

# 基于灰色关联法的新源县喀拉海依苏 滑坡降雨事件响应研究\*

程立龙<sup>1</sup>, 张紫昭<sup>1,2†</sup>, 吕倩俐<sup>1,3</sup>, 汤显伟<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 新疆大学研究基地, 新疆 乌鲁木齐 830017; 3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 伊犁河谷是新疆人口密集、环境和经济条件较好的重点发展区域,也是我国黄土滑坡广泛分布的地区之一。受气候、地形等因素影响,当地滑坡灾害频发,但降雨事件的滑坡响应尚未获得充分的监测数据论证。因此,本文以2021年4月至9月降雨期新源县喀拉海依苏滑坡的监测数据为基础,基于SPSSPro平台,采用数理统计和灰色关联分析方法,综合分析位移与降雨量、土壤含水率的相关性及关联程度,确定黄土-基岩型滑坡土壤含水率、垂直位移及水平位移对降雨的响应特征。结果表明:滑坡变形与降雨量、含水率具有较强的相关性,降雨入渗深度基本稳定在1.2~2.0 m;滑坡位移与降雨量的关联程度大于土壤含水率。

**关键词:** 伊犁地区; 滑坡; 降雨入渗; 灰色关联法

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.07.24.0001

**中图分类号:** P66 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)05-0607-014

**引文格式:** 程立龙, 张紫昭, 吕倩俐, 汤显伟. 基于灰色关联法的新源县喀拉海依苏滑坡降雨事件响应研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(5): 607-620.

**英文引文格式:** CHENG Lilong, ZHANG Zizhao, LYU Qianli, TANG Xianwei. Study on rainfall event response of Karaheisu landslide in Xinyuan County based on grey correlation method[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(5): 607-620.

## Study on Rainfall Event Response of Karaheisu Landslide in Xinyuan County Based on Grey Correlation Method

CHENG Lilong<sup>1</sup>, ZHANG Zizhao<sup>1,2</sup>, LYU Qianli<sup>1,3</sup>, TANG Xianwei<sup>1</sup>

(1. School of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Research Base of Xinjiang University, State Key Laboratory of Deep Geotechnical Mechanics and Underground Engineering, Urumqi Xinjiang 830017, China; 3. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** The Ili River Valley is a key development area in Xinjiang with dense population, favorable environmental and economic conditions, and one of the regions in China where loess landslides are widely distributed. Affected by factors such as climate and topography, landslide disasters occur frequently in this area, but the landslide response to rainfall events has not been fully demonstrated by monitoring data. Therefore, based on the monitoring data of the Karaheisu landslide in Xinyuan County during the rainfall period from April to September in 2021, and using the SPSSPro platform, this study employs mathematical statistics and grey correlation analysis methods to comprehensively analyze the correlation and association degree between displacement and rainfall amount, soil water content, and determine the response characteristics of soil water content, vertical displacement, and horizontal displacement of loess-bedrock landslides to rainfall. The results show that landslide deformation has a strong correlation with rainfall amount and water content, with the rainfall infiltration depth basically stabilized at 1.2~2.0 m; the degree of association between landslide displacement and rainfall amount is greater than that with soil water content.

\* 收稿日期: 2024-07-24

**基金项目:** 国家自然科学基金“伊犁谷地冰雪融水叠加降雨入渗黄土滑坡形成机理与预警判据”(42367021); 新疆维吾尔自治区天山英才计划“天山北坡矿山开采地质灾害-水文地质-生态环境耦合互馈机制及其工程地质意义”(2023TSYCCX0010)。

**作者简介:** 程立龙(2000—), 男, 硕士生, 从事地质灾害防治的研究, E-mail: cll\_xju@163.com.

† **通讯作者:** 张紫昭(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害和地质环境的研究, E-mail: zhangzizhao@xju.edu.cn.

**Key words:** Ili region; landslides; rainfall infiltration; grey correlation method

## 0 引言

新疆伊犁河谷独特的地形地貌条件、地理位置及气候特征,使其成为我国西北黄土型滑坡广泛分布的地区之一<sup>[1]</sup>。伊犁地区的黄土具有一定的静态液化势,对雨水入渗作用敏感;大气降水和冰雪融水入渗对伊犁地区黄土滑坡的诱发和加剧起到了重要作用<sup>[2]</sup>。伊犁地区降雨量的时空分布不均匀,易形成局部强降雨区并在短时间内产生大量径流,导致黄土坡面、滑动面处的水分快速饱和,黄土的抗剪强度快速降低,从而诱发滑坡<sup>[3]</sup>。据新疆维吾尔自治区地质环境监测院统计,伊犁谷地黄土滑坡灾害占当地地质灾害总数的70%,且多具爆发时间短、危害程度大的特点。故从降雨角度探究伊犁地区黄土-基岩滑坡的响应过程,可为当地防灾减灾工作提供一定的参考。

降雨对土壤入渗的影响可分为直接和间接两种。直接影响主要体现在降雨类型、强度变化对入渗过程的影响;间接影响则表现在降雨冲击下土壤表面易形成物理结皮<sup>[4]</sup>,影响入渗过程,其中雨滴大小、雨滴速度和降雨强度是影响土壤结皮的关键因素<sup>[5]</sup>。张光远等<sup>[6]</sup>、蔡强国等<sup>[7]</sup>发现,土壤结皮能减缓入渗,加速坡面产流。在入渗模型方面,早在1911年,Green-Ampt<sup>[8]</sup>提出了毛细管理论的模型,后来Philip<sup>[9]</sup>和Parlange<sup>[10]</sup>分别提出了适用于不同条件下的入渗公式。目前,土壤水分入渗研究主要集中在修正Green-Ampt模型、求解Philip和Parlange入渗方程等方面,研究方法包括实地监测、实验室试验和数值模拟计算等。

降雨对滑坡形变的影响,主要集中在降雨强度、降雨持时、滑体结构特征等对降雨与滑坡的关系研究<sup>[11-13]</sup>,主要方法有现场监测、物理模型模拟、数值模拟等。随着科技发展,监测设备在精度、灵敏度、稳定性及对滑坡建模的应用等方面均有较大提升,使得滑坡灾害防治的研究角度更为开阔。此外,数理统计的方法也广泛应用于滑坡稳定性分析及防治,聂兵其等<sup>[14]</sup>使用灰色关联法对涉水边坡敏感性进行研究,大幅降低了试验误差;王飞等<sup>[15]</sup>基于灰色关联法提出了多维度滑坡治理决策系统,其合理性及可靠性得到了有效验证。

降雨型滑坡预警研究是滑坡研究的重要课题<sup>[16]</sup>,其难点主要在于如何选取监测指标用以提高预测的可信度<sup>[17]</sup>。刘汉东等<sup>[18]</sup>汇总了滑坡预测的进展,并提出了综合集成的研究思路。Angeli等<sup>[19]</sup>、Petley等<sup>[20]</sup>、Intrieri等<sup>[21]</sup>基于边坡位移的监测研究了滑坡预警系统。Saito<sup>[22]</sup>首先提出了基于蠕变理论的边坡失稳预测方法。后来,有关学者结合滑坡变形的力学机制,同时增加了位移、变形速率等指标,改进了滑坡预测方法<sup>[23-27]</sup>。

