

气温变化对多年冻土斜坡稳定性的影响

沈凌锐, 周 保, 魏 刚, 魏赛拉加, 常文斌, 张明哲, 邢爱国

Influence of air temperature change on stability of permafrost slope: A case study of shallow permafrost landslide in Qinghai Province

SHEN Lingkai, ZHOU Bao, WEI Gang, WEI Sailajia, CHANG Wenbin, ZHANG Mingzhe, and XING Aiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多年冻土边坡的水热力耦合分析及软件开发

董旭光, 董建华, 何天虎, 代涛, 孙国栋

中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 77-84

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

杨栋, 王全成, 姜昭群 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 82-89

地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan

付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 123-132

压实作用对泥岩膨胀性及水分迁移影响

张唐瑜, 马丽娜, 张戎令, 王起才, 王天双

中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 98-103

地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用

Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jiangda County, Tibet

支泽民, 陈琼, 张强, 周强, 刘峰贵, 赵富昌, 陈永萍 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 19-26



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112025

沈凌铠, 周保, 魏刚, 等. 气温变化对多年冻土斜坡稳定性的影响——以青海省浅层冻土滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 8-16.

SHEN Lingkai, ZHOU Bao, WEI Gang, et al. Influence of air temperature change on stability of permafrost slope: A case study of shallow permafrost landslide in Qinghai Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 8-16.

气温变化对多年冻土斜坡稳定性的影响 ——以青海省浅层冻土滑坡为例

沈凌铠¹, 周保², 魏刚³, 魏赛拉加², 常文斌¹, 张明哲¹, 邢爱国¹

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 青海省地质环境监测总站, 青海
西宁 810007; 3. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007)

摘要:受气温变化影响, 浅层冻土滑坡失稳涉及水分的固液相态转换, 是一个复杂的水热力耦合过程。为揭示气温变化对多年冻土斜坡稳定性的影响, 基于冻土水热力耦合数值模型, 模拟了 2020—2024 年青海省多年冻土区斜坡水热力演化过程。研究表明: 水分迁移速率呈周期性变化, 每年 5—10 月活动层融化程度高, 总积含水率变化趋势显著; 夏季多年冻土上限以下的高含冰量土层融化产生厚度约 15 cm 的富水层, 孔隙水压难以消散; 4 年间多年冻土上限下移 10.4 cm, 导致活动层和富水层的厚度增大, 上覆融土下滑力增大、抗滑力减小, 土体抗剪强度进一步下降; 活动层土体每年产生数厘米冻胀融沉变形, 抗剪强度不断劣化, 坡脚处最容易形成薄弱带。

关键词:活动层; 水热力耦合; 多年冻土退化; 水分迁移; 冻胀融沉; 浅层冻土滑坡

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0008-09

Influence of air temperature change on stability of permafrost slope: A case study of shallow permafrost landslide in Qinghai Province

SHEN Lingkai¹, ZHOU Bao², WEI Gang³, WEI Sailajia², CHANG Wenbin¹, ZHANG Mingzhe¹, XING Aiguo¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Qinghai Geological Environment Monitoring Station, Xining, Qinghai 810007, China; 3. Qinghai Environmental
Geology Exploration Bureau, Xining, Qinghai 810007, China)

Abstract: Under the influence of air temperature change, shallow permafrost landslide is a complex thermal-hydro-mechanical coupling process, which involves the transformation of water between solid state and liquid state. To reveal the influence of air temperature change on the shallow permafrost landslide, based on the coupled thermal-hydro-mechanical model for frozen soil, the thermal-hydro-mechanical evolution process of slope in permafrost region from 2020 to 2024 is simulated. The results are as follows: the rate of water migration presents periodic variation. The thawing degree of the active layer from May to October is high, causing the variation trend of total water content significantly. In summer, the thawing of the high ice content layer below

收稿日期: 2021-12-21; 修订日期: 2022-04-26

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 创新平台建设专项项目(2021-ZJ-T08); 基础研究计划项目(2019-ZJ-7053)

第一作者: 沈凌铠(1998-), 男, 浙江宁波人, 土木工程专业, 硕士研究生, 主要从事冻土地区地质灾害研究。E-mail: jokerslk@sjtu.edu.cn

通讯作者: 周保(1982-), 男, 藏族, 青海北海人, 地质工程专业, 博士, 高级工程师, 主要从事工程地质、地质灾害调查研究工作。

E-mail: zhb820322@163.com

the permafrost table forms a water-rich layer of 15 cm thickness approximately, causing excess pore water pressure difficult to dissipate. The permafrost table will decline by 10.4 cm in 4 years, and the thickness of the active layer and water-rich layer increased. As a result, the sliding force of the overlying thawed soil increases, the sliding resistance decreases, and the shear strength of the soil further decreases. Several centimeters displacement of frost heave and thaw settlement occurs in the active layer per year, shear strength deteriorates continuously, and the weak zone is easiest formed at slope toe.

Keywords: active layer; coupling of seepage-temperature-stress; permafrost degradation; water migration; frost heave and thaw settlement; shallow permafrost landslide

0 引言

受全球变暖和夏季气温升高影响, 多年冻土斜坡活动层融化导致大量水分汇集在冻融交界面, 抗剪强度快速下降, 活动层沿多年冻土层滑动^[1], 诱发的浅层冻土滑坡广泛分布于加拿大北极地区^[2-4]、美国阿拉斯加北部^[5]和中国青藏高原^[6]等不连续多年冻土地区, 破坏生态环境、制约社会经济发展。因此, 研究气温变化对浅层冻土滑坡的影响, 对相应灾害的防治工作具有指导意义。

