

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.002 CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.002

张昊, 邹自强, 李文凯, 等. 崩岗坡面土壤水分时空分异及崩壁崩塌阈值[J]. 水土保持学报, 2026, 40(3): 108-118.

ZHANG Hao, ZOU Ziqiang, LI Wenkai, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture on Benggang slopes and thresholds for Benggang wall collapse[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 108-118.

崩岗坡面土壤水分时空分异及崩壁崩塌阈值

张昊¹, 邹自强², 李文凯¹, 祝文静¹, 陈家宙¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 信阳农林学院林学院, 河南 信阳 464000)

摘要: [目的] 为阐明崩岗坡面土壤水分的时空分异规律及其对崩壁稳定性的控制机制。[方法] 以湖北省通城县典型花岗岩崩岗为研究对象, 连续8 a在崩岗坡面上、中、下及崩壁4个坡位各4个深度监测土壤水分体积分数, 其间共发生4次大规模崩壁崩塌。[结果] 崩岗坡面土壤持水和导水能力随土层深度增加而减小, 导致垂直剖面上土壤含水量呈现浅层高于深层的“上高下低”格局。各坡位土壤水分体积分数差异显著, 年内均呈干湿季节变化。崩壁崩塌仅出现在丰水年和平水年雨季中后期, 但暴雨特征本身不足以预测崩塌, 剖面深层的砂土层土壤水分体积分数增加使得崩壁土体储水量处在高水平是崩塌发生的必要条件。前30 d累积降雨量足够多(≥ 170.0 mm), 土壤水分体积分数超过田间持水量 $0.018\sim 0.033$ cm³/cm³, 单次暴雨是触发崩塌的充分必要条件。[结论] 研究结果揭示崩壁崩塌是深层土体强度降低和浅层土体重力牵引共同驱动的倾坠, 为崩岗侵蚀预警和崩壁稳定性防护提供关键阈值与理论依据。

关键词: 崩岗; 崩壁崩塌; 土壤水分; 长期监测

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0108-11

Spatiotemporal Variation of Soil Moisture on Benggang Slopes and Thresholds for Benggang Wall Collapse

ZHANG Hao¹, ZOU Ziqiang², LI Wenkai¹, ZHU Wenjing¹, CHEN Jiazhou¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Forestry, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: [Objective] To elucidate the spatiotemporal variation patterns of soil moisture on Benggang slopes and its controlling mechanisms on the stability of Benggang walls. [Methods] A typical granite Benggang in Tongcheng County, Hubei Province, was selected as the study site. The volumetric soil moisture content was monitored at four slope positions (upslope, midslope, downslope, and Benggang wall) and at four different depths over eight consecutive years. During this period, four large-scale Benggang wall collapse events occurred. [Results] The soil water retention and hydraulic conductivity of the Benggang slope decreased with increasing soil depth, which resulted in a vertical profile of soil moisture content characterized by higher values in the shallow layers than in the deep layers. The volumetric soil moisture content at different slope positions showed significant differences and exhibited dry and wet seasonal variations throughout the year. However, rainfall event characteristics alone were insufficient to predict Benggang. The increase in volumetric soil moisture content in the deep sand layer resulted in a high level of water storage in the Benggang wall soil, which constituted a necessary condition for the occurrence of Benggang. The cumulative rainfall in the preceding 30 days was sufficiently high (≥ 170.0 mm), the volumetric soil moisture content exceeded the field capacity by $0.018\sim 0.033$ cm³/cm³, and a single heavy rainfall event was a sufficient and necessary condition to cause Benggang. [Conclusion] The research findings indicate that Benggang wall collapse is driven by the combined effect of reduced strength in deep soil

收稿日期: 2025-09-19 修回日期: 2025-10-15 录用日期: 2025-10-20 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177307)

第一作者: 张昊(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事水土保持与坡面土壤侵蚀研究。E-mail: zhangh97@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 陈家宙(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与土壤水分研究。E-mail: jzchen@mail.hzau.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

layers and gravitational pull on the shallower soil mass. This study provides critical thresholds and a theoretical basis for early warning of Benggang erosion and the stabilization of the Benggang wall.

Keywords: Benggang; Benggang wall collapse; soil moisture; long-term monitoring

Received: 2025-09-19

Revised: 2025-10-15

Accepted: 2025-10-20

Online(www.cnki.net): 2025-12-17

崩岗是我国南方热带和亚热带丘陵区危害最严重的土壤侵蚀地貌^[1],大多为花岗岩红壤坡面,一般由集水坡面、崩壁、崩积堆、冲刷沟道和洪积扇组成^[2]。崩岗侵蚀具有发育速度快,侵蚀量大,突发性和爆发性强等特点^[3]。调查^[4]显示,崩岗侵蚀年土壤流失量达到 $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,严重危害区域生态环境。崩壁是一种特殊的“沟头”,崩壁崩塌是崩岗侵蚀的主要方式^[5],准确预测仍非常困难。

降雨阈值是预测边坡侵蚀的最广泛的方法之一,当达到或超过降雨量时,可能会触发侵蚀^[6]。有学者^[7]进一步通过对土质边坡的含水量和水文地质进行监测,结合气象信息与孔隙水压力和含水量的变化来预测失稳现象。崩岗侵蚀是由降雨引发的水力重力复合作用过程,降雨发生后,崩岗土体含水量增加,土体的抗剪强度下降同时自重增加,可能引发崩壁崩塌。也就是说,降雨是崩塌的诱发因素,而土壤水分是影响崩壁稳定性的关键因子^[8]。有研究^[9]表明,土体含水量高时,崩塌未必一定发生,说明崩岗坡面土壤水分与崩塌的关系较为复杂,而且由于缺少实测数据资料,尚不能利用土壤含水量预测崩岗侵蚀。

受母质性质和风化程度的影响,崩岗坡面不同土层的持水性和导水性差异显著^[10]。随着土层深度的增加,砂粒含量增多,土壤持水能力减弱^[11]。浅层黏粒含量较高的土壤在降雨过程中更容易饱和,形成“头重脚轻”状态^[12],促进土体发生重力倾倒。深层土壤含水量升高降低土壤基质吸力和抗剪强度^[5],进一步削弱崩壁深层部位的稳定性。大多数边坡失稳通常从局部失稳开始^[13],在坡内孔隙水的输送和储存及孔隙水压力的长期积累作用下,局部失稳点逐步扩展造成整体边坡的失稳^[14]。所以在野外崩岗坡面,土壤水分与崩塌的关系并不明显,也不牢靠,需要长期的水分数据才能准确描述复杂的崩塌现象,才可能揭示崩岗水力重力复合侵蚀的过程。

当前一些研究虽测定崩岗坡面土壤水分分布,但多为某一时刻的含水量,缺少崩岗坡面长期水分动态与崩壁崩塌发生规律的深入研究。本研究基于典型崩岗坡面长期水分监测试验,研究连续8 a(2016—2023年)监测崩岗坡面水分时空动态和崩塌事件的发生,目的为:1)分析崩岗坡面土壤水分动态变化规律,建立坡面土壤水分动态与崩塌事件的联系;2)分析崩

