

引用格式: 林小慧, 何玥, 黄炎和, 林金石, 季翔. “三生空间”视角下基于云模型的崩岗侵蚀危害评价[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 411-421.  
LIN Xiaohui, HE Yue, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, JI Xiang. Cloud model-based assessment of Benggang erosion hazard in the red soil area of South China from a production-living-ecology space perspective [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 411-421.

# “三生空间”视角下基于云模型的崩岗侵蚀危害评价

林小慧<sup>1</sup>, 何玥<sup>1</sup>, 黄炎和<sup>1</sup>, 林金石<sup>1</sup>, 季翔<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建农林大学, 福州 350002; 2. 自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福州 350001)

**摘要:** 崩岗是中国南方红壤区最严重的土壤侵蚀形式之一。崩岗侵蚀危害的类型与大小均存在空间差异, 崩岗危害评估与风险防控应具备针对性和时效性, 并提高评价结果的空间精度。本研究以福建省安溪县官桥镇为研究区, 基于生产、生活、生态空间视角构建崩岗侵蚀危害评价模型, 通过云模型对 2020 年崩岗侵蚀危害进行评价, 并提出相应的治理措施。结果表明: (1) 经济密度、人口密度和崩岗面积占比的权重较大, 分别为 0.278、0.164 和 0.148, 说明经济社会因素和崩岗侵蚀的直接影响因素对危害程度的影响最大。(2) 崩岗侵蚀危害呈中部和东北部高、四周低的空间分布特征, 且对生产空间造成的危害最高, 生态空间次之, 生活空间最小, 在风险管理体系中应重点预防中部和东北部的崩岗侵蚀危害, 尤其是对生产空间的危害防控。(3) 对比基于云模型与未应用云模型的评价结果, 极高危害 V 区的空间分布趋势相似; 应用云模型得出的空间评价结果更加细化, 更能体现崩岗侵蚀危害的整体水平。本研究可进一步丰富崩岗侵蚀危害评价方法, 并为崩岗治理提供建议。

**关键词:** 崩岗; 三生空间; 云模型; 危害评价

**中图分类号:** S157

**文献标志码:** A

崩岗是中国南方红壤区最严重的土壤侵蚀形式之一<sup>[1]</sup>。崩岗切割坡地, 侵蚀泥沙淤积江湖, 酸性产物污染农田耕地, 威胁当地生产、生活及生态空间<sup>[2-3]</sup>。风险防控是崩岗侵蚀治理的有效手段<sup>[4]</sup>, 然而崩岗侵蚀危害的类型与大小均存在较强的空间差异, 降低了崩岗风险防控的有效性和针对性。对中国南方红壤区的崩岗侵蚀危害进行类型梳理与定量评价, 可为该区域的崩岗风险防控与治理提供更为准确的参考依据。

崩岗风险防控方面的研究已取得一些成果。例如, 有学者分别采用信息量与随机森林模型评估比

较福建省安溪县小流域的崩岗发生概率<sup>[5]</sup>; 采用地理探测器和随机森林模型评价江西省兴国县的崩岗易发性<sup>[6]</sup>。这类研究或涉及定性的调查描述<sup>[7-8]</sup>, 或侧重崩岗易发性评价及其精度提升, 对崩岗侵蚀危害的定量评价相对欠缺。以风险防控为目标的崩岗侵蚀危害量化评价与预测已有案例, 例如, 有学者<sup>[4,9]</sup>以土地利用类型为指标, 实现了崩岗侵蚀危害的定量评价, 但未划分崩岗侵蚀危害的类型, 因而难以对崩岗风险防控提供针对性的参考。

常用自然灾害危害性评估指标体系构建方法<sup>[10-12]</sup>, 包括致灾因子-孕灾环境分析框架、压力-

收稿日期 (Received date): 2024-01-18; 改回日期 (Accepted date): 2024-06-04

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41601557); 自然资源部创新中心资助项目 (KY090000042021007); 福建农林大学杰出青年科研人才计划 (XJQ201933)。[National Natural Science Foundation of China (41601557); Innovation Center of Ministry of Natural Resources (KY090000042021007); Outstanding Young Scientific Research Talents Program of Fujian Agriculture and Forestry University (XJQ201933)]

作者简介 (Biography): 林小慧 (1998-), 女, 福建三明人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土地资源可持续利用。[LIN Xiaohui (1998-), female, born in Sanming, Fujian province, M. Sc. candidate, research on sustainable utilization of land resources] E-mail: 735657257@qq.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 季翔 (1984-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 土地可持续利用、土壤侵蚀与风险评价。[JI Xiang (1984-), female, Ph. D., associate professor, research on sustainable utilization of land resources, soil erosion and risk assessment] E-mail: jixiangss@126.com

状态-响应 (Pressure State Response, PSR) 模型和“三生空间”综合评价法等。“三生空间”综合评价法从生产、生活、生态三个空间维度来评估灾情,并针对性提出防灾减灾措施<sup>[13-15]</sup>。社会经济因素是“三生空间”综合评价法中的关键评价指标,然而这类数据多基于统计结果,其空间发展数据的分辨率低,甚至为公里级网格化数据,降低了评价结果的空间精度。

云模型 (Cloud Model) 结合模糊数学与统计学方法,通过最大隶属度原则实现评价等级判别<sup>[16]</sup>,不仅可以提高评价结果的空间精度,且能够客观反映自然灾害风险形成机制的特点<sup>[17]</sup>。例如,有学者<sup>[18]</sup>通过云模型对暴雨洪涝灾害进行风险评价,在一定程度上弱化了空间分辨率低的影响。目前云模型已广泛应用于灾害风险<sup>[17-19]</sup>、生态风险<sup>[20-21]</sup>和水资源承载力<sup>[22-23]</sup>等方面的研究。例如,基于 PSR 模型和博弈论的改进云模型<sup>[23]</sup>,评估城市防洪能力。因此,应用云模型对崩岗侵蚀危害进行评价,将有助于提升整体的空间评价精度,并且更加准确地展示崩岗侵蚀危害在空间上的分布情况。

本研究以福建省安溪县官桥镇为研究区,基于“三生空间”视角,将崩岗侵蚀危害评价划分为生

产、生活和生态空间危害性 3 个子系统,构建崩岗侵蚀危害评价指标体系;运用云模型定量评价,探讨区域崩岗危害等级分布情况。本研究不仅可以为崩岗侵蚀危害评价提供工作框架,从“三生空间”视角构建崩岗侵蚀危害评价指标体系,研究成果还可为崩岗侵蚀危害预警、防治以及管理工作提供参考。