通过现场调查和野外勘察等手段, 现有研究证实了浅层冻土滑坡与气温变化具有密切关联。通过现场调查, Huscroft 等^[2]认为全球变暖导致森林大火、快速融雪和强降雨等极端事件的概率增加, 造成加拿大育空地区浅层冻土滑坡频发。Lewkowicz 等^[3]的现场调查数据表明 1969 年以来埃尔斯米尔岛气温呈升高趋势, 最大地表加热指数和解冻天数显著增长, 浅层冻土滑坡发生频率从每年 3~6 次上升到每年 14 次。结合气象观测资料, Lamoureux 等^[4]得出 2007 年 7 月梅尔维尔岛的极端高温导致活动层快速融化, 一周内发生浅层冻土滑坡 25 次。通过野外勘察, Patton 等^[5]提出气温升高导致冻土融化, 持续高温和干旱破坏地表植被、提高坡面蒸发率, 导致阿拉斯加浅层冻土滑坡频发。以上研究得出: 长时间尺度下全球变暖增加了极端天气事件发生率; 短时间尺度下夏季气温升高导致冻土融化、浅层冻土滑坡频发。但是浅层冻土滑坡失稳是一个复杂的水热力耦合过程, 气温变化对多年冻土斜坡水热力演化的影响机制不明, 本文尝试在这方面模拟讨论。

本文通过地质灾害遥感解译总结分析了青海省浅层冻土滑坡发育分布规律和孕灾条件, 针对青海省具有发生浅层冻土滑坡隐患的斜坡, 基于有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立多年冻土斜坡水热力耦合模型, 考虑全球变暖因素模拟了 2020—2024 年气温变化条件下多年冻土斜坡水热力复杂演化的过程, 从而揭示气温变化这一单一因素对浅层冻土滑坡失稳的影

响。研究结果对认识浅层冻土滑坡失稳机制和该类地质灾害的防灾减灾提供了理论依据和科学指导。

1 研究区概况

1.1 青海省浅层冻土滑坡分布特征

青海省内多年冻土区面积 $3.57 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占青海省总面积的 50%, 受气候变化和人类活动影响, 当地多年冻土稳定性下降, 浅层冻土滑坡灾害频发。基于多源遥感数据调查青海省多年冻土区浅层冻土滑坡灾害分布特征, 共解译该类型灾害 290 处, 祁连县、治多县和曲麻莱县为青海省浅层冻土滑坡发育的典型地区(图 1), 灾害发生时间集中在每年 7—9 月。通过遥感解译得到祁连县重点工作区浅层冻土滑坡分布如图 2 所示, 该区域发育有 54 处浅层冻土滑坡, 其中, 遥感影像呈椭圆状的为滑动型浅层冻土滑坡, 活动层呈整体向下滑动的趋势, 运动距离较近; 遥感影像呈长条状的为流动型浅层冻土滑坡, 由于滑体含水率较高, 表层土以泥流形式向下运移, 运动距离较远。

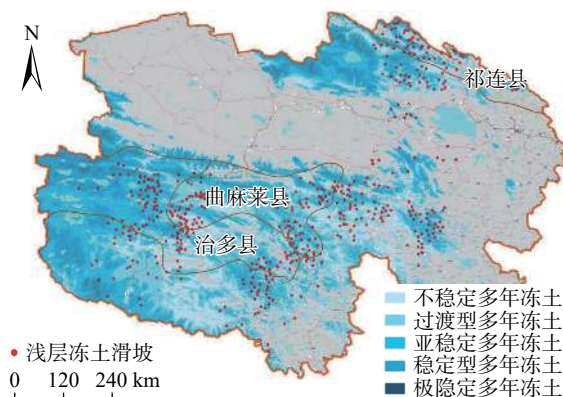


图 1 青海省不同类型冻土区浅层冻土滑坡分布

Fig. 1 Distribution of active layer detachments in different types of permafrost regions in Qinghai Province

基于实地调查和遥感目视解译结果统计了青海省浅层冻土滑坡灾害分布与多年冻土发育的关系如图 1 所示, 根据年平均地温(MAGT)范围可将多年冻土稳定

性分为 5 类^[7], 结果表明: 97.24% 的浅层冻土滑坡分布在不稳定多年冻土区($-0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{MAGT} < 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)、过渡型多年冻土区($-1.5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{MAGT} < -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)和亚稳定多年冻土区($-3.0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{MAGT} < -1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 仅 2.76% 的浅层冻土滑坡分布在稳定型多年冻土区($-5.0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{MAGT} < -3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)和极稳定多年冻土区($\text{MAGT} < -5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), 由此推断, 浅层冻土滑坡分布与多年冻土发育密切相关。

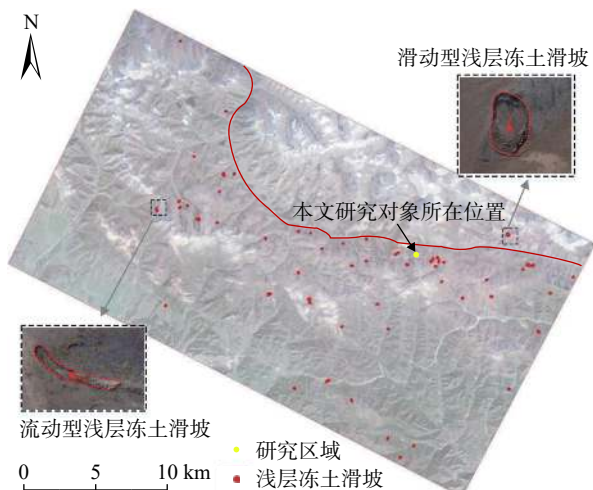


图 2 青海省祁连县重点工作区浅层冻土滑坡分布

Fig. 2 Distribution of active layer detachments in key working area of Qilian County, Qinghai Province

1.2 青海省浅层冻土滑坡发育规律

1.2.1 气温上升

大量研究表明气候变化是诱发浅层冻土滑坡的主要外部因素^[2-5]。近年来青海省最高线性增温趋势达 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 远超全球平均水平^[6-8], 气温变化呈正弦函数形式, 活动层不断经历冻融循环, 土体自 3—4 月开始融化, 8—9 月融深达到最大, 10—11 月开始冻结^[9]。青海省降水量季节分配不均, 其中 5—10 月的降水量占全年总降水量的 90% 以上, 7—8 月降水量最大^[10]。可以得出, 研究区活动层融化、降水量增大与浅层冻土滑坡集中发育时间基本吻合, 气候变化导致地温梯度改变, 破坏冻土发育的连续性和均匀程度^[11], 对多年冻土斜坡稳定性产生不利影响。

