

文章编号: 1008-2786-(2019)1-086-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000402

崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征及预测

季翔^{1,2}, 黄炎和^{1*}, 林金石¹, 蒋芳市¹, 葛宏力¹

(1. 福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002; 2. 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

摘 要: 崩岗是水力和重力复合的土壤侵蚀类型, 严重危害我国南方地区的农业生产和生态环境。侵蚀沟对崩岗的侵蚀过程以及地貌变化起着关键作用。本研究以福建省安溪县龙门镇一处崩岗为研究区, 以无人机获取的正射影像和高程数据为基础, 通过采点重构坡面提取出侵蚀沟, 然后对其进行时空动态分析, 得到侵蚀沟的时空侵蚀特征; 然后将其侵蚀特征与 CA-Markov 模型耦合, 通过修正转移概率矩阵以及制定空间分配规则, 构建崩岗侵蚀沟模拟模型。研究结果表明: 降雨量与侵蚀沟的侵蚀强度呈正相关, 强降雨利于侵蚀沟的下切侵蚀, 弱降雨则有利于沟沿的重力崩塌; 坡度对侵蚀沟的侧切和下切具有促进作用, 沟道距离和坡面高度则对下切和堆积具有抑制作用; 由面积差异率 0.18 和 Kappa 系数 0.81 验证了崩岗侵蚀沟模拟模型的精度; 在该崩岗侵蚀沟 2018-12-02 空间分布预测的基础上, 得到其年侵蚀量和侵蚀模数, 分别为 653.9 m^3 和 $340606 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。研究结果为探索崩岗侵蚀过程提供了新思路, 并为崩岗侵蚀的防治工作提供了参考。

关键词: 崩岗; 侵蚀沟; 侵蚀特征; CA-Markov; 预测

中图分类号: S157

文献标志码: A

崩岗是由崩落至坡脚的堆积物与崩落土体的坡面共同形成的特殊地貌, 由于地势和土质的特点再次受到地表径流以及重力的二次侵蚀。崩岗侵蚀产生大量泥沙淤积河道、农田, 严重威胁着生态环境和农业生产, 是我国南方花岗岩地区最为严重的土壤侵蚀类型之一, 甚至被称为该区域的“生态溃疡”。根据相关研究统计^[1-3], 南方红壤丘陵区共有各类崩岗 239 125 个, 总侵蚀面积为 1220.05 km^2 , 主要集中在江西、广东、福建和湖南等 7 个省(自治区)。崩岗地表沟壑横生, 侵蚀沟既是重要的产沙来源又是泥沙的运移通道, 其作用贯穿于崩岗的发生和发展, 影响整个崩岗侵蚀过程^[4-5]。因此, 分析崩岗侵蚀沟的侵蚀特征以及对其空间形态的预测有助于崩岗防治工作的开展, 从而减少损害。

目前, 对崩岗侵蚀沟的研究多侧重于通过收集崩岗土壤进行冲刷试验从而得到侵蚀特征^[6-8]。例如, 蒋芳市等^[6]通过模拟不同降雨强度对崩积体 30° 坡面进行冲刷试验, 获取了细沟发育的形态特征。虽然, 通过冲刷试验所获取的数据及其结果一般较为准确, 不受其他因素干扰, 然而由于试验用土以及试验参数设置等限制, 难以完整地还原崩岗侵蚀过程中的真实条件, 因而存在试验结果偏离现实的情况。以空间数据为基础的时空动态分析可以有效地弥补这一不足, 如刘希林等^[9]通过 3D 激光扫描仪对广东莲塘岗崩岗的地貌变化进行了监测研究, 并发现崩岗侵蚀在不同高程和坡度上存在显著差异。他的方法虽然可以获取崩岗侵蚀沟的实际侵蚀特征, 但难以对侵蚀沟的未来发展进行预测。

收稿日期 (Received date): 2018-09-12; **改回日期** (Accepted date): 2018-11-03

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41601557; 41571272); 国家科技支撑计划项目 (2014BAD15B0303)。[National Natural Science Foundation of China (41601557; 41571272); National Science and Technology Support Program (2014BAD15B0303)]

作者简介 (Biography): 季翔 (1984-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 景观生态和崩岗侵蚀。[JI Xiang (1984-), female, Ph. D., lecturer, specialized in landscape ecology and collapsing gully erosion] E-mail: jixiangss@126.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 黄炎和 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 水土保持和崩岗侵蚀。[HUANG Yanhe (1962-), male, Ph. D., professor, specialized in soil and water conservation and collapsing gully erosion] E-mail: yanhehuang@163.com

CA-Markov 模型是目前应用较为成熟的空间预测模型,具有可定义的时间单元和空间单元,并可根据过程机理设置规则。该模型虽然侧重经验概率的计算,但不仅广泛适用于对土壤生态过程的模拟^[10-13],并且在土壤侵蚀方面也获得了较好的应用^[12-13]。因此,本文引入 CA-Markov 模型,根据崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征进行修正耦合,构建崩岗侵蚀沟的空间模拟模型。

鉴于此,本研究以福建省安溪县龙门镇一处崩岗为研究区域,通过无人机采集该崩岗的正射影像和高程数据,然后利用 ArcGIS 空间分析工具对侵蚀沟进行提取,并对其形态变化进行时空分析,从而得到崩岗侵蚀沟的侵蚀特征;在此基础上,将侵蚀特征与 CA-Markov 模型耦合,构建崩岗侵蚀沟的空间模拟模型,实现对崩岗侵蚀沟的空间形态的预测。研究结果不仅为崩岗侵蚀过程及其侵蚀机制的进一步阐明提供新思路,还可为崩岗侵蚀的预防和治理工作提供较为直观的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区与数据采集

研究区位于福建省泉州市安溪县龙门镇,该区域为亚热带季风气候,年均气温为 19℃,降雨量高且集中,年降雨量 1546~2024 mm,且多集中在 5—9 月。龙门镇是福建省崩岗最多的乡镇^[14],本研究所选择的崩岗位于龙门镇的北部(N24°57'7", E118°3'48"),与同区域其他崩岗相比该崩岗面积较大,约 5260 m²,海拔高度为 250~295 m,相对高差为 45 m,由上及下呈红土层、沙土层和碎屑层分布。该崩岗土壤属酸性花岗岩类,为中-粗颗粒似斑状结构,长石为其主要矿物,其次为石英与云母。该崩岗沟壑纵横、侵蚀剧烈,因此本研究以此崩岗为案例点,如图 1。

研究所用的正射影像(DOM)和高程数据(DEM)由无人机飞行器(DJI GO 4 APP)和 RTK(Trimble R4 GNSS)获取,采集于 2017-03-11、2017-07-21 和 2017-12-02。同时期降雨量数据由放置在距离研究区约 740 m 的翻斗雨量计(Onset rg3-m)获取。