## 1 研究区与数据源

### 1.1 研究区概况

本研究以福建省安溪县官桥镇 (118°05' E、25°01' N) 为研究区域 (图 1)。该区域属亚热带季风气候,年均降雨量为 1600 mm,年均温度为 21℃;地形以丘陵山区为主,地势起伏较大,海拔为 31 ~ 971 m;土壤多为花岗岩发育的红壤和赤红壤,其风化壳厚且疏松,有利于崩岗侵蚀的发生<sup>[24]</sup>。该区域是福建省崩岗最为集中的区域之一,崩岗总数量为 680 处。同时,研究区作为 2023 年度全国综合实力千强镇之一,是安溪县重要的社会经济发展中心,其人口密集、交通发达。崩岗侵蚀对该区域产生的危害显著且多样,具有较好的代表性。

### 1.2 数据来源

本研究所用数据包括: DEM 数据 (2020 年,

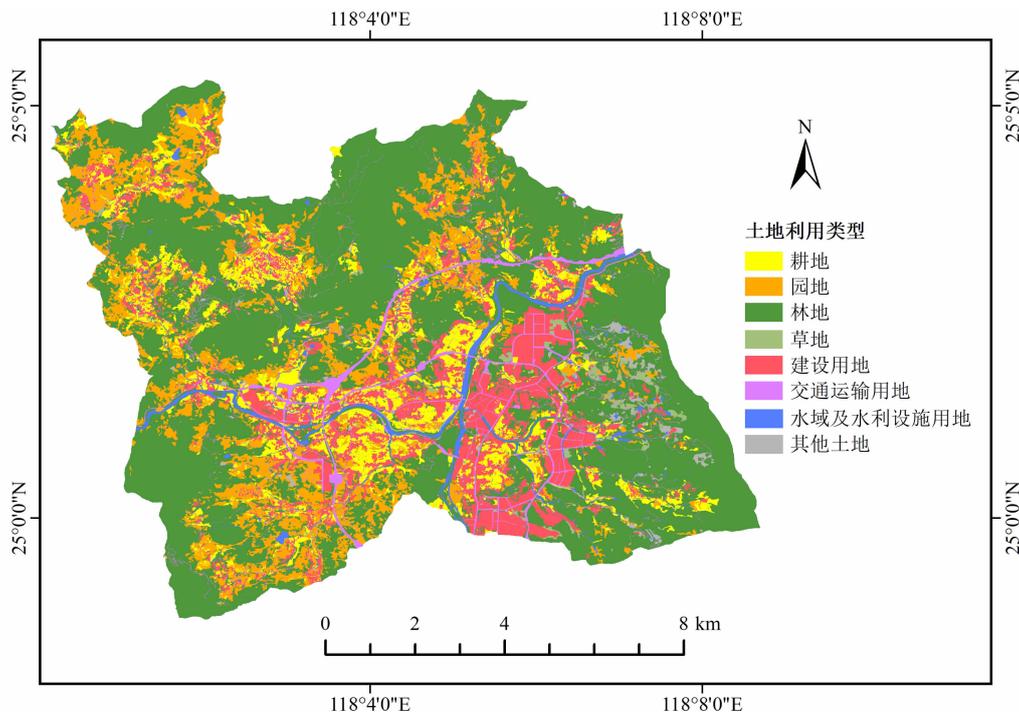


图 1 研究区概况

Fig. 1 Sketch of study area

30 m 分辨率)来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);中国多时期土地利用遥感监测数据集(2020年,30 m 分辨率)来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<https://www.resdc.cn/>);土壤侵蚀模数(2020年,30 m 分辨率)来源于中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用研究中心侵蚀地貌过程与生态过程研究团队;人口密度数据(2020年,100 m 分辨率)来源于基于2020年普查结果修正的WorldPop(<http://www.worldpop.org/>);2020年中国GDP空间分布公里网格数据集来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<https://www.resdc.cn/>);崩岗面积数据来源于福建省安溪县2008年崩岗普查成果。

## 2 研究方法

### 2.1 基于“三生空间”的评价指标体系

参考崩岗侵蚀危害评价指标成果<sup>[9,25]</sup>与崩岗侵蚀特征,侧重研究区可能面临的危害类型与社会经济等实际情况,围绕“三生空间”的主体功能选取评价指标。

生产空间是为物质生产等经营活动提供服务的空间,主要体现在投入和产出<sup>[26]</sup>。考虑到农业生产的重要性以及崩岗侵蚀对耕地的破坏力,选取经济密度和耕地密度作为评价指标。

生活空间是为居住、出行和社交等人居生活提供服务的空间<sup>[27]</sup>。崩岗侵蚀对其危害具体表现在对道路、人员和建筑物的影响上,因此选取道路密度、人口密度和与居民点距离作为评价指标。

生态空间是进行生态保护与建设等行为并提供生态服务的空间<sup>[28]</sup>。崩岗侵蚀对其危害具体表现在对林地、河流等生态用地的影响以及已经造成的生态破坏上,因此选取林地密度、河网密度、崩岗面积占比和土壤侵蚀模数作为评价指标。

通过以上分析,共选取9个指标构建基于“三生空间”的崩岗侵蚀危害评价指标体系(表1)。

由于指标单位与性质不同,采用极差标准化将其转换为同一量纲,并根据指标与崩岗侵蚀危害的关系,划分为正向和负向指标。

正向指标:

$$y_i = (x_i - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

表1 崩岗侵蚀危害性评价指标体系  
Tab. 1 Evaluation index system for the hazard of Benggang

目标层	系统层	指标层	指标说明	指标性质	数据处理	单位
崩岗 侵蚀 危害 评价	生产空间 危害性	经济密度 $X_1$	表明村庄整体经济发展现状	正	通过 ArcGIS 掩膜提取研究区 GDP 数据	百万元/km <sup>2</sup>
		耕地密度 $X_2$	表明崩岗对耕地的影响	正	通过 ArcGIS 提取耕地面积	—
		道路密度 $X_3$	表明崩岗对交通的影响	正	通过 ArcGIS 提取道路长度与数量计算道路密度	km/km <sup>2</sup>
	生活空间 危害性	人口密度 $X_4$	表明潜在受灾人群	正	通过 ArcGIS 掩膜提取研究区 WorldPop 人口数据,并根据当年人口普查数据进行修正	人/hm <sup>2</sup>
		与居民点距离 $X_5$	表明崩岗对居民的影响	负	通过 ArcGIS 提取居民点,并通过欧氏距离构建与居民点的距离	m
	生态空间 危害性	林地密度 $X_6$	表明崩岗对林地的影响	正	通过 ArcGIS 提取林地,并通过欧氏距离构建与林地的距离	—
		河网密度 $X_7$	表明崩岗产生泥沙对河流的影响	正	通过 ArcGIS 水文分析工具提取河网并计算河网密度	km/km <sup>2</sup>
		崩岗面积占比 $X_8$	表明崩岗对村庄的直接影响	正	通过 ArcGIS 属性表中计算崩岗面积占各村庄面积比例	—
		土壤侵蚀模数 $X_9$	表明村庄土壤侵蚀等级状况	正	通过 ArcGIS 掩膜提取研究区土壤侵蚀数据	t/(km <sup>2</sup> ·a)

