

含盐冻土物理力学特性研究现状与展望

杨平, 刘健鹏[△], 张婷

(南京林业大学土木工程学院, 南京 210037)

摘要:我国西北内陆和东南沿海含盐土地地区的大规模基础设施建设,促进了含盐冻土物理力学研究的发展。从含盐冻土的强度特征、冻融变形特性、水盐迁移规律以及细观结构研究等4个方面,简要概述了国内外研究现状,总结了含盐冻土物理力学特性的研究进展。提出人工含盐冻土强度和变形特性研究中需增大试验负温范围,以获得氯化钠二次相变对冻土强度和冻融变形的影响规律;从冻融过程中未冻水含量、土水势、孔隙水压力和盐晶体相变等关键机制入手,研究含盐冻土的变形机理;指出现有测定水分、盐分、基质势和孔隙水压力等传感器不能满足室内试验对尺寸和精度的要求,采用微型化、精确化的传感器进行冻融过程中的水盐迁移参数监测,是建立合理的水-热-力-盐耦合模型的前提;提出可将未冻水含量作为微观尺度的孔径分布与宏观强度特性和水盐迁移模型联系的纽带,为建立微观与宏观的联系提供一种新思路。

关键词:含盐冻土;强度特性;冻融变形特性;水盐迁移;细观结构

中图分类号: TU448

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2096-1359(2019)06-0011-09



Physical and mechanical properties of frozen saline soil: research status and prospect

YANG Ping, LIU Jianpeng[△], ZHANG Ting

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The massive infrastructure construction in the northwest inland and southeast coastal saline soil areas of China promotes the development in physical and mechanical researches of frozen saline soils. This review summaries the research status at home and abroad from four aspects of frozen saline soils such as strength, freeze-thaw deformation, water-salt migration law, as well as the variation of soil mesostructure and microstructure. The research tendency is put forward as follows based on the review of references. The negative testing temperature range of experiments is required to expand, in order to investigate the effects of the secondary phase change on strength characteristics and freeze-thaw deformation mechanism of frozen saline soils. It is lack of the investigation on the influence of the secondary phase change of sodium chloride on soil physical and mechanical properties. In addition, this review points out that the deformation mechanism of frozen saline soils during the freezing and thawing can be studied on the following four parameters, including unfrozen water content, matric potential, pore water pressure, and the amount of salt crystallization and dissolution. However, the available sensors cannot meet the requirements of size and accuracy in laboratory tests to obtain the values of the mentioned parameters. For the reason that the size of sensors is usually large and the accuracy of them is not high enough. Therefore, the application of the miniaturized and high-accuracy sensors for monitoring the parameters during the freezing and thawing is a prerequisite for establishing a reasonable thermos-hydro-salt-mechanical coupled model. A novel idea is also proposed in this review that unfrozen water content can be taken as a connection to build the relationship between microscopic and macroscopic aspects. To be specific, unfrozen water content is related to the micro pore size distribution and is an important parameter of researches on strength characteristics and water-salt migration of frozen saline soils.

Keywords: frozen saline soils; strength characteristics; freeze-thaw deformation; water-salt migration; mesoscopic and microscopic structures

工程上,土中易溶盐含量 $\geq 0.3\%$ 质量分数时 需要考虑盐分的影响^[1]。我国季节性和多年含盐

收稿日期: 2019-02-09

修回日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51478226);江苏省高校优势学科建设工程资助(PAPD)。

作者简介: 杨平,男,教授,主要从事环境岩土与地下工程研究。刘健鹏为共同第一作者。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

冻土广泛分布于西北内陆地区,浅表土体随季节的变化经历冻结和融化,产生的冻胀、融沉、盐胀及融陷对该地区的工程建设产生了不良影响^[2],如不均匀沉降引起房屋、道路基础破坏,制约当地经济发展。一批学者针对此问题开展了大量研究,在含盐冻土物理力学特性方面获得了丰富的研究成果。

对于人工含盐冻土的研究较少,如挪威奥斯陆海湾公路隧道开挖过程中遇到松散软弱带,采用冻结法进行加固,由于地下水含盐量丰富,冻结壁平均温度达到 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 才能满足强度要求^[3]。在我国沿海地区采用人工冻结法开展隧道施工时,也发现了盐分对冻土帷幕厚度和冻结温度有不利影响^[4-5]。人工冻结法形成的含盐冻土与天然含盐冻土相比,主要位于近海和海底,其含盐成分以氯盐为主,含水率高,人工冻结法盐水温度($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)低于寒区环境温度($-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$),若采用液氮冻结,冻结壁的温度将更低。人工含盐冻土以氯盐为主要研究对象,应考虑更低冷端温度下($\leq -20\text{ }^{\circ}\text{C}$)含盐冻土的物理力学特性,以及氯盐晶体的结晶与溶解对变形特性的影响,其中涉及氯化钠二次相变的关键科学问题。

笔者从含盐冻土的强度参数、冻融变形特性、水盐迁移规律以及细观结构演化规律4个方面,总结和分析了国内外含盐冻土力学特性的研究现状,并提出了进一步的研究方向,以期丰富含盐冻土物理力学特性的研究内容。

1 含盐冻土强度特性研究

早期冻土强度研究的主要目的是为了分析寒区工程中冻土地基承载能力的大小。Brouckov^[6]发现含氯离子的沉积物的承载能力比含硫酸根离子的更低。单轴压缩试验和三轴剪切试验是研究冻土强度问题最常用的室内试验方法。含盐土冻结后,硫酸盐冻土的抗压强度随含盐量增加后迅速降低的现象^[7],而氯盐冻土的抗压强度随含盐量的增加而减小^[8-9]。因此,含盐冻土中的含盐种类和含盐量是强度特性研究的两个重要因素。含盐冻土强度还受温度、初始含水率、加载应变速率、冻融循环次数等因素的综合影响,将这些参数完全统一到一个模型来描述含盐冻土强度特性仍有待研究,单因素或少量因素的耦合是当前研究的热点。