塌过程中崩壁失稳机理,揭示崩壁崩塌发生的条件,为崩壁崩塌预警提供数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省通城县($29^{\circ}02' \sim 29^{\circ}24' \text{N}$, $113^{\circ}36' \sim 114^{\circ}04' \text{E}$)。该区域属于亚热带季风气候,年平均气温 16.1°C ,年平均降水量 $1\ 600.0 \text{ mm}$ 。地形主要为山地丘陵,地带性土壤为红壤,土壤母质主要为花岗岩残积物。该区域是中国最北端的崩岗集中分布区,共有崩岗 $1\ 102$ 处,崩岗侵蚀总面积达 166.4 km^2 。

研究选取的崩岗位于通城县杨垄村附近的山坡($29^{\circ}20'05'' \text{N}$, $113^{\circ}46'18'' \text{E}$),是一个典型的瓢形崩岗。该崩岗的分水岭最高点(海拔 143 m)到崩岗口(海拔 109 m)的水平直线距离为 51 m ;崩壁上方集水坡面坡长 35 m ,平均坡度为 35° 。坡面植被稀少,主要为芒萁(*Dicranopteris linearis*)。该崩岗处在活跃期,崩壁是一个陡峭斜坡的自由面,高度为 4 m ,坡度为 80° ,且崩壁附近的大孔隙比较发育,特别是砂土层,具有很高的侵蚀潜力。研究区典型崩岗坡面及水分监测设备安装位置示意图1。

1.2 降雨量测定与水文年划分

降雨量数据来自坡面安装的自动记录雨量计,每 10 min 记录1次降雨数据,同时获取距离研究地点 6 km 的通城县气象局的气象监测数据作参考。研究区雨季为3—9月,旱季为10月到翌年2月,以日降雨量为准,将日降水量 $>0 \text{ mm}$ 的天数累加得到降雨天数(表1)。

采用水文年型划分标准划分水文年型^[15]。丰水年和枯水年的计算公式为:

$$P_i > P_m + 0.33\delta \quad (1)$$

$$P_i < P_m - 0.33\delta \quad (2)$$

式中: P_i 为当年降雨量,mm; P_m 为多年平均降雨量,mm; δ 为多年降雨量的均方差,mm;0.33为经验系数。研究区年平均降雨量为 $1\ 600.0 \text{ mm}$,多年降雨量的均方差为 366.6 mm ,故将年降雨量 $>1\ 721.4 \text{ mm}$ 为丰水年(2016年、2017年),年降雨量 $<1\ 479.4 \text{ mm}$ 为枯水年(2018年、2019年、2022年、2023年),其余为平水年(2020年、2021年)。

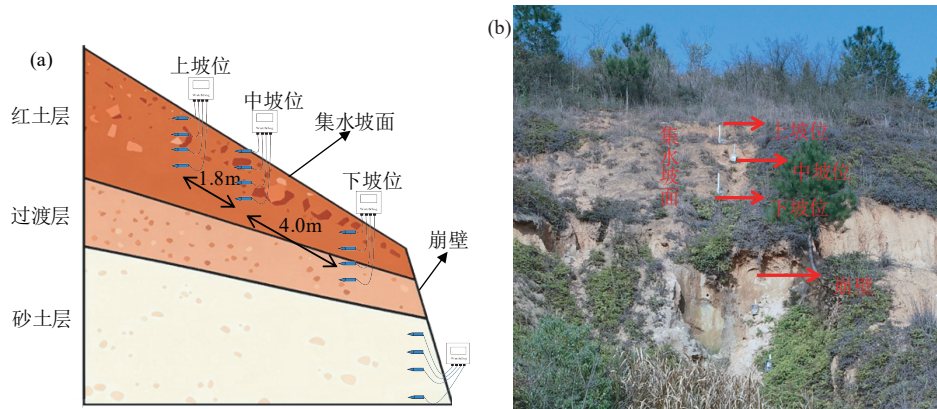


图 1 典型崩岗集水坡面和土壤水分监测位置

Fig.1 Schematic diagram of typical Benggang catchment slope and soil moisture monitoring locations

表 1 2016—2023 年不同水文年型的降雨特征

Table 1 Rainfall characteristics of different hydrological year types from 2016 to 2023

年份	水文年型	年降雨量/mm	旱季降雨量/mm	旱季降雨天数/d	雨季降雨量/mm	雨季降雨天数/d
2016	丰水年	2 004.3	299.4	57	1 704.9	98
2017	丰水年	1 728.9	218.6	42	1 510.3	93
2018	枯水年	1 250.1	351.8	54	898.3	78
2019	枯水年	1 108.3	261.9	43	846.4	82
2020	平水年	1 621.0	421.9	63	1 199.1	91
2021	平水年	1 612.4	241.1	48	1 371.3	101
2022	枯水年	1 181.3	272.3	60	909.0	79
2023	枯水年	1 005.2	175.3	56	829.9	97

注:雨季为 3—9 月,旱季为 10 月到翌年 2 月。

1.3 土壤性质测定

选择研究崩壁附近较为完整的坡面划分土壤层次,从上至下依次为红土层(0~125 cm)、过渡层(125~230 cm)、砂土层(230~400 cm)和碎屑层(>400 cm)。随着海拔高度的增加,坡面不同位置的土层厚度逐渐增加,这种变化影响土壤水分在垂直方向上的分布特征。在距离崩壁的 11.1、9.3、5.3 m 的上坡位、中坡位、下坡位土壤进行分层环刀取样,取样时间与水分传感器安装时间相同,取样深度分别为 20、40、60、80 cm,崩壁位置采集 180、230、280、380 cm 深度的土壤,用于土壤性质测定,每个样品采集 3 个重复。土壤体积质量测定采用环刀法,用砂箱法测定田间持水量,土壤颗粒组成采用吸管法测定,通过美国质地分类三角图得到土壤质地,土壤饱和导水率利用定水头法测定。

1.4 坡面土壤水分监测与崩塌事件记录

考虑到上、中、下坡位的土壤性质、水分过程等因素影响崩壁稳定性,为获得详细的崩壁土壤水分动态,在崩岗坡面上坡位、中坡位和下坡位分别设置监测位点(图 1),每个监测位点通过局部微创开挖的方法(尽可能减少对土体的扰动)插入土壤水分传感器。在野外布设前,水分传感器在室内已知含水

量的土柱上完成校准,然后回填土壤恢复原状。在同一位点的 4 个深度分别布设土壤水分传感器,水分传感器长 7 cm,宽 3 cm,每个传感器监测范围是直径 6 cm、高 7 cm 的圆柱范围内的土壤体积含水量,测量范围是 0 至饱和状态,测量精度 ± 0.03 ,分辨率 0.001。4 个探头监测的深度分别为 17~23、37~43、57~63、77~83 cm,分别以 20、40、60、80 cm 表示。同一位点的 4 个传感器连接 1 个数据采集器记录数据。

类似地,在崩壁 4 个深度(180、230、280、380 cm)也埋设有土壤水分传感器,传感器距离崩壁表面约 70 cm。崩塌时,水分传感器与采集器的线缆被断开,采集器停止记录该传感器对应土层深度的水分数据,此时停止记录的时间为崩塌的时间。暴雨结束后立即到现场人工核对崩塌时间,测量崩塌规模,判断崩塌部位,并重新连接传感器线缆。监测期间,崩岗发生 4 次崩塌事件,其中 2 次崩塌事件(2016 年 6 月 2 日和 2017 年 6 月 23 日)的沟头后退距离为 0.5~0.6 m,破坏深度在砂土层,崩积堆的高度超过 3 m;2 次崩塌事件(2020 年 7 月 7 日和 2021 年 7 月 3 日)的沟头后退<0.5 m,破坏深度在过渡层和砂土层之间。在其他时间段,崩壁上只有零星土块脱落,本研究不作分析。

