

黑土冻融过程中水分垂直迁移模拟研究

刘红希, 范昊明, 许秀泉

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 为明确土壤冻融过程中水分垂直迁移与其主要影响因素间的定量关系, 以我国东北典型黑土为研究对象, 通过单向冻融试验, 进行了不同初始含水率、降温幅度和地下水位条件下土壤冻结过程中水分垂直迁移试验, 定量分析了主要影响因素对黑土冻融过程中水分垂直迁移的影响规律。结果表明: (1) 试样中温度变化先快后慢, 最终试样内部温度随深度呈现稳定的温度梯度分布; (2) 初始含水率对土壤的冻结影响较为明显, 初始含水率越高, 冻结经历时间越长, 冻结过程中消耗的潜热量越大, 冻结锋面形成越晚; (3) 不同降温幅度使得土壤温度梯度差距较大, 15 °C 温差变温时垂直方向水分迁移量最大, 土壤最快进入冻结稳定期, 并在冻结 16 h 时, 20 cm 土层附近含水率达到冻结期峰值; (4) 地下水位越高, 温差越小, 冻结锋面向下迁移速率越慢, 各层水分均明显增加, 并且在在中上层聚集。

关键词: 初始含水率; 降温幅度; 地下水位; 冻结锋面

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0169-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.025

Simulation of Water Vertical Migration in Black Soil During Freezing-thawing Process

LIU Hongxi, FAN Haoming, XU Xiuquan

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: In order to clarify the quantitative relationship between the moisture vertical migration and the main influencing factors during soil freezing-thawing process, a unidirectional freezing-thawing simulation test was carried out using typical black soil in Northeast China, under the conditions of different initial moisture contents, temperature drop ranges, and groundwater levels. The results showed that: (1) The temperature changes in the samples were fast first and then slow, and the internal temperature of the samples showed a stable temperature gradient distribution with the variations of the depths. (2) The influence of initial moisture content on soil freezing was obvious. The higher the initial moisture content of soil was, the longer the duration of freezing process was, and the larger the latent heat consumed in the freezing process was, and the later the formation time of freezing front was. (3) Various temperature drop ranges caused the obvious difference of soil temperature gradients. The migration of water in the vertical direction was the largest with the temperature changes at 15 °C, the soil entered the freezing stable stage at fastest speed, and the moisture content near the 20 cm soil layer reached the peak value after 16 hours. (4) The higher the groundwater level was, the smaller the temperature difference was, the slower the downward migration rate of the freezing front was. The water content in each layer increased significantly, and accumulated in the upper and middle layers.

Keywords: initial water content; temperature drop range; groundwater level; freezing front

我国东北地区属于季节性冻土区, 是重要的商品粮生产基地, 其土壤质量安全具有重要的生态、经济效益。东北地区寒季土壤经受反复的冻融循环作用, 发生的冻融失稳与土壤水分有密切关系^[1]。其冻土系统内的水分迁移是土壤冻融作用、冻融侵蚀的先决条件。土壤冻

融过程中水分变化规律研究对于黑土区的土壤侵蚀防治、保护珍贵的黑土资源具有重要意义。

冬季温度降低, 冻结过程中或冻结后, 未冻水会在多种外力作用下从下层未冻结的土壤向低温冻结区迁移^[1], 使上层土体中水分富集, 形成冰晶或冰夹

收稿日期: 2020-06-06

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0202900); 国家自然科学基金项目(41371272)

第一作者: 刘红希(1994—), 女, 辽宁葫芦岛人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀规律研究。E-mail: 285607374@qq.com

通信作者: 范昊明(1972—), 男, 吉林白山人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持规划研究。E-mail: fanhaoming@syau.edu.cn

