https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.166

热融滑塌形态特征、演化过程和稳定性模拟综述

郝君明[1],钟积身[1],贾佩钱[3],吴通华[2],陈 杰[2]

1. 兰州理工大学土木与水利工程学院,甘肃兰州 730050
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学与冻土工程重点实验室,甘肃兰州 730000
3. 中国水利水电第四工程局有限公司,青海西宁 810000

摘 要: 在全球气候变暖的背景下,加速退化的多年冻土降低了边坡稳定性,诱发热融滑塌等冻土灾害,严重威胁寒区的工程稳定性和生态环境安全.然而,当前学界对热融滑塌形态特征与演化过程的认知仍不充分,且模型模拟方法体系和适用性缺乏系统综述.因此,结合多年野外考察和文献资料,从热融滑塌的形态特征、演化过程、失稳机理和模拟方法4个方面进行了综述.研究发现:(1)热融滑塌形态特征可以划分为11种不同的类型,其空间分布与地形地貌、冻土环境条件和发育过程相关;(2)热融滑塌演化过程经历了地表裂缝、活动层剥离滑动、多旋回性退缩和逐渐趋于稳定等4个阶段,主要受到地下冰和极端气候事件影响;(3)热融滑塌失稳是热-水-力场相互作用的结果,应力场作用下影响水热传导,温度场和水分场决定空隙水压力来影响应力场,改变边坡稳定性;(4)极限平衡、数值模拟和不确定性是主要的冻土稳定性模拟方法,各有优缺点.本研究有助于认识和理解热融滑塌的现象和过程,对揭示冻土-气候-地貌交互机制具有重要意义,为寒区地貌学、冻土力学等学科理论体系的完善提供支撑.

关键词: 热融滑塌;形态特征;演化过程;边坡稳定性模拟;多年冻土;环境地质.

中图分类号: P694 **文章编号:** 1000-2383(2025)12-4919-19 **收稿日期:** 2025-07-16

A Review of Retrogressive Thaw Slumps Characteristics, Evolution, and Permafrost Stability Analysis Methods

Hao Junming[1], Zhong Jishen[1], Jia Peiqian[3], Wu Tonghua[2], Chen Jie[2]

1. *School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*
2. *Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibet Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*
3. *Sinohydro Engineering Bureau No.*4, *Xining* 810000, *China*

Abstract: Under global climate warming scenarios, permafrost degradation has triggered retrogressive thaw slumps, posing threats to engineering infrastructure and ecological security in cold regions. However, many scholars lack sufficient understanding of the morphological characteristics and evolutionary processes of RTSs (retrogressive thaw slumps), and the applicability of simulation models has not been systematically summarized. In this study, RTSs from four perspectives: morphology, evolution, destabilization mechanisms, and simulation methods, based on field investigation and literature analysis. The main findings include: (1) The morphological characteristics of RTSs can be classified into 11 types, and their spatial distribution is associated

基金项目: 中国科学院"西部之光-西部交叉团队"重点实验室专项(No.xbzg-zdsys-202304);国家自然科学基金(No.42461019);甘肃省科技重大专项(No.23ZDFA007);甘肃省科技专员专项(No.24CXGA063);兰州市青年科技人才创新项目(No.2024-QN-170).

作者简介: 郝君明(1981-),男,博士,副教授,主要从事冻土灾害机理和监测研究. ORCID:0000-0002-9172-9344. E-mail:haojm198@lzb.ac.cn

引用格式: 郝君明,钟积身,贾佩钱,吴通华,陈杰,2025.热融滑塌形态特征、演化过程和稳定性模拟综述.地球科学,50(12):4919-4937.

Citation: Hao Junming, Zhong Jishen, Jia Peiqian, Wu Tonghua, Chen Jie, 2025. A Review of Retrogressive Thaw Slumps Characteristics, Evolution, and Permafrost Stability Analysis Methods. *Earth Science*, 50(12): 4919-4937.

with topographic features, permafrost conditions, and developmental stages. (2) The evolution of RTSs experiences four stages: surface cracking, active layer detachment, polycyclic recession, and gradual stabilization, mainly affected by ground ice and extreme climatic events. (3) The instability of RTSs is the result of the interaction among thermal-hydrological-mechanical fields. Under the influence of the stress field, moisture and heat transfer are affected, while the temperature and moisture fields determine the pore water pressure, which in turn influences the stress field and change slope stability. (4) The limit equilibrium method, numerical simulation, and uncertainty analysis are the main methods for simulating permafrost stability, each with its own advantages and limitations. This study enhances the understanding of the phenomena and processes of RTSs. It is of great significance for revealing the interaction mechanisms among permafrost, climate, and geomorphology, and provides support for the improvement of theoretical frameworks in cold-region geomorphology, permafrost mechanics, and related disciplines.

Key words: retrogressive thaw slumps; morphological characteristics; evolution process; model of permafrost stability; permafrost; environmental geology.

0 引言

多年冻土是指温度在0 ℃或低于0 ℃至少连续存在两年的岩土层(Zhao *et al.*, 2010),是特定历史气候的产物.气候变化加剧多年冻土的退化,具有明显的时空异质性和临界点效应(罗栋梁等,2024),并影响活动层的水热过程.由此引发土壤力学结构和力学性质变化,进而形成不同的冻土灾害和热融喀斯特景观(Hjort *et al.*,2018).这种现象广泛分布于北极和青藏高原地区,对周边环境产生显著影响(Kokelj and Lewkowicz,1999).冻土边坡长期的冻融蠕动、热融沉降和冻胀等过程,会导致冻土区建筑物的损坏和高速公路形变(Hjort *et al.*,2018).多年冻土是影响冻土区生态和工程建筑的重要环境因子,其退化和地下冰的融化将导致热喀斯特地貌发生,例如,泥流、滑塌、冰椎等现象.这会对地表建筑设施和生态环境造成严重破坏(李艳等,2022).

热融滑塌的形成和发生与高温多年冻土和地下冰融化有关,由后壁以及后壁地下冰融化的坍塌物形成块体和泥流组成,具有发展时间短而迅速的特点(Nesterova *et al.*,2024).地下冰一旦暴露后壁快速退缩,在北极地区,其速度可达 5~15 m/a (Lewkowicz and Way,2019),而青藏高原地区大多小于5 m/a(王绍令,1990).表1列举了部分主要冻土区热融滑塌的后壁、面积等变化情况.热融滑塌的后退速度与后壁高度、地下冰含量及气候条件等因素有关,对草场和道路造成破坏,加剧冻土退化(Gong *et al.*,2019;马伟东等,2020).多数热融滑塌可持续 30~50 a 逐渐趋于稳定(Burn and Friele, 1989),对区域环境造成持续和反复的影响.因此,热融滑塌的形成发育和气候响应关系备受广大学者关注.但是由于运动周期性和缺乏长期的连续观测,目前国内外多以个案短期观测研究为主,很难掌握其普适规律.同时,热融滑塌是局部的地形扰动,当空间密度达到一定程度时,就会影响河流物质输移、海岸侵蚀以及碳循环过程(Lantuit and Pollard,2008;Teufel and Sushama,2019).这种不可逆的多年冻土变化和快速增加的趋势对区域气候、水文和地貌过程产生了显著影响,直接或间接影响自然生态环境和人类社会系统(Jin *et al.*,2022).

热融滑塌是多年冻土边坡失稳的一种模式(李艳等,2022),可视为冻土斜坡在扰动条件下发生的热-水-力耦合失稳过程.冻土边坡失稳研究前后经历了一个多世纪的发展,其重点逐步由现象描述转向机理揭示,再到理论建模和工程应用的深化.早在1897年,国外已有过冻土边坡的描述,到20世纪70年代前后国外学者相继提出了边坡冻融泥流现象、冰缘泥流、滑坡等冻土边坡失稳灾害类型(Hutchinson, 1974; Pufahl and Morgenstern, 1979; Abrahams *et al.*,1996). 20世纪80年代前后,研究重点逐渐转向冻土蠕变特性、热传导机制与水分迁移行为以及孔隙水压力(Hutchinson,1974;Mcroberts and Morgenstern,1974).Taylor and Luthin (1978)通过室内试验对冻土温度场的变化原因进行了研究,认为冻土中热量的差异和改变引起水分的迁移与转化,使得土体的热物理参数发生改变形成了早期水-热双场分析框架.此阶段也开始关注冻土边坡在热扰动下的变形演化,例如阿拉斯加与北极地区工程案例中对斜坡稳定性变化的实测研究(Wu, 1984).2000年前后,随着计算机算力的提升与冻土边坡理论的发展,国内外学者开始搭建热-水-力三场耦合理论体系.有限元法(finite element method,FEM)与数值模拟技术被广泛引入边坡稳定性

表 1　部分冻土区热融滑塌发育情况

Table 1　Development status of retrogressive thaw slumps in some permafrost regions

地区	时间跨度(a)	后壁退缩速率(m/a)	面积扩张速率(m^2/a)	参考文献
祁连山北部	2009—2017	1.81	5～290	Mu *et al*.(2020)
风火山北部	1974—1985	2.7	—	王绍令(1990)
北麓河以南可可西里以北	2011—2013	1.83	46	Niu *et al*.(2012)
阿拉斯加诺阿塔克河流域	2011—2012	11.78	—	Swanson and Nolan(2018)
加拿大育空地区	1952—2000	0.45～0.61		Lantuit and Pollard(2008)

分析.Ugai and Leshchinsky (1995)验证了有限元强度折减法在三维空间中冻土边坡稳定性研究中的可靠性.李宁等(2003)推导出冻土四相介质的水热力耦合问题的微分方程，这四相介质包括冻土骨架、冰、水和气，并开发出了计算饱和与准饱和冻土三场耦合问题的有限元分析软件.进入21世纪后，研究进一步转向理论模型的工程化应用，主要集中在耦合模型的构建与应用，特别是工程背景下斜坡的变形行为、温度场及应力场变化等问题(Santander and Bubnovich, 2002；靳德武等，2005；武鹤等，2005；毛雪松等，2006；牛富俊等，2006；程永春等，2010).21世纪10年代以来，冻融循环作为影响边坡稳定的关键过程受到广泛关注.冻土边坡研究进入精细化建模与定量化分析阶段，冻融次数、软弱结构面的演化规律及其对强度参数(如抗剪强度、黏聚力与内摩擦角)的影响也成为了研究的重点.Zhang and Michalowski(2015)在热－水－力耦合模型中引入了土体弹塑性本构模型，实现了冻土边坡的冻融全面有限元计算.李智明(2017)综合分析了土体含水量和冻融循环次数对边坡稳定系数的影响规律；王淼等(2018)通过对季冻区典型细粒土研究得出了关于抗剪强度参数的冻融循环修正系数，对季冻区土体参数取值提供了一种新的方式.21世纪20年代后，冻土边坡研究从传统耦合分析转向气候变化驱动下的退化过程监测、机理模拟与预测方法(韩炳鑫等，2025；张永顺等，2025).冻土边坡稳定性研究经历了从早期的现象观察到多场耦合的系统演进，逐步形成了热－水－力耦合的理论体系与数值模拟方法.热融滑塌作为冻土边坡失稳的一种表现形式，反映了在气候变暖背景下地下冰融化、水分迁移和力学响应共同作用下的失稳过程.

