

DOI: 10.11779/CJGE201904018

压实风积沙土层盐分迁移规律研究

张 宏^{1, 2}, 闫晓辉¹, 王中翰¹, 刘海洋¹

(1. 内蒙古大学交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古综合交通科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 针对沙漠地区风积沙路基发生盐渍化病害现象, 探究压实风积沙土层水、热、盐变化规律。自制下垫面为硫酸钠盐渍土地基的风积沙土柱试验设备, 以自然环境条件下6个月(6月—12月)的实时监测数据为基础, 分析压实风积沙土层内水、热、盐的时空分布规律与迁移特征。研究结果表明: 受外界环境温度影响, 压实风积沙土层分影响剧烈区(0~50 cm)与薄弱区(50~120 cm), 随着埋深增加, 土柱内部温度变化幅度趋于平缓, 各层温度到达峰值具有滞后效应; 受含盐下垫面与压实素土风积沙含盐量的浓度梯度作用, 压实风积沙土层深部区域被盐分迁入, 由无到有。风积沙土层内盐分的存在, 为盐分的进一步迁移奠定了物源基础。由外界温度影响, 土层浅部受水分赋存形态的变化与蒸发牵引作用, 促使水分携带盐分在压实风积沙土层内部逐渐向上发生迁移; 盐分在土层整个埋深断面上呈现“高—低—高”的分布特征。受外界环境荷载周而复始作用, 压实风积沙土层浅部盐分将渐渐积聚, 由少到多, 随着时间推移将形成盐渍化病害。

关键词: 沙漠地区; 压实; 风积沙; 盐渍化

中图分类号: U416 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)04-0741-07

作者简介: 张 宏(1978-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为寒旱区道路工程与环境岩土。E-mail: zhanghong3537@126.com。

Migration law of salt in compacted aeolian sandy soil

ZHANG Hong^{1, 2}, YAN Xiao-hui¹, WANG Zhong-han¹, LIU Hai-yang¹

(1. Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 2. Research Institute of Integrated Transportation Science of Inner Mongolia, Hohhot 010051, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of salinization diseases in the aeolian sand subgrade in desert areas, the change laws of water, heat and salt in compacted aeolian sand soils are investigated. The self-made aeolian sand column test device with sodium salinite soil as its foundation is based on the real-time monitoring data from natural environment for 6 months (June to December) to analyze the temporal and spatial distributions and migration characteristics of water, heat and salt in the compacted aeolian sandy soil layers. The result shows that affected by the external environmental temperature, the compacted aeolian sandy soil layers affect the severe (0~50 cm) and weak (50~120 cm) areas. As the depth of burial increases, the internal temperature of the soil column tends to be flat, and the temperature of each layer reaching the peak has a hysteresis effect. Under the effect of the concentration gradient of the salinity content of the salt-containing underlay surface and the compaction aeolian sand deposit, the deep area of the compacted aeolian sand soil layer is moved in by salt, and it is composed of nothing. The accumulation of salt in the aeolian sandy soil layer lays the foundation for the further migration of salt. Affected by the external temperature, the shallow layer of soil is affected by the change of water storage and evaporation, which promotes the gradual migration of water carrying salt in the compacted aeolian sand layer. The salt has a "high-low-high" distribution pattern throughout the depth of the soil. Affected by the external environmental loads, the shallow salt content in the compacted aeolian sandy soil layers will gradually accumulate, and from less to more, it will form salinization diseases over time.

Key words: desert area; compaction; aeolian sand; saline soil

0 引言

随着中国社会经济的发展, 沙漠地区的公路建设逐渐兴起。根据“就地取材”原则, 沙漠区路基填料

基金项目: 国家自然科学基金项目(51468047); 内蒙古自然科学基金项目(2015MS523, 2016MS0531); 内蒙古交通科技项目(NJ2012-10)
收稿日期: 2018-06-19

常选用分布广泛、储量丰富、取材方便的风积沙作为路基填料^[1]。从而,风积沙填筑路基的工程实例愈来愈多,对风积沙的工程特性及施工工艺了解日益深入^[2-7]。压实风积沙具有良好的隔盐、阻盐效果,时常被用作防止路基盐渍化的隔离层^[8-9]。然而,在沙漠地区下垫面为硫酸钠盐渍土地层填筑的风积沙路基发生了盐渍化病害^[10]。路基沿线地下水位远离地表(>50 m),降水稀少,气候干燥,土壤水分含量极低,风积沙路基不具备毛细水引起盐渍化的工程条件。那么在一般认为压实风积沙具有隔盐性能的前提下,探讨研究素土风积沙路基是如何转化为盐渍化风积沙路基,将对沙漠区路基盐渍化防治具有重要意义。