1.2 崩岗侵蚀沟的提取

目前侵蚀沟提取的方法主要有目视解译与基于

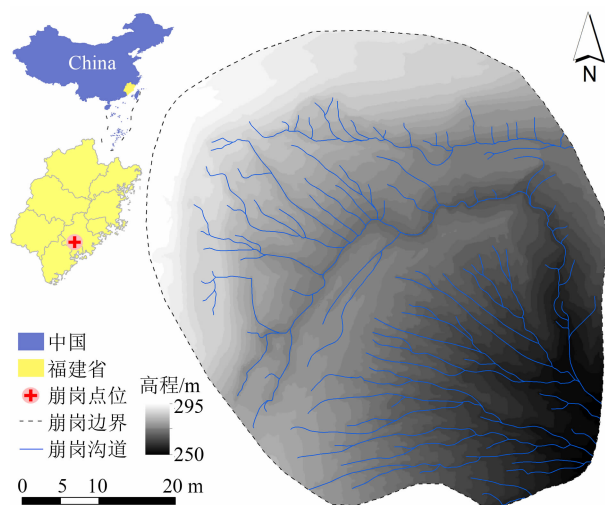


图1 研究区位置及其 DEM (下载地址:

<http://bzdt.nasg.gov.cn>;审图号:GS(2006)1593 号)

Fig.1 The location of study area and its DEM in China (Download link: <http://bzdt.nasg.gov.cn>; Number: GS(2006)1593)

水文过程两种,这两种方法在区域等较大尺度上的应用较为成熟^[15-16]。崩岗流域面积较小、侵蚀剧烈、地表复杂多变,难以应用这两种方法提取崩岗侵蚀沟。因此,本研究通过叠加重构坡面与现状坡面,提取出崩岗侵蚀沟,具体流程如下:

- 1) 以无人机获取的 DOM 为底图,在非侵蚀沟的位置,进行 2 m×2 m 的网格采点,共 684 点;
- 2) 根据无人机获取的 DEM,对上一步中得到的点位进行高程赋值,得到高程样点;
- 3) 对高程样点进行空间插值,得到不含侵蚀沟的重构坡面,该坡面与侵蚀沟沟沿等高程;
- 4) 将重构坡面与现状坡面叠加,计算二者之间的高程差,根据差值大小提取侵蚀沟:差值≤0 表示非侵蚀沟,差值越大,表示侵蚀沟的深度越大。

1.3 崩岗侵蚀沟的影响因子

为在时间和空间两个尺度上对崩岗侵蚀沟的侵蚀特征进行分析,分别从这两个尺度上选取影响崩岗侵蚀沟侵蚀过程、且具有一定差异性的因子。

(1) 时间尺度

影响崩岗侵蚀的因子众多,主要包括地形、土壤和降雨等方面^[3,17],而在时间尺度上差异性较为显著的只有降雨。因此,选择度量降雨条件的降雨量(g_1)、降雨强度(g_2)和降雨历时(g_3)作为时间尺度上的影响因子。

(2) 空间尺度

影响因子在空间尺度上的差异性使崩岗侵蚀沟在不同空间位置上的侵蚀过程不同。崩岗侵蚀是水力和重力的复合侵蚀,水力侵蚀主要是通过降雨形成的地表径流产生作用^[18-20],重力侵蚀则在坡度陡峭的土体上较为显著^[21-23]。因此,分别选择沟道距离(不同地理空间与沟道的最近距离, f_1)和坡度(ArcGIS 空间分析工具计算的最大坡度, f_2)作为表征两个侵蚀力的影响因子。另外,侵蚀力相同的情况下,土壤抗蚀能力的差异也会影响侵蚀沟的发展。土壤结构等理化性状决定其抗蚀能力,但这方面的空间数据较难获取。崩岗土体由上至下呈“表土层-红土层-沙土层-碎屑层”的结构^[22-23],且各土层的容重、孔隙度以及质地等理化性状递变^[24-25]。因此本文以崩岗最低海拔为基准计算其坡面高度(f_3)作为表征抗蚀能力的因子。

1.4 侵蚀沟动态模拟模型

CA-Markov 模型是将 Markov 模型中的转移概率矩阵应用到 CA 模型的空间分布中,通过上一时段的转移概率预测下一时刻各状态的面积,并以此在对下一时刻的空间模拟过程中控制状态数量。其中,Markov 模型的表达式如式(1):

$$S_{t+1} = S_t \times m_{ij} \quad (1)$$

式中, S_t 和 S_{t+1} 分别表示上一时刻和下一时刻的状态; m_{ij} 表示这一时段中 i 状态转移为 j 状态的概率(%)。

CA 模型是一种根据转换规则对元胞状态进行空间分配的系统。转换规则一般包括转移概率和邻域影响,由于崩岗侵蚀在空间上具有显著的差异性,因此还需要考虑空间因子的作用,即某状态的空间适宜性。该模型的表达式如式(2):

$$S_{t+1} = f(S_t, m_{ij}, N_{ij}, Q_j) \quad (2)$$

式中, N_{ij} 为 i 状态转化为 j 状态的邻域影响; Q_j 表示 j 状态的空间适宜性。即根据 t 时刻元胞状态对应的转移概率、邻域影响以及空间适宜性,从最高值的元胞开始赋值,然后次高,直到满足 $t+1$ 时刻的预测面积。

该模型具体参数如下:

1) 元胞:CA 模型以栅格数据为基础,元胞即为栅格,本研究采用的栅格大小为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 。

2) 元胞状态:在对崩岗侵蚀沟的动态模拟中,元胞的状态主要分为非侵蚀沟和侵蚀沟两部分。

3) 邻域:邻域中元胞的状态对核心元胞的转变

产生影响。一般通过 5×5 扩展摩尔型的滤波器设置邻域大小,邻域影响的计算式如式(3):

$$N_{ij} = c_j / c_0 \times (c_i + c_j) / c_0 \quad (3)$$

式中, c_0 为邻域元胞数; c_i 和 c_j 分别是邻域中 i 状态和 j 状态的元胞数。

4) 空间适宜性:转移概率矩阵控制状态之间的转移概率,而空间适宜性反映不同地理位置的转换概率,通过影响各状态转换的空间因子确定,具体如式(4):

$$Q = \sum_{k=1}^l \omega_k f_k \quad (4)$$

式中, Q 为某状态的空间适宜性; f_k 和 ω_k 分别为与该状态对应的第 k 个空间因子的取值与其权重; l 为空间因子的数目。

2 结果与分析

2.1 崩岗侵蚀沟的提取结果

利用 ArcGIS 生成不含侵蚀沟的重构坡面,通过与相同时期的 DEM 数据叠加提取出崩岗侵蚀沟,如图 2a~c。

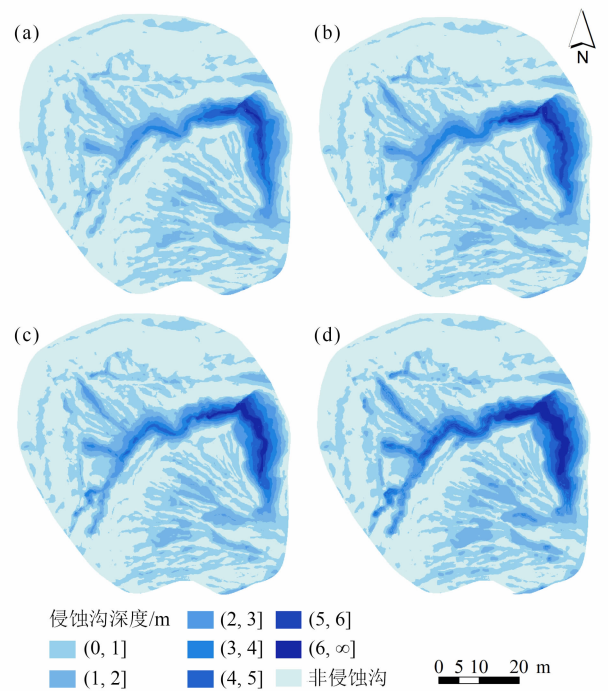


图2 侵蚀沟空间分布:(a)2017-03-11、(b)2017-07-21、(c)2017-12-02和(d)2018-12-02的预测结果

Fig. 2 Spatial distribution of erosion gullies on:

(a) 2017-03-11, (b) 2017-07-21, (c) 2017-12-02, and the prediction result on (d) 2018-12-02

由图 2 可以看出,在 2017 - 03 - 11—2017 - 12 - 02 时段内,该崩岗的侵蚀沟逐渐扩宽及加深,基本符合崩岗侵蚀沟的发展趋势。将图 2a 和图 2c 叠加,得到 2017 - 03 - 11—2017 - 12 - 02 侵蚀沟的体积变化,即该时段侵蚀沟的侵蚀量,为 504.96 m^3 。然后由 DEM 叠加计算该崩岗的总侵蚀量,为 668.11 m^3 ,由此可以得到侵蚀沟的侵蚀量占崩岗总侵蚀量的比率,为 75.58%。这与崩岗同时受重力崩塌、雨滴击溅、片流侵蚀、径流下切等多种侵蚀的客观事实相符^[26],进一步说明了本研究提取崩岗侵蚀沟的方法较为合理,可用于分析崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征。

2.2 崩岗侵蚀沟的侵蚀特征

崩岗侵蚀沟对土壤的侵蚀可分为侧切加宽和下切加深两种^[9],在空间分布上分别表现为侵蚀沟外扩和原侵蚀沟加深。另外,在泥沙运移的过程中存在未被运移出去堆积在侵蚀沟内的情况,因此崩岗侵蚀沟的动态变化还包括堆积这一现象。利用 ArcGIS 的栅格工具将前后 2 期数据叠加,提取出对应时段内侵蚀沟外扩的斑块、原侵蚀沟加深的斑块以及侵蚀沟中堆积的斑块,通过对这 3 种斑块的动态分析可以得到崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征。

2.2.1 时间尺度侵蚀特征

2017 - 03 - 11—2017 - 07 - 21 (P1) 和 2017 - 07 - 21—2017 - 12 - 02 (P2) 的时间长度接近,分别为 132 d 和 134 d,因此在研究崩岗侵蚀沟在时间尺度上的侵蚀特征方面具有较好的对比性。分别提取出 P1 和 P2 中外扩斑块、加深斑块和堆积斑块,然

后计算各类斑块的面积和体积以及在总量中所占比值,如表 1。

由表 1 中可以看出:(1)从总量看,P1 中的面积和体积变化量均比 P2 中多;(2)从 3 种变化斑块的占比看,P1 和 P2 中加深斑块的面积和体积均为最大,外扩斑块和堆积斑块较少;(3)从变化斑块占比的差值看,不论是面积还是体积,P1 至 P2 均表现出外扩斑块减少,加深斑块增加,堆积斑块几乎不变的特征。由此说明,崩岗侵蚀沟在 P1 中的侵蚀比 P2 剧烈,且均以下切侵蚀为主,侧切侵蚀为辅;P2 中侵蚀沟的下切加深较 P1 更为剧烈,侧切外扩较 P1 少。

根据安置在研究区雨量计 (Onset rg3—m) 的记录,分别统计出 P1 和 P2 的降雨量和降雨历时,然后求出两个时段中的平均雨强。由于量纲不同,以 P1 中的数值为单位 1 计算 P2 中各数值的标量使其具有可比性,具体如表 2。

由表 2 中可以看出 P2 中的降雨量和降雨历时均比 P1 少,但降雨强度比 P1 大,由此可以看出 P1 中多绵绵细雨,而 P2 中多短时大雨。

综合而言,结合以往学者的研究结果^[23-24],降雨量是崩岗侵蚀沟侵蚀的关键因子。降雨强度利于崩岗侵蚀沟的下切加深,这主要是单位时间内降雨越多,越容易形成地表径流,且冲刷力越强,从而使侵蚀沟的深度增加。另外,绵绵细雨更容易引起崩岗侵蚀沟的外扩,这是由于崩岗侵蚀沟外扩不仅需要侵蚀沟的侧切作用,还需要沟沿土体的重力作用使其坍塌,降雨强度越小越不容易形成地表径流,从而使越多的水分入渗土壤使其重力增加。

表 1 P1 和 P2 中侵蚀沟斑块的数量变化

Tab.1 Quantity changes of erosion gullies patches in P1 and P2

斑块类型	时段	斑块面积			斑块体积		
		面积/ m^2	占比/%	差值/%	体积/ m^3	占比/%	差值/%
外扩	P1	103.6	13.5	-9.8	75.3	15.8	-13.2
	P2	8.3	3.7		2.6	2.6	
加深	P1	558.8	72.8	12.5	364.7	76.5	12.8
	P2	191.7	85.3		88.4	89.3	
堆积	P1	104.9	13.7	-2.7	36.4	7.7	0.4
	P2	24.7	11		8	8.1	
合计	P1	767.3	-	-542.5 m^2	476.4	-	-377.4 m^3
	P2	224.7	-		99	-	

注:“差值”均为 P2 对应的值减去 P1 对应的值。

Note: “Difference” is the value of P2 minus the value of P1.

表 2 P1 和 P2 的降雨量、降雨强度和降雨历时

Tab.2 Rainfall amount, rainfall intensity and rainfall duration in P1 and P2

时段	降雨量		降雨强度		降雨历时	
	实际值/ mm	标量	实际值/ (mm · h ⁻¹)	标量	实际值/ h	标量
P1	784.60	1	1.49	1	526.83	1
P2	349.20	0.45	1.90	1.34	176.67	0.33

2.2.2 空间尺度侵蚀特征

通过对 2017-03-11—2017-12-02 时段中 3 种斑块的空间分布与影响因子间的关系,实现对崩岗侵蚀沟在空间尺度上的侵蚀特征分析。首先,提取出该时段的崩岗侵蚀沟的外扩斑块、加深斑块以及堆积斑块,并以 0.3 m 为间距将其变化深度/高度划分为 5 个等级(图 3a)。以 2017-03-11 的 DEM 为基础数据,通过 ArcGIS 生成空间尺度上影响因子沟道距离(f_1)、坡度(f_2)和坡面高度(f_3)的分布图,如图 3。

然后,分别计算各级别变化斑块在空间尺度上影响因子中的分布率,如公式(5):