综上,现有研究多聚焦于人工降雨情境下的滑坡响应观测与数值模拟,对于自然降雨过程中的滑坡诱发机制尚缺乏实地监测数据支持,尤其是在冻融区黄土斜坡环境中的多参量动态响应机制研究仍显不足。伊犁河谷作为黄土分布最广的典型地区之一,其黄土不仅粒径细、孔隙率高、渗透性强<sup>[28]</sup>,而且广泛分布于迎风坡面及中低山地部位,厚度变化大,颗粒组成以粉粒为主,常夹杂疏松层或弱结构夹层,形成滑动面潜势条件。受西风带控制,该区春季气温回升迅速,昼夜温差大,冻融循环频繁,部分地区一天可经历3~5次冻融过程,反复冻融作用显著削弱土体结构稳定性,表现为黏聚力下降、剪切强度劣化及裂缝发育加剧,易形成潜在滑动面。与此同时,该地区降雨呈季节性集中分布,春末夏初常伴有强降雨叠加融雪过程,使黄土斜坡处于长时间高含水状态,天然含水率明显高于黄土高原等地区,进一步加剧了滑坡的发生风险。研究表明,伊犁黄土滑坡普遍具有“缓慢蠕动-结构破坏-突发滑移”的演化特征,其触发机制受降雨、冻融、坡体结构和地貌因素的多重耦合作用控制<sup>[28-29]</sup>。因此,本文基于新源县喀拉海依苏滑坡区的自然降雨原位监测数据,采用灰色关联分析方法,从降雨量、降雨频次、土壤含水率等角度出发,系统探讨其与地表及深部位移的响应关系,旨在揭示典型冻融区黄土滑坡的降雨响应机制,为区域滑坡灾害监测预警和科学防治提供理论支撑。

## 1 研究区概况

### 1.1 滑坡概况

新源县喀拉海依苏滑坡隐患体位于新源县阿热勒托别镇西北的阿吾拉勒山喀拉海依苏沟沟口,北、东、南三面环山,整体地势东高西低。研究区地处亚欧大陆的中心地带,具典型大陆性气候特征,区内多年平均降雨量为578.92 mm,降雨主要集中在4月至10月,降雨量占全年的98.8%左右。

滑坡体地处剥蚀堆积的圆顶低山,海拔1 276~1 470 m,斜坡坡向320°,相对高差194 m,面积约97 896 m<sup>2</sup>。根据钻探结果(图1),滑坡体地表为粉土,下部基岩为华力西晚期第二侵入次花岗岩,岩体较完整,厚度在200

m以上, 推测滑动面位于第四系粉土与基岩分界面上. 滑床埋深在35 m以下, 土层干燥、密实. 滑坡体为黄土状粉土, 透水能力较差, 在干燥状态下力学强度较高; 当遇水饱和, 在水的软化作用下, 土体的抗剪强度骤降, 极易崩解和溃散. 滑坡体后缘发育多条坡体变形导致的拉张裂缝(图2), 呈分叉状, 与主滑方向基本垂直, 裂缝宽度0.5~80.0 cm, 形成的陡坎高0.7~5.0 m, 拉张裂缝局部贯通并产生错位变形.