1.1 盐分对含盐冻土强度特性的影响

为了研究不同因素对含盐冻土强度的影响,实验室内通常先将原状土洗盐然后重塑,洗盐后土中黏性颗粒增加,使得原状土与重塑土在形成条件及

结构上有着明显差异^[10]。对比洗盐前后含盐土的力学特性,发现洗盐后土的黏聚力和内摩擦角总是高于天然土壤^[11]。在相同围压下,硫酸盐冻土的黏聚力随含盐量增加而先增大后减小^[12]。此现象和孔隙盐溶液的饱和度有关,低温下硫酸钠溶液易达到过饱和状态而结晶析出,析出的芒硝晶体先在土中起到骨架作用,增大了土体抵抗变形的能力,随着盐晶体的继续增加使孔隙饱和,而达到过饱和后盐晶体破坏孔隙结构使土的强度减小。在高硫酸钠含量的土中,水结冰后对土体强度的贡献很小,在冻结过程中土-水界面饱和度的增加和张力的减小会导致基质吸力减弱,研究发现每增加3%的含水率会使黏聚力减小60%~90%^[13]。

正温下氯盐土中随着水分蒸发孔隙溶液达到饱和时会析出盐晶体,这部分盐晶体增大了土颗粒间的胶结性,使抗压强度和体积弹性模量增大,蠕变减小^[14]。负温下土中氯盐形成结晶需要很低($\leq -22\text{ }^{\circ}\text{C}$)的温度,其抗压强度与含盐量成反比。而抗剪强度存在临界值,即同一含水率条件或荷载条件下,抗剪强度随氯化钠含量的增大表现为先减小后增加^[15-16],破坏应变与围压大小成正比^[17]。

1.2 温度、冻融循环等因素对含盐冻土强度特性的影响

含盐土的抗压强度和抗剪强度均随温度降低而增大^[18-21]。Hivon等^[22]给出了温度和冻土强度的经验关系:

$$\sigma = A \left(\frac{T}{T_1} \right)^{B_s} \quad (1)$$

其中: σ 为冻土无侧限抗压强度; A 和 B_s 是与含盐量有关的系数; T 为冻土温度($^{\circ}\text{C}$); T_1 取 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

Sinityn等^[23]发现含盐冻土的抗剪强度随加载应变速率的增大而增大。在季节性冻土区,含盐土随着四季的更替经历着冻融循环,抗压强度^[24-25]和抗剪强度^[26-28]均随冻融循环次数的增加而减小,减小的趋势逐渐变缓直至趋于稳定,硫酸盐土比氯盐土降低幅度更大,且含盐量越高的土达到稳定所需的冻融循环次数越多。Liao等^[29]基于非线性强度理论建立了考虑含盐量的非线性Mohr-Coulomb方程,提出了子午线平面上的临界强度函数。

含盐冻土的强度特性试验参数的选取与工程实践密切相关。以我国季节性和多年含盐冻土为背景的研究,试验选取的冻融循环温度区间内($-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$),硫酸盐土既发生水的结冰作用,又发生硫酸盐随温度改变而发生结晶析出和溶解,导

致土体结构性减弱,密实度减小,宏观表现为强度随冻融次数增加而减小;而在此温度区间内,氯盐土只发生水冰相变,水结冰时的“自净”作用,使得土孔隙中的氯化钠溶液浓度增加并对结冰起抑制作用,因此对土体结构性的破坏较小。

在我国沿海地区进行近海和海底工程施工时,常采用人工冻结法加固。当遇到突发涌水事故时,有时采用液氮冻结抢险,因其能快速形成冻结帷幕、达到止水效果,是富含水地层的一种主要抢险方式。沿海地区海水浸渍使土壤中含盐,成分以氯盐为主,人工盐水冻结和液氮冻结的温度会达到氯盐土发生二次相变的温度($\leq -22\text{ }^{\circ}\text{C}$)。因此氯盐晶体析出和溶解对冻土强度的影响规律有待进一步研究。

2 含盐冻土冻融变形机制研究

含盐土在冻结及融化过程中会产生冷缩、冻胀、盐胀、固结压缩、热胀和融沉等变形,这些现象涉及冻融过程中土水势变化、孔隙水压力变化、冰水相变及盐分结晶和溶解等关键机制。

2.1 冰水相变

土质(包括土的粒度成分、矿物成分、分散度、含水量、密度、水溶液的成分和浓度)、外界条件(包括温度和压力)以及冻融历史是决定冻土中未冻水含量的三大因素^[30]。冻土中未冻水含量与温度的关系模式是未冻水众多影响因素中的基本模式,其关系曲线即冻结特征曲线。初始含水率、含盐量和荷载等因素对未冻水含量的影响均可归结为冰点降低且具叠加性^[31]。

Watanabe^[32]向土样和玻璃粉中添加盐溶液后进行冻结试验,发现未冻水含量与含盐量和孔径分布有关。Arenson等^[33]使用荧光剂对不同含盐量和温度梯度下粗颗粒试样中的未冻水迁移情况进行了追踪,发现粗颗粒土中未冻水主要存在于孔隙中间,而非形成细颗粒土中的未冻水膜。Ma等^[34]采用核磁共振获得了不同氯化钠含量下土的冻结特征曲线,基于表面化学理论建立了吸附力与未冻水膜厚度的关系式。低场核磁共振的出现,为冻土未冻水含量研究提供了一种精确的方法。专家学者开展了较多相关试验,研究了土质、含量种类、含盐量、孔隙对冻融过程中未冻水含量及其“滞后”性的影响^[35-37]。土质对未冻水含量的影响主要表现在比表面积越大的矿物颗粒,在相同负温下的吸附作用越强,孔隙水冰点越低,未冻水含量越高。对于氯盐冻土,含盐量越高时未冻水含量越高;而