1.2.2 坡向和坡度

为进一步揭示研究区地质环境条件对浅层冻土滑坡发育的影响, 对灾害发育斜坡进行了现场调查。统计结果显示, 原始斜坡的坡向集中在 $270^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 和 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 坡度集中在 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。已有学者指出^[12], 缓坡地带多年冻土埋藏位置更浅, 地下冰含量更高, 冻土受外部影响融化对斜坡稳定性产生严重威胁; 坡表植被以高原草甸

为主, 覆盖率大多达到 65% 以上, 灾害发育位置主要为斜坡坡体冲沟部位, 分析认为, 植被覆盖度高和汇水条件良好的斜坡表层水分充足, 阴坡积雪覆盖率高, 隔热作用显著, 有利于多年冻土发育^[13]; 斜坡表层主要发育第四系坡积物(Q^d), 活动层土体多为细粒土和泥炭, 相关研究表明^[14-15], 细粒冻土富含冰晶, 冻融循环作用下强度不断损失, 融化时有液化的可能, 容易诱发浅层冻土滑坡。综上所述, 地质环境条件是影响浅层冻土滑坡发育的内在因素, 通过控制冻土发育对青海省多年冻土斜坡稳定性产生影响, 大量力学性质不良的冻土融化是诱发浅层冻土滑坡的必要条件, 浅层冻土滑坡往往发育在植被覆盖率高、活动层土颗粒较细和汇水条件良好的低缓阴坡上。

2 水热力耦合数值模拟

2.1 水热力耦合计算原理

为简化土体冻融循环中的水热力演化过程, 本文做如下假设: 地温变化受热传导和冰水相变控制; 水分迁移由基质吸力驱动, 孔隙冰对水分迁移具有阻滞作用; 水热过程单向影响土体应力应变; 土体的破坏行为符合摩尔-库伦屈服准则。

冻土内水热作用互相影响, 水分迁移改变土的热物理参数, 土体温度变化影响水力学参数, 水热耦合方程选取常用的 Harlan 模型^[16]。变形场以平衡方程和连续性方程为基础, 建立冻胀模型描述冻胀融沉对土体应力应变的影响^[17]。

2.2 计算模型建立

青海省祁连县重点调查区某天然斜坡位于汇水面阴面, 位置见图 2, 整体坡度约 12° , 表层土体为粉质黏土, 植被覆盖率约 70%, 存在发生浅层冻土滑坡的隐患, 因此以该斜坡为研究对象模拟 2020—2024 年气温变化条件下多年冻土斜坡水热力演化过程。

钻孔资料(图 3)显示地表以下 0~1.6 m 为活动层, 土质为粉质黏土; 1.6~12.7 m 为多年冻土层, 土质为黏土, 有大量肉眼可见冰晶; 12.7 m 以下为砂砾岩。根据现场调查和钻孔资料所得典型斜坡地质剖面如图 4 所示。

建立二维有限元模型, 采用自由三角形网格进行划分, 将活动层网格细化, 见图 5(a), 布置 2 条测线和 8 个测点获取水热力时空分布计算结果, 见图 5(b): 斜坡中间剖面布置测线 1-1'; 斜坡表面布置测线 2-2'; 坡脚活动层不同深度布置测点 A-E; 与坡顶水平距离为 50 m 的地表布置测点 F; 坡顶地表布置测点 G; 测点 F 以下 1.68 m 处布置测点 H。

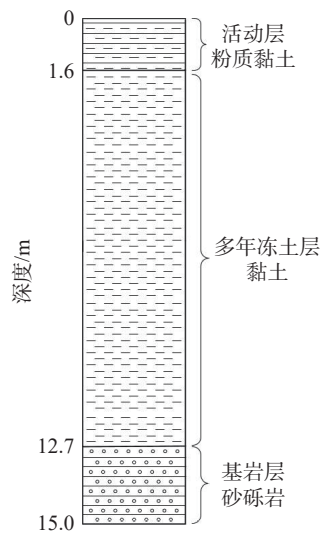


图 3 钻孔地层信息(水)
Fig. 3 Stratum information based on borehole

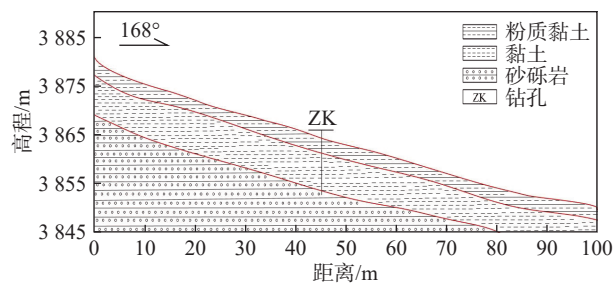


图 4 典型斜坡地质剖面
Fig. 4 Typical geological section of the slope

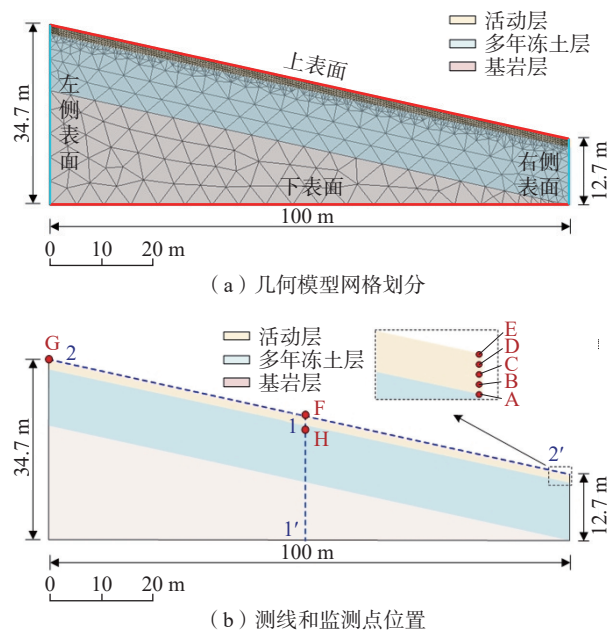


图 5 有限元计算模型
Fig. 5 Finite element computational model

2.3 计算参数及边界条件

根据相关研究给出的青海地区粉质黏土、黏土和砂砾岩的物理力学参数^[18-19]以及钻孔取样进行土工试验的结果,数值模拟所需参数设置如表 1 所示,水和冰的相变潜热取 334.5 kJ/kg,土体初始冻结温度取 -0.5 °C,完全融化温度取 0 °C,冻土的比热容和导热系数与土中未冻水含量的关系根据相关研究^[20-21]进行设置,土骨架的比热容和导热系数分别取 1.4×10⁶ J/(m³·°C)和 1.3 W/(m·°C)。

