

漠河机场跑道地基温度时空变化规律研究

吴丹泽¹, 冯莉²

(1. 民航机场规划设计研究总院有限公司东北分公司, 沈阳 110043; 2. 航科院(北京)科技发展有限公司, 北京 100028)

摘要: 多年冻土区机场建设属世界性技术难题, 缺乏成熟经验且工程风险显著, 亟须揭示冻土地温演化规律以指导寒区机场工程实践。本文以漠河古莲机场(简称漠河机场)17年间3次间断性地温监测数据为基础, 结合地表植被剥离、施工扰动及气候变暖等多重因素, 分析场地地温时空变化特征及其空间离散性。研究发现: 原有多年冻土显著退化, 高温冻土与深季节冻土范围扩大, 地温变化呈现深度分层异质性, 且同点位数据具有明显空间离散性。研究成果可为全球多年冻土及季节冻土区机场设计施工提供关键科学依据, 对推动寒区重大基础设施建设具有重要理论和实践价值。

关键词: 机场工程; 地基温度; 多年冻土; 飞机跑道; 漠河机场

中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)01-0053-07

Research on the temporal and spatial variation characteristics of runway foundation temperature at Mohe Airport

WU Danze¹, FENG Li²

(1. The Northeast Branch of China Aviation Airport Planning & Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110043, China; 2. HangKe Technology Development Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Airport construction in permafrost regions is a worldwide technical challenge, lacking mature experience and involving significant engineering risks, thus urgently requiring the identification of the evolution characteristics of permafrost ground temperature to guide airport engineering practices in cold regions. This paper is based on three intermittent ground temperature monitoring datasets collected over 17 years at Mohe Gulian Airport (referred to as Mohe Airport), and analyzes the temporal and spatial variation characteristics and spatial dispersion of site ground temperatures by integrating multiple factors such as surface vegetation removal, construction disturbance, and climate warming. The study found that the original permafrost has significantly degraded, with the extents of warm permafrost and deep seasonally frozen ground expanding; ground temperature variations exhibit depth-dependent stratified heterogeneity, and measurements at identical monitoring points show pronounced spatial dispersion. The research findings provide key scientific support for airport design and construction in global permafrost and seasonally frozen ground regions, and hold important theoretical and practical value for advancing major infrastructure development in cold regions.

Key words: airport engineering; foundation temperature; permafrost; aircraft runway; Mohe Airport

寒区温度在四季乃至昼夜呈现剧烈变化, 不同深度地基土层的地温变化程度各异^[1], 同时, 地基温度场也受到地质、外荷载及周边环境等多种因素的耦合影响。姜来库^[2]在研究中考虑了水分迁移携带热量因素, 建立了冻土水热耦合数学模型, 模拟经典土柱单向冻结试验, 验证了该模型的合理性, 分析了地表积水对多年冻土地基温度场和水分场的影响。李瑶^[3]通

过低温实验室试验得到冻土土基温度变化规律, 建立了水热力耦合地基有限元模型并验证了其可靠性, 对比跑道中部、端部及纵向断面温度场状况, 提出了温控措施施工建议, 还研究了附面层参数及跑道地基温度应力, 明确了跑道不同部位温度场差异, 为优化多年冻土区跑道设计和温控措施提供了依据。戚春香等^[4-5]模拟了东北多年冻土区跑道地基温度变化, 建立

了水热力耦合地基有限元模型,分析跑道地基水平温度应力分布规律,强调了温度应力对跑道的影响不可忽视,为跑道结构设计中考虑温度应力提供了参考。王肖江^[9]借助有限元软件构建了温度-应力场,研究了不同因素下土基动应力幅值变化规律,通过室内低温动三轴试验得出冻融粉质黏土动力变形特性,建立了累积塑性应变模型,分析了飞机荷载作用下冻土地基变形规律,为研究跑道冻土地基长期变形特性提供了多方面的数据和理论支持。但以上研究多聚焦单一因素对地温场的影响,且以室内试验或数值模拟为主,缺乏长期现场监测数据及多因素分析。

本文依托漠河古莲机场(简称漠河机场)2006—2023年3次间断性地温监测数据,通过长期监测进行多维度分析,以冻土学、工程热力学与水热耦合理论为基础,对比不同阶段(施工前、建设期、运营期、改扩建后)、不同区域(跑道中部/端头、植被破坏区/未扰动区)地温数据,分析地温场时空变化规律及多因素影响。漠河机场作为中国纬度最高的机场,其跑道地基温度场研究贯穿机场全生命周期,对多年冻土区机场安全、经济、可持续发展至关重要,可为寒区机场冻土地温演化规律研究提供借鉴。