层。冻结面延伸会逐步影响土壤水分的迁移运动。冻结土层本身具有不透水性,富集水分会不断聚集在冻结面上,使其含水率明显增大,甚至达到饱和,因此水分聚集处土体的抗剪切强度与摩擦力均会明显降低。冻结面会产生斜面滑床,由于重力的作用,很可能出现浅层滑塌^[2-3]。在冻融交替过程中,土壤水分迁移十分复杂,同时也属于土壤冻融失稳机理的关键性问题之一。20 世纪 60 年代至今,相关研究^[4]发展了薄膜水迁移机制、毛管水迁移机制以及真空抽吸机制等冻土液态水迁移理论。从水力学的角度,冻土中液态水总是从水势高的区域向水势低的区域迁移。土体内部由于温度场的改变产生不透水层,引起土体中相态平衡的破坏^[5]。压力势、溶质势、重力势、基质势、温度势等诸多因素都可以导致土体当中的水分迁移,并且提供相应的动力^[6-9]。具体迁移过程的动力多种多样,而且路径又存在很强的随机性,因此大多不能呈现明确的规律。对于季节性冻土与常年冻土,地下水受到基质吸力会明显的上升;温度梯度对于水分的迁移作用显著,在温度梯度的影响之下,水分也会不断向上部迁移^[10-12]。土壤冻结或融化过程中,其温度分布不均匀,将导致土壤水分分布不均匀,出现介质基质势的改变,导致水分迁移^[13]。水分迁移会直接改变土壤的热特性参数,进而改变温度的分布规律^[14]。综上所述,土壤的水分运动、含水率分布与热量或温度分布具有直接的关联,且均与传质热力学相关^[15]。

大量的观测和试验表明水分迁移是引起土壤冻融侵蚀的一个关键因素。近年来,相关研究^[16-17]通过数学模拟、实体模拟试验等手段,深入研究水分迁移动力机制。受试验条件等多方面的影响,针对性的分析方法相对较少,难以定量地描述冻结面上的水分聚积,尤其在动态监测土体内部含水率变化、冻融过程中含冰率的变化等方面仍无法获得满意的结果。本文以东北典型黑土为研究对象,讨论在单向冻结模式下,不同初始含水率、温度梯度和地下水位影响下,黑土中水分迁移变化的规律,构建各影响因素与水分垂向迁移之间的定量关系。研究结果可为分析冻融作用对土壤的影响规律,防治寒季土壤侵蚀提供一定参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验所用土壤为东北典型黑土,于 2018 年 9 月取自黑龙江省海伦市光荣小流域(46°54′32″N, 126°15′53″E)。该地区土壤采用环刀法测得容重为 1.15 g/cm³,孔隙度为 30.5%,机械组成采用吸管法,其砂粒含量为 57.35%、粉粒含量为 16.4%、黏粒含量为 26.25%。依据《土工试验标准方法》^[18]中关于扰动土试样的制备流程以及土壤情况,本试验制备土样为

剖面深 60 cm、直径 20 cm 的土柱,柱壁内侧涂抹凡士林防止优先流产生。柱壁每隔 10 cm 设置 1 组小孔,用于放置传感器探头,实时获取冻结过程中液态水含量及温度数据。对土样进行容重控制和含水率配置,依据现场取土实测值,设定容重为 1.13 g/cm³;土样过 3 mm 筛,配置成相应含水率土样后分层填充压实到要求密实状态,以获得不同含水率的均匀试验土柱。土样下方 20 cm 利用石英砂设置砂石反滤层,以连接马氏瓶进行不同深度地下水分补给,根据每组试验要求不同,调整恒定水头位置。

1.2 试验装置

试验所用冻融循环设备为自主研发的分层控温冻融循环机。该设备由分层冻融循环系统、土柱模型管、温度测量系统、含水率测量系统、数据采集系统等部分构成(图 1),可以实现表层向下单向冻结、分层控温,能较好地模拟野外冻结状态。土柱采用高 60 cm、直径 20 cm 的有机玻璃筒。采用 485 通信方式美国 SEC 水分传感器实时测量液态水含水率,每隔 10 cm 埋设 2 个平行探头以确保精度,共 12 个水分传感器,含水率采用传统烘干法测定。低温系统由功能性较强的 3 组中低温专用丹佛斯 SC15 型压缩机及冷凝散热器组成,冷媒选用低温 R404a 制冷剂,通过制冷系统工作,实现压缩→冷凝→膨胀→蒸发(吸热)的制冷循环,系统最低制冷温度为 -35 ℃,四壁由保温板组成,温控精度为 0.1 ℃,冻融循环机内温度误差±0.5 ℃。