负向指标:

$$y_i = (\max x_i - x_i) / (\max x_i - \min x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中,  $y_i$  为标准化处理后的指标值;  $x_i$  为原始数据中的第  $i$  个指标;  $\min x_i$  和  $\max x_i$  分别为指标最小值与最大值。

## 2.2 评价指标权重

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是目前常用于危害风险评价的权重计算方法, 通过将复杂问题看作一个系统, 然后对系统的各个因素进行层次划分并给出相对重要性分值, 进而计算指标权重<sup>[29]</sup>。

将基于“三生空间”的崩岗侵蚀危害评价指标体系看作复杂系统, 采用 AHP 计算其指标权重。首先构建梯阶层次结构, 依次对目标层、准则层和因素层进行两两比较构造判断矩阵, 进而计算指标相对权重, 并进行一致性检验。

## 2.3 基于云模型的危害等级确定

云模型是在概率论和模糊数学的基础上, 通过特定的构造算法形成定性语言与定量数值之间的转换模型, 揭示评价对象的随机性和模糊性间的内在联系<sup>[16]</sup>。主要通过逆向云发生器 and 正向云发生器实现计算<sup>[20]</sup>: 采用逆向云发生器计算各个模块的云数字特征值, 正向云发生器基于此计算各单元 (栅格) 的隶属度, 然后根据最大隶属度原则确定最终的评价等级。

### 2.3.1 云数字特征值计算

云数字特征值是采用云模型确定评价等级的基础, 首先需要根据各指标的分布频率平均划分若干区间, 然后运用逆向云发生器计算每个指标不同区间的云数字特征值, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} Ex_i &= (y_{i\max} + y_{i\min}) / 2 \\ En_i &= (y_{i\max} - y_{i\min}) / 6 \end{aligned} \quad (3)$$

$$He = z$$

式中,  $Ex$  为论域空间分布中的数学期望, 用于度量定性概念的基本确定性, 表示指标  $i$  对应云模型的期望;  $En$  为定性概念的不确定性, 表示指标  $i$  对应云模型的熵;  $y_{i\max}$ 、 $y_{i\min}$  分别为指标值的最大值和最小值;  $He$  表示对熵的离散程度,  $z$  为评价模糊阈值的常数, 取值为评价指标最大值的 1%, 因此  $z$  为 0.01<sup>[16]</sup>。

然后, 结合各指标权重, 计算出评价等级的云数字特征值, 公式如下:

$$\begin{aligned} Ex &= \sum_{i=1}^n (Ex_i En_i W_i) / (En_i W_i) \\ En &= \sum_{i=1}^n (En_i W_i) \\ He &= z \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  个指标权重。

### 2.3.2 隶属度计算与评价等级

隶属度是云模型中确定评价等级的最终依据。首先, 通过正向云发生器计算出各评价单元 (栅格) 对不同评价等级的隶属度, 然后根据最大隶属度原则确定最终的评价等级。隶属度计算公式如下:

$$u = \exp[-(y_i - Ex)^2 / 2(En')^2] \quad (5)$$

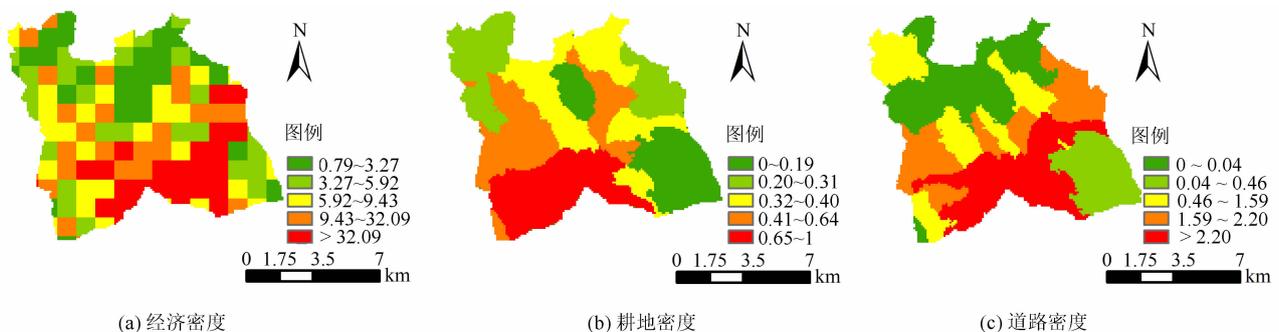
式中,  $u$  为数值  $y_i$  与云模型间的隶属度;  $En'$  为服从正态分布的随机数。

## 3 结果与分析

### 3.1 崩岗侵蚀危害评价结果

#### 3.1.1 指标体系与权重

将各评价指标统一转换为 100 m 分辨率的栅格数据, 并进行无量纲处理与 VIF 共线性诊断, 各指标的 VIF 值均小于 1.522, 说明指标间不存在共线性问题<sup>[30]</sup>。然后, 根据各评价指标的分布频率平均划分为极低危害 I、低危害 II、中等危害 III、高危害 IV、极高危害 V 共 5 个区间, 具体见图 2。