热融滑塌不仅反映了气候变化的进程，同时也对受影响区域的人类基础设施和生态系统构成了严重威胁.尽管热融滑塌的研究数量很多，但不同文献中关于热融滑塌不同形态特征的术语描述仍然存在一定差异.在而在冻土工程边坡稳定性分析过程中，考虑土体冻胀和融沉的影响，无论是传统的极限分析法，还是数值分析法，都不能直接简单地应用到冻土边坡失稳的理论分析中.开展冻土斜坡失稳相关研究，有助于保护冰缘地质环境，推动山地资源的合理开发与利用，促进区域的可持续发展.因此，综上所述，本文通过总结热融滑塌和冻土边坡失稳相关文献，对以下3个方面进行了探讨：(1)热融滑塌形态特征和演化过程及其与气候的响应关系，(2)热－水－力耦合过程下的冻土边坡失稳机理，(3)冻土边坡稳定性模拟方法.

1　热融滑塌形态特征和演化过程及其对气候变化的响应

1.1　热融滑塌形态特征

热融滑塌具有多种形态特征，其中后缘、陡坎、后壁和滑塌面是所有热融滑塌共有的典型特征，而其他特征则可能仅出现在特定类型的热融滑塌中，并取决于其所在地的地貌条件(Nesterova *et al*., 2024).从形态特征和演化过程来看，热融滑塌面可划分为3个部分：溯源侵蚀区、泥流区、前缘堆积区.溯源侵蚀区是地下冰暴露和块体坍塌，为泥流区和堆积区提供物质来源的区域.泥流区为滑塌块体滑动，细颗粒物质和水体流动的特征.前缘堆积区坡脚陡峻，地表呈现褶皱状形态，由活动层剥离滑塌块体堆积而成.当前热融滑塌的各种形态特征容易混淆，因此我们根据已有研究，结合地形地貌、冻土环境条件和发育过程总结了青藏高原地区热融滑塌常见的11个形态特征，如图1所示.

野外环境下各形态的位置、特征和中英文名称对应关系如下：(1)后缘(狭义的Headwall)：热融滑塌最靠后的边缘部位，通常表现为近垂直或垂直的陡坡，主要由少量含冰土壤和活动层组成(Lantuit and Pollard, 2005)，是后壁的一部分.(2)陡坎

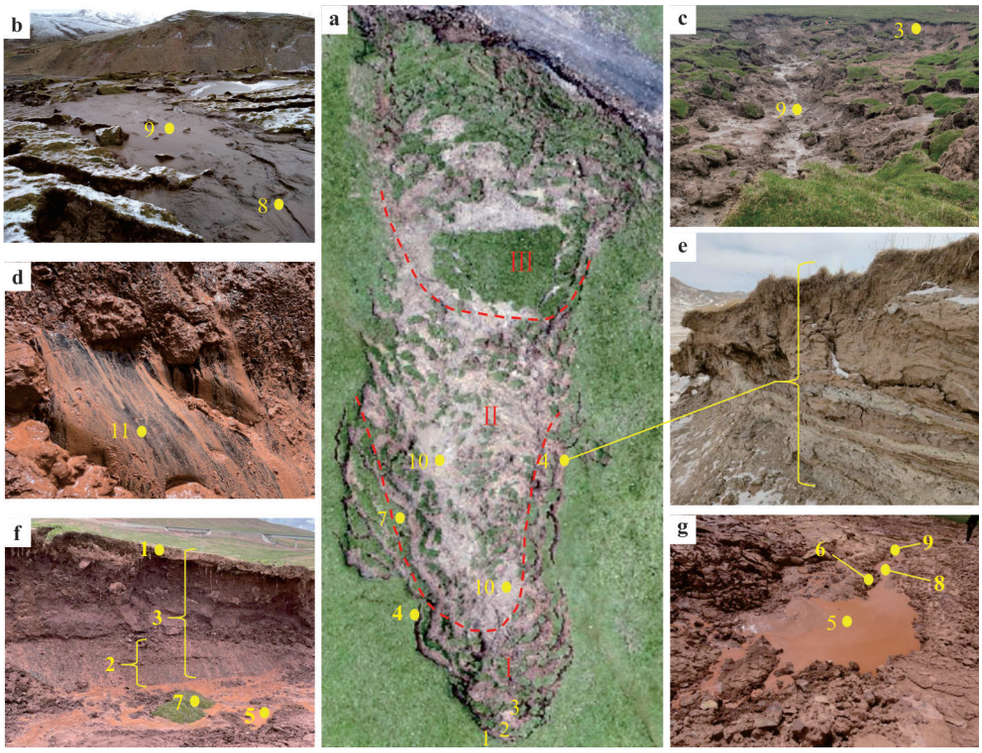

图 1　青藏高原地区热融滑塌的形态特征

Fig.1　Characteristics of retrogressive thaw slumps in the Wenquan, Qinghai-Tibet Plateau

a.热融滑塌区域其中Ⅰ为溯源侵蚀区，Ⅱ为泥流区、Ⅲ为前缘堆积区；b.热融滑塌前缘堆积区；c.热融滑塌溯源侵蚀区和泥流区；d.裸露的地下冰；e.热融滑塌侧壁；f.热融滑塌后壁；g.热融滑塌后壁附近，手机拍摄的照片；热融滑塌形态特征：1.后缘；2.陡坎；3.后壁；4.侧壁；5.泥洼；6.泥堤；7.滑塌块体；8.泥流；9.泥流通道；10.滑塌面；11.裸露的地下冰

(Headscarp)：是热融滑塌后缘的下部区域，由暴露的富冰沉积物或大块地面冰构成，倾斜角度较大，是冰暴露最集中的地貌特征，也是后壁的一部分.(3)后壁(广义的 Headwall)：指在热融滑塌形态学上部分的陡峭壁面，从地表活动层延伸至下部富冰层，通常包括后缘和陡坎，是热融滑塌最具代表性的地貌之一.(4)侧壁(Sidewall)：指的是热融滑塌两侧的陡峭壁体，其结构与后壁相似，通常仅出现在长条状或半圆形的滑塌形态中(Lewkowicz, 1987a).(5)泥洼(Mud pool)：位于滑塌底部、紧邻后壁处的低洼区域，常呈泥泞状，积水明显，属于泥流起源区之一(Lantuit and Pollard, 2005).(6)泥堤(Mud levees)：是沿泥流两侧自然沉积形成的堤状高地，由泥沙干化堆积而成，具有导流或边界功能.(7)滑塌块体(Slump block)：指在滑塌过程中，由于后壁后缘滑动或重力作用而整体脱落下滑的、含有植被覆盖的土块或活动层土体(Kokelj *et al.*, 2015).(8)泥流(Mudflow)：指从泥浆池或其他泥源区沿滑塌斜坡向下流动的饱和泥沙混合物流体；9)泥流通道(Mud gullies)：是泥流反复冲刷与堆积形成的线性凹陷地形，具有引流和物质输送功能(Lantuit and Pollard, 2005).(10)滑塌面(Slump floor)：由于热融滑塌后壁不断往后退缩而形成的低角度坡面(Lacelle *et al.*, 2010).(11)裸露的地下冰(Exposed ground ice)：由于热融滑塌等地表扰动，导致覆盖在多年冻土上的土壤层被移除，被暴露出来的地下冰.

热融滑塌在全球多年冻土区广泛分布，主要发育于富冰多年冻土区.其分布具有明显的地域性、地形依赖性及环境敏感性，主要集中在地下冰含量高、地表水活跃、冻土稳定性差的区域.但不同区域由于环境和地貌的差异，其形态特征会有明显的地域性.青藏高原的多年冻土为中低纬度高海拔类型，活动层为 2～3 m(Qin *et al.*, 2017)，地下冰以透镜状或层状为主，厚度差异大.热融滑塌多发生在中高山盆地，规模较小但受气候变化和工程活动双重影响.其形态和演化过程因纬度较低和气温相对较高，受气候与地表水活动影响更为显著.然而，北极地区属于高纬度多年冻土，地下冰含量高、分布连续，常以冰楔或巨型冰体形式存在.热融滑塌多集中分布于高冰含量区、连续多年冻土带及受工程

扰动区域，规模较大．受水蚀作用影响，其在沿海或湖岸阶地的富冰多年冻土区广泛发育；同时，受冰楔状结构影响，热融滑塌形态常呈规则的圆弧状．尽管北极与青藏高原热融滑塌形态特征各异，但其中后壁、滑塌面和泥流是构成热融滑塌最基本的形态特征．

1.2　热融滑塌形成和发展过程

热融滑塌是一种典型且广泛分布于多年冻土区的斜坡失稳地貌，通常由于富冰多年冻土的融化或大块地下冰的消融，引发地形快速下沉和侵蚀而形成，具有明显的季节性：冬季停止，夏季活跃．整个过程可能持续数年、数十年，甚至更长时间，才逐渐稳定下来．边坡与地下冰是热融滑塌形成的基础条件．一般非冻土斜坡失稳可能会随着坡度的增大而增大（Günther *et al.*，2013），而热融滑塌多发育在含冰量高的低角度冻土凸形边坡．如果凹形坡底部受到河流冲刷、人工开挖等破坏，会增加热融滑塌发生的风险．原生边坡因长期冻融作用易积累地下冰，而热融湖塘溃决后形成的边坡，因坡脚掏空和应力重分布更易失稳．此外，坡向通过影响太阳辐射与含冰量的作用关系，导致青藏高原热融滑塌集中于阴坡，北极则多见于阳坡．地下冰则是在多年冻土形成过程中，由地表水或地下水在土层中不断迁移并在冻结界面富集，经过多年冻结－融化－再冻结的过程，逐渐积累而成（程国栋，1982）．在青藏高原地区，热融滑塌通常由工程扰动、极端气候事件或季节性冻融过程引发的活动层剥离所导致，其演化过程主要受地下冰厚度、气温及降水的综合影响；而北极地区的热融滑塌除气候和工程等因素外，还与海岸侵蚀、河流侵蚀、森林火灾等外部扰动密切相关．因此，我们综合热融滑塌运动特征和影响因素，将热融滑塌的演化过程划分为4个阶段，如图2．

随着气候的逐渐变暖，降水逐渐增加，持续的升温使得活动层增厚，地下冰融化，融水沿地势流向低海拔地区，此时多年冻土地表出现持续的沉降．Wang *et al.*（2023）研究结果表明，长期沉降是因为地下冰的融化而不是活动层的增厚所致．斜坡上的多年冻土受季节性冻胀与融沉的影响，使整个坡面发生缓慢向下的位移．同时，降水使活动层的含水率不断增加，导致土体重量增加．地表融水不断渗透至地下冰顶部土层，并在冰－土界面聚集，使孔隙水压力持续升高，多年冻土层附近的土壤达到饱和或超饱和状态．积聚在冰－土界面的水起到润滑作用，孔隙水压力的增加（Weeks，1969），降低了土体的剪切强度，同时地下水的浮力也降低土体有效