图 1 水分迁移测试系统

1.3 试验方法

试验中对不同初始含水率的土样,设定相同温度梯度与地下水位条件;对相同含水率的土样,采取不同温度梯度与地下水位条件。每次试验设定为 24 h,前 12 h 为降温阶段,后 12 h 为升温阶段。每 4 h 对箱体进行温度调整,模拟不同单向冻结条件。依据研究区解冻期自然环境条件设置初始温度、降温幅度及初始含水率,地下水位设置考虑了解冻期土壤剖面表层解冻而下部仍然冻结,导致解冻土体下部有融水滞留。每个试验条件更换土柱,进行 3 组重复试验。

试验条件具体设计见表 1。

表 1 黑土冻融水分迁移试验条件

分组	试样编号	箱体初始温度/℃	降温幅度/℃	含水率/%	地下水位/m
1	1	10	10	15	—
	2	10	10	30	—
	3	10	10	40	—
	4	10	10	50	—
	5	10	5	30	—
2	6	10	10	30	—
	7	10	15	30	—
	8	10	10	30	0.3
3	9	10	10	30	0.6
	10	10	10	30	0.9

注:—表示未进行该组试验。

2 结果与分析

2.1 黑土冻融过程中温度场分析

为研究试样垂向温度随时间的变化规律,每隔 30 min 观测 1 次土柱各层中心点的温度。试样 2 对应的温度随时间的变化曲线见图 2。温度开始下降之后,初始的温度即被打破,首先各层温度在短时间内大幅下降,经过一段时间后,逐渐达到平稳状态。在不同条件之下,试样各点垂向上的温度变化趋势相似,可以划分为:(1)温度快速下降阶段,由初始温度,在很短的时间内下降到一个接近于 0℃ 且很小的正温值;(2)缓慢下降阶段,在这段时间内,温度开始下降到负温度,此阶段持续时间相对较长;(3)稳定阶段,当温度下降到一定程度后,将会趋于较长时间地稳定,此时对应的温度实际上就是冻结温度,该阶段持续时间受初始含水率、降温幅度等因素的影响;(4)升温时期,在此阶段温度在很短的时间内快速上升,最终达到正温状态。

在冻结前期,土体距离冷端越近,温度梯度越大,冻结的速率越快。当试样的温度下降时,与冷端间的温度梯度同样会下滑,冻结的速率减缓,呈现出初期斜率相对较大,随后不断减小,而温度差值先增后减。另外,在升温初期靠近底端的土层还有一个继续降温的延迟。试样在冻结时,会储存相应的冷量,进入到融化状态时,土柱内的少数冷锋与上层传来的热量彼此抵消,余温持续的向下方传播^[19],因此土壤中下层位置的温度会持续降低。

初始含水率越大,地下水位越高,温度到达最低点需要的时间越长。图 2 中试样的初始含水率是 15%,在该组试样中最先达到温度最低点。这是由于土中温度梯度越大,水分迁移速度越快,而含水率越高的土样在冻结过程中会释放较多的潜热,从而减缓

负温向下的传递速度^[20]。在降温幅度较大时,试样 7 在 14.5 h 首先出现温度最低点,而且表现出更长的降温冻结时间。这是由于降温幅度越大,土体内迅速产生较大的温度梯度,在含水率相同的情况下,使得试样温度首先到达最低点,更快达到冻结状态。

