

基于灾害动态演化过程的管道滑坡灾害多因素耦合预警模型

吴森, 齐得旭, 李虎, 兰宇, 李江, 孙明智

A multifactor coupled early-warning model for pipeline landslide hazards based on the dynamic evolutionary process of disaster

WU Sen, QI Dexu, LI Hu, LAN Yu, LI Jiang, and SUN Mingzhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型

A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression
方然可, 刘艳辉, 苏永超, 黄志全 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 181-187

四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨

A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan
张勇, 温智, 程英建 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 178-182

基于时空维度耦合的地质灾害发育程度评价研究

A study of the evaluation of geo-hazards development degree based on time-space coupling
曲雪妍, 李媛, 房浩, 杨旭东, 谢振桦, 尹春荣, 张艳玲, 佟彬 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 137-145

基于MACD指标的渐变型滑坡临滑预报模型研究

Research on early-warning prediction model of critical slide of creep landslide based on the MACD index
王家柱, 巴仁基, 葛华, 铁永波, 高延超 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 133-140

西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析

An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas
高杨, 贺凯, 李壮, 高浩源, 卫童瑶, 邢爱国, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 14-23

深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析

Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20 th, 2015 in Shenzhen, China
高杨, 卫童瑶, 李滨, 贺凯, 刘铮, 王学良 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 129-129



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307005

吴森, 齐得旭, 李虎, 等. 基于灾害动态演化过程的管道滑坡灾害多因素耦合预警模型[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 182-189.

WU Sen, QI Dexu, LI Hu, et al. A multifactor coupled early-warning model for pipeline landslide hazards based on the dynamic evolutionary process of disaster[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 182-189.

基于灾害动态演化过程的管道滑坡灾害多因素耦合 预警模型

吴森^{1,2,3,4}, 齐得旭², 李虎^{2,3}, 兰宇^{1,2,3}, 李江^{1,2,3,4}, 孙明智^{2,3}

(1. 四川省第一地质大队, 四川成都 610032; 2. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川成都 610032; 3. 四川省时空纵横信息科技有限公司, 四川成都 610037; 4. 自然资源部西部地区地质灾害防治与生态修复技术创新中心, 四川成都 610032)

摘要: 长输油气管道不可避免地要穿越地质环境条件复杂的山区, 遭受各类地质灾害威胁。滑坡灾害是最为严重的地质灾害之一。为了实现管道滑坡灾害的提前预判, 通常设定多项监测预警指标进行监测, 但是, 由于忽略了各指标之间的关联性, 导致大量的错报与误报。本文通过对管道滑坡灾害动态演化过程分析, 提出了管道滑坡灾害动态演化的 4 个阶段: ①滑坡区降雨, 地表入渗; ②地下水位上升, 坡体自重增加, 岩土力学参数降低; ③坡体产生局部变形; ④滑坡整体失稳下滑作用于管道。提取了灾害变形、外界诱发因素、管道应力应变 3 种类型监测关键指标, 构建了管道滑坡灾害监测指标体系, 在此基础上, 提出基于灾害动态演化过程的管道滑坡灾害多因素耦合预警模型。该模型通过综合考虑灾害变形指标、外界诱发指标、管道力学指标之间的耦合关系, 构建出了多维度预警等级判据。模型在贵州某天然气管道滑坡开展示范应用, 先后成功发布蓝色、黄色、红色预警信息, 为滑坡的应急处置与抢险提供了充足的响应时间, 保障了管道的运营安全。该模型避免了因降雨过多即发出高预警等级的问题, 进一步提高了预警准确度, 使得预警结果更符合实际, 可以为管道滑坡灾害的监测预警工作提供一定的参考与借鉴。

关键词: 管道滑坡灾害; 灾害动态演化过程; 多因素耦合; 预警模型

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0182-08

A multifactor coupled early-warning model for pipeline landslide hazards based on the dynamic evolutionary process of disaster

WU Sen^{1,2,3,4}, QI Dexu², LI Hu^{2,3}, LAN Yu^{1,2,3}, LI Jiang^{1,2,3,4}, SUN Mingzhi^{2,3}

(1. The 1st Geological Brigade of Sichuan, Chengdu, Sichuan 610032, China; 2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610032, China; 3. Sichuan Gallop Ahead Spatiotemporal Infotech Limited, Chengdu, Sichuan 610037, China; 4. Technology Innovation Center for Geological Disaster Prevention and Ecological Restoration in Western China, Chengdu, Sichuan 610032, China)

Abstract: Long oil and gas pipelines inevitably cross mountainous regions with complex geological environment

收稿日期: 2023-07-05; 修订日期: 2024-01-16

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFSY0036; 2022YFG0047); 四川省地矿局科技创新项目(SCDKZCKJXM-2021064)

第一作者: 吴森(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害评价与监测预警工作。E-mail: 769346087@qq.com