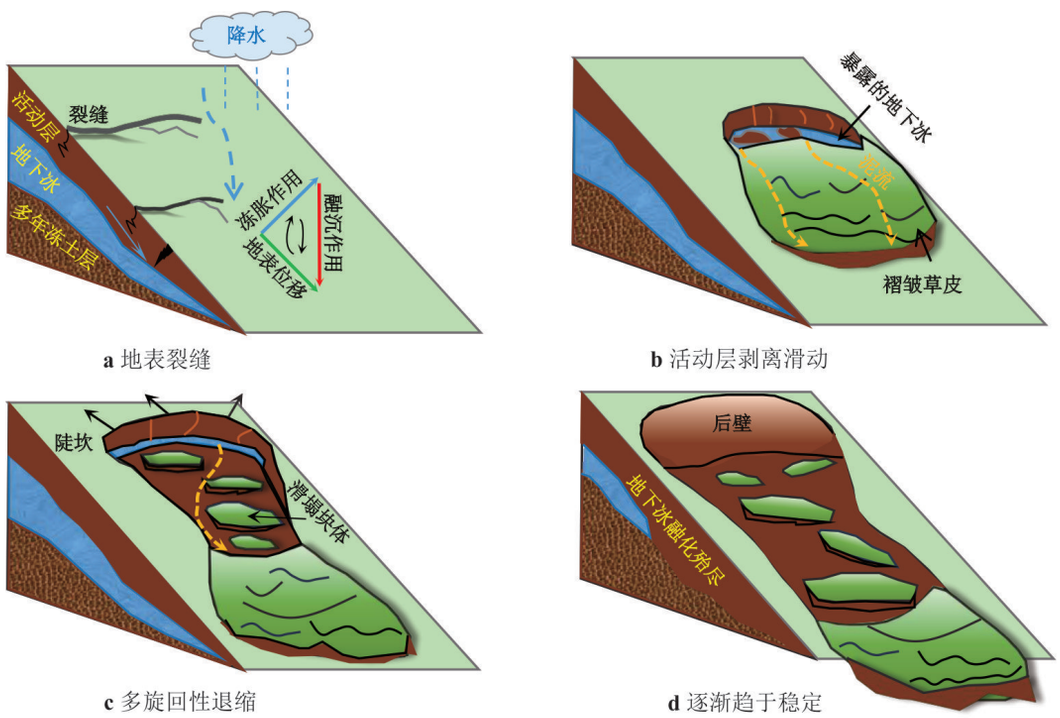

图2　热融滑塌演化过程

Fig.2　Evolution process of retrogressive thaw slumps

应力(Harris *et al.*,2001).如果此时出现极端气候事件,平衡被打破(Harris *et al.*,2001),从而发生活动层剥离事件,导致地下冰暴露,这种现象广泛分布在北极地区和青藏高原,如图3.多数学者也普遍认为,地下冰在多种自然或人为因素影响下暴露并融化,是引发热融滑塌的主要原因.在北极地区,地下冰暴露的主要原因包括河流冲刷、海岸侵蚀以及森林火灾烧毁腐殖层等(Burn and Lewkowicz,1990).1952年至2006年期间,加拿大北部赫歇尔岛因受海岸侵蚀影响,热融滑塌面积增加了162%(Lantuit and Pollard,2008).阿拉斯加地区的森林火灾加速多年冻土的融化,引发热融滑塌事件(Swanson,2021).青藏高原地区,活动层剥离滑动是引发热融滑塌的最主要原因(Luo *et al.*,2022).暴露后的地下冰在夏季逐渐融化.在热融滑塌后壁处,覆盖在地下冰顶部的土壤失去支撑力并产生张力,在后壁的上部形成裂缝.当裂缝贯穿至整个活动层时,土壤在重力作用下发生坍塌,后壁暴露出新的地下冰.坍塌的过程使地下冰反复暴露和融化,重复持续向上发展,造成溯源侵,热融滑塌范围不断扩张.由于气候条件和地理位置的影响,表现出来的形状特征有马蹄形、舌型、长条型和圈椅型,且后壁后退的速率大小不一,有每年几米到几十米不等.这一过程一直持续到暴露的地下冰完全融化,或者暴露的地下冰完全被坍塌的土壤覆盖,热量无法传导至地下冰(Burn and Friele,1989),从而使得缓坡和坡底逐渐趋于稳定.一旦热融滑塌稳定,先锋植被便开始在滑塌底部生长.稳定后的热融滑塌中的植被可能经历多个演替阶段.Brooker *et al.*(2014)将北极热融滑塌的这一演化过程划分为3个阶段:(1)活跃期:滑塌物质呈泥浆流状活动;(2)稳定期:滑动区域趋于干燥,植被由草本向灌木演替;(3)退化期:失稳坡面上的植被逐渐恢复,与周围景观趋于一致.Mu *et al.*(2020)将俄博岭地区的热融滑塌分为初始阶段、快速发展阶段及稳定阶段.但当前划分热融滑塌发展阶段的依据,仍然不够清晰.

1.3 热融滑塌对气候变化的响应

热融滑塌的形成和发育与区域的气候密切相关,气候变暖会加速多年冻土的退化影响稳定性,进而增加热融滑塌发生的频率,尤其是在极端气候条件下能直接诱发热融滑塌事件.1979—2012年,青藏高原地区气温平均每年上升0.42 ℃(Wang *et al.*,2017),降水也呈现出上升的趋势(马伟东等,2020).北极的高山及高海拔多年冻土区也呈现出显著的升温趋势,其增温速率是全球平均气候变暖的两倍(Pepin *et al.*,2015).气候的变暖,使得多年冻土严重退化,加速地下冰融化,从而引发热融滑塌灾害.有相关研究表明,未来50年内青藏高原将有约13.5%的多年冻土发生退化(南卓铜等,2004).

多年冻土边坡在季节性冻胀融沉的循环作用下,会逐渐形成地表裂缝.当温度在夏季升高时,多年冻土膨胀,产生水平方向的压应力,邻近土体被挤压抬升.夏季的降水会沿着地表裂缝渗透活动层深处,热量逐渐传导至活动层深处,引发深层处的活动层和地下冰融化.此时如果发生极端气候事件,融水渗透至多年冻土顶部,导致孔隙水压力升高,诱发活动层剥离滑动事件(Lewkowicz and Harris,2005).当地下冰暴露后,在高温作用下加速多年冻土融化,推进热融滑塌的演化过程.此后,长期的气候变化,使得活动层逐渐增厚,夏季融化程度加深、冬季冻结深度下移,导致多年冻土区季节性冻融过程的幅度进一步增强,在热融滑塌后壁附近地面的温度高于周围未受扰动区域,滑塌区内产生了横向热通量,从而加速了后壁的退缩速率(Niu *et al.*,2012),并促使热融滑塌区不断扩张(Lewkowicz,1987b).气候变暖能够诱发局部或区域大规模的热融滑塌,表现出集群效应.1984—2015年加拿大地区因持续升温热融滑塌数量增长了60倍,2011—2012年夏季异常的高温天气引发了热融滑塌事件,加拿大北部热融滑塌从不到100个增加超过200个(Jones *et al.*,2019).夏季的降水通过降雨和融雪将热量带入热融滑塌内部,同时降雨会促进后壁和侧壁裂缝的形成和扩展,并促进更多地表冰的暴露(牟翠翠等,2013).还可以通过水流搬运作用,使后壁处覆盖在地下冰表面的厚层土壤逐渐变薄,从而使热量得以再次传导至地下冰,进一步加速其融化(Kokelj *et al.*,2015).雨水的渗透还可能导致地下水位的抬升,降低多年冻土斜坡的稳定性,冻融界面累积的融水产生的润滑作用还可能导致该界面黏聚力和有效应力降低,从而发生坍塌.虽然长期的气候变暖或持续的降水可能是热融滑塌形成的原因,但仍需要短期的天气模式或特定的气候事件诱发热融滑塌形成,比如极端降水或者极端气温(Lacelle *et al.*,2010).极端气候对热融滑塌的影响主要表现为夏季或春季异常气温或降雨事件打破热-水-力平衡,诱发活动层剥离滑动.2008—2017年,北麓河地区因丰富的降水和异常的高温天气,热融滑塌的数量和面积分别增加了253%和617%,热融滑塌总面积达到了9.37 km^2(Luo *et al.*,2019).

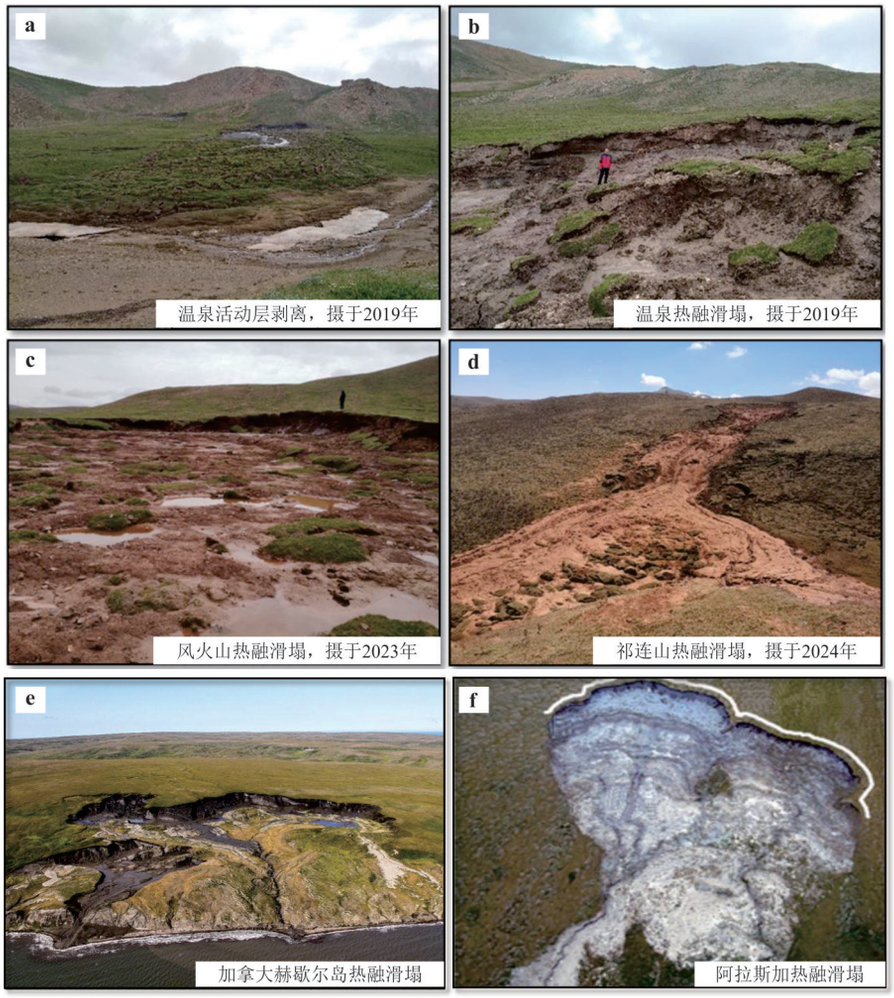

图 3　青藏高原与北极地区活动层剥离和热融滑塌

Fig.3　Active layer detachment and retrogressive thaw slumps on the Qinghai-Tibet Plateau and Arctic region

a. 温泉地区活动层剥离；b. 温泉地区热融滑塌；c. 风火山热融滑塌；d. 祁连山热融滑塌；e. 加拿大赫歇尔岛海岸侵蚀热融滑塌(Obu*et al.*，2016)；f. 阿拉斯加热融滑塌(Balser *et al.*，2014)

