

# 单向冻结黏性土水热特性冻胀试验研究

曾腾飞, 杨保存\*, 李宏伟

塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔  
Email: ztftau@163.com

收稿日期: 2021年2月28日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月30日

## 摘要

冻结过程中对其水-热分布特性及冻胀的研究一直是冻土学研究的热点。本文以新疆南疆阿拉尔市周边黏性土为研究对象, 进行土体单向冻结作用下的冻胀试验, 设置冷端温度 $-1^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 和 $-10^{\circ}\text{C}$ , 暖端温度、环境温度为 $3^{\circ}\text{C}$ , 研究土体在单向冻结作用下水-热变化及土体的变形。试验结果表明: 土体中水分迁移过程受土体降温的影响, 冷端温度越低水分随冻结时间向冷端迁移速度越快。试样冻胀量随冻结时间的增加而增加, 且冷端温度越低冻胀量越大。研究结果能够很好的反映在不同温度变化条件下新疆南疆地区黏性土在冻结过程中的温度分布、水分分布及变形规律, 从而为后期深入研究路基盐-冻胀变形机理提供一定的理论参考。

## 关键词

冻土, 单向冻结试验, 水分场, 温度场, 冻胀变形

# Experimental Study on Water Thermal Characteristics and Frost Heaving of Unidirectional Frozen Cohesive Soil

Tengfei Zeng, Baocun Yang\*, Hongwei Li

College of Water Resource and Architecture Engineering, Tarim University, Alaer Xinjiang  
Email: ztftau@163.com

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Mar. 30<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

During the freezing process, the research on the water heat distribution characteristics and frost

\*通讯作者。

heaving has always been a hot spot in permafrost research. In this paper, the cohesive soil around Alar city in southern Xinjiang is taken as the research object, and the frost heaving test of soil under Unidirectional Freezing is carried out. The cold end temperature is  $-1^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$  and  $-10^{\circ}\text{C}$ , the warm end temperature and the ambient temperature are  $3^{\circ}\text{C}$ , and the water heat change and soil deformation under Unidirectional Freezing are studied. The results show that the moisture migration process in soil is affected by soil cooling, and the lower the temperature of the cold end is, the faster the moisture migrates to the cold end with freezing time. The frost heaving increases with the increase of freezing time, and the lower the cold end temperature is, the greater the frost heaving is. The research results can well reflect the temperature distribution, moisture distribution and deformation law of cohesive soil in the freezing process in southern Xinjiang under different temperature changes, so as to provide a theoretical reference for the later in-depth study of subgrade salt frost heaving deformation mechanism.

## Keywords

Frozen Soil, Unidirectional Freezing Test, Water Field, Temperature Field, Frost Heave Deformation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冻土是一种温度不高于  $0^{\circ}\text{C}$  且土颗粒为冰所胶结的多孔介质材料[1]。按照其处于冻结状态的持续时间分为季节冻土和多年冻土[2]。我国是世界上第三大冻土大国,广泛分布于纬度高于  $24^{\circ}$  的地区[3]。随着全球变暖等环境因素的日益严重,冻土对环境和工程的影响逐渐受到学者和技术人员的高度重视。冻胀是土中水分发生冻结时体积发生膨胀,从而导致土体体积增大的现象。冻胀作用作为冻土中最常见的物理力学现象,对地貌形态的破坏具有重要的影响。

在我国西北地区分布有大面积的冻土区域,尤其是新疆南疆地区。新疆南疆地处天山以南,是我国新疆“丝绸之路经济带”新疆核心区建设的重点区域,也是我国通向中亚地区国家的陆上道路交通基础工程建设的重要区域。但是由于其区域气候的特殊性,导致该地区的道路发生冻胀、盐胀变形破坏较为严重。对其道路病害机理开展了相关的研究,研究认为南疆这种特殊的水盐地质环境和荒漠寒旱气候环境的共同作用是导致新疆南疆工程路基路面变形破坏的主要环境作用因素,其季节性的冻胀-盐胀和干湿循环作用是道路路基结构发生损伤和变形破坏的主要内在原因[4][5],为了深入研究该地区道路路基发生盐胀-冻胀变形的微观损伤机理,本文开展了单向冻结作用下的路基土体冻胀模拟试验,研究路基土体在单向冻结作用下的水-热分布特性。