国内外学者对土壤盐渍化进行了详细的研究。诸如Nssar建立了一维水汽输送、热量传递和溶质迁移理论模型^[11]。Horton利用SHAW模型和土柱试验研究盐渍土和素土中水、热、溶质的迁移,得出相对于素土,盐渍土中溶质浓度降低了冻结温度^[12]。Bresler系统总结了盐分迁移的原理和模型^[13]。陈肖柏等研究了盐渍土的盐胀、冻胀、融陷规律以及影响因素、路用性能等与道路破坏的关系^[14-16]。温昱等分析盐渍土路基水分、盐分和路基温度的变化情况,进而探究盐渍土水盐运移机理与迁移高度^[17-19]。目前,沙漠路基内也逐渐发生此类病害,笔者对阿拉善额济纳地区病害路段基层路基不同深度试样的化学成分进行分析,表明在特殊的气候环境条件与工程地质条件使得路基土逐渐盐渍化并发生盐胀^[10]。随后课题人员通过室内土柱试验,研究了不同影响因素下水盐的迁移特点,总结了在沙漠区非盐渍土路基演变为盐渍土路基的过程中,路基各深度处水盐迁移驱动力的主控因素^[20]。这与目前选用压实风积沙作防止路基盐渍化的隔离层填料不相符。

沙漠区风积沙路基的盐渍化病害现象有其独特性。虽然压实风积沙具有有效阻断盐分上升通道防止盐渍化的工程性能,且由地下水水分迁移携带盐分引起风积沙路基盐渍化的基本条件并不具备,而工程实例却发生了素土风积沙路基的盐渍化病害。为此,针对上述病害现象,在众多学者研究成果的基础上,基于笔者课题组前期的研究成果^[18, 21],分析置于自然环境条件下风积沙土柱试验的实时观测数据,探讨风积沙路基内水、热、盐的迁移特性与变化规律。

1 水汽试验

1.1 试验土样

选取内蒙古阿拉善地区具有代表性的风积沙路基填料作为土柱填筑材料,取样后自然风干、研磨,并

进行洗盐处理,保证初始土柱试样可溶盐含盐量为0%,再采用烘干法(105℃烘干时间大于8 h)进行烘干,然后对土样进行颗粒筛分,粒度成分见表1。采用标准击实仪对不同含水率状态下的风积沙试样分别进行重型击实试验,确定其最大干密度1800 kg/m³与最佳含水率13% (图1)。

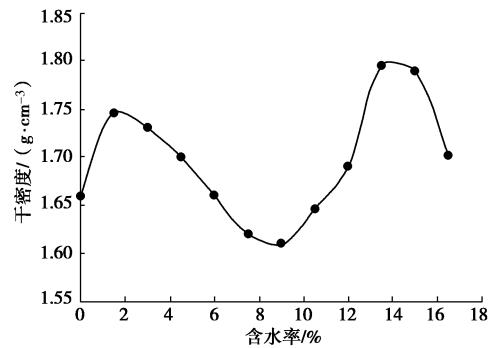


图1 击实曲线图

Fig. 1 Compaction curve

表1 土样颗粒组成成分

Table 1 Grain compositions of soil sample

粒径/mm	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.001
颗粒成分/%	2.09	12.61	72.46	12.84

1.2 试验装置设置

盐分迁移过程中总是伴随着水分参与,为了验证风积沙路基毛细通道被阻断,仍有水(汽)分发生迁移,导致风积沙路基盐渍化的现象。因此设置压实风积沙水汽迁移试验(图2),试验装置为有机玻璃箱(绝热、隔水)。首先在装置(a、b)底层0~12 cm范围内装入均匀含水率的风积沙,进行压实;然后将装置

