

# 变形监测技术在气象观测基地建设中的探索与实践研究

李圆圆<sup>1,2,3</sup>, 魏旭辉<sup>1,2\*</sup>, 闻海彭<sup>1,2</sup>, 朱思华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>新疆维吾尔自治区人工影响天气中心, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆人工影响天气工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>新疆大学地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年11月27日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月9日

## 摘要

气象观测基地是获取气象数据的关键场所, 其稳定性对于气象研究和预报的准确性至关重要。本文探讨了变形监测技术在气象观测基地建设中的应用, 通过梳理国内外研究现状, 详细阐述了包括水准测量等传统方法及GNSS、光纤传感等多种监测技术方法, 分析了面临的挑战, 提出了创新策略, 并结合新疆建设气象外场试验基地的实际案例展示了变形监测的应用效果, 最后对未来发展趋势进行展望。本文旨在为气象观测基地的建设、维护和发展提供全面的理论与实践参考, 以确保气象观测工作的可靠性和科学性。

## 关键词

变形监测技术, 气象观测基地, 稳定性分析, 防灾减灾

# Exploration and Practical Research on Deformation Monitoring Technology in the Construction of Meteorological Observation Bases

Yuanyuan Li<sup>1,2,3</sup>, Xuhui Wei<sup>1,2\*</sup>, Haipeng Wen<sup>1,2</sup>, Sihua Zhu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Xinjiang Weather Modification Center, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Weather Modification Engineering Technology Research Center, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: November 27, 2025; accepted: January 28, 2026; published: February 9, 2026

文章引用: 李圆圆, 魏旭辉, 闻海彭, 朱思华. 变形监测技术在气象观测基地建设中的探索与实践研究[J]. 地理科学研究, 2026, 15(1): 18-26. DOI: 10.12677/gser.2026.151003

## Abstract

As a key site for obtaining meteorological data, the stability of meteorological observation bases is crucial for the accuracy of meteorological research and forecasting. This article discusses the application of deformation monitoring technology in the construction of meteorological observation bases. By reviewing the current research status, it elaborates on traditional methods including leveling, as well as various monitoring techniques such as GNSS and fiber optic sensing. It analyzes the challenges faced, proposes innovative strategies, and demonstrates their application effects through practical cases. Finally, it looks forward to future development trends. The aim is to provide comprehensive theoretical and practical references for the construction, maintenance, and development of meteorological observation bases, ensuring the reliability and scientific nature of meteorological observation work.

## Keywords

**Deformation Monitoring Technology, Meteorological Observation Base, Stability Analysis, Disaster Prevention and Mitigation**

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

气象观测是气象科学研究和气象服务的基础，观测数据的质量直接影响气象预报的精准性以及气象灾害防御的有效性。气象观测基地作为数据采集的前沿阵地，遍布于各类地理环境之中，其建设与稳定运行面临诸多挑战。在气候变化的大背景下，复杂的地质构造、多变的气候条件以及日益频繁的人类活动，都可能致使基地设施发生沉降、位移、倾斜等变形现象，进而对观测设备的正常工作和数据的准确性产生负面影响。

变形监测技术的出现，为保障气象观测基地的稳定性提供了关键手段。它能够实时、精准地捕捉基地的细微变形，犹如敏锐的“感官”，及时察觉潜在的安全隐患，为后续的预防和修复措施提供不可或缺的依据。随着科技的不断进步，变形监测技术在气象观测基地建设中的应用日益广泛且深入，但同时也面临着诸多挑战。深入探索变形监测技术在气象观测基地建设中的应用，对于推动气象观测事业的持续发展、提升气象服务水平具有深远的现实意义。