1 漠河机场地基冻土研究现状

2008年,国内首座建设于多年冻土区的民用支线机场——漠河机场建成通航^[7-8]。2020—2022年漠河机场实施改扩建工程,跑道向东南方向延长700m。工程区域分布有高温且极不稳定的岛状融区多年冻土,按含冰量主要划分为少冰冻土、多冰冻土和富冰冻土。总体上看,该区多年冻土属退化型冻土,冻结区域的地基土属不融沉-弱融沉土,局部存在融沉区域^[7]。从平面上看,勘察区中部存在岛状融区;从垂向上看,自然环境未被破坏的区域为衔接性多年冻土,地表剥离区域(机场土面区)为非衔接性多年冻土,冻土上限下移。自然环境的破坏、地表植被的剥离是造成勘察区出现岛状融区及多年冻土上限下移的主要原因。在相同的太阳辐射下,水泥混凝土道面和裸露土面将吸收更多热量^[9-10],地温较新建机场时更加不稳定,冻土分布深度较新建机场时更深,使得多年冻土机场建造技术存在新的挑战^[11]。漠河机场在2006—2009年、2014年^[12]、2022—2023年3个时间段进行了地温监测工作。其中:2006年地温监测环境是森林等植被覆盖的原始地貌;其余年份则是在机场建设和运行过程中进行监测的,其地表植被已被剥离且存在跑道、航站

楼等建筑物。机场运行后发现,场区多年冻土升温、退化等多种原因导致机场建设区地表温度升高^[4],原本保持冻结状态的多年冻土开始融化^[13]。因此,本文旨在探究该冻土地基地温的时空演化规律,通过监测数据揭示施工扰动、气候条件及机场运行等因素对多年冻土的影响,从而为寒区机场工程的科学设计与建设提供指导依据。

2 2006—2009年地温监测数据分析

2006—2009年是漠河机场建设期,采集的温度分别表征了场地施工前原始地基温度和施工扰动后场地地基温度。地温观测孔位置如图1所示。根据2006—2009年在CK0+550、DK1+550、AK2+5503个观测孔位置所测不同深度下的温度数据绘制地温变化曲线,如图2—图4所示。地温观测特征温度及冻结深度(简称冻深)统计如表1所示。

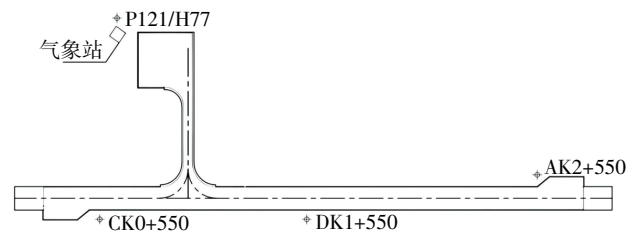
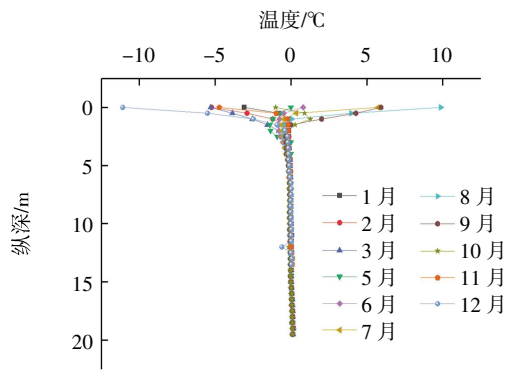
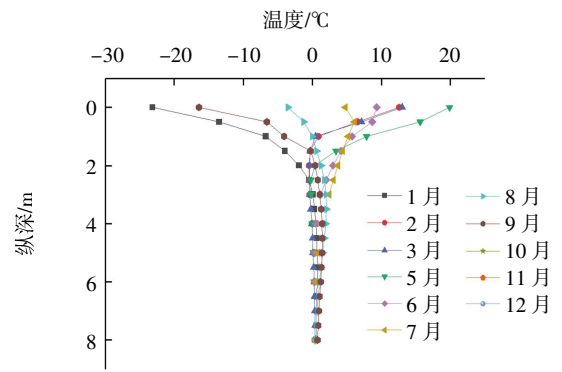