对于硫酸盐冻土,盐分对未冻水含量的影响存在峰值点,含盐量为2%时未冻水含量最大。冻土中盐溶液与纯盐溶液的冻融特征曲线有差异,这是由于不同大小孔隙的持水性不同,研究发现大孔隙中的水先冻结、小孔隙中的水先融化;且冻融过程中孔径分布的变化,引起了未冻水含量的“滞后”现象,即相同温度下融化时的未冻水含量低于冻结时的未冻水含量。

此外,时域反射法(TDR)和频域反射法(FDR)也被应用于土体冻融特征曲线的研究,其传感器价格较低,但试验精度低于核磁共振。Wu等^[38]使用TDR研究了盐溶液种类、浓度、初始含水率对冻结特征曲线的影响,建立了不同水、盐条件下的冻结特征曲线预测模型。Kruse等^[39]发现细粒土黏粒组分表面的吸附阳离子,强烈地控制着未冻水的含量和流动性,其中含钠离子土样在相同负温下未冻水含量最大。

2.2 盐胀和溶陷

晶体生长是多孔建筑材料破坏的主要原因之一。当温度低于冻结温度时,冰晶的产生使得未冻水含量减小,导致剩余孔隙溶液的浓度升高,当温度继续降低到冰盐共晶点温度以下时,孔隙溶液达到饱和状态而析出盐晶体。含盐土冻结过程中盐分结晶导致盐胀使孔隙结构疏松,融化过程中盐分溶解并在自重应力作用下导致沉降。室内试验研究发现,开放系统下硫酸盐土冻结过程中的变形由冻胀和盐胀两部分引起,冻结区的变形以冻胀为主,未冻结区的变形以盐胀为主^[40];融化过程中的沉降变形主要是由于自重应力引起,沉降量大于盐胀量,在多次冻融循环中表现为溶陷累加^[41]。在相同外界温度条件下,含硫酸钠盐土溶液中的盐分较硫酸钠自由溶液更容易达到饱和状态而析出^[42]。因此,首先确定含硫酸钠盐土中盐溶液是否已经饱和,对于研究硫酸钠盐含量对强度和变形特性的影响十分重要。

在某含盐土地地区地下7.5 m处进行现场盐胀试验时发现,含盐量是影响盐胀变形的主要因素,土体的自重应力并不能抑制盐胀^[43]。Zhang等^[12]使用原状含盐土进行 $-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结试验,观察到硫酸盐土有明显的冻-盐胀,而氯盐土在冻结过程中没有明显的体积变化。Li等^[44]提出使用摄影测量技术来精确测量土的体积变化。在正温条件下,多孔介质中盐分结晶可通过标准结晶试验来研究^[45-47],结果表明不同状态下的化学势能差是引发结晶相变的驱动力。基于此研究,Espinosa等建

立了描述5种相变(水合、脱水、潮解、结晶和溶化)的动力学方程。冻土中盐分的结晶行为难以观测,已有研究结合纯盐溶液来研究盐分的结晶机理^[48],也有采用理论分析或数值模拟的方法。赖远明等^[49]基于晶化动力学理论,分析了冰-水相变和孔隙盐溶液-盐晶体相变,建立了宏观结晶应力与土体变形的关系。肖泽岸等^[50]对0,1%,2%,3%和4%硫酸钠含量的粉质黏土进行了冻融循环试验,发现含盐量小于2%时有明显的冻胀融沉现象,含盐量大于2%时冻胀现象明显而融沉现象趋于消失;3%硫酸钠含量的盐结晶变形占土体总变形的34.01%。Wan等^[51]研究冻结过程试样中硫酸钠结晶的位置,分析了盐结晶与冰水相变的相互作用,并基于结晶理论给出了盐胀力和冻胀力的计算公式。

土体宏观冻融变形是各因素耦合作用的结果,涉及上述多种关键机制,研究多因素(如含盐种类、含盐量、温度、初始含水率等)对冻融过程中未冻水含量、土水势、孔隙水压力等机制的影响,可从本质上揭示冻融变形特性。在人工含盐冻土研究中,当冷端温度低于氯化钠二次相变温度时,会形成低共熔混合物 $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$,氯盐晶体的结晶和溶解对变形特性的影响有待进一步研究。

3 含盐冻土水盐迁移机理研究

冻土中的未冻水在温度梯度或压力梯度等驱动下会发生运移,水分迁移到冻结缘处形成冰,盐分随着水分一起发生迁移,当土中孔隙溶液由于冰结晶达到饱和状态时结晶析出;融化过程中,冰融化成水并在自重作用下发生迁移,同时溶解可溶盐晶体。水盐迁移改变了土的结构,是引起土体冻融前后物理力学特性变化的根本原因。

3.1 水盐迁移试验研究

徐敦祖^[52]对不含盐土进行冻结试验并在土样下端补给盐溶液,研究发现冻土和盐溶液之间形成的水势梯度,使得盐溶液向冻土中迁移,水、盐迁移通量及土体变形量随时间按指数规律衰减,并随外荷载增大和温度降低而减小。高江平等^[53]对含氯化钠的硫酸盐土进行单向冻结试验,也发现了水分和盐分向冷端迁移这一现象。肖泽岸等^[54]通过单向冻结试验研究了冻结过程中的水盐运移过程及土体变形,并建立了氯化钠盐土冻结过程中水盐迁移及变形的计算模型,该模型可反映含盐土体在冻结过程中的温度、水分、盐分及变形的规律。罗金明等^[55]通过野外观测发现,在冻结期一定深度内