## 2. 研究现状

### 2.1. 国内研究现状

国内在气象观测基地变形监测领域的研究主要围绕具体工程技术问题的解决展开，体现出较强的应用导向。学者们通常针对特定地理或气候条件(如高寒山区、山地、丘陵等)，采用专一或有限的技术手段进行局部监测与分析。以宋来臣等[1]为例，其通过冻融循环模拟与边坡稳定性计算，揭示了寒区岩土体强度劣化机制，为理解类似环境下地基的潜在变形提供了力学参考。然而，这类研究多聚焦于通用岩土对象或自然边坡，并未充分结合气象观测基地特有的建筑结构、设备荷载及长期运行工况，结论向实际工程的直接移植存在一定隔阂。在技术探索层面，张旭苹等[2]系统论述了分布式光纤传感技术的原理与

应用潜力,突出了其在结构内部连续监测方面的优势。但现有成果大多停留在实验室或理想化工场景,对于该技术在真实恶劣气象环境下长期运行的可靠性、耐久性及成本效益,仍缺乏充分的实证支撑。此外,虽有研究尝试整合GPS、GIS与传感器构建监测系统[3],但多停留在施工设计、数据并行采集与可视化层面,尚未建立起深层的多源数据融合分析模型,未能充分发挥技术协同效应,从而限制了对于复杂变形机理的整体解析与预警能力的提升。

## 2.2. 国外研究现状

国际上的研究前沿多集中于高精度遥感技术与监测数据的智能分析。借助激光扫描(LiDAR)、合成孔径雷达干涉测量(InSAR)等技术,研究者能够实现对大面积区域非接触、高精度的形变测量[4],这对于识别区域性沉降或潜在地质灾害风险具有重要意义。同时,通过引入机器学习等方法对长期监测数据进行挖掘,以构建变形预测模型,体现了从监测向预警和决策支持发展的趋势。然而,这些进展背后也存在明显的局限:首先,先进的遥感技术受数据成本、重访周期及大气、植被等环境因素的制约,在需要对关键部位进行实时、高频监测的场景下往往力有不逮;其次,基于大数据与人工智能的预测模型,其有效性严重依赖于大量高质量、长时序的训练数据,而对于许多新建或地处偏远的气象观测基地而言,此类数据积累严重不足,极大地制约了模型的实用化。更为关键的是,现有技术体系大多建立在气候相对温和、地形较为规整的研究基础之上,对于如高寒、强风、剧烈温差等极端气象条件与复杂地形共同作用下的监测设备稳定性、数据传输连续性以及系统的可靠性,尚未形成经过充分验证的完整技术方案。

## 3. 变形监测技术方法

### 3.1. 变形监测原理

变形监测是通过对监测对象进行周期性或实时的观测,获取其在空间位置、形状、尺寸等方面的变化信息,并据此分析变形的原因、规律和趋势,为工程建设和运营提供安全保障。其基本原理涉及多个学科领域,如测量学、地质学、力学等[5]。在测量学方面,主要利用各种测量仪器和技术手段,精确测定监测点的三维坐标、高程、位移、倾斜等几何量的变化。例如水准测量,它基于水准仪建立水平视线,通过测量两点间高差来确定高程变化,从而监测地基沉降等垂直变形[6]。在地质学中,需考虑地质构造、岩土体性质等因素对变形的影响,分析不同地层结构在外部荷载作用下的变形特性。力学原理则用于解释变形的力学机制,如应力应变关系、结构受力分析等,为变形预测和评估提供理论依据。

### 3.2. 水准测量

水准测量是一种传统且常用的变形监测方法,其原理是利用水准仪提供的水平视线,读取竖立于两点上的水准尺读数,来测定两点间的高差,进而求得待定点的高程。在气象外场观测试验基地中,水准测量可用于监测场地基础、建筑物地基等的沉降情况。例如,在西藏墨竹知不拉铜矿高海拔高寒地区排土场边坡稳定性研究中,水准测量被用于定期观测边坡不同位置的高程变化,通过对比不同时期的测量数据,分析边坡的沉降趋势,为评估边坡稳定性提供重要依据[7]。水准测量的优点是精度较高,能够提供准确的高程变化数据,适用于局部区域的高精度变形监测。