2　热－水－力耦合过程下的冻土边坡失稳机理

冻土与融土不同，冻土是由土颗粒、冰、未冻水和气体组成的四项体系，是一个受多种因素影响、随时空变异的复杂的动态系统(Zhang，2005)．由于其复杂性，如果仅从单一或两个物理变量出发分析其失稳机理，会存在较大局限．因此，应从多场耦合的视角出发，综合考虑水分场、温度场与应力场之间的相互作用，以更全面、真实地揭示其失稳过程．边坡冻土的融化过程涉及多个场之间的相互作用，如图 4．其中，水分场、温度场和力学场相互作用并彼此影响．

2.1　温度场－水分场相互作用

当外界温度低于土体中自由水的冰点时，土体中原位水开始冻结；由于温度梯度现象以及重力的作用，水分从温度较高的一侧向较冷的一侧迁移(Philip and De Vries，1957)．此外，在水分迁移驱动力的作用下，未冻区的水分将迁移到冻结锋面处形成分凝冰(O′neill and Miller，1985)，水分的迁移使得冻土内空间位置的含水量发生变化，使得土体水分场发生改变(Harlan，1973；O′neill and Miller，1985)．水的渗流和冰水相变会伴随热量的交换，导致温度场的改变(Harlan，1973)．

2.2　水分场－应力场相互作用

在分凝冰的形成时，冻结锋面处的土骨架受到了拉力的作用产生了裂缝，水分积聚形成冰透镜

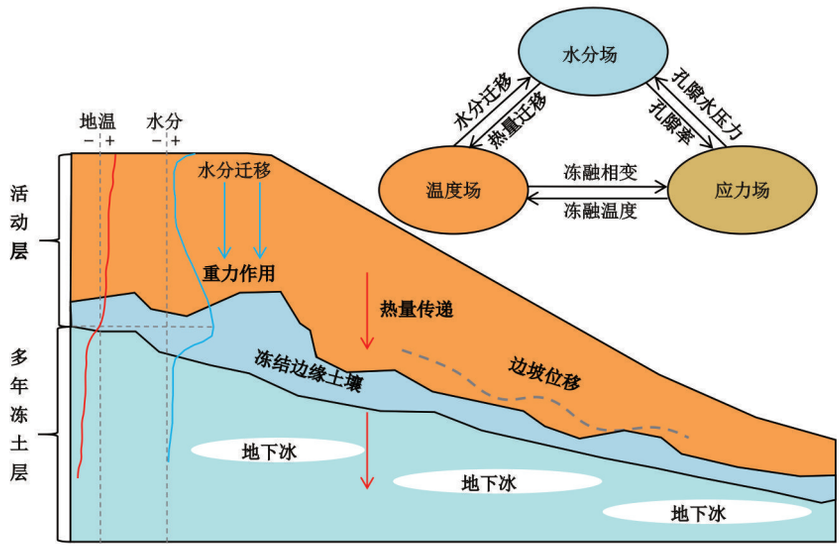

图 4　水分场－温度场－应力场耦合作用示意

Fig.4　Schematic diagram of moisture-temperature-stress field coupling

图中红色曲线表示不同深度土壤的温度波动情况，蓝色曲线表示土壤中水分的富集程度

体，并产生冻胀应力（Taber，1930）．当外界温度升高土体开始融化时，冰的融化使得土体含水量增加，水分也进行重分布；水分场的改变使得孔隙水压力发生变化，从而进一步影响了土体内应力分布（Mcroberts and Morgenstern，1974）．在冻融循环作用下，土体的结构发生变化，孔隙率增加，水分渗透作用增强．在冻融交界面处，冻土区阻止了水分继续向下渗透（Weeks，1969）．这使得大量的水分聚集在冻融交界面处，导致孔隙水压力增加，土体有效应力减小，土体所受到的应力状态又发生了改变．

2.3　温度场－应力场相互作用

当外界温度低于土体中自由水的冰点时，土体中原位水开始冻结膨胀，土中的水分冻结成冰改变了土体内部构造，由于冰的胶结作用使周围土体形成一个整体，增大了土体的强度和模量，冻胀产生冻胀应力，使得土体产生应力重分布．当冻结锋面处的水凝结成冰的时候，由于水的相变作用，不仅土体发生冻胀而且还有热量释放（Harlan，1973）．温度升高时，冰的膨胀速度超过于土体固相，导致孔隙水压力增加（Campanella and Mitchell，1968），孔隙水膨胀而产生热膨胀压力，造成土颗骨架的损伤和破坏（Zhou *et al.*，2022）；土体的黏聚力和剪应力随温度升高也会减小，最终使边坡趋于不稳定．

总之，冻土边坡失稳是由多种因素决定的复杂过程，是多场耦合的结果．因此，在水热力耦合作用下导致土体的黏聚力、有效应力和抗剪强度急剧降低而诱发边坡的失稳．

3　冻土边坡稳定性模拟方法

长期以来，边坡稳定性分析方法包括定性分析法和定量分析法．定性分析法主要基于工程经验、地质条件、现场观察等非数值化手段，对边坡稳定性进行宏观判断，适用于初步评估或数据不足的情况．而定量分析方法则基于数学模型、物理模型为基础，借助计算公式或数值方法，对边坡稳定性进行定量化和精细化的评估．通过查阅文献对冻土边坡稳定性分析方法作了详细划分，如表 2 所示．

边坡稳定性分析的方法普遍基于岩土塑性理论，因为岩土边坡的变形发展都从弹性阶段进入塑性阶段，直至坡体失稳．边坡失稳在力学上主要是一个强度问题，在岩土工程界通常称为稳定性问题．1773 年的库仑定律提出，开始了边坡的极限分析；Fellenius（1927）建立了极限平衡法；Drucker and Prager（1952）提出了极限分析的上、下限法．极限分析法在工程实践上取得了良好成效，解决了岩土工程中有关强度与稳定等问题；但面对复杂的工程情况时，如复杂的层状、非均质岩土材料等，这一方法往往无能为力；随着岩土力学数值方法的发展，逐渐兴起了数值极限分析方法，不仅可以解决这一问题，而且具有很广的适用性和实用性（郑颖人，

表 2　冻土边坡稳定性分析方法

Table 2　Methods for analyzing the stability of permafrost slopes

方法名称			应用领域
定性分析法	历史分析法、图解法、过程机制分析法、岩体质量分析法、工程类比法等		初级工程勘察设计阶段使用
定量分析法	确定性分析方法	刚体极限平衡法、数值分析法	高级的工程勘察设计阶段使用
	不确定性分析方法	可靠度评价法、人工神经网络分析法(ANN)、灰色系统评价法、模糊评价法、综合法、遗传算法等	

表 3　极限平衡法特点

Table 3　Key features of the limit equilibrium method

名称	分类	原理	优点	缺点
极限平衡法	瑞典条分法、萨尔玛法、詹布法、简化毕肖普法、不平衡推力传递法、斯宾塞法、工程兵团法、摩根斯顿－普莱斯法	假定边坡的岩土体破坏是由于边坡内产生了滑动面，部分坡体沿滑动面滑动而造成的．根据具体情况选择合理的满足摩尔－库伦准则的滑动面．由静力平衡关系，得出滑动时的破坏荷载和最危险滑动面	模型简单、计算简捷，在不能给出应力作用下的结构图像的情况下，仍能对结构的稳定性给出较精确的结论．分析失稳边坡反算的强度参数与室内试验吻合度较好，使分析程序更加可信	近似假设多，且假设与实际情况不一致；没有考虑材料的应力－应变关系；需要先知道滑动面的大致位置和形状，但是滑动面的位置难以准确确定；所得安全系数只是假定滑裂面上的平均安全度

2012)．因此，文章主要对刚体极限平衡法和数值分析法这2种方法进行详细地介绍说明．

3.1　极限平衡法

极限平衡法是冻土坡稳定性分析中发展最完善、最早出现的确定性分析方法．极限平衡法模型简单，通过测定土壤参数可以高效评价边坡稳定性．其主要特征及主要的计算方式，如表3，表4所示．

3.2　数值模拟计算法

计算机数值模拟已经成为解决科研及现代工程应用中复杂问题的一种有效途径．其过程首先是对关注的科学或工程问题进行分析，然后根据问题的特征选取或建立合理的数学模型，并针对具体问题提出适当的定解条件，最后基于数学模型和定解条件采用合理的数值计算方法对问题进行离散化求解和分析．数值分析法(也叫应力应变法)又可细分，如表5.

陈玉超(2006)应用极限平衡法和强度折减法对寒区边坡的稳定性进行了研究．采用岩土工程分析软件FLAC对寒区边坡进行了热－水－力耦合的数值模拟，结合工程实例计算了边坡在一年中融化期间不同月份对应的融化深度，讨论了融化对边坡的稳定性影响．张淑娟等(2008)通过试验数据结果，运用有限元数值模拟研究了青藏铁路地震影响下的路基稳定性问题．段东明等(2008)在考虑降雨渗透的机理上运用有限元软件，对青藏铁路安多短路基进行了降雨条件下的稳定性模拟．姜龙和王连俊(2008)利用安多段3年的地温和变形观测资料分析并预测未来30年内该地段的温度变化趋势，运用改进的极限平衡法和规范法指出在10年后该地区斜坡在融化期的稳定性最弱，而在20年后该段的冻土路基将会完全退化．赵刚(2010)对季节冻土区公路路堑边坡的滑坡机理进行了研究，并通过模型试验给出季节冻土区边坡水分迁移规律，并根据路堑边坡滑坡等工程病害给出其防治措施．王文丽等(2013)将冻土相变的显热熔算法引入到FLAC软件的热学计算模块，并联合使用静态边界动力计算模块，开展了冻融循环条件下边坡地震稳定性分析．刘志云等(2014)考虑到冻土边坡土体力学性质及冻融交界面性质会因温度影响而改变，开发了耦合温度场分析的冻土边坡稳定性数值计算程序．Chen *et al.*(2015)提出了一种基于随机有限元法的冻土地区路堤边坡稳定性概率分析方法．张媛等(2017)二次开发了ADINA软件，对冻融循环下冻土边坡的土钉支护结构响应规律进行了分析．宋彦琦等(2020)通过大型有限元软件ABAQUS，利用强度折减法获得冻融循环作用下边坡的稳定安全系数变化规律，研究表明边坡的安全系数随冻融循环次数增加逐渐降低，为边坡稳定性影响因素的探究提

