

综述论文

DOI: 10.63221/ecsp.v1i01-04.24-29

亮点:

- 系统梳理青藏铁路沿线近 60 年气温与冻土变化的研究进展
- 综合评述气温变化驱动铁路稳定性退化的关键机制
- 总结现有工程适应技术、监测手段与关键不足，提出未来研究方向

*通讯作者邮箱:

1092026305@qq.com

英文引用: Bai Yang, et al., 2025. A Review of Studies on the Relationship between Qinghai–Tibet Railway Stability and Temperature Variations. Evidence in Engineering Science and Practice, 1(01-04), 24-29.

中文引用: 白阳等, 2025. 青藏铁路稳定性与气温变化的关系研究综述. 工程科学与实践, 1 (01-04) , 24-29.

稿件处理节点:

接收	2025 年 11 月 26 日
修订	2025 年 12 月 05 日
接受	2025 年 12 月 05 日
发表	2025 年 12 月 08 日

基金资助:

本研究未受到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

青藏铁路稳定性与气温变化的关系研究综述

白阳^{1,*}

¹ 北京华横科技有限公司, 北京 100084

摘要 青藏铁路作为连接青藏高原与外界的重要通道, 其稳定性和安全运营受到气温变化的显著影响。随着全球气候变化加剧, 极端天气事件频发, 对铁路基础设施的影响日益凸显。气温波动会导致路基材料出现冻融循环现象, 进而影响铁路结构的稳定性和安全性。然而, 目前缺乏系统性的研究来全面评估气温变化对青藏铁路稳定性的影响机制及应对策略。本综述旨在总结当前研究进展, 识别研究空白, 并提出未来研究方向, 以期为保障青藏铁路的安全运营提供科学依据和技术支持。

关键词: 气温变化; 多年冻土; 冻融循环; 青藏铁路稳定性; 综述

A Review of Studies on the Relationship between Qinghai–Tibet Railway Stability and Temperature Variations

Bai Yang^{1,*}

¹ Beijing Huaheng Technology Company Limited, Beijing 100084, China

Abstract As a crucial transportation corridor linking the Qinghai–Tibet Plateau with surrounding regions, the Qinghai–Tibet Railway is highly sensitive to temperature variations that directly affect its stability and safe operation. Intensified global climate change and the increasing frequency of extreme weather events have posed growing challenges to railway infrastructure. Temperature fluctuations can cause freeze–thaw cycles in subgrade materials., thereby affecting the stability and safety of railway structures. However, there is still a lack of systematic research to comprehensively evaluate the mechanisms through which temperature variations influence railway stability, as well as the corresponding mitigation strategies. This review aims to summarize current research progress, identify knowledge gaps, and propose future research directions, with the goal of providing a scientific basis and technical support for ensuring the safe operation of the Qinghai–Tibet Railway..

Keywords: Temperature variation; Permafrost; Freeze–thaw cycles; Qinghai–Tibet Railway stability; Review

1. 引言

青藏铁路作为中国铁路建设史上的重要里程碑，不仅是中国西部大开发战略的重要基础设施，也是连接西藏与内地的重要交通命脉^[1]。其建成通车极大地改善了青藏高原地区的交通条件，促进了区域经济、文化和社会的快速发展^[2]。青藏铁路穿越青藏高原多年冻土区、高寒缺氧区及生态环境脆弱区，其线路总长超过 1956 公里^[3]，其中多年冻土区约占线路总长的 550 公里，是世界上海拔最高、线路最长、冻土区最长的高原铁路。该工程在设计施工过程中，面临诸多世界级技术难题，如冻土路基的稳定性控制、高寒环境下的材料性能保障、以及生态环境保护等，其建设成果体现了中国在高原铁路工程领域的综合实力和技术水平。然而，随着全球气候变暖趋势的加剧，青藏铁路沿线气候条件发生了显著变化，尤其是气温的持续升高，对铁路结构的长期稳定性构成了潜在威胁^[4]。研究表明，自 20 世纪 60 年代以来，青藏铁路沿线年平均气温以 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速度上升，进入 21 世纪后升温速率显著加快，达到 2~4 倍^[5,6]。这种气温变化不仅影响多年冻土的热力状态，还可能引发路基沉降、轨道变形等工程问题。因此，深入研究青藏铁路稳定性与气温变化之间的关系，对于保障铁路运营安全、延长使用寿命、以及制定科学的维护策略具有重要的理论与实践意义。