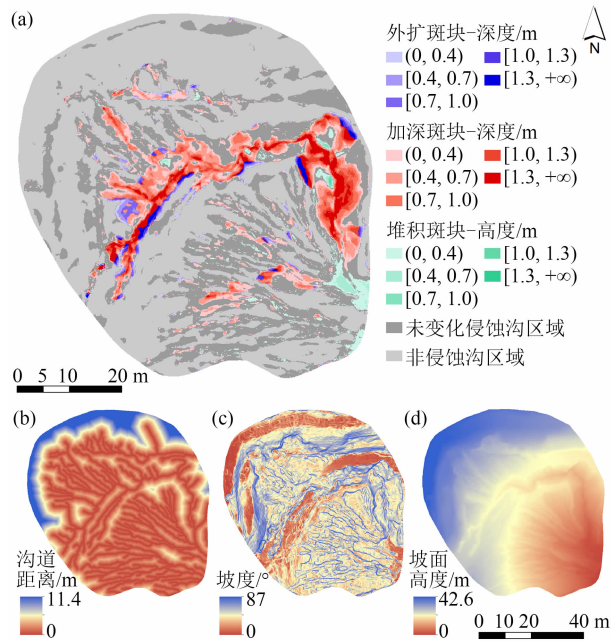


图 3 侵蚀沟斑块及其影响因子的空间分布:(a) 侵蚀沟斑块、(b) 沟道距离、(c) 坡度和(d) 坡面高度

Fig.3 Spatial distribution of erosion gullies patches and their influence factors: (a) erosion gullies patches, (b) channel proximity, (c) slope gradient, and (d) slope height

$$R_p^{kv} = \frac{A_p^{kv}}{A_{kv}} \quad (5)$$

式中, R_p^{kv} 为 p 斑块在 k 因子 v 值中的分布率(%); A_p^{kv} 为 p 斑块在 k 因子 v 值中的面积(m^2); A_{kv} 为 k 因子 v 值时的面积(m^2)。其中,沟道距离和坡面高度精确到 0.1 m,坡度精确到 1° ,分别作散点图如图 4~6。

由图 4 可以看出:(1)沟道对崩岗侵蚀沟外扩的作用集中在 4 m 以内,特别是 2 m 左右时和 0 m 处,这反映了两种侵蚀沟外扩:一种与沟道水平,另一种沿沟道方向。可以看出沿沟道方向的侵蚀沟外扩深度较小,这是由于该种外扩主要由径流冲刷导致;而与沟道水平方向外扩的深度相对较大,这是由于沟沿在受到侧切侵蚀后土体崩落,导致高度骤减。(2)坡度对侵蚀沟外扩的作用集中在大于 45° 坡时,进一步说明了侵蚀沟的外扩受外切侵蚀和重力侵蚀的共同作用。(3)坡面高度对崩岗侵蚀沟外扩的作用集中在 20~30 m 处,由于坡面高度反映崩岗土壤的抗蚀力,与抗蚀力越小侵蚀越剧烈的假设相悖。这一方面是由于 20~30 m 处分布着该崩岗最大最深的侵蚀沟,另一方面说明了侵蚀沟外扩受土壤抗蚀能力的影响较不显著。

综合而言,崩岗侵蚀沟的外扩包括沟沿坍塌和沟道延伸两种方式;其中,沟道距离和坡面高度作用的规律性较低,而坡度的作用最为显著,且作用范围为 $45^\circ \sim 90^\circ$,超过此范围坡度对侵蚀沟的外扩无影响。这说明在崩岗侵蚀沟的外扩主要取决于重力作用,水力冲刷及土壤抗蚀力的作用相对不显著。

由图 5 中可以看出:(1)沟道距离对侵蚀沟加深的作用也集中在 4 m 以内,且随沟道距离的增加侵蚀深度递减,说明侵蚀沟的加深主要由下切侵蚀导致。(2)坡度对沟道加深的作用呈递增趋势,且在大于 75° 时骤增,这一方面说明坡度越大,径流冲刷作用越强;另一方面则反映了重力对侵蚀沟加深的作用。(3)坡面高度对崩岗侵蚀沟加深的作用基本呈递减趋势,这不仅反映了土壤抗蚀能力越小,加深侵蚀越剧烈的规律,同时也证明了采用坡面高度表征土壤抗蚀能力的合理性。另外,由于 0~3 m 处为崩岗泥沙出口,容易发生泥沙堆积,因此加深斑块在这一段的分布率较小。

综合而言,侵蚀沟加深与 3 个空间因子的关系比较规律:沟道距离和坡面高度对侵蚀沟加深的作

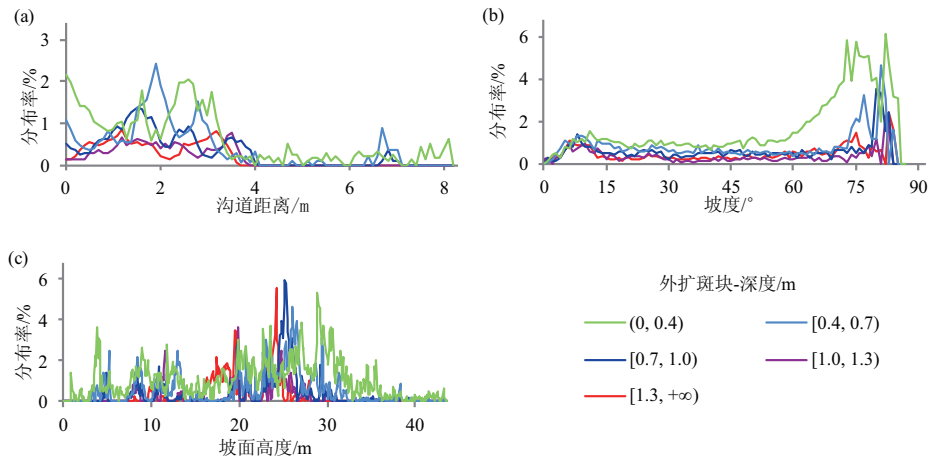


图4 侵蚀沟外扩斑块在各因子中的分布率:(a) 沟道距离、(b) 坡度和(c) 坡面高度

Fig.4 Distribution probability of erosion gullies expanded patch in each factor;

(a) channel proximity, (b) slope gradient, and (c) slope height

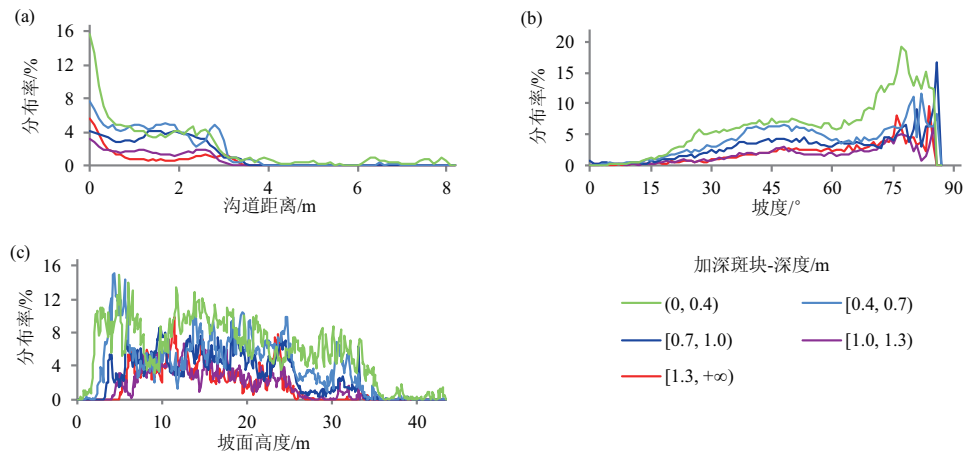


图5 侵蚀沟加深斑块在各因子中的分布率:(a) 沟道距离、(b) 坡度和(c) 坡面高度

Fig.5 Distribution probability of erosion gullies deepened patch in each factor;