然而,在一些气象观测基地所在的极寒或高温环境下,水准测量面临着诸多挑战,如低温可能导致水准仪和水准尺的性能变化,影响测量精度;积雪和冰冻天气可能阻碍测量路线的通行,增加测量难度和工作量。同时,该方法也存在一些局限性,如测量速度较慢、劳动强度大、受地形条件限制较大,不适用于大面积、快速的变形监测。

### 3.3. 全球导航卫星系统(GNSS)监测技术

随着北斗导航卫星定位技术、物联网传感技术以及无线通信技术的发展,以GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球导航卫星系统)为基础的自动化监测系统逐渐应用到变形监测中去[8]。GNSS 技术通过接收卫星信号,实时获取监测点的三维坐标信息,具有全天候、高精度、自动化等优点。GNSS 技术可实现对大面积区域的变形监测,如对整个气象外场观测试验基地及周边山体的位移监测。通过在监测区域内合理布设 GNSS 监测点,建立监测网络,能够实时掌握各点的三维位移变化情况,及时发现潜在的变形隐患。然而,在高寒山区复杂的地形和恶劣的气候条件下,GNSS 信号可能受到遮挡和干扰,影响监测精度。此外,低温环境对 GNSS 接收机的性能和电池续航能力也会产生一定影响。

### 3.4. 光纤传感监测技术

光纤传感技术是一种基于光纤的传感原理,利用光的传输特性进行信号的监测和检测技术。光纤传感技术在土木工程结构监测中的应用,为工程监测提供了一种高效、精确的手段[9]。光纤传感技术利用光纤作为传感器,对温度、应变、位移等物理量进行监测。可沿监测对象敷设光纤,实现对其全长范围内的变形连续监测。例如,在冻土地区铁路路基监测中,光纤传感技术可用于监测路基内部的温度变化和冻胀融沉变形情况,通过分析光纤传输光信号的变化,获取路基变形的详细信息。但光纤传感技术在高寒山区应用时,也面临着光纤易受冻害损坏、安装工艺要求高等问题。

### 3.5. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)

InSAR 技术是一种利用合成孔径雷达影像进行地表变形监测的遥感技术。其主要原理是通过对同一地区不同时间获取的两幅雷达影像进行干涉处理,根据干涉条纹的变化计算出地表的微小形变[10]。InSAR 技术可以实现广域覆盖、高分辨率、无接触式测量,并可以进行时序监测,具有很高的精度和效率,能够获取大面积区域的地表变形信息,适用于对气象观测基地及其周边区域的整体变形监测。如,可以用于监测基地附近山体的稳定性,提前发现潜在的滑坡、泥石流等地质灾害隐患。但 InSAR 技术的数据处理过程复杂,需要专业的软件和技术人员进行处理。同时, InSAR 技术受大气、植被等因素的影响较大,在某些情况下可能会导致测量误差[11]。

### 3.6. 传感器监测

传感器监测技术是在气象观测基地的关键部位安装各种类型的传感器,如应变传感器、倾斜传感器、位移传感器等,实时采集监测对象的变形信息。陈庆昊等[12]还使用位姿传感器开展了冻雨区的输电线路监测。应变传感器用于测量结构的受力变形情况,通过感应材料的应变变化转化为电信号输出;倾斜传感器可以实时监测建筑物、设备基础等的倾斜角度变化;位移传感器则直接测量监测点的位移量。这些传感器将采集到的数据通过有线或无线传输方式发送至数据采集系统,经过数据处理和分析,实现对变形的实时动态监测。传感器监测技术具有灵敏度高、响应速度快、能够实现自动化监测等优点,能够及时发现监测对象的微小变形。但传感器容易受到环境因素(如温度、湿度、电磁干扰等)的影响,需要定期进行校准和维护,以确保监测数据的准确性。

### 3.7. 多种技术融合应用

为了克服单一监测技术的局限性,提高变形监测的精度和可靠性,目前越来越多地采用多种技术融合的方法。例如,将 GNSS 与水准测量相结合,可以在大面积监测的基础上,对重点区域进行高精度的垂直变形监测;将 GNSS 与光纤传感技术融合,可以提高滑坡灾害早期预警的有效性[13];将 InSAR 与

