

西南地区油气管道水毁与地灾治理成果调研及建议

孙建科*#，赵彦波，张立强，尚玉杰，陈超，方玉晨，王纪念，王经

国家管网集团技术创新有限公司，天津

收稿日期：2025年10月21日；录用日期：2025年12月19日；发布日期：2025年12月29日

摘要

管道工程的水毁及地质灾害是威胁管道安全稳定运行的重要因素。本文以忠武线、川气东送管道的水毁及地质灾害治理历史成果现场调研，系统分析、总结了鄂西山区段管道工程面临的水毁、滑坡、岩溶塌陷等主要地质灾害治理经验。研究发现，该区域地质构造复杂、降水集中，导致灾害频发，现有治理措施在材料选择、施工质量、监测体系等方面存在优化空间。基于此，提出了细化前期勘察、强化施工监管、建立动态监测系统等优化建议，为同类山区管道工程的安全运营提供参考。

关键词

忠武线，川气东送，水工保护，水土保持，地质灾害治理

Research on Achievements and Suggestions for Water Damage and Geohazard Control of Oil and Gas Pipelines in Southwest China

Jiank Sun*#, Yanbo Zhao, Liqiang Zhang, Yujie Shang, Chao Chen, Yuchen Fang, Jinian Wang, Jing Wang

China National Pipe Network Group Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin

Received: October 21, 2025; accepted: December 19, 2025; published: December 29, 2025

Abstract

Pipeline engineering, as a critical energy transportation infrastructure, plays a vital role in ensuring

*第一作者。

#通讯作者。

the stable and secure supply of energy. Hydraulic protection and soil and water conservation are essential components of pipeline projects, effectively mitigating geological hazards that may damage pipelines. Based on field survey data from the Shuidong-Wuhan (Zhongwu) Line and the Sichuan-East Gas Transmission Pipeline, this paper systematically analyzes the primary geological hazards—such as water erosion, landslides, and karst collapses—faced by pipeline projects in the mountainous regions of western Hubei. It summarizes the remediation measures implemented at various hazard sites and evaluates their effectiveness. The study reveals that the complex geological structure and concentrated precipitation in this region contribute to frequent disasters, while existing remediation measures exhibit room for improvement in material selection, construction quality, and monitoring systems. Accordingly, optimization recommendations are proposed, including refined preliminary surveys, enhanced construction supervision, and the establishment of dynamic monitoring systems, to provide a reference for the safe operation of similar pipeline projects in mountainous areas.

Keywords

Zhongwu Line, Sichuan-East Gas Transmission Pipeline, Hydraulic Protection, Soil and Water Conservation, Geological Hazard 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

鄂西地区地貌以山区为主，地质构造复杂，地势高差大，且降水丰沛、暴雨集中，喀斯特地貌发育，给油气管道工程的建设与运营带来严峻挑战。忠武线与川气东送干线作为我国重要的能源输送通道，途经该区域时频繁遭遇水毁、滑坡、岩溶塌陷等地质灾害，严重威胁管道安全。本文基于 2025 年 3 月的现场调研，对两条干线的水工保护与地灾治理工程进行全面分析，梳理灾害治理经验，提出针对性优化策略，为山区管道工程的灾害防治提供理论与实践依据。

2. 调研方法

忠武输气管道由主干线西起重庆市忠县首站，东至湖北武汉末站，长约 760 km，管径 $\Phi 711$ mm，设计压力 6.3 MPa，设计年输量 30×10^8 m³/a。川气东送管道干主线西起川东北普光首站，东至上海末站，长约 1700 km，管径 $\Phi 1016$ mm，设计压力 10.0 MPa，设计输量 120×10^8 m³/a。本次调研涵盖 37 个现场踏勘点，涉及水毁、滑坡等多种灾害类型。本次调研的水工保护材料有浆砌石、混凝土；从水工保护设施结构分析，本次调研的主要结构有截水墙、挡土墙、堡坎、拦沙坝、护岸、护底、石笼等。调研重点关注刚性结构在油气管道水工保护与地灾治理中的表现。