通讯作者: 齐得旭(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害评价与监测预警工作。E-mail: 835201485@qq.com

and are threatened by various geological disasters, the most severe of which is landslides. To achieve early-warning of pipeline landslide hazards, multiple monitoring and early-warning indicators are typically established. However, the failure to account for the correlation between various indicators has led to a high frequency of false alarms. Based on the analysis of the dynamic evolutionary process of pipeline landslide hazards, this study proposes four stages of pipeline landslide hazards: (1) rainfall on the landslide leads to surface infiltration; (2) the groundwater level rises increasing the slope self-weight increases and reducing the geotechnical parameter; (3) the slope has undergone local deformation; (4) the landslide slides entirely and threatens pipeline safety. Three key monitoring indicators of landslide hazard deformations, external induced indicators, and pipeline stress-strain were extracted to construct a monitoring index system for pipeline landslide hazards. On this basis, a multifactor coupled early-warning model for pipeline landslide hazards is proposed. This model integrates the relationships between landslide deformation indicators, external triggers, and pipeline mechanical responses, creating a multidimensional early-warning criterion. This early-warning model was applied in a natural gas pipeline landslide in Guizhou Province, and successfully issued blue, yellow, and red early-warning information, providing sufficient time for emergency response and rescue of the landslide, ensuring the safe operation of the pipeline. This model can avoid the problem of high early-warning levels due to excessive rainfall, further improving the accuracy of pipeline landslide hazards early-warning and making the early-warning results more realistic. This study can provide a valuable reference for the monitoring and early-warning work on pipeline landslide hazards.

Keywords: pipeline landslide hazard; dynamic evolutionary process of disaster; multifactor coupling; early-warning model

管道滑坡灾害是指对管道输送系统安全和运营环境造成危害的滑坡灾害。滑坡对穿越的管道危害巨大,常导致管道挤压变形,造成输送介质泄漏,污染周围环境,更严重的甚至导致爆炸,影响周围群众生命财产安全^[1-2]。例如:2017年7月2日,位于贵州省黔西南州的中石油输气管道,受当地持续降雨影响,外侧公路边坡下陷侧滑,导致天然气泄漏引发燃烧爆炸^[3];2015年12月20日,深圳市光明新区的红坳渣土受纳场发生滑坡,事故造成西气东输管道破裂泄漏^[4];2019年3月,受极端天气影响,伊朗厄尔布尔士省山体滑坡导致天然气管道破裂停输^[5]。

滑坡灾害可以通过自动化监测手段进行风险预警^[6-7]。目前针对滑坡的预警主要包括两个方面:一是基于滑坡变形的预警,根据滑坡变形速率或变形曲线切线角来推测滑坡所处的不同变形阶段,给出相应级别的预警判据^[8-10];二是基于模拟实验^[11]与数理统计^[12-14],给出触发滑坡的临界降雨条件,构建滑坡失稳的临界雨强判据。针对管道滑坡灾害,部分学者对承灾对象管道开展了相关应力应变监测技术研究,葛华等^[15]推导出滑坡区管道位移和应力力学模型,给出不同级别预警等级下管道允许附加应力的阈值;冷建成等^[16]基于有限元应力分析确定敏感的应力监测部位;许学瑞等^[17]提出一种滑坡多发区管道应变监测的

安装方法;另有文献提出管道应变监测的原理,并给出常用管道允许附加应力阈值参考表^[18-19]。以上研究可以为管道滑坡灾害监测预警提供灾害变形、外界诱发因素、管道力学等单指标方面的预警判据参考。

已有研究成果表明,滑坡发生是一个动态变化过程,在演化过程中各系统之间表现出协同耦合效应。因此,基于管道滑坡的动态演化过程,综合考虑滑坡变形、承灾对象(管道)、外界诱发因素的影响,通过构建基于地灾变形指标(X)、外界诱发指标(Y)、管道力学指标(Z)的多维度预警矩阵,提出了一种基于灾害动态演化过程的管道滑坡灾害多因素耦合预警模型^[19-20],实现对单体管道滑坡风险的预警,进一步提高预警准确度,预警结果更符合实际,可为管道滑坡灾害的监测预警工作提供一定的参考与借鉴。

1 管道滑坡灾害动态演化过程

管道滑坡灾害的形成是地质动态演化过程^[21-23],可分为4个阶段,如图1所示:①滑坡区降雨,地表入渗;②地表入渗后,导致地下水位上升,坡体自重增加、岩土力学参数降低;③随着坡体自重增加、岩土力学参数的降低,导致坡体产生局部变形;④进一步的累计破坏到一定程度后,造成滑坡整体失稳下滑作用于管道上,导致滑坡体剪切管道,造成管道弯曲、