(a) channel proximity, (b) slope gradient, and (c) slope height

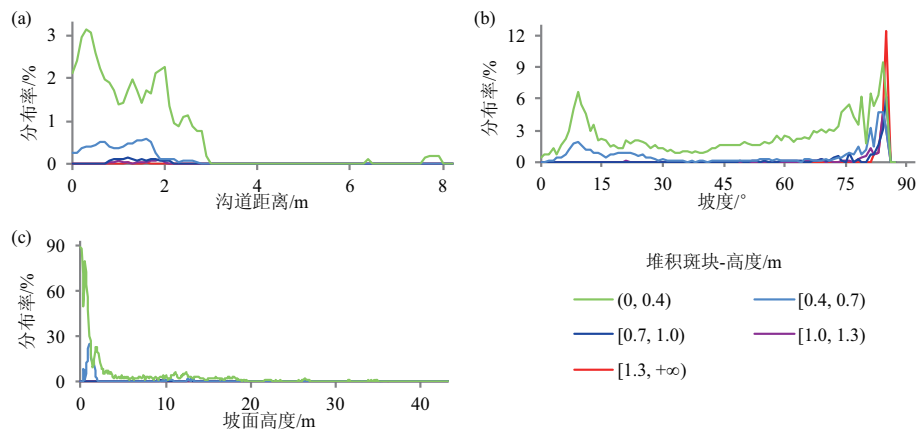


图6 侵蚀沟堆积斑块在各因子中的分布率:(a) 沟道距离、(b) 坡度和(c) 坡面高度

Fig.6 Distribution probability of erosion gullies cumulated patch in each factor;

(a) channel proximity, (b) slope gradient, and (c) slope height

用递减,坡度对侵蚀沟加深的作用递增。根据分布规律性可以看出 3 个因子的作用大小,由大及小为沟道距离、坡度和坡面高度,其中沟道距离的作用范围为 0~4 m,超过此范围沟道距离对侵蚀沟的加深无影响。

由图 6 可以看出:(1)沟道距离对崩岗侵蚀沟的堆积作用同样集中在 4 m 以内,且呈递减趋势,证明了沟道对泥沙的运移作用。(2)坡度对崩岗侵蚀沟堆积的作用集中在小于 15°和大于 75°两个范围内,这反映了侵蚀沟堆积现象的两种阶段:一是泥沙在运移过程中,由于坡度降低地表径流挟沙力减弱产生的堆积;二是坡度陡峭处发生土体崩塌落入侵蚀沟后,尚未被运移的堆积。(3)坡面高度表征土壤抗蚀能力,对崩岗侵蚀沟堆积无直接作用,但从其分布率可以看出堆积斑块主要集中在坡脚。

综合而言,侵蚀沟堆积不仅在沟道运移泥沙过程中产生,也会在坡度陡峭的土体受重力侵蚀崩落后产生,但主要集中在坡脚附近。坡度对侵蚀沟堆积的作用不显著,但沟道距离和坡面高度对崩岗侵蚀沟堆积的作用相对显著,且作用范围分别为 0~3 m 和 0~4 m,超过此范围沟道距离和坡面高度对侵蚀沟的堆积无影响。

2.3 崩岗侵蚀沟模拟模型的构建

将以上对崩岗侵蚀沟时空动态分析的结果与 CA-Markov 模型耦合,构建崩岗侵蚀沟的模拟模型。CA-Markov 模型是将 Markov 链中的经验计算应用到 CA 模型中的空间分布中。因此,本研究根据崩岗侵蚀沟的时间尺度侵蚀特征修正转移概率矩阵,根据空间尺度侵蚀特征构建 CA 的空间分配规则。

2.3.1 状态划分

转移概率矩阵和元胞分布均以离散数据为基础,因此需要将崩岗侵蚀沟划分为有限数量的状态集合。将崩岗中的非侵蚀沟定义为状态 1,根据深度将侵蚀沟分为状态 2~8,共计 8 个状态(图 2)。

2.3.2 转移概率矩阵的修正

转移概率矩阵式(6)是 Markov 模型的核心,反映某时段内一种状态转变为另一种状态的概率。矩阵中不同位置的元素反映崩岗侵蚀沟的不同变化方式:对角线的元素($i=j$)表示状态未变化;下三角中的元素($i>j$)表示侵蚀沟深度变浅,即堆积;上三角中的元素($i<j$)表示侵蚀沟深度变深,包括外扩和加深,其中第一行的元素($i=1$ & $i<j$)表示侵蚀沟

外扩。

$$m_{ij} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于数据等限制,模拟期与经验期的时间长度往往不等,为了保证变化总量与模拟期对应,需要对经验期的转移概率矩阵进行修正,常规的做法是根据两个时期的时间长度进行修正。由于崩岗侵蚀的主要驱动力为降雨^[18-19],而降雨在时间尺度上的变动非常大,导致时间长度难以反映崩岗在不同时期内的变化量。根据对崩岗侵蚀沟的时间动态分析,降雨量是最能综合反映降雨与侵蚀量关系的因子,且易于获取。因此本研究根据降雨量修正转移概率矩阵中的转移总量,从而实现对侵蚀沟变化总量的修正。另外,由对崩岗侵蚀沟的时间动态分析可知,降雨量相同的情况下,降雨强度对外扩、加深和堆积 3 种变化的作用不同。而这 3 种变化在转移概率矩阵中为不同位置的元素,因此可根据降雨强度对转移概率矩阵中不同位置的元素进行修正,从而实现对侵蚀沟 3 种变化的修正。具体如下:

首先,由于 Markov 转移概率为转移面积与转出状态总面积之比,需要将其转换为转移面积在崩岗总面积中的比率,记为转移比率如式(7):

$$p_{ij} = m_{ij} \times A_i / A \quad (7)$$

式中, p_{ij} 为经验期内 i 状态到 j 状态的转移比率(%); A_i 为转出时 i 状态的总面积(m^2); A 为崩岗总面积(m^2)。

然后,根据降雨强度对 3 种变化进行修正。根据对崩岗侵蚀沟时间动态分析可知,降雨强度与侵蚀沟外扩呈负相关,与加深呈正相关,与堆积关系不显著。因此只对外扩和加深两种变化进行修正,采用 Pastor 提出的转移概率修改公式^[27],具体如式(8):

$$pi_{ij} = \begin{cases} 1 - \exp[(I_1/I_2) \times \ln(1 - p_{ij})] & i = 1 \& i < j \\ 1 - \exp[(I_2/I_1) \times \ln(1 - p_{ij})] & i > 1 \& i < j \\ r_{ij} & i > j \end{cases} \quad (8)$$