3. 主要地质灾害类型及治理措施

3.1. 水毁

3.1.1. 水毁灾害

鄂西山区年降雨量多在 1200~1600 mm 以上，易出现短时强降水、雷暴大风等强对流天气。管道沿线河沟道分布密集，除部分大中型河流、人工渠采用隧道或者顶管穿越方式，通常以大开挖方式穿越河沟道，因此，河沟水流的冲刷侵蚀及河道摆动造成的管道危害较为普遍。以忠武线为例，据 2008 年数据统计忠武线管道发育河沟道水毁 1239 处，线密度 0.90 处/km，中等以上风险点比例约 27.0%。水毁是两

条干线最常见的灾害类型，主要由暴雨引发的洪水冲刷、坡面积水渗透等导致，表现为挡墙垮塌、护底损毁、管道裸露等。本次现场调研，共计有 23 处水毁问题，忠武线穿越榔坪河段管道问题尤为突出。

3.1.2. 水毁治理

忠武线穿越榔坪河一处水毁点位于长阳县榔坪镇长丰村三组。河道东西走向，流向自东往西，自然河道宽 25~30 m，河道坡降 2.86%，河道堆积为砂质卵砾石土，含漂石。左右两岸被开辟为弃渣场，左岸是宜万铁路的弃渣场，堆积厚度 20~30 m；右岸为沪蓉西高速公路的弃渣场，堆积厚度 10~20 m。堆积体前缘河岸边，建有混凝土挡土墙，墙高 4~8 m，顶宽一般 2~2.8 m (现场情况见图 1)。管道沿河槽敷设，埋深 1.5~1.8 m。为防止管道冲刷，2005 年在河床上整体砌筑了一层浆砌石硬盖，使河道成为一个过水渠，长度近 400 m，深 4~8 m，最窄处宽约 15 m，最宽处宽约 28 m。



Figure 1. On-site photo before treatment

图 1. 治理前现场照片

2010 年 7 月山洪爆发，洪水水深 2 m 左右，推断洪峰流量 200 m³/s 左右。洪水将硬覆盖几乎全部冲毁(如图 2 所示)，导致 120 余米输气管道露管漂浮。由于河道两侧有弃渣挡墙限制，河道水毁下切侵蚀较为突出。对照水毁前后所测得的 1:500 地形图，河槽下蚀深度 0.32~1.50 m。不同部位下蚀深度有所差异，硬盖区域下游(距硬盖 40 m)河槽下蚀 0.32 m，硬盖区域上游(距硬盖 45 m)河槽下蚀 0.68 m，硬盖区域获得两点下蚀深度分别为 0.99 m 和 1.5 m。硬盖段上下游河槽下蚀深度较能代表本区段下蚀幅度，因为该部位受硬盖及弃渣挡墙影响较小；硬盖区段下蚀幅度较大，硬盖施工抬高河床及挡墙实施改变河道水势造有较大影响。洪水冲刷作用也导致了河道两侧弃渣挡土墙基础埋深降低，局部被掏空，对挡墙的稳定问题有较大的影响，挡墙一旦垮塌，将对河道中的管道造成毁灭性破坏。



Figure 2. Photo of the scoured foundation of the retaining walls on both sides of the river channel

图 2. 河道左右两侧挡墙基础掏空照片

基于该处河道的现状和未来发展趋势,以保护天然气管道为基本出发点,首先将漂移的管道复位,并对管道进行应力释放。在工程防护措施上在露管段下游设置一道拦砂坝,使该区段管道上部覆盖层淤积增厚,保证工程运营期间输气管道的基本安全埋深。针对管道本身的防护,采用混凝土截水墙和硬覆盖层的措施,避免管道穿越位置河床的进一步冲刷下切,同时最大限度地减小对行洪的影响。且拦砂堤坝和截水墙有利于改善河流流态,增大河床泄洪能力,保持岸坡稳定[1]。基于这种考虑,治理工程首先要清理河床,平整主河槽,使河流流态平顺,阻止管道所在位置河床下切。此外,采用混凝土对淘空的挡墙基础进行填充,减小水流对挡墙基脚的进一步冲刷和掏空,增加挡墙的稳定性。