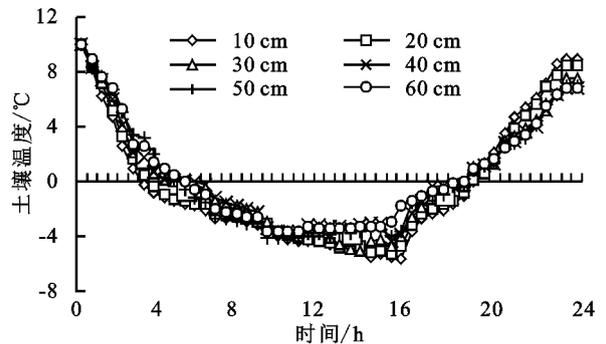


图 2 试样 2 温度随时间变化曲线

2.2 黑土冻融前后含水率变化分析

试验结果表明,土体剖面垂向水分迁移量与初始含水率、降温幅度、地下水补给之间呈现出显著的同向变动关系。在整个冻结期间,黑土相邻土层土壤水分含量变化显著相关,土壤水分垂向迁移较为明显,尤其在地下水补给试验组,相关性最为显著。相同地下水位与变温幅度、不同初始含水率的试验条件下(表 1),针对土壤样品含水率在垂直方向上的变化规律进行分析。温度设定见表 1,试样 1~4 冻融前后以及温度谷值时距顶板 10 cm 间隔处的含水率与土层深度的变化见图 3。

4 种试样的含水率分布曲线变化规律基本相同。上层的含水率明显变大,而下层的含水率持续减小。含水率最大值出现在地下 10 cm 处,表明水分的聚集现象。这是由于在冻结期随着温度降低,土壤开始从表层向下冻结,冻土层下界面对应的土壤水势相对较小,尚未冻结的土壤,水势相对比较大,造成土壤水分向上迁移^[21]。在土壤解冻过程中,环境温度不断提升,土壤从表面开始逐渐解冻,消融的土壤水分向下渗透,但下层未解冻部分,直接影响水分的向下迁移而产生滞水,导致通过渗透作用反迁至底层的未冻水量几乎可以忽略不计^[22]。另外,初始含水率较低时冻融前后水分迁移不明显。在相同条件下,初始含水率较大时,水分的迁移量也比较大,积累的水分越多。对于试样 1 来讲,地面以下 10 cm 处,含水率与初始含水率相比,新增 9.73%,而试样 4 新增 12.74%。因此初始含水率是水分迁移量的先决条件,随着冷端温度的降低,水分子作为温度传导的载体能够促进未冻水的迁移^[6]。

相同初始含水率与地下水位,不同变温幅度试验条件下,试样 5~7 冻结与融化前后含水率在土壤垂

直方向的变化规律见图 4。当初始含水率相同时,温度变化显著影响土壤样品中水分的迁移过程。温度变幅越大,所形成的水分积累越多;土壤冻结温度越低,向上迁移的量越大。主要原因是温度较低时,温度梯度相对较大,试样冻结温度变化更为显著,产生了较多的水分迁移量^[23]。相同含水率试样在不同降温幅度下从开始结冻到完全冻结历时不同,温变越大、

低温持续时间越长,水分的迁移量越大。冻结时 ΔT 为 5,10,15 °C 时,10 cm 土层含水率分别增加了 2.69%, 5.87%, 6.8%。因此,由温度差形成的温度梯度是土壤水分运移的主要因素^[15]。融化期土壤剖面水分运移以基质势的影响为主^[2],在融化层当中,水分不断地向上迁移蒸发,土壤水分迁移活跃,而冻土层下方的水分变化相对较少,属于相对稳定层^[22]。

