

DOI: 10.20103/j.stxb.202304070699

蔡源远, 崔婷婷, 刘政, 魏玉杰. 我国南方典型红壤区景观格局对崩岗侵蚀的影响. 生态学报, 2024, 44(7): 2817-2825.

Cai Y Y, Cui T T, Liu Z, Wei Y J. Impact of landscape pattern on Benggang erosion in typical red soil region of southern China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2817-2825.

我国南方典型红壤区景观格局对崩岗侵蚀的影响

蔡源远¹, 崔婷婷², 刘政², 魏玉杰^{2,*}

1 武汉理工大学艺术与设计学院, 武汉 430070

2 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要:崩岗是地质构造、地貌条件、气象水文、植被、人类活动等综合作用下形成的一种复合侵蚀地貌, 崩岗的形成与发展已严重制约了当地农业生产和社会经济发展。通过调整土地利用结构方式、优化景观格局是防治红壤区崩岗侵蚀的重要手段。如何从斑块类型水平揭示景观格局与崩岗侵蚀的关系, 对于控制崩岗侵蚀、提高生态环境效益具有重要意义。以福建省安溪县为例, 运用 ArcGIS 水文分析工具和 DEM 数据将该区域划分为 53 个子流域, 以崩岗面积与密度为响应变量, 景观格局指数为解释变量, 采用冗余分析(RDA)法和通径分析法, 从斑块类型水平探讨景观格局指数与崩岗面积与密度的影响。结果表明: 影响崩岗侵蚀的景观格局指数主要由土地利用类型决定, 其中林地的景观格局指数对崩岗特征的解释度最高(63.82%), 其次为耕地(49.19%)和建设用地(42.01%); 耕地景观类型面积、林地聚集度、建设用地景观形状指数和林地斑块连接度 4 个指标显著影响崩岗特征, 对崩岗特征变化的贡献率分别为 51.5%、26.9%、9.2%和 6.1%, 且 4 个指标对崩岗特征的累积解释度达到 66.2%; 通径分析发现耕地景观类型面积、林地斑块连接度、林地边缘密度、林地斑块类型面积百分比和建设用地边缘密度的综合作用对崩岗面积变化和密度变化的解释程度分别为 71%和 85%, 其中耕地景观类型面积和林地斑块类型面积百分比对崩岗面积和崩岗密度的影响最大, 通径系数分别是 0.499、-0.440和 0.608、-0.342。总体而言, 科学合理的规划耕地、林地和建设用地的空间布局, 提升景观类型整体生态效应, 对抑制崩岗侵蚀具有重要意义。研究结果对于科学规划土地利用、控制红壤区崩岗侵蚀具有重要指导意义。

关键词:土壤侵蚀; 土地利用; 冗余分析; 子流域; 斑块类型水平

Impact of landscape pattern on Benggang erosion in typical red soil region of southern China

CAI Yuanyuan¹, CUI Tingting², LIU Zheng², WEI Yujie^{2,*}

1 Wuhan University of Technology, School of Art and design, Wuhan 430070, China

2 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: Benggang, a compounded erosional landform influenced by geological tectonics, geomorphological conditions, meteorological hydrology, vegetation, and human activities, is widely distributed in southern China. The formation and development of Benggang severely restricted local agricultural production and socio-economy. Adjusting land use structure and optimizing landscape pattern are crucial ways to prevent Benggang erosion in red soil region of southern China. How to investigate the relationship between landscape pattern and Benggang erosion at patch-class level, which is of great significance for controlling Benggang and improving eco-environmental benefits. Herein, a case study with regard to investigate the impact of landscape indices of various patch types on the area and density of Benggang in Anxi County, Fujian Province in southern China. The study area was divided into 53 sub-watersheds based on DEM data using the ArcGIS

基金项目:国家自然科学基金项目(4227071207)

收稿日期:2023-04-07; **网络出版日期:**2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyj@mail.hzau.edu.cn

hydrological analysis tool. The area and density of Benggang were taken as the response variables, and the landscape pattern indices were the explanatory variables. Effects of landscape pattern indices on the response variables were determined by redundancy analysis (RDA) and path analysis at patch-class level. The results indicated that the landscape metrics affecting Benggang erosion were mainly determined by land use types. Specifically, the landscape metrics of woodland had the highest interpretation (63.82%), followed by farmland (49.19%) and land used for building (42.01%). The total class area of farmland, clumpiness of woodland, landscape shape index of land used for building, and patch cohesion index of woodland contributed to 51.5%, 26.9%, 9.2%, and 6.1% of Benggang erosion, respectively. Meanwhile, the integrated impacts of these four variables could explain 66.2% of Benggang variance. Furthermore, the path analysis results showed that the total class area of farmland, patch cohesion index of woodland, edge density of woodland, percentage of landscape of woodland, and edge density of land used for building could jointly explain 71% of the variation in Benggang area and 85% of the Benggang density. Among these five landscape patterns, the total class area of farmland and area percent of landscape of woodland were the most critical factors to Benggang area and density, and the path coefficients were 0.499, -0.440 and 0.608, -0.342, respectively. In general, a scientific spatial layout (such as farmland, woodland, and land used for building) benefits to an improved ecological effect of landscape types, significantly influencing the control of Benggang. This study facilitates scientific planning of land utilization and provides effective measures for Benggang control in red soil region of southern China.