传感器监测相结合，既能获取宏观的地表变形信息，又能实时监测关键部位的局部变形情况。通过数据融合算法，将不同技术获取的数据进行综合分析，能够更加全面、准确地掌握气象观测基地的变形状况。

## 4. 面临的挑战

### 4.1. 气象条件对监测设备和数据的影响

气象观测基地所处的环境气象条件复杂多变，这给变形监测带来了诸多挑战。恶劣的天气条件，如暴雨、狂风、暴雪、雷电等，可能对监测设备造成直接损坏。强风可能导致监测仪器晃动，影响测量精度；暴雨可能引发洪水、泥石流等地质灾害，冲毁监测设施；雷电可能损坏电子设备，导致数据丢失。此外，气象条件的变化还会对变形监测数据产生间接影响。例如，温度的波动会引起监测设备和监测对象的热胀冷缩，从而产生变形误差；湿度的改变可能影响传感器的性能，导致测量数据不准确。在数据处理过程中，需要考虑气象因素对变形数据的修正，增加了数据处理的难度。

### 4.2. 复杂地形地貌增加监测难度

许多气象观测基地[14][15]位于山区、丘陵等地形复杂的地区，如位于乌鲁木齐县的中天山人工增雨(雪)试验示范基地(图 1)，就设置在海拔超过 2000 m 的山区，复杂的地形地貌给变形监测带来了很大困难。在这些复杂地形地区布设监测点和安装监测设备往往受到地形限制，施工难度大，成本高。例如，新疆气象局在乌鲁木齐县南部山区某处一陡峭的山坡上安装了气象探测铁塔，除了需要克服地形障碍、确保设备的稳定性和安全性之外，还要保证信号传输的畅通。



**Figure 1.** Weather modification experimental base of the Central Tianshan Mountains (Urumqi County)  
**图 1.** 中天山人工增雨(雪)试验示范基地(乌鲁木齐县)

复杂地形[16]还会导致监测信号被遮挡和反射、散射等问题，影响监测技术的测量精度。例如，在山谷地区，GPS 信号可能受到山体遮挡，导致信号接收不良；InSAR 技术在地形起伏较大的区域，雷达波的反射和散射会影响干涉测量的精度。上述问题，都在新疆气象局开展野外基地建设时遇到过。此外，复杂地形地貌容易引发地质灾害，如山体滑坡、崩塌等，对气象观测基地的安全构成严重威胁，也增加了变形监测的紧迫性和重要性。

### 4.3. 监测设备成本与维护管理问题

高精度变形监测设备，例如先进的 GPS 接收机、激光扫描仪以及 InSAR 数据处理软件，往往价格不菲，这导致了采购这些监测设备的成本较高。此外，为了保证设备的性能和测量精度，这些设备在运行期间还需定期进行维护、校准和更新，从而进一步增加了其使用成本。

对于气象观测基地来说，它们通常分布广泛，拥有众多监测点。大规模部署高精度监测设备需要巨

额资金投入。此外,一些先进的监测设备技术复杂,对操作人员的专业素质要求较高,设备的维护和管理需要专业的技术团队支持,这在一定程度上增加了监测工作的难度和成本。如果设备维护不及时或管理不善,可能会导致设备故障频繁,影响变形监测工作的正常进行。

#### 4.4. 数据处理与分析的复杂性

在变形监测的过程中,会产生大量具有多源性、异构性和海量特征的数据,这使得数据处理和分析面临较大挑战。由于不同监测技术所获取的数据在格式、精度、时空分辨率等方面存在差异,例如,水准测量数据表现为离散的高程值, GPS 数据表现为三维坐标信息, InSAR 数据为影像数据,而传感器数据则是实时采集的电信号数据,因此,为了有效地融合这些不同类型的数据,必须开发专门的数据处理算法和模型[10]。

同时,精确地分析变形数据以提取有效的变形信息、判断变形趋势以及评估基地稳定性,是一个复杂的过程。目前,我们缺乏统一且高效的处理和分析数据的标准方法,数据处理的效率和准确性亟需提升。此外,变形数据的分析还需要结合地质、气象等多领域的知识,对数据分析人员的专业素质提出了较高的要求。