3.1.3. 现场检验及总结

管道穿越河沟道时,根据设防洪水频率下的河沟床的水流流速及管沟开挖的断面,确定过水面护底结构材料形式及防护宽度。混凝土材料的过水面结构适用于流速低于8~10 m/s的河沟道护底防护。管道顺河沟床敷设时,根据河沟床比降、洪水资料、管道覆土厚度及管沟断面尺寸综合确定稳管截水墙护底结构的间距及断面尺寸。

本段管道顺河沟道敷设,受强降雨影响,原管道护底及稳管措施损坏,管道发生了漂管。采用截水墙+硬覆盖层+拦砂堤坝的保护措施,相比原保护方案,通过降低管道敷设地段的管沟位置河床的过水流流速,降低动水流对管沟覆土的冲刷下切动能,稳管截水墙起到了关键作用[2]。通过现场踏勘,运行多年后,当前结构整体完整(目前现场情况如图3所示)。



Figure 3. On-site photo after treatment

图3. 治理后现场照片

3.2. 滑坡

3.2.1. 滑坡灾害

鄂西地区是我国滑坡分布的主要地区,不仅规模大、类型多,而且分布广泛、发生频繁、危害严重。本次现场调研,共计有8处滑坡问题,管道线位与地形等高线处于正交或平行状态,管道以平行状态穿越滑坡时,管道本体所承受的拉伸或压缩变形超出其允许值时,管道会出现不可恢复的弹塑性变形或塑性变形,严重时甚至破裂。结合现场调研分析,以忠武线黄草坡滑坡治理特点最为明显。

3.2.2. 滑坡治理

黄草坡滑坡于2005年忠县-宜昌段地质灾害调查时未发现有滑坡迹象,但将其作为一个潜在问题提出来并列入监测。2007年10月开始实施监测,发现古泥石流堆积体出现多处裂缝,两处民房地基沉降,坡体前部挡墙外鼓、开裂,处于缓慢蠕滑变形阶段。滑坡区处于一个斜坡地带,西高东低,从微地貌单

元来讲,在滑坡的北侧和东侧发育一条冲沟,为滑坡的形成提供了良好的临空条件[3]。滑坡体主要由古泥石流堆积体组成,物质成分主要为碎石土,坡体表面物质结构较松散,有利于雨水及灌溉用水的下渗,碎石土中所夹粉质粘土形成相对隔水层,为滑坡的产生提供了物质条件。连续集中、大强度的降雨为滑坡的发生创造了极好的外部条件[4]。

黄草坡滑坡平面形态整体近似长舌状,长约350 m,宽为800~100 m,滑体厚度为6~22 m之间,体积约 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,为中型堆积体滑坡,滑动方向为108°。同时在滑坡的后缘还存在一处次级浅层小滑坡,滑动方向为79°(滑坡体范围如图4所示)。



Figure 4. Full view of Huangcaopo Land slide

图4. 黄草坡滑坡全貌图

2009年对该段滑坡进行了第一次治理。针对黄草坡大滑坡后缘右侧的次级小滑坡:在小滑坡前缘地形较缓地段,沿横剖面线布桩,桩截面选用 $1.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,共12根,桩间距5 m,按桩长不同共分5种桩型:A型桩(桩长20 m)、B型桩(桩长18 m)、C型桩(桩长14 m)、D型桩(桩长12 m)、E型桩(桩长10 m)。桩间设置挡土板。针对黄草坡大滑坡:在大滑坡的中部和前部,布置两排抗滑桩,共12根,桩截面选用 $1.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,桩间距为5 m,采用B型、C型、D型、E型等四种桩型,桩间设置挡土板,挡土板长3.9 m,宽1.0 m,厚0.4 m。另外,在大滑坡前缘输气管道两侧设置挡土墙,墙高5.0 m,总长为58 m。另外考虑到降水较多,采用了截水沟,同时考虑坡降问题,在坡度较陡的地方做跌水,并修建消能井。