Key Words: soil erosion; land use; redundancy analysis; sub-watershed; patch-class level

景观格局是指不同大小、形状和属性的斑块在空间上的组合分布,既是景观异质性的具体表现,也是自然和人类活动耦合作用的结果^[1]。土地利用反映了人类利用土地进行各种活动的综合信息,是景观格局演变的关键驱动力,也是生态系统结构、功能和过程变化的重要因素^[2]。近年来,研究景观格局对土壤侵蚀过程的影响受到景观生态学研究的关注^[3]。景观格局通过影响各景观类型之间的连通性,改变水文过程,进而影响土壤侵蚀过程^[4-5]。可通过调控各地类的空间配置来实现景观格局优化,从而实现控制土壤侵蚀和区域可持续发展^[6]。景观格局对土壤侵蚀影响的研究,有效提升了黄土高原生态问题的解析^[7]。崩岗作为我国南方红壤区一种独特的侵蚀地貌^[8],地表切割严重,年侵蚀模数介于3—5万 t km⁻² a⁻¹,是剧烈土壤侵蚀模数临界值的2—4倍^[9],而研究发现自然环境与人类活动共同驱动下的不合理土地利用格局是崩岗侵蚀形成的关键驱动因子^[10]。揭示景观格局与崩岗侵蚀之间的定量关系,对于正确认识崩岗侵蚀的形成机理、指导科学合理的治理方案具有重要意义。

景观格局分析是探讨土地利用变化和生态过程相互关系的基础^[11]。景观格局指数则高度概括了景观结构组成和空间格局特征,是景观格局分析中重要的表征指标^[12]。根据景观格局的尺度特征,可将景观指数分为斑块水平、斑块类型水平和景观水平3个层次,而在斑块类型水平上,景观指数与反应变量之间显示出更强的统计学关系^[13],且斑块类型水平景观格局对水土流失过程空间变异的解释能力要高于景观水平^[14]。然而,景观格局指数的构建、选取和生态学意义是景观生态学研究中的难点问题之一^[15]。学者们为此开展了大量的研究。例如,傅伯杰团队将尺度-格局-过程有机结合,建立了景观格局-生态过程-生态系统服务的概念框架,并揭示了土地利用格局对土壤侵蚀的影响机制^[16]。陈利顶等^[17]基于“源-汇”过程提出了景观空间负荷对比指数来反映景观格局对生态过程的影响。杨秋华等^[18]在福建省西溪流域的研究表明,景观类型面积、斑块数量、加权面积的平均形状指数和平均分维数与水土流失成正相关关系,而景观连接度与水土流失呈负相关,平均斑块大小、多样性指数、散布与并列指数与水土流失关系不显著。李晶等^[19]在黄土高原丘陵沟壑区的延河流域发现,地形-水文响应单元景观格局指数与流域产沙量呈显著负相关。以往的研究为景观格局指数的应用和发展做出了积极的贡献,但由于崩岗侵蚀过程的复杂性、空间分布的地带性及其驱动因子的多样性等,景观格局如何影响崩岗侵蚀过程及其路径目前仍缺乏系统研究。

据此,本文以典型崩岗侵蚀区福建省安溪县为研究对象,在斑块类型水平上运用景观格局指数和 RDA 分析法,研究了景观格局与崩岗侵蚀的内在联系,并在此基础上运用通径分析法进一步量化景观格局对崩岗侵蚀的影响路径。本研究旨在为科学规划土地利用和南方红壤区崩岗防治提供支撑与参考。

1 材料与方

1.1 研究区概况

安溪县地处福建省东南部(24°50'N—25°26'N,117°35'E—118°17'E),气候类型为亚热带季风气候,年均气温为 16—22℃,年降水量介于 1600—2000 mm 之间;岩性以花岗岩为主,土壤类型主要是红壤;地势由东南向西北呈递增趋势,地貌以山地、丘陵为主。崩岗调查数据显示,安溪崩岗分布范围广(图 1),全县共有崩岗发生点 12828 个,占全省崩岗总量的 49.29%;侵蚀面积为 2305.442 hm²,占全省崩岗总侵蚀面积的 31.41%^[20]。