水分探头埋设于 2015 年 8 月,经校准后,自 2016

年1月1日起正式记录监测数据,监测时间截止为2023年12月31日。在雨季每5 min和旱季每15 min记录1次土壤水分体积分数数据。间隔15 d拷贝水分数据和检查设备运行情况。由于仪器故障等不可控因素(如疫情),部分数据缺失。对于少数2~3 d的数据通过线性插值法补救;缺失较长的时间不进行补救。

1.5 土壤储水量计算

土壤储水量为各土层储水量之和,依据传感器监测的20、40、60、80、180 cm处土壤水分体积分数分别计算0~20、20~40、40~60、60~80、80~180 cm土层的日平均土壤水分体积分数,根据土层厚度计算各层的土壤储水量,加和得到0~180 cm土壤储水量,计算公式为:

$$SWS = \sum_{i=1}^n \theta_i \times D_i \quad (3)$$

式中:SWS为0~180 cm土壤的储水量,mm;n为所测土壤层次的层数; θ_i 为第*i*个土层的日平均土壤水分体积分数, cm^3/cm^3 ; D_i 为第*i*个土层的土层深度,mm。

0~180 cm土壤储水量变化量 ΔSWS 计算公式为:

$$\Delta SWS = SWS_{t_2} - SWS_{t_1} \quad (4)$$

式中: SWS_{t_2} 和 SWS_{t_1} 分别为 t_2 和 t_1 时刻的土壤储水量, t_2 晚于 t_1 1 d。

1.6 数据处理与统计方法

本研究数据采用Excel 2023软件处理,相关图表

采用Origin 2021软件绘制。取日平均土壤水分体积分数绘制坡面水分动态图,并对不同水分年型,不同深度的平均土壤水分体积分数进行显著性差异分析($p < 0.05$);崩塌事件中下坡位和崩壁水分动态图为5 min监测频率的土壤水分体积分数,土壤储水量的计算中土壤水分体积分数为日平均土壤水分体积分数。

2 结果与分析

2.1 土壤水力学性质

比较崩岗坡面不同坡位的土壤性质(表2)可知,不同深度土壤的水力性质差异较大。沿坡面向下,土壤体积质量逐渐增加,其中崩壁土壤的平均体积质量最大,为 $1.57 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。从上坡位到崩壁,随着土层深度增加,土壤砂粒质量分数逐渐增加,土壤质地由砂黏壤土向砂土过渡。垂直方向上,各土层的田间持水量随土层深度的递减,其中,近崩壁浅层0~80 cm土层的田间持水量($0.348 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)显著高于崩壁深层180~380 cm土层($0.293 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。上、中、下3个坡位0~80 cm土壤的饱和导水率均较低,在60~80 cm土层存在弱透土层(饱和导水率 $< 0.14 \text{ cm}/\text{d}$)。从上坡位到下坡位,平均饱和导水率分别为10.20、2.01、1.43 cm/d 。总体来看,崩岗坡面浅层土壤的持水能力高于深层土壤,且浅层土壤的导水能力较弱。

表 2 不同坡位不同深度土壤基本性质

Table 2 Basic properties of soil at different depths across four slope positions

坡位	土层深度/cm	土层	土壤体积质量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	土壤颗粒组成/%			质地 (USDA)
						砂粒	粉粒	黏粒	
上坡	20	红土层	1.39	0.324	40.18	56.34	11.91	31.75	砂黏壤土
	40	红土层	1.45	0.398	0.17	53.48	16.15	40.37	砂黏壤土
	60	红土层	1.41	0.391	0.29	45.02	26.49	28.49	砂黏壤土
	80	红土层	1.42	0.386	< 0.14	44.26	27.87	27.87	砂黏壤土
中坡	20	红土层	1.44	0.325	6.74	43.66	32.19	24.15	砂黏壤土
	40	红土层	1.46	0.336	1.01	43.33	32.38	24.29	砂黏壤土
	60	红土层	1.52	0.335	< 0.14	44.20	35.87	19.93	壤土
	80	红土层	1.43	0.332	< 0.14	44.65	35.58	19.77	壤土
下坡	20	红土层	1.52	0.347	5.18	44.10	31.95	23.95	壤土
	40	红土层	1.54	0.351	0.26	47.99	32.00	20.01	壤土
	60	过渡层	1.55	0.331	< 0.14	47.58	36.29	16.13	壤土
	80	过渡层	1.58	0.359	< 0.14	56.38	31.72	11.90	砂壤土
崩壁	180	砂土层	1.60	0.289	0.29	75.16	8.28	16.56	砂壤土
	230	砂土层	1.51	0.302	1.26	75.17	8.28	16.55	砂壤土
	280	砂土层	1.60	0.359	< 0.14	91.79	4.10	4.10	砂土
	380	砂土层	1.55	0.273	8.37	87.85	8.10	4.05	砂土

注: $< 0.14 \text{ cm}/\text{d}$ 表示饱和导水率低于室内测量值的下限,该土层为弱透土层。

2.2 坡面土壤水分时空分异

监测期间,不同水文年的坡面土壤水分体积分数差异显著($p < 0.05$)。在年尺度内呈干湿周期变化,与季节性降雨的趋势一致(图2)。图2中空白部分表示土壤水分体积分数数据缺失。旱季(10月至翌年2月)降雨较少导致土壤水分处于较低状态;随着雨季降雨的增加,土壤水分体积分数逐渐升高,且在雨季中后期达到较高水分状态。与平水年和枯水

年相比,丰水年(2016年和2017年)雨季的降雨量更高,多出139.0~875.0 mm,丰水年各坡位的浅层0~80 cm土层的土壤水分体积分数也明显更高,特别是在中坡位(平均土壤水分体积分数为 $0.329 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。由于各土层持水能力的差异,垂直剖面上,土壤水分体积分数呈“上高下低”格局,浅层0~80 cm土壤的平均水分体积分数($0.277 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)高于深层180~380 cm土壤($0.265 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。