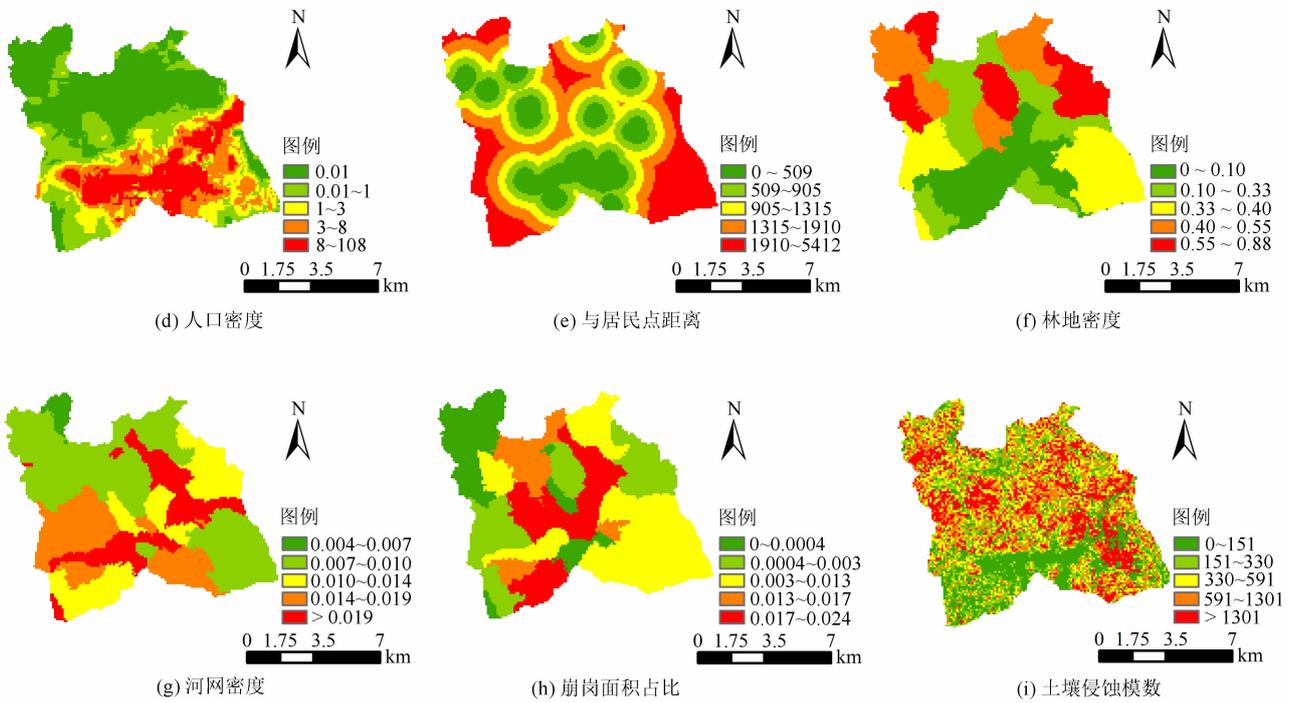
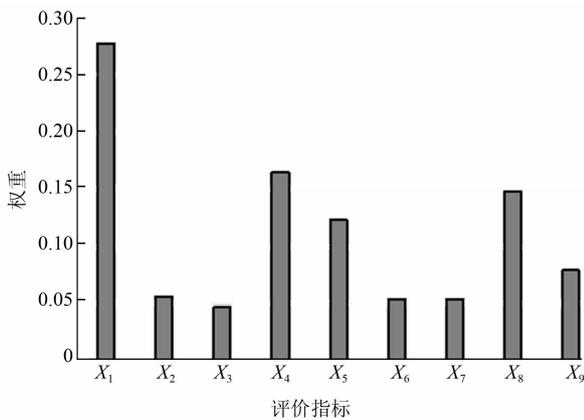


图2 崩岗侵蚀危害评价指标分级图

Fig. 2 Classification of the evaluation indicators for Benggang hazards

借助 SPSS 18.0 对评价指标进行 AHP 权重计算,并通过一致性检验,结果见图 3。

由图 3 可知,经济密度( $X_1$ )、人口密度( $X_4$ )和崩岗面积占比( $X_8$ )的权重较大,分别为 0.278、0.164 和 0.148,这表明经济社会因素和崩岗侵蚀的直接影响范围对危害程度的影响最大。林地密度( $X_6$ )和河网密度( $X_7$ )的权重最小,均为 0.053,相



$X_1$ :经济密度;  $X_2$ :耕地密度;  $X_3$ :道路密度;  $X_4$ :人口密度;  
 $X_5$ :与居民点距离;  $X_6$ :林地密度;  $X_7$ :河网密度;  
 $X_8$ :崩岗面积占比;  $X_9$ :土壤侵蚀模数。

图3 崩岗侵蚀危害评价指标权重

Fig. 3 Weights of the evaluation indicators for Benggang hazards

比之下林地密度和河网密度这类体现生态服务价值方面的指标,在衡量灾害危害程度时的贡献较小。

### 3.1.2 基于云模型的崩岗侵蚀危害评价

#### (1) 云数字特征值

将各评价指标划分的区间值(图 2)代入式(3),计算出各指标不同等级的云数字特征值( $Ex$ 、 $En$ 、 $He$ ),如表 3 所示。

将各评价指标的云数字特征值与指标权重代入式(4),得到“三生空间”和综合评价等级的云数字特征值( $Ex$ 、 $En$ 、 $He$ ),如表 4 所示。

#### (2) 隶属度与评价等级

借助 Matlab R 2021a 软件运行逆向云发生器,计算各栅格的云数字特征值,将以上结果代入式(5)得到各栅格的隶属度。根据最大隶属度原则确定每个栅格的崩岗侵蚀危害等级,并通过 ArcGIS 10.2 生成“三生空间”危害分布图和崩岗侵蚀危害等级分布图(图 4、图 5)。

由图 4 可知,整体上生产空间与生态空间的危害性高于生活空间,且研究区中部和东北部较为严重,其他区域危害等级较低。生产空间的危害等级(图 4a)以高危害 IV 和极高危害 V 等级为主,其余 3 个较低等级在空间分布上较为分散;生活空间的

表 3 各评价指标的云数字特征值

Tab.3 Cloud digital characteristic values of various evaluation indicators

指标	危害等级				
	I	II	III	IV	V
$X_1$	(0.0021, 0.0007, 0.01)	(0.0064, 0.0008, 0.01)	(0.0117, 0.0010, 0.01)	(0.0339, 0.0064, 0.01)	(0.5266, 0.1578, 0.01)
$X_2$	(0.0965, 0.0322, 0.01)	(0.2523, 0.0198, 0.01)	(0.3539, 0.0141, 0.01)	(0.5185, 0.0408, 0.01)	(0.8204, 0.0599, 0.01)
$X_3$	(0.0034, 0.0011, 0.01)	(0.0408, 0.0114, 0.01)	(0.1687, 0.0312, 0.01)	(0.3119, 0.0165, 0.01)	(0.6808, 0.1064, 0.01)
$X_4$	(0, 0, 0.01)	(0.0046, 0.0015, 0.01)	(0.0185, 0.0031, 0.01)	(0.0509, 0.0077, 0.01)	(0.5370, 0.1543, 0.01)
$X_5$	(0.3235, 0.1078, 0.01)	(0.7021, 0.0183, 0.01)	(0.7949, 0.0126, 0.01)	(0.8694, 0.0122, 0.01)	(0.9530, 0.0157, 0.01)
$X_6$	(0.0495, 0.0165, 0.01)	(0.2152, 0.0387, 0.01)	(0.3655, 0.0114, 0.01)	(0.4754, 0.0252, 0.01)	(0.7755, 0.0748, 0.01)
$X_7$	(0.0044, 0.0015, 0.01)	(0.0137, 0.0017, 0.01)	(0.0245, 0.0019, 0.01)	(0.0373, 0.0023, 0.01)	(0.5221, 0.0023, 0.01)
$X_8$	(0.0082, 0.0027, 0.01)	(0.0696, 0.0177, 0.01)	(0.3356, 0.0709, 0.01)	(0.6118, 0.0211, 0.01)	(0.8376, 0.0541, 0.01)
$X_9$	(0.0043, 0.0014, 0.01)	(0.0136, 0.0017, 0.01)	(0.0261, 0.0025, 0.01)	(0.0536, 0.0067, 0.01)	(0.5369, 0.1544, 0.01)