的水分和盐分向表面冻层聚集,与实验室内观测到的水盐迁移现象较为吻合。

上述水盐迁移试验主要获得冻融前后水盐分布情况。即分层取样,使用烘干法获得含水率,使用土壤浸出液测得含盐量的方法,但无法获得冻融过程中的水分和盐分的迁移规律。要对冻融过程中水盐迁移的动态过程进行监测,就必须采用合适的传感器,通过将测量的土体介电常数反演出体积含水率,将电导率反演出含盐量。TDR传感器可测量冻土的介电常数,而FDR传感器可同时测量介电常数和电导率。

最早关于冻土介电常数的研究多基于TDR传感器展开。Topp等^[56]基于TDR传感器,使用三次多项式拟合介电常数与含水率的关系。Van Loon等^[57]提出用TDR测得的介电常数来计算电导率,并给出了理论计算模型,Stahli等^[58]在此理论模型的基础上进行室内试验,使用TDR传感器测量了温度梯度条件下的盐分迁移。使用TDR在盐渍土中测量介电常数时,可在探针表面涂抹环氧树脂以消除盐分对介电常数测量引起的误差^[59]。TDR传感器测量信号受温度影响大,测量冻土介电常数时必须考虑温度的影响。FDR传感器通过将电容转化为介电常数和电导率,电容受温度影响可忽略不计^[60],因此使用FDR对含盐冻土冻融过程中的水分和盐分迁移进行动态监测,比使用TDR传感器更有优势。

3.2 水-热-力-盐模型理论研究

早期的水热盐模型是在水盐模型的基础上,加入盐分运移方程得到的。岳汉森^[61]在Harlan模型的基础上,考虑冻融过程中土壤中盐分的对流和扩散作用,建立了水-热-盐耦合运移数学模型。Cary^[62]给出了非饱和土中的水-热-盐数值模型,验证了溶液中溶质浓度的增加会减少流向冰透镜体的水流,因此会减小冻胀的理论。Bear等^[63]研究了温度梯度对土壤水分性质,如表面张力、黏度、密度以及相的平衡组成的影响,建立了考虑温度梯度的盐分迁移模型。黄兴法等^[64]结合二维有限元数值解、一维模拟程序的编制和计算预测,建立了冻结、未冻结、饱和、非饱和土壤的水-热-盐耦合运移通用模型。李瑞平等^[65-66]基于人工神经网络和SHAW模型对冻融土水盐耦合运移进行了预测,该研究为冻融条件下土壤水盐迁移研究开辟了新的途径。Zhang等^[67]进行冻结过程中的水-盐迁移试验,基于达西定律、能量守恒定律和质量守恒定律,并结合数值模拟,建立了饱和盐渍土的水-热-盐运

移方程。针对硫酸盐渍土冻结过程中较为欠缺的水-盐-热-力四场耦合理论,冯瑞玲等^[68]利用等效含水量和等效含盐量两个耦合因子来完善已有水-热-盐模型,在建立应力场方程时分别考虑了盐胀和冻胀的影响。Wu等^[69]研究了饱和盐渍冻土中的相变驱动力,给出了水-热-力-盐耦合模型,此模型对所有盐分种类均有较好的适用性。

文献提出的多场耦合模型均基于理论结合数值模拟的方法,其中难免提出部分与实际不符的假设,通过试验获得冻融过程中关键参数准确的变化规律,是建立符合实际的水-热-力-盐模型的前提。土壤冻融特征曲线是反映冻土强度和土壤冻融过程中的水分和盐分迁移规律的重要参数^[70],目前可使用核磁共振(NMR)、时域反射法(TDR)和频域反射法(FDR)等方法进行冻融过程中未冻水含量的动态测量,但是核磁共振试验试样尺寸较小,且难以实现温度梯度和补水条件下的研究。TDR和FDR传感器测量范围较大,对室内试验来说无法实现精确测量。其他参数的测量亦存在相似的问题。因此将传感器微型化、精确化,对冻融过程中的重要参数进行动态监测,是未来研究的重点与热点。

4 含盐冻土细微观结构演化规律研究

王春雷等^[71]使用扫描电镜及X射线能谱对含盐土的微观结构进行了分析,探讨了易溶盐晶体析出对强度的影响机理。刘军勇等^[72-73]对原状氯盐土(含盐量达20%~90%)进行力学强度试验和扫描电镜分析,发现含盐量为45.74%时无侧限抗压强度最大;通过扫描电镜观察到当含盐量小于10%时土颗粒以点式接触为主,当含盐量在10%~40%之间时土颗粒以堆叠接触为主,当含盐量在40%~50%之间时土颗粒间被盐晶体胶结。You等^[74]对不同硫酸钠含量粉质黏土进行三轴试验,发现1.5%硫酸钠含量下试样具有最大强度,并采用压汞法和扫描电镜分析,研究了盐晶体的溶解和结晶规律。李炎^[75]采用扫描电镜对冻融循环后含盐土的内部微观结构进行观察,发现土中硫酸盐含量较多时盐结晶的形状变化各异,且体积较大,形成的盐结晶易将土颗粒包裹,土体颗粒之间被结晶盐填充;土中盐分以氯盐为主时,土体盐结晶形状相对硫酸盐较为规则,多数附在土体颗粒表面。

扫描电子显微镜、压汞、计算机断层扫描等技术已被广泛用于冻融对土体细微观结构的影响机理研究中,但是这些细微观尺度的研究成果较难和

宏观尺度的物理力学特性建立联系。低场核磁共振技术作为一种较少被使用的孔隙结构测试方法,拥有无损检测的优点,可用于土体冻融过程中孔径分布的定量研究。目前已有学者提出将微观层面的孔径分布与未冻水含量建立联系^[76],可为构建细微观结构与宏观物理力学特性之间的关联,提供新的研究思路。