结合黄草坡滑坡体分布与变形特征,以6条综合监测剖面为主,共布置23个监测点。在此基础上,又布置6个重点监测点。包括表面绝对位移监测、地下水位监测和深部位移监测。为了检测抗滑桩效果,用深井超声波、成孔后成桩前预埋4个传感压力盒对其进行监测,反馈设计,指导施工[5]。

2011年对该段滑坡进行了第二次治理。新滑坡发育于黄草坡大滑坡后缘右侧,为泥石流堆积体的二

次崩滑改造。新发现滑坡后缘从黄草坡大滑坡后缘排水沟开始,形态近屈形,后缘相对高程 712 m,前缘相对高程 694 m,顺管道长度约 90~100 m,宽度 120 m,滑体厚度约 2~5 m(据古泥石流堆积体中厚度推断),体积约 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,为浅层堆积体滑坡。2009 年已对黄草坡大滑坡及其后缘发育的次级小滑坡进行过治理,黄草坡大滑坡整体呈稳定状态,但新调查发现滑坡后缘坡体仍有变形迹象,主要表现在挡土墙的变形上,如挡土墙开裂(如图 5 所示)、挡土墙基础外移、下挫(如图 6 所示)等,挡土墙基础下挫的幅度局部可达 10 cm。



Figure 5. Cracked retaining wall at the rear edge of the landslide
图 5. 滑坡后缘挡土墙开裂



Figure 6. Subsidence of the retaining wall at the rear edge of the landslide
图 6. 滑坡后缘挡墙下挫

新滑坡诱发的主要原因是在山区持续降雨或强降雨作用下,由于坡体表层物质松散,大量雨水向坡体入渗,而中间所夹的粉质粘土层为相对隔水层,在坡体内易形成稳定的地下水位,滑带土体在地下水的作用下,强度大幅降低;同时该段斜坡平均坡度为 20~25°,相对斜坡中部较陡,前期治理工程的第一排抗滑桩桩顶高程整体相对偏低(如图 7 所示),加之该处不断的人工活动的影响,加大了桩后土体沿桩顶剪出的可能性,形成新的滑坡。

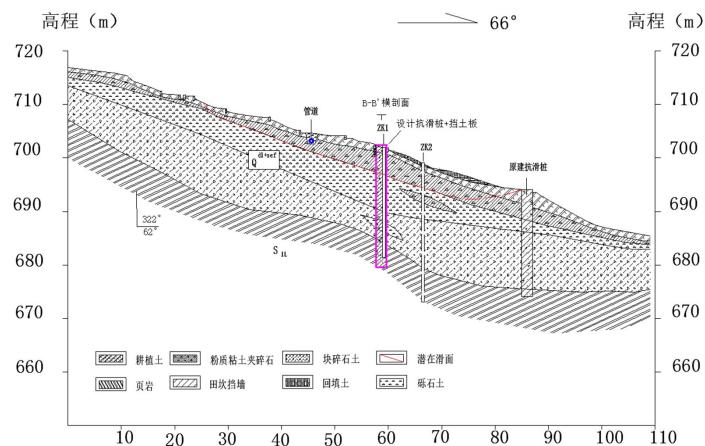


Figure 7. Location relationship between new and existing remedial measures
图 7. 新老治理措施位置关系图

新滑坡沿深层滑面滑动的可能性不大, 所以防止工程主要针对滑坡浅层滑面, 即沿粉质粘土夹碎石层的滑动, 故设计采用抗滑桩 + 挡土板进行加固。在滑坡中前部设置抗滑桩支挡, 修复滑坡后缘排水工程排走后缘地表水。根据基岩面和潜在滑动面的埋深设置 5 种长度的抗滑桩: 20 m、22 m、24 m、27 m、28 m。设计挡土板共 19 块, 单块板体规格 $4.5 \times 0.3 \times 0.6$ m, 采用 C20 砼浇筑。过管道处布置 1 块挡土板, 其他桩之间布置 3 块挡土板。管道附近挡土板施工时确保管道安全。监测工程布置可充分利用原有 GPS 位移监测点。