青藏铁路穿越中国西部高海拔多年冻土区，其线路所经区域的气候环境对铁路结构的稳定性具有深远影响。近年来，受全球气候变暖的驱动，青藏铁路沿线地区的气温呈现出显著的上升趋势^[7]。根据相关气象观测资料，1961—2011 年间，该区域气温以约 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速率增长，而进入 21 世纪后，升温速率加快至原来的 24 倍，显示出气候变暖趋势的加剧。五道梁、沱沱河、安多等气象站以及风火山观测站的长期观测数据显示，近 60 年来该地区年平均气温的线性升温速率介于 $0.0310.036\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 之间^[8]，且在不同时间段内存在波动性上升特征。尤其值得注意的是，风火山地区的地表温度变化趋势更为显著，1976—1986 年期间年平均地表温度普遍低于 37 年平均值，而自 1993 年起，该地区地表温度开始明显上升，20 年间年平均地表温度均高于历史平均水平，其年均增长率达到 $0.0608\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ，是气温增长速率的 1.34 倍。这一现象表明，地表温度的升温速率显著高于空气温度，暗示着冻土层的热响应更为敏感。此外，气温变化不仅体现在年均值的上升，更表现

为季节性的显著差异，尤其是冬季升温幅度较大，暖冬现象日益频繁，导致冻土的热力平衡被打破，从而对铁路路基结构的稳定性构成潜在威胁。与此同时，青藏铁路沿线的年降水量也呈现增长趋势，进一步加剧了冻土水热过程的复杂性^[9]。综合来看，气候变暖背景下，青藏铁路沿线地区气温变化呈现出长期上升、季节差异显著、地表升温速率快等特征，为铁路结构稳定性研究提供了重要的气候背景依据。

本综述的目标在于系统梳理和深入分析青藏铁路沿线近 60 年以来的气候变化趋势，特别是气温变化及其对冻土环境的影响，从而为青藏高原地区铁路工程的可持续发展和冻土区基础设施的稳定性提供科学依据与理论支持。随着全球气候变暖的加剧，青藏铁路沿线的气候环境正经历显著变化，具体表现为年平均气温的持续上升、冻融过程的增强以及地表温度的显著波动。这些变化不仅影响区域生态系统，更对铁路路基的稳定性构成潜在威胁。因此，本研究聚焦于气温变化的长期趋势、不同时间段内的升温速率差异以及地表温度的演变特征，通过整合多站点观测数据，分析气温与冻土活动的相互作用机制，进而评估其对铁路工程结构安全的影响。本综述旨在构建一个基于实证数据的气候变化与铁路冻土工程响应之间的理论框架，为冻土区铁路工程的设计、施工与维护提供科学指导。预期成果包括：一是明确青藏铁路沿线气候变化的时空分布特征，揭示其在不同时期的演变规律；二是建立气温变化与冻土活动之间的定量关系模型，评估其对铁路路基稳定性的影响程度；三是提出应对气候变化背景下冻土区铁路工程的适应性策略，为未来高原铁路工程的可持续发展提供理论支撑和决策参考。通过本综述的系统研究，期望能够推动冻土工程领域在气候变化背景下的理论创新与技术进步，为高原铁路建设与运营的长期安全提供坚实的科学基础。

2. 青藏铁路稳定性影响因素分析

2.1. 地质条件

青藏铁路穿越青藏高原多年冻土区，其地质条件复杂，对铁路的稳定性具有重要影响。多年冻土是指地温连续两年或更长时间保持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的土体，其物理力学性质与地温密切相关。在青藏高原特殊的地理和气候环境下，多年冻土广泛分布，构成了青藏铁路路基的重要基础。然而，近年来受全球气候变暖影响，青藏铁路沿线气温呈显著上升趋势

势,尤其是在 21 世纪以来,升温速率较历史时期增加了 2~4 倍,对多年冻土的热力稳定性造成了显著扰动。研究表明,自 1961 年至 2011 年,青藏铁路沿线年均气温以 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速度上升,而进入 21 世纪后,升温速率进一步加快,部分地区如风火山地区年均地表温度增长率达到 $0.0608\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$,是气温增长率的 1.34 倍。这种持续增温趋势导致多年冻土的热结构发生改变,地温升高,冻结指数增幅大于融化指数增幅,表明寒冷季节的增温尤为显著,暖冬现象日益突出。地温变化进一步影响了冻土的物理状态,表现为冻土退化、融化、热融沉陷等现象,从而对铁路路基的稳定性构成威胁。此外,不同区域的冻土退化程度存在差异,如楚玛尔河高平原至北麓河盆地地温变化范围为 $0.04\sim 0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻土南北边界退化尤为明显,对铁路工程结构的长期稳定性提出了严峻挑战^[10]。综上所述,青藏铁路沿线地质条件受气温变化影响显著,冻土热力环境的持续变化将直接关系到铁路路基的沉降、变形及整体稳定性,因此在铁路工程设计与维护中,必须充分考虑气候变化对冻土区地质条件的长期影响,以确保铁路运行的安全性与可靠性。