图1 2006—2009年地温观测孔位置图示
Fig.1 Schematic diagram of ground temperature monitoring borehole locations from 2006 to 2009

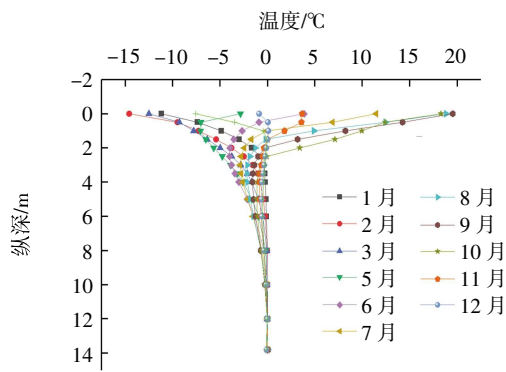
由图2—图4可以看出,每年逐月记录的地温-时间曲线包络线呈现“漏斗状”,该漏斗的口径表示该点位年度温度波动范围,通过某一深度处的温度范围宽度可以看出该深度处土基的热稳定状态。从时间范畴看,施工扰动之后较2006年场地施工前,原始地基下部土体的多年冻土上限发生下移,土体的温度稳定性也受到影响,且高温冻土存在的范围也更广。从空间范畴看,各观测孔内温度随深度加深不断变化,且由于上部温度受季节性变化和太阳辐射的影响较大,地温波动较为明显;当大气温度趋于0℃时,地温不再随深度变化而波动。由于该建设场地原为林地,地表覆盖的厚层植被对下部地基起到一定的保温作用^[4],从表1可以看出,2006年观测孔位CK0+550、AK2+550最低温度较高,冻深小;2007年之后随着工程建设实施,地表植被剥离,最低温度下降,冻深加深。DK1+550相较于其他两个孔位而言,位于跑道中段部位,由于跑道中部与外界环境的热交换相对充分,受飞机