3.2.3. 现场检验及总结

设计方案为浆砌石挡土墙 + 纵向混凝土排水沟 + 抗滑桩。现场情况: 管道纵坡敷设, 坡面距离较长。沿管道敷设方向设置有四层挡土墙, 并在靠近坡脚的位置设置了两排大型混凝土抗滑桩(第一次 12 根抗滑桩, 第二次 8 根抗滑桩)。侧面建有混凝土排水沟, 以确保坡面不会产生大量积水冲刷。整体水保结构完整无损坏。相较于施工阶段, 现场坡面植被茂盛, 已基本恢复, 看不出管线位置。现场沿管道敷设方向设置了 23 个滑坡监测点。

可借鉴经验: 当坡面距离较长时, 仅设置一道挡土墙或者堡坎可能无法保障水土保持功效, 此时可设置多道设施提高水土保持效率[6]。在坡面较长或者坡度较大的情况下, 应设置多道抗滑桩(如图 8 所示)。对于变形缓慢的大型滑坡, 应做出全面的整治规划, 进行分期整治。并注意观察每期工程的整治效果, 据此确定下一步措施。通过现场踏勘, 运行多年后, 当前结构整体完整。





Figure 8. On-site photo after treatment

图 8. 治理后现场照片

3.3. 岩溶塌陷

3.3.1. 岩溶塌陷灾害

鄂西山区地处中国西南岩溶区的东北缘，地质构造复杂，碳酸盐岩广泛分布，是岩溶塌陷灾害较为严重的地区之一。地表溶沟、石芽、漏斗、落水洞、溶蚀洼地发育；地下溶洞、管道、地下河系统纵横交错，网络复杂。地下水动力条件改变引发覆盖层土洞扩展，表现为地面漏斗状陷坑，威胁管道基础稳定性。本次现场调研，共计有 2 处岩溶塌陷问题。结合现场调研，以川气东送黄大支坪镇大支坪村岩溶塌陷区进行分析。

3.3.2. 岩溶塌陷治理

该区首次地表塌陷发生于 2014 年降雨后，陷坑深度约 0.50~0.80 m，管理处安排人员对陷坑进行了回填处理：2016 年 8 月，该区遭遇连续强降雨，雨后在相同位置出现第二次地面塌陷，塌陷范围比 2014 年更大，陷坑深度 1.0~2.0 m，致使管道裸露，后采用“鼓水墙 - 排水沟 + 陷坑回填”方案进行再次处理；2018 年 3 月 30 日逻线时，发现该点再次发生地面塌陷，塌陷深度最大至 60cm，对光缆造成损毁，已严重危及塌陷边界处的管道安全。

地面物探显示，槽谷浅部沿管道方向有顺斜坡和岩层倾向发育的隐伏溶蚀破碎带，其顶板为抗剪强度很低的表层红黏土，抗塌稳定性差，一旦溶蚀破碎带在水动力作用下被潜蚀掏空，极易导致大范围的地面塌陷，继而造成管道悬空、光缆拉断，对管道的直接威胁极大，甚至产生新的陷坑，危及塌陷区域内长约 100 m 的川气管道的安全(如图 9 所示)，需要采取工程措施进行处理。

对工区内的地表陷坑进行回填。回填前应采用机械手段挖除塌陷范围内的松软土层，底部 1.0 m 用块石、碎石回填，其上采用黏性土回填，并分层压实。在料坡体外缘设二道截水沟，总长 701 米，快速排泄地表水。该段地表陷坑 96 米，管道左右各 14 米，采用注浆加固，注浆以纯水混浆为主的单液注浆