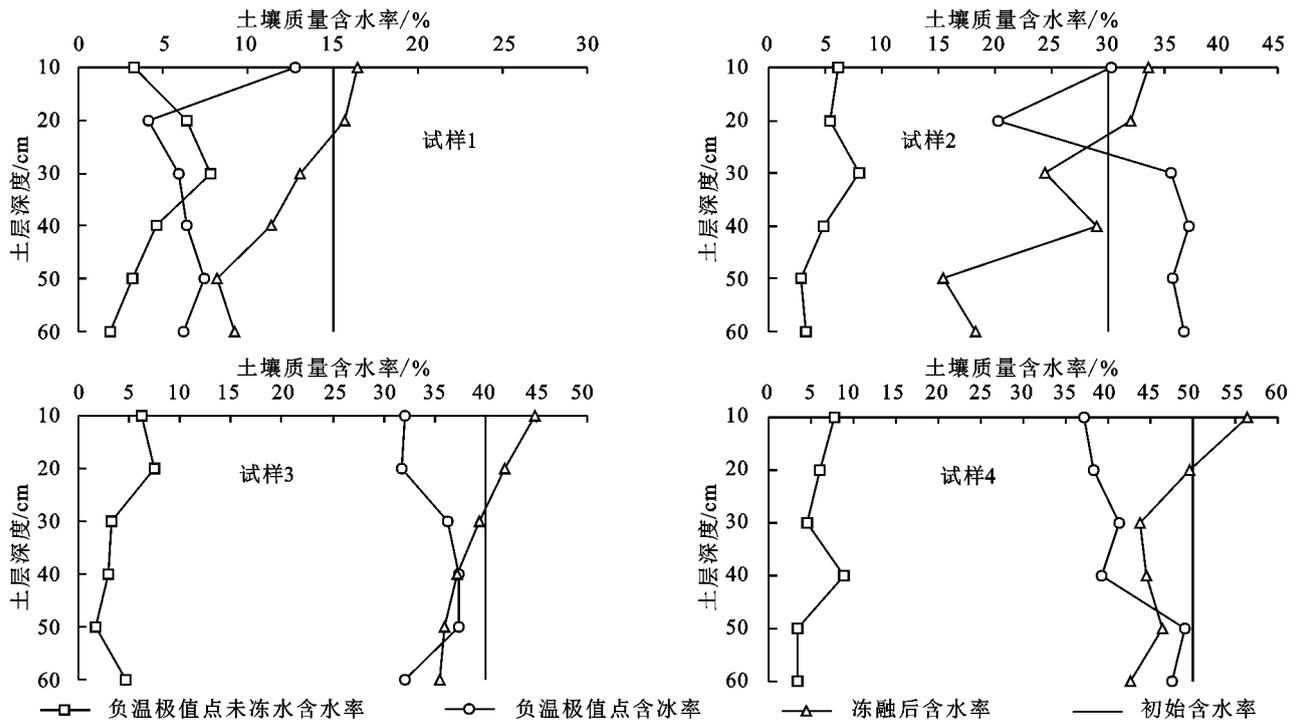


图 3 不同初始含水率土样剖面的垂向含水率变化

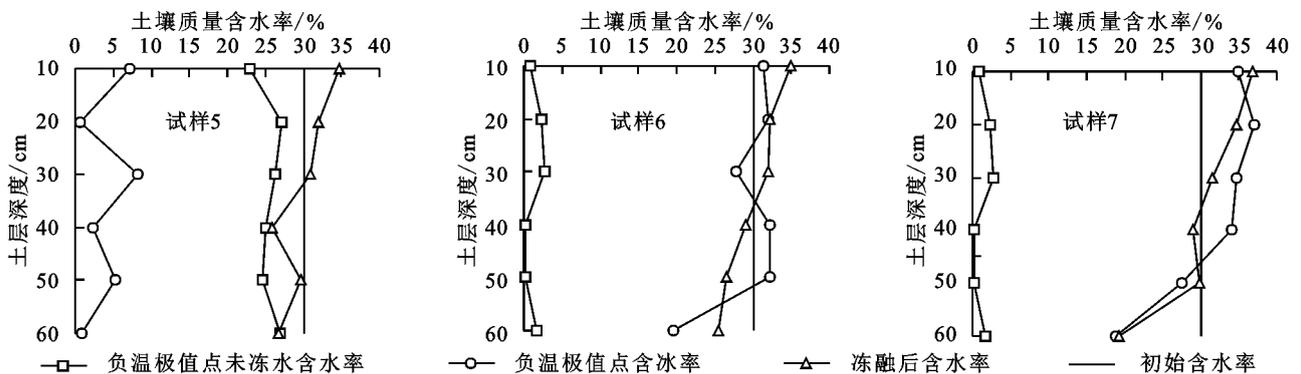


图 4 不同降温幅度土样剖面垂向含水率变化

相同初始含水率与降温幅度,不同地下水位试验条件下,试样 8~10 冻融前后含水率沿土样垂向的变化见图 5。无地下水补给的条件下,土壤冻结过程中表现出更加显著的降温速率和温度梯度。地下水补给的存在将减缓上述变化,从而延长土壤冻结过程的持续时间。这一现象的原因主要在于,地下水位通过温度梯度及水势梯度作用对土壤水分总量与迁移过程产生影响^[20]。地下水补给使土壤含水率上升,导致更多的水分相变释放更多的热量^[2],从而使土壤局部温度上升,最终减缓了冻结进程^[15]。无地下水补

给时距表层 10 cm 土层含水率增加 11.83%,而 0.9 m 地下水补给土样的含水率增幅达到 45.6%。地下水埋深越高,潜水接受冻层融水补给越多,补给速度越快。当埋深下降时,补给路径会延长,冻土层内融化水的补给量明显降低,且表现出滞后性^[20]。0.9 m 地下水位补给土样的 10—60 cm 土层含水率均表现出含水率增加的情况。表层冻结使得水分在土水势梯度作用下向冻结锋处聚集,地下水位对土壤冻结过程的影响主要表现为较高的地下水位改变了土壤剖面的水热状态,进而阻碍了土壤冻结锋向下移动^[24]。