2.2. 施工技术

青藏铁路作为穿越多年冻土区的重大工程,其施工技术与气候环境之间的关系尤为密切。研究表明,气温变化对冻土热力学状态具有显著影响,进而影响铁路路基的稳定性。在青藏铁路建设过程中,施工技术不仅需应对高原复杂地质条件,还需主动适应气候变化带来的挑战。为此,青藏铁路工程在施工阶段采取了一系列创新性技术措施,以确保冻土路基的热力稳定性。例如,施工中广泛采用了热棒、通风管路基、块石结构路基等工程结构,通过调控热传导、对流和辐射等方式,实现对冻土的主动降温,有效抑制了冻土温度的上升趋势。这些技术手段在实际应用中表现出良好的工程适应性,尤其在应对气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的模拟预测中,显示出较强的冻土保护能力。此外,青藏铁路施工还注重工程结构与自然环境的协调,通过优化路基走向、设置遮阳板和块碎石护坡等措施,减缓了太阳辐射对边坡温度场的不均匀影响,从而降低了阴阳坡效应带来的不均匀沉降风险。施工技术的实施不仅依赖于理论研究和试验验证,更需结合长期监测数据进行动态反馈和调整^[11]。青藏铁路沿线建立了完善的冻土与路基稳定性监测系统,为施工技术的优化提供了科学依据。通过“设计—监测—预

测—反馈管理”的动态循环机制,施工技术不断得到修正和完善,确保了工程在复杂气候条件下的长期稳定运行。综上所述,青藏铁路施工技术在应对气温变化、保护冻土稳定性方面发挥了关键作用,为高原冻土区铁路建设提供了可借鉴的工程范式。

3. 气温变化对青藏铁路稳定性的影响机制

3.1. 冻融循环

冻融循环是影响青藏铁路路基稳定性的关键因素之一,其强度和频率与气温变化密切相关^[12]。随着全球气候变暖,青藏高原地区气温呈现显著上升趋势,特别是 21 世纪以来,升温速率较历史时期增大了 2 至 4 倍,导致冻融循环过程更加频繁且剧烈。冻融循环主要表现为冬季冻结与夏季融化交替进行,其作用机制涉及水分相变、土体结构变化以及热力应力的积累。在多年冻土区,冻融循环不仅影响地表形态,还会引发深层地下冰的融化,进而造成热融沉陷、热融滑坍、冻胀丘、冰椎等次生不良冻土现象。这些现象对铁路路基的承载能力、变形控制以及长期稳定性构成严重威胁。研究表明,青藏铁路沿线多年冻土区年平均地温呈上升趋势,活动层厚度随之增加,地下冰的融化速率加快,从而加剧了路基的沉降和变形^[13]。在高温高含冰量冻土路段,冻融循环的热力学效应尤为显著,土体在反复冻融过程中易发生塑性变形,降低路基的结构强度和抗变形能力。此外,冻融循环还可能改变冻土的水文地质条件,增加地下水活动的不确定性,进一步影响路基的排水性能和稳定性。因此,在青藏铁路工程的设计与维护中,必须充分考虑气候变暖背景下冻融循环的动态变化规律,采取动态设计、动态补强的策略,以提升铁路工程对冻融作用的适应能力和抗灾能力。冻融循环作为气候与冻土相互作用的直接体现,其研究不仅对青藏铁路的可持续运营具有重要意义,也为高寒地区其他冻土工程提供了理论支持和技术借鉴。

3.2. 温度应力

青藏铁路作为中国高海拔地区最具代表性的铁路工程之一,其稳定性不仅受到地质构造、冻土活动等自然因素的制约,也与气温变化密切相关^[10]。特别是在全球气候变暖背景下,青藏高原地区气温呈现显著上升趋势,这一变化对铁路结构的热力稳定性构成了持续性影响。在铁路工程领域,温度应力是影响结构稳定性的关键力学因素之一,尤其在严寒冻土区,温度变化引起的热胀冷缩效应可能导致