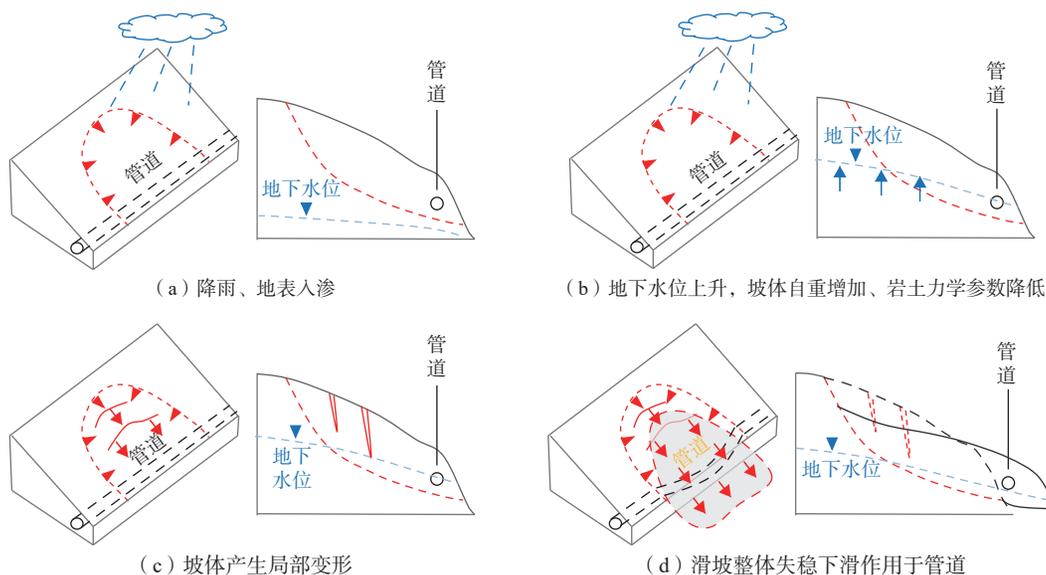


图 1 管道滑坡灾害动态演化过程

Fig. 1 Dynamic evolutionary process of pipeline landslide hazards

断裂。

2 管道滑坡灾害预警模型

通过灾害变形指标(X)、外界诱发指标(Y)、管道力学指标(Z)3 大类监测指标构建的三维预警判别矩阵,实现对滑坡灾害的预警。

2.1 监测指标体系构建

根据管道滑坡灾害动态演化过程,可以针对性开展相关监测,包括:降雨、土壤含水率、灾害的变形,管道应力应变等,以求在滑坡发生变形破坏之前,捕捉相关信息,为管道安全运营提供信息支撑。根据监测对象不同,构建基于灾害变形指标、外界诱发指标、管道力学指标的监测指标体系(图 2)。

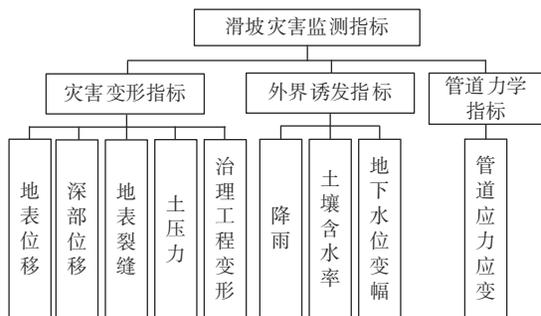


图 2 管道滑坡灾害监测指标体系

Fig. 2 Monitoring index system for pipeline landslide hazards

2.2 预警等级

以管道滑坡灾害变形发展演化阶段、变形速率、外界诱发因素、管体附加应力等监测数据为基础,综

合研判,进行中长期、短期和临灾预警。管道滑坡灾害险情预警划分为 3 级: I 级(特别严重)、II 级(较重)、III 级(一般),分别赋以红色、黄色、蓝色标志^[18]。

- (1)红色预警:警报级(I级);
- (2)黄色预警:警示级(II级);
- (3)蓝色预警:关注级(III级)。

2.3 预警阈值与指标级别划分

(1)灾害变形指标(X)

灾害变形指标阈值主要考虑 2 个因素:一是变形的绝对值,即变形监测中变形具体值;二是相对值,即从变化速率及曲线上判断滑坡灾害所处变形阶段。

不同类型、不同规模的滑坡灾害,地表变形绝对量差距较大,要根据灾害发育特征,考虑管土耦合关系,根据管道极限承载,按照最不利工况下管土协同变形,反推灾害变形指标的各级判别等级^[24]。

以匀速变形阶段速率为基准,对监测曲线做无量纲处理,实现切线角的转换。通过灾害监测数据曲线与变化速率,判断滑坡灾害所处变形阶段,设置对应的指标阈值^[8]。

为避免错报漏报,按照“就高不就低”的原则,取变形量绝对量值与监测曲线切线角值进入对应指标分级区间的高者,作为灾害变形指标的综合分级。

(2)外界诱发指标(Y)

降雨、土壤含水率、地下水位变幅等作为灾害的外界诱发指标,可以通过数值模拟或类似灾害进行推演;分析灾害在不同降雨条件下的稳定性系数,拟合安全系数分别为 1.15, 1.05, 1.0 时持续时间与雨强关