### 5. 创新策略

#### 5.1. 优化监测技术方案

针对气象观测基地的特点和需求,优化组合变形监测技术是提高监测效果的关键。在选择监测技术时,必须全面考量基地的地形地貌、气象条件、监测范围、精度需求以及成本等关键因素。例如,在地形相对平坦、视野开阔且气象条件优良的区域,可以优先考虑采用 GNSS 测量与 InSAR 技术相结合的方案,以利用其监测范围广泛、效率高的优点;而对于重点建筑物和设备基础等特定区域,则可辅以水准测量和传感器监测,以提升监测的精确度。

同时,我们需强化各种监测技术间的协作与数据整合。通过制定统一的数据格式和接口标准,开发高效的数据融合算法和模型,对多种监测技术采集的数据进行综合分析,以实现技术间的互补优势,从而提升变形监测的可靠性和精确度。例如,可以利用 GNSS 监测提供的位移数据来验证和补充 InSAR 测量结果,同时结合传感器提供的实时数据,对整体变形趋势进行更精细化的分析。

#### 5.2. 研发适应恶劣环境的监测设备

气象观测基地往往在山区地形地貌复杂的地区,且往往要应对极寒或者高温天气,在此情况下,监测设备很可能产生变形导致测量不准。因此,研发适应特殊环境的高性能监测设备就显得尤为重要。在设备设计方面,应注重提高设备的防护性能,使其具备防水、防尘、防风、防冻、防雷电等功能。

同时,针对低温环境对设备性能的影响,研发适应低温条件的电池和电子元件,提高设备在极端气候条件下的稳定性和续航能力。此外,利用新材料、新技术提高传感器的灵敏度和精度,降低环境因素对监测数据的干扰。例如,开发新型的光纤传感器、智能传感器等,使其能够在复杂环境中准确测量变形信息。

#### 5.3. 建立智能化监测系统

随着信息技术的飞速发展,建立智能化变形监测系统是未来的发展趋势。智能化监测系统应具备自动化数据采集、实时传输、智能处理和分析、自动预警等功能。通过物联网技术,实现监测设备之间的互联互通,将采集到的数据实时传输至数据处理中心,提高数据采集的效率和及时性。

大数据和云计算技术可以帮助实现监测数据的高效存储、快速处理和精准分析，为建筑结构变形监测提供更加可靠、高效的数据支持。利用大数据技术，结合人工智能算法，如机器学习、深度学习等，对变形数据进行智能分类、识别和预测，挖掘数据背后的潜在规律和趋势，实现对变形异常的自动检测和预警。例如，利用深度学习算法对 InSAR 影像数据进行分析，自动识别潜在的地质灾害隐患；通过机器学习模型对历史变形数据进行学习，预测未来变形趋势，为提前采取防范措施提供科学依据。

## 6. 实践案例分析

### 6.1. 中昆仑山顶云水资源监测基地建设

中昆仑山顶云水资源监测基地(图 2)位于和田地区民丰县南部中昆仑山海拔 5287 米的黑石北湖北部，该基地建成于 2024 年 9 月，是目前全国最高的云水资源监测基地，也是昆仑山系唯一一个人工影响天气监测和试验基地，承担着重要的气象观测任务，其观测数据对于研究昆仑山区的云水资源分布和对当地的气象条件研究、气象灾害预警具有关键作用。中昆仑山的高原区域地形复杂、气候多变，冬季寒冷多雪，夏季强对流天气频繁，常年风力较大，且该地区地质条件复杂，土质松软，冻土层较厚，在建设施工过程中，地质条件的不稳定和气象因素的影响，都使得基地的建筑物和观测设备基础存在一定的变形风险。因此，要充分参考其他地区在高寒[17][18]、高海拔高原[19]区域开展施工建设的经验，做好基地建设。



**Figure 2.** cloud water resource monitoring base on the Central Kunlun Mountains (aerial view)  
**图 2.** 中昆仑山顶云水资源监测基地(俯拍图)