近年来国内外学者关于土体的冻胀变化规律取得了很多的研究成果,在冻胀方面的研究有了很大的进展。穆彦虎[6]等对多年冻土区路基工程等病害类型进行了研究,认为很多病害基本都是由土体的冻胀所导致。肖璇对东北季节冻土区中的公路路基的冻胀机理进行了研究,并对冻胀破坏提出了具体的防治措施[7]。石刚强对哈大高铁路基的冻胀变形进行了现场测量和数值模拟,分析了气候条件、冻结深度、填料中的细颗粒含量以及基床表层含水率对哈大高铁路基冻胀变形的影响[8]。汪恩良[9][10]在室内进行了冻胀试验,在不同因素条件下建立了冻胀模型对其冻胀进行预报;Wang [11]等考虑到含水率、温度、细度和密实度等影响因素,采用正交试验方法设计了室内冻胀试验,发现含水量对冻胀量的影响最大。

Ma [12]等通过室内单向冻胀试验研究了冻结锋面的移动速度,在冻胀过程中,较低的冷端温度可以提高了冻结锋面移动速度;研究表明,在冻结过程中,水的冻结和迁移速率受外部因素(例如土体冷端温度)的综合影响。因此,在研究土体的冻胀问题时,应研究冻结过程中土体内部温度分布、水分运动以及冻胀量变形规律。

## 2. 单向冻结条件下土体冻胀试验

### 2.1. 土样的采集与制备

取样点位于新疆阿拉尔市。该市气候干燥,干燥度指数高达 2.0,多年平均降水量低,多年平均蒸发量大等特点,属于典型的内陆极端干旱荒漠气候。试样取土深度为 1 m 至 1.5 m,将在取回的土样用蒸馏水进行洗盐处理。当测得土体含盐量小于 0.3%时,认为土体中盐分已经充分洗净。对洗好土样进行晒干、碾磨处理。然后依照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)对土样进行土工试验。颗粒级配曲线如图 1 所示。试验采用重塑土样,对前期处理好的土样通过孔径 2mm 的土工筛,然后按照《土工试验方法标准》配制试验用土。对素土进行最佳含水率(18.25%)配制。再将配制好的土样用密封袋密闭保存 24 h,使土体中的水分均匀分布,将配置好的土样分层装入试样筒中( $d = 10 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ),装填高度为 20 cm,分 4 次装填,每装填完成一次进行下一次装填时需要对接面进行凿毛处理。

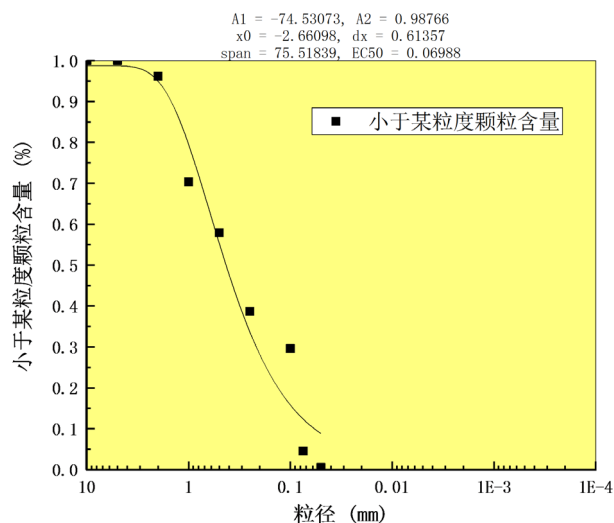
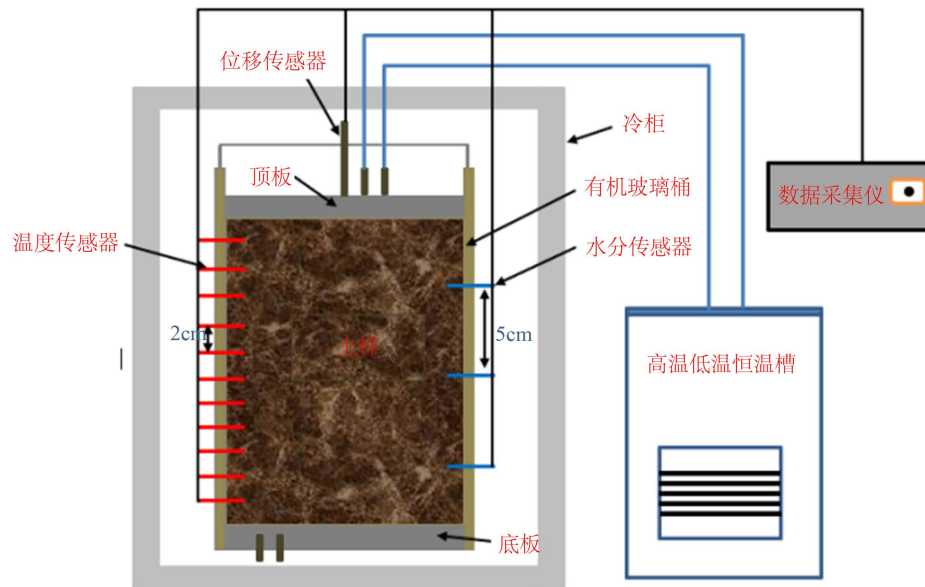