(b)上下两部分隔断,中间铺设宽为1 cm的间隔层,材料为孔径小于风积沙最小粒径的筛网,确保分割剖面风积沙无塌落并在隔断处仅有汽态水进行交换。试验装置(a)则无间隔层,将干风积沙分别填装到装置(a、b)上部0~12 cm范围内,在距干风积沙底端2,6,10 cm埋入仪器并压实;将试验装置密封静置于室外(夏季炎热),在阳光直射下,使装置内部一直处于较高温度。进行实时监测,采集试验数据。

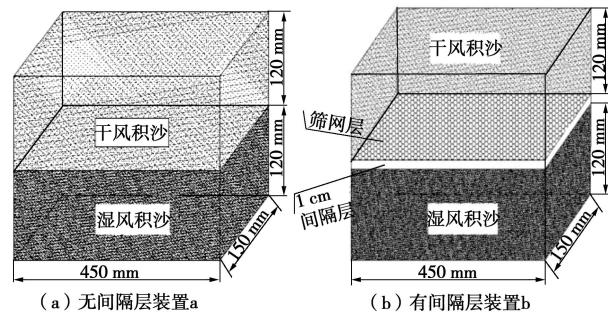


图2 水汽试验装置图

Fig. 2 Diagram of water vapor test devices

1.3 试验结果分析

通过30 d对装置中不同深度处风积沙含水率变化规律监测(图3)。设有间隔层的装置b中干风积沙含水率变化明显低于装置a,但随着时间变化,装置b中10 cm处含水率增加至0.0268,也证明毛细通道被隔断,随着时间推移,液态水转化为汽态水仍会以相对缓慢的速率向上迁移,这与相关学者对于非饱和土体中水汽迁移问题研究规律相符^[22-23]。

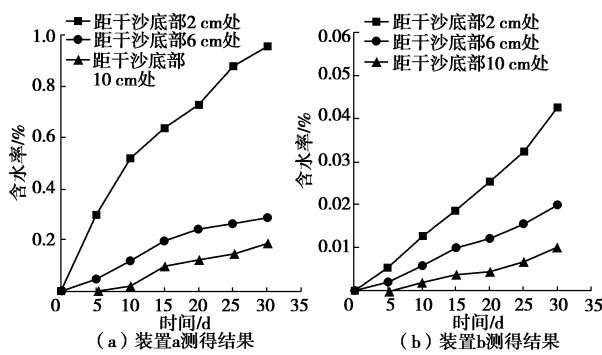


图3 干风积沙内含水率变化

Fig. 3 Variation of water content in dry aeolian sand

风积沙土体中水分梯度(干湿)存在时,则会引起汽态水迁移现象发生,汽态水迁移导致干风积沙含水率分布的变化随时间增加而增大,当时间足够久时,汽态水迁移成为影响风积沙内含水率分布变化的主要因素之一;水汽试验中含水率分布变化规律突显出干燥区土样在干湿风积沙接触区域附近变化较大,远离接触面的干端风积沙土样中的含水率变化远低于接触区域附近,见图3(a)、(b),距干沙底部2 cm处含水率均高于10 cm处。

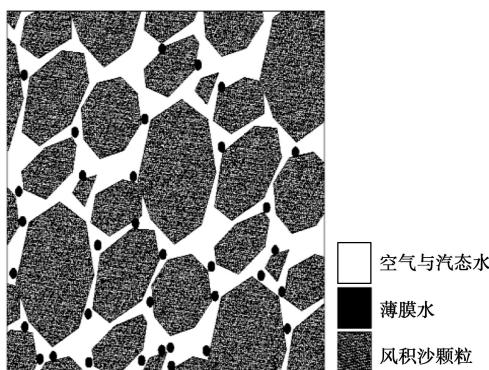


图4 水分迁移形式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of water migration form

综上,沙漠区毛细管道被隔断的风积沙路基中水分迁移的形式主要为薄膜水迁移和汽态水迁移,其迁移形式示意图如图4。通常,压实风积沙内两种迁移是并存的,同时为盐分迁移提供了载体。水汽试验证明压实风积沙毛细通道被阻断后,仍有盐渍化病害发生的存在性。由于水汽试验的可行性,故可推进对沙