系曲线, 通过现实降雨持续时间(T)和雨强(I), 判别外界诱发因素的综合分级^[11-14](图 3)。

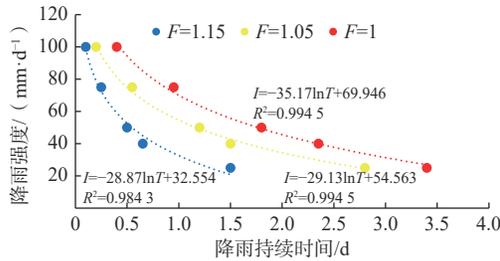


图 3 不同安全系数下降雨持续时间与雨强关系曲线
Fig. 3 Relation curves between rainfall time and rainfall intensity under different factors of safety

(3)管道力学指标(Z)

根据《油气管道滑坡灾害监测规范》^[18], 布设管道应力应变监测站, 获取管道附加应力值。按照被监测管道附加应力允许超过的百分比及管道应力曲线切线角 α 两个指标确定。切线角判别方式与此类似。

① 附加应力超过允许附加应力的 30% 或管道应力曲线超过匀速变化达到初始加速阶段, 管道力学指标为蓝色级别。

② 附加应力超过允许附加应力的 60% 或管道应力曲线达到中加速阶段, 管道力学指标为黄色级别。

③ 附加应力超过允许附加应力的 90% 或管道应力曲线达到加速阶段, 管道力学指标为红色级别。

(4)预警指标级别划分

各类别预警指标级别划分标准, 参考表 1。

表 1 各类别指标级别划分标准

Table 1 Classification standards for indicators of various categories

指标分级	灾害变形指标	外界诱发指标	管道力学指标
蓝色级	$X_{blue} \leq X < X_{yellow}$	$Y_{blue} \leq Y < Y_{yellow}$	$Z_{blue} \leq Z < Z_{yellow}$
黄色级	$X_{yellow} \leq X < X_{red}$	$Y_{yellow} \leq Y < Y_{red}$	$Z_{yellow} \leq Z < Z_{red}$
红色级	$X \geq X_{red}$	$Y \geq Y_{red}$	$Z \geq Z_{red}$

注: X_{blue} 、 X_{yellow} 、 X_{red} 分别为灾害变形指标蓝色级、黄色级、红色级阈值; Y_{blue} 、 Y_{yellow} 、 Y_{red} 分别为外界诱发指标蓝色级、黄色级、红色级阈值; Z_{blue} 、 Z_{yellow} 、 Z_{red} 分别为管道力学指标蓝色级、黄色级、红色级阈值。

2.4 预警模型

通过灾害变形指标、外界诱发指标、管道力学指标构建三维矩阵预警模型, 实现对管道灾害的预警。在考虑各指标权重时, 结合管道滑坡灾害 4 个阶段的动态演化过程。第一阶段, 当降雨达到对应的阈值区间时, 如果灾害变形与管道受力未见明显增加, 为避免单一降雨条件触发高级别预警的“尴尬”, 相应的预警等级降低; 第二、三阶段, 当坡体地下水位上升, 自

重增加, 岩土力学参数降低时, 灾害体开始变形, 达到对应阈值区间时, 滑坡灾害会进一步作用于管道, 威胁管道的安全, 预警等级提升; 第四阶段, 当管道受力达到对应阈值区间时, 进一步提升灾害的预警等级。

针对监测工程实际应用, 若监测类型不足 3 种, 可做降维处理: 两种监测类型按照二维矩阵预警, 一种监测类型按照对应阈值进行一维预警。

(1)一维预警模型

一维预警模型适用于仅有一种类别监测指标的预警, 共 3 种情况: 仅有灾害变形指标、外界诱发指标或管道力学指标。相应的预警等级见表 2。同一类预警指标下有多种监测手段, 按照就高不就低原则, 取最高级作为预警等级。

表 2 一维预警模型

Table 2 One-dimensional early-warning model

预警等级	灾害变形指标	外界诱发指标	管道力学指标
蓝色预警	$X_{blue} \leq X < X_{yellow}$	$Y_{blue} \leq Y < Y_{yellow}$	$Z_{blue} \leq Z < Z_{yellow}$
黄色预警	$X_{yellow} \leq X < X_{red}$	$Y_{yellow} \leq Y < Y_{red}$	$Z_{yellow} \leq Z < Z_{red}$
红色预警	$X \geq X_{red}$	$Y \geq Y_{red}$	$Z \geq Z_{red}$

(2)二维预警模型

二维预警模型适用于有两种类别监测指标的预警, 共 3 种组合矩阵方式, 分别为: (X, Y)、(X, Z)、(Y, Z), 对应的预警等级判别见表 3、图 4。

表 3 二维预警模型组合矩阵

Table 3 Combining-matrix of two-dimensional early-warning model

预警等级	各类指标组合矩阵	
蓝色预警	(X, Y)	(蓝, 蓝)、(蓝, 黄)、(蓝, 红)
	(X, Z)	(蓝, 蓝)、(黄, 蓝)
	(Y, Z)	(蓝, 蓝)、(黄, 蓝)、(红, 蓝)
黄色预警	(X, Y)	(黄, 蓝)、(黄, 黄)
	(X, Z)	(红, 蓝)、(蓝, 黄)
	(Y, Z)	(蓝, 黄)、(黄, 黄)
红色预警	(X, Y)	(黄, 红)、(红, 蓝)、(红, 黄)、(红, 红)
	(X, Z)	(黄, 黄)、(红, 黄)、(蓝, 红)、(黄, 红)、(红, 红)
	(Y, Z)	(红, 黄)、(蓝, 红)、(黄, 红)、(红, 红)