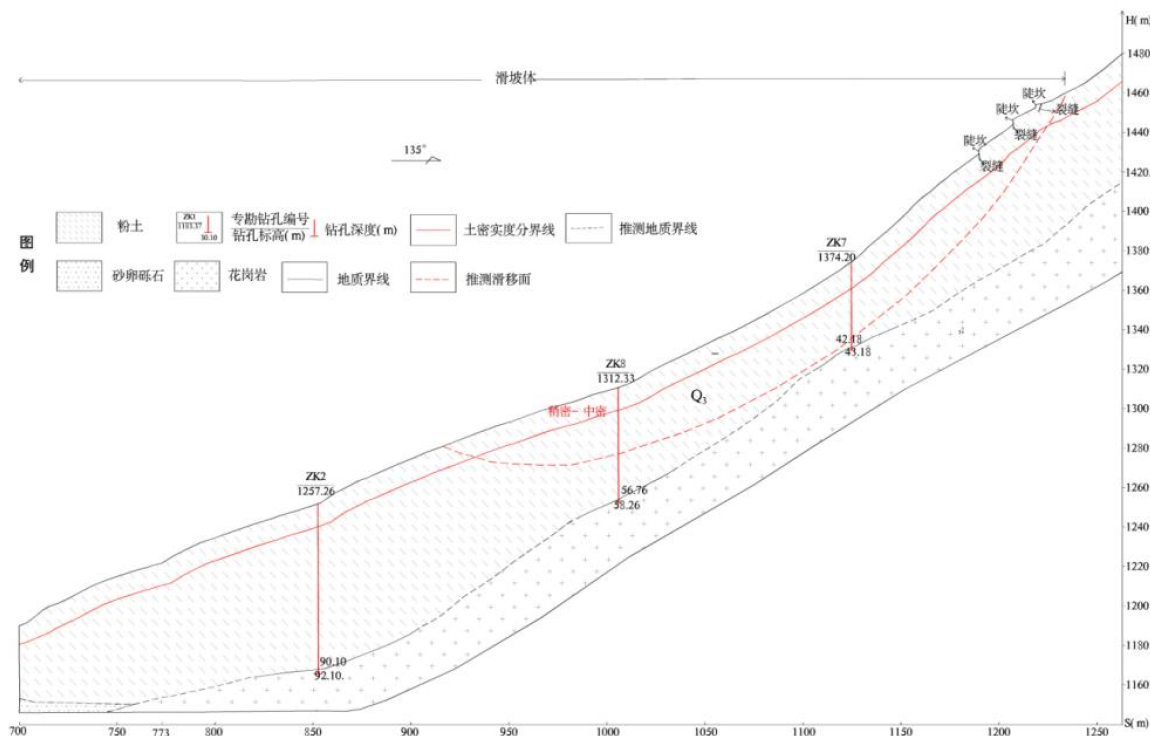


图 1 滑坡体纵向工程地质剖面

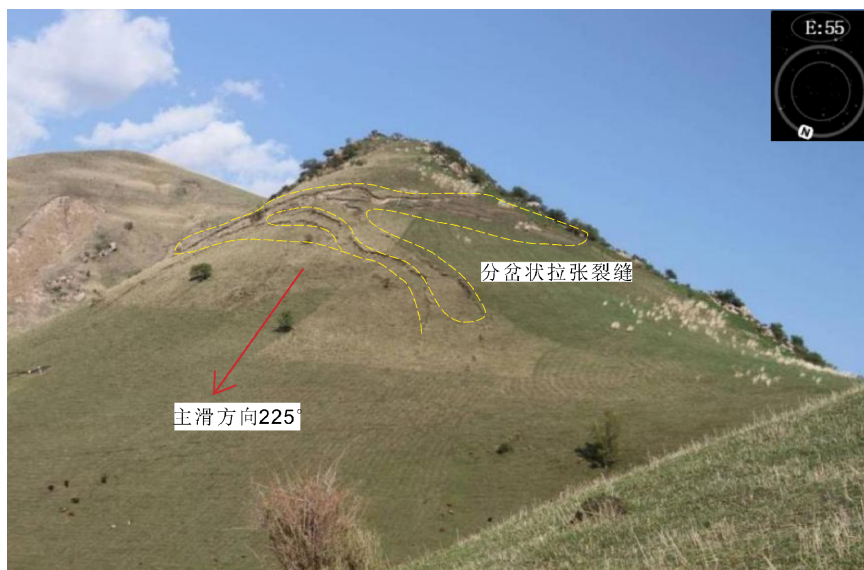


图 2 滑坡隐患后缘发育的拉张裂缝

黄土在伊犁地区的低山丘陵、山麓斜坡、沙漠边缘及各大河流阶地均有分布(图3), 据新疆维吾尔自治区地质环境监测院的监测点数据绘制伊犁地区滑坡分布图(图4)及降雨量图(图5). 由图3可知, 喀拉海依苏滑坡地处伊犁河谷, 该区域广泛分布第四系黄土及基岩组合, 具典型的黄土-基岩接触型滑坡特征. 滑坡体地表覆盖黄土状粉土, 下部为华力西晚期次花岗岩基岩. 由于黄土的孔隙度较高、透水性差, 在干燥状态下具备较高的抗剪强度, 但在降雨入渗作用下易发生含水率迅速升高、剪切强度急剧下降的现象, 导致滑坡变形失稳. 由

图5可知, 该区域降雨时空分布不均, 最大日降雨量介于5~100 mm, 喀拉海依苏滑坡附近降雨量较大且局部强降雨事件频发, 诱发大量类似的黄土-基岩型滑坡. 因此, 喀拉海依苏滑坡在地质背景、降雨特征和滑坡机制方面具有较强的代表性, 其研究结果可为伊犁河谷乃至其他类似地区的降雨型滑坡监测预警和防灾减灾提供重要的科学依据.

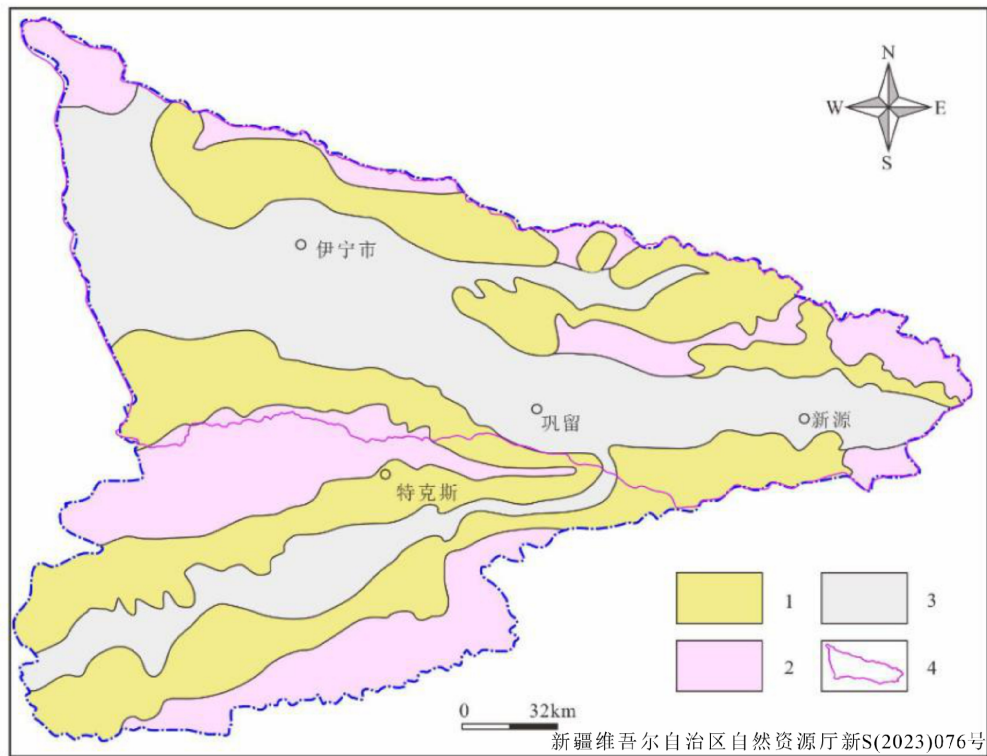


图 3 伊犁地区黄土分布 (据文献[28]修改)

