

# 高寒地区冻土地基稳定性研究 综述

柳明宇

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月14日; 发布日期: 2026年7月6日

## 摘要

高寒地区冻土环境极为脆弱, 多年冻土与季节性冻土广泛发育, 冻土地基的热稳定性与力学稳定性, 是寒区交通、水利、房建等基础设施建设与长期安全运营的核心控制难题。受全球气候变暖加剧、工程开挖填筑、地表植被破坏等人为扰动叠加影响, 原有冻土热平衡体系被打破, 活动层厚度增大、地下冰持续消融、冻融循环作用加剧, 进而引发冻胀隆起、融沉塌陷、路基开裂、不均匀沉降、热融滑塌、翻浆冒泥等典型地基病害, 大幅降低结构服役年限, 增加后期运维与养护成本。本文以高寒冻土地基稳定性为核心主线, 围绕冻土水-热-力多场耦合作用机理、路基长期变形预测方法、主动-被动协同温控技术、冻土复合地基加固机理四大模块, 系统梳理国内外研究成果, 搭配机制示意图、病害示意图、技术原理图、对比表格与研究演进时间轴辅助分析, 全面对比各类理论、方法与工程技术的适用条件、优势缺陷。总结现阶段研究存在的理论模型理想化、技术应用单一化、规范体系滞后化等突出问题, 结合寒区重大工程建设与气候变化背景, 展望未来研究重点与发展趋势。研究旨在系统阐明高寒冻土地基失稳内在机制, 完善冻土地基病害防控与加固技术体系, 为高原及高纬度寒区工程设计、施工运维、灾害防治提供理论支撑与工程参考。

## 关键词

高寒地区, 冻土地基, 稳定性, 水-热-力多场耦合, 变形预测, 温控技术, 复合地基

# Review of Research on the Stability of Frozen Ground Foundations in Cold Regions

Mingyu Liu

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: April 13, 2026; accepted: May 14, 2026; published: July 6, 2026

## Abstract

Permafrost environments in alpine cold regions are extremely fragile, with widespread development of permafrost and seasonally frozen ground. The thermal and mechanical stability of frozen soil foundations constitutes a core restrictive challenge for the construction and long-term safe operation of infrastructure such as transportation, water conservancy and building engineering in cold regions. Compound impacts from intensified global warming, engineering excavation and filling, surface vegetation destruction and other human disturbances disrupt the original thermal equilibrium system of frozen ground. This results in thickening of the active layer, continuous thawing of underground ice, and intensified freeze-thaw cycling effects, which further trigger typical foundation defects including frost heave and uplift, thaw settlement and collapse, subgrade cracking, differential settlement, thermokarst slumping, and mud pumping. Such defects drastically shorten the service life of structures and raise subsequent operation, maintenance and repair costs. Taking the stability of alpine frozen soil foundations as the central theme, this paper systematically reviews domestic and international research findings around four core modules: the coupled hydro-thermal-mechanical multi-field interaction mechanism of frozen ground, long-term deformation prediction methods for subgrades, coordinated active-passive temperature control technologies, and reinforcement mechanisms of composite frozen soil foundations. Mechanism diagrams, defect schematic drawings, technical principle schematics, comparative tables and research evolution timelines are incorporated to assist analysis. The applicable conditions, advantages and limitations of various theories, methodologies and engineering technologies are comprehensively compared. Prominent drawbacks in current research are summarized, including oversimplified theoretical models, narrow and isolated technical applications, and lagging standard specification systems. Against the backdrop of major cold-region engineering construction and climate change, key priorities and development trends for future research are prospected. This study aims to systematically elaborate the intrinsic instability mechanisms of alpine frozen soil foundations, improve the technical system for the prevention, control and reinforcement of frozen soil foundation defects, and provide theoretical support and engineering references for the design, construction, operation, maintenance and disaster prevention of projects on plateaus and high-latitude cold regions.