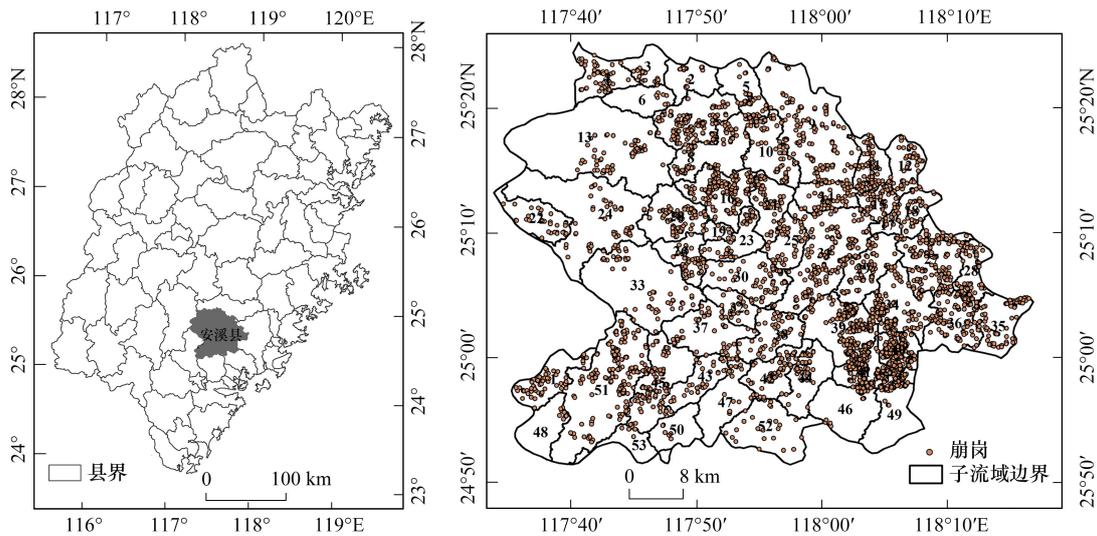


图 1 安溪县地理位置与崩岗点分布图

Fig.1 Geographical location of Anxi County and Benggang occurrence distribution

1.2 数据来源

本研究中的崩岗的位置和投影面积来源于中国水利部长江水利委员会的调查资料,并利用地理空间数据云获得的 5m 分辨率的资源一号 02C 系列 2018 年 11 月卫星图像进行了崩岗校核。DEM 数据来自地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>),像元为 30 m × 30 m。土地利用来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。根据研究目的将土地利用类型划分六类:耕地、林地、草地、水域、建设用地和其他用地(图 2)。

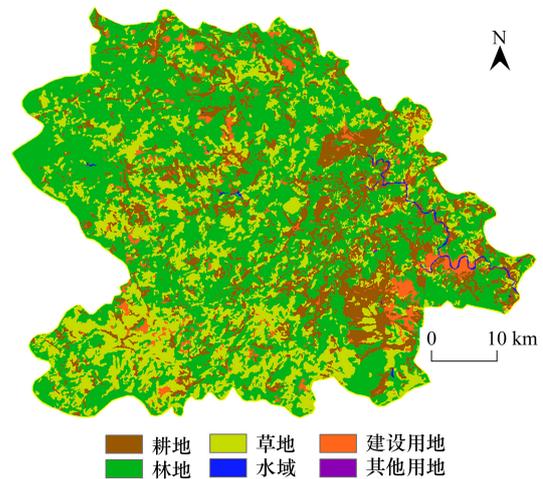


图 2 安溪县土地利用空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of land use in Anxi County

2 研究方法

2.1 崩岗特征指标选取及子流域划定

选取崩岗密度和崩岗面积作为流域单元崩岗侵蚀特征指标,其中崩岗密度等于崩岗数量与所处子流域面积的比值。子流域是崩岗治理最基本的空间单元,子

流域的划定对崩岗空间管理和水土流失防治具有显著的理论与实践意义^[21]。子流域主要是基于 DEM 数据,运用 ArcGIS 10.2 的水文分析工具进行划分,同时结合实际地形对个别子流域进行了修正与归并,最终将研究区划分为 53 个子流域。

2.2 景观指数选取与计算

本文统计并汇总了相关文献在斑块类型水平上的常用景观指数^[5,7,22],各指数值由软件 Fragstats 4.2 计算得出;在此基础上应用 SPSS 24 软件中的共线性检验工具计算景观指数之间的共线性,对方差膨胀因子(VIF)大于 10 的景观指数进行剔除,最终选取的景观指数见表 1。由于研究区其它用地上崩岗占比不足 0.1%,所以本文主要探讨耕地、林地、草地、水域和建设用地这五种地类的景观指数对崩岗侵蚀的影响。为了便于区分不同斑块类型的景观指数,分别以 1、2、3、4、5 来表示耕地、林地、草地、水域和建设用地,用“指标名称+地类代码”的方式表示各土地利用类型对应的景观指数,如:耕地的聚集度表示为 CLUMPY1,林地则为 CLUMPY2,以此类推。

表 1 安溪县斑块类型水平上的景观指数

Table 1 The landscape indices used in analysis at the patch-class level in Anxi County

景观指数 Landscape index	缩写 Abbreviation	景观指数 Landscape index	缩写 Abbreviation
斑块密度 Patch Density	PD	聚集度 Clumpiness Index	CLUMPY
斑块数量 Number of Patches	NP	最大斑块指数 Largest Patch Index	LPI
平均斑块分维数 Mean Patch Fractal Dimension	FRAC_MN	斑块连接度 Patch Cohesion Index	COHESION
斑块形状指数 Patch Shape Index	LSI	散布与并列指数 Interspersion and Juxtaposition Index	IJI
边缘密度 Edge Density	ED	景观类型面积 Total (Class) Area	CA
斑块类型面积百分比 Percentage of Landscape	PLAND	斑块面积变异 Coefficient of Variation in Patch Area	AREA_CV