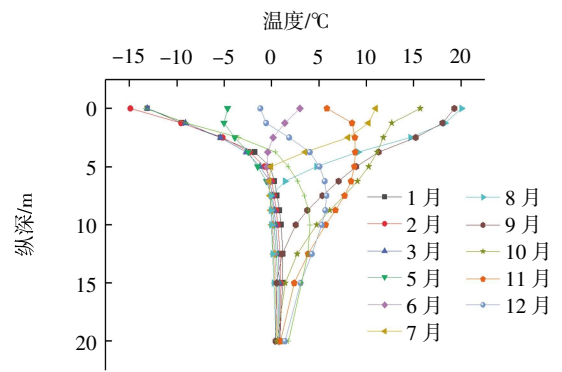
(a)2006年



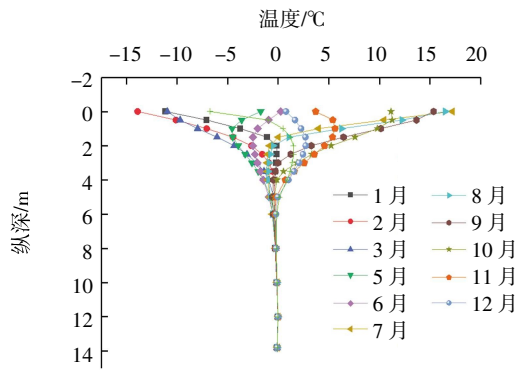
(a)2006年



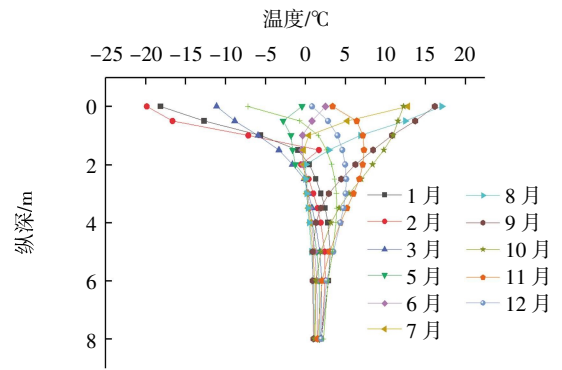
(b)2007年



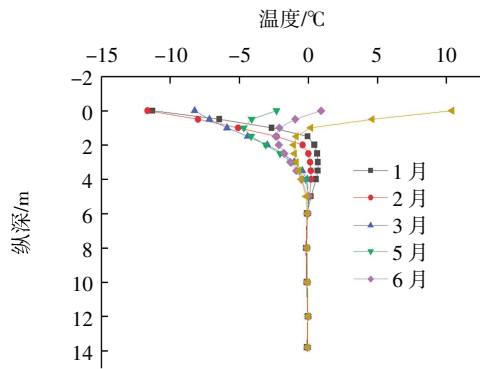
(b)2007年



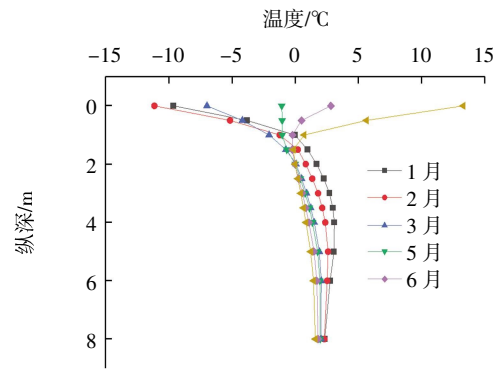
(c)2008年



(c)2008年



(d)2009年



(d)2009年

图 2 2006—2009年 CK0+550 观测孔地温变化曲线

Fig.2 Ground temperature variation curves at monitoring borehole CK0+550 from 2006 to 2009

图 3 2006—2009年 DK1+550 观测孔地温变化曲线

Fig.3 Ground temperature variation curves at monitoring borehole DK1+550 from 2006 to 2009

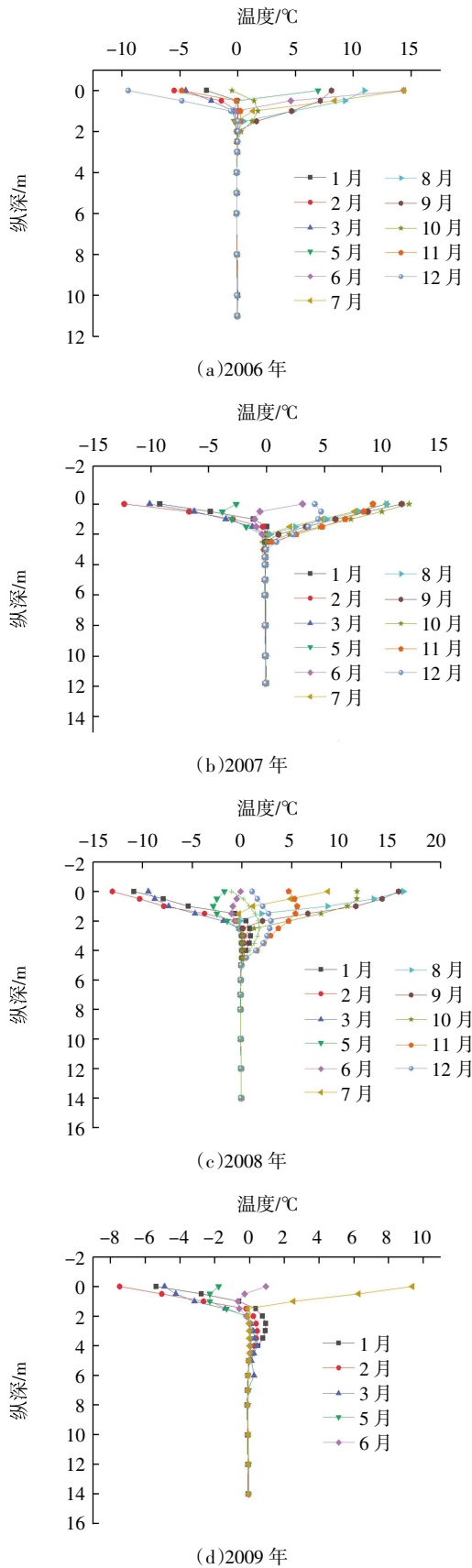


图4 2006—2009年AK2+550观测孔地温变化曲线

Fig.4 Ground temperature variation curves at monitoring borehole AK2+550 from 2006 to 2009

表1 2006—2009年地温观测特征温度及冻深统计

Tab.1 Statistics of characteristic temperatures and frost depth from ground temperature monitoring, 2006 to 2009

观测孔位置	观测年份	年度最低温度/°C	年度最高温度/°C	冻深/m
CK0+550	2006年	-12	10	2.5
	2007年	-15	20	10.0
	2008年	-15	18	5.0
	2009年	-13	11	5.0
DK1+550	2006年	-25	20	8.0
	2007年	-15	20	3.0
	2008年	-20	17	3.0
	2009年	-12	14	2.0
AK2+550	2006年	-10	15	2.0
	2007年	-13	13	3.0
	2008年	-17	17	5.3
	2009年	-19	22	3.8