表 1 地层物理力学参数			
Table 1 Physical and mechanical parameters of formation			
参数	活动层	多年冻土层	基岩层
密度/(kg·m ⁻³)	1 800	2 000	2 500
弹性模量/MPa	40	30	5 000
泊松比	0.25	0.3	0.15
渗透系数/(m·s ⁻¹)	1.2×10 ⁻⁶	8×10 ⁻¹⁰	0
黏聚力/kPa	12	35	—
内摩擦角/(°)	22	20	—

祁连当地年气温线性增长速率为 0.037 °C/a^[22],根据附面层理论^[16]得出模型,见图 5(a),上表面温度边界条件表达式:

$$T = 2 + \frac{0.037t}{8\,760} + 13 \sin\left(\frac{2\pi t}{8\,760} + \frac{17\pi}{12}\right) \quad (1)$$

式中: t ——时间/h。

左右两侧为绝热边界;下表面温度为 3 °C,热通量为 0.03 W/m²。水分场上表面为自由渗透边界;左右两侧和下表面均为零流量边界。变形场上表面为自由边界,左右两侧水平位移为 0,下表面为固定边界。

2.4 模型有效性验证

图 6(a)为 2020 年 10 月地温的钻孔实测值和数值模拟计算值对比图,可以看出数值模拟所得地温与现场钻孔测温结果基本一致。2020 年活动层从 3 月 25 日开始融化,至 8 月 26 日融深达到最大,整个融化过程持续约 5 个月,符合刘广岳等^[9]的水热监测结果。图 6(b)为融深最大时刻(8 月 26 日)斜坡融化程度云图,可知最大融深位于地表以下 1.61 m,与图 2 所示多年冻土上限位置吻合。综上所述,该模型几乎准确地反演了气温变化条件下斜坡地温分布、融深达到最大的时刻和多年冻土上限位置,体现了模型的有效性。

3 计算结果与分析

3.1 气温变化对水分场演化的影响

图 7(a)和图 7(b)分别为 2020—2024 年测点 E 和

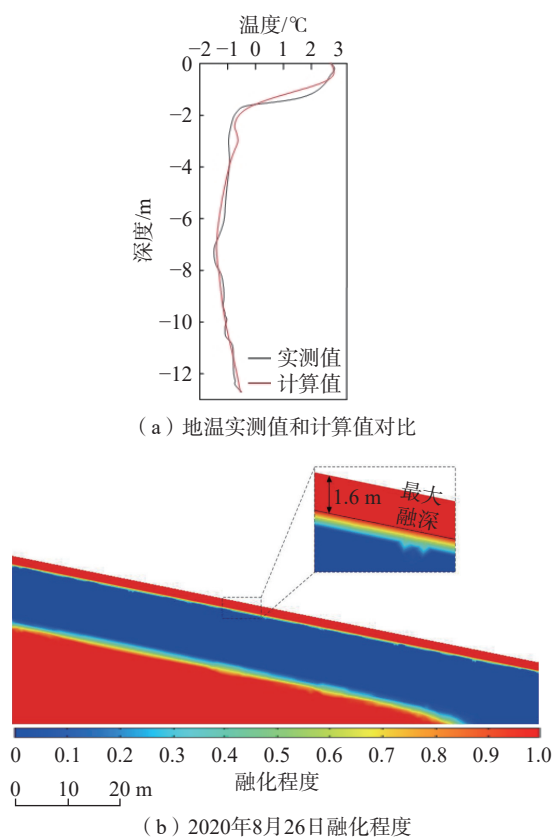


图 6 模型有效性验证
Fig. 6 Effectiveness verification of model

G 的总体积含水率(含水率和含冰率的总和)变化曲线,对比可知测点 E 总体积含水率以 $0.16\%/a$ 的速度升高;测点 G 总体积含水率以 $0.16\%/a$ 的速度下降;根据总体积含水率变化趋势可以将水分迁移分为 4 个阶段:1 月 1 日—3 月 15 日土体处于冻结状态,孔隙冰的阻隔作用导致水分迁移现象不明显;3 月 15 日—7 月 20 日孔隙冰逐渐融化,土体渗透性提高,水分迁移速率增大;7 月 20 日—10 月 20 日,活动层土体融化程度较高,总体积含水率变化趋势最明显,这一阶段的水分迁移量占全年总迁移量的 50%;随着气温降至负温,10 月 20 日—12 月 31 日土体再次冻结,水分迁移速率减小。

图 7 (c) 为 2020—2024 年 8 月 2-2' 测线上总体积含水率分布,可以得出坡顶总体积含水率逐年减小,坡脚总体积含水率逐年增大,经历 4 个冻融循环后坡脚土体总体积含水率比坡顶大 7.4%,说明水分自坡顶向坡脚迁移;越靠近坡顶和坡脚,总体积含水率变化趋势越明显,由于水分自坡顶的补给和向坡脚的运移达到平衡,距坡顶 55 m 处土体总体积含水率不变。

图 8 (a) 和图 8 (b) 分别为 2 月 1 日含冰率分布云图和 8 月 26 日融深最大时刻含水率分布云图。由图 8 (a) 可知 2 月活动层土体内的水分主要以孔隙冰的形式

