

桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性

张笑楠^{1,2,3}, 王克林^{1,2,*}, 张伟^{1,2}, 陈洪松^{1,2}, 何寻阳^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125; 2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以桂西北喀斯特区域——广西环江县为研究区, 基于景观结构信息对研究区的生态环境脆弱度进行评价。将灰关联分析法应用于指标体系的构建, 选取破碎度、分维数、聚集度、土壤侵蚀指数、植被覆盖指数和喀斯特地貌面积比作为评价指标, 计算了研究区的景观类型脆弱度和区域生态环境脆弱度, 并对结果进行半变异函数分析和空间插值分析, 揭示了研究区生态环境脆弱度的空间分布特征。研究表明: (1) 研究区林地景观脆弱度最高, 其次为未利用地和耕地; (2) 半变异函数分析表明, 区域生态环境脆弱度指数具有明显的空间相关性, 相关距离在 25km 左右, 区域脆弱度的空间变异在 15km 以内表现出明显的各向同性, 15km 以外表现出各向异性; (3) 区域生态环境脆弱度整体上表现出从东北到西南逐渐增大的趋势, 局部随着高程的增加表现出“高-中-低-中-高”的变化特征, 地质和地形是该区生态环境脆弱度空间格局的两大控制因素。

关键词:喀斯特; 景观结构; 生态环境脆弱性; 空间变异; 广西

文章编号: 1000-0933(2009)02-0749-09 中图分类号: Q148, Q988, X171.1, X24 文献标识码: A

The quantitative assessment of eco-environment vulnerability in karst regions of Northwest Guangxi

ZHANG Xiao-Nan^{1,2,3}, WANG Ke-Lin^{1,2,*}, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Hong-Song^{1,2}, HE Xun-Yang^{1,2}

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0749 ~ 0757.

Abstract: The eco-environment vulnerability assessment was conducted in Huanjiang, a karst region of northwest Guangxi, based on the landscape structure. Grey relational grade analysis was adopted to study the assessment index system, and we finally selected fragmentation, perimeter-area fractal dimension, aggregation index, area proportion of karst landforms, soil erosion index and vegetation coverage index as the evaluation factors to construct the eco-environment vulnerability model to evaluate the vulnerability of landscape types and the regional eco-environment vulnerability degree, semi-variogram analysis and ordinary Kriging interpolation were conducted to get the distribution map of regional eco-environment vulnerability. The results showed that: (1) The vulnerability of the landscapes of forest lands was the highest, followed by unused land and farmland; (2) The semi-variogram analysis showed that the regional eco-environment vulnerability had a relatively good spatial autocorrelation in the study area, and the range of autocorrelation extended to about 25km. The spatial variability of the regional eco-environment vulnerability was in an obvious isotropy within 15km, but existed distinct anisotropy character outside 15km; (3) From the global aspect, the regional vulnerability index was higher in southwest area than that in northeast area, and it was highly related to the elevation. This showed that geology and topography of the study area were the dominant factors affecting the spatial pattern of the regional eco-environment vulnerability.

基金项目:中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-08); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题资助项目(2006CB403208); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿资助项目(ISACX-LYQY-QN-0704)

收稿日期: 2008-10-07; 修订日期: 2008-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kelin@isa.ac.cn

Key Words: karst; landscape spatial structure; eco-environment vulnerability; spatial variation; Guangxi

生态环境脆弱性是生态系统在特定时空尺度相对于外界干扰所具有的敏感反应和自恢复能力,是自然属性和人类经济行为共同作用的结果^[1]。开展区域生态环境脆弱度评价不仅对保护生态资源及生态环境有重要意义,同时对土地经营、资源合理利用及区域可持续发展也有重要指导意义。随着世界各国对社会经济可持续发展的认同和重视,区域生态环境脆弱度研究已经受到越来越多地关注,成为了当前学科研究的一个重要方向^[2]。当前,国内学者在区域生态环境脆弱度评价方面开展了大量的研究^[3-5],然而已有研究多是由收集到的自然环境、社会经济统计数据等离散的点上数据作支撑,以行政区域或流域为评价单元进行的,较大程度上限制了对生态环境脆弱性自然空间分布规律的揭示。为了解决这个问题,部分学者从景观视角出发,采用能准确指示各种生态影响的空间分布与梯度变化特征的景观结构信息建立评价模型,实现了生态环境脆弱度评价的定量化和空间化^[6,7]。然而由于景观格局指数种类繁多,有一些基本功能相同,反映相同格局特征的指数,因为计算公式的不同,反映出来的规律却不完全一致^[8],影响了景观格局特征对生态环境脆弱度的表征效果^[7],如何客观、科学的确定反映生态环境脆弱性的景观格局指数及其权重还需要进一步的研究。

中国西南喀斯特山区位于世界三大连片喀斯特发育区之一的东亚片区的中心,喀斯特地貌广泛发育,地形条件复杂,该区域独特的地质环境背景加上生存型经济发展阶段不合理的土地开发方式使该区域生态环境脆弱程度不断恶化,土壤侵蚀退化严重,人地关系矛盾十分尖锐^[9]。为了合理可持续的利用资源,防止喀斯特区域生态环境进一步退化,许多学者对喀斯特生态环境脆弱性有所研究^[10-14],但是基于景观格局信息的相关研究还比较少见。基于此,本研究以喀斯特广泛发育的广西环江县为研究区域,基于景观格局信息进行生态环境脆弱度评价,并将灰色关联度分析方法运用于景观格局指数的选取和评价指标权重的确定,较为客观的构建了评价指标体系,在此基础上分析了各景观类型的脆弱度,揭示了研究区域生态环境脆弱度的自然空间分布特征,为该地区生态治理和规划提供科学依据。