荷载、大气温度和太阳辐射影响显著^[15-17], 季节变化导致的热量传递在中部表现明显, 使其温度能在较大范围内波动, 呈现地温上升和冻深减薄现象。具体表现为活动层厚度增加, 符合多年冻土退化特征^[18], 该区域正是场地多年冻土分布区。2006—2009年是施工扰动主导期, 由于工程活动的影响, 地表植被剥离, 土体保温层缺失, 热传导特性改变, 同时导致地表能量吸收机制改变, 加剧土体温度波动。

3 2014年地温监测数据分析

机场运行5年后, 在2014年对漠河机场进行了地温监测, 地温观测孔位置如图5所示。地温观测孔深度为15m, 选择3处与2006—2009年地温观测孔位置相近的地温观测孔进行数据分析, 各观测孔地温变化曲线如图6所示, 地温观测特征温度及冻深统计如表2所示。

对图6分析可知: 在各观测孔内部, 地温呈现出随深度增加而持续改变的态势, 其中, 浅层部位的温度随时间推移, 变化速率较为显著; 当大气温度趋近

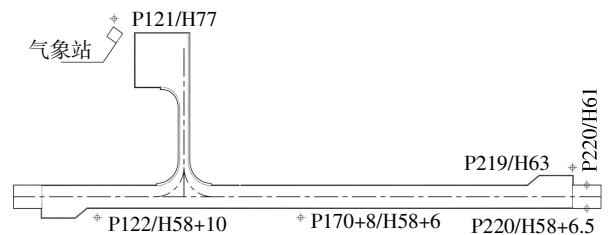


图5 2014年地温观测孔位置图示

Fig.5 Schematic diagram of ground temperature monitoring borehole locations in 2014

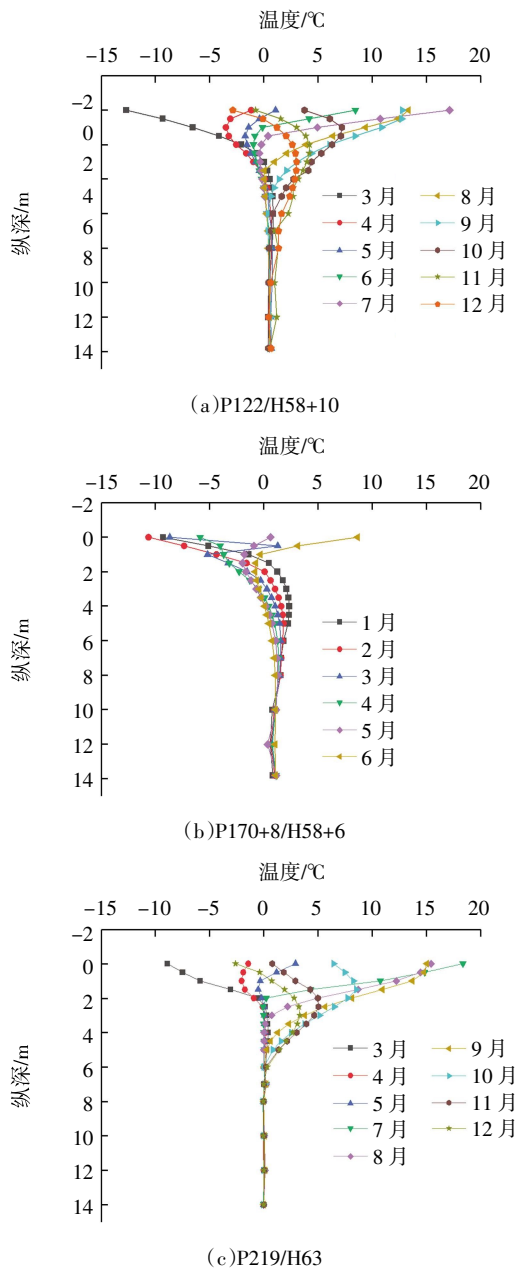


图 6 2014 年观测孔地温变化曲线

Fig.6 Ground temperature variation curves at monitoring boreholes in 2014

表 2 2014 年地温观测特征温度及冻深统计

Tab.2 Statistics of characteristic temperatures and frost depth from ground temperature monitoring in 2014

