

文章编号: 1008-2786-(2016)4-476-09
DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000153

基于 RRM 模型和不确定性分析的喀斯特地区 生态风险管理 ——贵阳市案例研究

王 祺¹ 蒙吉军^{1*} 孙 宁²

(1. 北京大学城市与环境学院/地表过程分析与模拟教育部重点实验室 北京 100871;
2. 环境保护部中国环境规划院 北京 100012)

摘 要: 喀斯特地区因自然条件和人类活动的双重作用,成为生态灾害频发的区域。区域生态风险评价应结合区域生态特征,从多角度衡量生态风险组分,进而识别生态风险的空间差异,为风险管理提供依据。以喀斯特典型生态脆弱区贵阳市为研究区,运用相对风险评价模型对区域生态风险特征进行识别,并采用蒙特卡洛模拟进行不确定性分析,进而提出生态风险管理措施。结果表明:1) 贵阳市生态风险具有显著的空间差异,呈现出以市区为生态风险高值区向周围区域辐射递减的空间格局;2) 人类活动强度是影响贵阳市生态风险最主要的因素,景观格局稳定性影响生态系统的稳定性和恢复力,地形、石漠化在一定程度上加剧生态风险的发生;3) 不确定性分析进一步验证了模型的有效性,并表明不确定性对风险评价的干扰是局部的,主要体现在低风险区。研究结果对贵阳市生态系统空间管理具有重要的指导意义。

关键词: 区域生态风险; 相对风险评价模型; 不确定性; 喀斯特地区; 贵阳市

中图分类号: F062.2 X171

文献标志码: A

20 世纪以来,随着各种自然灾害和人为灾害的加剧,如洪涝、干旱、地震、滑坡、火灾、核污染等,对人类的生存发展和生态系统健康造成了巨大的威胁^[1-2]。各类风险的不确定性更加大了对生态系统结构和功能的损害,生态风险管理日趋重要。区域生态风险评价(Regional Ecological Risk Assessment, RERA)是在区域尺度上描述和评价自然灾害和人类活动对区域生态系统结构和功能等产生危害的程度和可能性^[3],体现了多胁迫因子、多种受体、空间异质及多评价终点等特点^[4-5]。由于区域生态风险评价能够度量区域的环境效应、自然灾害及损失,可实施适时的生态风险管理,从而成为区域生态系统管理的重要内容^[6]。

近年来,一些学者基于土地利用信息^[7-8]、空间统计和景观格局指数^[9-12]、风险过程机理^[13-16]等角度来构建区域生态风险指数,采用相对风险模型和人工神经网络进行生态风险评价。人工神经网络技术在模式识别方面表现出良好的特性^[17-20]。相对风险模型能将多风险源、多受体、多终点较好的结合在一起^[21],从而得到广泛运用^[22-24]。基于此,本文基于风险过程机理的分析,引入景观格局指数,采用相对风险模型进行区域生态风险评价,并采用蒙特卡洛模型分析不确定性对区域生态风险产生的影响。

西南喀斯特地区是我国的典型生态脆弱区,多年以来,在强烈的人类活动干扰下,石漠化现象较为

收稿日期(Received date): 2015-07-01; 修回日期(Accepted): 2015-09-07。

基金项目(Foundation item): “生物多样性保护专项(2002403712)”,国家自然科学基金项目(41371097)资助。[Biological Diversity Project (2002403712), National Natural Science Foundation of China (41371097).]

作者简介(Biography): 王祺(1990-),男,云南普洱人,硕士研究生。主要从事资源环境管理研究。[Wang Qi (1990-), male, bachelor, major in study of resources and environmental management.] E-mail: wangqi901025@pku.edu.cn, Tel: 15210623720

* 通信作者(Corresponding author): 蒙吉军(1971-),男,副教授。[Meng Jijun (1971-), male, associate professor.]

普遍。许多区域植被破坏、土壤侵蚀、岩石裸露、土地生产力逐步退化和丧失,地表呈现类似荒漠景观^[25-26]。石漠化已经成为喀斯特地区最严重的生态灾害^[27]。贵阳市是喀斯特地貌集中分布的地区,长期以来,石漠化问题较为突出^[28-29]。本文以贵阳市为研究区,以石漠化为风险源,生态系统类型为受体,提取区域生态风险特征,识别区域生态脆弱性和生态系统恢复力,通过生态风险评价和不确定性分析,为区域生态风险管理提供科学依据。

