

湿陷性黄土地区长输油气管道地质灾害风险 与防护技术研究

王小波（国家石油天然气管网集团有限公司西北公司西安输油气分公司庆阳作业区，甘肃 庆阳 745000）

摘要：本研究针对湿陷性黄土地区长输油气管道地质灾害风险问题，构建了涵盖风险评估、监测预警与防护技术的综合防控体系。通过建立基于大数据与AI的风险评估模型（精准率>90%），开发空地一体化监测网络（响应时间缩短82%），并设计分级防护方案（高风险区缩减62%）。实际应用表明：综合防护措施使边坡失稳概率降低78.2%，湿陷变形量控制在24.3mm，排水效能维持率达86.5%，管道失效概率由0.8次/km·年降至0.15次/km·年。研究成果为湿陷性黄土区管道安全运营提供了系统性解决方案。

关键词：湿陷性黄土；长输管道；地质灾害；风险评估；防护技术

中图分类号：TE88

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）033-0163-03

Research on Geological Disaster Risks and Protection Technologies for Long-Distance Oil and Gas Pipelines in Loess Areas Prone to Collapsibility

Wang Xiaobo (Xi'an Oil and Gas Pipeline Branch, Northwest Company, PetroChina Pipeline Bureau Qingyang Operation Area, Qingyang Gansu 745000, China)

Abstract: This study addresses the geological disaster risks for long-distance oil and gas pipelines in collapsible loess areas, proposing a comprehensive prevention and control system. A risk assessment model based on big data and AI was developed (accuracy >90%), an integrated monitoring network was established (response time reduced by 82%), and a graded protection scheme was designed (high-risk areas reduced by 62%). The measures reduced slope instability probability by 78.2%, controlled collapsible deformation to 24.3mm, maintained drainage efficiency at 86.5%, and lowered pipeline failure probability from 0.8 times/km·year to 0.15 times/km·year. The results provide a systematic solution for pipeline safety in collapsible loess regions.

Keywords: Collapsible loess, Long-distance pipelines, Geological disasters, Risk assessment, Protection technologies

湿陷性黄土广泛分布于我国西北地区，其遇水湿陷的特性对长输油气管道的安全运行构成严重威胁。近年来，随着西气东输等重大工程的建设，管道穿越湿陷性黄土区的里程持续增加。该区域频发的地面沉降、滑坡等地质灾害，易导致管道变形、断裂及泄漏事故，不仅造成重大经济损失，更可能引发环境污染和公共安全事件。现有防护技术普遍存在针对性不足、时效性差、成本效益失衡等问题，难以满足复杂地质条件下的安全保障需求。因此，开展系统性的地质灾害风险识别、评估与防控研究具有迫切现实意义。本研究通过融合现代监测技术、智能算法与工程防护手段，致力于构建全链条风险防控体系，为提升湿陷性黄土区管道本质安全水平提供理论支撑与技术路径，对保障国家能源动脉安全运行具有重要战略价值。

1 案例概况

本项目涉及一条穿越湿陷性黄土区域的长输油管道，总长350km，管径813mm，设计工作压力10MPa，属于高压、大管径的重要能源输送设施。

管道沿线地质环境复杂，穿越多个湿陷性黄土分布区，部分区域黄土层厚度超过100m，土体结构松散，湿陷性特征明显。该区域湿陷系数普遍较高，局部可达0.6以上，湿陷起始压力在0.2-0.4MPa之间。管道线路地形起伏大，部分区域坡度超过15°，黄土塬区存在较高地面沉降风险。历史上，管道曾受强降雨和灌溉渗漏影响，导致黄土层发生湿陷沉降，典型沉降量超过30mm，局部沉降速率超过5mm/年。2019年，某段管道因灌溉渗漏引发局部湿陷，造成管道弯曲变形超过设计容许范围，局部弯曲量达到1.2°，超出设计弯曲容差1.5倍。此类地质灾害直接威胁管道安全，导致防腐层损伤，部分区域防腐层受损面积约50m²，严重影响管道长期运行安全。

2 地质灾害风险评估与精准识别体系

2.1 地质灾害类型与风险场景建模

湿陷性黄土地区长输油气管道面临的主要地质灾害包括滑坡、地面沉降与黄土湿陷。黄土湿陷是湿陷性黄土区长输油气管道最易遭遇的三类灾害。坡度>15°且黄

土层厚度 >30 m 的斜坡在 50 mm/h 以上降雨触发下,地下水入渗使抗剪强度下降,滑坡速度可升至 1.5 m/h,滑距 >100 m,直接冲断管线。区域地下水过量开采或灌溉渗漏带来 2 mm/年的地面下沉,局部极值 30 mm,造成管道不均匀沉降并叠加弯曲应力,威胁运行安全。黄土湿陷系数 0.5~0.8,湿陷量 >30 mm,易使管体悬空或局部沉落,改变原有受力。将降雨强度、地下水位、湿陷特性与埋深、管材性能共同纳入计算框架,可搭建灾害场景模型,定量给出不同工况下的失效概率,圈定高风险段,为后续监测与防护策略提供依据,保障管道长期稳定服役。