路基、轨道结构产生微裂缝甚至结构性破坏。研究表明,随着气温的持续升高,冻土层的热平衡状态受到扰动,导致冻土上限下降、融化深度增加,从而引发地基沉降与变形。这种热力—力学耦合作用对铁路结构的长期稳定性构成了潜在威胁。此外,温度应力的累积效应在季节性冻融循环中尤为显著,冬季低温导致轨道材料收缩,夏季升温则引发膨胀,反复的应力变化可能加速轨道结构疲劳损伤。因此,在青藏铁路的维护与设计中,必须充分考虑温度应力的动态演变特征,建立基于气候响应的结构稳定性评估模型。近年来,研究人员通过数值模拟与现场监测相结合的方法,探讨了不同升温速率对铁路结构温度应力分布的影响机制,并提出采用热隔离材料、优化轨道结构参数等工程措施以提升铁路系统的抗温变能力^[14]。总体而言,温度应力作为青藏铁路稳定性研究中的核心问题之一,其研究不仅有助于深化对高寒地区铁路工程热力响应机制的理解,也为铁路工程的长期安全运营提供了理论支撑与技术指导。

4. 现有研究成果与研究方法综述

青藏铁路沿线气候变暖背景下铁路工程稳定性问题已成为国内外学界关注的重点。现有研究普遍表明,该区域自 20 世纪中叶以来气温持续上升,且 21 世纪后升温速率显著加快,对多年冻土热力状态、地基沉降及路基结构变形造成深刻影响。国内研究针对气温变化及其对冻土退化的影响进行了系统分析,明确指出青藏铁路沿线年均气温呈现显著升高趋势,1961—2011 年间升温速率为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$,进入 21 世纪后增至 $0.06\sim 0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$,部分地区更高于 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 。同时,寒季气温上升明显,暖冬现象导致冻结指数快速增加,破坏了冻土的热力平衡。此外,研究显示地表温度对气候变暖的响应更为敏感,如风火山地区 1976—2012 年地表温度上涨率达 $0.0608\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$,为同期气温变化的 1.34 倍。国内学者还从周期性角度揭示了气温与地温变化中存在 2.2~3.1 年、17~19 年、21~24 年等多个显著周期,为预测未来气候趋势及铁路稳定性变化提供了科学依据^[15]。

国际学界从全球气候变化视角出发,同样强调青藏高原作为敏感区对变暖高度响应。相关研究利用地面观测、遥感监测及气候模型等多源数据,证实青藏铁路沿线气温上升速率在 21 世纪初较历史平均水平提高 2~4 倍。国际研究普遍关注冻土的热力学

响应机制,如俄罗斯贝阿铁路、加拿大与阿拉斯加的多年冻土铁路工程也普遍面临路基热稳定性下降、冻融变形加剧等问题。与青藏铁路相比,这些工程在气候类型、地温扰动强度及工程控温措施方面存在差异,但其共同挑战均源于气候变暖下多年冻土退化的加速趋势。气温升高将增强融化指数,削弱冻土承载能力,并因暖冬导致冻结深度减少,使路基不均匀沉降加剧。此外,工程适应性措施(如热棒系统、改良路基结构等)被证明可有效提升铁路应对气候扰动的能力,相关经验为我国铁路工程建设提供了有益参考。

研究方法上,青藏铁路冻土环境研究已形成较成熟的数据采集与分析体系。数据来源包括沿线自动气象站的实时气象监测、埋设式温度传感器的冻土热状态记录、钻孔测试的冻土物理力学参数获取、铁路病害巡检资料及遥感影像等。分析方法则包括时间序列分析、Mann-Kendall 趋势检验、统计回归模型、克里金空间插值、遥感-地面数据融合以及太阳辐射与阴阳坡效应模拟等。这些方法系统揭示了气温与地温的变化趋势、冻土的热力响应机制以及路基结构在气候变暖背景下的潜在风险,为评估铁路工程稳定性并制定适应性策略提供了坚实的理论基础和技术支撑。