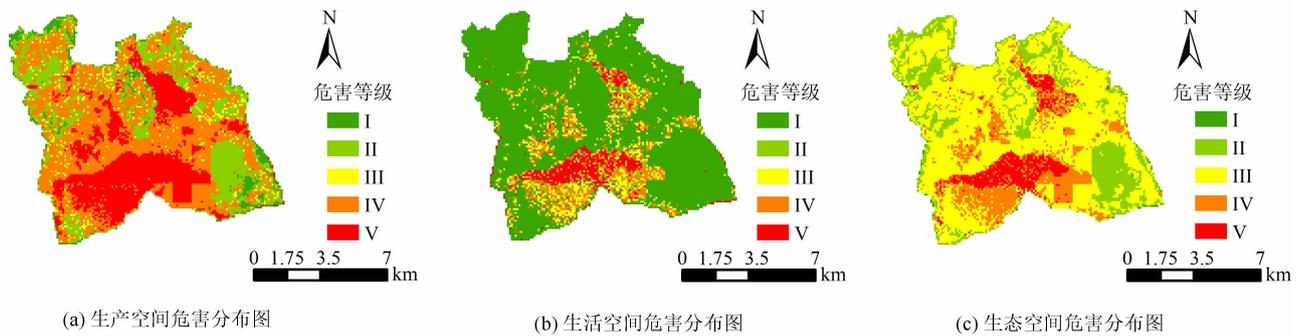


图 4 基于云模型的三生空间危害分布图

Fig.4 Distribution of the hazards in production-living-ecological space based on cloud model

表 4 综合评价等级的云数字特征值

Tab.4 Cloud digital features of the comprehensive evaluation grade

危害等级	$E_x$	$E_n$	$H_e$
I	0.2689	0.0167	0.01
II	0.2711	0.0093	0.01
III	0.3456	0.0160	0.01
IV	0.4271	0.0127	0.01
V	0.5837	0.1120	0.01

危害等级(图4b)以极低危害 I 等级为主,高危害 IV 和极高危害 V 等级主要集中在中部和东北部区域,但斑块较为破碎;生态空间的危害等级(图4c)以中危害 III 为主,高危害 IV 和极高危害 V 等级主要分布在中部与东北部。总体而言,崩岗侵蚀对生产空间造成的危害最高,生态空间次之,生活空间最小;在崩岗防治工作中应注重对生产空间的风险防控,同时兼顾生态与生活空间。

由图 5 可知,总体上,研究区的崩岗侵蚀危害等级呈中部高、四周低的空间分布特征。其中,中部区域危害等级最高,以高危害 IV 和极高危害 V 等级为主,该区域的经济密度高,且人口密集、交通发达。因此,当发生崩岗侵蚀时,该区域受到的损失最为严

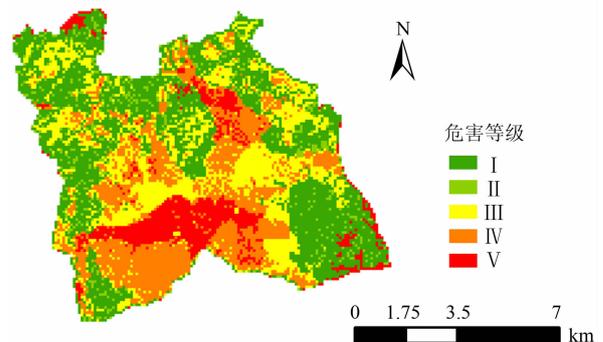


图 5 基于云模型的崩岗侵蚀危害等级分布图

Fig.5 Distribution of the hazard grades of Benggang based on cloud model

重,需高度重视并制定针对性的崩岗侵蚀风险防控措施,以降低潜在的社会经济损失。东北部的危害等级次高,高危害 IV 和极高危害 V 等级的分布相对集中,该区域中河网密度和崩岗面积占比较高,且居民点分布相对集中。因此,崩岗侵蚀对该区域的居民生活和生态环境造成的不利影响较为显著,需加强该区域的崩岗生态修复与综合治理。

### 3.2 综合评价对比分析结果

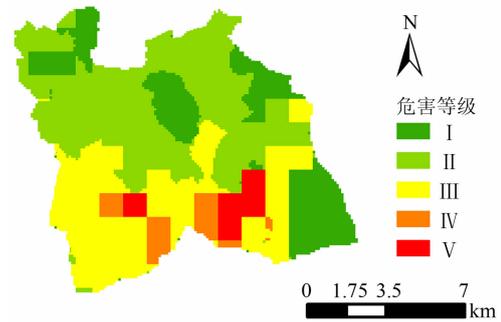
为了进一步明晰云模型在崩岗侵蚀危害评价中的作用,将未应用云模型的评价结果与其对比。通过 ArcGIS 10.2 的栅格计算器将无量纲处理后的评价指标与权重叠加,采用自然间断法划分极低危害 I、低危害 II、中等危害 III、高危害 IV、极高危害 V 共 5 个等级,得到崩岗侵蚀的“三生空间”危害分布图和综合危害评价等级分布图(图 6、图 7)。

由图 6 可知,整体上生活空间的危害性最高的,生产空间次之,生态空间最低。生产空间的危害等级(图 6a)以低危害 II 和中危害 III 为主,极高危害 V 较少且集中分布在中南部,与基于云模型的评价结果(图 7)趋势相似。生活空间的危害等级(图 6b)呈中南部高、四周低的空间分布特征,主要受道路、人口和居民点等因素的影响。生态空间的危害等级(图 6c)呈分散的斑块状分布,极高危害 V 则集中在东北部。这主要是由于该区域河网集中、崩岗与土壤侵蚀较为剧烈,因而生态空间的危害程度较高。

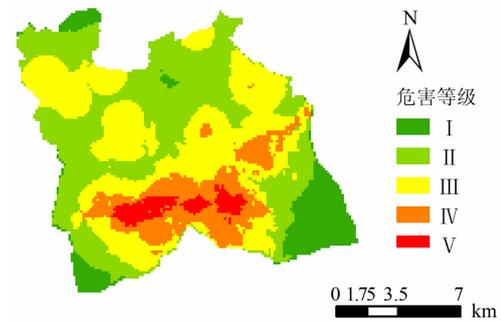
由图 7 可知,整体上崩岗侵蚀危害以低危害 II 和中危害 III 为主,高危害 IV 和极高危害 V 主要分布于区域中南部,这与基于云模型的崩岗侵蚀危害评价结果(图 5)具有相似的分布趋势。与基于云模型的崩岗侵蚀危害评价结果(图 5)相比,未运用云模型的评价结果(图 7)受评价指标原始数据及其权重的影响较为显著,导致评价结果的空间精度较低。基于云模型的评价结果由于经隶属度等处理,弱化了单一评价指标的影响,使评价结果的空间表现更细化,各危害等级分布较为均衡,更能体现崩岗侵蚀危害的整体水平。