漠区风积沙路基盐渍化的研究。

2 水、热、盐试验过程

2.1 试验仪器设备

为探究压实风积沙土层发生盐渍化内部的水、热、盐迁移规律,笔者课题组自行组装了土柱试验装置与实时采集土柱内水分、温度、盐分变化的监测系统。试验设备主要由HM-S8型土壤墒情速测仪(图5)和有机玻璃柱构成,整个箱体不封顶,周围板厚1 cm,底板厚1.5 cm。箱体材料为热的不良导体,且对壁板进行加厚保温隔热处理,防止试验土柱侧壁与外界环境的能量交换。



图5 土壤水、热、盐测试仪

Fig. 5 Soil water, heat and salt tester

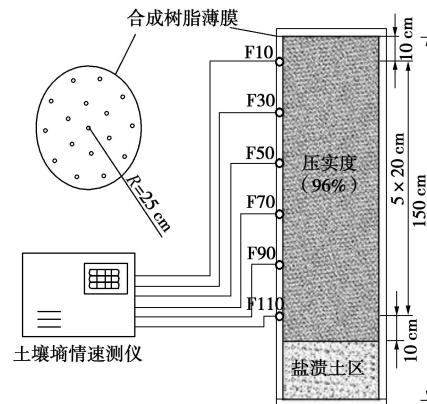


图6 装置模型图

Fig. 6 Device model

在土柱外箱体侧壁间隔设有固定的圆形测孔,用于插入传感器探头,传感器自箱顶下10 cm开始布设,每隔20 cm布设1个监测点,共布设6个。检测范围为箱顶下110 cm深度内,编号依次为F10~F110。底部铺设30 cm厚硫酸钠盐,用以表征下垫面为硫酸钠盐渍土的地基。箱体顶面采用合成树脂薄膜覆盖,并在薄膜上打出一定面积的小孔,模拟路基被路面覆盖后有一定的蒸发作用,尽可能地构建接近实际状态的试验边界条件(图6),将装置置于外界环境。

2.2 土柱填筑

综合考虑发生风积沙路基盐渍化病害段的压实

度检测结果与填筑路堤的压实标准要求^[24], 风积沙土柱填筑时采用压实度为96%的均匀压实控制标准。在填土夯筑过程中要先用胶带将预留孔密封, 防止土从孔中漏出。土柱填筑压实后, 对每个测孔位置处的土体进行取样, 利用烘干法和EDTA配位滴定法对此时的土样进行测定, 并以此状态作为水盐迁移的初始状态。将土壤墒情速测仪插入预留的测孔内, 采集系统自动存储数据, 定期进行数据提取, 本次分析数据为6月1日至12月1日所采集到的数据资料。

3 试验结果及分析

3.1 温度分布特征

图7为压实风积沙土柱不同埋设深度处温度随采集时间的分布规律图。不难从8月10日—9月10日的观测数据可知, 土层较浅位置(<50 cm)的测点温度受气候环境温度影响正处在降温阶段, 而埋深较深位置的测点温度仍保持上升趋势, 受环境温度影响的深部温度变化相比于浅部温度变化具有滞后效应; 同时, 土柱90 cm处温度出现峰值比70 cm处滞后约60天, 而30 cm比10 cm处滞后约20 d, 表明压实风积沙土层内部温度随着环境温度的变化而变化, 土层内部温度的变化明显滞后于环境温度, 随着土柱深度的增加, 土层内部温度变化的滞后时间效应越显著。

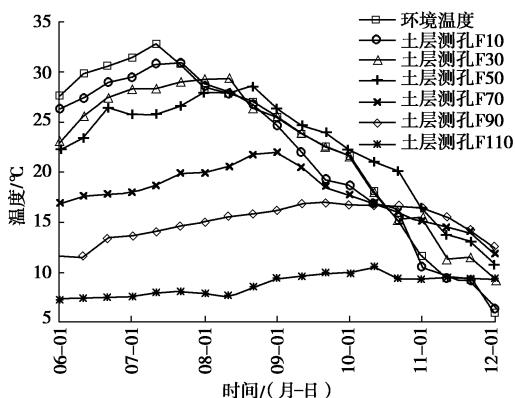


图7 土柱不同深度温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of soil column at different depths

在0~110 cm监测范围内, 离表层越远受外界环境影响越小, 随着深度的增加, 各层温度变化幅度逐渐变缓, 110 cm深度处, 最大温度差仅为4°C, 温度基本趋于稳定, 表明该深度范围内压实风积沙土层温度受环境温度变化的影响程度较小; 在埋深小于50 cm的范围内, 土层温度出现升、降温现象, 随环境温度的变化趋势相一致, 温度线的倾斜幅度较大, 凸显<50 cm范围内压实风积沙土层受环境温度变化影响剧烈的埋深区段。