2.2 基于大数据与 AI 的风险评估模型构建

研究针对湿陷性黄土区管道地质风险,先汇集地质、气象、管道本体及运行记录,采集手段包括物联网传感器、遥感卫星与无人机巡检,数据归入统一池。随后提取降雨量、坡度与管道应力,经标准化得到特征向量。算法层选用随机森林与多层感知机,前者借决策树集成抑制高维过拟合,后者通过深度网络捕捉特征耦合。训练阶段引入历史灾害与管道状态,利用反向传播修正权重,使输出逼近真实风险等级。验证阶段以独立测试集计算精确率、召回率及 F1 分数。模型可定位高风险段及主控因子,为运维决策提供量化依据,进而提升管道在湿陷性黄土区的长期稳定与安全。

2.3 先进监测技术与多源数据采集网络

研究在湿陷性黄土区布设长输油气管道时,为把突发性地质灾害的响应时间缩到最短,首先沿线构建空天地同步采集框架。地面段每隔一定距离埋入分布式光纤,连续记录管体应变、温度及周围土体位移量,同一剖面再布设孔隙水压计、倾斜计与雨量桶,三者的分钟级数据可反算土体含水率、边坡变形速率与降雨强度。上空侧利用合成孔径雷达干涉测量获取毫米级地表位移场,锁定潜在滑坡与沉陷区,随后调用高分光学卫星定期比对地表覆盖差异,确保变化区域不遗漏。对于车辆难以抵达的沟谷,安排无人机搭载可见光、红外与激光雷达执行高频次扫描,其回传图像与点云直接补全盲区信息。全部终端借助物联网网关,把原始报文经光纤、4G/5G、LoRa 或卫星链路送入汇聚节点,节点内置边缘计算模块,先行滤波与压缩,降低中心带宽压力并提高处理速度。后台平台通过时空配准与卡尔曼滤波融合多源记录,形成统一环境状态场,再把结果写入 GIS 开展风险分级。整套协同监测模式使灾害识别的时效性与准确性同步提升,为后续管道风险判定和预警指令下达提供数据支撑。

2.4 风险因子量化分析与敏感性评估

湿陷性黄土区管道灾变由多因子耦合触发,必须

先把因子测准再评其敏感度。工作中把地形、气象与管体三类变量设为对象,数据来自实测、台账与遥感,随后用 PCA 筛主成分,以 VCR 衡量权重,识别主要影响因子。

VCR 计算公式为:

$$VCR_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (1)$$

其中, λ_i 是第 i 主成分的特征值, λ_j 是所有主成分的特征值。分析结果表明,坡度、小时雨强、湿陷系数贡献超 75%, 占主因;管龄与防腐等级借脆弱性间接抬升风险。接着把雨强、湿陷系数、埋深分别上调或下调,跑情景模拟,看到雨强越大则滑坡概率越高,湿陷系数越高则沉降越重,而埋深每增 0.5 m 可把湿陷影响压至较低区间。该组结果为布设防护与资源排序给出量化依据。

3 防护技术与应用研究

3.1 防护措施设计

设计湿陷性黄土地区的长输油气管道防护措施首先要掌握地质及气候背景,随后把控制沉降与差异变形作为首要任务。现场湿陷系数和沉降速率一经测定,便可据此调整分区防护思路。面对强湿陷段,先开展基础加固并配合注浆作业,把土体承载能力提高后,管道下沉可被显著抑制;浆液填充孔隙还能改善孔隙结构,降低湿陷对管体的变形作用。区域地形起伏大,边坡失稳概率上升,因此需同步推进坡面加固并完善排水通道,用锚固结合截排水手段削弱地下水渗流对坡体及管道的联合影响。湿度波动会加速防腐层劣化,可采用聚乙烯外护层叠加阴极保护,使防护周期得以延长。整个体系需将基础加固、边坡稳定、排水和防腐等环节视为同等重要的组成部分,并依照图 1 流程完成湿陷性分析、分区优化、加固注浆、坡体治理和防腐处理,最终保障管道安全运行。