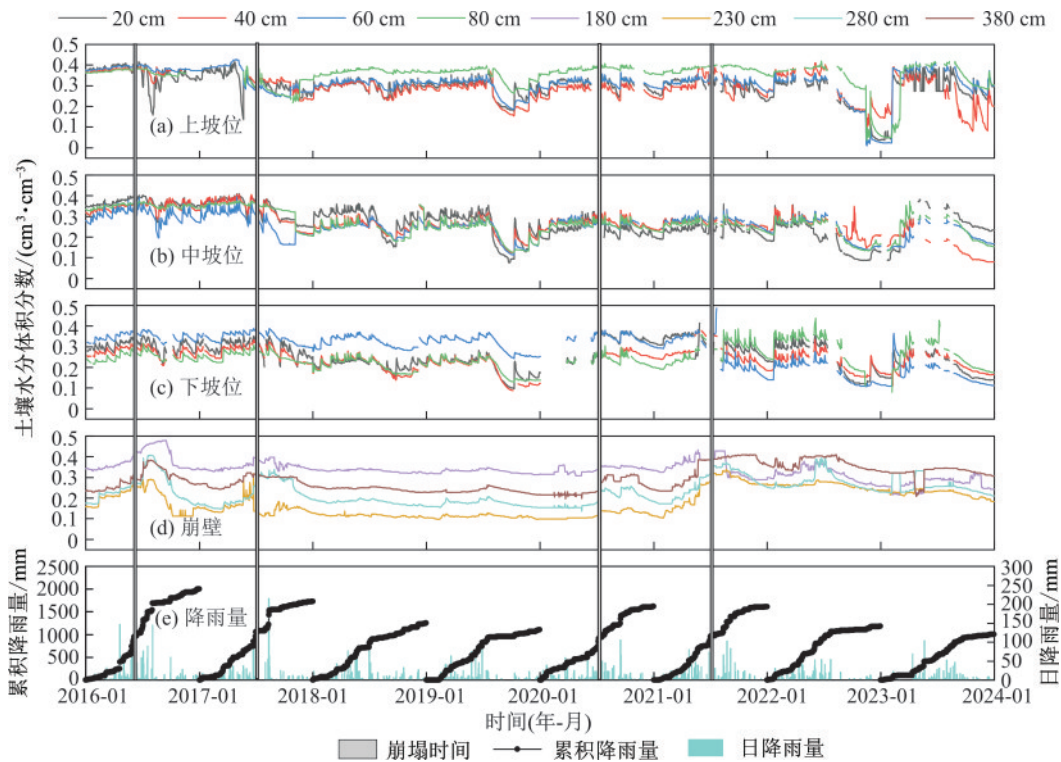


图2 监测期2016—2023年崩岗坡面不同位置不同深度的土壤水分及体积分数时空动态

Fig.2 Spatiotemporal dynamics of soil moisture at different positions and depths on Benggang slope during monitoring period from 2016 to 2023

由表1可知,枯水年的年累积降雨量低于丰水年和平水年,尤其是在雨季,较少的降雨量无法渗透到180 cm以下的深层土壤,所以枯水年深层土壤的水分体积分数整体处于相对较低的状态(平均值为 $0.250 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。丰水年和平水年雨季的累积降雨量较高,深层土壤的水分体积分数能够得到补充,这种情况只在雨季中后期发生,所以4次崩塌事件全部发生在6月和7月,其余月份不具备发生崩塌的土壤水分条件。

4次崩塌事件发生具体时间分别为2016年6月2日(A)、2017年6月23日(B)、2020年7月7日(C)和2021年7月3日(D)。在崩塌事件A中,近崩壁20、40、60、80 cm土层的土壤水分体积分数分别为0.315、0.279、0.370、0.328 cm^3/cm^3 ,崩壁180、230、280、380 cm深度的土壤水分体积分数分别为0.401、0.343、0.285、0.300 cm^3/cm^3 。在崩塌事件B中,近崩壁20、

40、60、80 cm深度的土壤水分体积分数分别为0.274、0.274、0.375、0.376 cm^3/cm^3 ,崩壁180、230、280、380 cm深度的土壤水分体积分数分别为0.361、0.354、0.242、0.301 cm^3/cm^3 。在崩塌事件C中,近崩壁20、40、60、80 cm深度的土壤水分体积分数分别为0.310、0.281、0.381、0.352 cm^3/cm^3 ,崩壁180、230、280、380 cm深度的土壤水分体积分数分别为0.347、0.126、0.192、0.237 cm^3/cm^3 。在崩塌事件D中,近崩壁20、40、60、80 cm深度的土壤水分体积分数分别为0.361、0.381、0.388、0.322 cm^3/cm^3 ,崩壁180、230、280、380 cm深度的土壤水分体积分数分别为0.322、0.297、0.350、0.398 cm^3/cm^3 。除事件C的230、280 cm土层外,其他土层的土壤水分体积分数均处于较高水分状态,接近或超过田间持水量。总体来看,崩岗坡面浅层土壤的水分体积分数高于深层土壤,而雨季深层土壤水分体积分数升高可能是崩壁崩塌的主要原因。

2.3 土壤水分动态与崩壁崩塌的关系

为进一步确定崩塌事件中崩壁土体的水分状态,对崩塌前 30 d 近崩壁和崩壁土体的水分体积分数变化情况进行分析。由图 3 可知,崩塌前 30 d,近崩壁各土层的

土壤水分体积分数差异显著,其中 60 cm 深度的土壤水分体积分数最高,为 0.349~0.381 cm³/cm³,比其田间持水量提高 0.018~0.050 cm³/cm³。崩塌当天,各土层的土壤水分体积分数显著增加,增幅为 0.006~0.134 cm³/cm³。