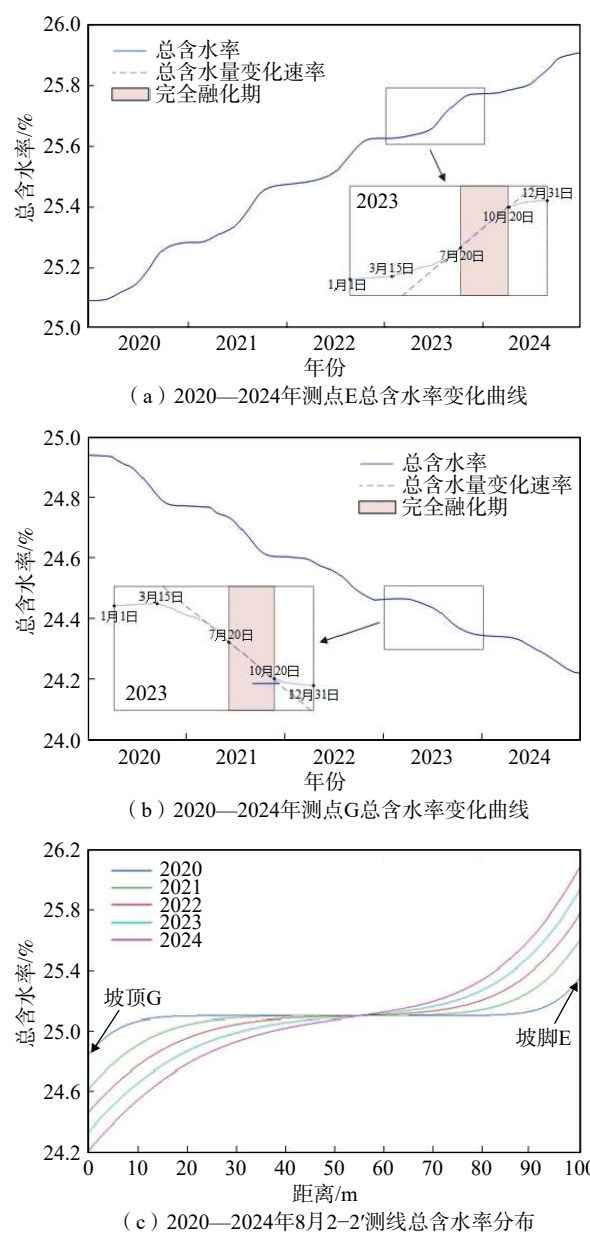


图 7 水分迁移规律
Fig. 7 Water migration rules

存在,体积含冰率约 16%,多年冻土上限以下体积含冰率呈先减小后增大再减小的趋势,其中活动层以下 0~0.5 m 范围内土体体积含水率达到 28% 左右。图 8 (b) 为 8 月 26 日含水率分布云图,可以得出此时活动层土体融化,体积含冰率约 26%,且在活动层基底以下高含冰层有一定融化,出现厚度约 15 cm、体积含水率达到 40% 的富水层。

3.2 气温变化对温度场的影响

图 9 为 2020—2024 年 8 月 26 日 1-1' 测线地温随深度的分布,融深最大时 0°C 地温所在深度可视作多年冻土上限位置,由此得出 2020 年多年冻土上限位于地

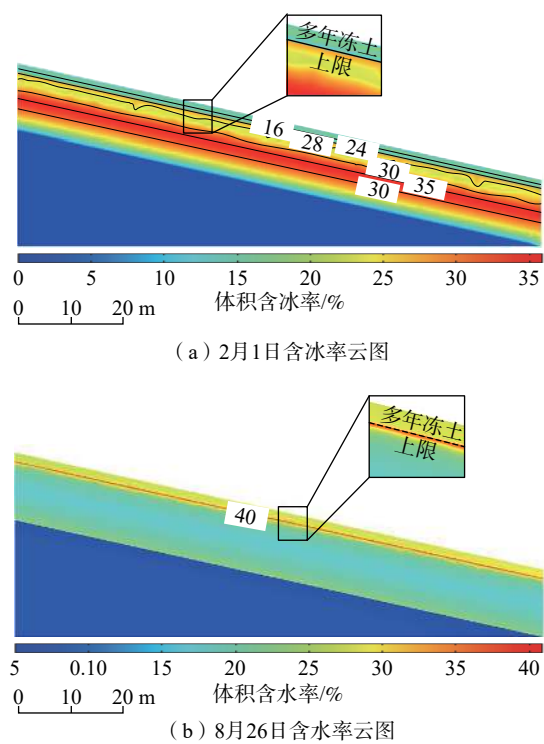


图 8 斜坡含水率和含冰率分布规律
Fig. 8 Water content and ice content distribution law of slope

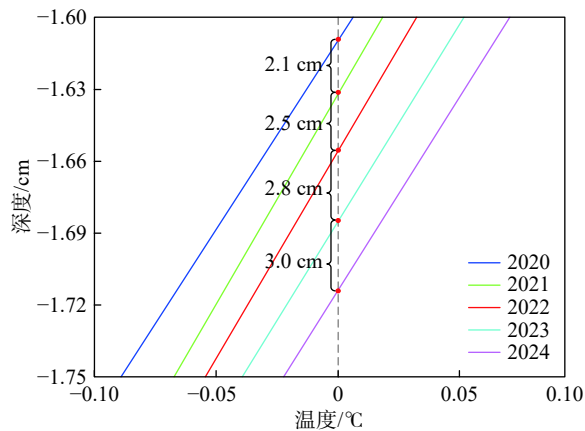


图 9 2020—2024 年 8 月 26 日 1-1' 测线地温随深度分布
Fig. 9 Depth distribution of ground temperature of 1-1' section on August 26 from 2020—2024

表以下 161 cm, 2024 年多年冻土上限位于地表以下 171.4 cm, 下移 10.4 cm, 平均退化速率约 2.6 cm/a; 多年冻土上限下移量逐年增大, 下移量的增幅逐年减小, 说明气温升高对多年冻土退化的影响程度随深度的增加逐渐减弱。

图 10 (a) 和图 10 (b) 分别为 2020—2024 年 8 月 26 日测点 H 处地温和体积含水率, 可以得出: 2020—2024 年测点 H 地温呈升高趋势, 升高速率逐年降低, 平均升高速率为 0.017 °C/a; 2020—2022 年该处土体仍处