## Keywords

Alpine Region, Frozen Soil Foundation, Stability, Hydro-Thermal-Mechanical Coupling, Deformation Prediction, Temperature Control Technology, Composite Foundation

Copyright © 2026 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

我国高寒冻土分布范围广阔，主要包括青藏高原高海拔多年冻土区、东北大小兴安岭高纬度季节性冻土区、西北高山冻土区三大板块，冻土总面积位居世界前列。冻土作为一种由土颗粒、冰、未冻水和气体组成的特殊四相介质，其复杂的物理力学性质对寒区工程建设提出了严峻挑战[1]。在自然状态下，冻土依靠长期低温环境维持相对稳定的结构形态，而一旦遭遇气候升温或工程建设扰动，冻土内部冰—水相变频繁发生，直接诱发地基整体变形与局部破坏。

近年来，川藏铁路、青藏高速改扩建、边疆乡村建设、高寒地区能源输送管线等重大工程持续推进，

大量建筑物不可避免坐落于冻土地基之上。气候变暖背景下，高寒区域升温速率远高于全球平均水平，多年冻土上限逐年下降，厚层地下冰加速融化[1]；工程施工中的开挖削坡、路基填筑、硬化路面铺装等活动，降低地表反照率、阻隔原有散热通道、增加地表热输入，与气候变暖叠加，加速多年冻土退化[2]。在季节交替冻融循环与长期升温双重作用下，冻土地基水分迁移、结构劣化、承载力衰减，易引发路基波浪变形、路面裂缝、房屋开裂、边坡热融滑塌等灾害，严重威胁工程安全[1]。

长期以来，国内外学者针对冻土地基稳定性开展了大量室内冻融试验、理论推导、数值模拟与现场长期监测。俄罗斯、加拿大、北欧等冻土发育国家起步较早，在冻土基础力学、被动式温控、冻融变形计算方面形成成熟理论；我国依托青藏铁路等重大工程，在高海拔多年冻土主动冷却技术、复合地基加固、冻土多场耦合数值模拟等方面取得突破，形成了适配我国高寒地域特征的冻土工程技术体系[3]。但现有研究仍存在明显不足：多场耦合模型过度理想化，难以适配现场非均质冻土；变形预测技术与工程实际脱节；温控技术与地基加固技术多单独应用，协同性较差；缺乏面向气候变暖的长效稳定性评价体系。

基于此，本文系统整合现有研究资料，结合图表辅助说明，从耦合机理、预测方法、温控技术、复合地基四个方面展开综述，剖析问题、展望趋势，为高寒冻土工程高质量建设提供参考依据。

## 2. 冻土水 - 热 - 力多场耦合理论与研究进展

### 2.1. 多场耦合作用机制

冻土地基失稳的本质，是温度场、水分场、应力场三场相互耦合、动态反馈的演化过程。温度场是主导控制因素，水分场是变形发育的物质基础，应力场是地基破坏的直接表现，三者相互影响、循环作用。

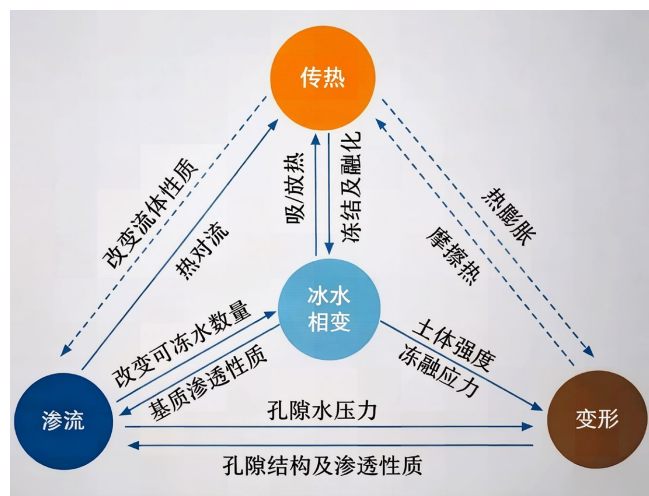


Figure 1. Schematic diagram of the coupling mechanism of water-heat-force multi-fields in frozen soil

图 1. 冻土水 - 热 - 力多场耦合作用机制示意图

见图 1，完整作用逻辑如下：

温度场：季节气温变化、大气升温、工程热输入→冻土温度升降→冰与未冻水相互相变；

水分场：温度梯度、毛细吸力、渗透压力驱动未冻水向冻结锋面迁移，聚冰富集；融水下渗软化土体；

应力场：结冰体积膨胀产生冻胀力，引发隆起、开裂；冰层融化土体压缩，产生融沉变形；上部荷载与冻融附加应力共同控制地基稳定；

耦合反馈：土体变形改变孔隙结构与渗流通道，进而影响热量传导与水分迁移，形成水 - 热 - 力闭

环耦合效应，加剧冻土退化与工程灾变[4]。

## 2.2. 多场耦合理论发展

早期冻土研究仅单一关注温度场分布或水分迁移规律，忽略场间联系；20世纪80年代后，水-热-双场耦合理论逐步完善，重点考虑相变潜热与水分迁移的热效应；21世纪以来，基于质量守恒、能量守恒、动量守恒定律，水-热-力三场全耦合理论成为研究主流。