表4 极限平衡法计算方法

Table 4 Methods for limit equilibrium calculations

年份(a)	作者	稳定性计算公式	公式说明
1974	Hutchinson (1974)	$F_s=\frac{2C_u}{\gamma Z\sin 2\beta}$	总应力分析法,其认为由于冻结锋面碎块冰集聚导致融化时土体含水量增加,土的不排水抗剪强度降低,从而引发斜坡失稳
1969	Week(1969)	$F_s=(1-\frac{\gamma_w D_w}{\gamma Z})\frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}+\frac{2C'}{\gamma Z\sin\beta}$	用"冰堵法"分析Vestspitsbergen冻土斜坡稳定性,提出基于"冰阻渗流"引起孔隙水压力增加机理的有效应力分析法,他们主要考虑土体孔隙水压力增大致使土体有效应力减小而土体强度减弱失稳的情况
1972	Chandler (1972)	$F_s=\frac{(1-\gamma_u)\tan\varphi'}{[Ka(1-\gamma_u)+\gamma_u]\tan\beta}$	考虑表层土的主动土压力
1974	Mcroberts and Morgenstern (1974)	$F_s=\frac{\gamma_s'}{\gamma_s}(1-\frac{1}{1+\frac{1}{2R^2}})\frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$	提出的基于有效应力和融化-固结理论,认为在斜坡冻土融化-固结过程中,易滑面上超孔隙水压力增加并可引发斜坡失稳
1980	Vallejo(1980)	$F_s=\frac{(\gamma_s-\gamma_f)CZ\cos\beta\tan\varphi'}{[\gamma_f+(\gamma_s-\gamma_f)C]Z\sin\beta}$	斜坡稳定性计算中滑体成分分为两个方面,即由大块体和除大块体外的似流体,其稳定性系数与大块体所占总体积多少相关.为此推导了基于土体结构性和有效内摩擦角的评价方法
2004	靳德武和牛富俊(2004)	$F_s=\frac{C'+\{[(1-m)\gamma+m(\gamma_{sat}-\gamma_w)]\}z\cos^2\alpha\tan\varphi'}{[(1-m)\gamma+m\gamma_{sat}]z\sin\alpha\cos\alpha}$	应用无限斜坡分析方法.考虑渗流方向与斜坡方向一致的情况,应用有效应力原理,推导出不同含水条件下融冻泥流型滑坡安全系数的解析表达式
2005	沈宇鹏等(2005)	$F_s=\frac{\gamma_2 h(1-R'')+\gamma_1' Z(1-P_1+P_2)}{\gamma_2 h+\gamma_1 Z}$ $R''=\frac{erf(R)}{[erf(R)+\frac{e^{-R^2}}{R\sqrt{\pi}}]}$	提出冻土斜坡失稳主要原因是斜坡中的孔隙水压力,并将非饱和理论运用到正融冻土斜坡稳定性分析上,引用孔隙水压力P1和孔隙气压力P2表达在冻土边坡稳定性计算上,提出相应的冻土斜坡稳定分析方法
2006	刘红军和王丕祥(2006)	$F_s=\frac{C'+[(1-n)\gamma+n\gamma']h\cos\alpha\tan\varphi'}{[(1-n)\gamma+n\gamma_{sat}]h\sin\alpha}$	考虑地下水渗流作用的情况下运用有效应力法分析土质边坡失稳的主要原因,同时将该方法引入到求解季节性冻土边坡的安全系数的实例中.但是,文章考虑了在渗流情况下渗流力的作用,而未考虑孔隙水压力变化对边坡稳定性影响.此为,在计算渗透力时将水力梯度看成是坡度的参数,然而该参数应由实际的地质情况计算或者实验得出

注:表4中F_s表示斜坡稳定系数;C_u表示不排水抗剪强度;γ表示土容重;Z表示融化深度;β表示坡度;γ_w表示水容重;D_w表示滑动面以上水头高度;φ'表示有效内摩擦角;C'表示有效黏聚力;γ_u表示孔隙水压力系数;Ka表示主动土压力系数;$\frac{\gamma_s'}{\gamma_s}$表示滑坡体单位有效重度与单位总重度的比值;$R$表示融化固结系数;$\gamma_s$表示块体的重度;$\gamma_f$表示泥流的重度;$C$表示块体体积占比;$Z$表示块体厚度;$\gamma_{sat}$表示土的饱和容重;$m$表示滑体的饱和度;$z$表示地下冰埋深;$\alpha=\frac{d}{\sqrt{t}}$其中d是t时刻的融化深度;$\gamma_2$表示排水面上的总重度;$\gamma_1'$表示潜水面下土的重度;$\gamma_1$表示土的总重度;$P_1$表示孔隙水压力;$P_2$表示孔隙气压力;$h$表示冻土层的厚度;$R''$表示由固结和渗流引起的超孔隙水压力的简写;$erf()$表示误差函数.

供参考.Sordo *et al.*(2024)证明了一种"FEM-MPM混合方法",用于捕捉边坡失稳起始与大变形破裂后的演化过程,不再局限于传统FEM的大变形限制.相比传统的极限平衡法等简化方法,数值模拟不仅能够反映边坡整体稳定性的变化趋势,还能细致揭示边坡内部不同区域的应力分布、位移变化及潜在滑动面的发展演化过程.该方法在冻土边坡稳定性分析中也展现出广阔的应用前景.

3.3 不确定分析方法

3.3.1 可靠度评价法 由于冻土边坡所处冻融环境的复杂性,冻土力学参数的不确定性,复杂的地形及地质状况,使得冻土边坡的稳定性问题成为寒区工程建设中的一大难题.众多专家和学者运用可靠度理论对常温地区的边坡稳定性问题进行了深入的研究,取得了丰硕的成果.但对寒区冻融环

表5　数值分析法及应用软件

Table 5　Numerical analysis methods and application software

名称	原理	特点及适用领域	软件
有限元法(FEA)	目前最广泛的数值计算方法,它能满足静力平衡条件、应变相容条件,考虑了岩体的不连续性和非均质性,将无限自由度的结构体转化为有限自由度的等价体系;有限元分析的最大特点就是标准化和规范化,这种特点使得大规模分析和计算成为可能.有限元方法与其他求解边值问题近似方法的根本区别在于它的近似性仅限于相对小的子域中.	有限元法将函数定义在简单几何形状的单元域上,且不考虑整个定义域的复杂边界条件,能够模拟土体与支护的共同作用.不但能进行线性分析还可以进行非线性分析,但是对大变形求解、应力集中等问题的求解还有待改进.	ANSYS、ABAQUS、ADINA、RFPA、3D-σ、MIDAS-GTS、ROCSCIENCE-RS2/3等
有限差分法	其基本思想是先把问题的定义域进行网格剖分,然后在网格点上,按适当的数值微分公式把定解问题中的微商换成差商,从而把原问题离散化为差分格式,进而求出数值解.具有简单、灵活以及通用性强等特点,容易在计算机上实现.	应用广泛但在边坡稳定计算中较少应用.	FLAC2D/3D、Massflow等
离散元法	把研究对象分离为刚性元素的集合,使每个元素满足牛顿第二定律,用中心差分的方法求解各元素的运动方程,得到研究对象的整体运动形态.	适用于处理不连续介质、大变形、低应力水平等问题,其主要问题是阻尼选取和迭代收敛性.	PFC、UEDE、3DEC、MatDEM等
不连续变形分析法	以自然存在的节理面或断层切割岩体形成不同的块体单元,以各块体的位移作为未知量,通过块体间的接触和几何约束形成一个块体系统.将边界条件和接触条件等一同施加到总体平衡方程.求解方程组即可得到块体当前时步的位移场、应力场、应变场及块体间的作用力.	可以模拟出岩石块体的移动、转动、张开、闭合等全部过程并据此判断岩体的破坏程度、破坏范围,从而对岩体的整体和局部稳定性做出正确的评价.	DDA
块体理论法	将岩体视为由大量岩块构成的集合体,并对其进行平衡稳定分析的理论.块体理论的核心就是找出临空面上的关键块体.所谓关键块体,即在外荷载和块体自重作用下,由于滑移面上的抗剪强度不足以抵御滑动力而将失稳的块体.在块体理论中先运用有限性定理判别块体是否有限,运用可动性定理判别块体是否可动.	块体理论概念清楚,方法简单,运用起来十分方便,适合于块状结构岩体的稳定分析.它的不足之处是只考虑了岩块的平衡条件,没有考虑岩块和结构面的变形.在块体理论的基础上,又先后出现了一些分析岩体稳定性问题的方法,如块体单元法和DDA(非连续变形分析)法等.	BT、BSA3D等
数值流形元法(NMM)	该方法将基于连续介质力学的有限单元法和基于不连续介质力学的非连续变形分析理论统一起来,创造性地提出相互独立的数学覆盖和物理覆盖双层覆盖系统,形成任意形状的流形单元.	具有统一处理连续和不连续介质问题的能力,同时对解决节理岩体的几何大位移、动力及动静交叉等问题有其自身的特点.	

续表5

名称	原理	特点及适用领域	软件
极限分析法	所谓有限元极限分析法,就是在弹塑性有限元模型中,通过强度降低或者增大荷载和弹性数值计算,使模型达到极限破坏状态,从而获得模型的破坏状态和相应的安全系数.	能够对具有复杂地质、地貌的岩土工程进行计算;考虑了土体的非线性弹塑性本构关系,以及变形对应力的影响;求解安全系数时,可以不假定滑移面的形状、不进行条分;能模拟土坡失稳过程及其滑移面形状.滑移面大致在水平位移突变的地方及塑性变形发展严重的部位,呈条带状;动面与稳定安全系数;能模拟土体与支护的共同作用.	OptumG2/G3
边界元法	将描述数学物理问题、力学问题的偏微分方程边值问题,化为边界积分方程,边界元法只在求解域的边界.上进行离散;边界元法在域内采用了物理问题或弹性力学的基本解和一些积分运算,数值计算只在边界上进行,它属于半解析半数值方法.	求解各种力学和非力学问题、线性和非线性问题等;具有解析与数值相结合的特点,通常具有较高的精度;便于处理无限域以及半无限域问题;缺点是需要事先知道控制微分方程的基本解且在处理材料非线性问题时不如有限元法好,不能处理大变形问题;它的应用范围以存在相应微分算子的基本解为前提,对于非均匀介质等问题难以应用.	BEASY、ROCSCIENCE、EXAMINE3D等
物质点法	采用拉格朗日质点和欧拉网格的双重描述,它将连续体离散成一组质点.每个质点代表一块材料区域并携带该材料区域的所有物质信息,如质量、速度、应力和应变等,因此所有质点的集合代表了整个材料区域.计算网格仅用于动量方程的求解和空间导数的计算,它不携带任何物质信息.	发挥了拉格朗日法和欧拉法各自的长处,克服了其弱点,特别适合分析具有超大变形和移动界面的问题,如动态断裂问题、高速碰撞问题和流固耦合问题等.	MPM
有限元法—极限平衡法联合法	有限元法没有对滑动面的形式和位置做任何假定,通过容重增加法或强度折减法确定滑动面的位置和形式,然后用刚体极限平衡法计算安全系数.	不仅考虑了土体的应力—应变关系,同时能很方便计算出土坡稳定的安全系数.避免了极限平衡法单独计算时反复试算这一过程.这两种方法联合应用可以互相补充,充分发挥了两者各自的优点.	GEO-SLOPE、ROCSCIENCE_SLIDE、理正边坡、GEO5库仑岩土、SlopeLE 2.7
有限元法—离散元耦合法	根据已有的非连续面划分离散块体,每个离散块体被当成可变形的连续体,分别划分有限元网格,块体的运动及相互作用采用与DEM相同的处理方式,也即单个块体的运动根据该块体所受的不平衡力或不平衡力矩按牛顿第二定律来确定,并根据接触本构确定块体之间的相互作用.块体之间不需要满足变形协调条件,块体可以发生平移和旋转.	有限元/离散元(FEM/DEM)耦合分析方法结合连续和非连续数值方法的优点,不但可以对完整岩体以及已有的不连续面进行很好的模拟,而且在采用断裂力学的相关准则后,可以对裂纹的产生和扩展进行模拟.	CDEM、GDEM等