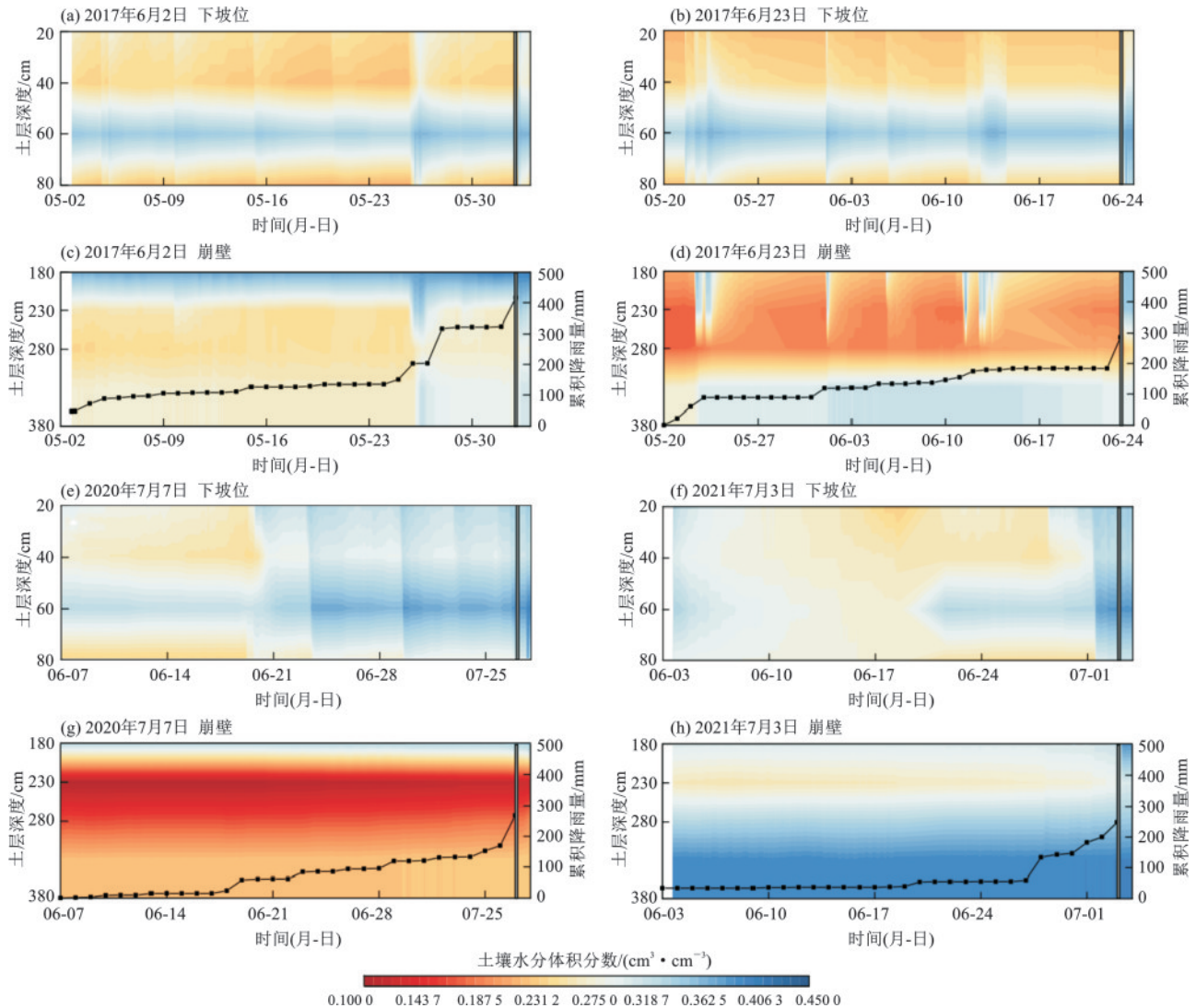


图 3 4次崩塌事件中下坡位和崩壁前 30 d 的土壤水分体积分数

Fig.3 Volumetric soil moisture content at downslopes and Benggang wall 30 days before four collapse events

崩塌前 30 d,崩壁深层土壤水分处于较高状态,尤其是深层 180 cm 土层(土壤水分体积分数为 0.322~0.401 cm³/cm³),其土壤水分体积分数超过田间持水量的 0.033~0.112 cm³/cm³。崩塌发生前,崩壁深层土壤水分体积分数有明显增加,例如,180、230 cm 深度土壤水分体积分数的平均增幅分别为 0.056、0.068 cm³/cm³。可见,砂土层达到高土壤水分体积分数状态是崩壁崩塌的前提。所以可得到崩塌的土壤水分体积分数阈值条件为超过田间持水量(本文 4 次崩塌中,土壤水分体积分数均超过田间持水量 0.018~0.033 cm³/cm³),具体为近崩壁 60 cm 土层土壤水分体积分数为 0.349 cm³/cm³,崩壁 180 cm 土层土壤水分体积分数为 0.322 cm³/cm³,这些土壤

水分体积分数是暴雨触发崩塌发生前的土壤水分体积分数,称为初始土壤水分体积分数阈值。注意到并不需要整个砂土层初始土壤水分体积分数都达到初始土壤水分体积分数阈值,只需任意深度的砂土层初始土壤水分体积分数达到阈值即满足崩塌的前提,例如,图 3 崩塌事件 C 中,180 cm 深度的砂土层土壤水分体积分数达到阈值,而更深层次的砂土层土壤仍然是干燥的,但依然发生崩塌。

除初始土壤水分体积分数外,前 30 d 累积降水量和崩塌当日的降雨量足够高也是触发崩塌的必要条件。4 次崩塌的当日降雨量分别为 92.6、102.2、99.0、47.9 mm,均接近和超过暴雨标准,因此暴雨条件(>47.9 mm/d)是触发崩塌事件的当日降雨量必

须达到的阈值。4次崩塌事件前30 d的累积降雨量分别为323.7、183.8、169.9、200.4 mm。因此,可以确定崩塌事件发生前30 d的累积降雨量阈值为170.0 mm为累积降水阈值。总体来看,崩塌事件的发生是前期累积降雨量、土壤初始水分体积分数和当日降雨量共同作用的结果,只有当这3个条件同时达到阈值时,崩塌才会发生。

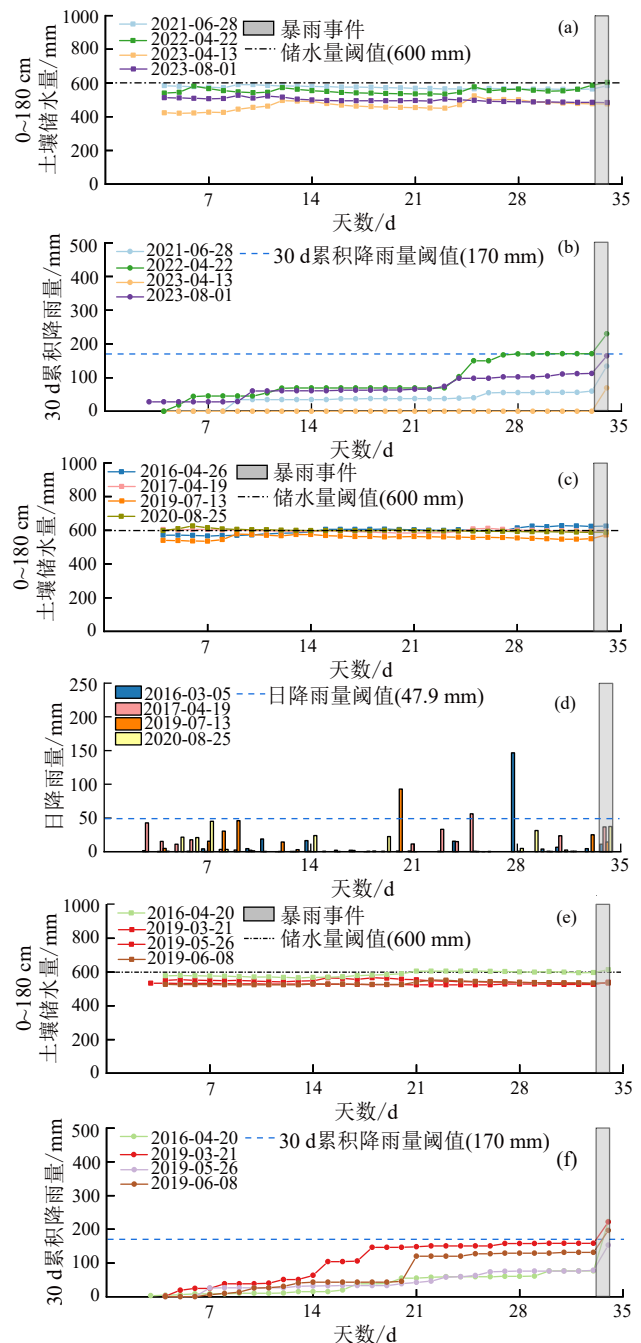
剖面土壤储水量对崩塌也有影响。在4个崩塌事件中,崩塌时0~180 cm深度(达到砂土层)土壤的储水量均较高,分别为659.4、620.8、611.8、612.4 mm,因此,可得到崩塌的阈值条件是0~180 cm深度土壤储水量达到600.0 mm。在崩塌前5 h内,崩壁180 cm土层土壤储水量急剧增加,平均增量为51.6 mm。说明深层土壤储水量是崩塌发生的必要条件,而深层土壤水分体积分数处于较高水分状态,需要长时间的降水入渗,这只在雨季(4—7月)的中后期才成为可能。上述4个阈值条件是相互联系的和冗余的,其中剖面土壤储水量与前30 d累积降雨量本质上是同一个条件,因此剖面土壤储水量不纳入崩塌阈值条件,而前期累积降雨量、砂土层含水量、当日暴雨是触发崩塌是3个充分必要条件。应当注意到,如果一个阈值条件高则另一个阈值可以稍低,本文给出的是需要同时满足最低阈值条件。