## 4 讨论

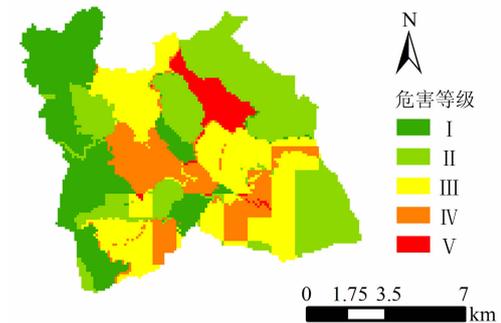
本研究从“三生空间”的视角出发,对崩岗侵蚀危害进行了类型梳理与评价指标体系的构建,并引



(a) 生产空间危害分布图



(b) 生活空间危害分布图



(c) 生态空间危害分布图

图 6 未应用云模型的三生空间危害分布图

Fig. 6 Hazard distribution of the production-living-ecological space with non-applied cloud model

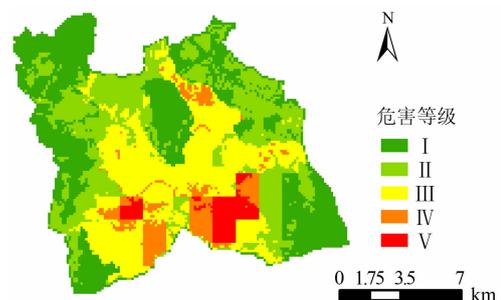


图 7 未应用云模型的崩岗危害评价等级分布图

Fig. 7 Distribution of the collapse hazard evaluation grades with non-applied cloud model

入云模型对崩岗侵蚀危害进行定量评价,显著提升了评价结果的空间精度。

### (1)“三生空间”视角下的危害评价

崩岗侵蚀是造成南方丘陵山区生态安全、粮食安全、防洪安全以及人居环境安全的主要威胁<sup>[8]</sup>。因此,本文基于“三生空间”视角解读崩岗侵蚀危害并构建评价指标体系,覆盖了崩岗侵蚀危害的各种表现形式,并纳入了社会经济等实际因素的影响。该指标体系与现有的研究结果相符<sup>[4,9,25]</sup>。其中,经济密度和人口密度对崩岗侵蚀危害的贡献最大,这与已有研究关于崩岗侵蚀危害中“居民点与建设用地”指标的权重结果较为一致<sup>[4]</sup>,进一步说明了社会经济因素在崩岗侵蚀防治中的重要作用,但由于崩岗治理投入与侵蚀变化等数据难以获取,未能深入分析这部分因素对崩岗侵蚀危害造成的动态影响。因此,如何有效掌握崩岗侵蚀变化情况并将其纳入危害评价是今后需要深入研究的关键问题。

### (2)云模型在空间尺度评价的应用

云模型作为一种将定性语言与定量数值进行转换的工具<sup>[16]</sup>,在本研究中被有效地应用于崩岗侵蚀危害的定量评价,将定性描述的危害等级更为细致地表现在空间分布上。目前风险评价方面的研究多通过 ArcGIS 软件将评价指标与权重进行空间耦合<sup>[32-33]</sup>,但评价结果易受评价指标随机性和模糊性的影响。已有相关研究<sup>[17]</sup>认为应用云模型能够很好的解决这一问题,相较于原有的指标权重法,云模型的评价结果能更准确地反映自然灾害风险的形成机制。这与本研究关于云模型评价结果的对比结论一致,即基于云模型的评价结果更能体现崩岗侵蚀在空间上的整体危害情况,可为崩岗防治工作提供资源配置等方面的建议和依据。

但也有学者指出模型验证需要更加关注与实际数据的对比,而非单纯在模型间的比较<sup>[6,34]</sup>。由于崩岗侵蚀危害表现形式多样,且涉及范围广泛,对生态和生产等方面的实际损失难以获取。因此,本研究着重在空间尺度上比较评价模型的适用性,为地方的崩岗侵蚀防治工作提出区域性的建议。未来研究应继续加强数据收集与验证的工作,特别是聚焦于崩岗侵蚀变化与实际危害损失等方面的数据收集。通过将这些数据与模型输出结果进行对比验证,旨在进一步增强模型的可靠性和有效性,确保能够更加准确地反映实际情况。

### (3)崩岗侵蚀危害等级与防治建议

本研究可以丰富崩岗侵蚀危害评价的理论框架与技术方法,为崩岗风险防控提供具体建议。在崩岗侵蚀防治中,崩岗侵蚀危害等级直接影响着崩岗治理模式的选择,并且危害等级越高,治理优先级越高。对危害等级较高的区域,需引起高度重视,采取预防和综合治理相结合的防范措施,以提升崩岗治理效果;特别是该区域中靠近交通和人口密集区的崩岗群,需采用较为高效的工程措施,并配合生物措施如在坡顶处种植水土保持林等。对于危害等级较低的区域,可采取相对保守的预防保护等防范措施。

## 5 结论

本研究以安溪县官桥镇为研究区,通过“三生空间”视角构建崩岗侵蚀危害评价指标体系,应用云模型对危害程度进行定量评价,并提出崩岗防治的对策建议,以期为崩岗侵蚀危害防治提供参考依据,得到的主要结论如下。

(1)通过层次分析法进行权重计算,经济密度、人口密度和崩岗面积占比的指标权重较大,分别为 0.278、0.164 和 0.148,这说明经济社会因素和崩岗侵蚀的直接影响因素对危害程度的影响最大。

(2)云模型的崩岗侵蚀危害评价呈中部和东北部危害等级高、四周低的空间分布特征,在风险管理体系中应重点预防中部和东北部的崩岗侵蚀危害。从三个空间看,崩岗侵蚀对生产空间造成的危害最高,生态空间次之,生活空间最小,今后需注重建立生产空间的崩岗防控体系。

(3)基于云模型的评价结果与未应用云模型的评价结果中极高危害 V 的空间分布趋势相似,且应用云模型得出的空间评价结果更加细化,更能体现崩岗侵蚀危害的整体水平。

## 参考文献(References)

- [1] 史德明. 南方花岗岩区的土壤侵蚀及其防治[J]. 水土保持学报, 1991, 5(3): 63-72. [SHI Deming. Soil erosion and its control in the granite region of southern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(3): 63-72] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.1991.03.008
- [2] LIU Xinyu, ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, et al. Formation mechanism of collapsing gully in southern China and the relationship with granite residual soil: A geotechnical perspective [J]. Catena,