境条件下边坡的稳定性问题却很少涉及,多年冻土边坡可靠性问题的研究在国内还很少,应用考虑土性参数随机性的可靠性原理对寒区边坡进行可靠性评价的研究更少.冻土边坡的实际工作机理出发,采用基于概率统计思想的可靠度理论,充分考虑由于各种计算参数的随机变异性和计算模型不确定性对冻土边坡稳定性的影响,把冻土边坡稳定问题作为一个随机过程看待,进行冻土边坡稳定可靠度研究.徐江等(2007)考虑参数随机变异性和计算模型不确定性,开展了基于概率统计可靠度理论

的冻土边坡可靠度稳定分析；Chen *et al.*(2015)提出了基于随机有限元法的冻土区路堤边坡稳定性概率分析方法；

3.3.2　人工神经网络分析法(ANN)　由于人工神经网络能够很好地模拟非线性系统是具有较强学习能力的优异网络结构因此在进行科学预测方面具有较为广泛的运用.梁若筠等(2007)运用改进的神经网络算法选取相关的冻土试验数据分别建立了冻土中未冻水含量预测模型、开放系统饱水正冻土中水分迁移预测模型、封闭系统正冻土中水分迁移预测模型和封闭系统已冻土中的水分迁移预测模型以建立的神经网络预测模型为依据，对影响冻土水分迁移的主要因素进行了系统的、详细的分析.

3.3.3　灰色系统评价法　靳德武等(2004)推导了相变热传导问题微分控制方程的一般形式，应用有限元法对青藏公路K3035斜坡地温场和变形场进行了模拟，建立了冻土斜坡温度场和变形场数值分析模型.采用基于灰色系统理论的GM(1,1)模型，对滑塌距离动态变化进行预测，取得了较好的结果.

3.4　冻土边坡稳定性定分析的新方法

冻土的性质对温度与压力变化比较敏感，故使得冻土尤其是季节性冻土表现出一定不稳定性.在冻土边坡稳定性分析过程中，考虑土体冻胀和融化的不利影响，仅基于库伦莫尔准则下的单一应力场的研究已显不足，多场耦合正逐渐成为研究趋势.冻土边坡稳定性分析方法也朝着多种技术、多种方式综合应用的趋势.冰－土界面的室内直剪试验的开展，涉及的条件和参数越来越广泛，这为热融滑塌坡体的稳定性计算提供数据支持.靳婉莹(2019)利用COMSOL建立相同尺寸边坡模型进行数值模拟，通过对季冻区渠道土质边坡冻融—渗流作用下温度场水分场耦合分析，得出春融期渠道边坡冻融－渗流作用下水分场温度场变化过程.Mamot *et al.*(2021)构建温度－强度相关模型，结合UDEC对退化冻土岩体边坡失稳进行模拟，揭示岩体在0°C附近剪切强度迅速衰减，从而引发冻土边坡失稳.Nomleni *et al.*(2023)利用离心模型试验和Newmark方法，验证根－土体系在地震作用下对边坡具有显著的抗滑移增强作用.Cui and Qin (2023)构建水－热耦合模型，分析春季融化期土体孔隙水压力与地温变化对边坡稳定性的协同影响.Hao *et al.*(2023)通过构建热－水－力耦合数值模型，分析了两种典型降雨情景下冻土活动层中体积含水量变化，并揭示出低强度长降雨触发深滑、高强度短雨引发浅滑的不同失稳机理.Sordo *et al.*(2024)证明了一种“FEM-MPM混合方法”，用于捕捉边坡失稳起始与大变形破裂后的演化过程.Wang *et al.*(2024)在青藏高原北麓河多年冻土区通过室内冻融循环和直剪试验，研究了草本植物根－土复合体在不同冻融循环次数、水分及根含量条件下剪切强度的演化过程，发现根系显著增强土体凝聚力，其增强效应随水分和冻融循环变化而变化.

4　结论与展望

热融滑塌广泛分布于北极和青藏高原地区，气候的变暖，多年冻土退化，导致冻土边坡失稳，引发大规模热融滑塌地质灾害.对冻土工程建设、基础设施、环境及生态造成了严重的影响.通过对热融滑塌和冻土边坡失稳研究的相关文献归纳我们得出以下结论.

(1)热融滑塌的形态特征大致可以划分为11种类型，如后壁、泥洼、泥流通道等.其空间分布与地形地貌、冻土环境特征及其演化过程相关.

(2)热融滑塌的演化会经历4个阶段，即地表位移沉降、活动层剥离滑动、多旋回性退缩和逐渐趋于稳定.其演化过程受外界气候条件的影响，尤其易受夏季高温和强降水等极端气候事件的影响.

(3)热融滑塌失稳是一个典型的热－水－力场相互作用的结果，应力场作用下影响水热传导，温度场和水分场决定空隙水压力来影响应力场，同时由温度变化引起的冰水相变、水分迁移及冻胀行为等共同作用于土体结构，导致孔隙水压力变化与剪切强度削弱，最终导致失稳.

(4)极限平衡法力学模型简单直观，可以定量评价边坡进行稳定性，计算结果便于应用，数值分析方法通过计算机处理获得岩土体应力应变关系，可以处理非均质、非线性、复杂边界边坡，且能模拟边坡的开挖、支护及地下水渗流等，几乎适用于所有的计算领域.围绕青藏铁路、北麓河地区等典型冻土工程的研究推动了冻土边坡失稳理论方法在工程方面的应用.

尽管目前在多年冻土区热融滑塌和冻土边坡失稳方面的研究已取得了许多进展，但仍存在以下几方面的不足.

(1)虽然大多数学者普遍认为，热融滑塌的演化过程会大致经历四个阶段，但是其各个阶段的划

分仍然缺乏相应的标准和依据.此外,在形态特征的描述上,中文术语与英文术语之间仍存在一定差异,易造成理解偏差.气候响应方面,多数模型与遥感研究采用粗网格或宏观区域分析,缺乏细尺度观测.

(2)当前对热-水-力耦合作用机理的研究仍不充分,在确定耦合模型中的参数与变量时,往往未能充分考虑三者之间的相互作用,使得尽管采用了热-水-力耦合模型,实际计算过程却未真正实现3场的有效耦合.因此,通过水热力耦合作用机理性研究确定水热力耦合参数及变量,应是现时进行水热力耦合研究的中心问题.

(3)极限平衡法在分析过程中未考虑岩土体的应力应变关系,破坏分析与变形分析分别采用理想刚塑性和线弹性假定,过于强调土体在极限状态下的破坏机制,难以揭示边坡破坏的发生与演化过程,且在结构复杂的边坡中滑动面位置难以准确确定,具有较大的不确定性;而数值分析法虽然可以模拟多种复杂工况,但在实际工程应用中对物理参数的选取较为敏感,在处理大变形与应力集中等问题求解有待改进.

未来研究可以结合气候响应、形态变化特征和地貌变化等方面,构建热融滑塌演过阶段的判别标准.此外,当前研究主要集中在失稳模拟,而对于热融滑塌演化过程模拟的研究较少,未来可以借助冻土模型通过量化气候、地形地貌、地下冰等因素,结合深度学习或机器学习等方法模拟热融滑塌演化过程.同时,可以通过细尺度的观测,弥补当前气候响应机制研究中的空白,从而进一步解释热融滑塌的演化过程和发生机制.在模型与评价方法的选择上,不能过于追求选择最新的或者最流行的,要根据边坡的变形破坏力学机制、破坏模式来选取合适的评价方法,这是稳定性评价的基本前提.

References

Abrahams, A.D., Li, G., Parsons, A.J., 1996. Rill Hydraulics on a Semiarid Hillslope, Southern Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(1):35-47.

Balser, A.W., Jones, J.B., Gens, R., 2014. Timing of Retrogressive Thaw Slump Initiation in the Noatak Basin, Northwest Alaska, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(5): 1106-1120. https://doi.org/10.1002/2013JF002889

Brooker, A., Fraser, R.H., Olthof, I., et al., 2014. Mapping the Activity and Evolution of Retrogressive Thaw Slumps by Tasselled Cap Trend Analysis of a Landsat Satellite Image Stack. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25(4):243-256. https://doi.org/10.1002/ppp.1819

Burn, C.R., Friele, P.A., 1989. Geomorphology, Vegetation Succession, Soil Characteristics and Permafrost in Retrogressive Thaw Slumps near Mayo, Yukon Territory. *Arctic*, 42(1):31-40.

Burn, C.R., Lewkowicz, A.G., 1990. Canadian Landform Examples-17 Retrogressive Thaw Slumps. *Canadian Geographies / Géographies Canadiennes*, 34(3): 273-276. https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1990.tb01092.x

Campanella, R.G., Mitchell, J.K., 1968. Influence of Temperature Variations on Soil Behavior. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(3):709-734. https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001136

Chandler, R.J., 1972. Periglacial Mudslides in Vestspitsbergen and Their Bearing on the Origin of Fossil 'Solifluction' Shears in Low Angled Clay Slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 5(3): 223-241. https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1972.005.03.02

Chen, X., Liu, J.K., Xie, N., et al., 2015. Probabilistic Analysis of Embankment Slope Stability in Frozen Ground Regions Based on Random Finite Element Method. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 7(4):354-364.

Chen, Y.C., 2006. Preliminary Study on Rock and Soil Slope Stability under the Freezing-Thawing Condition (Dissertation). Xi'an University of Science and Technology, Xi'an (in Chinese with English abstract).

Cheng, G.D., 1982. The Formation of Thick Layers of Underground Ice. *Science in China (Ser.B)*, 12(3):281-288 (in Chinese).

Cheng, Y.C., Ge, Q., He, F., 2010. Experimental Research on Critical Depth of Slip Surface of Soil Slope in Seasonal Frozen Area. *Rock and Soil Mechanics*, 31(4): 1042-1046 (in Chinese with English abstract).

Cui, K., Qin, X.T., 2023. Landslide Risk Assessment of Frozen Soil Slope in Qinghai Tibet Plateau during Spring Thawing Period under the Coupling Effect of Moisture and Heat. *Natural Hazards*, 115(3):2399-2416. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05646-8.

Drucker, D.C., Prager, W., 1952. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 10(2):157-165.

Duan, D.M., Shen, Y.P., Xu, Z.Y., et al., 2008. Stability of the Slope Embankment of Andou Test Section on Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Area. *China Railway Science*, 29(2):6-11 (in Chinese with English abstract).

Fellenius, W. K. A., 1927. Erdstatische Berechnungen Mit Reibung Und Kohäsion (Adhäsion) Und Unter Annahme Kreiszylindrischer Gleitflächen. W. Ernst & Sohn, Berlin.