注: 1为黄土; 2为基岩; 3为平原; 4为研究区

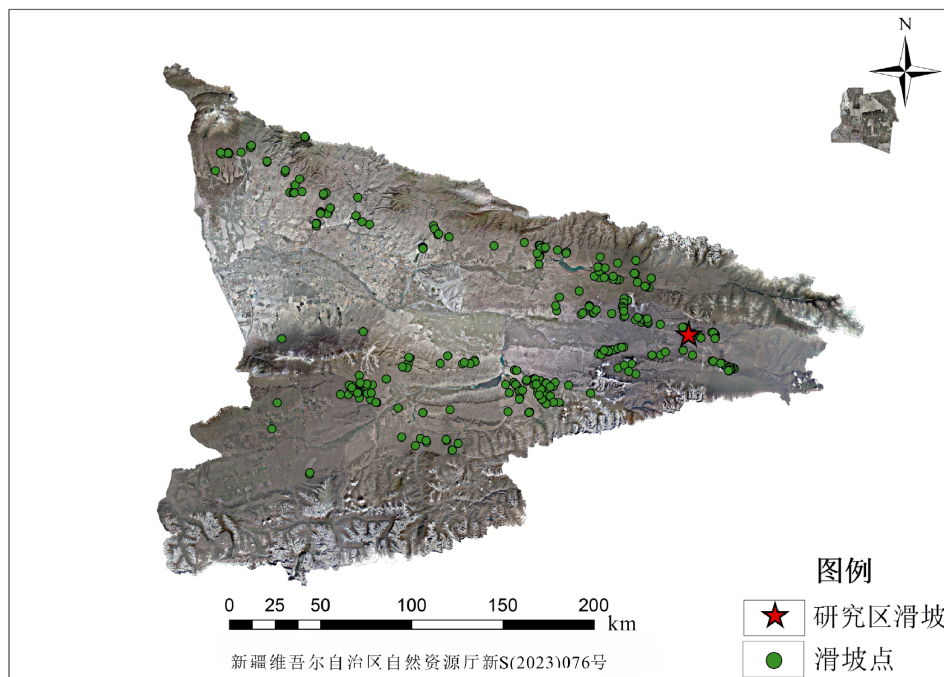


图 4 伊犁地区滑坡分布

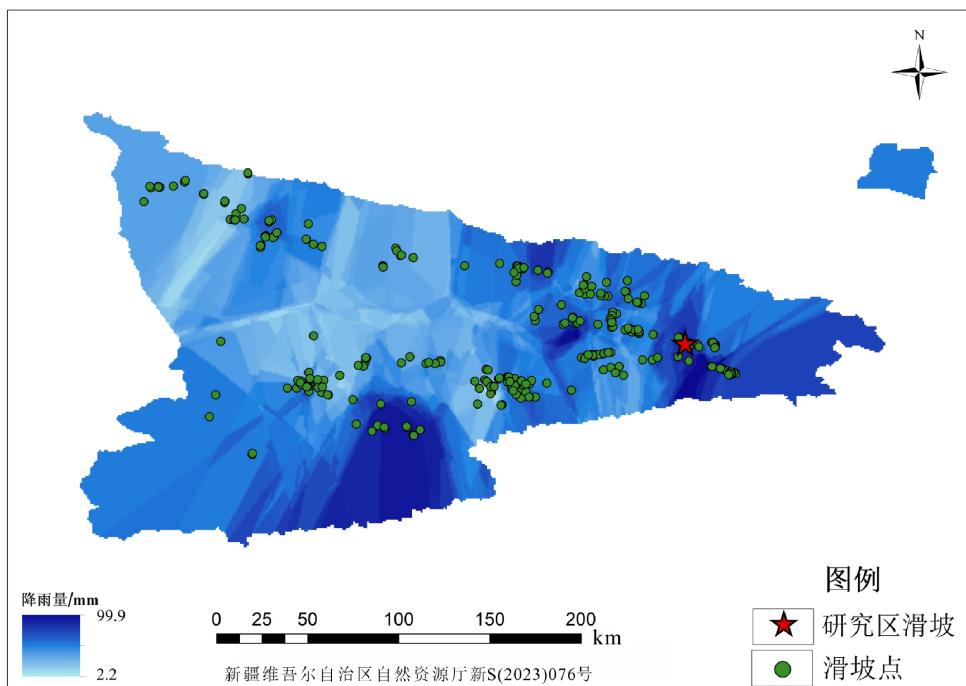


图 5 伊犁地区降雨量

### 1.2 监测设备概况

新源县喀拉海依苏滑坡监测站是由新疆维吾尔自治区地质环境监测院建立的, 以地表位移、地下位移和雨量监测为主要内容的多参数综合监测系统(表1)。监测设备类型主要包括雨量、气象要素、土体含水率、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)滑坡地表位移及深部位移监测等。该监测站的布局是在现场调查的基础上选定变形剧烈区, 兼顾滑坡体不同位置和深度的变形特征, 具有较强的针对性。在监测方法上, 系统采用一体化GNSS形变监测站监测地表位移, 具有精度高、实时性强的特点, 可准确捕捉滑坡体在降雨作用下的水平与垂直位移变化。深部位移监测站布设于滑坡的不同深度, 以捕捉滑动面的活动特征, 特别是针对潜在的滑坡复活或蠕动现象进行精准监测。土壤含水率监测站布设在不同深度的关键区域, 实时记录土体含水率变化, 揭示降雨入渗深度及土体饱和过程, 对分析滑坡失稳的水文动力学机制具有重要作用。

表 1 新源县喀拉海依苏滑坡监测站监测设备情况

序号	名称	监测要素	运行数量/套
1	一体化含水率监测站	含水率	10
2	一体化深部位移监测站	深部位移	3
3	一体化GNSS形变监测站	地表位移	15
4	一体化降雨量监测站	降雨量	1
5	一体化视频监测站	视频	2
6	气象站	气温、降雨量	1
7	一体化地表裂缝监测站	裂缝位移	6

研究区滑坡地表位移采用15套GNSS、3套深部位移监测站进行全方位监测。监测点布置依照“上-中-下-深部”全方位监测原则布设, 滑坡上部的监测点包括深部位移监测点1号, GNSS监测点1~3号; 滑坡中部的监测点包括深部位移监测点2~3号, GNSS监测点4~9号、11号、14号; 滑坡下部的监测点包括GNSS监测点10~12号(图6)。通过数据采集系统对接收的数据进行初步处理, 包括数据清洗、异常值剔除等, 以确保数据的准确性和完整性。随后, 数据经过进一步的分析和处理, 如数据平滑、趋势分析、统计分析等, 以提取有用的信息并生成监测报告。



序列、子指标):影响系统行为的因素组成的数据序列,类似自变量 $X$ ,此处记为 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ ;得到矩阵 $Z_{n \times m} = (Z_{ij})_{n \times m}$ .

3) 计算灰色关联度,得到 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m$ .

4) 计算各指标的权重.

5) 计算得分.第 $k$ 个评价对象得分为

$$\omega_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_m}, \omega_2 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_m}, \dots, \omega_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_m}. \quad (1)$$

6) 得分归一化,表示为

$$S'_1 = \frac{S_1}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}, S'_2 = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}, \dots, S'_n = \frac{S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}. \quad (2)$$

分析步骤如下:第一步,利用均值法对实地监测数据进行变量的无量纲化操作.第二步,将第一步所得数据分别进行各影响因素对GNSS高程监测点4号水平位移和垂直位移、深部位移监测点1号水平位移和垂直位移的相关性分析.根据灰色加权关联度的大小,建立各评价因子的关联序.关联度越大,评价因子对评价内容的重要程度越大.

### 3 监测数据分析

#### 3.1 降雨-土壤含水率监测数据分析

##### 3.1.1 降雨-土壤含水率总体趋势分析

监测期间的降雨量、土壤含水率随时间的变化如图7所示.0.4 m处土壤含水率的变化趋势受降雨变化的影响较大,含水率呈较大的波动上升趋势;0.8~1.2 m处土壤4月及9月含水率的增量较小,5月至8月的月降雨量增大,土壤水分的增量也快速增大;降雨对1.6~2.0 m处土壤含水率的影响相对较小,随着时间推移、降雨量的累积,呈微弱上升趋势.表明该滑坡降雨入渗深度基本稳定在1.2~2.0 m处.

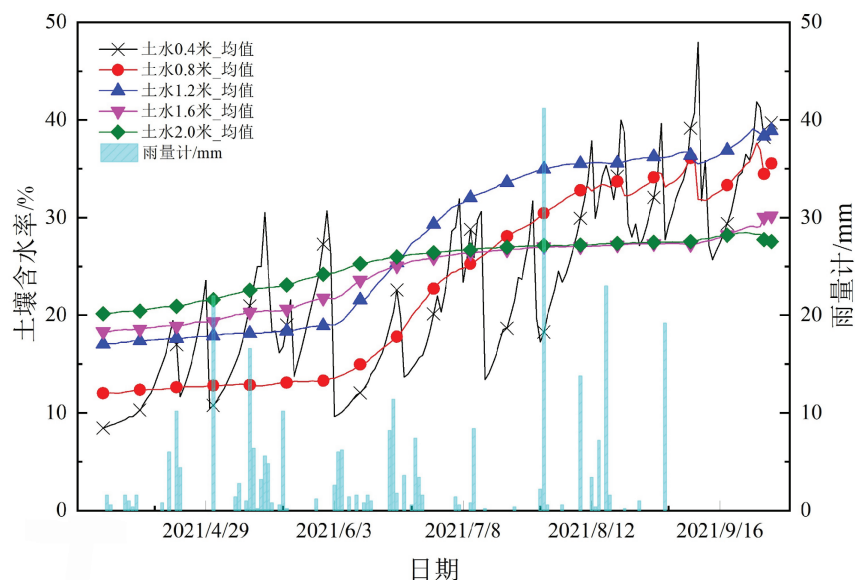


图7 研究区2021年土壤含水率与降雨量监测值汇总

##### 3.1.2 降雨间隔-土壤含水率分析

由图7可知,降雨时间间隔对土壤含水率的影响较为显著.短时间间隔的降雨事件(如2021年7月中旬)导致表层土壤含水率迅速上升,尤其是0.4 m深度的土壤,含水率波动明显.主要原因是浅层土壤入渗速度较快,短时间内的降雨量累积使土壤迅速达到饱和状态.然而,深层土壤(如1.6 m和2.0 m)含水率变化较小且存在滞后性,表明短时间间隔降雨对深层含水率的直接影响有限.相比之下,在2021年8月底至9月初的长时间间隔降雨期间,尽管降雨量较少,但由于土壤有较长的恢复和下渗时间,深层土壤含水率呈稳定增长趋势.长时间间隔降雨事件往往促进深层水分的累积,增加了深部土体的含水率,进而可能引发深层滑坡.