1 研究区与数据来源

贵阳市位于云贵高原东部、苗岭中部、贵州省中部,地理坐标为 $106^{\circ}07' \sim 107^{\circ}17'E$ $26^{\circ}11' \sim 27^{\circ}22'N$,是我国西南腹地的开放省会城市和重要的交通枢纽,总面积 $8\,034\text{ km}^2$ (图1)。贵阳市气候类型属亚热带湿润季风气候,多年平均气温 15.3°C ,多年平均降水量为 $1\,095.7\text{ mm}$ 。地貌类型多样,主要为中山、低山及丘陵地貌,平均海拔 $1\,200\text{ m}$ 左右。喀斯特面积 $6\,830.26\text{ km}^2$,石漠化面积达到 $2\,253.07\text{ km}^2$,分别占总面积的 85.02% 和 28.04% ;水土流失面积为 $2\,622.5\text{ km}^2$,占总面积的 32.64% ,年土壤侵蚀总量 $1.04 \times 10^8\text{ t}$ 。近年来,石漠化和水土流失已经成为贵阳市重要的自然灾害¹⁾,一方面加剧了生态系统的脆弱性和敏感性,另一方面也成为制约贵阳市经济社会发展最为突出的生态问题。

本文所用土地覆被数据来自贵阳市国土资源管理局提供的国土资源二次调查数据(2011),根据《土地利用现状分类 GB/T 21010-2007》将生态系统类型合并为水田、旱地、园地、森林、灌木林、草地、城镇、水域和荒漠共9类。DEM数据来自国家科学数据服务平台(<http://www.cnix.cn/zcfw/sjfw/gjlx-sjxx/>),分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$;NDVI数据是来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站2012年6月的合成数据,分辨率为 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$;NPP数据来自2012年MOD17A3数据集,分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$;夜间灯光数据来自美国国家地球物理数据中心DMSP F18卫星获取的2012年DMSP_OLS灯光数据,空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$;土壤侵蚀数据来自“中国生态功能区划专题数据库”(<http://www.ecosystem.csdb.cn/>)的“贵州省土壤侵蚀”数据,分辨率为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 。岩性数据来自

贵阳市国土资源局,分辨率为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 。

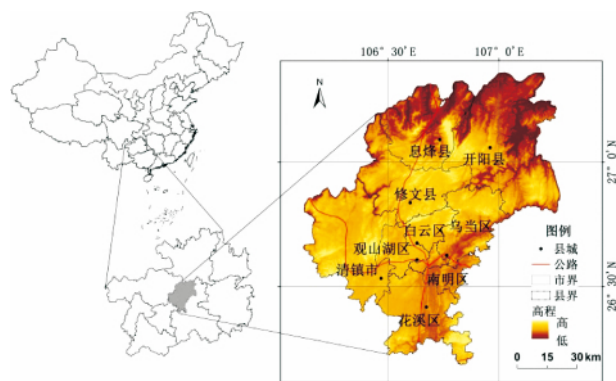


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of research site

2 研究方法

2.1 风险小区的划分

在Landscape水平上,基于DEM数据,通过ArcGIS水文模块,将研究区划分出93个具有独立水文响应功能的子流域,作为生态风险评价的基本单元。将GIS获取的数据经过统一投影坐标后,利用子流域提取各流域的均值以表示子流域的相关指标,并采用极值法进行去量纲处理。

2.2 区域生态风险表征

2.2.1 风险源分析

贵阳市面临着多种自然灾害和人为灾害的共同威胁。其中,石漠化是较为突出的自然灾害。根据指标的可得性、代表性和可替换性,选取土壤侵蚀、坡度、植被覆盖度(NDVI)和碳酸盐含量四个基础性指标来表征区域石漠化程度^[26,30]。人类活动,尤其是不合理的土地利用方式,如陡坡开荒、滥砍滥伐、掠夺式经营等行为,加剧了石漠化的发生,成为了当地重要的威胁生态系统功能的人为灾害。本研究用夜间灯光数据从空间上表征人类活动强度的差异。

2.2.2 生态受体

随着生态风险评价的不断发展,受体的选择从个体、种群逐渐扩大到生态系统乃至景观类型,选取的受体越来越能够体现风险源的综合干扰。为表征多受体的生态风险承受能力,本研究选取9类生态系统类型作为生态受体,以从功能上表征同一种风险源对不同生态系统损害强度的差异。

1) 数据来源《贵州省贵阳市岩溶地区石漠化综合治理专项规划(2011—2020年)》、《贵阳市水土保持规划(2010—2030年)》

2.2.3 生态终点

生态终点反映了风险源作用于风险受体后的损害程度,表征了生态系统结构和功能所受的损伤。由于生产力指数是区域生态系统的物质基础和资源潜力的象征,本研究采用净初级生产力(NPP)来表征生态终点,揭示区域生态价值的改变。