Gong, W. Y., Darrow, M. M., Meyer, F. J., et al., 2019. Reconstructing Movement History of Frozen Debris Lobes in Northern Alaska Using Satellite Radar Interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 221: 722—740. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.014.

Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J. P., et al., 2013. Tier-Based Approaches for Landslide Susceptibility Assessment in Europe. *Landslides*, 10(5): 529—546. https://doi.org/10.1007/s10346-012-0349-1

Han, B. X., Yin, C., Yuan, W., et al., 2025. Numerical Simulation of the Stability of Frozen Soil Slopes in Permafrost Regions Based on an Enhanced Hydrothermal Coupling Model. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 47(2): 417—429 (in Chinese with English abstract).

Hao, J. M., Jia, P. Q., Wu, T. H., et al., 2023. Numerical Analysis of the Impacts of Rainfall on Permafrost-Related Slope Stability on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47: 101439. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101439

Harlan, R. L., 1973. Analysis of Coupled Heat-Fluid Transport in Partially Frozen Soil. *Water Resources Research*, 9(5): 1314—1323. https://doi.org/10.1029/wr009i005p01314

Harris, C., Rea, B., Davies, M., 2001. Scaled Physical Modelling of Mass Movement Processes on Thawing Slopes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1): 125—135. https://doi.org/10.1002/ppp.373

Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., et al., 2018. Degrading Permafrost Puts Arctic Infrastructure at Risk by Mid-Century. *Nature Communications*, 9: 5147. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4

Hutchinson, J. N., 1974. Periglacial Solifluxion: An Approximate Mechanism for Clayey Soils. *Géotechnique*, 24(3): 438—443. https://doi.org/10.1680/geot.1974.24.3.438

Jiang, L., Wang, L. J., 2008. Stability Study on Swampy Sloping Roadbed in Permafrost Regions of Qinghai-Tibet Railway. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(1): 138—142 (in Chinese with English abstract).

Jin, D. W., Niu, F. J., Chen, Z. X., et al., 2004. Landslide Hazard from Gelifluction in Qinghai-Tibet Plateau and Stability Analysis Method. *Coal Geology & Exploration*, 32(3): 49—52 (in Chinese with English abstract).

Jin, D. W., Sun, J. F., Fu, S. L., 2005. Discussion on Landslides Hazard Mechanism of Two Kinds of Low Angle Slope in Permafrost Region of Qinghai-Tibet Plateau. *Rock and Soil Mechanics*, 26(5): 774—778 (in Chinese with English abstract).

Jin, H. J., Huang, Y. D., Bense, V. F., et al., 2022. Permafrost Degradation and Its Hydrogeological Impacts. *Water*, 14(3): 372. https://doi.org/10.3390/w14030372

Jin, W. Y., 2019. Coupled Analysis of Water and Heat under Freezing and Thawing Conditions of Soil Slope in Seasonal Frozen Area (Dissertation). Northeast Agricultural University, Harbin (in Chinese with English abstract).

Jones, M. K. W., Pollard, W. H., Jones, B. M., 2019. Rapid Initialization of Retrogressive Thaw Slumps in the Canadian High Arctic and Their Response to Climate and Terrain Factors. *Environmental Research Letters*, 14(5): 055006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab12fd

Kokelj, S. V., Lewkowicz, A. G., 1999. Salinization of Permafrost Terrain Due to Natural Geomorphic Disturbance, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island. *Arctic*, 52(4): 372—385.

Kokelj, S. V., Tunnicliffe, J., Lacelle, D., et al., 2015. Increased Precipitation Drives Mega Slump Development and Destabilization of Ice-Rich Permafrost Terrain, Northwestern Canada. *Global and Planetary Change*, 129: 56—68. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.008

Lacelle, D., Bjornson, J., Lauriol, B., 2010. Climatic and Geomorphic Factors Affecting Contemporary (1950—2004) Activity of Retrogressive Thaw Slumps on the Aklavik Plateau, Richardson Mountains, NWT, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1): 1—15. https://doi.org/10.1002/ppp.666

Lantuit, H., Pollard, W. H., 2005. Temporal Stereophotogrammetric Analysis of Retrogressive Thaw Slumps on Herschel Island, Yukon Territory. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3): 413—423. https://doi.org/10.5194/nhess-5-413-2005

Lantuit, H., Pollard, W. H., 2008. Fifty Years of Coastal Erosion and Retrogressive Thaw Slump Activity on Herschel Island, Southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada. *Geomorphology*, 95(1/2): 84—102. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.040

Lewkowicz, A. G., 1987a. Headwall Retreat of Ground-Ice Slumps, Banks Island, Northwest Territories. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24(6): 1077—1085. https://doi.org/10.1139/e87-105

Lewkowicz, A. G., 1987b. Nature and Importance of Thermokarst Processes, Sand Hills Moraine, Banks Island, Canada. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 69(2): 321—327. https://doi.org/10.1080/04353676.1987.11880218

Lewkowicz, A.G., Harris, C., 2005. Morphology and Geotechnique of Active-Layer Detachment Failures in Discontinuous and Continuous Permafrost, Northern Canada. *Geomorphology*, 69(1—4): 275—297. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.01.011

Lewkowicz, A.G., Way, R.G., 2019. Extremes of Summer Climate Trigger Thousands of Thermokarst Landslides in a High Arctic Environment. *Nature Communications*, 10: 1329. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7

Li, N., Chen, B., Chen, F.X., 2003. Heat - Moisture - Deformation Coupled Model for Composite Foundation in Cold Zone. *China Civil Engineering Journal*, 36(10): 66—71 (in Chinese with English abstract).

Li, Y., Jin, H.J., Wen, Z., et al., 2022. Stability of Permafrost Slopes: A Review. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(1): 203—216 (in Chinese with English abstract).

Li, Z.M., 2017. Study on Mechanism of Moisture-Heat-Stress Coupling for Frozen Soil and Engineering Application (Dissertation). Harbin Institute of Technology, Harbin (in Chinese with English abstract).

Liang, R.J., 2007. Research on Frozen Soil Water Migration Based on Neural Network Technique (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).

Liu, H.J., Wang, P.X., 2006. Stability Analysis of Loss of Stability Caused by Freeze and Melt of Earthen Side Slopes of Highways. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 38(5): 764—766 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z.Y., Chen, J.B., Jin, L., 2014. Development of Slope Stability Evaluation Process of Permafrost Embankment. *Science Technology and Engineering*, 14(13): 272—277 (in Chinese with English abstract).

Luo, D.L., Liu, J., Chen, F.F., et al., 2024. Research Progress and Prospect of Transition Zone in Permafrost. *Earth Science*, 49(11): 4063—4081 (in Chinese with English abstract).

Luo, J., Niu, F.J., Lin, Z.J., et al., 2019. Recent Acceleration of Thaw Slumping in Permafrost Terrain of Qinghai-Tibet Plateau: An Example from the Beiluhe Region. *Geomorphology*, 341: 79—85. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.020

Luo, J., Niu, F.J., Lin, Z.J., et al., 2022. Inventory and Frequency of Retrogressive Thaw Slumps in Permafrost Region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geophysical Research Letters*, 49(23): e2022GL099829. https://doi.org/10.1029/2022GL099829

Ma, W.D., Liu, F.G., Zhou, Q., et al., 2020. Characteristics of Extreme Precipitation over the Qinghai - Tibet Plateau from 1961 to 2017. *Journal of Natural Resources*, 35(12): 3039—3050 (in Chinese with English abstract).

Mamot, P., Weber, S., Eppinger, S., et al., 2021. A Temperature-Dependent Mechanical Model to Assess the Stability of Degrading Permafrost Rock Slopes. *Earth Surface Dynamics*, 9(5): 1125—1151. https://doi.org/10.5194/esurf-9-1125-2021

Mao, X.S., Li, N., Wang, B.G., et al., 2006. Coupling Model and Numerical Simulation of Moisture - Heat - Stress Fields in Permafrost Embankment. *Journal of Chang'an University* (*Natural Science Edition*), 26(4): 16—19, 62 (in Chinese with English abstract).

McRoberts, E.C., Morgenstern, N.R., 1974. The Stability of Thawing Slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(4): 447—469. https://doi.org/10.1139/t74-052

Mu, C.C., Shang, J.G., Zhang, T.J., et al., 2020. Acceleration of Thaw Slump during 1997—2017 in the Qilian Mountains of the Northern Qinghai - Tibetan Plateau. *Landslides*, 17(5): 1051—1062. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01344-3

Mu, C.C., Zhang, T.J., Cao, B., et al., 2013. Study of the Organic Carbon Storage in the Active Layer of Permafrost over the Eboling Mountain in the Upper Reaches of the Heihe River in the Eastern Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).

Nan, Z.T., Li, S.X., Cheng, G.D., 2004. Prediction of Permafrost Distribution on the Qinghai - Tibet Plateau in the Next 50 and 100 Years. *Science China: Earth Sciences*, 34(6): 528—534 (in Chinese).

Nesterova, N., Leibman, M., Kizyakov, A., et al., 2024. Review Article: Retrogressive Thaw Slump Characteristics and Terminology. *The Cryosphere*, 18(10): 4787—4810. https://doi.org/10.5194/tc-18-4787-2024

Niu, F.J., Luo, J., Lin, Z.J., et al., 2012. Development and Thermal Regime of a Thaw Slump in the Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 83/84: 131—138. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.07.007

Niu, F.J., Ma, L.F., Jin, D.W., 2006. Stability Evaluation of Slopes in Permafrost Region. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 34(6): 1—3, 17 (in Chinese with English abstract).

Nomleni, I.A., Hung, W.Y., Soegianto, D.P., 2023. Dynamic Performance of Root - Reinforced Slopes by Centrifuge Modeling Tests. *Landslides*, 20(6): 1187—1210. https://doi.org/10.1007/s10346-023-02035-5

O'Neill, K., Miller, R.D., 1985. Exploration of a Rigid Ice

Model of Frost Heave. *Water Resources Research*, 21(3): 281－296.https://doi.org/10.1029/wr021i003p00281

Obu, J., Lantuit, H., Fritz, M., et al., 2016. Relation between Planimetric and Volumetric Measurements of Permafrost Coast Erosion: A Case Study from Herschel Island, Western Canadian Arctic. *Polar Research*, 35(1): 30313. https://doi.org/10.3402/polar.v35.30313

Pepin, N., Bradley, R.S., Diaz, H.F., et al., 2015. Elevation-Dependent Warming in Mountain Regions of the World. *Nature Climate Change*, 5(5):424－430.https://doi.org/10.1038/nclimate2563

Philip, J., De Vries, D.D., 1957. Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(2): 222－232. https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222

Pufahl, D.E., Morgenstern, N.R., 1979. Stabilization of Planar Landslides in Permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(4):734－747.https://doi.org/10.1139/t79-081

Qin, Y.H., Wu, T.H., Zhao, L., et al., 2017. Numerical Modeling of the Active Layer Thickness and Permafrost Thermal State across Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(21): 11, 604－11, 620.https://doi.org/10.1002/2017JD026858

Santander, R.E., Bubnovich, V., 2002. Assessment of Mass and Heat Transfer Mechanisms in Unsaturated Soil. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(4): 531－545. https://doi.org/10.1016/S0735-1933(02)00350-0

Shen, Y.P., Xu, Z.Y., Wang, L.J., 2005. Analysis of Stability of Thawing Slopes on Roadbed of Qing-Tibet Railway. *China Safety Science Journal*, 15(7):97－100 (in Chinese with English abstract).