2.4 土壤储水量状态与崩壁崩塌阈值

根据初始土壤水分体积分数、当日降雨量和累积降雨量3个阈值条件,对监测期间有暴雨而无崩塌事件进行剖析,分析这些暴雨事件中崩壁未崩塌的原因(图4)。图4a为土壤初始水分体积分数低而不满足崩塌条件。在4次暴雨事件中,60 cm土层土壤初始水分体积分数为0.182~0.289 cm^3/cm^3 ,180 cm土层土壤初始水分体积分数为0.273~0.289 cm^3/cm^3 ,较低的初始水分体积分数使土壤储水量不足以触发崩塌。在事件2021-06-28中,180 cm土层水分体积分数均超过田间持水量,但增幅较小(0.017 cm^3/cm^3),也不会引发崩壁崩塌。图4b为暴雨强度不足而不能触发崩塌,4个事件中60 cm土层土壤初始水分体积分数为0.338~0.371 cm^3/cm^3 ,180 cm土层初始水分体积分数为0.339~0.369 cm^3/cm^3 ,均高于初始水分体积分数阈值条件。然而日降雨量(11.1~37.2 mm)均低于暴雨阈值条件(47.9 mm/d),较低的降雨量使进入土体的水分较少,不能显著增加深层土壤储水量,从而未能触发崩壁崩塌。

图4c为前期累积降水不足而不满足崩塌条件,4次暴雨事件中60 cm土层初始水分体积分数为0.330~0.357 cm^3/cm^3 ,180 cm土层初始含水量为

0.331~0.362 cm^3/cm^3 ,日降雨量为53.9~146.7 mm,均超过阈值条件。4个暴雨事件的前30 d累积降雨量分别为76.3、158.4、78.2、131.7 mm,均低于崩塌事件的前期累积降雨量阈值(170.0 mm),且暴雨条件下的0~180 cm土壤储水量的增量较小,为1.8~15.7 mm。深层180 cm土层储水量增量更小,仅为0.5~4.7 mm。前期降雨量不足限制土体储水量的积累,即使在强降雨条件下,深层土壤储水量难以显著增加,未发生崩壁崩塌。



注:灰色柱体表示暴雨事件;图a、图b为初始含水量不足,图c、图d为当日降雨量不足,图e、图f为累积降雨量不足。

图4 未崩塌事件中崩壁0~180 cm深度土壤储水量

Fig.4 Soil water storage at a depth of 0~180 cm of Benggang wall during non-collapse events

由表 3 可知,综合比较崩塌事件和未崩塌事件的发生条件可以发现,崩壁崩塌的发生需要同时考虑前期累积降雨量、初始土壤水分体积分数及当日降雨量的条件。具体来说,当累积降雨量不足时,初始土壤水分体积分数和土体储水量处于较低的水平,崩壁土体处于较稳定状态。当累积降雨量足

够时,深层土壤储水量在长期入渗情况下得到补充,且初始土壤水分体积分数较高。当日降雨强度不足时,进入土体的水分较少,深层土壤水分的增量较小。在暴雨条件下,水分入渗使得深层土壤水分体积分数显著增加,崩壁稳定性降低,崩塌事件才可能发生。

表 3 崩塌和未崩塌事件的土壤初始水分体积分数、降雨量和土壤储水量
Table 3 Initial soil moisture content, rainfall, and soil water storage for collapse and non-collapse events

类型	时间(年-月-日)	崩塌事件(未崩塌事件)前			崩塌事件(暴雨事件)当日		未崩塌原因
		初始土壤水分体积分数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		30 d 累积降雨量/ mm	日降雨 量/mm	0~180 cm 储水 量/mm	
		近崩壁 60 cm	崩壁 180 cm				
崩塌	2016-06-02	0.371	0.401	323.7	92.6	659.4	崩塌 A
	2017-06-23	0.349	0.336	183.8	102.2	620.8	崩塌 B
	2020-07-07	0.381	0.337	169.9	99.0	611.8	崩塌 C
	2021-07-03	0.376	0.322	200.4	47.9	612.4	崩塌 D
	阈值	0.349	0.322	170.0	47.9	600.0	—
未崩塌	2021-06-28	0.289*	0.306	59.9	74.1	583.9	土壤水分体积分数未达阈值
	2022-04-22	0.213*	0.367	170.6	59.5	603.8	土壤水分体积分数未达阈值
	2023-04-13	0.197*	0.273*	0	69.0	465.3	土壤水分体积分数未达阈值
	2023-08-01	0.182*	0.295	112.2	52.0	484.1	土壤水分体积分数未达阈值
	2016-04-26	0.371	0.369	230.2	11.1*	624.2	当日降水量未达阈值
	2017-04-19	0.365	0.345	241.1	36.6*	594.0	当日降水量未达阈值
	2019-07-13	0.344	0.339	235.4	14.4*	572.8	当日降水量未达阈值
	2020-08-25	0.338	0.352	177.9	37.2*	578.3	当日降水量未达阈值
	2016-04-20	0.349	0.362	76.3*	146.7	613.6	累积降水量未达阈值
	2019-03-21	0.333	0.331	158.4*	63.5	535.6	累积降水量未达阈值
	2019-05-26	0.322	0.331	78.2*	74.6	540.3	累积降水量未达阈值
	2019-06-08	0.334	0.331	131.7*	64.6	536.7	累积降水量未达阈值

注:*表示该条件未达到崩塌阈值。

3 讨论

3.1 崩岗坡面土壤水分时空分异规律

本研究中,不同水文年的坡面土壤水分体积分数差异显著,在年尺度内呈干湿周期变化,且年际波动一致。降雨量是土壤水分补给的主要来源,季节性降雨导致土壤水分条件分数的交替性增加或减小^[16]。丰水年崩岗坡面各坡位的水分状态均高于平水年和枯水年,与邹文秀等^[17]的研究结果一致。土壤水分状态在时间动态上受降雨量的影响^[18],丰水年雨季的累积降雨量明显高于平水年和枯水年,导致丰水年坡面土体的水分状态更高。地下水位深度与土壤水分也密切相关,雨季降水增加导致地下水位上升,进而补充深层土壤水分^[19]。

沿坡面向下,土壤体积质量逐渐增加。崩壁深层的平均体积质量较大,可能是上层土体对下层土壤的压实作用所导致的,在重力作用下,下层土壤更

加紧密^[20]。水分入渗过程的淋溶作用也使得上层土壤的细颗粒填充下部土层的孔隙,增加下方砂土层的体积质量^[21]。监测期间,崩岗坡面土壤水分体积分数呈现浅层高于深层的“上高下低”格局,这是剖面土壤持水和导水性质差异所导致的^[22]。与深层砂土层土壤相比,浅层红土层土壤的黏粒质量分数更高,而土壤持水能力与黏粒质量分数呈显著正相关^[23],所以浅层土壤水分体积分数更高。降雨时,浅层土壤也容易吸水而增加土体自重,增加崩塌风险。在红土层和砂土层之间存在一个导水率很低的弱透水层(表 2),阻滞水分入渗,深层土壤水分体积分数只有在长时期高累积降雨的作用下才能增加。在雨季中后期,浅层土壤水分体积分数也较高时,深层土壤水分体积分数增加。当砂土层土壤水分体积分数增加时,崩壁土体的稳定性也逐渐降低,崩塌在这个时期发生。