观测孔位置	年度最低温度/°C	年度最高温度/°C	冻深/m
P122/H58+10	-13	17	2.5
P170+8/H58+6	-13	23	2.0
P219/H63	-9	19	2.5

于 0 °C 时,地温趋于稳定,不再随深度的改变而出现明显波动。进一步对比不同位置观测孔发现,靠近跑道两端头处的冻深相较于靠近跑道中部区域更大。同时,将该场地 2014 年的地温状况与 2009 年进行对比,二

者表现出较高的相似性,表明场地地温在时间维度上具有一定的连贯性。值得注意的是,冻深呈现出逐年减薄的趋势,这一方面归因于土面区与大气之间的热交换效应,随着年份增长,该效应使得热量传递愈发频繁,进而抑制了冻深的发展;另一方面,是由于机场建成后,地下水分布相对贫瘠,缺少充足的水源参与热量交换与调节过程。

4 2022—2023 年地温监测数据分析

继 2014 年监测后,时隔 8 年,2022—2023 年再次对漠河机场跑道地温进行监测,如图 7 所示。



(a)漠河机场区位图



(b)地温监测设备

图 7 漠河机场区位图及地温监测设备

Fig.7 Site location map and ground temperature monitoring equipment for Mohe Airport

2022 年 3 月至 2023 年 2 月在漠河机场飞行区内布置了 6 个深度为 10 m 的地温观测孔,长期监测相应区域地表下温度变化,获得热作用剧烈程度的基础数据^[9]。地温观测孔位置覆盖了前期地温监测区域,不同深度下的地温变化曲线相似度非常高,说明地温变化已稳定,机场土面区地形平坦,地温的空间变化影响因素变弱,某个观测孔的情况如图 8 所示。

通过为期 1 年的地温监测发现,各观测孔地温呈现出较规律的变化,符合典型的深季节冻土区地温变化规律。由于 2023 年冬季漠河地区出现了极端低温现象,-53 °C 突破了漠河市最低气温的历史极值,地温

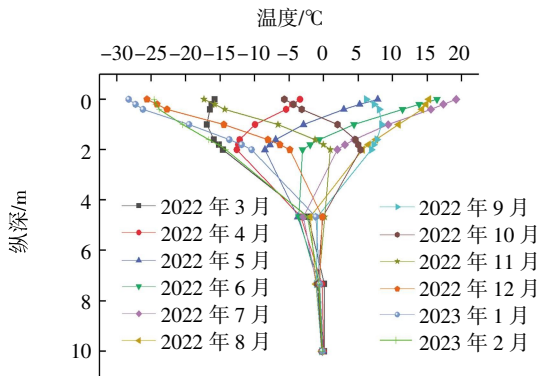


图8 2022—2023年地温观测孔典型地温变化曲线

Fig.8 Typical ground temperature variation curves at monitoring borehole from 2022 to 2023

下降速率较快,造成地基快速回冻。这个阶段的数据揭示了冻土系统仍具气候敏感性。

通过室内试验模拟春融期初的土体融化过程发现,土基内部形成了大小不一的冻结核,且随着温度上升冻结核逐渐减小乃至消失。60 min 温升过程后,冻结核温度为-3.2 °C,与表面土样温差-2.0 °C;110 min 温升过程后,冻结核与表面土样温差-0.6 °C,且均为正温。如某年度冷季较长,则会形成隔年冻土,此过程大大改变了土基的物理、力学特征,其对边坡稳定性潜在影响较大。

5 地基温度场时空变化规律分析

漠河市标准冻深为 3.0 m,最大季节冻深为 3.8 m,标准融深为 2.8 m,最大季节融深为 3.8 m^[20-21]。该场区冻土分季节活动层与多年冻土,机场升降带土面区主要由砂土及碎石土组成,层厚为 0.3~3.5 m。场地地基温度在-0.69~-0.01 °C,取地表以下约 10.0 m 位置-0.03 °C地温作为该区年平均地温。场地多年冻土按形成与自然条件划分属高纬度多年冻土;按地温划分属高温极不稳定多年冻土;按冷生构造划分属整体构造多年冻土;按含冰量划分属少冰冻土。其分布从平面上看属大片(连续)多年冻土;从垂向上看,植被未破坏区域为衔接性多年冻土,植被破坏区域为非衔接性多年冻土。