式中, pi_{ij} 是根据降雨强度修正后的 i 状态到 j 状态转移比率(%); I_1 和 I_2 分别为经验期和模拟期的降雨强度($mm \cdot h^{-1}$)。此时的转移比率对应着模拟

期降雨强度和经验期降雨量,因此还需要根据降雨量对总转移比率进行修正,同样根据 Pastor 提出的公式进行修正^[27],具体如式(9)~(11):

$$Spr = 1 - \exp[(R_2/R_1) \times \ln(1 - Sp)] \quad (9)$$

$$Sp = \sum_{i=1}^{i \neq j} \sum_{j=1}^{i \neq j} p_{ij} \quad (10)$$

$$pr_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^{i \neq j} \sum_{j=1}^{i \neq j} p_{ij}} \times Spr \quad (11)$$

式中, Spr 为与模拟期降雨量对应的总转移比率(%); R_1 和 R_2 分别是经验期和模拟期的降雨量(mm); Sp 为经验期的总转移比率(%); pr_{ij} 为与模拟期降雨量和降雨强度均对应的 i 状态到 j 状态的转移比率(%)。

最后,再将 pr_{ij} 转换回转移概率矩阵,如式(12):

$$M_{ij} = \begin{cases} pr_{ij}/(A_i/A) & i \neq j \\ 1 - \sum_{j=1}^{i \neq j} M_{ij} & i = j \end{cases} \quad (12)$$

式中, M_{ij} 为与模拟期降雨量和降雨强度均对应的 i 状态到 j 状态的转移概率(%)。

2.3.3 空间适宜性的计算

转移概率矩阵从总量上控制不同状态之间的转变,空间适宜性则影响每个元胞的状态转变概率,由在空间尺度上影响崩岗侵蚀沟变化的因子决定。根据对崩岗侵蚀沟的空间动态分析,可以得到各因子针对3种侵蚀沟变化的取值及权重:由于沟道距离和坡面高度对侵蚀沟外扩的作用不显著,因此只选择坡度作为在空间尺度上影响侵蚀沟外扩的因子,作用范围为 $45^\circ \sim 90^\circ$;3个因子在空间尺度上对侵蚀沟加深的作用均显著单调,且沟道距离的作用范围为 $0 \sim 4$ m,由于显著度大小依次为沟道距离、坡度和坡面高度,根据等差法将其权重分别设为 0.5、0.33 和 0.17;坡度对侵蚀沟堆积的作用较为复杂,

而沟道距离和坡面高度的作用显著单调,因此选择沟道距离和坡面高度作为在空间尺度上影响侵蚀沟堆积的因子,且作用范围分别为 $0 \sim 3$ m 和 $0 \sim 4$ m,权重分别为 0.5。将各因子的取值在相应作用范围内进行 $0 \sim 1$ 标准化处理,然后根据式(4)分别生成3种变化的空间适宜性图集,用于计算每个元胞的转变概率。

2.3.4 精度验证

以 2017-12-02 为基期,根据 2017-03-11—2017-07-21 之间的转移变化模拟 2017-12-02 时的侵蚀沟形态,并与实际值对比进行精度验证。如果精度达到要求,应用该模型对崩岗侵蚀沟进行预测。

首先,将 2017-03-11 和 2017-07-21 两期数据叠加从而求得各状态之间的转移概率,并根据降雨强度和降雨量进行修正,使之与模拟期对应。然后与真实值对比,通过计算面积差异率进行数量精度的验证,如式(13):

$$d_i = \frac{|A_i^m - A_i^r|}{A_i^r} \quad (13)$$

式中, d_i 为 i 状态的面积差异率(%); A_i^m 和 A_i^r 分别为 i 状态的模拟面积和实际面积(m^2)。计算结果如图 7a,其中,MR 表示根据降雨因素修正的转移概率矩阵计算的面积差异率,MT 表示传统方法修正的转移概率矩阵计算的面积差异率。

由图 7a 可以看出,MR 的分类面积差异率和平均差异率均比 MT 的低,说明根据降雨因素修正后的转移概率矩阵更合理;MR 的平均面积差异率 0.18,说明利用该转移概率矩阵模拟面积的精度较高。

然后,将根据降雨修正的转移概率矩阵与 CA 模型耦合,根据邻域以及适宜性图集对 2017-12-

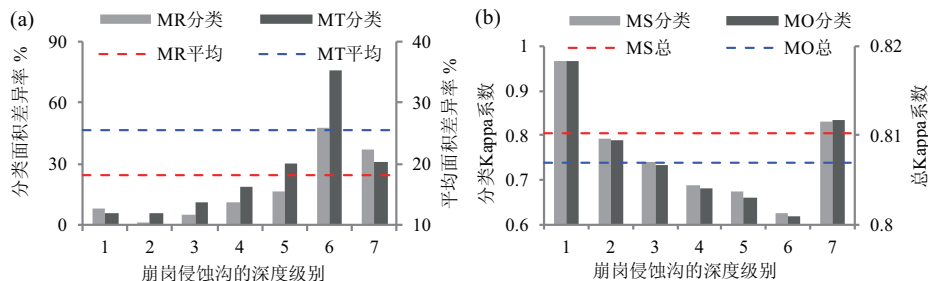


图7 崩岗侵蚀沟模拟模型精度验证:(a) 面积差异率和(b) Kappa 系数

Fig. 7 Accuracy validation for the simulation model of erosion gullies: (a) area difference ratio and (b) Kappa coefficient

02 崩岗侵蚀沟的空间分布进行模拟。并与真实值对比,通过 Kappa 系数进行空间精度的验证,具体如式(14):

$$Kc = \frac{N \sum p_{ii} - \sum (p_{i+} \times p_{+i})}{N^2 - \sum (p_{i+} \times p_{+i})} \quad (14)$$

式中, Kc 为 Kappa 系数; N 为样本数目; p_{ii} 为 i 状态被正确分配的样本数目; p_{i+} 为 i 状态所在列的像元数目; p_{+i} 为 i 状态所在行的像元数目。当 $Kc \geq 0.75$ 时,精度较高;当 $0.4 \leq Kc < 0.75$ 时,精度一般;当 $Kc < 0.4$ 时,精度较差。计算结果如图 7b,其中,MS 表示考虑了影响因子空间差异的模拟结果的 Kappa 系数,MO 表示未考虑该差异的模拟结果的 Kappa 系数。

由图 7b 可以看出,MS 的分类 Kappa 系数和总 Kappa 系数均比 MO 的高,说明考虑了崩岗侵蚀的影响因子空间差异的模拟精度更高;另外 MS 的总 Kappa 系数为 0.81,说明该模型的模拟精度较高。由此完成了该模型的精度验证,可以应用该模型对崩岗侵蚀沟进行预测。