3.2 水分迁移特征

通过对压实风积沙土柱实测数据(图8(a)、(b))分析表明, 埋深在0~30 cm范围内, 距离土层顶面越近湿度越大, 但在10月—12月, 10 cm深度处水分积聚现象要比7月—9月更加显著, 且9月、12月时含水率分别达到最小、最大值, 图8说明土柱顶层覆盖一定孔隙的树脂薄膜, 一定程度上阻碍了土柱内部水分的向外蒸发, 造成顶层水分的积聚, 湿度的增大。

由图7知, 压实风积沙土层在50~110 cm范围受环境温度变化的影响程度较小, 可知图8中土柱底部50~110 cm范围内倾斜度代表非饱和土体内液态水上移速率, 随深度增加倾斜度逐渐趋近于平缓, 主要原因是土柱中重力势作用。由于风积沙持水量和供水量较差, 重力势对水盐迁移的影响显著, 随着水分上升高度的增加, 重力势增大, 土壤基质对水的吸附和约束能力减弱, 含水率上升的幅度逐渐降低, 故土柱50~70 cm范围的含水率相比于70~110 cm明显较低, 土柱内的含水率随深度呈现“V”状分布。

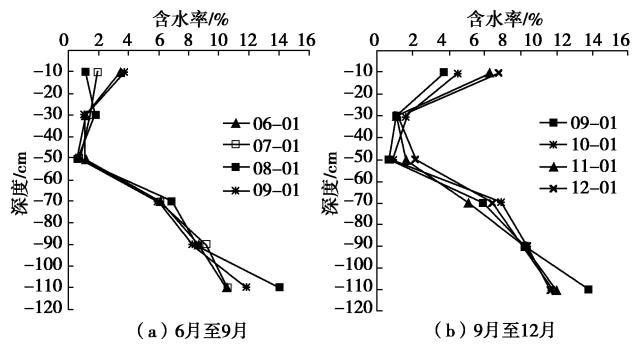


图8 土柱不同深度水分分布

Fig. 8 Moisture distribution of soil column at different depths

液态水缓慢向上迁移, 当进入到环境温度剧烈影响区(<50 cm)时, 主要以气态水的形式存在, 因为蒸发作用接力为水分的迁移提供主要动力, 使得能够存在于该深度范围的液态水整体含量比其它位置少; 在30~50 cm范围内几乎处于土柱含水率最低值, 受环境温度剧烈影响, 该范围内水分主要由汽态水构成; 而在0~30 cm范围内, 受土柱表层具有一定孔隙覆膜的影响, 既有蒸发作用, 又有覆盖效应, 土柱表面蒸发效应受阻, 引起水分在覆盖层下积聚, 导致覆盖层下土体含水率大幅提高, 随着环境温度周而复始的变化, 受重力势主控在土层底部积聚的水分将逐渐向上迁移。综上可知, 在地下水位深(>50 m), 干燥少雨的沙漠地区, 压实风积沙土柱顶层出现明显的水分聚集区域主要由气态水迁移所致。

3.3 盐分迁移特征

图9为6月—12月压实风积沙土层不同埋深处的盐分分布图。初始非盐渍土风积沙土层内部盐分呈现缓慢增长趋势, 整个路基由初始含盐量为0%增加到

平均含盐量 1.95%, 说明在毛细管运输中断的沙漠地区, 非盐渍土风积沙土层在下垫面为盐渍土地基条件下, 盐分会逐渐向压实风积沙土层内迁移积聚, 随着时间的推移, 将发生盐渍化病害现象。