国外学者较早建立冻土渗流-传热耦合方程，完善冻土有效应力理论；国内科研团队结合青藏高原高含冰量冻土特点，修正冻土本构模型，引入冻融损伤、温度流变参数，建立适配高寒复杂工况的改进THM耦合方程，极大提升了理论模型的区域适用性。

## 2.3. 主流数值模拟方法对比

随着计算机仿真技术发展，数值模拟已成为多场耦合分析、地基稳定性计算的核心手段，各类方法特点见表1：

**Table 1.** Comparison table of numerical simulation methods for coupled Multi-field processes in permafrost

**表 1.** 冻土多场耦合数值模拟方法对比表

数值分析方法	常用软件	核心优势	适用工程场景	主要局限性
有限元法(FEM)	ABAQUS, COMSOL	边界条件适配性强, 多场耦合计算稳定	公路路基、房建地基、大型冻土工程	建模复杂, 计算耗时, 参数调试难度大
有限差分法(FDM)	FLAC3D	非线性大变形模拟效果好, 计算效率高	冻土边坡稳定、长期沉降分析	异形结构建模困难, 复杂工况适应性一般
离散元法(DEM)	PFC 系列	可还原冰晶、土颗粒细观结构变化	冻土微观机理、裂隙扩展研究	

## 2.4. 现阶段研究不足

多数耦合模型忽略盐分、植被覆盖、局地微气候等复杂影响因素，理想化假设过多；模型参数多取自室内小型试验，与现场含裂隙、夹层、非均质冻土差距较大；多场耦合计算复杂繁琐，难以直接融入工程设计规范，理论落地应用不足。

## 3. 冻土路基长期变形预测方法分析

冻土地基长期变形包含季节性往复变形与逐年累积永久变形，精准预测是工程设计、病害预警、养护决策的重要依据，现有技术主要分为四类。

### 3.1. 经验与半经验预测方法

依托长期现场监测数据，通过数理统计回归，建立冻胀量、融沉量与冻深、含水率、土质、气温之间的经验公式。该方法计算简单、参数易得、便于基层工程应用，广泛用于中小型寒区工程初步设计。传统方法地域限制性大、通用性差，难以考虑气候变暖与长期冻融累积损伤，仅适用于局部区域简单估算，无法满足长期服役与复杂环境下的工程需求[5]。

### 3.2. 理论解析预测方法

以热力学、渗流力学、冻土弹塑性力学为基础，通过简化边界条件推导变形解析解，物理概念清晰，能够从机理层面解释冻融变形发育规律。但解析求解需要大量简化假设，仅适用于一维土层、均质土体、简单边界条件，复杂场地条件下计算误差大，工程推广受限。

### 3.3. 数值模拟预测方法

依托多场耦合数值模型，完整还原全年冻融循环、热量传导、水分迁移与应力演化全过程，可模拟不同气候条件、不同加固方案下地基长期变形规律，能够实现数十年尺度冻土退化变形预测，是当前重大冻土工程的主流预测手段。缺点在于建模流程复杂、专业软件依赖性强、对操作人员技术要求较高。

### 3.4. 监测 - 数值耦合预测方法

通过布设温度传感器、分层沉降仪、水分监测设备，结合物联网实时采集原位数据。

## 4. 主动 - 被动协同路基温度场调控技术

冻土融化是融沉病害发生的根源，维持冻土长期低温稳定、削弱冻融交替强度，是冻土地基防控的核心思路。当前冻土工程普遍采用被动温控为主、主动温控为辅的协同调控模式，兼顾长期稳定性与服役安全性[4]。

### 4.1. 高寒冻土路基典型病害

长期冻融循环作用下，冻土地基发育多类典型病害，直接影响结构安全。

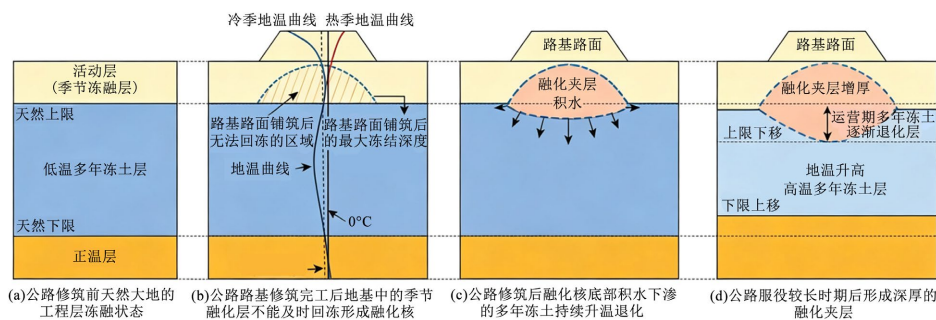


Figure 2. Schematic diagram of typical diseases of high-cold permafrost subgrade (section)