1 研究区域与资料准备

1.1 研究区概况

选择桂西北典型喀斯特地区——环江毛南族自治县作为研究区,该区位于广西西北部,地处云贵高原东南侧、九万大山坡麓地带(24°44'~25°33' N, 107°51'~108°43' E),土地总面积 4507.02km²。总地势北高南低,四周山岭绵延,全县大部分面积属山地,中部偏南为丘陵,略成盆地。属中亚热带季风气候,气候温暖,雨量充沛,年均气温 15.7~19.9℃,无霜期 290d,年均日照时数 145h,年均降水量 1389~1750mm,降水集中于 4~9 月份,占全年降雨量的 70%,年均蒸发量约 1571mm。自然土壤有红壤、黄红壤、黄壤、棕色石灰土、黑色石灰土 6 个土壤亚类,成土母岩包括石灰岩、白云岩、白云岩夹碎屑岩、灰岩夹碎屑岩、碎屑岩。在亚热带高原季风湿润气候和当地水热条件的作用下,境内喀斯特山地、丘陵、峰丛洼地、峰林谷地交错发育,分布广泛。

1.2 研究区脆弱生态环境特征

喀斯特是多相多层复杂界面体系,生态系统表现出对外界变化的敏感性强、自我调节和自我修复的能力低、抗干扰能力弱、稳定性差等一系列生态脆弱特征^[9]。这种生态脆弱性在本研究区主要表现为:可溶性的碳酸盐岩广泛出露,岩溶发育广泛,地势起伏大,地面切割破碎;植被抗干扰能力低,在人类干扰下极易发生逆向演替,且恢复难度大;成土速度缓慢,土层薄且土被分布不连续,加上碳酸盐岩母岩与土壤之间通常存在着明显的硬软界面,岩土之间的亲和力与粘着力差,极易发生土壤侵蚀,喀斯特区域土壤长期处于负增长状态;降水量大但过于集中,加上喀斯特特有的双层水文地质结构,旱涝灾害频繁发生;研究区人口压力大,毁林开荒、陡坡耕种等不合理利用方式加剧了土壤侵蚀、植被退化等生态问题的发生,导致整个区域生态环境的恶性循环。

1.3 资料准备及预处理

所用资料包括研究区 2000 年分辨率为 30m 的 Landsat TM 影像、2000 年 1:25 万土地利用数据、1:25 万

DEM 数据、1:25 万地质图、1:25 万行政区划图和第二次土壤普查数据,由中国科学院亚热带农业生态研究所和中国科学院地理科学与资源研究所共同提供。基于研究区野外实地观测资料和土地利用数据,运用遥感图像处理 Erdas Imagine 8.7 软件提取遥感影像中的景观类型信息。景观类型的分类标准以国家级土地利用与覆被分类系统为基础,结合本研究区的景观特征,将研究区景观划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种一级景观类型和旱地等 11 种二级景观类型,本研究采用一级景观类型的六大类作为研究区生态环境脆弱性研究的类型。

2 研究方法

景观格局作为自然与人为多种因素相互作用所产生的区域生态环境体系的综合反映,既是景观异质性的具体体现,又是各种生态过程在不同尺度上作用的最终结果^[15],可以反映出不同景观生态系统所受到的干扰及脆弱程度。本研究从景观生态学的角度,采用景观格局指数结合反映研究区主要生态环境问题的环境因子作为评价指标,构建景观类型脆弱度指数,并通过景观类型脆弱度指数的空间化实现了区域生态环境脆弱性的定量化表达。

2.1 景观类型脆弱度指数的构建

不同的景观类型在维护生物多样性、保护物种、完善整体结构和功能、促进景观结构自然演替等方面的作用是有差别的,对外界干扰的敏感性和抵抗能力也不同^[16]。根据景观类型结构信息及不同景观类型对外界环境的响应特征,采用多因子加权求和法构建景观类型脆弱度指数。

2.1.1 预选评价指标的获取

生态环境脆弱性特征是各种自然和人为因素综合作用的结果^[1]。在反映景观所受干扰强度的景观格局指数中,初步选取破碎度、斑块密度、分维数、对数分维数、景观形状指数、分离度和聚集度指数^[15]作为景观类型脆弱度评价的预选景观格局因子。由于根据景观格局信息难以充分说明生态环境脆弱性问题,选取反映研究区主要生态环境问题的土壤侵蚀指数、植被覆盖指数及喀斯特地貌面积比 3 个因子对景观格局信息进行补充,使评价结果能综合反映景观生态环境状况以及所受干扰程度。