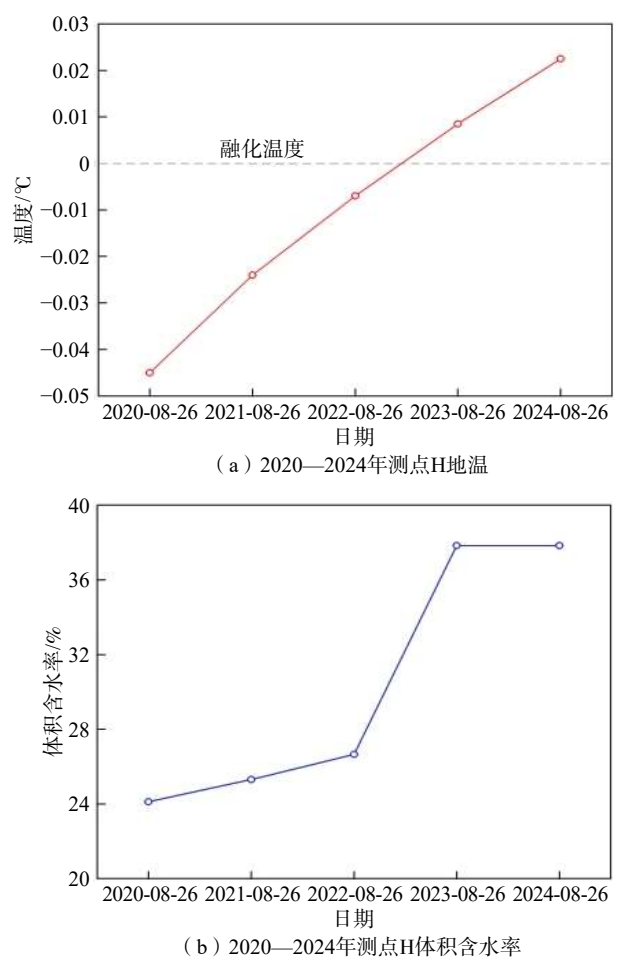
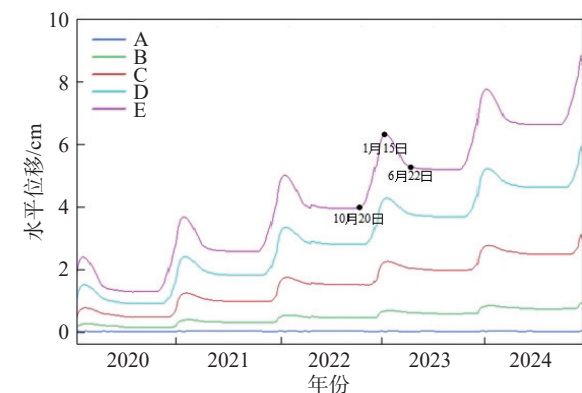


图 10 2020—2024 年测点 H 地温和体积含水率
Fig. 10 Ground temperature and volumetric water content of monitoring point H on 2020—2024

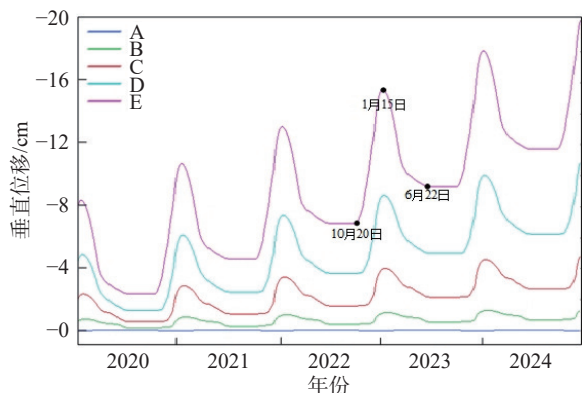
于冻结状态, 由于土体温度升高导致体积含水率增大 3%; 2023 年多年冻土上限将退化至测点 H 以下, 土体完全融化导致含水率突增, 较 2022 年增大 11%; 2024 年含水率相比 2023 年未发生明显变化, 说明气温升高对含水率的影响随着土体完全融化而消失。

3.3 气温变化对变形场的影响

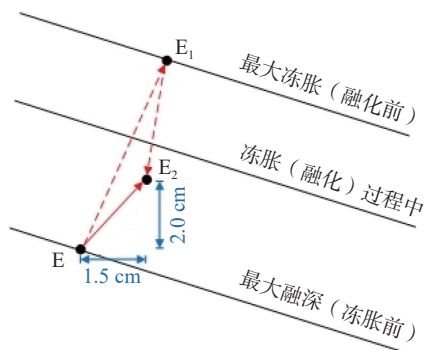
图 11 (a) 和图 11 (b) 分别为 2020—2024 年坡脚不同深度 5 个测点的水平位移和竖直位移变化, 可以得出: 位移随深度的增加逐渐减小, 冻胀融沉循环仅发生在活动层; 以测点 E 为例, 土体自 10 月 20 日起发生冻胀, 1 月 15 日冻胀量达到最大, 水平冻胀位移为 2.5 cm, 竖直冻胀位移为 8.0 cm; 土体随着气温的回升开始融沉, 6 月 26 日融沉量最大, 产生 1.0 cm 的水平融沉位移和 6.0 cm 的竖直融沉位移。图 11 (c) 为测点 E 冻胀融沉位移示意图, E-E₁ 为冻胀变形路径, E₁-E₂ 为融沉回退路径, 测点 E 处的土颗粒经历一次冻胀融沉后运动至 E₂ 处, 产生 1.5 cm 的水平净位移和 2.0 cm 的垂直净位