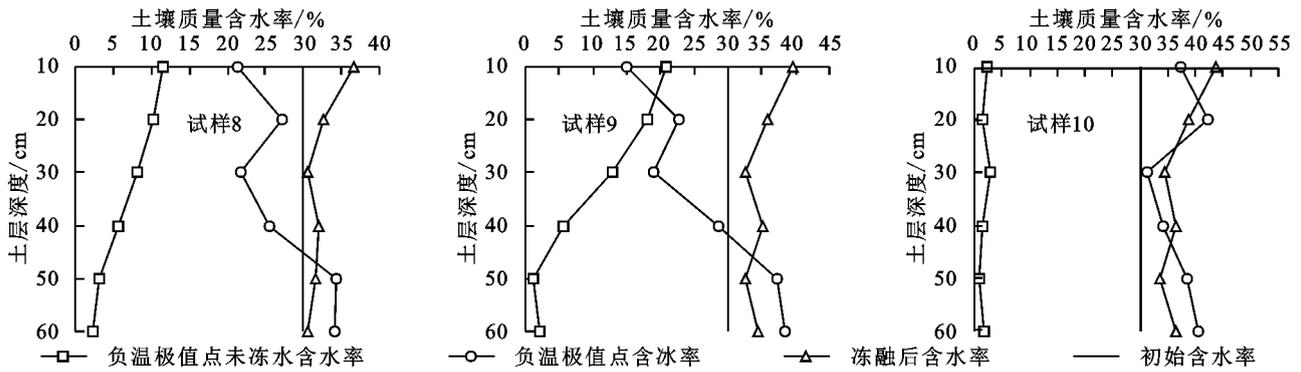


图 5 不同地下水补给土样剖面垂向含水率变化

3 结论

(1)不同含水率土样在不同深度的温度变化趋势基本相同。可将其划分为温度迅速下降、缓慢降低、稳定和上升 4 个阶段。含水率较低时,土壤水分冻结速度较快。单个土样不同深度的初始冻结温度存在差异,距离表层越近冻结温度越低。

(2)冻结过程使土壤水分在垂直方向上由下层向表层迁移。冻土层上部含水率变大而下部含水率下降,且在地表 10 cm 处出现水分聚集现象。水分聚集层与持续迁移的融化锋面并不重合。

(3)土壤含水率对土壤水的冻结温度影响较大。含水率越大,冻结温度越低,水分迁移量越大。土壤表层的含水率波动最为明显。15%的最低含水率试样融化后,表层含水率增加最多。

(4)降温幅度越大,水分迁移量越大。地下水补给可以增加各层土壤含水率,地下水位越高,增幅越明显。较高地下水补给可使土壤内部温度升高,延迟最低温度出现时间,从而改变土壤内温度梯度变化,减缓冻结锋面向下迁移速率。

参考文献:

[1] 宋存牛.冻融过程中土体水热力耦合作用理论和模型研究进展[J].冰川冻土,2010,32(5):982-988.