景观格局指数是运用 Fragstats 3.3 软件计算得到的,各指数的计算公式和指标含义参见 Fragstats 软件说明^[17]。喀斯特地貌面积比是在 Arcgis9.0 软件的支持下,用栅格计算器 Raster Calculator 分别对研究区景观类型图和地质图进行叠加运算,运用得到的属性表的数据进行统计分析得到各景观类型的喀斯特地貌面积比。土壤侵蚀强度的评价是基于解译出来的景观类型数据和 DEM 数据,按照《土壤侵蚀分类分级标准》中面蚀分级指标表^[18],将本研究区土壤侵蚀强度分为微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈共六个等级,分别赋值 1、3、5、7、9、11 为土壤侵蚀指数的相对作用分。植被覆盖度是基于 NDVI 数据和植被覆盖度遥感定量模型^[19]计算得到,并参照已有文献中提到的分级阈值^[20]结合地面定位监测资料,把研究区植被覆盖度分为 0% ~ 25%, 25% ~ 40%, 40% ~ 60%, 60% ~ 80%, 80% ~ 100% 五级,分别赋值 1、3、5、7、9 为植被覆盖指数的相对作用分。各景观类型的土壤侵蚀指数和植被覆盖指数的计算公式如下:

$$F_i = \sum_{j=1}^n \frac{A_{ij} \cdot P_j}{A_i} \quad (1)$$

式中, F_i 为第 i 种景观类型的土壤侵蚀或植被覆盖指数; A_{ij} 表示第 i 种景观类型分布在 j 土壤侵蚀/植被覆盖等级上的面积; A_i 为 i 景观类型总面积; P_j 为 j 等级土壤侵蚀/植被覆盖的相对作用分; i 为景观类型; j 为土壤侵蚀/植被覆盖等级; n 为景观类型数。

2.1.2 评价指标的筛选及指标权重的确定方法

由于景观格局指数种类繁多,已有研究多根据主观判断来确定评价指标及其权重,选取的部分景观格局指数对生态环境脆弱度的表征效果不够理想^[7]。为了减小评价指标及其权重确定的主观随意性,本研究将数学方法——灰色关联度分析应用于景观格局指数的选取及评价指标权重的确定,为进一步客观、科学的选取能更好的表征生态环境脆弱性的景观格局指数的研究提供参考。

灰关联分析法是根据因素间发展趋势的相似或相异程度作为衡量因素间关联程度的一种方法,对样本量的多少和样本有无规律同样适用^[21]。在进行数据列关联分析时,必须先确定参考数列,然后比较其它数列同参考数列的接近程度,这样才能对其它数列进行比较。关联度越大,表明两数列的几何曲线形状越接近,即发展变化态势越接近。关联度的公式计算如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{i(k)} \quad (2)$$

其中 $\varepsilon_{i(k)} = \frac{\min_i |\chi_0(k) - \chi_i(k)| + \rho \max_k |\chi_0(k) - \chi_i(k)|}{|\chi_0(k) - \chi_i(k)| + \rho \max_k |\chi_0(k) - \chi_i(k)|}$, ($i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$)

式中, X_0 为参考数列, X_i 为比较数列, k 为样本序号, i 为变量因子序号, ρ 为分辨系数,取 0.5, $\varepsilon_{i(k)}$ 为关联系数, r_i 为关联度。

由于土壤资源的缺失是喀斯特区域呈现环境脆弱性的重要原因^[9],以各景观类型的土壤侵蚀指数为参考数列,计算各预选评价指标与土壤侵蚀指数之间的关联度,依据关联度大小结合减少冗余的原则,确定评价指标及指标权重。

2.1.3 景观类型脆弱度计算模型

景观类型脆弱度指数的计算模型如下:

$$CEVI_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j F'_{ij} \quad (3)$$

式中, $CEVI_i$ 表示第 i 种景观类型的脆弱度指数; F'_{ij} 为第 i 种景观类型的第 j 个评价指标的归一化值; α_j 为第 j 个评价指标的权重。当评价指标与景观类型脆弱度呈正向关系时,采用指标项的平均值去除该指标数据得到该指标的归一化值;当评价指标与景观类型脆弱度呈逆向关系时,采用指标项的平均值除以该指标数据得到其归一化值。

2.2 区域生态环境脆弱度分析

为了从空间上反映整个区域的生态环境脆弱性特征,利用所建立的景观类型脆弱度指数,将景观类型脆弱度与区域生态环境脆弱状况联系起来,将其转化为空间化的区域生态环境脆弱度。

2.2.1 评价单元的确定

根据研究区景观格局及生态系统特点,采用 5km × 5km 的正方形样地,运用等间距系统采样方法将研究区划分为 183 块样地,计算每块样地区域生态环境脆弱度,以此作为该样地中心点的生态环境脆弱度值。

2.2.2 区域生态环境脆弱度计算模型

利用景观类型脆弱指数与景观类型面积的比重构建了区域生态环境脆弱度指数,区域生态环境脆弱度指数是景观类型脆弱度指数的空间化,可以反映生态环境脆弱程度的空间变化及格局特征,其计算模型如下^[6]:

$$EVI = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{TA} CEVI_i \quad (4)$$

式中, EVI 为区域生态环境脆弱度指数; A_i 为区域中第 i 景观类型的面积; TA 为区域总面积。

2.2.3 空间分析方法

区域生态环境脆弱度指数作为一种空间变量,其空间变化具有结构性和随机性特征。本研究采用地统计学的基本函数——半变异函数(Semi-variogram)进行生态环境脆弱度的空间分析,并根据半变异函数的理论模型进行区域生态环境脆弱度的空间插值分析,实现区域生态环境脆弱度指数的面状化、连续化。半变异函数的计算公式为^[22]:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