总体上,短时间间隔降雨对浅层土壤含水率和地表变形的影响更为显著,而长时间间隔降雨更易诱发深层土壤含水率的累积效应,对滑坡的整体稳定性产生持续影响。

### 3.1.3 土壤含水率日变异程度分析

变异系数(CV)是衡量数据集中各观测值变异程度的统计量,能消除不同单位或平均数对两个及以上数据集变异程度比较的影响. 变异系数判断依据: 0~15%为小变异, 16%~35%为中等变异, 大于36%为高度变异<sup>[32]</sup>. 其计算公式为:  $CV = (\text{标准偏差}/\text{平均值}) \times 100\%$ .

表2为研究区2021年4月至9月不同深度土壤含水率日变化的变异系数统计, 变异系数越大, 说明该埋深处每日土壤含水率的变化越大. 根据统计结果: 4月, 0.4 m处土壤水分日变异程度较大, 0.8~2.0 m处变异程度较小; 5、7、8、9月, 0.4 m处土壤水分日变异程度中等, 0.8~2.0 m处变异程度较小; 6月, 0.4、0.8 m处土壤水分日变异程度中等, 1.2~2.0 m处变异程度较小.

研究区潜在滑坡面坡度较大, 大气降水容易形成坡面流, 故浅表层土壤含水率变化较大. 同时, 潜在滑坡区域浅表层为黄土层, 降雨易导致形成土壤结皮, 大气降水入渗受阻, 降雨量变化主要影响浅表层土壤含水率, 故表层土壤(0.4 m)水分的日变异程度较大.

表 2 研究区2021年4月至9月不同深度土壤含水率日变化的变异系数统计

月份	埋深/m	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差	变异系数/%	变异程度
4月	0.4	23.60	8.45	13.04	4.05	31.04	中
	0.8	12.77	11.98	12.39	0.25	1.99	小
	1.2	17.85	17.05	17.49	0.25	1.42	小
	1.6	19.30	18.30	18.79	0.31	1.66	小
	2.0	21.52	20.15	20.76	0.43	2.05	小
5月	0.4	30.53	10.77	18.72	4.91	26.21	中
	0.8	13.30	12.77	12.99	0.18	1.39	小
	1.2	18.93	17.90	18.34	0.29	1.58	小
	1.6	21.75	19.33	20.50	0.64	3.11	小
	2.0	24.20	21.62	22.88	0.71	3.11	小
6月	0.4	30.72	9.62	15.73	4.82	30.66	中
	0.8	22.73	13.38	17.00	2.88	16.95	中
	1.2	29.33	18.98	23.70	3.36	14.20	小
	1.6	25.90	21.68	24.13	1.40	5.80	小
	2.0	26.40	24.28	25.55	0.67	2.63	小
7月	0.4	31.93	13.40	22.68	5.21	22.95	中
	0.8	30.65	22.73	26.78	2.30	8.60	小
	1.2	35.05	29.33	32.73	1.64	5.00	小
	1.6	27.02	25.90	26.54	0.31	1.19	小
	2.0	27.15	26.40	26.84	0.22	0.82	小
8月	0.4	40.00	21.30	30.57	4.88	15.96	中
	0.8	34.62	30.95	32.86	0.86	2.60	小
	1.2	36.23	35.13	35.70	0.30	0.84	小
	1.6	27.33	26.98	27.16	0.13	0.46	小
	2.0	27.52	27.12	27.31	0.12	0.45	小
9月	0.4	47.98	25.70	34.08	5.30	15.56	中
	0.8	37.65	31.77	34.21	1.60	4.68	小
	1.2	39.10	35.52	37.08	1.12	3.03	小
	1.6	30.18	27.25	28.20	0.91	3.23	小
	2.0	28.48	27.48	27.92	0.36	1.28	小

### 3.2 降雨-位移监测数据分析

#### 3.2.1 地表位移水平监测数据分析

图8、表3为研究区2021年GNSS监测点水平位移监测数据. 其中: 4号位移量变化最大, 为24.4 mm; 2号位移量变化最小, 为2.8 mm. 1、4、7、8、10、15号水平位移变化趋势基本一致, 1月至6月上述GNSS监测点变化趋势较弱, 6月至7月上述GNSS监测点位移量呈增大趋势, 且位移变化量均大于10 mm. 2、3、5、8、12号水平位移变化趋势基本一致, 全年变化趋势较弱且位移变化量均小于10 mm. 1、4、7、8、10、15号均位于滑坡体东北部, 即滑坡体中部至后缘区域, 表明降雨作用对滑坡体的变形影响较大, 且主要集中于滑坡体东北部.

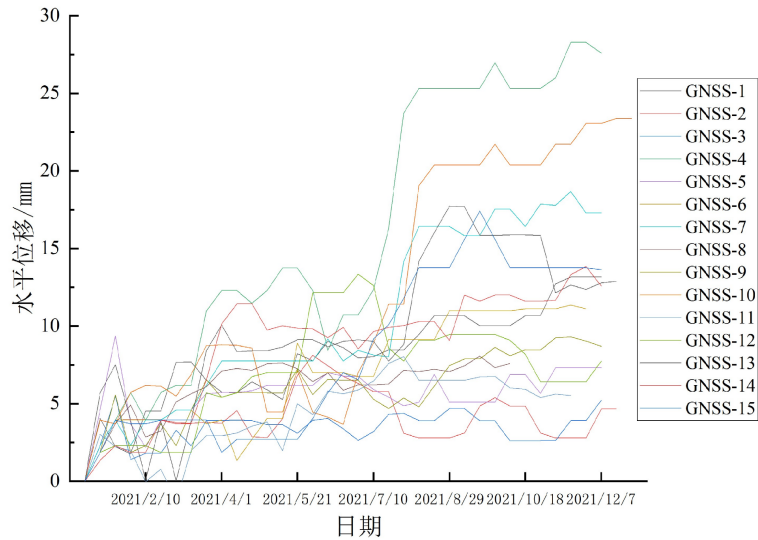


图 8 研究区GNSS监测点水平位移变化

表 3 2021年新源县GNSS监测点全年水平位移量

监测点序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
变化量/mm	13.2	2.8	4.7	24.4	7.3	11.1	16.4	7.7	8.7	23.4	5.3	7.7	13.1	11.5	13.6

#### 3.2.2 地表位移垂直监测数据分析

图9、表4为研究区2021年GNSS监测点垂直位移监测数据. 其中: 8、11、15号垂直位移变化较小, 11号变化量最小 (-0.8 mm); 4、9、10号垂直位移变化较大, 4号变化量最大 (-37.1 mm) .