- 2022, **210**: 105890. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105890
- [3] 岳梦, 刘希林. 崩岗泥砂流流体和流动特性及其输沙研究——以广东德庆县径深崩岗为例[J]. 山地学报, 2022, **40**(6): 859 – 874. [YUE Meng, LIU Xilin. Hydrodynamic properties of Benggang-related mud-sand flow and sediment yield: A case study of Jingshen mud-sand flow at Deqing county of Guangdong, China [J]. Mountain Research, 2022, **40**(6): 859 – 874] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000719
- [4] 程冬兵, 赵元凌, 张平仓, 等. 基于 Logistic 模型的江西省崩岗侵蚀风险评估[J]. 中国水土保持科学, 2017, **15**(6): 106 – 116. [CHENG Dongbing, ZHAO Yuanling, ZHANG Pingcang, et al. On the risk assessment of collapse gully erosion in Jiangxi province based on logistic model [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, **15**(6): 106 – 116] DOI: 10.16843/j.sswc.2017.06.013
- [5] 管家琳, 黄炎和, 林金石, 等. 基于信息量模型与随机森林模型的崩岗风险对比评估[J]. 山地学报, 2021, **39**(4): 539 – 551. [GUAN Jialin, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Comparisons between Benggang risk assessments based on Information model and Random Forest model [J]. Mountain Research, 2021, **39**(4): 539 – 551] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000618
- [6] 郭飞, 赖鹏, 陈洋, 等. 不同环境因子联接方法对崩岗易发性评价的影响[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(5): 123 – 130. [GUO Fei, LAI Peng, CHEN Yang, et al. Influence of different environmental factor connection methods on Benggang susceptibility assessment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, **42**(5): 123 – 130] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.016
- [7] 龙莉, 丁树文, 蔡崇法, 等. 花岗岩红壤丘陵区崩岗侵蚀对农田的危害及治理[J]. 中国水土保持, 2013(12): 24 – 26. [LONG Li, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. The harm and control of Benggang erosion to farmland in granite red soil hilly area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(12): 24 – 26] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2013.12.015
- [8] 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. Characteristics and control of Benggang erosion in red soil region of Southern China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(1): 31 – 34] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2009.01.009
- [9] 程冬兵, 赵元凌, 张平仓, 等. 基于双变量熵信息法的江西省崩岗侵蚀风险评估[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(2): 27 – 32 + 38. [CHENG Dongbing, ZHAO Yuanling, ZHANG Pingcang, et al. Risk assessment of collapse gully erosion in Jiangxi province based on bivariate statistical analysis of entropy information [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(2): 27 – 32 + 38] DOI: 10.11988/ckyyb.20170984
- [10] 熊俊楠, 曹依帆, 程维明, 等. 福建省山洪灾害危险性评价[J]. 山地学报, 2019, **37**(4): 538 – 550. [XIONG Junnan, CAO Yifan, CHENG Weiming, et al. Risk assessment of mountain torrent disasters in Fujian province, China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(4): 538 – 550] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000446
- [11] 牛彦合, 焦胜, 操婷婷, 等. 基于 PSR 模型的城市多灾种风险评估及规划响应[J]. 城市发展研究, 2022, **29**(4): 39 – 48. [NIU Yanhe, JIAO Sheng, CAO Tingting, et al. Urban multi-hazard risk assessment and planning response based on PSR model [J]. Urban Development Studies, 2022, **29**(4): 39 – 48] DOI: 10.3969/j.issn.1006-3862.2022.04.006
- [12] 付朝华, 曾亮, 严钦强, 等. 全域土地综合整治视角下的地质灾害易发区村庄规划策略研究——以河池市坪上村为例[J]. 规划师, 2022, **38**(S1): 88 – 93. [FU Chaohua, ZENG Liang, YAN Qinqiang, et al. Geo-disaster prone village planning from the perspective of comprehensive land reorganization: Pingshang village, Hechi city [J]. Planners, 2022, **38**(S1): 88 – 93]
- [13] 夏照亮, 兰安军, 范泽孟, 等. “三生”空间视角下喀斯特山区流域景观生态风险的时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2023, **43**(2): 256 – 266 + 276. [XIA Zhaoliang, LAN Anjun, FAN Zemeng, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of landscape ecological risks in karst mountain watersheds from productive-living-ecological perspective [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, **43**(2): 256 – 266 + 276] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20221012.003
- [14] 陈晓红, 许晓庆, 刘艳军, 等. 基于三生空间质量的哈长城市群城市脆弱性时空演变格局及驱动力研究[J]. 生态学报, 2022, **42**(15): 6395 – 6405. [CHEN Xiaohong, XU Xiaoqing, LIU Yanjun, et al. Patterns and driving forces of the temporal-spatial evolution of urban vulnerability in Harbin-Changchun urban agglomeration based on the production-living-ecological spatial quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(15): 6395 – 6405] DOI: 10.5846/stxb202106221662
- [15] YANG Xiaojing, WANG Juan, QIAO Na, et al. Spatiotemporal variation pattern of production-living-ecological space and land use ecological risk and their relationship analysis: A case study of Changzhi City, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, **30**(25): 66978 – 66993. DOI: 10.1007/s11356-023-27169-w
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, **6**(8): 28 – 34. [LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004, **6**(8): 28 – 34]
- [17] 洪成, 王桂生, 周家贵, 等. 基于云模型和风险矩阵的自然灾害风险评估[J]. 人民黄河, 2019, **41**(6): 14 – 20. [HONG Cheng, WANG Guisheng, ZHOU Jiagui, et al. Natural disaster risk assessment based on cloud model and risk matrix [J]. Yellow River, 2019, **41**(6): 14 – 20] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.06.004
- [18] 万昔超, 殷伟量, 孙鹏, 等. 基于云模型的暴雨洪涝灾害风险