5 展 望

综上所述,目前含盐冻土的研究对象主要为多年和季节性冻土区的天然含盐土,其强度特性、变形特性、水盐迁移规律、细微观结构演化规律等研究已较为丰富。对于人工冻结形成的海相含盐冻土,其物理力学特性可以借鉴天然含盐冻土的已有研究成果,但仍需要补充部分研究。综合国内外研究现状,建议可从以下方面进一步深入开展含盐冻土物理力学特性研究:

1)开展含盐冻土强度和冻胀融沉试验需增大负温范围,研究氯盐土发生二次相变前后盐分结晶和溶解对强度特性以及变形特性的影响,为近海和海底含盐土层人工冻结法施工提供设计依据。

2)含盐冻土冻融变形特性主要集中于宏观尺度,缺少对土体冻融过程中土水势、孔隙水压力、未冻水含量、含盐量等关键机制的研究。冻融过程中的水盐迁移可用FDR传感器进行动态监测。冻土中的未冻水含量^[77]和水分迁移^[78]受土-水体系能量状态的影响,基质势和渗透势是含盐冻土水势的两个重要组成部分。当前的技术手段难以测量冻土渗透势,已有对冻土中水势的研究大多基于Clapeyron方程。有学者采用pF Meter传感器^[79-81]测量对冻土中的基质势进行了测量;MPS系列传感器^[82-83]已被用于野外土壤基质势的测量,将其应用于冻土基质势研究的可行性有待进一步验证。

在我国多年和季节性的高温冻土区,土中具有较高的未冻水含量,因此把孔隙水压力形成和消散作为冻融变形机理研究的重要方面^[84]。当土中含有氯化钠溶液时,在相同负温下,未冻水含量明显高于不含盐土,且溶液浓度越高未冻水含量越高。对于沿海地区氯化钠盐含量较高的人工冻土,孔隙水压力也可作为变形研究的一个重要参数。研制适用于冻土孔隙水压力测量的传感器是当前难点。已有在传统压力传感器前端加陶土头,将酒精作为压力传导介质的孔隙水压力传感器^[85],虽然酒精在负温下不会冻结,但在试验过程中存在挥发使传感腔体内不能维持饱和状态而引起测量误差的问

题。且现有传感器的尺寸相对于冻结缘厚度而言较大,测量结果不能用于评价冻结缘的特性。

提出使用微型化、精确化的传感器,对冻融过程中基质势、孔隙水压力、水分和盐分迁移的动态观测,获得冻融过程中的水盐运移参数,构建合理的水-热-力-盐模型,是今后研究的方向。

3)提出一种建立细微观结构参数与宏观物理学特性联系的思路。根据已有理论,微观尺度的孔径分布与未冻水含量存在关联,而未冻水含量作为水-热-力-盐模型中的重要参数,可将冻融引起的微观孔径分布变化与宏观水盐迁移建立联系。采用低温核磁共振测试系统,可同时获得某一负温下的未冻水含量和孔径分布曲线,该曲线为假定孔隙模型为球状或管状的前提下,根据算法反演得到未冻水所占孔隙的孔径分布,选择合适的孔隙模型和构建合理的孔径分布函数是研究的重点及难点。

参考文献(References):

- [1] 徐攸在.盐渍土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
XU Y Z. Saline soil foundation [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1993.
- [2] 张英,邵慧.含盐冻土物理力学性质研究现状与进展[J].冰川冻土,2013,35(6):1527-1535. DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0169.
ZHANG Y, BING H. Study of the physical and mechanical properties of saline frozen soil; research status and progress [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1527-1535.
- [3] WALLIA S. Freezing under the sea rescues Oslo-fjord highway tunnel[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1999, 8: 19-26.
- [4] 张军,李慕涵,胡向东.含盐地层冻土帷幕安全状态判断方法的工程应用[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):189-192. DOI:10.3969/j.issn.1673-0836. 2010.01.035.
ZHANG J, LI M H, HU X D. Safety state assessment method of artificially frozen soil curtain in saline strata and its application [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 189-192.
- [5] 胡俊,卫宏,刘勇,等.水下人工冻结板温度场发展规律研究[J].森林工程,2016,32(6):93-98. DOI:10.16270/j.cnki.slgc.2016.06.019.
HU J, WEI H, LIU Y, et al. Study on the development of temperature field of an underwater artificial freezing plate[J]. Forest Engineering, 2016, 32(6): 93-98.
- [6] BROUCHKOV A. Frozen saline soils of the Arctic coast: their distribution and engineering properties [C]//8th International Conference on Permafrost. Zurich: University of Zurich, 2003: 95-100.
- [7] 蔡正银,吴志强,黄英豪,等.含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(9):1580-1586. DOI:10.11779/CJGE201409002.
CAI Z Y, WU Z Q, HUANG Y H, et al. Influence of water and salt contents on strength of frozen soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1580-1586.
- [8] 孙立强,路江鑫,李恒,等.含水率和含盐量对人工冻土强度特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(S2):27-31. DOI:10.11779/CJGE2015S2006.
SUN L Q, LU J X, LI H, et al. Influence of water and salt contents on strength of artificially frozen soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 27-31.
- [9] 陈锦,李东庆,邵慧,等.含盐量对冻结粉土单轴抗压强度影响的试验研究[J].工程力学,2013,30(12):18-23. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750. 2012.06.0412.
CHEN J, LI D Q, BING H, et al. The experimental study on the uniaxial compressive strength of frozen silt with different salt content [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 18-23.
- [10] 邵慧,武俊杰,邓津.黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J].冰川冻土,2011,33(4):796-800. DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2011.04856.
BING H, WU J J, DENG J. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 796-800.
- [11] XU X T, WANG Y B, BAI R Q, et al. Comparative studies on mechanical behavior of frozen natural saline silty sand and frozen desalted silty sand [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 132: 81-88. DOI:10.1016/j.coldregions.2016.09.015.
- [12] HU K, CHEN X Q, CHEN J G. Laboratory investigation of deformation and strength characteristics of saline frozen silty sand [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2017, 54(2): 102-109. DOI:10.1007/s11204-017-9441-9.
- [13] ZHANG Y, YANG Z H, LIU J K, et al. Impact of cooling on shear strength of high salinity soils [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 141: 122-130. DOI:10.1016/j.coldregions.2017.06.005.
- [14] ZHENG H, FENG X T, JIANG Q. The influence of NaCl crystallization on the long-term mechanical behavior of sandstone [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 48(1): 33-51. DOI:10.1007/s00603-013-0536-y.
- [15] 洪安宇,杨晓松,党进谦,等.非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J].长江科学院院报,2013,30(4):52-55. DOI:10.3969/j.issn.1001-5485. 2013.04.012.
HONG A Y, YANG X S, DANG J Q, et al. Shear strength property of unsaturated chlorine saline soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 52-55.
- [16] 席人双.含盐量对盐渍土力学特性的影响[J].铁道建筑,2016(10):86-88. DOI:10.3969/j.issn. 1003-1995.2016.10.23.
XI R S. Effect of salt content on mechanical properties of saline soils [J]. Railway Engineering, 2016(10): 86-88.
- [17] XU J, LIU H, ZHAO X K. Study on the strength and deformation property of frozen silty sand with NaCl under tri-axial compression condition [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 137: 7-16. DOI:10.1016/j.coldregions.2017.01.008.
- [18] 牛江宇,靳鹏伟,李栋伟,等.冻结盐渍砂土单轴强度特性研究[J].冰川冻土,2015,37(2):428-433. DOI:10.7522/j.issn.1000-240.2015.0048.
- [19] NIU J Y, JIN P W, LI D W, et al. Study of the uniaxial compressive strength of frozen saline sandy soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 428-433.
- [19] 王春雷,谢强,姜崇喜,等.青藏铁路冻区盐渍土热特性及力学性能分析[J].岩土力学,2009,30(3):836-839. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2009. 03.047.