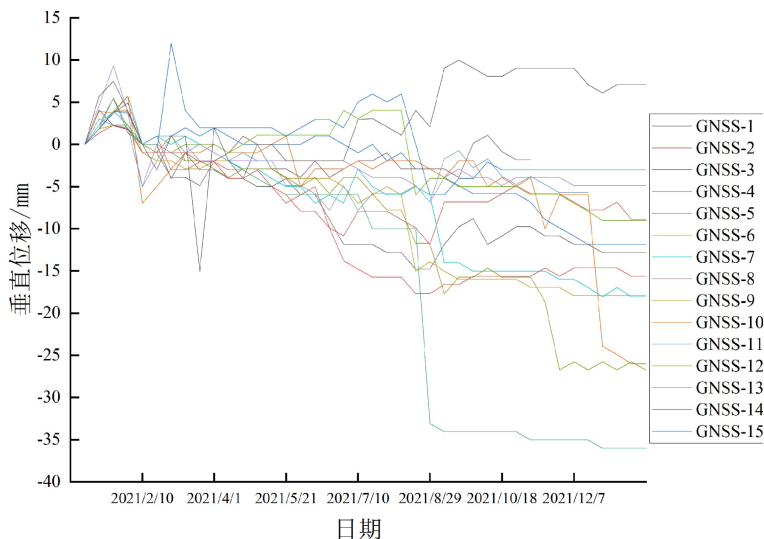


图 9 研究区GNSS监测点垂直位移变化

表 4 2021年新源县GNSS监测点全年垂直位移量

监测点序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
位移量/mm	-12.8	-16.6	-13.9	-37.1	-5.9	-18.9	-19.0	-1.8	-25.8	-32.0	-0.8	-9.0	6.1	-8.9	-3.1

### 3.2.3 深部位移监测数据分析

图10、图11为研究区在2021年7月至10月深部位移1号的水平和垂直位移变化与降雨量的相关性图。该设备1月至5月损坏,未记录数据,6月至9月监测数据正常。受7月末暴雨影响,深部土壤的水平和垂直位移增量急剧增大,水平位移平均增量约为8 mm,垂直位移平均增量约为0.2 mm,但深部44 m处的位移变化微弱,水平、垂直位移均小于等于1 mm,可见暴雨对其影响极小。8、9月分别发生了2次和1次大雨,对应的深部垂直位移呈阶段性小幅增长。总体而言,暴雨过程对深部水平及垂直位移的发生均有促进作用,对水平位移增量影响更大,呈埋深越浅、位移增量越大的趋势。

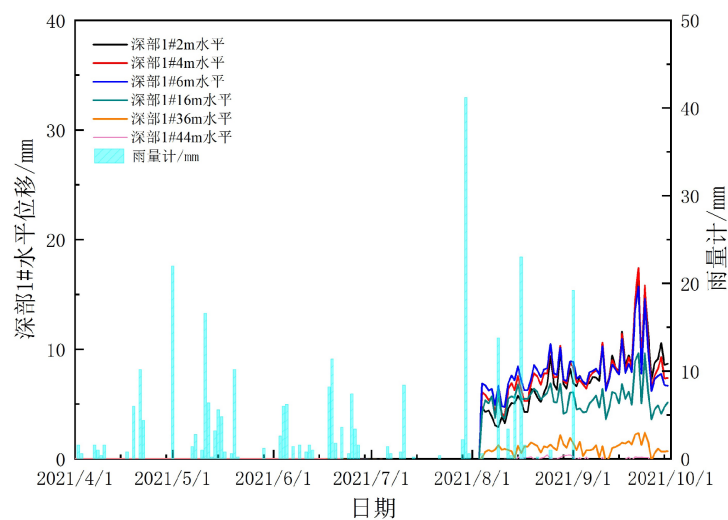


图 10 深部位移1号水平位移变化与降雨量相关性

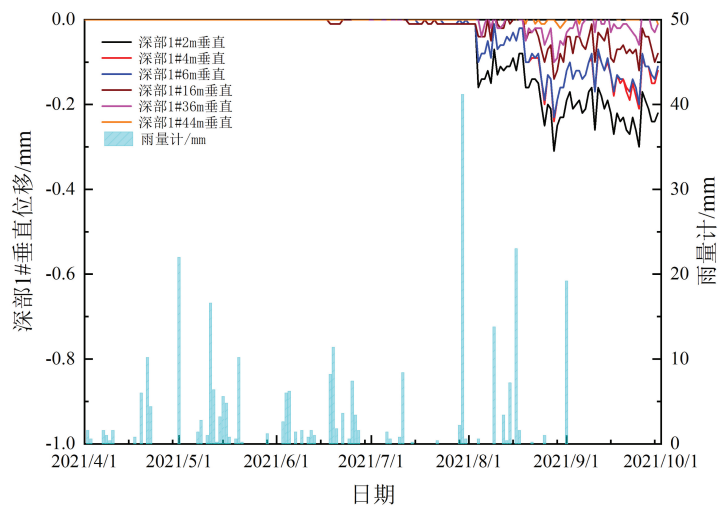


图 11 深部位移1号垂直位移变化与降雨量相关性

### 3.2.4 降雨间隔对滑坡形变的影响

由图10、图11可知,深部位移1号的水平位移和垂直位移均与降雨量存在一定的相关性。在降雨量较大的时间段,尤其是2021年7月至9月,水平位移和垂直位移均表现出显著变化,其中:水平位移在降雨事件发生后迅速增大,位移量呈阶梯式上升,表明降雨事件对滑坡的推进作用较为明显;垂直位移的变化则更加缓慢,主要表现为逐步下沉,且在降雨事件后的滞后效应较为显著。短时强降雨事件往往导致水平位移急剧增大,而连续降雨事件后,垂直位移的累积效应逐渐显现。

分析认为, 降雨时间间隔通过影响土体含水率的恢复程度与孔隙水压力的累积过程, 进而影响滑坡形变的时效性与幅度. 具体而言, 间隔时间越短, 前一轮降雨残留的孔压尚未充分消散, 新一轮降雨便再次入渗, 土体更易形成高饱和或超孔压状态, 诱发更强烈的位移响应. 短间隔降雨条件下, 含水率与孔压值在多次降雨后叠加升高, 滑坡形变量明显大于长间隔情形. 此外, 相关研究也指出, 连续降雨或短间隔复降雨事件更易引发黄土斜坡失稳<sup>[33]</sup>, 与本文结论吻合, 进一步印证了降雨间歇控制滑坡响应的物理基础.

### 3.2.5 滑坡平均位移增量分区分析

根据图6将滑坡划分为上中下三个分区, 分别计算各区域4月至9月位移增量的平均值, 获得4月至9月滑坡区域平均位移增量(表5). 滑坡中上部0~2 m浅表层土壤水平位移及垂直位移均较大, 而深部土壤主要发生水平位移, 垂直位移较小; 滑坡下部主要发生浅表层水平位移, 平均位移增量大于滑坡中上部.