漠河机场施工阶段采用了开挖回填方案,将原有多年冻土土层移除,经过十多年使用后,监测区域地温变化曲线呈典型季节冻土特征,其冻深在 2.0~3.0 m 左右,冻结持续时间为每年 12 月至次年 6 月。每年的 1 月至 3 月大气温度均值低于地表温度均值,所以在每年 1 月至 3 月期间,机场跑道地基处于放热状态,

冻深也随时间推移而增大;4 月开始,大气温度均值高于地表温度均值,机场跑道地基处于吸热状态^[22],冻土中的冰逐渐融化,冻深减小,这一趋势一般持续到 9 月;9 月之后大气温度均值再次低于地表温度均值,地基开始放热,地基温度降至负温,之后逐渐开始冻结且冻深逐渐增加,场地最大冻深受当年实际气温变化情况影响最大。分析跑道结构设计方案可知,水稳层以下 1.5 m 范围内土基将经历周期性冻融循环作用。漠河机场建成使用后,在飞机动力荷载及冻融循环作用下,场地土基内部温度场发生了显著的变化。

通过 17 年间 3 次间断性现场监测数据发现,在靠近跑道的土面区,由于全球变暖、飞机动力作用、原有地貌的改变、地下水流向改变等多种因素,多年冻土已经退化为季节性冻土。机场区域多年冻土属退化型高温不稳定冻土,在未被扰动的地区,仍零星分布多年冻土,冻结区域的地基土总体上看属不融沉土。

6 结语

本研究依托漠河机场 2006—2023 年 3 次间断性地温监测数据,系统剖析了多年冻土区机场跑道地基温度场的时空演化规律,揭示了多因素作用下冻土环境的退化机制与工程响应特征,主要研究结论如下。

1) 冻土退化的时间序列特征

施工扰动与全球变暖驱动场区多年冻土显著退化,漠河机场运行 17 年后,原多年冻土区已退化为高温冻土或深季节冻土,最大冻深从施工前的 8.0 m 缩减至运营期的 2.0~3.0 m,冻融循环周期延长至每年 6 个月(12 月至次年 6 月)。活动层季节性冻融和隔年冻土的形成使土基物理力学特性劣化,可能对边坡稳定性构成潜在威胁。

2) 地温场的空间分异规律

垂直方向:地表以下 0~5.0 m 地温受季节波动影响剧烈,温差达 30~40 °C;5.0 m 以下趋于稳定(年平均地温-0.03 °C),其中,临界稳定深度为 5.0~8.0 m;由此可见,垂直方向地温呈现“浅层剧烈波动,深层趋稳”的分层异质性。

水平方向:跑道中部因飞机荷载生热及尾气散热,地温较跑道端头高 2.0~5.0 °C,冻深浅 1.0~2.0 m;土面区植被破坏区域较未扰动区地温高 1.0~3.0 °C,冻土上限下移 1.0~3.0 m,凸显了地表扰动对地温场的重塑作用。

3) 工程应用价值与展望

研究成果为寒区机场全生命周期地温监测与温控设计提供了关键数据支撑,证实了高温不稳定冻土

区机场建设中需重点关注地温场时空变异对地基稳定性的影响。未来建议构建数字化、智能化的地温监测体系,深化多因素作用下地温长期演化规律研究,为全球高纬度冻土区重大基础设施的冻土风险防控与生态协同发展提供科学借鉴。

参考文献:

- [1] GUO M, LU Y, YU W B, et al. Permafrost change and its engineering effects under climate change and airport construction scenarios in NorthEast China[J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 43: 101117.
- [2] 姜来库. 地表水对某多年冻土地基温度影响的数值研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [3] 李 瑶. 多年冻土区跑道地基水热力耦合效应研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
- [4] 戚春香, 韩 卓, 马 琳, 等. 多年冻土区跑道水热力耦合地基温度应力分析[J]. *中国民航大学学报*, 2023, 41(5): 34-41.
- [5] 戚春香, 李 瑶, 马 琳, 等. 漠河地区多年冻土地基温度场附面层参数研究[J]. *中国民航大学学报*, 2020, 38(1): 49-53.
- [6] 王肖江. 飞机荷载作用下跑道冻土地基长期变形特性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- [7] 韩 卓. 保温隔热技术在多年冻土区场道地基中的应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
- [8] 刘伟博, 喻文兵, 陈 琳, 等. 多年冻土地区机场跑道修筑技术现状[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(6): 1599-1610.
- [9] 王娇娇, 张 虎, 金晓颖, 等. 变暖背景下砾石换填对多年冻土区机场跑道下地温场的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20(3): 291-303.
- [10] 张 开. 青藏高原机场跑道多年冻土地基温度控制方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [11] 张润峰, 戚春香, 张献民, 等. 道面宽度对机场跑道多年冻土地基温度场的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(4): 568-576.
- [12] MAO Y C, LI G Y, MA W, et al. Field observation of permafrost degradation under Mo'he airport, Northeastern China from 2007 to 2016[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 161: 43-50.
- [13] 戴竞波. 大兴安岭北部多年冻土地区地温特征[J]. *冰川冻土*, 1982, 4(3): 53-63.
- [14] 李述训, 吴通华. 冻土温度状况研究方法和应用分析[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 377-383.
- [15] MOHAMMED I, ZHOU Z F, AI C F. Evaluating the impact of temperature variations and subgrade reactions under traffic-load on airport concrete pavement performance[J]. *Structures*, 2024, 70: 107704.
- [16] 李红霞, 张洪泽, 王文杰, 等. 人类活动与全球变暖对冻土环境的双重影响[J]. *黑龙江水利科技*, 2025, 53(1): 1-4, 23.
- [17] LIU X L, FU C W, LV C. Study on applicability of parallel perforated ventilation subgrade to the runway in frozen soil regions[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2025, 110: 168-185.
- [18] 郝加前, 吉延峻, 何乃武, 等. 高温多年冻土区冻土地基预先融化技术研究现状及展望[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 645-652.
- [19] 刘国光, 杨跃敏, 牛富俊, 等. 春融作用对寒区机场土面区工作性能的影响[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2019, 36(6): 621-627.
- [20] 张程程. 中国东北多年冻土时空演化及线性工程响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [21] 吴树森, 周学军, 王 振, 等. 漠河极寒天气特征分析[J]. *黑龙江气象*, 2022, 39(3): 37-39, 46.
- [22] TAI B W, WU Q B, XU X M. Thermal and hydrological processes in permafrost slope wetlands affect thermosyphon embankment stability[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15(4): 680-694.

(责任编辑:明月)

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 中国民用航空局机场司. 飞机荷载桥梁在机场工程中的应用: IB-CA-2019-02 [Z]. 北京: 中国民用航空局机场司, 2019.
- [2] 中国民用航空局. 民用机场飞机荷载桥梁技术状况评定规程: MH/T 5074—2023[S]. 北京: 中国民航出版社, 2023.
- [3] 黄 信, 谭成松, 陈 宇, 等. 机场滑行道桥桥面板横向有效分布宽度分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(19): 8475-8480.
- [4] 戚春香, 丁丛丛, 李佳坤. 基于机桥耦合振动的滑行道桥优化设计研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(16): 6744-6751.
- [5] 张宇辉, 丁硕旋. 地震波影响下的滑行道桥仿真建模[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(6): 2518-2524.
- [6] MAZZEO M, DE DOMENICO D, QUARANTA G, et al. Automatic modal identification of bridges based on free vibration response and variational mode decomposition technique[J]. *Engineering Structures*, 2023, 280: 115665.
- [7] TAROZZI M, PIGNAGNOLI G, BENEDETTI A. Identification of damage-induced frequency decay on a large-scale model bridge[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111039.
- [8] ABEDIN M, DE CASO Y, BASALO F J, KIANI N, et al. Bridge load testing and damage evaluation using model updating method[J]. *Engineering Structures*, 2022, 252: 113648.
- [9] 王婷婷. 基于振动的飞机滑行道桥损伤识别方法的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [10] 张献民, 金喜莎, 李少波, 等. 基于动静参数联合反演技术快速评定桥梁承载能力[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(2): 74-80.
- [11] 何 琳, 王家林. 模拟有效预应力的等效荷载-实体力学降温法[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(11): 75-80.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁板式橡胶支座技术标准: JT/T 4—2019[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2019.
- [13] 樊友景. 弹性力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [14] 广州白云国际机场. 广州白云国际机场桥梁检测报告[R]. 广州: 广州白云国际机场, 2020.
- [15] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范: MH/T 5004—2010[S]. 北京: 中国民用航空局, 2010.
- [16] 汪越胜, 梁小燕. 材料力学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵养护规范: JTG 5120—2021 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2019.
- [18] 张献民, 孙维丰, 曹中杰, 等. 动态测试钢筋混凝土梁承载力的新方法[J]. *工程力学*, 2002(S1): 616-619.

(责任编辑:刘雅婷)