式中, $N(h)$ 为相隔距离等于 h 时的样点对数; $Z(x_i)$ 为样点 Z 在位置 x_i 的实测值; $Z(x_i + h)$ 为与 x_i 距离为

h 处样点的值。

3 结果与讨论

3.1 脆弱度评价指标体系的建立及指标权重的确定

首先对各景观类型的破碎度、斑块密度、分维数、对数分维数、景观形状指数、分离度、聚集度、土壤侵蚀指数、植被覆盖指数和喀斯特地貌面积比进行初始化处理,即用指标项的平均值去除该指标数据得到各指标的初始化值。以土壤侵蚀指数为参考数列,将初始化后的数据代入公式 2 计算出各指标与土壤侵蚀指数的关联度,结果如表 1。

表 1 各指标与土壤侵蚀指数的关联度

Table 1 The correlations between soil erosion index and other indexes

指数 Items	FN	PD	FD	LSI	AI	FI	SE	AP	VC
关联度 Correlative	0.705	0.654	0.875	0.836	0.841	0.741	1	0.801	0.872

FN: 破碎度 Patch number fragmentation, PD: 斑块密度 Patch density, FD: 分维数 Perimeter-area fractal dimension, LSI: 景观形状指数 Landscape shape index, AI: 聚集度 Aggregation index, FI: 分离度 Landscape division index, SE: 侵蚀指数 Soil erosion index, AP: 喀斯特地貌面积比 Area proportion of karst landforms, VC: 植被覆盖指数 Vegetation coverage

由表 1 各指标与土壤侵蚀指数的关联度的大小可以看出,破碎度、分维数和聚集度与土壤侵蚀指数的关联度值分别高于反映相同格局特征的斑块密度、对数分维数和分离度指数,能更好的反映生态环境脆弱性程度。因此依据关联度大小结合减少冗余的原则,选取破碎度、分维数、聚集度指数作为脆弱度评价的景观格局因子,结合土壤侵蚀指数、植被覆盖指数和喀斯特地貌面积比作为研究区生态环境脆弱度的评价指标,并根据表 1 的关联度结果确定各指标权重分别为 0.138、0.172、0.165、0.197、0.171 和 0.157。

3.2 景观类型脆弱度分析

将各评价指标的归一化值与权重代入公式 3 计算得到各景观类型脆弱度值,其中指标项 FN、SE 和 AP 与景观类型脆弱度呈正向关系,FD、AI 和 VC 与景观类型脆弱度呈逆向关系,结果如表 2。

表 2 景观类型脆弱度指数

Table 2 Vulnerability indexes of the landscape types

景观类型 Landscape types	破碎度 FN	分维数 FD	聚集度 AI	喀斯特面积比 AP	植被覆盖指数 VC	土壤侵蚀指数 SE	类型脆弱度 CEVI
耕地 Farmland	0.137	1.394	88.389	0.205	7.231	4.460	1.007
林地 Forest land	0.670	1.370	95.675	0.438	7.956	3.364	1.529
草地 Grassland	0.100	1.409	88.778	0.181	7.800	3.085	0.868
水域 Water area	0.003	1.555	88.072	0.036	6.115	2.696	0.691
建设用地 Construction area	0.001	1.268	89.771	0.223	6.017	1.662	0.799
未利用地 Unused land	0.088	1.501	57.926	0.251	7.044	5.783	1.150

CEVI: 景观类型脆弱度 Vulnerability index of the landscape types

由表 2 可以看出,各景观类型中,建设用地、耕地和林地的分维数较低,受人为干扰的程度较为强烈。破碎度指数最大的是林地,其次是草地和耕地。与其他区域地貌、生境相对一致的情况不同,喀斯特区域的林地由于基岩裸露面积大,植被赖以生存的土面、石面、石沟等小生境类型多样,组合复杂,分布的随机性和不连续性大,喀斯特林木分布本身就不均匀,再加上长期以来火烧、开垦、樵采等人为干扰强度大,进一步增加了林地的破碎程度。耕地的破碎度大是因为喀斯特区域生态环境恶劣,宜耕地少,在人多地少的情况下,人们尽其所能的开发耕地,在喀斯特地区土层薄且不连续的背景条件下,研究区有相当一部分耕地为乱石缝地,地块小,破碎度高。喀斯特地区的草地多属于旱地弃耕后的地段,破碎度高,同时受持续的复垦和放牧的影响,土壤侵蚀状况较严重。就景观类型脆弱度来看,林地景观的脆弱度指数最高,其次为未利用地和耕地,表明这 3 种景观类型稳定性较差,抗外界干扰能力非常弱。由于喀斯特土层浅薄,林木在基岩裂隙较少的区域,根系分