(a) 2020—2024年测线1-1'上测点A-E水平位移变化



(b) 2020—2024年测线1-1'上测点A-E垂直位移变化



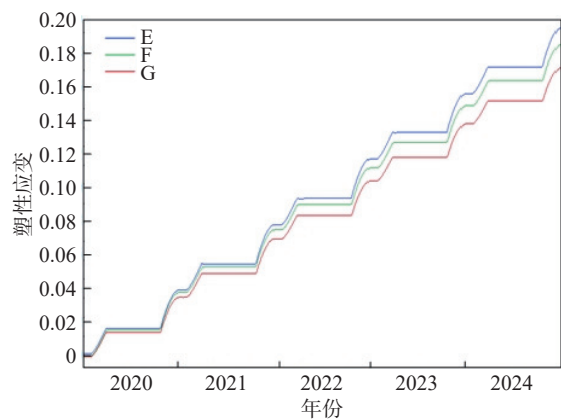
(c) 测点E冻胀融沉位移示意图

图 11 冻胀融沉位移变化规律

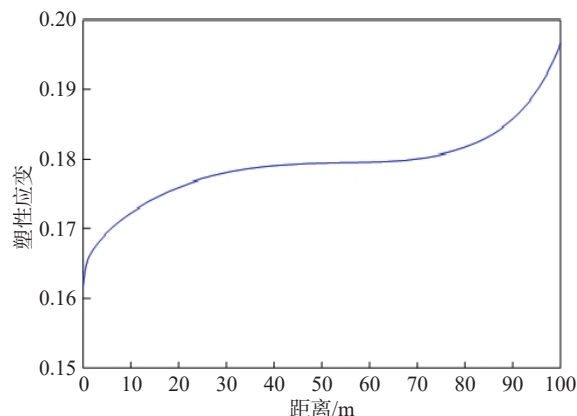
Fig. 11 Displacement variation of frost heaving and thaw settlement

移, 总位移 2.5 cm, 与 Harris 等^[22]通过位移监测得出的 1.6 cm/a 的坡表变形量相近。

图 12 (a) 为 2020—2024 年测点 E、F、G 的塑性应变变化曲线, 可以得出塑性应变在每年的冻胀融沉期间发展, 4—10 月坡表土体完全融化期间塑性应变不发生变化; 塑性应变随时间不断增大, 且坡脚 E 点塑性应变增大的速率最大, 坡顶 G 点最小。图 12 (b) 为 2024 年 12 月测线 2-2' 塑性应变曲线, 可见塑性应变至坡顶至坡脚逐渐增大, 对比图 7 (c) 可以得出塑性应变的分布与体积含水率的分布有关, 5 年间坡脚 E 点产生的塑



(a) 2020—2024年测线2-2'上测点E、F、G塑性应变变化曲线



(b) 2024年12月测线2-2'塑性应变曲线

图 12 塑性应变变化规律

Fig. 12 Variation of plastic strain

性应变比坡顶 G 点大 20.98%。

4 讨论

计算结果显示, 随着土体融化程度增大, 水分自坡顶至坡脚迁移的现象愈发显著, 根据总体积含水率的变化趋势将水分迁移过程分为四个阶段, 其中 5—10 月水分迁移现象尤为显著, 此时青海省处于雨季, 降雨量占全年的 80% 以上^[11], 雨水大量入渗导致融土迅速饱和, 土体应力状态改变^[23]、孔隙水压力增加, 对斜坡稳定性产生威胁。

已有研究表明土体孔隙冰含量上升导致基质吸力和胶结力增大^[24], 2 月活动层土体含冰量达到 18%, 此时土体黏聚力较大, 冻结期斜坡稳定良好; 通过冰分离现象、大气水和融水下渗、冻结初期双向冻结^[25], 多年冻土上限以下出现 0.5 m 厚高含冰量层, 且含冰量有继续增大的可能^[26], 8 月 26 日融深达到最大, 高含冰量层有一定的融化, 产生约 15 cm 厚的富水层, 细粒土排水能力较差, 孔隙水压力难以消散^[17], 发生浅层冻土滑坡的概率增大。

在当地气温以 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 的速度升高的情况下,斜坡多年冻土处于升温退化状态,2020—2024 年多年冻土上限将下移 10.4 cm ,活动层厚度不断增大,夏季上覆融化的土体提供更大的下滑力。随着最大融深的增大,活动层以下的高含冰层有进一步融化的可能,冻融界面含水量大幅度升高,孔隙水压难以消散、抗剪强度大幅下降,水分聚集产生的润滑作用导致抗滑力下降^[6],活动层沿多年冻土层下滑的风险大大上升。

10 月—次年 4 月活动层土体发生冻胀融沉,坡表土体产生 2.5 cm/a 的位移,由此产生的塑性应变不断增大,表明土颗粒间胶结作用随冻融循环次数的增加逐渐减弱,抗剪强度有损失至残余值的可能^[23],塑性应变从坡顶至坡脚逐渐增大,5a 间坡脚产生的塑性应变比坡顶大 20.98% ,土体力学性质劣化显著,且坡脚处容易产生水分聚集,形成薄弱带,进而诱发牵引式浅层冻土滑坡。

5 结论

基于地质灾害遥感解译总结了青海省浅层冻土滑坡分布特征和孕灾条件,采用数值模拟方法考虑当地气候变暖模拟了 2020—2024 年气温变化条件下多年冻土斜坡水热力演化,探讨了气温变化对浅层冻土滑坡失稳的影响,得出以下结论:

(1) 气温变化影响冻结程度,改变土体渗透性,从而控制水分迁移。根据总含水率变化趋势可将水分迁移分为四个阶段,当活动层融化后水分自坡顶至坡脚的迁移现象最显著。

(2) 气温变化影响活动层未冻水的含量,导致土体力学性质存在季节性差异,夏季活动层下的高含冰量层融化产生 15 cm 厚富水层,冻融交界面孔隙水压大幅上升,且气候变暖导致多年冻土上限以 2.6 cm/a 的速度下移,富水层厚度有继续增大的可能,诱发浅层冻土滑坡的风险增加。

(3) 气温周期性变化导致土体水分固液相态不断转换,冰水体积变化导致活动层经历冻胀融沉循环,斜坡表面每年产生数厘米膨胀变形和顺坡位移,表明土体抗剪强度逐渐损失,坡脚土体力学性质劣化程度最明显。

参考文献(References):

[1] LEWKOWICZ A G. Dynamics of active-layer detachment failures, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, Nunavut, Canada [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007,

18(1): 89–103.