Figure 1. Particle size distribution curve

图 1. 颗粒级配曲线

### 2.2. 冻胀试验装置

试验设备由 TMS8035-R40 高低温恒温槽,温度范围在 $-40^{\circ}\text{C}$ 到  $90^{\circ}\text{C}$ 之间、浙江托莫斯科技有限公司的 34970A 数据采集仪、冻胀装置、京海泉位移传感器 DA-15 (量程 0~30 mm,线性度  $< 0.05\%$ ,精度可达 0.01 mm)、水分传感器 EC-5、温度热敏电阻传感器(精度可达  $0.05^{\circ}\text{C}$ )、冷柜(BD/BC-568DDKEM)组成。将 10 个温度传感器 2 cm 等间距布置;3 个水分传感器分别布置在距离底板 5、10、15 cm 处;位移传感器安装在冻胀装置的上部,测量土体在单向冻结过程中的位移变化,冻胀装置示意图如图 2 所示。为了保证土体有同样的初始条件,将土体放在  $3^{\circ}\text{C}$  的恒温环境下 24 h,此时测得土体各位置处的温度为  $3^{\circ}\text{C}$ 。将冷端温度设置为 $-1^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C}$ ,暖端温度设置为  $3^{\circ}\text{C}$ ,使土体产生单向冻结,冻结时间持续 48 小时,监测在这过程中水分、温度和冻胀变形与冻结时间的变化规律。试验的初始条件及边界条件如表 1 所示。



**Figure 2.** Schematic diagram of frost heaving device  
**图 2.** 冻胀装置示意图

**Table 1.** Initial and boundary conditions  
**表 1.** 试样初始与边界条件

试样编号	冻结时间(h)	样高(cm)	最佳含水率(%)	初始干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	冷端温度(°C)	暖端温度(°C)	环境温度(°C)
T01	48	20	18.25	1.69	-1	3	3
T02	48	20	18.25	1.69	-5	3	3
T03	48	20	18.25	1.69	-10	3	3

### 3. 试验结果分析

#### 3.1. 水分分布规律

通过水分传感器 EC-5 对试样的含水率进行分层监测, 可对试样冻结过程中的水分重分布有一定的认识和分析。图 3 为冷端温度为-1°C、-5°C 和-10°C 时, 含水率随土柱高度变化曲线。由图可以看出含水率受冷端温度的影响, 随着冻结时间的推移, 冷端含水率呈上升趋势。冷端温度为-1°C 时, 顶端含水率、中部含水率(18.4713%、18.5566%) > 底端含水率(18.2277%), 冷端温度为-5°C 时, 顶端含水率、中部含水率(18.3239%、18.49%) > 底端含水率(18.2475%), 冷端温度为-10°C 时, 顶端含水率、中部含水率(18.2905%、18.8095%) > 底端含水率(18.2575%)。在土柱中部既冻结锋面附近含水率明显增大, 且最大, 分别达到了 18.5566%、18.49% 和 18.8095%。在冻结初期试样的温度场变化较快, 水分有少量的迁移, 但不是十分的明显, 当试样的温度场逐渐达到稳定后, 冻结缘的水分便开始逐渐在冻结锋面聚集, 导致冻结缘部分既试样中部 10 cm 处的含水率明显增大。原因在于温度发生变化的冻土内部会产生温度梯度, 温度梯度促使水分由暖端区域向冷端区域发生迁移。冻土内部水势是由冻土温度来决定, 通过冻土中薄膜水的冻结或冰的融化来实现。当温度降低, 孔隙中薄膜水进一步冻结成冰, 薄膜水厚度变薄时, 未冻水受到的束缚作用愈发强烈, 导致土水势降低。在冻结过程中存在于土体的温度梯度“强迫”冻土内部形成一个与其相对应的土水势梯度, 冻土中的水分正是在这种由温度梯度决定的土水势梯度的驱动下由