2.3 数据分析

以 53 个子流域为基本单元,景观指数为解释变量,崩岗密度和崩岗投影面积为响应变量。RDA 分析方法可以用二维排序图直观展现景观指数和崩岗特征指标之间的相关性,也能定量揭示单个景观指数对崩岗侵蚀的贡献率^[9]。在此基础上借助通径分析进一步量化景观指数之间的相互作用及其对崩岗侵蚀的影响路径^[2]。上述分析基于 SPSS 24+Amos 24 和 CANOCO 5 等软件包进行。

3 结果分析

3.1 不同斑块类型景观指数与崩岗特征的 RDA 排序

斑块类型水平上,不同土地利用类型景观指数对崩岗特征的累积解释度排序为:林地>耕地>建设用地>草地>水域。耕地景观指数与崩岗特征呈显著正相关($r=0.71$, $P<0.01$),耕地景观指数可累计解释崩岗特征因子的 49.18%(图 3)。其中,耕地景观的面积、散布与并列指数、聚集度对崩岗侵蚀具有促进作用,三者的贡献率分别为 47.3%、10.5%和 4.3%。林地景观指数对崩岗特征因子的累积解释量最高,达 63.82%(图 3)。林地的聚集度指数、斑块形状指数和散布与并列指数同崩岗特征因子呈正相关关系,其中林地的聚集度指数对崩岗特征的贡献率最大,达到 48.3%。草地景观指数与崩岗特征存在显著正相关关系($r=0.65$, $P<0.01$),景观特征指数累积解释崩岗特征可达 41.25%(图 3)。草地景观的斑块数量、散布与并列指数、平均斑块分维数和聚集度指数是影响崩岗特征的主要指标。而水域景观指数累积解释崩岗特征最小,仅为 35.43%,水域斑块密度与崩岗特征指标呈负相关关系(图 3)。建设用地的景观形状指数和景观类型面积与崩岗特征均呈正相

关系,建设用地的聚集度指数与崩岗特征呈负相关关系,景观指数可累积解释崩岗特征为 42.01%(图 3)。

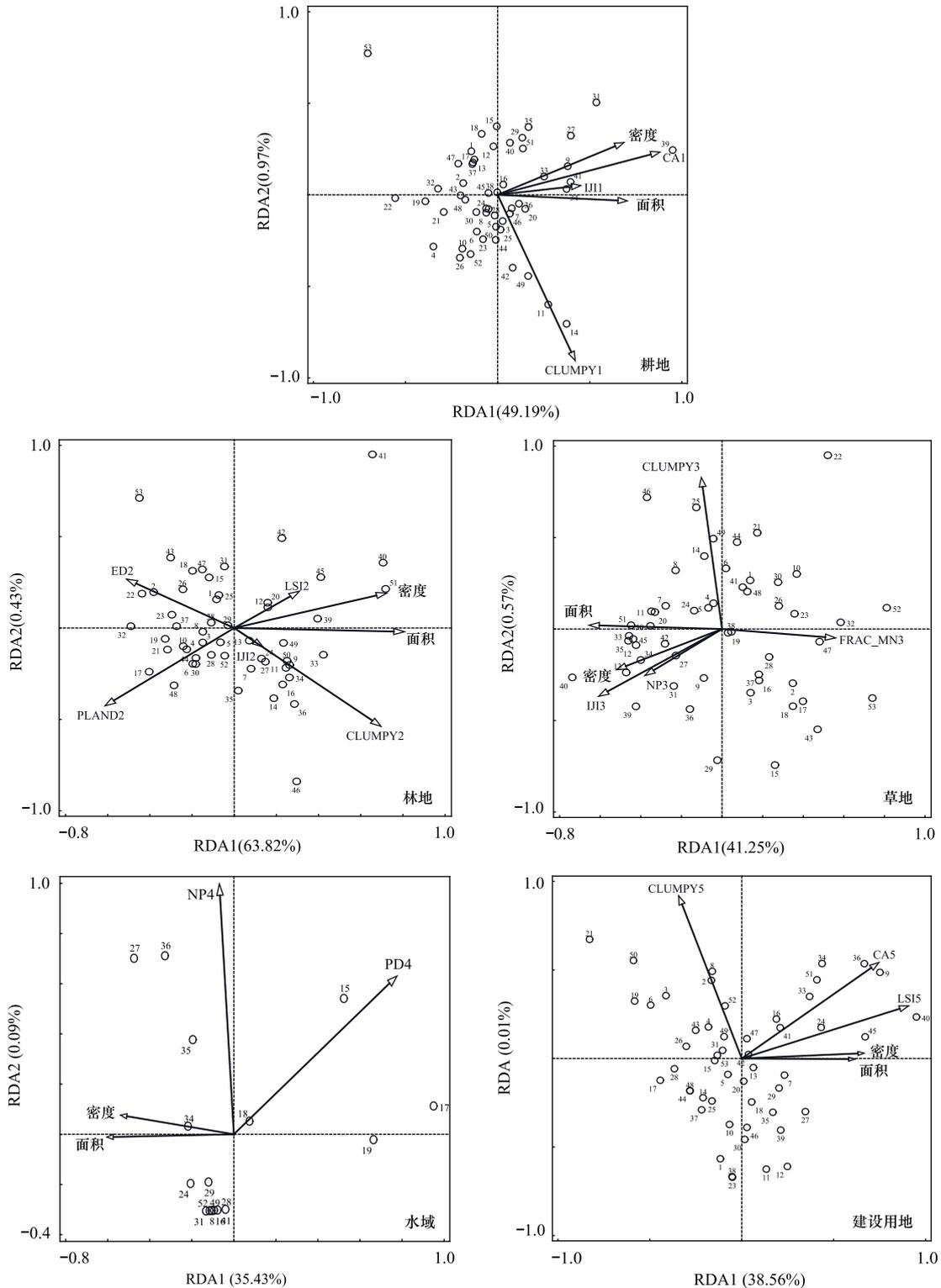


图 3 斑块类型水平上不同景观类型景观指数与崩岗特征指标的 RDA 排序

Fig.3 RDA ordination of different landscape pattern indexes and Benggang characteristics at patch-class level