- 分区评价[J]. 自然灾害学报, 2017, **26**(4): 77 - 83. [WAN Xichao, YIN Weiliang, SUN Peng, et al. Risk division assessment of rainstorm-flood disasters based on cloud model [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, **26**(4): 77 - 83] DOI: 10.13577/j.jnd.2017.0409
- [19] 张威, 胡舫瑞, 蔡巍, 等. 基于 XGBoost 和云模型的地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, **34**(6): 136 - 145. [ZHANG Wei, HU Fangrui, QI Wei, et al. Susceptibility assessment of geological hazard based on XGBoost and cloud model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, **34**(6): 136 - 145] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003 - 8035.202210041
- [20] 韩峰, 刘志博, 尹文华, 等. 基于二维云模型的沙漠高速公路生态风险评价及优选研究[J]. 安全与环境学报, 2023, **23**(10): 3774 - 3783. [HAN Feng, LIU Zhibo, YIN Wenhua, et al. Ecological risk evaluation and optimum selection of desert expressway schemes based on 2-D cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, **23**(10): 3774 - 3783] DOI: 10.13637/j.issn.1009 - 6094.2021.2284
- [21] 焦柳丹, 邓佳丽, 吴雅, 等. 基于 PSR + 云模型的城市韧性水平评价研究[J]. 生态经济, 2022, **38**(5): 114 - 120. [JIAO Liudan, DENG Jiali, WU Ya, et al. Evaluation of urban resilience based on PSR + Cloud model [J]. Ecological Economy, 2022, **38**(5): 114 - 120]
- [22] PENG Tao, DENG Hongwei, LIN Yun, et al. Assessment on water resources carrying capacity in karst areas by using an innovative DPESBRM concept model and cloud model [J]. Science of the Total Environment, 2021, **767**: 144353. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144353
- [23] ZHANG Yang, SHANG Kejian. Cloud model assessment of urban flood resilience based on PSR model and game theory [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, **97**: 104050. DOI: 10.1016/j.ijdr.2023.104050
- [24] 季翔, 黄炎和, 林金石, 等. 基于生态位适宜度的南方花岗岩区崩岗发生敏感性评价方法[J]. 中国农业大学学报, 2017, **22**(10): 159 - 168. [JI Xiang, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Sensitivity assessment method of collapsed gully occurrence in granite region of south China based on niche-fitness [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, **22**(10): 159 - 168] DOI: 10.11841/j.issn.1007 - 4333.2017.10.19
- [25] 林小慧, 黄炎和, 林金石, 等. 基于 DPSIR 模型的崩岗侵蚀风险评价及时空特征[J]. 农业工程学报, 2023, **39**(18): 123 - 131. [LIN Xiaohui, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Risk assessment and spatial-temporal characteristics of Benggang erosion based on DPSIR model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, **39**(18): 123 - 131] DOI: 10.11975/j.issn.1002 - 6819.202304204
- [26] 王强, 陈田田, 李爱迪, 等. “三生”视角下的国土空间利用质量评价——以攀西地区为例[J]. 山地学报, 2020, **38**(2): 290 - 302. [WANG Qiang, CHEN Tiantian, LI Aidi, et al. Evaluation of territorial utilization quality based on "production-living-ecological perspectives": A case study of Panxi region [J]. Mountain Research, 2020, **38**(2): 290 - 302] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000510
- [27] 江曼琦, 刘勇. “三生”空间内涵与空间范围的辨析[J]. 城市发展研究, 2020, **27**(4): 43 - 48 + 61. [JIANG Manqi, LIU Yong. Discussion on the concept definition and spatial boundary classification of "production-living-ecological" space [J]. Urban Development Studies, 2020, **27**(4): 43 - 48 + 61]
- [28] 张令达, 侯全华, 段亚琼. 生态文明背景下三生空间研究: 内涵、进展与对策[J]. 生态学报, 2024, **44**(1): 47 - 59. [ZHANG Lingda, HOU Quanhua, DUAN Yaqiong. A literature review on Production-Living-Ecological Spaces in the context of ecological civilization: Connotation, problems and countermeasures [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(1): 47 - 59] DOI: 10.20103/j.stxb.202211173323
- [29] AHMAD M S, LISA M, KHAN S. Comparative analysis of analytical hierarchy process (AHP) and frequency ratio (FR) models for landslide susceptibility mapping in Reshun, NW Pakistan [J]. Kuwait Journal of Science, 2023, **50**(3): 387 - 398. DOI: 10.1016/j.kjs.2023.01.004
- [30] 曾营, 张迎宾, 张钟远, 等. 基于 X-多层感知器耦合模型的滑坡易发性评价——以贵州省松桃自治县为例[J]. 山地学报, 2023, **41**(2): 280 - 294. [ZENG Ying, ZHANG Yingbin, ZHANG Zhongyuan, et al. Landslide susceptibility evaluation based on Coupled X-multilayer Perceptron model: A case study of Songtao Autonomous county of Guizhou province, China [J]. Mountain Research, 2023, **41**(2): 280 - 294] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000748
- [31] 丁光敏. 福建省崩岗侵蚀成因及治理模式研究[J]. 水土保持通报, 2001, **21**(5): 10 - 15. [DING Guangmin. Causes and control patterns of collapse gully erosion in Fujian province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, **21**(5): 10 - 15] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2001.05.003
- [32] 王瑞丰, 翟延亮, 张宝君, 等. 基于 GIS 与 AHP 耦合技术的承德地区地质灾害危害性评价[J]. 现代地质, 2023, **37**(4): 1023 - 1032. [WANG Ruifeng, ZHAI Yanliang, ZHANG Baojun, et al. Evaluation of geological disaster in Chengde area based on GIS and AHP coupling technology [J]. Geoscience, 2023, **37**(4): 1023 - 1032] DOI: 10.19657/j.geoscience.1000 - 8527.2021.160
- [33] 赵魁. 基于 ArcGIS 平台的广东云浮云安区地质灾害危害程度分区评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, **31**(3): 89 - 95. [ZHAO Kui. The assessment on hazard degree division of geology disaster in Yun'an district based on ArcGIS [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, **31**(3): 89 - 95] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003 - 8035.2020.03.12

[34] 邢立亭, 李净. 基于遥感数据和随机森林算法的黄土高原地区气温模拟及时空变化[J]. 山地学报, 2020, 38(6): 873 – 880. [XING Liting, LI Jing. Temperature simulation and temporal variation based on remote sensing data and random forest

algorithm: A case study in the Loess Plateau region, China [J]. Mountain Research, 2020, 38(6): 873 – 880] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000563

## Cloud Model-Based Assessment of Benggang Erosion Hazard in the Red Soil Area of South China from a Production-Living-Ecology Space Perspective

LIN Xiaohui<sup>1</sup>, HE Yue<sup>1</sup>, HUANG Yanhe<sup>1</sup>, LIN Jinshi<sup>1</sup>, JI Xiang<sup>1,2\*</sup>

(1. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Technology Innovation Center for Monitoring and Restoration Engineering of Ecological Fragile Zone in Southeast China, Ministry of Natural Resources, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** Benggang is one of the most serious forms of soil erosion in the red soil areas of southern China. Since there exists spatial differences in the types and sizes of Benggang hazards, approaches to Benggang hazard assessment and risk control practices should be targeted and time-sensitive, and require more spatial accuracy of assessment results.

In this study, it demonstrated a proper approach of hazard assessment of Benggang in Guanqiao town, Anxi county, Fujian province, a red soil area in southern China. A cloud model-based assessment model of Benggang hazard was built from a production-living-ecology space perspective, and then it was justified by a case study of 2020 for the town, followed by feasible countermeasures to the Benggang occurrences to be proposed.

(1) Economic density, population density, and the proportion of the Benggang area to the area of each village in Guanqiao town were dominant factors, with weights of 0.278, 0.164, and 0.148, respectively, suggesting that the economic and social factors and the direct influencing factors of Benggang collectively regulated hazard level.

(2) The Benggang hazards was characterized spatially by a high clustering in the central and northeastern part of the town, but a sparse formation in the surrounding area. It caused the highest harm to productive-space, followed by ecology-space, and the least to living-space. It is advisable to address the prevention of the Benggang hazards in the central and northeastern part, especially for the production-space, if any in a risk management system.

(3) As comparing the evaluation results based on the cloud model and a non-applied cloud model/regular model, the spatial distribution trends of the very high hazard V zones were almost identical for the both models, but the cloud model-based assessment produced more refined and detailed output, revealing the overall pattern of the Benggang hazards in the study areas.

This study not only enriches methodology for evaluating Benggang hazards but also offers suggestions for an proper Benggang management policy.

**Key words:** Benggang; production-living-ecology space; cloud model; hazard assessment

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)