布较浅,遇到泥石流、大风、大雨等自然灾害,容易倒伏,发生退化;而在基岩裂隙较多的区域,岩石裂隙缓慢的被林木根系拓宽,加上其自身的风化、侵蚀作用,岩石易涨裂松动,在外力作用下稳定性差,林木也容易倒伏^[23]。除此之外,喀斯特森林质量差、林种结构不合理、人为干扰大、自然恢复难度大等因素^[9]是林地景观脆弱度较高的主要原因。研究区耕地中陡坡耕地面积大,且缺乏合理的保护措施,加上研究区降雨季节分配不均,旱涝灾害频繁,耕地水土流失状况严重,在外力影响下发生退化的几率也很大。由于研究区人口压力大,人们对土地开发强度大、范围广,未利用地大部分是质量差,开垦难度高的裸岩石砾地、裸土、荒草地、田坎等,植物覆盖度很低,土壤侵蚀指数高,脆弱度高。

3.3 区域生态环境脆弱度的空间分异

为了便于直观比较各样点生态环境脆弱程度的差异,用极值法^[24]对由公式4计算得出183块样地中心点的生态环境脆弱度值进行了标准化转换,转化后的区域生态环境脆弱度的取值介于0~1之间,无量纲。对转化后的样点数据进行单样本K-S检验表明,数据符合正态分布,可以直接进行地统计学分析。将183个样点数据代入地统计学软件GS+计算生态环境脆弱度的实验半变异函数,进行理论半变异函数的拟合,由于指数模型的拟合结果比较理想,区域生态环境脆弱度的空间结构分析是基于指数模型得到的。

图1a是区域生态环境脆弱度指数在各向同性条件下的变异函数曲线及相关参数。基台值($C_0 + C$)是当半变异函数达到一个相对稳定的常数时,该常数称为基台值,其大小反映了脆弱性指数的波动幅度,块金值(C_0)表示随机因素引起的空间异质性的程度,块金值与基台值的比值反映了脆弱度的空间相关性的程度,其值越大表明由随机因素引起的空间异质性越高^[24]。本研究中,块金值/基台值为28.59%,属于中等强度的空间相关性,说明在县域尺度上,区域生态环境脆弱度的空间变化是结构性因素(如土壤、母岩母质、地形等)和随机因素(人为干扰等)共同作用的结果,其中,由随机因素引起的空间异质性相对较小,而由结构性因素引起的空间异质性占主要部分。变程是指变异函数达到基台值所对应的距离,表明变量的空间自相关尺度,变程以内的空间变量具有空间相关性或空间依赖性,变程以外区域化变量的空间相关性不存在^[24]。研究区变程较大,为25 km,与研究区乡镇级行政区划宽幅较为接近,表明不同的乡镇级行政单元的生态环境脆弱性存在局部特征差异。

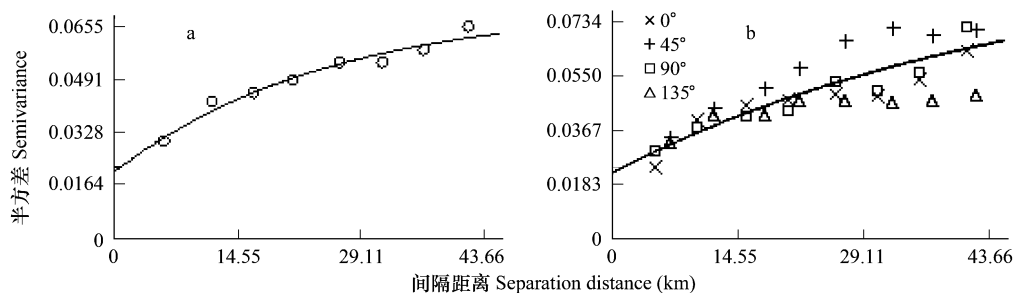


图1 生态环境脆弱度的变异函数曲线

Fig. 1 Semi-variograms of the regional eco-environment vulnerability indexes

a: 各向同性变异函数曲线 Isotropic semi-variograms, b: 各向异性变异函数曲线 Anisotropic semi-variograms

对于区域化变量,变异函数不仅与间隔距离有很强的相关性,也与方向性有关^[25,26]。区域化变量如果在各个方向上的性质变化相同,则称为各向同性,若在各个方向上的变异不同,则称其为各向异性。在实际研究中,空间变量的各向同性是相对的,各向异性则是绝对的^[22]。以正北顺时针为方向角计算0°、45°、90°、135°4个主要方向上的变异函数(图1b),结果表明区域生态环境脆弱度的空间异质性具有明显的各向异性特点,产生脆弱度指数空间分布各向异性的主要原因是影响生态环境脆弱程度的地质、水分、土壤等生态因子在不同方向上存在显著差异。由图1b可以看出,脆弱度指数在各个方向上的半变异函数曲线在15km以内比较接近,具有显著的各向同性的特点,15km以外则表现出各向异性,其中45°和135°两个方向上表现最为明显。

总的来看,生态环境脆弱度在 45° 方向上的空间变异最大, 0° 和 90° 方向上的空间变异次之, 135° 方向上的空间变异最小,说明生态环境脆弱度的空间变异主要表现在 45° 方向。脆弱度指数在不同方向上的空间变异特征可能与成土母岩的变化有关,研究区成土母岩在 45° 方向上呈渐变的带状分布,且平均带宽大约为15km,因此在15km范围内,母岩较为均一,脆弱度空间变异性的方向性差异不明显,当大于15km时,母岩在 45° 方向上的变化趋向增强,脆弱度在该方向上的变异性较高。