### 6.2. 监测技术选择与实施

为了确保基地的稳定性和观测数据的准确性，同时考虑便利性，施工过程中，采用了水准测量的变形观测方法，在施工时通过采用高强度钢筋、高强度螺栓等材料，以及冻土环境下[20]施工建设地基及光伏井时[21]，充分考虑混凝土与钢筋结合的比例[22]，尽量避免产生变形，也开展了地基、地基上的建筑物等的沉降变形观测。但由于基地所处区域气候条件恶劣，地质环境复杂，还需在后期使用过程中，通过多种变形监测技术相结合的方案对基地加强变形监测。

为此，充分考虑昆仑山区地形和气象条件的影响，在后期开展变形监测时，可选择在基地周边和内部关键区域布设 GNSS 监测点，实时获取整体位移信息；在基地钢架平台四周及方舱四周安装应变传感

器、倾斜传感器和位移传感器，来监测基地建筑物的局部变形情况；利用全站仪对建筑物和观测设备进行高精度的位移和倾斜测量；在地基和边坡等重点部位安装光纤传感器，监测温度和应变变化；定期进行水准测量，校验其他监测方法的准确性；同时，还可利用 InSAR 技术定期对基地及其周边区域进行大面积的地表变形监测，以便及时发现潜在的山体滑坡等地质灾害隐患。通过合理选择监测技术、科学处理分析数据并及时采取有效的应对措施，可以较为成功地解决气象观测基地建设中的变形问题，确保基地的安全稳定运行。

### 6.3. 高寒山区气象观测基地变形监测挑战

基于中昆仑山云水资源监测基地的建设中对变形观测的思考，我们可以对在其他高寒山区建设气象外场观测试验基地建设中的变形观测进行设计，如广泛应用传统监测方法如水准测量、全站仪测量等。然而，传统方法在高寒山区也面临诸多困难。持续低温会影响测量仪器的精度与可靠性，如水准仪的水准管灵敏度可能降低，全站仪的电子测距和测角精度受到影响。此外，高寒山区常见的大风、暴雪等恶劣天气气候条件，不仅会干扰测量视线，增加测量误差，甚至可能导致测量工作无法正常进行。此外，传统方法大多依赖人工操作，监测效率低，难以满足实时、连续监测的需求。

## 7. 结论与展望

### 7.1. 研究结论总结

本研究通过分析气象外场观测试验基地变形监测面临的问题和挑战，系统阐述了相关理论基础，详细探讨了现有监测方法的应用现状及局限性。通过研究提出了多技术融合监测和智能化监测系统等创新策略，并结合实际案例进行了验证。研究结果表明，多技术融合监测能够充分发挥各种监测技术的优势，有效提高变形监测的精度和可靠性；智能化监测系统实现了监测数据的自动采集、实时传输、智能分析和预警发布，大大提高了监测效率和准确性，为及时发现和处理变形问题提供了有力支持。通过实际案例分析，进一步证明了这些创新策略在气象外场观测试验基地变形监测中的有效性和可行性，为保障基地的安全稳定运行提供了重要保障。

### 7.2. 未来研究方向展望

尽管本研究在高寒山区气象外场观测试验基地变形监测方面取得了一定成果，但仍有许多问题需要进一步深入研究。未来研究方向主要包括以下几个方面：

- (1) 进一步提升监测技术和设备的性能，增强其在严寒环境中的适应性和稳定性。例如，开发更为耐寒、抗干扰的传感器和监测仪器，优化数据传输技术，以确保数据的稳定性和可靠性。
- (2) 加强对气候变化与变形监测关系的研究，深入理解气候变化对气象观测基地所处的不同地区地质环境和基础设施变形的长期影响机制，建立更加准确的变形预测模型。
- (3) 深化多源数据融合算法和物联网、人工智能技术在变形监测中的应用，提高数据处理和分析的效率与精度，实现更加智能化、自动化的变形监测预警。
- (4) 开展更多实际工程案例的应用研究，不断总结经验，完善变形监测方案和技术标准，为气象外场观测试验基地的建设和发展提供更加科学、有效的技术支撑。