图 2. 高寒冻土路基典型病害示意图(剖面)

主要病害见图 2，包含：冻胀隆起、路基融沉塌陷、纵向及横向开裂、不均匀差异沉降、热融滑塌、春季翻浆冒泥六类；病害主要源于冬季水分聚冰膨胀、夏季地下冰融化软化，加之冻土含冰量空间分布不均与边坡表层融化失稳，共同引发冻胀、融沉与滑坡灾害[5]。

### 4.2. 被动式温度调控技术

被动温控无需外部能源，依靠材料与结构自身特性调节热环境，造价低、耐久性好：

保温层路基：铺设挤塑聚苯板、聚氨酯保温层，阻隔夏季外界热量下渗，减缓冻土升温退化；

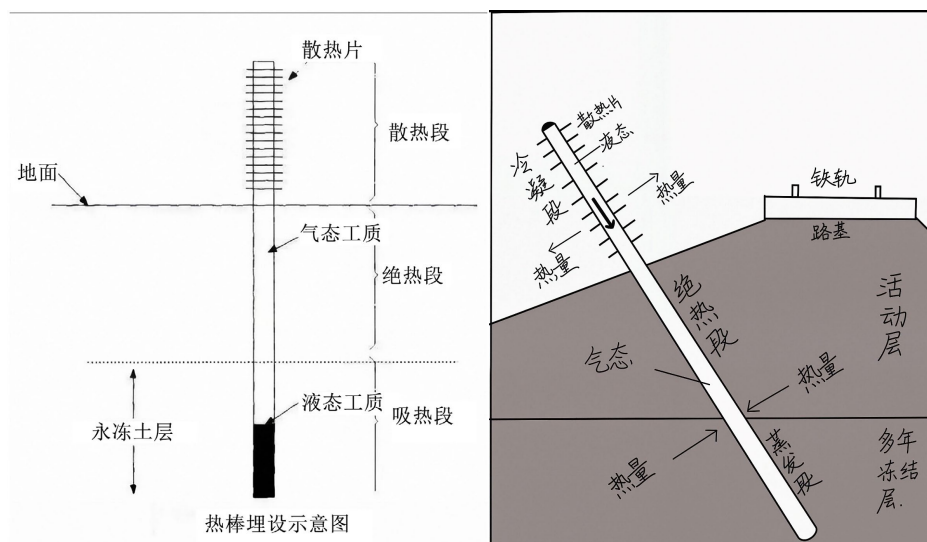
通风管路基：路基内部预埋横向通风管道，利用高原昼夜温差与自然风对流散热；

块石、碎石垫层路基：利用大孔隙骨架结构形成自然空气对流层，实现天然被动降温。

被动技术适合大范围常规路段，可有效延缓冻土退化，但在高温多年冻土、高含冰量地段单独使用效果有限。

### 4.3. 主动式温度调控技术

主动温控依靠人工强化散热，制冷效果强，多用于重点病害路段与高含冰量冻土区，热棒技术为最成熟应用形式。



**Figure 3.** Schematic diagram of the working principle of active temperature control thermosyphon technology  
**图 3.** 热棒主动温控技术工作原理图

工作原理见图 3：热棒为密闭重力式热管装置，下段蒸发段深埋冻土地基内，上段冷凝段裸露大气；冬季低温环境下，管内液态工质吸收冻土热量汽化上升，在顶端释放热量后冷凝液化，依靠重力回流底部，循环往复持续带走地基热量，常年保持冻土冻结稳定，有效抑制多年冻土融化。

#### 4.4. 主动 - 被动协同调控体系

单一技术存在明显短板：被动隔热无法强力降温，主动热棒造价偏高。工程实践证明：保温层隔热 + 块石通风 + 局部热棒补强的组合模式，夏季阻隔热量侵入、冬季强化自然散热、关键区段主动制冷，全年稳定冻土温度场，综合防控效果最优，已大规模应用于青藏铁路、高原高速等重点工程。