暖端区域向冷端区域迁移。在冻结初期土体的温度场变化很快，水分虽有迁移，但并不明显，当土体温度场逐渐稳定，冻结缘水分便逐渐集聚，导致冻结缘部分含水率显著增大。

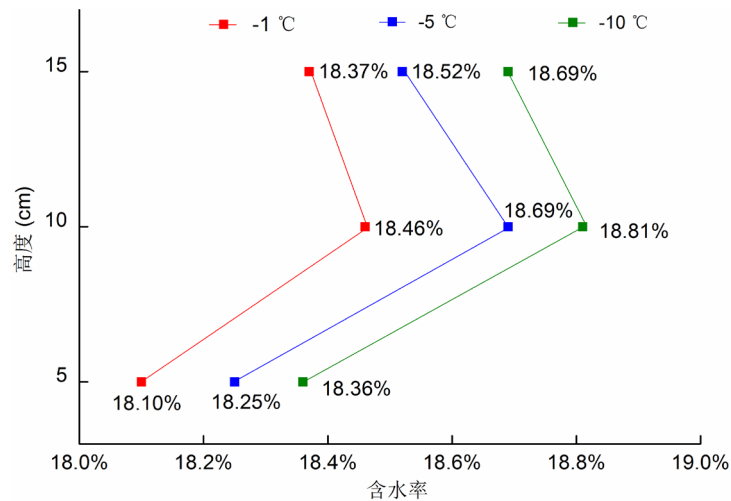
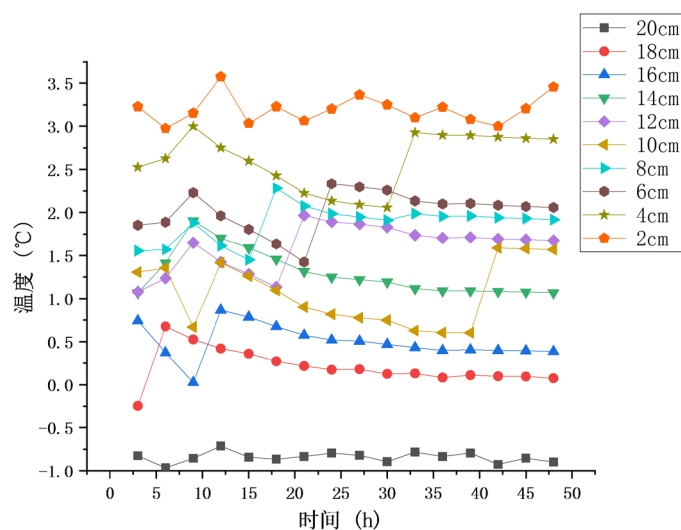


Figure 3. Variation curve of moisture content with height at different cold end temperatures

图 3. 不同冷端温度时含水率随高度变化曲线

### 3.2. 温度分布规律

冷端温度为 $-1^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 和 $-10^{\circ}\text{C}$ 时，不同位置温度随时间的变化曲线见图 4 所示(2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm, 18 cm, 20 cm)，可以看出冷端温度越低，温度梯度越大。在单向冻结过程中，由于暖端温度、环境温度恒定，只变化冷端温度，导致土体内部温度变化相似。在冻结初期，土体内部温度急剧下降，在 20 cm 与 18 cm 之间温度急剧下降。距离冷端温度越远温度场越稳定，这主要取决于土体的冷端温度和暖端温度，因为靠近冷端的土体从冷端接收到更多的冷量，由于温度梯度大和冻结速度快，土体在冻结的早期阶段迅速完成冻结，冻结锋面向下移动，水的流动受到阻碍，温度场达到稳定。距离越远，对远端土体的温度场影响越小，远端土体受暖端温度和环境温度影响。随着距冷端距离和冻结深度的增加，温度场越来越接近暖端温度、环境温度 $3^{\circ}\text{C}$ 。