5. 气温变化对青藏铁路稳定性影响的实证分析

5.1. 数据分析结果

通过对青藏铁路沿线气候与冻土环境的长期监测数据进行系统分析,可以得出多个关键性的研究发现。首先,从气温变化趋势来看,自 1961 年至 2011 年,青藏铁路沿线各区域的年均气温以约 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速率持续上升,而进入 21 世纪后,升温速率显著加快,达到历史速率的 2~4 倍^[16]。这一变化不仅体现在年均气温上,更在季节性气温分布上表现出明显的非对称性,即气温升高主要集中在寒冷季节,表现为“暖冬”现象的加剧。具体而言,风火山地区的融化指数以 $0.2064\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}/\text{年}$ 的速率上升,而冻结指数则以 $0.3369\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}/\text{年}$ 的速率增长,尽管融化指数增幅略低,但整体趋势表明寒季变暖趋势明显,对多年冻土稳定性构成潜在威胁。

此外,年降水量的变化也呈现出上升趋势,沿线多年冻土区年均降水量在 250~450 mm 之间,南部边缘可达 550 mm。降水的增加在一定程度上缓解了部

分区域的干旱问题，但同时也可能对冻土水热平衡产生复杂影响，尤其是在冻融交替频繁的区域，增加了路基变形与结构破坏的风险。进一步分析风火山地区 1976—2012 年的地表温度变化曲线发现，该地区在 1976—1986 年间的年平均地表温度普遍低于 37 年平均值，而在 1993—2012 年间则显著升高，年均增长率达 $0.0608\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ，约为气温增长率的 1.34 倍，显示出地表温度对气候变化的响应更为敏感。

在工程结构与冻土相互作用方面，研究发现太阳辐射对路基阴阳坡的热效应显著，导致冻土温度分布不均，进而引发路基不均匀沉降、纵向裂缝等工程问题^[17]。监测数据显示，普通路基下部阴阳坡温度差异可达 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而采用块碎石边坡等工程措施后，温度差异显著降低，表明合理工程设计对抑制阴阳坡效应具有显著效果。同时，路基走向与太阳辐射强度之间存在正相关关系，提示未来铁路工程设计应充分考虑地理方位对热环境的影响，以提升冻土区铁路的长期稳定性与安全性^[18]。

5.2. 影响程度评估

青藏铁路作为我国高原地区重要的交通基础设施，其运行稳定性在很大程度上受到气候变化的直接影响，尤其是气温的长期变化趋势。根据青藏铁路沿线五道梁、沱沱河、安多及风火山观测站近 60 年的气象观测数据，自 1957 年至 2017 年，该区域年均气温以 $0.031\sim 0.036\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 的速率呈波动上升趋势^[19]。这一升温速率虽低于全球平均增温速率，但由于青藏高原特殊的地理环境与生态系统，其对铁路结构稳定性的影响尤为显著。气温的持续升高可能引发冻土退化、地基沉降、路基变形等问题，从而对铁路的长期运营安全构成潜在威胁。在理论研究层面，需综合考虑气温变化对冻土热力学特性、地基承载力及轨道结构应力分布的影响机制，建立相应的数值模型与评估体系，以量化气候变化对铁路工程结构的长期影响。此外，还需结合区域气候变化预测模型，分析未来不同升温情景下铁路沿线可能面临的稳定性风险，为工程维护与适应性设计提供科学依据。因此，深入评估气温变化对青藏铁路稳定性的影响程度，不仅具有重要的工程实践意义，也为高原地区交通基础设施的可持续发展提供了理论支撑。

6. 应对策略、结论与未来展望

青藏铁路所处的多年冻土区对气候变化极为敏感，21 世纪以来区域升温速率显著加快，给铁路路基的热力稳定性和运营安全带来了前所未有的挑战。气温升高导致冻土上限抬升、活动层加深、冻融循环增强，直接影响路基结构的变形与力学响应，对铁路工程的长期稳定构成潜在威胁^[20]。鉴于此，有必要从工程技术与政策制度两方面提出系统性的应对策略，并在总结现有研究成果的基础上进一步明确未来研究的发展方向。

6.1. 工程技术改进

针对气温持续升高、多年冻土热稳定性下降的趋势，应全面提升现有工程结构的适应能力。首先，在路基热调控方面，应优化“冷却路基”设计，通过热棒与通风管组合结构强化地温调控能力。建议引入智能调控系统，基于实时监测数据动态调节热棒工作状态，以提高在极端气候条件下的冷却效率。其次，应进一步推广块石路基结构，其在升温背景下表现出较强的热稳定性，可显著减缓地温上升对冻土的影响。