- WANG C L, XIE Q, JIANG C X, et al. Analysis of thermal characteristics and mechanical properties of salty soil in frozen area of Qinghai-Tibet Railway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (3): 836-839.
- [20] 陈肖柏,邱国庆,王雅卿,等. 重盐土在温度变化时的物理化学性质和力学性质[J]. *中国科学(A辑)*, 1988(4): 95-104.
- CHEN X B, QIU G Q, WANG Y Q, et al. Physicochemical properties and mechanical characters of heavy saline soil under the temperature change [J]. *Scientia Sinica (A)*, 1988(4): 95-104.
- [21] 杨成松,何平,程国栋,等. 含盐冻结粉质黏土应力-应变关系及强度特性研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(12): 3282-3286. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2008.12.019
- YANG C S, HE P, CHENG G D, et al. Study of stress-strain relationships and strength characteristics of saturated saline frozen silty clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3282-3286.
- [22] HIVON E G, SEGO D C. Strength of frozen saline soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(2): 336-354. DOI: 10.1139/t95-034.
- [23] SINITSYN A O, LOSET S. Strength of frozen saline silt under tri-axial compression with high strain rate [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2011, 48(5): 196-202. DOI: 10.1007/s11204-011-9148-2.
- [24] 邴慧,何平. 冻融循环对含盐土物理力学性质影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(12): 1958-1962. DOI: ir.casnw.net/handle/362004/49032.
- BING H, HE P. Influence of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of salty soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1958-1962.
- [25] BING H, HE P. Experimental investigations on the influence of cyclical freezing and thawing on physical and mechanical properties of saline soil [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(2): 431-436. DOI: 10.1007/s12665-010-0858-y.
- [26] 陈伟韬,王鹰,王明年,等. 冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(11): 2343-2347. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2007.11.018.
- CHEN W T, WANG Y, WANG M N, et al. Testing study on influence of freezing and thawing circulation on saline soil's cohesion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(11): 2343-2347.
- [27] 王海涛,张远芳,成峰,等. 冻融循环作用下盐渍土抗剪强度变化规律研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(5): 1271-1276.
- WANG H T, ZHANG Y F, CHENG F, et al. Study on the shear strength change laws of the saline soil subjected to freeze-thaw cycle [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(5): 1271-1276.
- [28] 常丹,刘建坤,李旭,等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1496-1502. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2014.07.023.
- CHANG D, LIU J K, LI X, et al. Experiment study of effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of Qinghai-Tibet silty sand [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1496-1502.
- [29] LIAO M K, LAI Y M, WANG C. A strength criterion for frozen sodium sulfate saline soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(7): 1176-1185. DOI: 10.1139/cgj-2015-0569.
- [30] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- XU X Z, WANG J C, ZHANG L X. *Frozen soil physics* [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [31] 马巍,王大雁. 中国冻土力学研究 50 年回顾与展望[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 625-640. DOI: ir.casnw.net/handle/362004/20741.
- MA W, WANG D Y. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 625-640.
- [32] WATANABE K. Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 34(2): 103-110. DOI: 10.1016/S0165-232X(01)00063-5.
- [33] ARENSON L U, SEGO D C. The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(3): 325-337. DOI: 10.1139/t06-006.
- [34] MA T T, WEI C F, XIA X L, et al. Soil freezing and soil water retention characteristics: connection and solute effects [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(1): 1-8. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000851.
- [35] 谭龙,韦昌富,田慧会,等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1566-1572. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.06.006.
- TAN L, WEI C F, TIAN H H, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1566-1572.
- [36] 马敏,邴慧,李国玉. 硫酸钠盐渍土未冻水含量的实验研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(4): 963-969. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0110.
- MA M, BING H, LI G Y. Experimental research on unfrozen water content of sodium sulphate saline soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(4): 963-969.
- [37] WANG C, LAI Y M, YU F, et al. Estimating the freezing-thawing hysteresis of chloride saline soils based on the phase transition theory [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 135: 22-33. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.039.
- [38] WU M S, TAN X, HUANG J S, et al. Solute and water effects on soil freezing characteristics based on laboratory experiments [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 115: 22-29. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.03.007.
- [39] KRUSE A M, DARROW M M. Adsorbed cation effects on unfrozen water in fine-grained frozen soil measured using pulsed nuclear magnetic resonance [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 142: 42-54. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.07.006.
- [40] 邴慧,何平,杨成松,等. 开放系统下硫酸钠盐对土体冻胀的影响[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 126-130. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2006.01.018.
- BING H, HE P, YANG C S. Influence of sodium sulfate on soil frost heaving in an open system [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 126-130.
- [41] 包卫星,李志农. 喀什地区不同盐渍土冻融变形特性试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2008, 28(2): 26-30. DOI: 10.3321/j.issn:1671-8879.2008.02.007.
- BAO W X, LI Z N. Testing on transmutation properties of saline soil under freezing and thawing cycles in Kashi, Xinjiang [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2008, 28(2): 26-30.