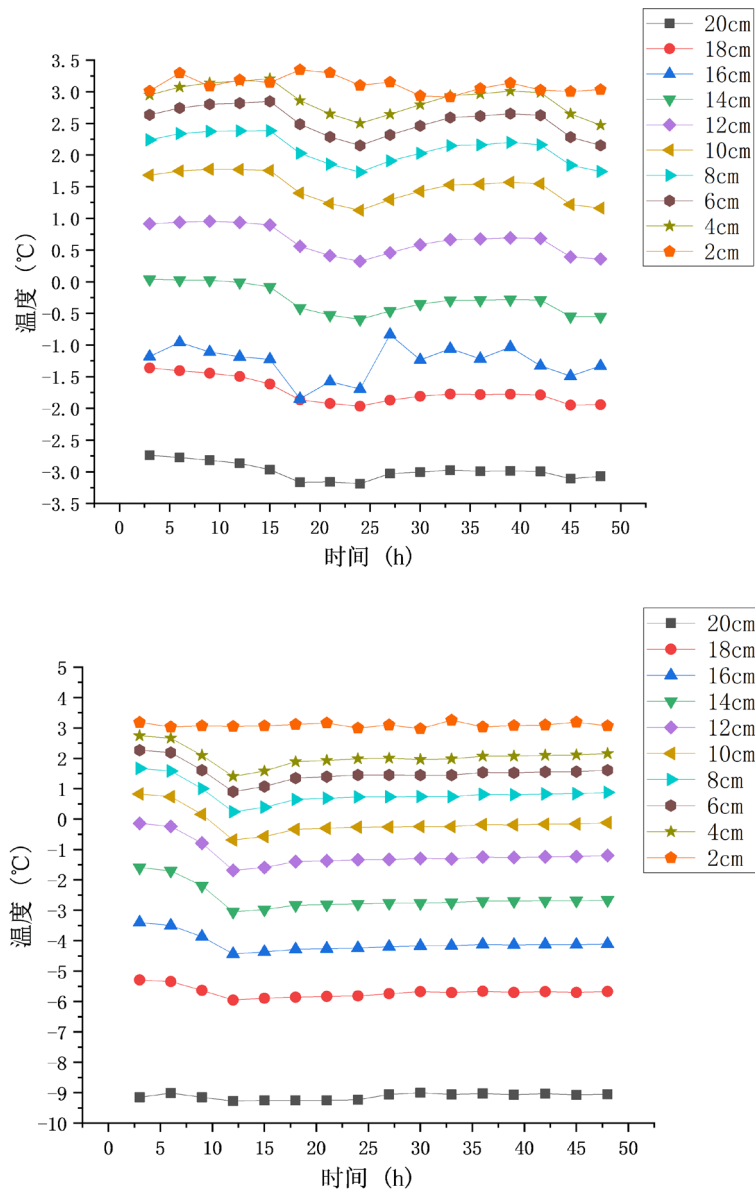


Figure 4. Temperature versus time curves of different positions at different cold end temperatures

图 4. 不同冷端温度为时不同位置温度随时间的变化曲线

### 3.3. 单向冻胀变形规律

冷端温度为 $-1^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 和 $-10^{\circ}\text{C}$ 时，土体冻胀量随时间变化规律见图 5 所示。可以看出，冷端温度越低，冻胀量越大，冷端温度在 $-10^{\circ}\text{C}$ 时冻胀量最大， $-5^{\circ}\text{C}$ 时次之， $-1^{\circ}\text{C}$ 时冻胀量变化较 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 时不是很明显。冻胀曲线的斜率越大，即冻胀率越大。冻结初期温度场较后期变化快，土体孔隙水来不及迁移，致使前期土体冻胀不是十分的明显。但是随着冻结时间的增加，温度逐渐达到设定温度，慢慢趋于稳定，这时土体发生冻胀较前期明显。土体的冻胀变形并不是呈现一定的线型。