[2] 柴国辉.季节冻土区高速公路路基含水状况与冻害情况分析[J].建材与装饰,2018(39):265-266.

[3] 赵刚,陶夏新,刘兵.原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(12):1952-1957.

[4] Feng M, Li D Q. A model of migration potential for moisture migration during soil freezing [J].Cold Regions Science and Technology,2016,124(12):87-94.

[5] Rui D H, Zhai J B, Li G Y, et al. Field experimental study of the characteristics of heat and water transfer during frost heaving [J].Cold Regions Science and Technology,2019,168(12):e102892.

[6] 李东庆,周家作,张坤,等.季节性冻土的水-热-力建模与数值分析[J].中国公路学报,2012,25(1):1-7.

[7] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[8] 叶云雪,邹维列,韩仲,等.非饱和土孔隙比与基质吸力关系

的通用模型[J].岩土工程学报,2019,41(5):927-933.

[9] 张泽,王述红,杨天娇,等.寒区隧道围岩水热耦合数值分析[J].东北大学学报,2020,41(5):635-641.

[10] 史长莹,张宝磊,张晔楠.砂性冻土堤防冻融作用下水分迁移试验研究[J].地震工程学报,2019,41(3):688-693.

[11] Wang T H, Su L J. Experimental study on moisture migration in unsaturated loess under effect of temperature [J].Journal of Cold Regions Engineering,2010,24(3):77-86.

[12] 李慧,张旭贤,李志刚,等.地表覆盖对冻融期土壤水盐分布特征的影响[J].塔里木大学学报,2020,32(1):92-99.

[13] 张音,海米旦·贺力力,古力米热·哈那提,等.天山北坡积雪消融对不同冻融阶段土壤温湿度的影响[J].生态学报,2020,40(5):1602-1609.

[14] Wu D Y, Zhou X Y, Jiang X Y. Water and salt migration with phase change in saline soil during freezing and thawing processes [J].Groundwater,2017,56(5):742-752.

[15] 高玉佳,王清,陈慧娥,等.温度对季节性冻土水分迁移的影响研究[J].工程地质学报,2010,18(5):698-702.

[16] Ala M, Liu Y, Wang A Z, et al. Characteristics of soil freeze-thaw cycles and their effects on water enrichment in the rhizosphere [J].Geoderma,2016,264:132-139.

[17] 曾桂军,张明义,李振萍,等.饱和正冻土水分迁移及冻胀模型研究[J].岩土力学,2015,36(4):1085-1092.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].北京:中国标准出版社,2019:6-10.

[19] 许健,牛富俊,牛永红,等.冻结过程路基土体水分迁移特征分析[J].重庆大学学报,2013,36(4):150-158.

[20] 王永琦,苏小四,吕航,等.冻融作用对土壤水分迁移和地下水位波动影响的实验研究[J].北京师范大学学报,2020,56(2):204-209.

[21] 马琳,王清,原国红.长春地区季节冻土水热迁移的分析与模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2010,29(1):52-55.

[22] 马俊杰,李韧,刘宏超,等.青藏高原多年冻土区活动层水热特性研究进展[J].冰川冻土,2020,42(1):195-204.

[23] 王桂尧,李斌,付宏渊.非饱和路基土水分运移的室内试验研究[J].岩土力学,2010,31(1):61-65.

[24] 张少良,沈庆松,王曜,等.不同冻结强度下容重和含水量对黑土剖面水分变化特征影响[J].东北农业大学学报,2016,47(12):48-55.