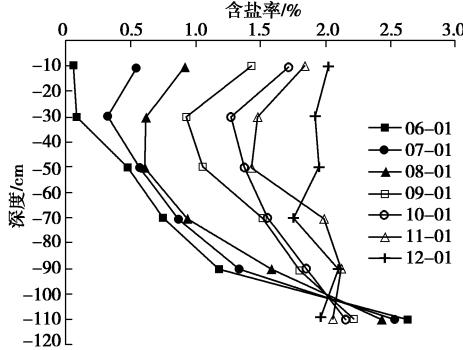


图 9 土柱不同深度盐分分布

Fig. 9 Salt distribution of soil column at different depths

除 F110 测孔的含盐量随时间增加而逐渐减少, 其余测孔 (F10~F90) 基本呈现出含盐量随时间的增加而增大的积聚规律, 呈现“ \vee ”型分布现象, 拐角点大约分布在 F30 测孔处。盐分在土柱的顶、底层积聚, 盐分在向上迁移过程中呈现“高—低—高”分布规律。F110 测孔处含盐量的存在, 表明硫酸钠盐地基下垫面与初始素土风积沙土层含盐量的浓度梯度为盐分迁移提供了动力; 含盐量随着监测时间的推移逐渐降低的分布特征, 表征盐分进一步向土柱上层迁移, 各测孔从初始含盐量为零到逐渐增加也佐证了盐分迁移的方向。下垫面的含盐地基将为压实风积沙土层的盐渍化提供盐分物源, 且随着时间的推移, 盐分将渐渐积聚土层表面一定埋深范围内, 形成盐渍化病害。

3.4 水、热、盐迁移特征

硫酸盐渍土路基在封闭条件下, 水分、温度、盐分三者相互促进, 使得盐渍土路基盐渍化程度更加严重^[25]。温度对土中水分迁移的影响可归结为温度影响水分特性、封闭气体与水气运动等方面^[26~28]。对比分析压实风积沙土层不同埋深处温度、水分、盐分随监测时间的分布特征 (图 10), 不难发现不同埋深区域盐分迁移积聚的主控因素有所不同。

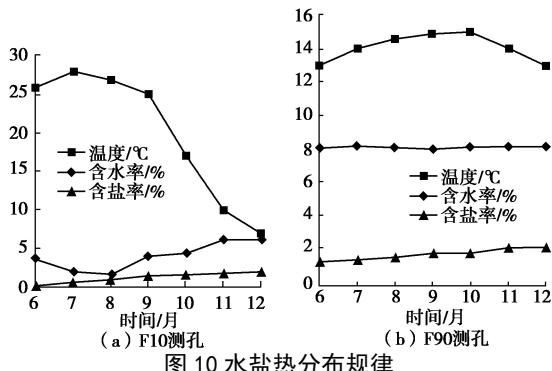


图 10 水盐热分布规律

Fig. 10 Heat distribution of water and salt

在受环境温度影响弱小的土层内部区域或滞后效应比较明显的范围内, F90 处含水率稳定在 8%, 而盐分则呈线性增加, 盐分的迁移主要受控于下垫面含盐地基与素土风积沙的含盐浓度梯度提供了初始迁移动力, 虽然沙漠区压实风积沙的毛细通道被隔断, 但通过水汽试验证明仍有薄膜水在向上迁移, 在这迁移的过程中, 与下层的土体又形成盐分梯度, 再进一步促使盐分向上迁移, 此过程中土层之间的浓度梯度占主导地位; 而在受温度影响剧烈的埋深区段埋深<50 cm。F10 处含水率明显受环境温度影响, 与温度成反相关, 土层温度受环境温度的影响将改变土柱内水分存在方式, 主要以薄膜水形式存在的水分, 逐渐转化为以汽态形式为主。虽然图 10 中含盐量均呈现线性变化, 但 F10 含盐量明显低于 F90, 因为 F10 处水汽迁移过程缓慢, 水分存在量少, 很难形成如 F90 处上下区段较大浓度差, 由此推出水、盐分迁移过程, 受浓度梯度、环境温度共同的作用。

随着部分聚集水分从表层蒸发, 盐分被滞积于受环境温度影响显著的土层区域, 这也是压实风积沙表层盐分由无到有, 渐渐呈现高盐分的所因所在。不难推断随着年复一年的环境荷载作用, 下垫面含盐地基将源源不断地提代盐分, 最终压实风积沙土层内的盐分将由现在资料分析的“高—低—高”特征转化为沿埋深盐分由表层的高盐分逐渐过度到低盐分的分布特征。

4 结 论

综上, 以水汽试验研究为前提, 依据自制下垫面为硫酸钠盐渍土地基的压实风积沙土柱的试验监测资料, 探讨压实风积沙土层发生盐渍化病害产生缘由。总结水、热、盐的分布特征, 初步得到如下几点认识:

(1) 通过水汽试验, 表明压实风积沙浅层区域 (0~50 cm) 盐分的积聚, 受温度影响土层水分赋存形式主要为薄膜水和汽态水, 二者同时存在并为盐分迁移提供了载体。

(2) 受外界环境温度变化, 压实风积沙土层内部温度变化幅度随埋深增加趋于平缓, 分影响剧烈区 (0~50 cm) 与影响薄弱区 (50~120 cm), 各层温度到达峰值具有滞后效应。

(3) 压实风积沙土层深层区域 (50~120 cm) 盐分的迁入是硫酸钠盐地基下垫面与初始素土风积沙土层含盐量 (0%) 的浓度梯度为其提供了原始动力。

(4) 压实素土风积沙土层含盐量由无到有的试验结果现象表明, 一般认为压实风积沙土层具有阻融盐分作用的观点, 忽略了盐渍化的时间累积效应。只要

条件具备, 风积沙土层仍能被盐分侵入并且随着时间推移盐分由少积多, 渐渐失去隔断层的作用。

参考文献:

- [1] 张 宏, 王智远, 刘润星, 等. 科尔沁沙地区风积沙路用性能室内试验研究[J]. 内蒙古大学学报(自然版), 2015(3): 308 - 312. (ZHANG Hong, WANG Zhi-yuan, LIU Run-xing, et al. Experimental study on aeolian sand road performance in Horqin sandy land[J]. Journal of inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2015(3): 308 - 312. (in Chinese))
- [2] CHAUHAN M S, MITTAL S, MOHANTY B. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2008, 26(5): 429 - 435.
- [3] SANTONI R L, WEBSTER S L. Airfields and roads construction using fiber stabilization of sands[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(2): 96 - 104.
- [4] PADMAKUMAR G P, SRINIVAS K, UDAY K V, et al. Characterization of aeolian sands from Indian desert[J]. Engineering Geology, 2012, 9(139/140): 38 - 49.
- [5] KOK J F, PARTELI E J, MICHAELS T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust[J]. Reports on Progress in Physics Physical Society, 2012, 75(10): 106901.
- [6] 张 浩, 李哲, 折学森, 等. 毛乌素地区不同级配风积沙的压实特性与压缩特性试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 167 - 172. (ZHANG Hao, LI Zhe, SHE Xue-sen, et al. Compaction and compression characteristics of different levels of aeolian sand in Maowusu area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 167 - 172. (in Chinese))
- [7] MARSHALL J R, BULL P A, MORGAN R M. Energy regimes for aeolian sand grain surface textures[J]. Sedimentary Geology, 2012, 4(253/254): 17 - 24.
- [8] 陈发明, 陈静曦, 张 华. 浅谈盐渍土路基设计和防腐处理[J]. 科技创新与生产力, 2008(3): 63 - 64, 67. (CHEN Fa-ming, CHEN Jing-xi, ZHANG Hua. Discussion on design and antiseptic treatment of saline soil subgrade[J]. Technology Innovation and Productivity, 2008(3): 63 - 64, 67. (in Chinese))
- [9] 杨仲全. 盐渍土地区路基隔断层设置研究[J]. 中国水运月刊, 2012, 12(11) : 218 - 220. (YANG Zhong-quan. Study on subgrade settlement in saline soil area[J]. China Water Transport, 2012, 12(11): 218 - 220. (in Chinese))
- [10] 张 宏, 王智远, 张海龙, 等. 阿拉善额济纳地区公路盐胀病害成因分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 151 - 154. (ZHANG Hong, WANG Zhi-yuan, ZHANG Hai-long, et al. Analysis of desert highway expansion caused by the excessive salt content in Ejina of Alxa Area, Inner Mongolian[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 151 - 154. (in Chinese))
- [11] NASSAR I N, HORTON R. Water transport in unsaturated nonisothermal salty soil: I experimental results[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(5): 1330 - 1337.
- [12] NASSAR I, GLOBUS A, HORTON R. Simultaneous soil heat and water transfer[J]. Soil Science, 1992, 154(6): 465 - 472.
- [13] BRESLER E, MCNEAL B L, CARTER D L. Saline and sodic soils. Principles-dynamics-modeling[M]. Berlin/ Heidelberg/New York: Springer-Verlag, 1982.
- [14] 陈肖柏, 邱国庆, 王雅卿, 等. 温降时之盐分重分布及盐胀试验研究[J]. 冰川冻土, 1989, 11(3): 231 - 238. (CHEN Xiao-bai, QIU Guo-qing, WANG Ya-qing, et al. Salt redistribution and heave of saline soil during cooling[J]. Journal of Glaciology And Geocryology, 1989, 11(3): 231 - 238. (in Chinese))