注: 如某一类型指标达到以上区间级别, 另一指标未达到, 未达到的指标按照最低分级取, 以满足以上判别。

(3)三维预警模型

三维预警模型适用于 3 种类别监测指标齐全的预警, 对应的预警等级判别见表 4、图 5。

3 应用案例

贵州某天然气管道滑坡位于低山斜坡中部, 坡面呈阶梯形, 上缓下陡, 斜坡整体坡度 16° , 坡向 220° , 整

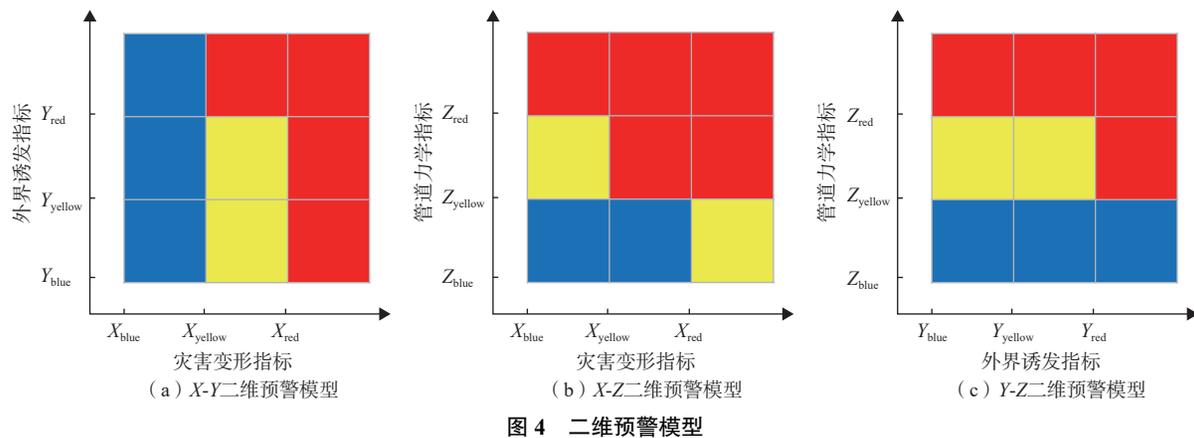


图 4 二维预警模型

Fig. 4 Two-dimensional early-warning model

表 4 三维预警模型组合矩阵

Table 4 Combining-matrix of three-dimensional early-warning model

预警等级	各类别指标级别组合矩阵
蓝色预警	(蓝, 蓝, 蓝)、(蓝, 黄, 蓝)、(蓝, 红, 蓝)、(黄, 蓝, 蓝)、(黄, 黄, 蓝)
黄色预警	(黄, 红, 蓝)、(红, 蓝, 蓝)、(红, 黄, 蓝)、(红, 红, 蓝)、(蓝, 蓝, 黄)、(蓝, 黄, 黄)、(蓝, 红, 黄)、(黄, 蓝, 黄)、(黄, 黄, 黄)
红色预警	(黄, 红, 黄)、(红, 蓝, 黄)、(红, 黄, 黄)、(红, 红, 黄)、(蓝, 蓝, 红)、(蓝, 黄, 红)、(蓝, 红, 红)、(黄, 蓝, 红)、(黄, 黄, 红)、(黄, 红, 红)、(红, 蓝, 红)、(红, 黄, 红)、(红, 红, 红)

注: 括号里自左至右依次表示灾害变形指标、外界诱发指标、管道力学指标对应的指标分级; 如某一类或两类指标达到以上区间级别, 有指标未达到, 未达到的指标按照最低分级取, 以满足以上判别。