表 5 4月至9月滑坡区域平均位移增量

分区	GNSS		2 m	4 m	深部水平				深部垂直					
	水平	垂直			6 m	16 m	36 m	44 m	2 m	4 m	6 m	16 m	36 m	44 m
上部/mm	4.93	7.05	8.68	7.38	6.67	5.14	0.70	0.07	0.22	0.12	0.11	0.08	0.01	0.01
中部/mm	5.45	8.94	3.43	3.47	3.38	2.23	0.91	0.64	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08	0.05
下部/mm	8.23	6.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 4 位移-降雨量-土壤含水率灰色关联法分析

根据前文所述, 降雨量、0~2 m土壤水分变化对表层位移和深部位移均有影响, 为深入分析关联程度, 选取日降雨量、0~2 m处5组土壤含水率均值, 共计6个评价项, 分别与GNSS 4号地表位移、深部位移1号的6处位移进行灰色关联度分析. 运用灰色关联度进行分析时, 分辨系数取值为0.5, 计算关联系数值, 同时以此为基础, 计算关联度值用于评价判断, 分析结果及排名见表6.

表 6 滑坡位移与日降雨量、土壤水分因素的关联度分析及排名

评价项	GNSS 4号		深部1号_2 m				深部1号_4 m				深部1号_6 m					
	水平		垂直		水平		垂直		水平		垂直		水平		垂直	
	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名
降雨量	0.584	6	0.557	1	0.816	1	0.429	6	0.815	1	0.406	6	0.803	1	0.406	6
0.4 m	0.749	1	0.468	5	0.721	2	0.495	3	0.727	2	0.505	4	0.740	2	0.503	3
土壤 0.8 m	0.720	3	0.467	6	0.715	3	0.460	5	0.716	3	0.487	5	0.729	3	0.484	5
水分 1.2 m	0.717	4	0.493	4	0.677	4	0.478	4	0.678	4	0.505	3	0.690	4	0.501	4
均值 1.6 m	0.706	5	0.531	3	0.638	5	0.512	2	0.640	5	0.534	2	0.654	5	0.531	2
2.0 m	0.734	2	0.553	2	0.569	6	0.533	1	0.569	6	0.560	1	0.581	6	0.556	1
评价项	深部1号_16 m		深部1号_36 m				深部1号_44 m									
	水平		垂直		水平		垂直		水平		垂直					
	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名				
降雨量	0.786	1	0.422	6	0.741	2	0.429	6	0.499	6	0.506	6				
0.4 m	0.750	2	0.541	4	0.769	1	0.578	5	0.662	1	0.681	3				
土壤 0.8 m	0.750	3	0.531	5	0.700	3	0.581	4	0.609	4	0.647	4				
水分 1.2 m	0.712	4	0.556	3	0.675	4	0.608	3	0.597	5	0.640	5				
均值 1.6 m	0.679	5	0.597	2	0.674	5	0.649	2	0.651	2	0.701	1				
2.0 m	0.603	6	0.626	1	0.609	6	0.683	1	0.639	3	0.687	2				

### 4.1 降雨量与位移的关联度分析

1) GNSS 4号垂直位移与降雨量的关联度最大, 而水平位移最小, 说明相比土壤水分变化所造成的影响, 降雨量变化对边坡表面垂直位移变化造成的影响更大. 分析认为, 降雨后一部分水分迅速渗入土壤, 导致土壤中

的垂直含水率迅速增加;另一部分沿坡面径流排泄至坡脚.因此,垂直土壤水分的增加引起土体吸水膨胀、饱和,导致垂直位移的变化较大.而受坡面径流影响,土壤的水平位移变化较小,与降雨量的关联度较低.

2) 深部(深部1号\_2 m、深部1号\_4 m、深部1号\_6 m、深部1号\_16 m、深部1号\_36 m)水平位移与降雨量的关联度较大,而其对应的垂直位移与降雨量的关联度均较小;深部(深部1号\_44 m)垂直位移、水平位移与降雨量的关联度均很小.主要原因是深部的水平位移受不同土层之间的相对滑动或层间变形的影响.降雨增加了土体中的孔隙水压,导致土体内部不同土层之间的力学特性发生变化,水平方向的位移变化较大;而深部的垂直位移受土体自身的抗压性质和周围土体的约束影响较大,降雨对深部垂直位移的直接影响可能相对较小.

3) 降雨量对0~44 m位移的影响,随埋深的增加而减小,表明随深度增加,土体内水分传导速度减慢,表层土壤更易受降雨的直接影响,而随深度增加入渗速率和入渗量减小<sup>[34]</sup>,使深部位移对降雨响应减弱.

#### 4.2 土壤含水率与位移的关联度分析

由表6可知,土壤含水率与位移的关联度呈随深度增加垂直位移与土壤含水率关联度增大、水平位移与土壤含水率关联度减小的趋势,但整体上降雨对滑坡位移的影响更大.受降雨影响,土壤含水率增加,土颗粒吸水膨胀,引起垂直位移的变化较大;同时,埋深较浅处土壤含水率受温度等外界作用影响较大,土颗粒失水收缩,宏观上表现出水平位移变化较大.综上,由于土壤含水率的变化受多种因素共同作用,除降雨外还受温度、地形等因素影响,故土壤含水率与滑坡位移的关联度小于降雨.

## 5 结论

本文以新源县喀拉海依苏滑坡为研究对象,在收集、查阅已有成果的基础上,通过对该滑坡实地调查、监测数据处理,运用灰色关联法对位移、降雨量、土壤含水率进行分析,得到降雨量、降雨频次对滑坡位移及土壤含水率的影响关系,进一步揭示黄土-基岩型滑坡对降雨的响应过程.

1) 滑坡区浅层土体含水率与地表位移对降雨变化高度敏感,尤其在短时强降雨条件下,浅层土体迅速饱和,导致滑坡变形显著增强.浅层位移以垂直变形为主,受降雨过程控制明显,变形呈突发性;而深层土体响应滞后,位移变化相对缓慢,主要表现为持续性缓变过程,说明浅-深层滑体的水动力响应机制存在明显差异.

2) 降雨时间间隔对滑坡变形具有显著调控作用.短间隔连续降雨事件促使浅层含水率迅速上升,孔隙水压力叠加,引发突发性浅层变形;长时间间隔降雨则通过持续渗透作用使深层含水率逐步累积,孔压升高,诱发缓慢而持续的深层位移.降雨间隔越短,滑坡的瞬时响应越强;间隔越长,累积效应越突出.

3) 灰色关联分析表明,降雨量、降雨频次与浅层位移之间的关联性显著高于深层位移,浅层响应更直接、强烈.该方法在多参量、多时段响应特征提取中具有良好的适应性与解释能力,为降雨型滑坡的早期识别与预警指标构建提供了量化基础.

综上,喀拉海依苏滑坡在地形地貌、土体结构、降雨特征等方面具有典型性,其降雨响应特征能够代表伊犁河谷黄土滑坡的主要发育机制.研究结果可为类似区域滑坡灾害的动态评估、风险识别与监测预警提供一定参考.

#### 参考文献:

- [1] 安海堂,刘平.新疆伊犁地区黄土滑坡成因及影响因素分析[J].地质灾害与环境保护,2010,21(3):22-25.  
AN H T, LIU P. Genesis and influencing factors of loess landslides in Yili region in Xinjiang[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(3): 22-25. (in Chinese)
- [2] 张鸿义,黄洪标,闫中学.新疆新源山区黄土滑坡形成条件与防治措施[J].新疆地质,2004,22(3):233-237.  
ZHANG H Y, HUANG H B, YAN Z X. Forming conditions and prevention treatment of loess landslide in the Xinyuan mountain area, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(3): 233-237. (in Chinese)
- [3] 孙广忠,姚宝魁.中国滑坡地质灾害及其研究[C]//中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会成立暨中国典型滑坡实例学术讨论会.中国,湖北,宜昌.北京:科学出版社,1986:11-21.  
SUN G Z, YAO B K. Landslide geological hazards and their study in China[C]//Establishment of the Ground Rock Engineering Professional Committee of the Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering and Academic Symposium on Typical Landslide Cases in China. Yichang, Hubei, China. Beijing: Science Press, 1986: 11-21. (in Chinese)
- [4] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.