RDA: Redundancy Analysis(冗余分析); CA1:耕地的景观类型面积; IJI1:耕地的散布与并列指数; CLUMPY1:耕地的聚集度; ED2:林地的景观类型面积; LSJ2:林地的斑块形状指数; CLUMPY2:林地的聚集度; PLAND2:林地的斑块面积变异; CLUMPY3:草地的聚集度; FRAC_MN3:草地的平均斑块分维数; NP3:草地的斑块数量; IJI3:草地的散布与并列指数; NP4:水域的斑块数量; PD4:水域的斑块密度; CLUMPY5:建设用地的聚集度; CA5:建设用地的景观类型面积; LSJ5:建设用地的斑块形状指数

3.2 不同景观格局与崩岗特征的 RDA 特征值及解释度比较

由表 2 可知,五种斑块类型的景观格局与崩岗特征的相关性均达到了显著水平($P<0.05$),由此可见,崩岗侵蚀受到多种景观类型的综合影响。在 RDA 排序轴上不同斑块类型的景观格局与崩岗特征具有不同的相关性与累积解释度。在第一排序轴上,林地景观指数与崩岗特征相关性最高,相关系数为 0.809($P<0.01$),其次分别为耕地和建设用地,相关系数分别为 0.710($P<0.01$)和 0.657($P<0.01$)。这表明在斑块类型水平上,林地、耕地和建设用地的空间格局对崩岗特征具有更高的解释能力。因此,在崩岗侵蚀敏感区要更加关注各景观类型的空间布局,尤其是耕地、林地与建设用地的协调布局。通过利用景观生态学中连接度和网络结构等原理提高区域尺度景观连接度,在生态脆弱区科学规划土地利用格局,以减少水土流失和抑制崩岗侵蚀。

表 2 斑块类型水平上各景观类型 RDA 排序的特征值及累积解释量

Table 2 Eigenvalues and cumulative interpretation of RDA ordination of each landscape type at patch-class level

景观类型 Landscape types	排序轴 Axes	相关性 Correlation	累积解释变异 Explained variation	累积拟合变异 Explained fitted variation	总特征值 All eigenvalues	典范特征值 Canonical eigenvalues	调整后的解释变异 Adjusted explained variation	<i>P</i>
耕地 Farmland	第一轴	0.710	49.19	98.07	1	0.502	47.1%	0.002
	第二轴	0.621	50.16	100.00				
林地 Woodland	第一轴	0.809	63.82	99.34	1	0.642	60.4%	0.002
	第二轴	0.418	64.25	100.00				
草地 Meadow	第一轴	0.651	41.25	98.64	1	0.418	37.0%	0.002
	第二轴	0.474	41.82	100.00				
水域 Water body	第一轴	0.605	35.43	99.74	1	0.355	26.3%	0.04
	第二轴	0.170	35.52	100.00				
建设用地 Land used for building	第一轴	0.630	38.56	99.97	1	0.386	34.7%	0.002
	第二轴	0.063	38.57	100.00				

3.3 斑块类型水平上景观格局与崩岗特征的关系

RDA 第一、二排序轴上景观格局与崩岗特征相关系数分别为 0.843($P<0.01$)和 0.767($P<0.05$),均具有显著相关性(表 2 和图 4)。其中,第一排序轴能够集中反应出所有排序轴中景观格局与崩岗特征关系的绝大部分信息,其对崩岗特征变化的累积解释度为 69.26%,对景观格局与崩岗特征关系的累积解释度高达 97.88%。在 10 个景观格局指数中,耕地景观面积、林地聚集度、建设用地景观的形状指数和林地斑块连接度 4 个指标对崩岗特征变化的贡献率分别为 51.5%、26.9%、9.2%和 6.1%,解释度分别为 36.4%($P<0.01$)、19.0%($P<0.01$)、6.5%($P<0.01$)和 4.3%($P<0.01$),累积解释度达到了 66.2%。由此可见,崩岗特征受多种景观指数的综合影响,其中,耕地景观面积、林地聚集度和建设用地景观形状指数与崩岗特征呈正相关关系,林地斑块连接度对崩岗特征具有抑制作用(图 4)。

