—2010[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [17] 李静,白利舸,刘辉,等. 季节性冻土冻融周期多场地球物理探测与监测[J]. *地球物理学报*, 2025, 68(8): 3011-3024. LI J, BAI L G, LIU H, et al. Investigating and monitoring seasonal frozen soil freeze-thaw cycles with multi-geophysical data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, 68(8): 3011-3024.
- [18] 申艳军,魏欣,张蕾,等. 高寒山地区冰碛土水热迁移规律及聚冰冻胀孕灾机制研究进展[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(5): 1450-1465. SHEN Y J, WEI X, ZHANG L, et al. Hydrothermal migration of moraine soil and the mechanism of ice accumulation and frost swelling in alpine-cold mountain region [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(5): 1450-1465.
- [19] 刘爽,刘汉龙,肖杨. 毛细-吸附作用下考虑温度和孔隙比影响的土-水特征曲线研究[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(4): 877-886. LIU S, LIU H L, XIAO Y. Soil-water characteristic curve considering temperature and void ratio under capillarity and adsorption [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(4): 877-886.
- [20] RHOADES J D, CHANDUVI F, LESCH S. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements [J]. *FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO)*, 1999: 1-4.
- [21] 张莎莎,钱宇,王利鑫,等. 砾质硫酸盐渍土道基水盐迁移及变形特征[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(9): 48-58. ZHANG S S, QIAN Y, WANG L X, et al. Water and salt migration and deformation characteristics of gravelly sulfate-saline soil embankment [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2025, 52(9): 48-58. (责任编辑 张爱丽)
- 
- (上接第 37 页)
- [18] 刘泽,杨果林,申超,等. 绿色加筋格宾挡墙现场试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(2): 709-716. LIU Z, YANG G L, SHEN C, et al. Reinforced earth retaining wall of green gabion by field test [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(2): 709-716.
- [19] 杨果林,申权,徐健楠. 高速公路绿色加筋格宾挡墙数值分析及现场试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(6): 18-23. YANG G L, SHEN Q, XU J N. Site test and numerical analysis on reinforced earth retaining wall with green gabion on expressway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(6): 18-23.
- [20] 李浩然,宋飞,吴博,等. 秦巴山区某填方边坡加筋土挡墙破坏机理研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(1): 81-87. LI H R, SONG F, WU B, et al. Study on failure mechanism of reinforced earth retaining wall of a fill slope in Qinling-Bashan mountain area [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2023, 40(1): 81-87.
- [21] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014 [S]. 北京:中国铁道出版社,2014. National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014. (责任编辑 张爱丽)