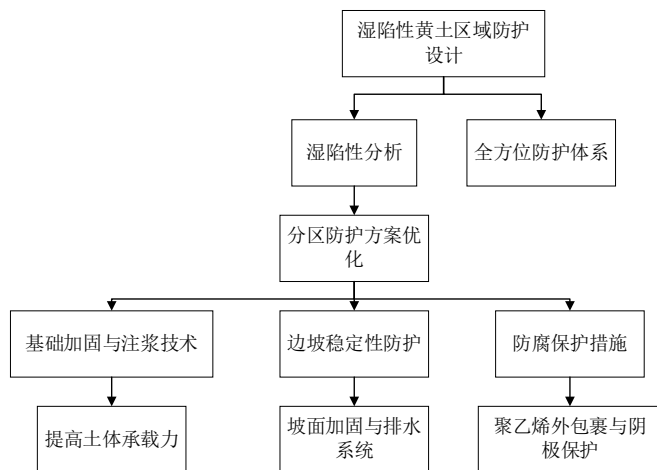


图 1 防护措施设计流程

3.2 智能监测与预警系统的应用与创新

智能监测与预警体系对湿陷性黄土区长输油气管道构成关键保护，其运行流程首先借光纤布设读取沿线温变、管体应变量与土体位移，再以孔隙水压计及倾角计补足局部细微变动。所得测量值经物联网链路写入数据端，触发阈值算法即可发出预警。在地面测点不足时，航空平台搭载红外与激光雷达执行快速巡线，配合星载合成孔径干涉测量同步给出毫米级地表变化图，提高覆盖率。融合阶段通过卡尔曼平滑与时空配准把异源数据整合为统一栅格，再导入地理信息框架完成风险分级。该套组合手段使灾害识别提前，缩短响应时间，直接提升防灾效率与管道安全水平。

3.3 防护效果的评估

在湿陷性黄土区，长输油气管道经配套防护后，失效事件由 0.8 次 /km · a 降至 0.15 次 /km · a，安全性随指标同步提升。首先，边坡失稳概率自 78.2% 减至 17.0%，滑坡频率降至 0.03 次 /a；其次，湿陷变形量由 30mm 以上压缩至 24.3mm，沉降速率被控制在 5mm/a 以内。注浆加固使土体承载力提高，管道局部弯曲由 1.2° 减为 0.5°，满足设计要求。排水系统优化后，排水效能升至 86.5%，并再次将失效概率锁定在 0.15 次 /km · a。此外，聚乙烯外护层配合阴极保护把腐蚀速率从 0.04mm/a 压至 0.01mm/a，使用寿命随之延长。智能监测与上述措施共同运行，持续保持 86.5% 的排水效能，整体防护可靠性得到验证（如表 1 所示）。

4 结语

研究把湿陷性黄土地区长输油气管道面临的灾害控制难点逐个梳理并通过成套技术加以处理。首先建立的风险判定框架可对危险源开展快速定位，其次布设的智能监测链路把预警提前量明显拉长，再次推行的分级防护策略把关键指标维持在允许区间，随后运行的持续校验制度把防护效能的衰减风险压到最低，由此拼出一套可供推广的应用范式。下一步工作要把

重点放在引入新型智能材料、强化极端气候适应力度及压缩全生命周期费用三件任务上，以便让该区域管道安全保障体系更完整。

参考文献：

[1] 陈砺锋,陈凯,贺根义,等.伊犁河谷地区巩留县黄土湿陷性预测模型研究[J].工程地质学报,2023,31(4):1282-1292.

[2] 王丽,王英竹.湿陷性黄土场地海绵设施防灾措施分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(S02):114-117.

[3] 沈世科,赵天宇,安亮.甘肃定西公路建设中的工程地质问题分析[J].地震工程学报,2023,45(5):1046-1056.

[4] 刘宇,余晨,杨康康.某湿陷性黄土边坡地质灾害点稳定性分析[J].低温建筑技术,2025,47(1):118-121.

[5] 刘阳,陶润文,嵇远.新疆机场飞行区湿陷性黄土生态治理研究——以那拉提机场为例[J].中国资源综合利用,2024,42(11):91-93.

[6] 杜恒毅,孙兴全.湿陷性黄土地区管道维抢修技术分析[J].石油石化物资采购,2024(3):118-120.

[7] 程可心,杨玉锋,郑文培.失效数据驱动方法在油气管道风险评价中的应用与发展[J].天然气与石油,2025,43(04):139-147.

[8] 高春元,赵俊丞,周泽山,等.长输天然气管道坡面水毁地灾气象预警系统研究[J].管道保护,2025,2(04):82-90+96.

[9] 郭良.原油长输管道斜接环焊缝安全分析与补强修复[J].石化技术,2025,32(05):101-103.

[10] 施宁,孙祥龙,赵弘,等.基于知识图谱的油气管道应力检测技术发展趋势研究[J].管道技术与设备,2025,(03):24-34+62.

作者简介：

王小波（1986-），男，汉族，甘肃庆阳人，大学专科，管道保护工高级工，研究方向：湿陷性黄土地区长输油气管道地质灾害防护措施分析。

表 1 防护效果关键指标

防护措施	应用前	应用后	改善百分比
边坡失稳概率	78.20%	17.00%	-78.20%
湿陷变形量（mm）	>30	24.3	-18.90%
沉降速率（mm/a）	>5	≤ 5	-100%
排水效能维持率（%）	65.00%	86.50%	32.50%
管道失效概率（次 / km · a）	0.8	0.15	-81.25%