为进一步明确斑块类型水平上五种地类的景观格局对崩岗特征的影响,选取了景观指数分别与崩岗面积和崩岗密度进行逐步回归分析。结果表明,林地面积百分比和边缘密度、耕地景观面积是崩岗面积的显著性影响因素,其拟合方程为公式(1);显著影响崩岗密度的景观指数为耕地景观面积、林地斑块连接度和斑块密度以及建设用地边缘密度,其拟合方程为公式(2)。

$$\text{Area} = 972051.53 - 9304.25\text{PLAND2} + 162.70\text{CA1} - 25376.26\text{ED2}, R^2 = 0.63, P = 0.000 \quad (1)$$

$$\text{Density} = 21.53 + 0.001\text{CA1} + 0.13\text{ED5} - 0.22\text{COHESION2} - 4.51\text{PD2}, R^2 = 0.72, P = 0.003 \quad (2)$$

利用通径分析模型可表示斑块类型水平上各景观格局指数与崩岗特征指数之间的相互关系。经过修正,该模型整体上具有良好的拟合效果($\chi^2/df = 1.08 < 3$, $GFI = 0.954 > 0.9$, $RMSEA = 0.04 < 0.05$),能够解释崩岗面积变化的 71%,崩岗密度变化的 85%,说明耕地景观面积、林地斑块面积百分比、建设用地边缘密度、林地边

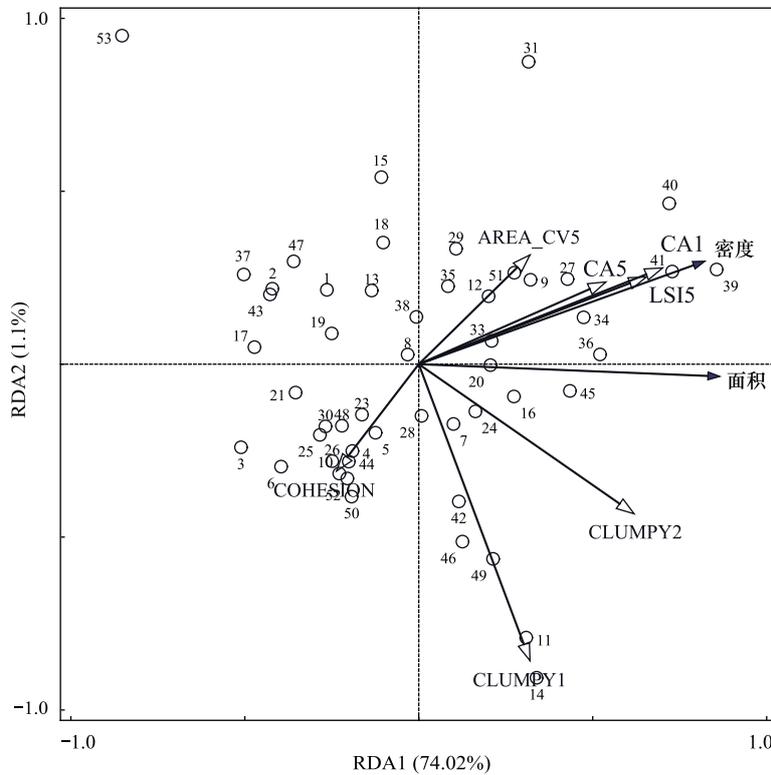


图 4 斑块类型水平景观格局指数与崩岗特征指标的 RDA 排序

Fig.4 RDA ordination of landscape pattern indexes and Benggang characteristic indexes at patch-class level

AREA_CV5:建设用地斑块面积变异

缘密度和林地斑块连接度这 5 个景观指数对崩岗密度与面积具有较好的特征变异解释能力。从景观指数对崩岗特征的直接与间接作用来看,斑块类型水平上对崩岗面积影响最大的景观指数是耕地景观面积,其次为林地面积百分比,通径系数分别为 0.499、-0.440,对崩岗密度有重要影响的景观指数是耕地景观面积与林地面积百分比,通径系数分别为 0.608、-0.342。说明耕地面积减少与林地空间占比增加可在一定程度上有效抑制崩岗面积的扩大与崩岗密度的增加,并且可以通过建立研究区景观格局指数与崩岗特征因子的定量关系来有效预测该区域崩岗侵蚀的发生与变化(图 5)。

4 讨论

土地利用蕴含了大量人类活动的信息,通过改变土地利用结构从而影响生态系统结构、功能和生态环境质量^[2]。目前进行土地利用与崩岗侵蚀相互关系研究时,多聚焦在土地利用与崩岗空间分布关系上^[23],过于强调单一地类对崩岗侵蚀的影响,而忽略了不同土地利用类型空间格局特征对崩岗侵蚀的指示意义。景观格局对土壤侵蚀、土壤养分调节、水分分布及产流产沙过程均有重要影响^[24],因此有必要从景观生态学的视角来深入理解景观格局对崩岗侵蚀的影响机制。

本研究表明,林地景观格局对崩岗特征的解释度最高。林地景观在侵蚀产流产沙过程中起着决定性作用^[20]。林地斑块的连通性越高,则对崩岗的抑制作用越强,其主要原因是由于较高的斑块连通性提升了整个景观生态系统对外界扰动的适应性,从而推动林地景观功能更好的实现^[25];而林地斑块形状复杂、面积小且连通性低,廊道被截断,则极易受到外界的干扰^[26-27],将会致使生态系统趋于恶化,在生态敏感区易促发水土流失以及崩岗侵蚀发生。林地主要通过冠层对降雨的截留作用、枯枝落叶层对雨滴溅蚀的消减作用及根系对土壤抗冲性、渗透性和剪切强度等的改善减少土壤侵蚀^[28],从而有效抑制崩岗侵蚀。林地景观空间格局可通