- [15] 牛玺荣. 硫酸盐渍土地区路基水、热、盐、力四场耦合机理及数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2006. (NIU Xi-rong. The study and numerical simulation on moisture-heat-salt-stress coupled mechanism in the sulphate saline soil subgrade[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese))
- [16] 曹福贵. 硫酸盐渍土地区路基水、热、盐、力四场耦合效应的室内和现场试验分析及现场试验路数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2009. (CAO Fu-gui. Laboratory and field research on coupled hydro-thermo-saline-mechanical behavior of subgrade in vitriol saline soil areas and field numerical simulation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [17] 温 昱, 张 文, 罗艳珍, 等. 盐渍土区路基土层级配特征及 阻盐效应分析[J]. 青海大学学报, 2018, 36(4): 17 - 23. (WEN Yu, ZHANG Wen, LUO Yan-zhen, et al. Analysis of gradation characteristics and salt-resistance effect of subgrade layer in saline soil area[J]. Journal of Qinghai University, 2018, 36(4): 17 - 23. (in Chinese))
- [18] 赵德安, 余云燕, 马惠民, 等. 南疆铁路路基次生盐渍化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 745 - 751. (ZHAO De-an, YU Yun-yan, MA Hui-min, et al. Secondary salinization of subgrade of southern Xinjiang Railway[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 745 - 751. (in Chinese))
- [19] 杨 噴. 盐渍土地区铁路路基的温度变化和水盐运移研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014. (YANG Tun. The study on temperature variation and moisture rise and salinity transport of railway subgrade in saline soil area[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [20] 胡建荣, 张 宏, 张海龙, 等. 沙漠区风积沙路基水盐迁移规律[J]. 交通运输工程学报, 2017, **17**(3): 36 - 45. (HU Jian-rong, ZHANG Hong, ZHANG Hai-long, et al. Water-salt migration laws of aeolian sand subgrade in desert area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, **17**(3): 36 - 45. (in Chinese))
- [21] 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(自然版), 2017(1): 106 - 111. (ZHANG Hong, YAN Xiao-hui, HE Lin-lin, et al. Progress in water-salt migration model and mechanism[J]. Journal of inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2017(1): 106 - 111. (in Chinese))
- [22] 王铁行, 贺再球, 赵树德, 等. 非饱和土体气态水迁移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(18): 3271 - 3275. (WANG Tie-hang, HE Zai-qiu, ZHAO Shu-de, et al. Experimental study on vaporous water transference in loess and sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(18): 3271 - 3275. (in Chinese))
- [23] 李彦龙, 王 俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2839 - 2844. (LI Yan-long, WANG Jun, WANG Tie-hang. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. Rock and Soil Mechanics , 2016, **37**(10): 2839 - 2844. (in Chinese))
- [24] 姚佳禹. 高速公路风积沙路基填筑质量控制技术研究[J]. 建筑技术开发, 2017(20): 111 - 112. (YAO Jia-yu. Study on quality control technology of wind blown sand subgrade filling on expressway[J]. Road and Bridges, 2017(20): 111 - 112. (in Chinese))
- [25] 唐好鑫. 新疆硫酸盐渍土地区路基温度和水盐运移规律的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (TANG Hao-xin. Research on temperature and salt migration law of sulphate salty soil subgrade in Xinjiang region[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [26] CHUNG S. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. Water Resour Res, 1987, **23**(12): 2175 - 2186.
- [27] PHILIP J R. The theory of infiltration: 4. sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Sci, 1957, **84**: 257 - 264.
- [28] 罗 汀, 陈 含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, **46**(9): 6 - 9. (LUO Ting, CHEN Han, YAO Yang-ping, et al. Analysis of water migration characteristics of pot-cover effect[J]. Industrial Construction, 2016, **46**(9): 6 - 9. (in Chinese))