3.4 区域生态环境脆弱度分析

基于对区域脆弱度空间结构的分析,对研究区183个样点的生态环境脆弱度值进行了普通克里格插值,对插值结果进行等距重新分级为1级(<0.4268)、2级($0.4268 \sim 0.5365$)、3级($0.5365 \sim 0.6461$)、4级($0.6461 \sim 0.7557$)、5级($0.7557 \sim 0.8654$)和6级(>0.8654),得到研究区生态环境脆弱度分布图(图2)。

研究区生态环境脆弱度在整体上表现出东北轻、西南重的特征,具有显著的地域分异规律:高脆弱度区域集中分布在川山—洛阳—大安—长美—线以南地区,该地区裸岩普遍分布,成土母岩以白云岩、石灰岩等碳酸盐岩为主,土壤主要是棕色石灰土,植被类型以灌丛为主,如灰毛浆果楝、盐肤木、聚果羊蹄甲等,局部地区有阔叶林及农作物分布;低脆弱度区域集中分布在川山—洛阳—大安—长美—线以北地区,该地区岩性以碎屑岩为主,间或有碳酸盐岩分布,土壤为黄红壤、黄壤、黄壤性土、黑色石灰土,植被类型以灌草丛、农作物为主,局部有阔叶林、针叶林分布。这个特征反映出在喀斯特区域,岩性对生态环境脆弱程度的控制作用明显,碳酸盐岩基础上发育的土壤成土速率缓慢、淋溶强烈,植被多

具有喜钙性、旱生性、石生性特点,群落结构简单,土地承载能力低,抗干扰能力弱,脆弱程度明显高于非碳酸盐岩区域。就碳酸盐岩来看,已有研究表明,由于石灰岩与白云岩在岩溶形态、风化作用方式、岩石裂隙发育程度等方面都有差异,白云岩区域的土层厚度往往大于石灰岩区,受到的人类干扰往往更强,土壤侵蚀状况高于灰岩区^[27],另外,就其成土特点对植被恢复而言,也不如石灰岩区^[28]。本研究也发现,与石灰岩区域相比,白云岩区域的脆弱度相对较高,可能与上述原因有关。

从细部特征来看,在生态环境脆弱度普遍较低的东北部区域,虽然脆弱度宏观上以3级以下为主,但局部区域脆弱度较高;而在生态环境脆弱度较高的东南部区域,局部脆弱度却在3级以下。这可能是由于研究区地面切割破碎,山地、丘陵等镶嵌排列,不同的地形地貌对生态环境脆弱度具有一定的影响。为了更好的分析生态环境脆弱度与地形的关系,把研究区域划分为5个高程带,分别为洼地、丘陵、低山、中山和高山^[17],将其与研究区生态环境脆弱度分布图进行叠加分析,结果表明48.86%的洼地为5级生态环境脆弱区,71.05%的高山高程带的生态环境脆弱度等级在4级以上,丘陵和中山高程带的生态环境脆弱度等级多为中度,而有近60%的低山高程带的生态环境脆弱度级别在3级以下。通过以上分析可以看出,随着高程的增加,研究区域生态环境脆弱度大致呈现出“高-中-低-中-高”的变化特征,说明生态环境脆弱程度与地形具有较为明显的相关关系。其中,洼地生态环境较为脆弱的主要原因可能在于由于地形较为平坦,易于较大规模的土地开发活动的开展,人类长时期为了追求自身发展和经济利益所进行的不合理的景观改造活动加大了生态环境的脆弱

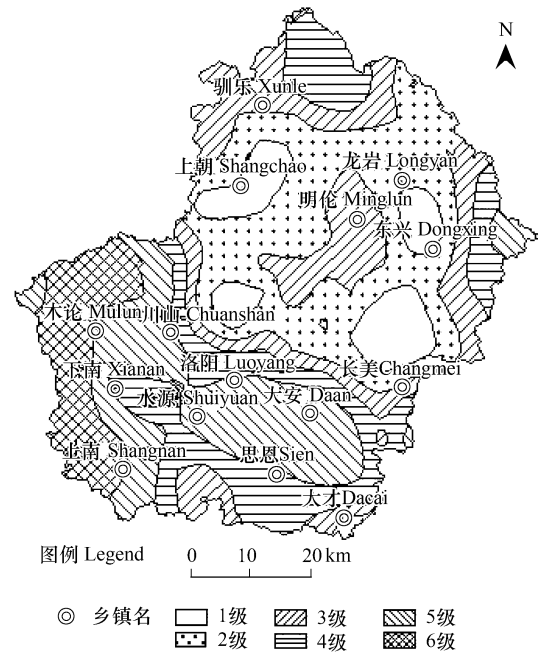


图2 环江县生态环境脆弱度分布图

Fig. 2 Distribution of the regional eco-environment vulnerability in Huanjiang County 乡镇名 Township, 1级 The first subarea, 2级 The second subarea, 3级 The third subarea, 4级 The fourth subarea, 5级 The fifth subarea