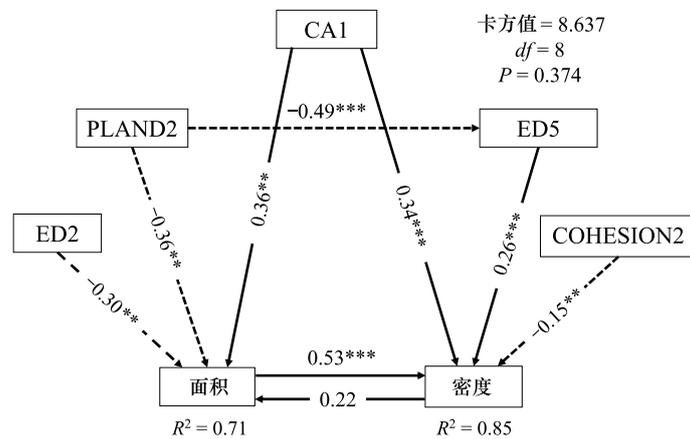


图5 景观指数与崩岗特征指标的通径分析

Fig.5 Path analysis on the relationship between landscape indexes and Benggang characteristic indexes

实线和虚线箭头分别代表正相关和负相关;*** $P < 0.001$, ** $0.001 < P < 0.01$, * $0.01 < P < 0.05$; ED5:建设用地的景观类型面积

通过对降雨产流、热量等的再分配从而改变土壤理化性质和土壤可蚀性^[29-30],进一步影响崩岗侵蚀过程。而人类盲目毁林开垦尤其是在陡坡随意砍伐林木使林地斑块破碎化,致使生态系统抗干扰性下降,由此加速生态退化和崩岗侵蚀形成。

相比于林地,耕地景观格局对崩岗侵蚀的解释度居于第二位。耕地的水土保持功能相对较弱,在一定的气候、径流与地形耦合条件下耕地表层土壤结构的稳定性易被破坏,尤其是盲目开垦坡地,再加上坡面径流的搬运和冲刷作用会使土壤有机质含量减少,土壤抗侵蚀能力减弱,土体发生崩解,从而诱发崩岗侵蚀^[31]。而在花岗岩母质土壤分布的生态脆弱区人为持续进行不合理的耕地扩张或开垦、增大耕地破碎度,则会降低耕地生态安全性,从而加剧崩岗侵蚀的发生^[32]。大面积的毁林开荒也是触发崩岗侵蚀的重要原因^[33]。

草地的丛生度指数与崩岗密度呈负相关关系,表明较高的草地斑块丛生度有利于预防土壤侵蚀,这与Ouyang等^[34]研究结果一致。水域斑块密度与崩岗特征指标也呈负相关关系,表明水域斑块密度越低,则水域的形状特征越大,更易发生土壤侵蚀^[35]。而本研究区水域上崩岗占比为0.3%,造成水域上崩岗侵蚀的原因可能是由于花岗岩风化壳覆盖区内水系尤其是三级支流的溯源侵蚀,集水区水流冲刷,导致土体润湿、抗剪强度降低^[36]。建设用地景观格局指数累积解释崩岗特征为42.01%(图3)。研究发现,社会经济是影响建设用地景观格局演变的重要因素,当经济发展和生态保护耦合协调度较低时,容易促发崩岗侵蚀;而当区域距城镇越远时,建设用地布局分散,斑块聚集度较低,建设用地景观格局对崩岗侵蚀的影响有限^[37]。

在区域崩岗治理上,需要科学评估生态系统稳定性,提升耕地空间布局的合理性,加快推进生态脆弱区耕地的科学规划、管理与功能提升^[38];提高林地斑块的连通性和聚集度、优化调整林地结构、减少人为活动对林地的破坏和不合理干预、实行封育等措施来促进植被恢复与生长^[39];其它的土地利用格局的发展也要趋于生态化、集约化和合理化,注重经济建设与生态环境的协调发展^[40]。

5 结论

景观格局表征了人类活动对景观生态系统的影响,其对崩岗侵蚀的响应极为复杂。本文以福建省安溪县为研究对象,借助冗余分析和通径分析法,从斑块类型水平上探讨了五种地类的景观格局指数对崩岗侵蚀的指示作用,得出了影响崩岗侵蚀的关键景观格局指标。结果表明:在斑块类型水平上,林地的景观格局对崩岗侵蚀特征的解释度最佳;在各土地利用类型的景观格局指数中,耕地景观类型面积、林地聚集度、建设用地景观形状指数和林地斑块连接度是影响崩岗侵蚀的主要景观格局因子;耕地景观类型面积和林地边缘密度是影响崩岗面积和密度的共性指标;各景观指数与崩岗特征指标间存在明显的直接与间接作用,耕地景观类型面