- [2] HUSCROFT C A, LIPOVSKY P, BOND J D, et al. Permafrost and landslide activity: Case studies from southwestern Yukon Territory [J]. *Yukon exploration and geology*, 2003: 107–119.
- [3] LEWKOWICZ A G, HARRIS C. Frequency and magnitude of active-layer detachment failures in discontinuous and continuous permafrost, northern Canada [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, 16(1): 115–130.
- [4] LAMOUREUX S F, LAFRENIÈRE M J. Fluvial impact of extensive active layer detachments, cape bounty, Melville Island, Canada [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2009, 41(1): 59–68.
- [5] PATTON A I, RATHBURN S L, CAPPS D M, et al. Ongoing landslide deformation in thawing permafrost [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(16): 1–2.
- [6] 靳德武, 孙剑锋, 付少兰. 青藏高原多年冻土区两类低角度滑坡灾害形成机理探讨 [J]. *岩土力学*, 2005(5): 774–778. [JIN Dewu, SUN Jianfeng, FU Shaolan. Discussion on landslides hazard mechanism of two kinds of low angle slope in permafrost region of Qinghai-Tibet plateau [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005(5): 774–778. (in Chinese with English abstract)]
- [7] RAN Youhua, LI Xin, CHENG Guodong, et al. Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005–2015 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(1): 62–79.
- [8] 梁虹, 张为为, 农华. 青海省气温空间变化特征分析 [J]. *气象研究与应用*, 2017(增刊 1): 52–53. [LIANG Hong, ZHANG Weiwei, NONG Hua. Analysis of spatial variation characteristics of air temperature in Qinghai Province [J]. *Journal of Guangxi Meteorology*, 2017(Sup 1): 52–53. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘广岳, 谢昌卫, 杨淑华. 青藏公路沿线多年冻土区活动层起始冻融时间的时空变化特征和影响因素 [J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1067–1078. [LIU Guangyue, XIE Changwei, YANG Shuhua. Spatial and temporal variation characteristics on the onset dates of freezing and thawing of active layer and its influence factors in permafrost regions along the Qinghai-Tibet highway [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1067–1078. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 魏赛拉加, 严慧珺, 张俊才, 等. 青海省地质灾害防治资金投入与成效分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(5): 112–116. [WEI Sailajia, YAN Huijun, ZHANG Juncai, et al. Analysis of funding used for geological disaster prevention in Qinghai Province and its effects [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(5): 112–116. (in Chinese with English abstract)]

- [11] MCKENZIE J M, VOSS C I. Permafrost thaw in a nested groundwater-flow system [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 299 – 316.
- [12] 庞伟军, 常刚, 苟海瑞, 等. 青海204省道祁默段沿线多年冻土发育特征 [J]. *冰川冻土*, 2019, 41(1): 93 – 99. [PANG Weijun, CHANG Gang, GOU Hairui, et al. Characteristics of the permafrost from Qilian to mole of the highway 204 in Qinghai Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 93 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 庞强强, 赵林, 李述训. 局地因素对青藏公路沿线多年冻土区地温影响分析 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 349 – 356. [PANG Qiangqiang, ZHAO Lin, LI Shuxun. Influences of local factors on ground temperatures in permafrost regions along the Qinghai-Tibet highway [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 349 – 356. (in Chinese with English abstract)]
- [14] WANG Baolin, NICHOL S, SU Xueqing. Geotechnical field observations of landslides in fine-grained permafrost soils in the Mackenzie valley, Canada *Landslides*, 2005: 203 – 212.
- [15] 樊圆圆, 宋玲, 魏学利. 基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析: 以中巴公路艾尔库然沟为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(1): 1 – 9. [FAN Yuanyuan, SONG Ling, WEI Xueli. Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(1): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [16] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil [J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(5): 1314 – 1323.
- [17] 白青波. 附面层参数标定及冻土路基水热稳定数值模拟方法初探 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016. [BAI Qingbo. Determination of boundary layer parameters and a preliminary research on hydrothermal stability of subgrade in cold region [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 邓友生, 何平, 周成林, 等. 含盐土渗透系数变化特征的试验研究 [J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 772 – 775. [DENG Yousheng, HE Ping, ZHOU Chenglin, et al. Experimental study of permeability coefficient of saline soils [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 772 – 775. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张虎, 张建明, 张致龙, 等. 冻结状态青藏粉质黏土的渗透系数测量研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(6): 1030 – 1035. [ZHANG Hu, ZHANG Jianming, ZHANG Zhilong, et al. Measurement of hydraulic conductivity of Qinghai-Tibet Plateau silty clay under subfreezing temperatures [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 1030 – 1035. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 刘为民, 何平, 张钊. 土体导热系数的评价与计算 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 770 – 773. [LIU Weimin, HE Ping, ZHANG Zhao. A calculation method of thermal conductivity of soils [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 770 – 773. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣. 季节性冻土地区高速铁路路基地温分布规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1286 – 1296. [ZHANG Yuzhi, DU Yanliang, SUN Baochen. Temperature distribution in roadbed of high-speed railway in seasonally frozen regions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1286 – 1296. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 白明, 牛丽娟, 魏荣妮. 近58年来祁连山中段气温时空变化 [J]. *青海气象*, 2019(2): 12 – 14. [BAIMing, NIULijuan, WEI Rongni. Temporal and spatial variation of air temperature in the middle Qilian Mountains in recent 58 years [J]. *Journal of Qinghai Meteorology*, 2019(2): 12 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李同录, 李颖喆, 赵丹旗, 等. 对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 25 – 32. [LI Tonglu, LI Yingzhe, ZHAO Danqi, et al. Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 25 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 晏长根, 王婷, 贾海梁, 等. 冻融过程中未冻水含量对非饱和粉土抗剪强度的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(6): 1252 – 1260. [YAN Changgen, WANG Ting, JIA Hailiang, et al. Influence of the unfrozen water content on the shear strength of unsaturated silt during freezing and thawing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(6): 1252 – 1260. (in Chinese with English abstract)]
- [25] HARRIS C, LEWKOWICZ A G. An analysis of the stability of thawing slopes, Ellesmere Island, Nunavut, Canada [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(2): 449 – 462.
- [26] HINKEL K M. Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in northern Alaska, 1995 – 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D2): 8168.