性。而与荆玉平^[29]、王娟^[16]等研究得出的高山区域生态系统稳定性好,生态风险性随高程的升高逐渐降低的规律不同,本研究喀斯特区域高山高程带生态环境较为脆弱,这可能主要是受喀斯特区域特殊的环境条件影响较大。从一定意义上讲,喀斯特区域石漠化土地的土壤资源是不可再生的^[9],而高山区由于山高坡陡,土壤丢失及随之发生的土壤水分、养分淋溶丢失较为严重,植被生境恶化,石漠化程度高,生态系统稳定性差,脆弱度高。

4 结语

本研究以喀斯特区域广西环江县为研究区,从景观空间结构的角度,运用灰色关联度分析方法选取能有效反映景观脆弱性的景观格局指数,结合反映研究区主要生态环境问题的环境因子构建生态环境脆弱性评价指标,能综合反映研究区生态环境状况以及所受干扰程度,较好的揭示喀斯特区域自然因素与人类活动综合作用所形成的生态环境的脆弱性及其空间分布规律。研究结果表明:

(1)研究区林地景观脆弱指数最高,其次为未利用地,如果没有合理的土地利用规划,脆弱的林地和未利用地景观在强烈的人为干扰下易发生退化且恢复难度大。而广西环江县是我国西南喀斯特地区最大的特困农民异地安置县,已接纳7万多人异地开发,大量的移民开发使得土地利用格局发生了重大变化,对林地和未利用地的干扰尤为强烈,要着重避免为增加土地数量而对土地盲目开发,以至严重破坏生态环境的行为。

(2)半变异函数分析表明,研究区生态环境脆弱度指数具有明显的空间自相关性,其相关距离平均在25km左右,随机因素引起的空间异质性相对较小,由结构性因素引起的空间异质性处于主导地位;区域脆弱度空间变异在15km以内表现出明显的各向同性,15km以外表现出各向异性,母岩特性在不同方向上变化的差异性是导致各向异性增强的主要原因。

(3)区域生态环境脆弱度指数的空间分布特征上,研究区脆弱度整体表现出从东北到西南逐渐增大的趋势,脆弱程度相对较高的区域与碳酸盐岩在研究区的分布较为一致;局部随着高程的增加表现出“高-中-低-中-高”的变化特征。表明喀斯特区域生态环境脆弱性主要受地质和地形两大自然要素的制约,脆弱性的根源在于其特殊的地质背景条件。

References:

- [1] Wang R H, Fan Z L. Study on the evaluation of ecological fragility of Tarim River Basin. *Arid Environmental Monitoring*, 1998, 12(4): 39—44.
- [2] Cai H S, Chen M Q, Zhao X M. Research progress in evaluation of fragile degrees of fragile ecological environment. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2003, 25(2): 270—275.
- [3] Wang J M, Wang Y K. On the calculation of eco-environment fragility in Loess Plateau Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(3): 32—36.
- [4] Tao X D, Zhao H J. Study on the vulnerability assessment, restoration and regeneration of ecology in the Hexi Corridor. *Arid Zone Research*, 2002, 19(4): 7—11.
- [5] Yao J, Ding J, Ai N S. Assessment of ecological vulnerability in upper reaches of Mingjiang River. *Resource and Environment in Yangtze Basin*, 2004, 13(4): 380—383.
- [6] Wang J Y, Zhao G X, Du C X. Analysis on the regional ecological environment vulnerability based on the information of spatial structure of landscapes—a case study in Kenli country located in Yellow River delta. *Arid Zone Research*, 2005, 22(3): 317—321.
- [7] Qiu P H, Xu S J, Xie G Z, *et al.* Analysis on the ecological vulnerability of the western Hainan Island based on its landscape pattern and ecosystem sensitivity. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1257—1264.
- [8] Bu R C, Hu Y M, Chang Y, *et al.* A correlation analysis on landscape metrics. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2764—2775.
- [9] Li Y B, Shao J A, Wang S J, *et al.* A conceptual analysis of karst ecosystem fragility. *Progress in Geography*, 2006, 25(5): 1—9.
- [10] Guan D J, Su W C, Wang H J, *et al.* On eco-environment vulnerability assessment of karst regions in Chongqing. *Research of Agricultural Modernization*, 2006, 27(6): 432—435.
- [11] Hu B Q, Jin S L, Cao S Y, *et al.* Comprehensive evaluation of fragile karst eco-environment in Guangxi zhuang autonomous region based on GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 103—107.
- [12] Jing J L, Chen Z H, Hu C, *et al.* Study on eco-environment fragile evaluation of karst mountains in southwest China. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 22(3): 95—99.
- [13] Zhang D F, Wang S J, Li R L. Study on the eco-environmental vulnerability in Guizhou karst mountains. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(1): 77—79.