材料, 水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥(如图 10 所示)。

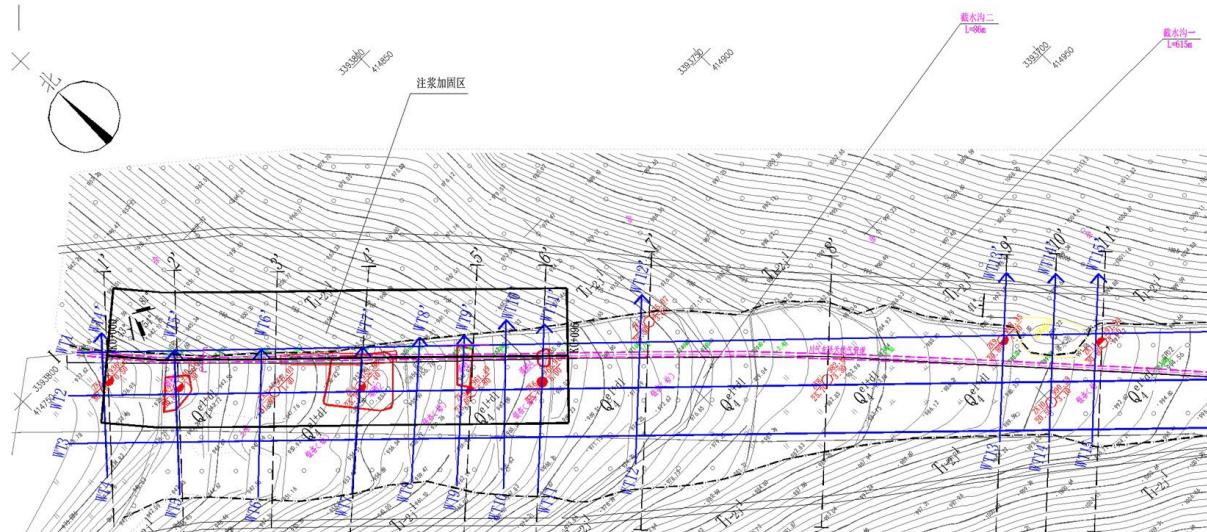


Figure 9. Plan of karst collapse remediation

图 9. 岩溶塌陷整治平面图

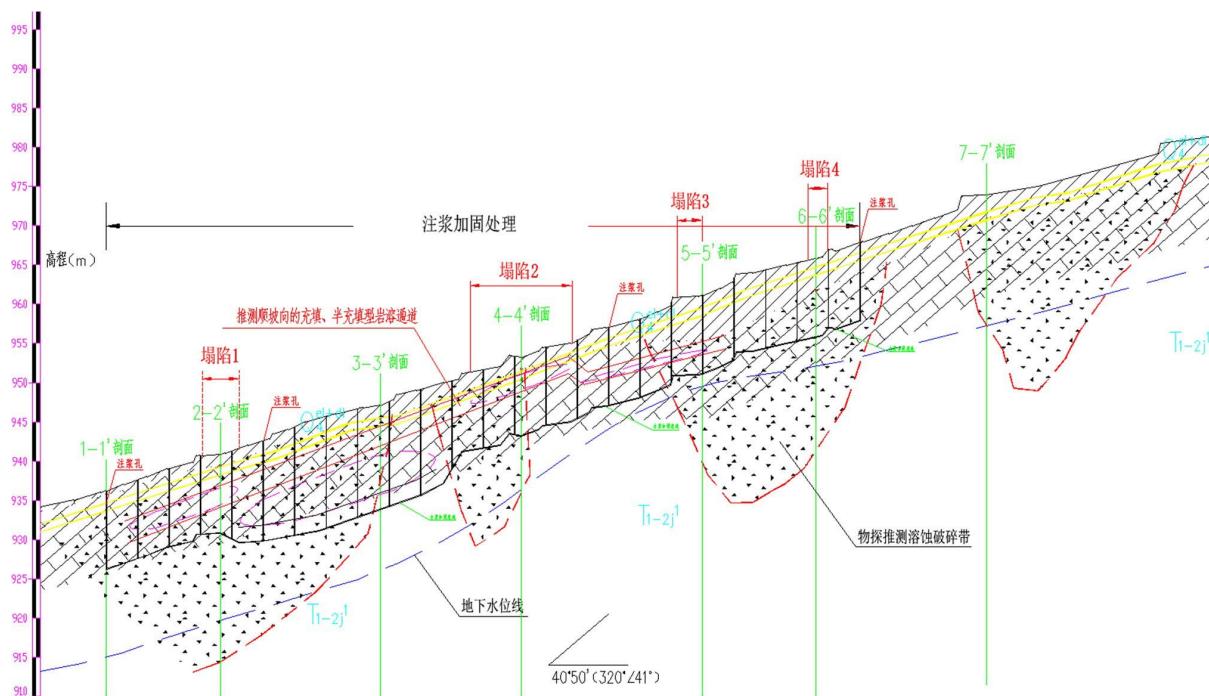


Figure 10. Karst collapse remediation profile diagram

图 10. 岩溶塌陷整治剖面图

3.3.3. 现场检验及总结

针对在运行管道, 受强降雨或人为活动导致的岩溶塌陷在鄂西山区较为普遍。对岩溶地表水宜以疏导为主, 采取因地制宜、因势利导的方法, 不宜堵塞。疏导结构一般可采取排水沟渠、护岸、护底等措施。有些岩溶, 由于岩石裂隙较为发育, 且小型沟道支岔众多, 因此管沟沟壁两侧的渗水通道较为发育。

为防止管沟回填土的流失,对管沟内渗水及水道的处理,应以堵塞为主。对于较为深,无水或水量较少的,可采用钢筋混凝土板跨的结构措施。同时洞穴内填充透水性好的粗颗粒物质(块、卵石、砂等),必要时采用混凝土加固,起到支撑的作用。通过现场踏勘,运行多年后,地面较为平整,未发生进一步塌陷。

4. 结束语