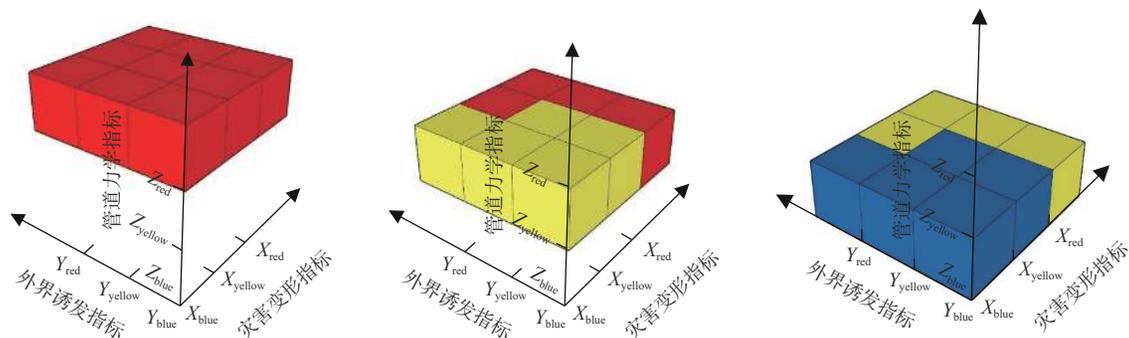


图 5 三维预警模型

Fig. 5 Three-dimensional early-warning model

个滑坡分为滑坡区与牵引影响区。滑坡区主滑方向 220°, 宽 165 m, 长 106 m, 厚 15.0 ~ 24.2 m, 体积约 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$; 牵引影响区破坏方向 236°, 宽 110 ~ 145 m, 长 51.0 m, 滑体厚 7.0 ~ 25.8 m, 体积约 $11.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡总方量约 $46.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为中型土质滑坡。管道横向穿越滑坡的牵引影响区, 敷设长度约 155 m。

2020 年 7 月 9 日, 滑坡前部出现变形失稳迹象, 坡体拉张裂缝发育, 中前部堡坎出现不同程度鼓胀与垮塌, 路面局部下错, 并有向管道方向扩展趋势。为了监控灾害风险, 前期沿管道敷设方向布设了 2 个防护工程倾斜监测站、3 个地表位移 GNSS 监测站、1 个雨量监测站。

基于灾害变形指标与外界诱发指标构建二维预警模型, 如图 4(a) 所示。预警规则: 灾害变形指标包含地表位移与防护工程倾斜两种类型, 根据管道所能承受的最大位移量, 按照最不利工况, 即管土协同变形考虑, 反推地表位移量作为不同级别分级阈值; 防护工程倾斜值设置同上述方法; 地表位移与防护工程倾斜曲线切线角按照 45°、80°、85° 分级^[6,8], 按照就高不就低原则取最高级作为灾害变形指标的等级, 见表 5。运用有限元软件建模分析滑坡安全系数为 1.15, 1.05, 1.0 时降雨持续时间与雨强关系曲线, 通过现实降雨持续时间和雨强组成的点 (T, I) 所处位置, 给出对应的外界诱发指标 Y 的等级^[6], 如图 3

表5 滑坡预警规则

Table 5 Landslide early-warning rules

指标类别	指标分级		
	蓝色级	黄色级	红色级
灾害变形指标			
地表位移量/(mm)	30	80	150
防护工程倾斜量/(°)	0.5	1	2
切线角/(°)	[45,80)	[80,85)	≥85
外界诱发指标			
降雨持续时间与雨强组成的点	$F=1.15$ 、 $F=1.05$	$F=1.05$ 、 $F=1$	$F=1$
拟合曲线之间	拟合曲线之间	拟合曲线之间	拟合曲线之上

所示。

2021年8月13日—9月1日,管道监测预警平台按照该二维预警模型先后成功发布蓝色、黄色、红色预警信息,为滑坡的应急处置与抢险提供了充足的响应时间,经过应急处置与应急抢险后,滑坡变形趋于平稳,从而保障了管道的平稳安全运营(图6、图7)。

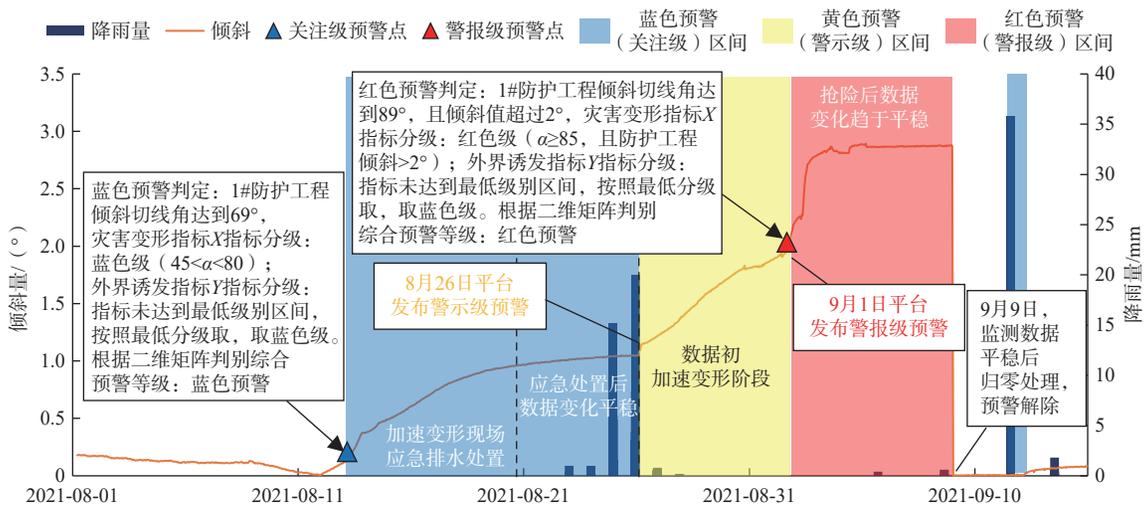


图6 1#防护工程倾斜与降雨监测曲线分析

Fig. 6 Analysis of No.1 inclination displacement of protective construction and rainfall monitoring curve