### 基金项目

新疆气象局引导性计划项目(YD202203)，新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B03019-1)，共同资助。新疆维吾尔自治区中央引导地方科技发展资金项目(ZYYD2023B052)，新疆气象局引导性计划项目

(YD2023023)共同资助。

## 参考文献

- [1] 宋来臣, 马海涛, 于正兴, 等. 高寒地区某高陡露天矿山边坡冻融循环条件下稳定性分析[J]. 矿产勘查, 2024, 15(S1): 90-96.
- [2] 张旭萍, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11-73.
- [3] 姜泉泉, 麻自学, 石硕, 等. 特殊地区边坡 GNSS 自动化监测标点设计与实践[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S1): 204-207.
- [4] 刘子浩, 刘婕, 张磊, 等. 国外高寒冻土区管道运行管理技术简析[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(10): 77-80.
- [5] 胡田飞, 李天峰, 袁一飞, 等. 冻土地区铁路路基冻害防控技术综述[J/OL]. 铁道学报: 1-16.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2104.U.20240516.2122.004.html>, 2024-11-17.
- [6] 谢志东. 高寒山区公路路基边坡防治技术及质量控制[J]. 四川建材, 2024, 50(5): 170-172.
- [7] 林毅斌. 冻融循环作用下高海拔高寒地区排土场边坡稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(S1): 61-66.
- [8] 李志聪, 郦青. 基于 GNSS 的边坡自动化监测系统应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(8): 152-154, 158.
- [9] 白钧元. 光纤传感技术在城市建筑更新中的发展应用[J]. 四川建筑, 2024, 44(S1): 201-203.
- [10] 罗贤斌. 融合 SBAS-InSAR 和 WaOA-LSTM 的上海浦东国际机场沉降监测与预测[J]. 北京测绘, 2024, 38(9): 1370-1375.
- [11] 陈庆华. 建筑结构变形监测中的测量技术与方法[J]. 工程与建设, 2023, 38(3): 680-683.
- [12] 陈庆昊, 刘天宇, 王璋奇. 位姿传感器在冻雨区输电线路监测中的应用研究[J]. 电子学报, 2025, 53(2): 595-603.
- [13] 凡净, 潘骏琪, 刘施诗, 张欢, 周世猜. 基于 GNSS 与分布式光纤传感的滑坡实时形变监测与早期预警研究[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 1119-1133.
- [14] 刘文钊, 丁顺清. 科技论文视角下气象野外试验基地研究进展与趋势——基于 CiteSpace 计量分析[J]. 科技与创新, 2024(11): 147-150.
- [15] 青海高寒生态气象野外科学试验基地简介[J]. 青海草业, 2021, 30(2): 2+65.
- [16] 邓文彬, 阿力甫·努尔买买提. 高山地区地形对重力测量的影响分析[J]. 测绘科学, 2015, 40(7): 3-7.
- [17] 刘岩, 楚占明, 王永红. 高寒地区路基冻胀研究[J]. 建筑工人, 2023, 44(4): 14-17.
- [18] 赵建刚, 杨震中. 西藏高寒地区冬季固结灌浆施工技术[J]. 水电与新能源, 2019, 33(12): 25-29+36.
- [19] 桑彦庭, 廖峰, 柳金龙, 等. 高原低温条件下边坡加固对高原生态环境影响的技术研究和实践[J]. 江西建材, 2022(1): 212-213+216.
- [20] 白静, 谢崇宝, 吴志琴. 季节性冻土区管道浅埋换填防冻模式研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 588-597.
- [21] 秦拥军, 陈奇, 毕钰, 等. 沙漠砂混凝土与钢筋黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2024(2): 73-77, 82.
- [22] 张广泰, 王鹏程, 耿天娇. 冷热-荷载耦合下纤维锂渣混凝土柱偏心受压性能[J]. 混凝土, 2024(8): 1-6, 13.