忠武线与川气东送干线的实践表明,鄂西山区管道工程的水工保护与水土保持需直面地质复杂、灾害频发的挑战。通过总结水毁、滑坡、岩溶塌陷等灾害的治理经验,建议在设计阶段结合地质勘察数据优化防护结构参数,如截水墙间距、抗滑桩布置等,确保工程经济性与安全性。推广柔性防护(如石笼、生态袋)与刚性结构(混凝土、浆砌石)的组合应用,提升管道河流的抗冲刷能力。在重点灾害区布设分布式光纤、GNSS等实时监测设备,建立BIM-GIS管理平台,实现灾害动态预警。制定差异化巡检标准,并配备专业抢险队伍,确保应急响应时效。山区管道地质灾害防治需坚持“预防为主、防治结合”原则,未来应进一步融合遥感、物联网等新技术,提升灾害防控的智能化水平,为长输管道的安全运营提供更可靠保障。

基金项目

国家管网集团西部管道有限责任公司科技项目(XG-JCGL-CX-KJXX-01-JL-03)。

参考文献

- [1] 雷宏峰,吴夏,罗鹏.极端天气条件下管道顺沟敷设段山洪泥石流防护提升[J].管道保护,2025,2(2): 43-50.
- [2] 张成信,魏龙飞,唐尧,等.泰青威天然气管道临朐段水毁灾害分布特征与风险评价[J].中国地质调查,2021,8(5): 108-114.
- [3] 牛鋆培,施晓文,熊健.黄草坡滑坡与降雨相关性研究[J].中国水运(下半月),2013,13(2): 238-241+244.
- [4] 李华章,何文刚,罗伟,等.川气东送管道某滑坡变形特征及治理措施[J].江西建材,2020(7): 183-185.
- [5] 贺江梅,徐景田,丁征凯,等.GPS技术在忠武输气管道沿线滑坡监测中的应用[J].工程地球物理学报,2011,8(2): 241-244.
- [6] 朱朝军.川气东送管道工程白杨坪地段滑坡的治理[J].油气田地面工程,2010,29(7): 4-5.