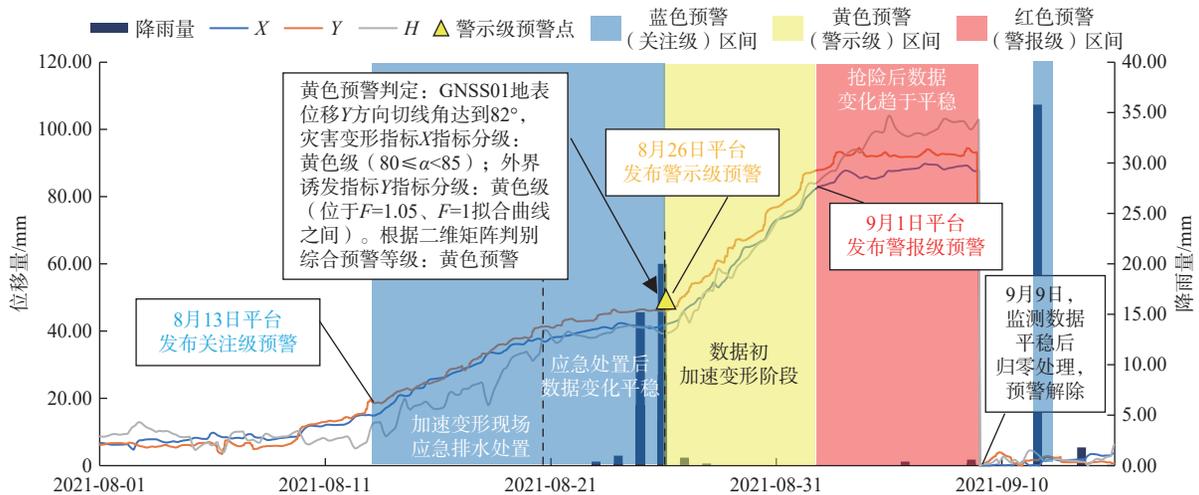


图7 1#GNSS位移与降雨监测曲线分析

Fig. 7 Analysis of No.1 GNSS displacement and rainfall monitoring curve

4 结论

(1)管道滑坡灾害的形成是一个地质动态演化过程,分为4个阶段:①滑坡区降雨,地表入渗;②地下水位上升,坡体自重增加,岩土力学参数降低;③坡体产生局部变形;④滑坡整体失稳下滑作用于管道。

(2)基于管道滑坡灾害动态演化过程,提取关键监测指标,通过地灾变形指标、外界诱发指标、管道力学指标构建滑坡灾害监测指标体系。

(3)综合考虑地灾变形指标、外界诱发指标、管道力学指标之间的地质动态演化耦合关系,提出基于灾

害动态演化过程的管道滑坡灾害多因素耦合预警模型。分析案例表明由该模型触发的预警等级更符合实际情况,预警的准确性得到进一步的提升。

参考文献 (References) :

- [1] 狄彦, 帅健, 王晓霖, 等. 油气管道事故原因分析及分类方法研究 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 109 – 115. [DI Yan, SHUAI Jian, WANG Xiaolin, et al. Study on methods for classifying oil & gas pipeline incidents[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(7): 109 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [2] LEE E M, AUDIBERT J M E, HENGESH J V, et al. Landslide-related ruptures of the Camisea pipeline system, Peru[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2009, 42(2): 251 – 259.
- [3] 国务院安委会办公室. 国务院安委会办公室关于贵州省黔西南州晴隆县“7·2”中石油输气管道燃烧爆炸事故的通报 [J]. 国家安全生产监督管理局国家煤矿安全监察局公告, 2017(8): 3 – 4. [Office of the State Council Safety Commission. Notice of the Office of the State Council Safety Commission on the “7·2” China Petroleum gas pipeline combustion and explosion accident in Qinglong County, Qianxinan Buyi and Miao Autonomous Prefecture, Guizhou Province[J]. Gazette of the State Administration of Work Safety and the State Administration of Coal Mine Safety, 2017(8): 3 – 4. (in Chinese)]
- [4] 本刊编辑部. 广东深圳光明新区渣土受纳场“12·20”特别重大滑坡事故调查报告 [J]. 中国应急管理, 2016(7): 77 – 85. [Editorial department. Investigation report on the “12·20” special major landslide accident at the waste soil receiving site in Guangming district, Shenzhen, Guangdong Province[J]. China Emergency Management, 2016(7): 77 – 85. (in Chinese)]
- [5] VASSEGHI A, HAGHSHEENAS E, SOROUSHAN A, et al. Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 119: 105009.
- [6] 许强, 汤明高, 黄润秋, 等. 大型滑坡监测预警与应急处置 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2020. [XU Qiang, TANG Minggao, HUANG Runqiu, et al. Large landslide monitoring and early warning and emergency treatment[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)]
- [7] 方汕澳, 许强, 修德皓, 等. 基于斜率模型的突发型黄土滑坡失稳时间预测 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 169 – 179. [FANG Shan’ao, XU Qiang, XIU Dehao, et al. A study of the predicted instability time of sudden loess landslides based on the SLO model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 169 – 179. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 许强, 曾裕平, 钱江澎, 等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据 [J]. 地质通报, 2009, 28(4): 501 – 505. [XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4): 501 – 505. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王家柱, 巴仁基, 葛华, 等. 基于 MACD 指标的渐变型滑坡临滑预报模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 133 – 140. [WANG Jiazhu, BA Renji, GE Hua, et al. Research on early-warning prediction model of critical slide of creep landslide based on the MACD index[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 133 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 亓星, 朱星, 许强, 等. 基于斋藤模型的滑坡临滑时间预报方法改进及应用 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 832 – 839. [QI Xing, ZHU Xing, XU Qiang, et al. Improvement and application of landslide proximity time prediction method based on saito model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 832 – 839. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 汤明高, 许强, 李九乾, 等. 降雨诱发震后松散堆积滑坡的启动试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 128 – 134. [TANG Minggao, XU Qiang, LI Jiujian, et al. An experimental study of the failure mechanism of shallow landslides after earthquake triggered by rainfall[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 128 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 安知利. 三峡库区降雨型滑坡形成机制与降雨阈值研究——以秭归县为例 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2022. [AN Zhili. Study on the formation mechanism and rainfall threshold of rainfall landslide in the three gorges reservoir Area[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 朱晓霞, 张力, 杨树文. 降雨引发的兰州黄土滑坡时空规律分析和临界降雨量预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 24 – 31. [ZHU Xiaoxia, ZHANG Li, YANG Shuwen. Characteristics of rainfall-induced loess landslides and their threshold rainfall in Lanzhou[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard*