- ZHOU J M, SHEN R F. Dictionary of soil science[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 刘贤赵, 康绍忠. 降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 57-62.  
LIU X Z, KANG S Z. Some developments and review of rainfall-infiltration-runoff yield research[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(2): 57-62. (in Chinese)
- [6] 张光远, 蔡崇法. 黄绵土结皮的微形态特征及某些理化性质的研究[C]//晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990: 68-75.  
ZHANG G Y, CAI C F. Micromorphological characteristics and some physico-chemical properties of the topsoil crust of a loess soil[C]//Proceedings of Experimental Studies on Soil Erosion Patterns in the Loess Plateau of Western Shanxi Province. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990: 68-75. (in Chinese)
- [7] 蔡强国, 陈浩. 降雨特性对溅蚀影响的初步试验研究[J]. 中国水土保持, 1986(6): 30-33+39.  
CAI Q G, CHEN H. Preliminary experimental study on the influence of rainfall characteristics on splash erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 1986(6): 30-33+39. (in Chinese)
- [8] 李阜棣, 李学垣, 刘武定, 等. 生命科学和土壤学中几个领域的研究进展[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.  
LI F D, LI X Y, LIU W D, et al. Research advances in several areas of life science and soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993. (in Chinese)
- [9] PHILIP J R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Science, 1957, 84(3): 257-264.
- [10] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.  
LEI Z D, YANG S X, XIE S C. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese)
- [11] 杨宗佶, 王礼勇, 石莉莉, 等. 降雨滑坡多指标监测预警方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 272-285.  
YANG Z J, WANG L Y, SHI L L, et al. Research of monitoring and early warning methods for rainfall-induced landslides based on multivariate thresholds[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 272-285. (in Chinese)
- [12] 亓星, 许强, 郑光, 等. 降雨诱发顺层岩质及土质滑坡动态预警力学模型[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 38-42.  
QI X, XU Q, ZHENG G, et al. Dynamic mechanics early warning model of rainfall induced bedding rock and soil landslide[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 38-42. (in Chinese)
- [13] 刘鹏, 吕庆, 吴俊宇, 等. 暴雨诱发浅层滑坡启滑机理模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 531-540.  
LIU P, LYU Q, WU J Y, et al. A flume model test to investigate initiation mechanisms of rainstorm-induced shallow landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 531-540. (in Chinese)
- [14] 聂兵其, 汤明高, 邵山, 等. 基于灰色关联法的涉水边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 123-126.  
NIE B Q, TANG M G, SHAO S, et al. Sensibility analysis of influencing factors of reservoir slope stability based on grey correlation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 123-126. (in Chinese)
- [15] 王飞, 王威. 基于改进组合赋权与区间灰色关联法的滑坡治理方案优选研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(6): 171-177.  
WANG F, WANG W. Improved combined weighting and interval grey relation method-based optimization of landslide treatment scheme[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(6): 171-177. (in Chinese)
- [16] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081-1090.  
HE M C. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1081-1090. (in Chinese)
- [17] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360-374.  
XU Q. Understanding the landslide monitoring and early warning: Consideration to practical issues[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360-374. (in Chinese)
- [18] 刘汉东, 王思敬. 滑坡预测预报非线性动力学方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3): 123-126.  
LIU H D, WANG S J. Study on nonlinear dynamics in landslide prediction[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2001, 22(3): 123-126. (in Chinese)
- [19] ANGELI M G, PASUTO A, SILVANO S. A critical review of landslide monitoring experiences[J]. Engineering Geology, 2000, 55(3): 133-147.
- [20] PETLEY D N, MANTOVANI F, BULMER M H, et al. The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns[J]. Geomorphology, 2005, 66(1/2/3/4): 133-147.
- [21] INTRIERI E, GIGLI G, MUGNAI F, et al. Design and implementation of a landslide early warning system[J]. Engineering

- Geology, 2012, 147: 124-136.
- [22] SAITO M. Research on forecasting the time of occurrence of slope failure[J]. Quarterly Report of RTRI, 1969, 10(3): 135-142.
- [23] 董秀军, 许强, 唐川, 等. 滑坡位移-时间曲线特征的物理模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 401-407.  
DONG X J, XU Q, TANG C, et al. Characteristics of landslide displacement-time curve by physical simulation experiment[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 401-407. (in Chinese)
- [24] OCHIAI H, OKADA Y, FURUYA G, et al. A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall[J]. Landslides, 2004, 1(3): 211-219.
- [25] ROSE N D, HUNGR O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(2): 308-320.
- [26] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104-1112.  
XU Q, TANG M G, XU K X, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1104-1112. (in Chinese)
- [27] 许强, 曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1099-1106.  
XU Q, ZENG Y P. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1099-1106. (in Chinese)
- [28] 曹小红. 冻融循环作用下伊犁河谷黄土强度劣化及促滑效应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2024.  
CAO X H. Study on strength deterioration and sliding-promoting effect of loess under freeze-thaw cycles in Yili Valley[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [29] 魏学利, 陈其鹏, 焦友金, 等. 季节冻土区黄土滑坡形成机理研究: 以新疆伊犁加朗普特滑坡群为例[J]. 冰川冻土, 2024, 46(6): 1871-1882.  
WEI X L, CHEN Q P, JIAO Y J, et al. Research on the formation mechanism of loess landslide in seasonally frozen ground region: A case study of Garangput landslide group[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(6): 1871-1882. (in Chinese)
- [30] Shanghai Zhongyan Network Technology Co Ltd. Scientific platform serving for statistics professional (SPSSPRO) (Version 1.0.11)[EB/OL]. (2021-09-22)[2024-01-05]. <https://www.spsspro.com/>.
- [31] AZZEH M, NEAGU D, COWLING P I. Fuzzy grey relational analysis for software effort estimation[J]. Empirical Software Engineering, 2010, 15(1): 60-90.
- [32] 付雅芳, 杨任农, 刘晓东, 等. 基于灰色关联分析的软件工作量估算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 2384-2389.  
FU Y F, YANG R N, LIU X D, et al. Software effort estimation method based on grey relational analysis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(11): 2384-2389. (in Chinese)
- [33] 开迪尔丁·吾拉木, 张紫昭, 张艳阳, 等. 基于COMSOL Multiphysics的降雨型滑坡临界降雨阈值计算模型研究: 以新疆新源县喀拉海依苏滑坡隐患体为例[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1364-1374.  
KAIDIERDING W, ZHANG Z Z, ZHANG Y Y, et al. COMSOL Multiphysics based calculation model of critical rainfall threshold for rainfall-induced landslide: A case study of Karahayisu landslide in Xinyuan County, Xinjiang[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1364-1374. (in Chinese)
- [34] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1210.  
GUAN X Y, WANG S L, GAO Z Y, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1202-1210. (in Chinese)

责任编辑: 张自强