- [14] Qin X Q, Jiang Z C. An assessment of eco-environmental vulnerability in karst counties of Guangxi. *Earth and Environment*, 2005, 33(2): 45—51.
- [15] Wu J G. *Landscape Ecology Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [16] Wang J, Cui B S, Yao H R, *et al.* The temporal and spatial characteristic of landscape ecological security at Lancang River Watershed of longitudinal range gorge region in Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1681—1690.
- [17] McGarigal K. FRAGSTATS 3.3 software and documentation [EB/OL]. (2002-08-30) [2008-05-08]. http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats_documents.html
- [18] Zhang M Y, Wang K L, Chen H S. Dynamical monitoring and analysis on water and soil erosion in the karst region based on RS and GIS—a case study of Huanjiang County, Guangxi Province. *Resources Science*, 2007, 29(3): 23—26.
- [19] Xu X K, Chen H, Zhang F. Temporal and spatial change of vegetation covers in the northwest of China and factors analysis influencing on vegetations variation. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 41—47.
- [20] Ding G D. Study on indicative feature and cover classification of vegetation in regional desertification assessment-taking Mu Us sandland as an example. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 159—160.
- [21] Deng J L. *The basic method of gray system*. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 1987.
- [22] Wang Z Q. *Geo-statistics and its application in ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [23] Long C L, Yu S X, Wei L M, *et al.* Disturbance regimes and the characteristics of gaps in Maolan karst forest, Guizhou Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 13—19.
- [24] Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al.* Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas. *Transactions of the CSAE*, 2006, 43(4): 554—562.
- [25] Liebhold A M, Rossi R E, Kemp W P. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annu. Rev. Entomol*, 1993, 38: 303—327.
- [26] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advance in Soil Science*, 1985, 3: 1—70.
- [27] Jiang S F, Hu B Q, Huang Q Y, *et al.* Spatial correlation analysis between karst rocky desertification and lithology in Du'an Yao Autonomous County of Guangxi. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(2): 214—219.
- [28] Li Y B, Wang S J, Wang J. Soil properties in karst ecosystem and further study. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(4): 285—289.
- [29] Jing Y P, Zhang S W, Li Y. Ecological risk analysis of rural-urban ecotone based on landscape structure. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(2): 229—334.

参考文献:

- [1] 王让会,樊自立.塔里木河流域生态脆弱性评价研究. *干旱环境监测*, 1998, 12(4): 39~44.
- [2] 蔡海生,陈美球,赵小敏.脆弱生态环境脆弱度评价研究进展. *江西农业大学学报*, 2003, 25(2): 270~275.
- [3] 王经民,汪有科.黄土高原生态环境脆弱性计算方法探讨. *水土保持通报*, 1996, 16(3): 32~36.
- [4] 陶希东,赵鸿婕.河西走廊生态脆弱性评价及其恢复和重建. *干旱区研究*, 2002, 19(4): 7~11.
- [5] 姚建,丁晶,艾南山.岷江上游生态脆弱性评价. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(4): 380~383.
- [6] 王介勇,赵庚星,杜春先.基于景观空间结构信息的区域生态脆弱性分析——以黄河三角洲垦利县为例. *干旱区研究*, 2005, 22(3): 317~321.
- [7] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等.基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析. *生态学报*, 2007, 27(4): 1257~1264.
- [8] 布仁仓,胡远满,常禹,等.景观指数之间的相关分析. *生态学报*, 2005, 25(10): 2764~2775.
- [9] 李阳兵,邵景安,王世杰,等.岩溶生态系统脆弱性研究. *地理科学进展*, 2006, 25(5): 1~9.
- [10] 官冬杰,苏维词,王海军.重庆市岩溶地区生态环境脆弱性评价研究. *农业现代化研究*, 2006, 27(6): 432~435.
- [11] 胡宝清,金姝兰,曹少英,等.基于GIS技术的广西喀斯特生态环境脆弱性综合评价. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 103~107.
- [12] 靖娟利,陈植华,胡成,等.中国西南部岩溶山区生态环境脆弱性评价. *地质科技情报*, 2003, 22(3): 95~99.
- [13] 张殿发,王世杰,李瑞玲.贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究. *地理学与国土研究*, 2002, 18(1): 77~79.
- [14] 覃小群,蒋忠诚.广西岩溶县的生态环境脆弱性评价. *地球与环境*, 2005, 33(2): 45~51.
- [15] 郭建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [16] 王娟,崔保山,姚华荣,等.纵向岭谷区澜沧江流域景观生态安全时空分异特征. *生态学报*, 2008, 28(4): 1681~1690.
- [17] 张明阳,王克林,陈洪松.基于RS和GIS的喀斯特区域水土流失动态监测与分析——以广西环江县为例. *资源科学*, 2007, 29(3): 23~26.
- [18] 徐兴奎,陈红,张凤.中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析. *环境科学*, 2007, 28(1): 41~47.
- [19] 丁国栋.区域荒漠化评价中植被的指示性及盖度分级标准研究——以毛乌素沙区为例. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 159~160.
- [20] 邓聚龙. *灰色系统基本方法*. 武汉:华中理工大学出版社, 1987.
- [21] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京:科学出版社, 1999.
- [22] 龙翠玲,余世孝,魏鲁明,等.茂兰喀斯特森林干扰状况与林隙特征. *林业科学*, 2005, 41(4): 13~19.
- [23] 张伟,陈洪松,王克林,等.典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 67~73.
- [24] 蒋树芳,胡宝清,黄秋燕,等.广西都安喀斯特石漠化的分布特征及其与岩性的空间相关性. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(2): 214~219.
- [25] 李阳兵,王世杰,王济.岩溶生态系统的土壤特性及其今后研究方向. *中国岩溶*, 2006, 25(4): 285~289.
- [26] 荆玉平,张树文,李颖.基于景观结构的城乡交错带生态风险分析. *生态学杂志*, 2008, 27(2): 229~334.