- [42] 万旭升, 赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2090-2096.
- WAN X H, LAI Y M. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate solution and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2090-2096.
- [43] YANG P, LIU Y F, MI H Z, et al. Study on deformation property of coarse particles (sulfate) saline soil with field test[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 580-583: 329-333. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.329.
- [44] LI L, ZHANG X. A New approach to measure soil shrinkage curve[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, 42(1): 1-18. DOI: 10.1520/GTJ20 150 237.
- [45] ESPINOSA R M, FRANKE L, DECKELMANN G. Model for the mechanical stress due to the salt crystallization in porous materials[J]. Construction & Building Materials, 2008, 22(7): 1350-1367. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.013.
- [46] ESPINOSA R M, FRANKE L, DECKELMANN G. Phase changes of salts in porous materials: crystallization, hydration and deliquescence[J]. Construction & Building Materials, 2008, 22(8): 1758-1773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.0 05.
- [47] STEIGER M, ASMUSSEN S. Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and the generation of stress[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2008, 72(17): 4291-4306. DOI: 10.1016/j.gca.2008. 05.053.
- [48] XIAO Z A, LAI Y M, YOU Z M, et al. The phase change process and properties of saline soil during cooling[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(9): 3923-3932. DOI: 10.1007/s13369-017-2542-y.
- [49] LAI Y M, WU D Y, ZHANG M Y. Crystallization deformation of a saline soil during freezing and thawing processes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 463-473. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.011.
- [50] 肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 冻融循环作用下含盐量对 Na_2SO_4 土体变形特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 953-960. DOI: 10.11779/CJGE201705021.
- XIAO Z A, LAI Y M, YOU Z M. Experimental study on impact of salt content on deformation characteristics of sodium sulfate soil under freeze-thaw conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 953-960.
- [51] WAN X S, HU Q J, LIAO M K. Salt crystallization in cold sulfate saline soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 137: 36-47. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.02.007.
- [52] 徐敦祖. 冻土与盐溶液系统中热质迁移及变形过程[J]. 冰川冻土, 1992, 14(4): 289-295. DOI: 10.1007/BF02677081.
- XU X Z. Experimental study on processes of heat-mass transfer and deformation in system of frozen kaolin and salt solution[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(4): 289-295.
- [53] 高江平, 杨荣尚. 含氯化钠硫酸盐渍土在单向降温时水分和盐分迁移规律的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(3): 22-25.
- GAO J P, YANG Y S. Study on the moving pattern of water and salt with directional temperature lowering in sulfate salty soil containing NaCl[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(3): 22-25.
- [54] 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. DOI: 10.11779/CJGE201711006.
- XIAO Z A, LAI Y M, YOU Z M. Water and salt migration and deformation mechanism of sodium chloride soil during unidirectional freezing process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 1992-2001.
- [55] 罗金明, 邓伟, 张晓平, 等. 冻融季节苏打盐渍土的水盐变化规律[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 559-566. DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.20 08.04.017.
- LUO J M, DENG W, ZHANG X P, et al. Variation of water and salinity in sodic saline soil during frozen-thawing season[J]. Advances In Water Science, 2008, 19(4): 559-566.
- [56] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582. DOI: 10.1029/WR016i003p00574.
- [57] VAN LOON W K P. Application of dispersion theory to time domain reflectometry in soil[J]. Transport in Porous Media, 1991, 6: 391-406. DOI: 10.1007/bf00136348.
- [58] STAHLI M, STADLER D. Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1997, 195: 352-369. DOI: 10.1016/S00 22-1694(96)03227-1.
- [59] WU M S, TAN X, HUANG J S, et al. Solute and water effects on soil freezing characteristics based on laboratory experiments[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 115: 22-29. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.03.007.
- [60] LI H P, YANG Z H, WANG J H. Unfrozen water content of permafrost during thawing by the capacitance technique[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 152: 15-22. DOI: 10.1016/j. coldregions.2018.04.012.
- [61] 岳汉森. 土壤在冻融过程中水-热-盐耦合运移数学模型之初探[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 308-313.
- YUE H S. Primary study on model for coupled heat-moisture-salt transfer in soil during freezing-thawing processes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(4): 308-313.
- [62] CARY J W. A new method for calculating frost heave including solute effects[J]. Water Resources Research, 1987, 23(8): 1620-1624. DOI: 10.1029/ WR023i008p01620.
- [63] BEAR J, GILMAN A. Migration of salts in the unsaturated zone caused by heating[J]. Transport in Porous Media, 1995, 19(2): 139-156. DOI: 10.1007/BF00626663.
- [64] 黄兴法, 曾德超, 练国平. 土壤水热盐运动模型的建立与初步验证[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 32-36.
- HUANG X F, ZENG D H, LIAN G P. A numerical model for coupling movement of water heat and salt in soil under the conditions of frozen, unfrozen, saturated and unsaturated[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1997, 13(3): 32-36.
- [65] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 季节性冻融土壤水盐动态预测 BP 网络模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 125-128. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2007.11.021.
- LI R P, SHI H B, TAKEO A, et al. BP network model research on water and salt transfer forecast in seasonal freezing and thawing soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 125-128.
- [66] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 403-412. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.