Song, Y.Q., Zheng, J.J., Li, X.S., et al., 2020. Effects of Freezing-Thawing Cycles on Stability of Soil Slope. *Science Technology and Engineering*, 20(19):7885－7890(in Chinese with English abstract).

Sordo, B., Rathje, E., Kumar, K., 2024. Sequential Hybrid Finite Element and Material Point Method to Simulate Slope Failures. *Computers and Geotechnics*, 173:106525. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106525

Swanson, D.K., 2021. Permafrost Thaw-Related Slope Failures in Alaska's Arctic National Parks, C.1980－2019. *Permafrost and Periglacial Processes*, 32(3): 392－406. https://doi.org/10.1002/ppp.2098

Swanson, D.K., Nolan, M., 2018. Growth of Retrogressive Thaw Slumps in the Noatak Valley, Alaska, 2010－2016, Measured by Airborne Photogrammetry. *Remote Sensing*, 10(7):983.https://doi.org/10.3390/rs10070983

Taber, S., 1930. The Mechanics of Frost Heaving. *The Journal of Geology*, 38(4):303－317.

Taylor, G.S., Luthin, J.N., 1978. A Model for Coupled Heat and Moisture Transfer during Soil Freezing. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4): 548－555. https://doi.org/10.1139/t78-058

Teufel, B., Sushama, L., 2019. Abrupt Changes across the Arctic Permafrost Region Endanger Northern Development. *Nature Climate Change*, 9(11): 858－862. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0614-6

Ugai, K., Leshchinsky, D., 1995. Three-Dimensional Limit Equilibrium and Finite Element Analyses: A Comparison of Results. *Soils and Foundations*, 35(4): 1－7. https://doi.org/10.3208/sandf.35.4_1

Vallejo, L.E., 1980. A New Approach to the Stability Analysis of Thawing Slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4):607－612.https://doi.org/10.1139/t80-068

Wang, C., Hu, X.S., Lu, H.J., et al., 2024. Study on Shear Characteristics of Herbs Plant Root-Soil Composite System in Beiluhe Permafrost Regions under Freeze-Thaw Cycles, Qinghai-Tibet Highway, China. *Sustainability*, 16(7):2907.https://doi.org/10.3390/su16072907

Wang, L.X., Zhao, L., Zhou, H.Y., et al., 2023. Evidence of Ground Ice Melting Detected by InSAR and In Situ Monitoring over Permafrost Terrain on the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Permafrost and Periglacial Processes*, 34(1):52－67.https://doi.org/10.1002/ppp.2171

Wang, M., Meng, S.J., Yuan, X.M., et al., 2018. Research on Freezing-Thawing Correction Coefficients of Shear Strength Parameters of Seasonal Frozen Soil. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(Suppl.1):3756－3764 (in Chinese with English abstract).

Wang, S.L., 1990. Thaw Slumping in Fenghuo Mountain Area along Qinghai-Xizang Highway. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 12(1):63－70 (in Chinese with English abstract).

Wang, W.L., Wang, L.M., Zheng, L., 2013. The Freeze-Thaw Cycling Effects on Slope Stability in Earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8(2): 156－163 (in Chinese with English abstract).

Wang, X.J., Pang, G.J., Yang, M.X., et al., 2017. Evaluation of Climate on the Tibetan Plateau Using ERA-Interim Reanalysis and Gridded Observations during the Period 1979－2012. *Quaternary International*, 444: 76－86. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.12.041

Weeks, A.G., 1969. The Stability of Natural Slopes in South-East England as Affected by Periglacial Activity. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 2(1):49－61.https:

//doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1969.002.01.04

Wu, H., Gao, W., Wang, G.F., et al., 2005. Study on Causes of Slide and Stability Technology of Artifical Soil-Cutting Side Slope in Frost Area. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 19(2): 1－4(in Chinese with English abstract).

Wu, T.H., 1984. Soil Movements on Permafrost Slopes near Fairbanks, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4):699－709.https://doi.org/10.1139/t84-076

Xu, J., Yang, G.S., Liu, H., 2007. Evaluation of Permafrost Slope with Monte Carlo Simulation Method and Program Design. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 3(Suppl. 2): 1433－1437 (in Chinese with English abstract).

Zhang, S.J., Lai, Y.M., Li, S.Y., et al., 2008. Dynamic Strength of Frozen Soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(4): 595－599 (in Chinese with English abstract).

Zhang, T.J., 2005. Influence of the Seasonal Snow Cover on the Ground Thermal Regime: an Overview. *Reviews of Geophysics*, 43(4): 2004RG000157. https://doi.org/10.1029/2004RG000157

Zhang, Y.S., Chang, M.J., Liu, Y.H., et al., 2025. Cut Slope Stability Prediction in Permafrost Region Based on Ensemble Learning. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 42(1): 131－139(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Dong, J.H., Dong, X.G., et al., 2017. Analysis of Freezing and Thawing of Slope Improved by Soil Nailing Structure in Seasonal Frozen Soil Region. *Rock and Soil Mechanics*, 38(2):574－582(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Michalowski, R.L., 2015. Thermal-Hydro-Mechanical Analysis of Frost Heave and Thaw Settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(7):04015027.https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001305

Zhao, G., 2010. Mechanism of Shallow Slide on Highway Cutting Slope during Spring in Cold Region (Dissertation). Harbin Institute of Technology, Harbin (in Chinese with English abstract).

Zhao, L., Wu, Q.B., Marchenko, S.S., et al., 2010. Thermal State of Permafrost and Active Layer in Central Asia during the International Polar Year. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(2): 198－207. https://doi.org/10.1002/ppp.688

Zheng, Y.R., 2012. Development and Application of Numerical Limit Analysis for Geological Materials. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(7): 1297－1316 (in Chinese with English abstract).

Zhou, B., Zhang, Y.L., Wei, S., et al., 2022. Slope Instability Analysis in Permafrost Regions by Shear Strength Parameters and Numerical Simulation. *Sustainability*, 14(15):9401.https://doi.org/10.3390/su14159401

中文参考文献

陈玉超，2006. 冻融环境下岩土边坡稳定性研究初探(硕士学位论文). 西安:西安科技大学.

程国栋，1982. 厚层地下冰的形成过程. 中国科学(B辑)，(3): 281－288.

程永春，葛琪，何锋，2010. 季冻区土质边坡滑动界面临界深度的试验研究. 岩土力学，31(4):1042－1046.

段东明，沈宇鹏，许兆义，等，2008. 青藏铁路安多试验段多年冻土斜坡路基的稳定性. 中国铁道科学，29(2):6－11.

韩炳鑫，尹超，袁维，等，2025. 基于改进水热耦合模型的冻土边坡稳定性数值模拟. 冰川冻土，47(2):417－429.

姜龙，王连俊，2008. 青藏铁路多年冻土区沼泽化斜坡路基稳定性研究. 岩土工程学报，30(1):138－142.

靳德武，牛富俊，陈志新，等，2004. 青藏高原融冻泥流型滑坡灾害及其稳定性评价方法. 煤田地质与勘探，32(3): 49－52.

靳德武，孙剑锋，付少兰，2005. 青藏高原多年冻土区两类低角度滑坡灾害形成机理探讨. 岩土力学，26(5): 774－778.

靳婉莹，2019. 季冻区渠道土质边坡冻融条件下水热耦合分析(硕士学位论文). 哈尔滨:东北农业大学.

李宁，陈波，陈飞熊，2003. 寒区复合地基的温度场、水分场与变形场三场耦合模型. 土木工程学报，36(10):66－71.

李艳，金会军，温智，等，2022. 多年冻土区斜坡稳定性研究综述. 冰川冻土，44(1):203－216.

李智明，2017. 冻土水热力场耦合机理研究与工程应用(硕士学位论文). 哈尔滨:哈尔滨工业大学.

梁若筠，2007. 基于神经网络方法的冻土水分迁移研究(硕士学位论文). 兰州:兰州大学.

刘红军，王丕祥，2006. 公路土质边坡冻融失稳稳定性分析. 哈尔滨工业大学学报，38(5):764－766.

刘志云，陈建兵，金龙，2014. 冻土路基边坡稳定性计算程序开发. 科学技术与工程，14(13):272－277.

罗栋梁，刘佳，陈方方，等，2024. 多年冻土过渡带研究进展与展望. 地球科学，49(11):4063－4081.

马伟东，刘峰贵，周强，等，2020. 1961—2017年青藏高原极端降水特征分析. 自然资源学报，35(12):3039－3050.

毛雪松，李宁，王秉纲，等，2006. 多年冻土路基水－热－力耦合理论模型及数值模拟. 长安大学学报(自然科学版)，26(4):16－19，62.

牟翠翠，张廷军，曹斌，等，2013. 祁连山区黑河上游俄博岭多

年冻土区活动层碳储量研究.冰川冻土,35(1):1－9.
南卓铜,李述训,程国栋,2004.未来50与100a青藏高原多年冻土变化情景预测.中国科学(D辑:地球科学),34(6):528－534.
牛富俊,马立峰,靳德武,2006.多年冻土地区斜坡稳定性评价问题.工程勘察,34(6):1－3,17.
沈宇鹏,许兆义,王连俊,2005.青藏铁路路基中正融土斜坡稳定性分析.中国安全科学学报,15(7):97－100.
宋彦琦,郑俊杰,李向上,等,2020.冻融循环作用对土质边坡稳定性的影响.科学技术与工程,20(19):7885－7890.
王淼,孟上九,袁晓铭,等,2018.季冻区典型土类抗剪强度冻融修正系数研究.岩石力学与工程学报,37(Suppl.1):3756－3764.
王绍令,1990.青藏公路风火山地区的热融滑塌.冰川冻土,12(1):63－70.
王文丽,王兰民,郑龙,2013.冻融循环作用下边坡地震动稳定性研究.震灾防御技术,8(2):156－163.
武鹤,高伟,王国峰,等,2005.寒区路堑人工土质边坡滑塌原因与稳定技术研究.黑龙江工程学院学报,19(2):1－4.
徐江,杨更社,刘慧,2007.基于蒙特卡洛模拟法的冻土边坡可靠度评价.地下空间与工程学报,3(S2):1433－1437.
张淑娟,赖远明,李双洋,等,2008.冻土动强度特性试验研究.岩土工程学报,30(4):595－599.
张永顺,常明军,刘宇航,等,2025.基于集成学习的多年冻土区路堑边坡稳定性预测.公路交通科技,42(1):131－139.
张媛,董建华,董旭光,等,2017.季节性冻土区土钉边坡支护结构冻融反应分析.岩土力学,38(2):574－582,592.
赵刚,2010.寒区高等级公路路堑边坡春季浅层滑塌机理研究(博士学位论文).哈尔滨:哈尔滨工业大学.
郑颖人,2012.岩土数值极限分析方法的发展与应用.岩石力学与工程学报,31(7):1297－1316.