- and Control, 2019, 30(4): 24 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴杰, 陈冠, 孟兴民, 等. 白龙江流域滑坡降雨临界值 [J]. 山地学报, 2022, 40(6): 875 - 886. [WU Jie, CHEN Guan, MENG Xingmin, et al. Rainfall threshold of landslides in the Bailong river basin, China[J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 875 - 886. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 葛华, 方迎潮, 朱建平, 等. 穿越管道滑坡地表位移预警阈值及预警模型研究 [J]. 人民长江, 2023, 54(1): 126 - 132. [GE Hua, FANG Yingchao, ZHU Jianping, et al. Prediction threshold of surface displacement and prediction model of pipeline crossing landslide[J]. Yangtze River, 2023, 54(1): 126 - 132. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 冷建成, 钱万东, 周临风. 基于应力监测的油气管道安全预警试验研究 [J]. 石油机械, 2021, 49(6): 139 - 144. [LENG Jiancheng, QIAN Wandong, ZHOU Linfeng. Experimental study on safety warning of oil and gas pipeline based on stress monitoring[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(6): 139 - 144. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 许学瑞, 帅健, 肖伟生. 滑坡多发区管道应变监测应变计安装方法 [J]. 油气储运, 2010, 29(10): 780 - 784. [XU Xuerui, SHUAI Jian, XIAO Weisheng. The installation method of strain gage used to monitor pipeline strain in landslide-prone areas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(10): 780 - 784. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 中国石油天然气集团公司标准化委员会天然气与管道专业标准化技术委员会. 油气管道滑坡灾害监测规范: Q/SY 1673—2014[S]. 北京: 中国石油天然气集团公司, 2014. [Standardization Technical Committee of Natural Gas and Pipeline Discipline of Standardization Committee of China National Petroleum Corporation. Code for monitoring landslide hazards of oil and gas pipelines: Q/SY 1673—2014[S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 2014. (in Chinese)]
- [19] 刘奎荣, 余东亮, 周广, 等. 管道地质灾害监测数据挖掘及预警模型研究与应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2022. [LIU Kuirong, YU Dongliang, ZHOU Guang, et al. Research and application of data mining and early warning model for pipeline geological disaster monitoring[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2022. (in Chinese)]
- [20] 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 181 - 187. [FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 181 - 187. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 郭斌, 贾燕, 梁彧, 等. 四川宝轮服务区降雨型滑坡活动过程分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 45 - 51. [GUO Bin, JIA Yan, LIANG Yu, et al. Analysis on process of rainfall-induced landslide in Baolun service area, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 45 - 51. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王子, 王栋, 姜帅, 等. 西气东输管道工程陕西岭湾村滑坡变形特征及成因机制分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 8 - 19. [WANG Zi, WANG Dong, JIANG Shuai, et al. Analysis on deformation mechanism of the Lingwan Village landslide in Shaanxi Province section of the West-East Gas Pipeline Project[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 8 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 韩俊杰, 黄迪文, 汪海超, 等. 横穿滑坡天然气管道失效机制研究 [J]. 人民长江, 2022, 53(1): 209 - 215. [HAN Junjie, HUANG Diwen, WANG Haichao, et al. Research on failure mechanism of a fuel gas pipeline transversely crossing landslide[J]. Yangtze River, 2022, 53(1): 209 - 215. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农