2.4 崩岗侵蚀沟的预测

由于崩岗侵蚀的主要驱动力为降雨,而降雨在一年内不同季节间的差异较大,年际间的差异较小。因此,本研究根据 2017-03-11—2017-12-02 的转移概率以及 2016-12-02—2017-12-02 的降雨数据预测一年后(即 2018-12-02)崩岗侵蚀沟的空间形态。

首先计算出 2017-03-11—2017-12-02 的转移概率矩阵,然后根据 2016-12-02—2017-12-02 的降雨量和降雨强度进行修正,得到预测 2018-12-02 的转移概率矩阵,如表 3。

由表 3 中对角线元素(表示状态不变的概率)可以看出,前 3 个状态的不变概率较大($>60\%$),后 4 个状态的不变概率较小($<40\%$),即变化的概率较大。这说明崩岗侵蚀沟的深度越深,其变化越剧烈,这与崩岗侵蚀沟以下切侵蚀为主的特征相对应。

将该转移概率矩阵与 CA 耦合,得到 2018-12-02 时崩岗侵蚀沟的空间分布(图 2d),然后与 2017-12-02 时的崩岗侵蚀沟分布图叠加求得变化体积,得到 2017-12-02—2018-12-02 崩岗侵蚀沟的泥沙产量,为 653.9 m^3 ,根据崩岗侵蚀沟侵蚀量在崩岗总侵蚀量中的占比,得到该崩岗的总侵蚀量约为 865.18 m^3 。参照蒋芳市^[4]测定的该区域崩岗土壤的平均容重 $1.37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,计算得崩岗侵蚀沟的侵蚀模数和该崩岗的侵蚀模数,分别为 $340606 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $225342 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3 结论

崩岗是我国南方花岗岩区最严重的土壤侵蚀类型之一,为水力和重力复合侵蚀类型。侵蚀沟既是重要的产沙来源又是泥沙的运移通道,对崩岗的侵蚀过程以及崩岗的地貌变化起着重要作用。本研究分别在时间尺度和空间尺度上对崩岗侵蚀沟的形态变化进行动态分析,由此得到崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征,并在此基础上建立了崩岗侵蚀沟的动态模拟模型,通过对崩岗侵蚀沟形态的模拟预测,实现对崩岗侵蚀沟形态变化的预测和侵蚀量的估算。

表 3 2017-12-02—2018-12-02 崩岗侵蚀沟转移概率矩阵 %

Tab. 3 Transition probability matrixes of erosion gullies between 2017-12-02 and 2018-12-02 %

转出状态	转入状态							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	88.5	9.77	1.4	0.33	0	0	0	0
1	6.72	80.96	10.72	1.57	0.03	0	0	0
2	0.01	7.16	64.99	25.9	1.85	0.08	0	0
3	0.01	0.01	4.11	44.51	44.18	7.19	0	0
4	0	0	0.03	1.72	38.42	48.22	7.93	3.69
5	0	0	0.05	0.03	3.21	31.06	37.46	28.19
6	0	0	0.06	0.17	0.11	11.51	25.29	62.87
7	0	0	0	0	0	6.83	54.22	38.95

(1) 本文提取出的崩岗侵蚀沟泥沙产量约占崩岗总侵蚀量的 75%, 符合崩岗同时受重力崩塌、雨滴击溅、片流侵蚀、径流下切等多种侵蚀的客观事实^[24]。

(2) 崩岗侵蚀沟在时间尺度上随降雨因素的变化呈现不同特征: 降雨量是崩岗侵蚀沟侵蚀的关键因子; 其中降雨强度越大, 越有利于侵蚀沟的下切加深侵蚀; 降雨强度越小, 越有利于侵蚀沟的边沿崩塌。

(3) 崩岗侵蚀沟的外扩主要受坡度的影响, 这进一步说明了重力在侵蚀沟沿崩塌过程中的作用; 侵蚀沟的下切加深受影响因子的作用较为规律, 且作用由大及小依次为沟道距离、坡度和坡面高度, 说明水力侵蚀作用最大, 土壤抗蚀能力的作用最小; 侵蚀沟内的堆积不仅在沟道运移泥沙过程中产生, 沟沿崩塌后未被运移也会产生堆积现象。另外, 沟道作为崩岗侵蚀沟的重要侵蚀途径, 其最大作用距离为 4 m。

(4) 根据崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征, 对转移概率矩阵进行降雨因素的修正, 并计算不同变化的空间适宜性, 进而构建了崩岗侵蚀沟的 CA-Markov 动态模拟模型; 其面积差异率和 Kappa 系数分别为 0.18 和 0.81, 说明数量精度和空间精度均较高, 从而验证了该模型的适用性。并应用该模型对案例崩岗 2018-12-02 侵蚀沟的空间分布进行了预测, 从而得到侵蚀沟的年侵蚀量和该崩岗的年侵蚀量, 分别为 653.9 m^3 和 865.18 m^3 , 侵蚀模数分别为 $340606 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $225342 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

根据对崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征分析以及转移概率矩阵可知, 崩岗侵蚀沟主要以径流下切侵蚀为主, 重力崩塌较少, 且侵蚀沟越深, 变化越剧烈。需要注意的是, 随着侵蚀的加剧, 侵蚀沟深度逐渐加深, 这使得侵蚀沟的实际状态超出了模型中现有的状态集合。因此, 该模型不适用于较长时间尺度的模拟预测, 另外崩岗侵蚀呈一定的生命周期性变化^[28], 这也限制了预测的时间长度。另外, 由于崩岗是发生在风化壳上的地貌过程, 因此在对侵蚀沟空间形态进行预测时需要注意所在风化壳的发育速率与其侵蚀速率之间的关系。

参考文献 (References)

[1] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安

全[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 924-925. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Soil and water conservation and ecological safety in China [M]. Beijing: Science Press, 2011: 924-925]

[2] 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 Yin, NING Duihu, PAN Xianzhang, et al. Characters and control of collapsing hill erosion in South China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009, (1): 31-34]

[3] 牛德奎. 华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009: 2. [NIU Dekui. Research on the environmental factors and erosive mechanism of collapsing hill in South China [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009: 2]

[4] 蒋芳市. 花岗岩崩岗崩积体侵蚀机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 33-38. [JIANG Fangshi. Erosion mechanism of colluvial deposits in granite Benggang [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013: 33-38]

[5] 阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 675-680. [RUAN Fushui. Study on slump gully erosion and its control in Fujian Province [J]. Mountain Research, 2003, 21(6): 675-680]

[6] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石. 多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 1-7. [JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi. Effects of repetitive rainfalls on rill erosion of coluvial deposit in granite slope collapse [J]. Science of Soil and Water Conservation. 2014, 12(6): 1-7]

[7] SHI Zhihua, FANG Nufang, WU Fengzhi, et al. Soil erosion process and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. Journal of Hydrology, 2012, 454/455: 123-130.

[8] 雷廷武, NEARING M A. 侵蚀细沟水力特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J]. 水利学报, 2000, 31(9): 49-54. [LEI Tingwu, NEARING M A. Flume experiments for determining rill hydraulic characteristic erosion and rill patterns [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(9): 49-54]

[9] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 204-211. [LIU Xilin, ZHANG Dalin. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 204-211]

[10] ZHOU De, LIN Zhulu, LIU Liming. Regional land salinization assessment and simulation through cellular automaton-Markov modeling and spatial pattern analysis [J]. Science of the Total Environment, 2012, 439: 260-74.