在冷端温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ ，冻胀时间在 10~20 h 时，冻胀量快速增加，原因在于顶板的自重作用下，试样顶端附近会有部分的水分聚集，试样在冻结开始阶段，聚集的水分相变成冰，发生快速冻胀。

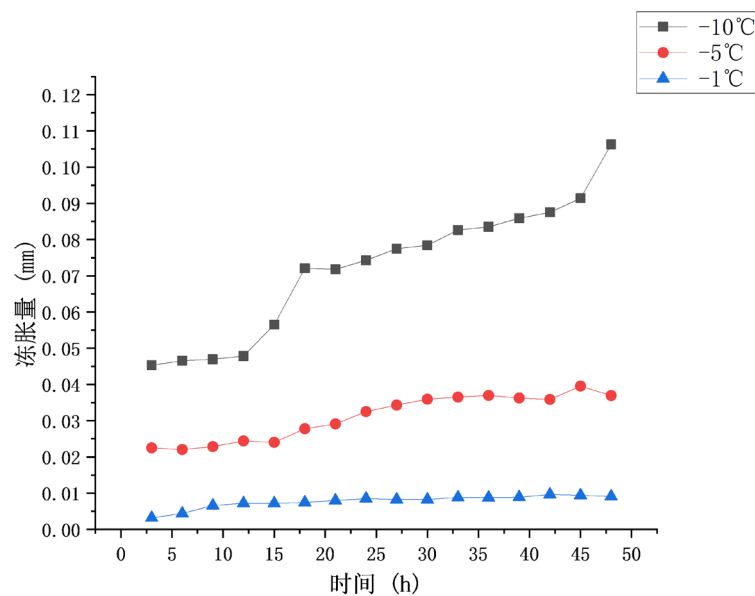


Figure 5. Variation of soil frost heaving with time  
图 5. 土体冻胀量随时间变化

#### 4. 结论

本文通过封闭系统条件下对新疆南疆阿克苏地区阿拉尔市周边黏性土进行不同冷端温度条件下的单向冻结试验, 得到以下几点结论。

1) 黏性土在冻结过程中, 水分相变成冰, 导致体积膨胀。在不同的冷端温度作用下, 黏性土的冻胀变形量不同, 冻胀量与冷端温度呈正相关。冷端温度越低, 冻胀变形量越大。

2) 土体中水分移动过程受土体降温的影响, 冷端温度越低, 移动速度越快; 土体中的含水率分布也受冷端温度的影响, 随着冻结时间的推移, 冷端含水率呈上升趋势, 暖端含水率变化不大。说明土体中水分移动过程受土体降温的影响。冷端温度越低, 温度梯度越大, 水分迁移速度越大。

#### 基金项目

基于新型相变材料寒区道路盐渍化路基灾变控制关键技术及应用, 编号: 1119052。

#### 参考文献

- [1] 马巍, 王大雁, 等. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 周幼吾, 邱国庆, 郭东信, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] Yang, B., Qin, Z., Zhou, Q., Li, H., Li, L. and Yang, X. (2020) Pavement Damage Behaviour of Urban Roads in Seasonally Frozen Saline Ground Regions. *Cold Regions Science and Technology*, **174**, Article ID: 103035. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103035>
- [5] 王飞. 季冻区盐渍土环境作用对道路水稳层破坏效应的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 新疆: 塔里木大学, 2018.
- [6] 穆彦虎, 马巍, 牛富俊, 刘戈, 张青龙. 多年冻土区道路工程病害类型及特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 259-267.
- [7] 肖璇. 东北季节冰冻地区公路冻胀与翻浆病害研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [8] 石刚强. 严寒地区高速铁路路基冻胀和工程对策研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2014.

- [9] 汪恩良, 刘风波, 刘兴超, 崔恩彤. 考虑温控模式对非饱和土冻结规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1247-1258.
- [10] 王彦虎, 王旭, 杨楠, 等. 基于 BP 神经网络的人工盐渍土冻胀预测研究[J]. 路基工程, 2018(2): 14-18.
- [11] Ma, H.Y., Zhang, F., Feng, D.C., *et al.* (2017) Frost-Heave Properties of Saturated Compacted Silty Clay under One-Side Freezing Condition. *Sciences in Cold and Arid Regions*, No. 3, 95-101.
- [12] 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.