- 04.004.
- LI R P, SHI H B, TAKEO A, et al. Study on water-heat-salt transfer in soil freezing-thawing based on simultaneous heat and water model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(4): 403-412.
- [67] ZHANG X D, WANG Q, WANG G, et al. A study on the coupled model of hydrothermal-salt for saturated freezing salinized soil[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017(5): 1-12. DOI: 10.1155/2017/4918461.
- [68] 冯瑞玲, 蔡晓宇, 吴立坚, 等. 硫酸盐渍土水-盐-热-力四场耦合理论模型[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(2): 1-10. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372. 2017.02.001.
- FENG R L, CAI X Y, WU L J, et al. Theoretical model coupling process of moisture-salt-heat- stress field in sulfate salty soil[J]. *China Journal of Highway and Transport*. 2017, 30(2): 1-10.
- [69] WU D Y, LAI Y M, ZHANG M Y. Thermo-hydro-salt-mechanical coupled model for saturated porous media based on crystallization kinetics[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 133: 94-107. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016. 10.012.
- [70] 王璐璐, 陈晓飞, 马巍, 等. 不同土壤冻融特征曲线的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 1004-1011. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2007.06. 022.
- WANG L L, CHEN X F, MA W. Experimental study of the freezing and thawing characteristic curves of different soils[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 1004-1011.
- [71] 王春雷, 姜崇喜, 谢强, 等. 析晶过程中盐渍土的微观结构变化[J]. *西南交通大学学报*, 2007, 42(1): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2007. 01.013.
- WANG C L, JIANG C X, XIE Q, et al. Change in microstructure of salty soil during crystallization[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2007, 42(1): 66-69.
- [72] LIU J Y, ZHANG L J. The microstructure characters of saline soil in Qarhan Salt Lake Area and its behaviors of mechanics and compressive strength[J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2014, 39(12): 8649-8658. DOI: 10. 1007/s13369-014-1410-2.
- [73] 刘军勇, 任勇, 张留俊. 察尔汗盐湖地区盐渍土微观结构及其力学特性[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(5): 1277-1287.
- LIU J Y, REN Y, ZHANG L J. The micro-structure of saline soil in Qarhan Salt Lake and its mechanics characteristics[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(5): 1277-1287.
- [74] YOU Z M, LAI Y M, ZHANG M Y, et al. Quantitative analysis for the effect of microstructure on the mechanical strength of frozen silty clay with different contents of sodium sulfate[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(4): 143. DOI: 10.1007/s12665-017-6454-7.
- [75] 李炎. 新疆某地区天然盐渍土盐-冻胀及微观结构变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- LI Y. Experimental study on salt-frost heave and microstructure of crude saline soil in Xin Jiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.
- [76] WANG C, LAI Y M, ZHANG M Y. Estimating soil freezing characteristic curve based on pore-size distribution[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124: 1049-1060. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.006.
- [77] DROTZ S H, TILSTON E L, SPARRMAN T, et al. Contributions of matric and osmotic potentials to the unfrozen water content of frozen soils[J]. *Geoderma*, 2009, 148: 392-398. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.11.007.
- [78] 李彦龙, 汪留松, 王铁行. 基质势梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(6): 847-859. DOI: 10.15986/j.1006-7930. 2017.06.012.
- LI Y L, WANG L S, WANG T X. Moisture migration of unsaturated soil due to matric suction gradients[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 49(6): 847-859.
- [79] 温智, 马巍, 薛珂, 等. 基于 pF Meter 基质势传感器的冻土水分迁移研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(2): 370-375. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2014.02. 019.
- WEN Z, MA W, XUE K, et al. Study on moisture migration in frozen soil by soil matric potential sensor[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2): 370-375.
- [80] 薛珂, 温智, 张明礼, 等. 土体冻结过程中基质势与水分迁移及冻胀的关系[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 176-183. DOI: CNKI;SUN;NYGU. 0.2017-10-023.
- XUE K, WEN Z, ZHANG M L, et al. Relationship between matric potential, moisture migration and frost heave in freezing process of soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10): 176-183.
- [81] 薛珂, 杨明彬, 温智. 基于 pF Meter 的土体冻结特征曲线研究[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(3): 22-29. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.03.003.
- XUE K, YANG M B, WEN Z. pF Meter-based research on soil freezing characteristic curves[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(3): 22-29.
- [82] MALAZIAN A, HARTSOUGH P, KAMAI T, et al. Evaluation of MPS-1 soil water potential sensor[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 402: 126-134. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.006.
- [83] NOLZ R, KAMMERER G. Evaluating a sensor setup with respect to near-surface soil water monitoring and determination of in-situ water retention functions[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 301-312. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.011.
- [84] 刘世伟, 张建明. 高温冻土物理力学特性研究现状[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 120-129. DOI: ir.casnw.net/handle/362004/8906.
- LIU S W, ZHANG J M. Review on physic-mechanical properties of warm frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 120-129.
- [85] 张莲海, 马巍, 杨成松. 冻融循环过程中土体的孔隙水压力测试研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1856-1864. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.07.005.
- ZHANG L H, MA W, YANG C S. Pore water pressure measurement for soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1856-1864.

(责任编辑 葛华忠)