[11] LI Weidong, LI Baoguo, SHI Yuanchun. Markov-chain simulation of soil textural profiles [J]. Geoderma, 1999, 92(1/2): 37-53.

- [12] LIU Ruimin, MEN Cong, WANG Xiujuan, et al. Application of spatial Markov chains to the analysis of the temporal-spatial evolution of soil erosion [J]. *Water Science and Technology*, 2016, **74**(5): 1051–1059.
- [13] SKAGGS R, GHOSH S. Assessing changes in soil erosion rates: A Markov chain analysis [J]. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 2009, **31**(3): 611–622.
- [14] 林敬兰, 黄炎和, 林金石, 等. 福建省崩岗侵蚀的地质地貌背景分析[J]. 亚热带水土保持, 2014, **26**(4): 1–5. [LIN Jinglan, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Background analysis on the geology and landform of collapse erosion in Fujian Province [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2014, **26**(4): 1–5]
- [15] 蒲罗曼, 张树文, 王让虎, 等. 多源遥感影像的侵蚀沟信息提取分析[J]. 地理与地理信息科学, 2016, **32**(1): 90–94 [PU Luoman, ZHANG Shuwen, WANG Ranghu, et al. Analysis of erosion gully information extraction based on Multi-resources Remote Sensing Images [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, **32**(1): 90–94]
- [16] 刘鹏举, 朱清科, 吴东亮, 等. 基于栅格 DEM 与水流路径的黄土区沟缘线自动提取技术研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(4): 72–76. [LIU Pengju, ZHU Qingke, WU Dongliang, et al. Automated extraction of shoulder line of valleys based on flow paths from grid Digital Elevation Model (DEM) data [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, **28**(4): 72–76]
- [17] 林敬兰, 陈志明, 黄炎和, 等. 安溪县崩岗侵蚀空间分布特征探讨[J]. 水土保持研究, 2009, **24**(6): 63–68. [LIN Jinglan, CHEN Zhiming, HUANG Yanhe, et al. Study on the characteristics of spatial distribution of slope disintegration erosion in Anxi County [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, **24**(6): 63–68]
- [18] CAPRA A, PORTO P, SCICOLONE B. Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy) [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **105**(1): 77–87.
- [19] CHAPLOT V, BROWN J, DLAMINI P, et al. Rainfall simulation to identify the storm-scale mechanisms of gully bank retreat [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, **98**(11): 1704–1710.
- [20] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(5): 974–982. [JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on particle size composition of erosion sediment form colluvial deposits of Benggang [J]. *Acta Pedologica Sinica*. 2014, **51**(5): 974–982]
- [21] 刘希林, 张大林. 崩岗地貌侵蚀过程三维立体监测研究——以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(1): 26–31. [LIU Xilin, ZHANG Dalin. Study on erosion process of collapsing hill and gully by three-dimensional monitoring: an example of Liantanggang in Wuhua County of Guangdong Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1): 26–31]
- [22] 刘希林, 张大林, 贾瑶瑶. 崩岗地貌发育的土体物理性质及其土壤侵蚀意义——以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J]. 地球科学进展, 2013, **28**(7): 802–811. [LIU Xilin, ZHANG Dalin, JIA Yaoyao. Soil physical properties of collapsing hill and gully and their indications for soil erosion: an example of Liantanggang collapsing hill and gully in Wuhua County of Guangdong [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, **28**(7): 802–811]
- [23] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 花岗岩崩岗崩积体颗粒组成及分形特征[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(6): 175–180. [JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Soil particle size distribution and fractal dimensions of colluvial deposits in Granite Benggang [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(6): 175–180]
- [24] 魏多落. 南方花岗岩区崩岗剖面特征研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009: 7–9 [WEI Duoluo. Study on characteristics of slope disintegration profile of granite region in South China [D]. Fuzhou: Agriculture and Forestry University, 2009: 7–9]
- [25] 卫杰. 崩岗岩土体无侧限抗压强度及室内改良技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 21–23. [WEI Jie. Study on unconfined compressive strength and indoor improvement technology of collapsing gully rock soil [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017: 21–23]
- [26] 林敬兰, 黄炎和. 崩岗侵蚀的成因机理研究[问题[J]. 水土保持研究, 2010, **17**(2): 41–44. [LIN Jinglan, HUANG Yanhe. 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]
- [27] PASTOR J, BONDE J, JOHNSTON C, et al. Markovian analysis of the spatially dependent dynamics of beaver ponds [J]. *Lectures on Mathematics in the Life Science*, 1993, **23**: 5–27.
- [28] 张大林, 刘希林. 崩岗侵蚀地貌的演变过程及阶段划分[J]. 亚热带资源与环境学报, 2011, **6**(2): 23–28 [ZHANG Dalin, LIU Xilin. Evolution and phases division of collapsed gully erosion landform [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2011, **6**(2): 23–28]

Spatio-temporal Erosion Features and Prediction for the Erosion Gullies on Collapsing Hills

JI Xiang^{1,2}, HUANG Yanhe^{1*}, LIN Jinshi¹, JIANG Fangshi¹, GE Hongli¹

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Gully erosion on collapsing hills is a common type of soil erosion in Southern China, that is severely detrimental to agricultural production and ecological environment. Erosion gullies play a key role in understanding the erosion process and landform development of a collapsing hill. This study investigated a collapsing hill at Longmen Town (Anxi County, Fujian Province, China). Digital Orthophoto Maps (DOMs) and Digital Elevation Models (DEMs) of the area were collected by an unmanned aerial vehicle on 11 March 2017, 21 July 2017, and 2 December 2017. Based on the DOMs and DEMs, erosion gullies were identified by reconstructing the slope surface in the study area. A spatio-temporal analysis of the erosion features for gullies was performed by subdividing the changed patches into three main types: the expanded patch that was the result of side-cutting, the deepened patch indicated down-cutting, and the accumulated patch indicated soil depositing. An erosion gullies simulation model was developed by coupling the recognized spatio-temporal erosion features with Cellular Automata (CA)-Markov model, by refining transition probability matrixes according to rainfall amounts and intensity, and, finally, by regulating cellular allocation rules based on the influence mechanism for each type of changed patch. The study results indicated: 1) Rainfall amounts had a positive correlation with gully erosion, while rainfall intensity increased down-cutting and decreased gully edge collapse; 2) Increase in slope gradient promoted gully side-cutting and down-cutting, whereas both the channel distance and slope height restricted down-cutting and soil depositing; 3) Area difference ratio (0.18) and the Kappa coefficient (0.81) validated the accuracy of the model; 4) Gully erosion simulation model developed on 2 December 2018 showed that the amount and modulus of annual gully erosion in the study area were 653.9 m^3 and $340\,606 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The current study provides a novel way to characterize the process of gully erosion on collapsing hills, and provides data for gully erosion prevention and control measures.

Key words: collapsing hill; erosion gully; erosion feature; CA-Markov; prediction