3.2 预测崩壁崩塌的阈值条件

对崩塌发生的条件分析得出,崩塌事件的发生是前期累积降雨量、土壤初始水分体积分数和当日降雨量共同作用的结果,只有当这3个条件同时达到阈值时,崩塌才会发生。本研究中,4个崩塌事件发生前30 d累积降雨量均超过170.0 mm。如果没有前期降雨的累积效应,单次降雨造成的土体湿润深度很难到达崩壁崩塌所需要的临界深度^[24-25],且在垂直坡面上,弱透水层的存在阻碍水分入渗,深层土壤水分需要更长的时间才能积累,是在很多单次大暴雨事件中未发生崩塌的原因。

足够多的前期累积降雨量增加崩塌事件的初始土壤水分体积分数。在崩塌事件中,土壤初始水分体积分数均超过田间持水量 $0.018\sim 0.033\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,具体为近崩壁60 cm土层初始水分体积分数为 $0.349\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,崩壁180 cm土层初始水分体积分数为 $0.322\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。在足够的累积降雨条件下,深层土壤均处于高水分状态。土壤水分的升高直接导致土体的抗剪强度下降^[26-27],使得崩壁的稳定性下降。土壤水分体积分数越高,抗剪强度越低。土壤初始水分体积分数超过田间持水量表示土壤水分接近饱和状态,抗剪强度降低达到最小值。有研究^[28]指出,当土壤水分体积分数从20%增加到24%时,花岗岩红壤的抗剪强度平均降低108.54~113.37 kPa。在土壤水分体积分数较高时(如 $0.42\text{ cm}^3/\text{cm}^3$),红土层和过渡层土壤的抗剪强度仍然高于砂土层土壤低水分体积分数时(如 $0.32\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)的抗剪强度^[10],说明崩壁崩塌可能是深层部位失稳发生的崩塌,而不是沿某一滑动面发生的滑塌。在崩塌事件C中,虽然崩壁230~380 cm土层的含水量较低,但180 cm土层的土壤水分体积分数超过阈值条件,崩壁土体在180 cm土层位置发生失稳。所以与其他崩塌事件相比,崩塌事件C的崩塌规模较小。

土壤储水量的变化情况也是降雨量累积效应的反映^[29]。崩塌事件发生前,崩壁0~180 cm土层储水量均超过600 mm。表3中,当累积降雨量足够多时,土壤储水量均处于较高状态。初始土壤水分体积分数高,也反映前期累积降雨量充足,这种情况下,土壤储水量通常也较高,即剖面土壤储水量与前30 d累积降雨量本质上是同一个条件。在评估阈值条件时,考虑前30 d累积降雨量的同时,也间接考虑土壤储水量阈值。因此,剖面土壤储水量不纳入崩塌阈值条件。

在本研究中,崩壁180 cm土层储水量在崩塌前5 h迅速增加,平均增量为51.6 mm。深层土壤水分

体积分数的变化是崩塌的驱动力^[9],说明深层土壤水分体积分数的快速大幅增加是崩塌发生的直接驱动力。在崩塌事件中,均有暴雨发生($>47.9\text{ mm/d}$),说明深层土壤水分体积分数的突发性增加来自这些暴雨事件。一方面,土壤初始水分体积分数较高,降雨入渗时水分快速进入土体,达到深层土壤部位,显著增加深层土壤储水量;另一方面,由于土壤持水能力和导水能力的差异,暴雨发生后,浅层土壤水分也会继续增多,增加土体自重,形成“头重脚轻”不稳定状态^[12],降低崩壁稳定性。所以,当日暴雨条件也是崩壁崩塌触发的充分必要条件。

综上,本研究中的崩塌阈值条件是经验值,同时具有崩塌机理含义。具体而言,因为前期降雨的累积效应,土壤水分体积分数超过田间持水量,深层部位的抗剪强度显著降低;当日暴雨导致浅层土壤水分进一步增加,进而增加土体自重,增强向下的剪切力。这些阈值条件表明,崩壁崩塌受主要土体内部水分状况控制,与地表径流作用、集水坡面的大小等因素的影响相对较小。所以,一些崩岗的崩壁在超过分水岭后退仍继续发生侵蚀^[30]。

从阈值的获取来看,本研究中初始水分体积分数阈值和当日暴雨条件阈值可用于其他崩岗坡面。对比地质灾害气象风险预警当日临界雨量^[31],本研究的暴雨条件阈值达到橙色风险等级,崩塌风险较高。在关于土壤水分体积分数的边坡稳定分析模型中^[7],土壤水分体积分数达到饱和时的稳定安全系数最低,本研究中初始水分体积分数的阈值条件是超过田间持水量的 $0.018\sim 0.033\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,土壤水分体积分数达到近饱和状态,土体抗剪降低基本处于最低值,与上述结果一致。本研究中崩岗坡面土壤厚度为十几米,而在广西壮族自治区等花岗岩崩岗区,土壤厚度最深可达50 m^[32],可能深层土壤水分增加需要更大的累积降雨量阈值,而且累积降雨量的计算也受气候条件的影响,所以其他崩岗坡面需要通过试验资料重新获取累积降雨量作为阈值条件。有研究^[33]指出,土壤水分能量状态可以表征不同景观和季节之间土壤水动力学的显著差异。未来研究可以计算崩壁土体的水分能量状态,消除土壤性质和地形条件的差异,用水分能量状态的量化崩壁稳定性和预测其崩塌时间。

4 结论

由于坡面各土层持水和导水能力差异,垂直剖面上土壤水分体积分数呈现浅层高于深层的“上高下低”格局。在丰水年和平水年雨季中后期,深层土壤水分体积分数在足够累积降雨量情况下得到补

充,且4次大型崩塌事件均发生在这个时期。砂土层土壤水分体积分数增加使得崩壁土体储水量处在高水平是崩塌发生的必要条件。前30 d累积降雨量、初始水分体积分数和当日暴雨是崩壁崩塌的充分必要条件。在前30 d累积降雨量足够多(≥ 170.0 mm)时,初始水分体积分数超过田间持水量高水分状态 $0.018\sim 0.033\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (具体为近崩壁60 cm初始水分体积分数为 $0.349\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,崩壁180 cm初始水分体积分数为 $0.322\text{ cm}^3/\text{cm}^3$),单次暴雨条件(本研究中 $>47.9\text{ mm/d}$)下触发崩壁崩塌。崩壁崩塌机制是深层土体抗剪强度降低和浅层土体重力牵引共同驱动的倾倒入落。通过减少深层土壤的水分渗透可有效防治崩壁崩塌。本研究为崩岗侵蚀预警和崩壁稳定性防护提供关键阈值与理论依据。

参考文献:

- [1] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J].土壤学报,2018,55(6):1297-1312.
LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China[J].Acta Pedologica Sinica,2018,55(6):1297-1312.
- [2] 刘希林.全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展[J].地理科学进展,2018,37(3):342-351.
LIU X L. Benggang erosion landform and research progress in a global perspective[J].Progress in Geography,2018,37(3):342-351.
- [3] 梁音,宁堆虎,潘贤章,等.南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J].中国水土保持,2009(1):31-34.
LIANG Y, NING D H, PAN X Z, et al. Characteristics and treatment of collapse erosion in red soil area of South China[J].Soil and Water Conservation in China,2009(1):31-34.
- [4] DENG Y S, DUAN X Q, DING S W, et al. Suction stress characteristics in granite red soils and their relationship with the collapsing gully in South China[J].Catena,2018,171:505-522.
- [5] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等.不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J].农业工程学报,2015,31(24):106-110.
LIN J S, ZHUANG Y T, HUANG Y H, et al. Shear strengths of collapsing hill in red soil as affected by soil moisture under different experimental methods[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(24):106-110.
- [6] REICHENBACH P, CARDINALI M, DE VITA P, et al. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River basin (central Italy)[J].Environmental Geology,1998,35(2):146-159.
- [7] BORDONI M, MEISINA C, VALENTINO R, et al. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: From the field monitoring to a simplified slope stability analysis[J].Engineering Geology,2015,193:19-37.
- [8] 林敬兰,黄炎和,张德斌,等.水分对崩岗土体抗剪切特性的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):55-58.
LIN J L, HUANG Y H, ZHANG D B, et al. Influence of soil moisture content on shear characteristics of Benggang[J].Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(3):55-58.
- [9] ZOU Z Q, TAO Y, GAO Y H, et al. Soil moisture dynamics near a gully head in relation to the trigger of collapse in granite red soil slope in southern China[J].Geomorphology,2023,420:e108493.
- [10] DUAN X Q, DENG Y S, TAO Y, et al. The soil configuration on granite residuals affects Benggang erosion by altering the soil water regime on the slope[J].International Soil and Water Conservation Research,2021,9(3):419-432.
- [11] 邓羽松,丁树文,刘辰明,等.鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J].水土保持学报,2015,29(4):132-137.
DENG Y S, DING S W, LIU C M, et al. Soil moisture characteristics of collapsing gully wall in granite area of southeastern Hubei[J].Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(4):132-137.
- [12] TAO Y, ZOU Z Q, GUO L, et al. Linking soil macropores, subsurface flow and its hydrodynamic characteristics to the development of Benggang erosion[J].Journal of Hydrology,2020,586:e124829.
- [13] FAN L F, LEHMANN P, OR D. Effects of hydromechanical loading history and antecedent soil mechanical damage on shallow landslide triggering [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2015,120(10):1990-2015.
- [14] BOGAARD T A, GRECO R. Landslide hydrology: From hydrology to pore pressure [J]. WIREs Water,2016,3(3):439-459.
- [15] LI L J, JIANG D J, HOU X Y, et al. Simulated runoff responses to land use in the middle and upstream reaches of Taoerhe River basin, northeast China, in wet, average and dry years [J]. Hydrological Processes,2013,27(24):3484-3494.
- [16] 郑力轩,吴福忠,杨巧,等.亚热带森林类型转换对土壤水文物理参数的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):125-134.
ZHENG L X, WU F Z, YANG Q, et al. Impacts of subtropical forest type conversion on soil hydrophysical characteristics [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(2):125-134.
- [17] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等.降水年型对黑土区土壤水分

- 动态变化的影响[J].水土保持学报,2009,23(5):138-142.
- ZOU W X, HAN X Z, WANG S Y, et al. Impact of different yearly rainfall patterns on dynamic changes of soil moisture in black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 138-142.
- [18] 刘姗,刘泽彬,王梦飞,等.六盘山华北落叶松林坡面土壤储水时空变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2025,39(5):234-243.
- LIU S, LIU Z B, WANG M F, et al. Spatiotemporal variation characteristics of soil water storage and their influencing factors on a *Larix gmelinii* var. *rincipis-rupprechtii* plantation hillslope in liupan mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 234-243.
- [19] 李丽娇,张奇.一个地表-地下径流耦合模型在西苕溪流域的应用[J].水土保持学报,2008,22(4):56-61.
- LI L J, ZHANG Q. Application of a surface runoff and groundwater coupled model to Xitiaoxi catchment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 56-61.
- [20] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(5):1610-1620.
- LI P, WANG D M, DING C, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in loess alpine region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1610-1620.
- [21] BOLT G H, FRISSEL M J. Thermodynamics of soil moisture[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1960, 8(1): 57-78.
- [22] ZHANG B, TANG J L, GAO C, et al. Subsurface lateral flow from hillslope and its contribution to nitrate loading in streams through an agricultural catchment during subtropical rainstorm events [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(10): 3153-3170.
- [23] 王燕,宫澜波,尹艳杰,等.不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能[J].水土保持学报,2013,27(5):23-27.
- WANG Y, GONG Y B, YIN Y J, et al. Soil and water conservation functions of pinus massoniana plantation at different forest ages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 23-27.
- [24] 王彦华,谢先德,王春云.风化花岗岩崩岗灾害的成因机理[J].山地学报,2000,18(6):496-501.
- WANG Y H, XIE X D, WANG C Y. Formation mechanism of calamities due to Benggang processes of weathered granitic rocks [J]. Journal of Mountain Research, 2000, 18(6): 496-501.
- [25] 林敬兰,黄炎和.崩岗侵蚀的成因机理研究与问题[J].水土保持研究,2010,17(2):41-44.
- LIN J L, HUANG Y H. Review of study on formation mechanism of slope disintegration erosion and its problems[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 41-44.
- [26] 王轩,李珍玉,肖宏彬,等.基于土-水特征曲线的植物边坡抗剪强度研究[J].水土保持学报,2021,35(5):57-62.
- WANG X, LI Z Y, XIAO H B, et al. Study on shear strength of plant slope based on soil-water characteristic curve [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 57-62.
- [27] 程子捷,张海东,蒋芳市,等.安溪县花岗岩崩岗土体水分特征曲线及其影响因素[J].水土保持学报,2018,32(3):120-125.
- CHENG Z J, ZHANG H D, JIANG F S, et al. Water characteristic curve and its influence factors of granite Benggang soil in Anxi County [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 120-125.
- [28] ZHANG Y, ZHONG X Y, LIN J S, et al. Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China [J]. Geomorphology, 2020, 351: e106956.
- [29] 侯贵荣,余新晓,刘自强,等.不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征[J].水土保持学报,2017,31(3):209-215.
- HOU G R, YU X X, LIU Z Q, et al. Spatial and temporal variation characteristics of soil moisture in typical forest land in Beijing mountain region under different rainfall intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 209-215.
- [30] 史德明.我国热带、亚热带地区崩岗侵蚀的剖析[J].水土保持通报,1984,4(3):32-37.
- SHI D M. Analysis of collapse erosion in tropical and subtropical areas of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1984, 4(3): 32-37.
- [31] 李宇梅,狄靖月,许凤雯,等.基于当日临界雨量的国家级地质灾害风险预警方法[J].气象科技进展,2018,8(3):77-83.
- LI Y M, DI J Y, XU F W, et al. A risk warning method based on the intraday critical precipitation for national geological disaster [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8(3): 77-83.
- [32] 韩杰欣,邓芷慧,王旌靡,等.干湿交替条件下花岗岩崩岗区土壤裂隙发育规律[J].水土保持学报,2024,38(5):262-271.
- HAN J X, DENG Z H, WANG J M, et al. Development of soil cracks in granite Benggang area under wetting-drying cycles [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 262-271.
- [33] ZEHE E, LORITZ R, JACKISCH C, et al. Energy states of soil water—a thermodynamic perspective on soil water dynamics and storage-controlled streamflow generation in different landscapes [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(2): 971-987.