积对崩岗面积影响最大(通径系数为 0.499),其次为林地斑块类型面积百分比(通径系数-0.440),耕地面积与林地面积百分比对崩岗密度具有重要影响,通径系数分别为 0.608、-0.342。然而,鉴于崩岗侵蚀的复杂性,今后需进一步考虑景观格局、地形、植被、土壤、人类活动等要素,而构建和发展更为宽广的景观格局指数体系对解析侵蚀防控的效益仍十分必要。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰,吕一河,陈利顶,苏常红,姚雪玲,刘宇. 国际景观生态学研究新进展. 生态学报, 2008, 28(2): 798-804.
- [2] 陈利顶,李秀珍,傅伯杰,肖笃宁,赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [3] Kareiva P, Wennergren U. Connecting landscape patterns to ecosystem and population processes. *Nature*, 1995, 373(6512): 299-302.
- [4] de Vente J, Poesen J, Arabkhedri M, Verstraeten G. The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(2): 155-178.
- [5] 黄志霖,田耀武,肖文发,马德举. 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响. 生态学报, 2013, 33(23): 7487-7495.
- [6] 陈晓燕. 不同尺度下紫色土水土流失效应分析[D]. 重庆:西南大学, 2009.
- [7] 郑明国,蔡强国,陈浩. 黄土丘陵区沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响. 生态学报, 2007, 27(9): 3572-3581.
- [8] Xu J X. Benggang erosion: the influencing factors. *Catena*, 1996, 27(3/4): 249-263.
- [9] 邓羽松. 南方花岗岩区崩岗特性、分布与地理环境因素研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2018.
- [10] Wei Y J, Liu Z, Wu X L, Zhang Y, Cui T T, Cai C F, Guo Z L, Wang J G, Cheng D B. Can Benggang be regarded as gully erosion? *CATENA*, 2021, 207: 105648.
- [11] 陈利顶,刘洋,吕一河,冯晓明,傅伯杰. 景观生态学中的格局分析:现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [12] 郭建国. 景观生态学中的十大研究论题. 生态学报, 2004, 24(9): 2074-2076.
- [13] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, 2001, 16(3): 235-254.
- [14] 王计平,杨磊,卫伟,陈利顶,黄志霖. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较. 生态学报, 2011, 31(19): 5531-5541.
- [15] 王计平,陈利顶,汪亚峰. 黄土高原地区景观格局演变研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(5): 535-542.
- [16] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Zhou H F, Wang J. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China. *CATENA*, 2000, 39(1): 69-78.
- [17] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,巩杰. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [18] 杨秋华,黄炎和,范胜龙,林金石,季翔. 南方红壤丘陵区流域景观格局与水土流失的关系. 福建农林大学学报:自然科学版, 2017, 46(3): 329-335.
- [19] 李晶,周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析. 地理学报, 2014, 69(7): 933-944.
- [20] 彭建,王仰麟,张源,叶敏婷,吴健生. 土地利用分类对景观格局指数的影响. 地理学报, 2006, 61(2): 157-168.
- [21] 程冬兵,张平仑. 南方崩岗侵蚀风险评估构想. 水土保持通报, 2016, 36(4): 346-350.
- [22] 王计平,杨磊,卫伟,陈利顶,黄志霖. 黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平. 生态学报, 2011, 31(19): 5739-5748.
- [23] Wei Y J, Liu Z, Zhang Y, Cui T T, Guo Z L, Cai C F, Li Z X. Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach. *Geoderma*, 2022, 420: 115869.
- [24] 刘宇,吕一河,傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.
- [25] Haines-Young R. Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes. *Progress in Physical Geography*, 1996, 20(4): 418-445.
- [26] Hanski I. Metapopulation dynamics. *Nature*, 1998, 396(6706): 41-49.
- [27] 马克明,傅伯杰. 北京东灵山地区景观格局及破碎化评价. 植物生态学报, 2000, 24(3): 320-326.
- [28] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展. 土壤学报, 2008, 45(5): 802-809.
- [29] 朱战强,刘黎明,张军连. 退耕还林对宁南黄土丘陵区景观格局的影响——以中庄村典型小流域为例. 生态学报, 2010, 30(1): 146-154.
- [30] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, Zhai J. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *CATENA*, 2014, 121: 151-163.
- [31] Amundson R, Berhe A, Hopmans J, Olson C, Sztein A, Sparks D. Soil and human security in the 21st century. *Science*, 2015, 348(6235): 1261071.
- [32] 傅伯杰,张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [33] 吴志峰,王继增. 华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系. 水土保持学报, 2000, 14(2): 31-35.
- [34] Ouyang W, Skidmore A K, Hao F H, Wang T J. Soil erosion dynamics response to landscape pattern. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(6): 1358-1366.
- [35] Gysels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4): 371-384.
- [36] 葛宏力,黄炎和,林敬兰,林金石,林世清,蒋芳市,魏多落. 区域水系与崩岗空间分布的关系. 福建农林大学学报:自然科学版, 2011, 40(2): 187-191.
- [37] 伍星,沈珍瑶. 长江上游地区土地利用/覆被和景观格局变化分析. 农业工程学报, 2007, 23(10): 86-92, 291.
- [38] 裴欢,魏勇,王晓妍,覃志豪,侯春良. 耕地景观生态安全评价方法及其应用. 农业工程学报, 2014, 30(9): 212-219.
- [39] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [40] 彭月,何丙辉,黄世友. 基于景观破碎化的三峡库区(重庆)土壤侵蚀评价. 土壤学报, 2012, 49(4): 636-645.