针对阴阳坡效应所导致的不均匀融沉，应加强边坡的热隔离设计，如采用不同厚度的块碎石结构以减弱太阳辐射造成的热差异。此外，在新线路规划中应优化线路走向，尽可能减少因朝向差异引起的热不均匀性，从源头上降低冻融界面倾斜度和路基变形风险。与此同时，必须进一步完善冻土区铁路工程监测体系，构建覆盖地表温度、冻土上限、路基沉降等关键参数的长期监测网络，并依托人工智能构建预测模型，实现冻土变化趋势的精准预判与工程响应的动态调整。上述工程技术的系统升级将为青藏铁路在未来气候情景下保持结构稳定和安全运营提供坚实支撑。

6.2. 政策建议与未来研究方向

为了提升高原铁路工程在气候变化背景下的适应能力，应从政策制定、监测体系、环境保护与科研投入等多个方面进行系统部署。首先，应在铁路规划、建设及运营全过程贯彻“动态设计与动态补强”理念，将气候变化因素纳入工程适应性设计标准，推动热棒、通风管等热调控技术的规范化应用。其次，应建立集地温、活动层厚度、地下水位、冻融变形等多参数于一体的综合监测与预警体系，结合遥感、物联网和大数据分析，实现对冻土变化和工程风险的实时感知。

在生态保护方面，应完善冻土区工程的环境影响评价制度，减少施工过程中的热扰动与生态破坏，促进工程与高原脆弱生态系统的协调发展。同时，应建立国家层面的气候变化影响评估机制，推动跨部门协作，构建气候适应型基础设施政策框架。未来研究应加强冻土热力学过程、路基热-力耦合机制、多源数据融合技术、工程结构弹性设计与生态修复等方向的深入探索，形成理论创新、技术发展与工程实践之间的良性循环，为青藏铁路及其他高原重大工程的长期安全运行提供更加坚实的科技支撑。

参考文献

- [1] 夏海山. 中国铁路遗产文化价值概览 [J]. 新建筑, 2024, 42(5): 8-13.
- [2] 李青. 历史联系与新发展格局下的川藏滇青交界区域合作 [J]. 区域经济评论, 2021.
- [3] 汪双杰, 陈建兵, 章金钊, 等. 青藏高原多年冻土区公路修筑技术之进展 [J]. 中国科学: E 辑, 2009, (1): 8-15.
- [4] 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]. Journal of Engineering Geology/Gongcheng Dizhi Xuebao, 2021, 29(2).
- [5] 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 青藏高原近 60 年来气候变化及其环境影响研究进展 [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(1).
- [6] 徐影, 赵宗慈, 李栋梁. 青藏高原及铁路沿线未来 50 年气候变化的模拟分析 [D]; 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2005.
- [7] 张倚浩, 阎建忠, 程先. 气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2023, 43(6).
- [8] 周扬, 徐维新, 白爱娟, 等. 青藏高原沱沱河地区动态融雪过程及其与气温关系分析 [J]. 高原气象, 2017, 36(1): 24-32.
- [9] 张明礼, 雷兵兵, 周凤玺, 等. 青藏高原降雨增加和气温升高对多年冻土水热动态贡献研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45(7).
- [10] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445-68.
- [11] 杜岩, 吕梦镓, 刘敬楠, 等. 脆性破坏地质灾害智能监测预警研究与展望 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(3): 755-69.
- [12] 林战举, 牛富俊, 徐志英, 等. 青藏铁路沿线热融沟发展特征及其对路基热稳定性的影响 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 566-73.
- [13] 刘明浩, 孙志忠, 牛富俊, 等. 气候变化背景下青藏铁路沿线多年冻土变化特征研究 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1122-30.
- [14] 任怀平. 高速铁路大跨度连续梁桥线形控制对轨道静态平顺性影响分析 [J]. 地震地磁观测与研究, 2025, 46(1): 177-86.
- [15] 刘凯, 聂格格, 张森. 中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1113.
- [16] 蔡汉成, 李勇, 杨永鹏, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区气温和多年冻土变化特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1434-44.
- [17] 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.
- [18] 罗涛, 吕梦菲, 吴亚平, 等. 基于热稳定性的冻土区铁路路基过渡段结构改进研究 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 374-83.
- [19] 孙志忠, 马巍, 穆彦虎, 等. 青藏铁路沿线天然场地多年冻土变化 [J]. 地球科学进展, 2018, 33(3): 248.
- [20] 范星文, 林战举, 罗京, 等. 高海拔多年冻土区路基工程行为对低温多年冻土长期影响的监测研究 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1323-33.