### 5. 冻土区复合地基加固机理与设计理论

针对高含冰量、强融沉、软弱冻土地基，单纯温控无法完全控制变形，必须配套地基加固措施，复合地基是现阶段冻土区地基处理的核心技术。

#### 5.1. 常用复合地基类型

高寒冻土区常用加固形式：刚性桩复合地基、碎石垫层复合地基、桩网复合地基、水泥石复合地基等，可根据冻土冻胀等级、含冰量、工程等级差异化选用。

#### 5.2. 复合地基核心加固机理

荷载分担作用：刚性增强体承担上部主要荷载，减小原状冻土受力，降低压缩变形；  
 变形约束作用：桩体、加固层刚度大，限制土体冻胀隆起与融沉压缩，减小不均匀沉降；  
 隔水阻渗作用：竖向增强体阻断水分竖向迁移通道，减少冻结期水分聚集，从源头弱化冻胀条件；  
 协同温控作用：加固材料改变局部导热特性，辅助维持地基低温环境，实现加固与温控协同增效。

#### 5.3. 设计理论及现存问题

我国现行冻土规范，在常规复合地基计算基础上，增加冻胀力验算、融沉变形控制、冻融耐久性要求，初步形成冻土专用设计体系。现存不足：长期冻融循环下结构劣化机理研究不足；高海拔极端低温

冻土设计参数缺乏系统试验；复合地基与温控结构一体化设计理论不完善。

## 6. 冻土工程研究演进与未来展望

### 6.1. 研究发展时间脉络

1950~1990年：基础观测阶段，聚焦冻土物理力学性质、简单冻融现象研究；1990~2010年：理论突破阶段，水热耦合模型、被动冷却路基、常规冻土加固技术快速发展；2010年至今：智能协同阶段，多场耦合精细化模拟、主动-被动协同温控、智能监测预警、复合一体化加固全面发展。

### 6.2. 整体现存问题

理论层面：多场耦合模型理想化，气候变暖下冻土长期演化预测精度不足；  
技术层面：各类防控技术分散应用，一体化协同设计体系不完善；  
工程层面：长期原位监测数据不足，理论模型缺乏长期现场验证；  
规范层面：高寒高含冰量冻土专项设计、施工、养护标准有待完善。

### 6.3. 未来研究方向

构建考虑气候变暖、冻融累积损伤的精细化 THM 多场耦合模型；研发低碳生态型协同温控材料与复合加固新技术；融合大数据与人工智能，建立冻土工程全生命周期智能监测预警系统；完善高寒冻土区专项设计规范，推动理论研究与工程实践深度结合；

推进温控、加固、边坡防护多技术一体化集成应用；持续校准数值模型参数，动态修正预测结果。该方法预测精度最高，可实现病害提前预警，是智慧冻土工程未来发展方向，唯一短板是建设与运维成本偏高。

## 7. 结论

高寒冻土地基稳定性由水-热-力多场耦合共同控制，冰-水相变与水分定向迁移是诱发冻胀、融沉病害的根本原因，深化多场耦合机理研究是保障地基稳定的理论核心。

冻土地基变形预测形成经验法、解析法、数值模拟、监测耦合四类技术体系，监测与数值结合的耦合预测方法精度最高，是未来发展主流。

主动-被动协同温控技术可有效维持冻土热平衡，抑制地下冰消融，热棒、通风路基、保温结构组合使用，适配高寒重大工程长期稳定需求。

复合地基能够有效提升冻土地基承载力、约束冻融变形、阻断水分迁移，是高含冰量软弱冻土区地基处理的关键技术。

面对气候变暖与寒区工程建设需求，需推动理论精细化、技术协同化、监测智能化、规范系统化发展，全面提升高寒冻土地基长效稳定保障能力。

## 参考文献

- [1] 张敏, 袁克阔, 黄镇斌. 冻土冻融过程研究综述[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1715-1722.
- [2] 吴青柏, 张中琼, 刘戈. 青藏高原气候转暖与冻土工程的关系[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 342-352.
- [3] 马巍, 周国庆, 牛富俊, 等. 青藏高原重大冻土工程的基础研究进展与展望[J]. 中国基础科学, 2016, 18(6): 9-19.
- [4] 雷大伟. 土体冻结水热力耦合理论研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [5] 高峰, 曾宪璋, 钟闻华, 等. 多年冻土区道路工程病害处治技术研究进展与展望[J]. 中外公路, 2024, 44(5): 1-16.