2.2.4 生态脆弱度

生态脆弱度表征区域自身生态状况的不稳定程度。由于生态脆弱性会加剧灾害造成的损害程度,降低生态系统的恢复力,延长生态系统恢复的时间,因此成为刻画生态风险的重要指标。本研究选取景观破碎度和景观分维数来表征生态脆弱性程度。

2.2.5 生态系统恢复力

生态系统受到干扰、损害后具有逐渐恢复的能力。由于不同的生态系统有着不同的组织结构、不同的生物多样性及不同的复杂程度,因此不同类型的生态系统也有着不同的恢复能力。生态恢复能力直接关系着生态系统在受到干扰威胁后能够恢复的程度和恢复时间长短。本研究用生物丰度指数(《生态环境状况评价技术规范(试行)》(HJ/T192-2006))来表征生态系统恢复力的大小。结合贵阳市实际情况,生物丰度指数公式为:

$$A_{bio} \times \frac{(0.3 \times \text{林地} + 0.19 \times \text{草地} + 0.25 \times \text{水域湿地} + 0.11 \times \text{园地} + 0.1 \times \text{耕地} + 0.04 \times \text{建设用地} + 0.01 \times \text{未利用地})}{\text{区域面积}} \quad (1)$$

式中 A_{bio} 为生物丰度指数的归一化系数。各指标空间分布如图2。

2.3 相对风险评价模型

相对风险评价模型(Relative Risk Model,简称RRM)是Landis^[31]针对区域构建的模型。其主要环节包括:①确定区域风险管理的目标;②对与区域风险管理相关的潜在风险源和生境进行制图;③根据风险管理目标、风险源和生境对区域进行进一步划分;④建立连接风险源、受体以及评价终点的概念模型;⑤根据评价终点,确定相对风险计算的等级系统;⑥计算相对风险值;⑦对风险等级进行不确定性和敏感性评价;⑧为将来样地和实验室的调查建立可检验的风险假设,目的是减少风险评价的不确定性和确定风险的等级;⑨检验。RRM可为特定的调整或管理决策提供依据,但由于风险的不可通约性、地区的属性不同以及众多暴露-响应关系难以定量表达,对于生态风险效应无法提供准确衡量。

根据本文研究内容,生态风险可以表示为:

$$E_i = \left(\sum_{j=1}^A w_{ij} \times H_{ij} \right) \times T_i \times V_i \times R_i \quad (2)$$

式中 E_i 为第 i 个子流域的生态风险值, H_{ij} 为第 i 个子流域的第 j 种风险源的风险值, w_{ij} 为第 i 个子流域的第 j 种风险源的权重, T_i 为子流域 i 的生态终点, V_i 为子流域 i 的生态脆弱度, R_i 为子流域 i 的生态系统恢复力。

基于RRM模型,在采用变异系数法确定各指标权重(表1)的基础上,获得各子流域的生态风险值。基于ArcGIS10.0将生态风险值进行空间化表征,并将风险值按照自然断裂法分为5个等级,从1到5表示生态风险强度依次增强(图3)。

2.4 蒙特卡洛模拟

相对风险评价是基于具有不确定性的灾害或时间对生态系统及其组分可能造成的损伤的评价^[32]。由于难以准确预测风险源是否会发生以及发生的时间、地点、强度和范围,最多根据历史的概率信息和造成灾害的要素分布去推断和预测^[14],这种信息的不确定性会使风险值可能被高估或低估^[33]。对于生态风险评价中的不确定性,一般来说,由概念模型的建立、信息和数据的不完备、自然风险源等的多样性、来源范围很广的误差等方面带来^[34],这些都需要进行不确定性分析,使评价更加科学可靠^[35]。

本研究采用蒙特卡洛模拟方法对评价过程中存在的不确定性进行分析。蒙特卡洛模拟法(Monte Carlo Simulation),又称随机模拟法,它通过一个能产生一定概率分布的随机数发生器来模拟实际中可能发生的种种情况。其基本思想是将符合一定概率分布的大量随机数作为参数带入数学模型,求出所关注变量的概率分布,从而了解不同参数对目标变量的综合影响以及目标变量最终结果的统计特性。

由于区域生态本底和生态系统恢复能力属于静态影响因子,可认为其发生变动的概率很小,因此区域生态风险的不确定性主要来自风险源发生的概率、大小和范围,所以本研究通过估计风险源的不确定性来估计区域生态风险的不确定性。具体方法如下:

1) 将每一个风险源用自然裂点法分为五级,各子流域的生态风险计算如式(2)所示。

2) 设定不确定性为 U ,即原数据中可能有 $U \times 100\%$ 的数据存在不确定性因素。设 H_{ij} 在区域内对应的概率分布值为 P_{iq} ,用 q 来表示风险值,同时设模拟次数为 T ,则可以得到不同子流域内不同风险源的概率分布如下:

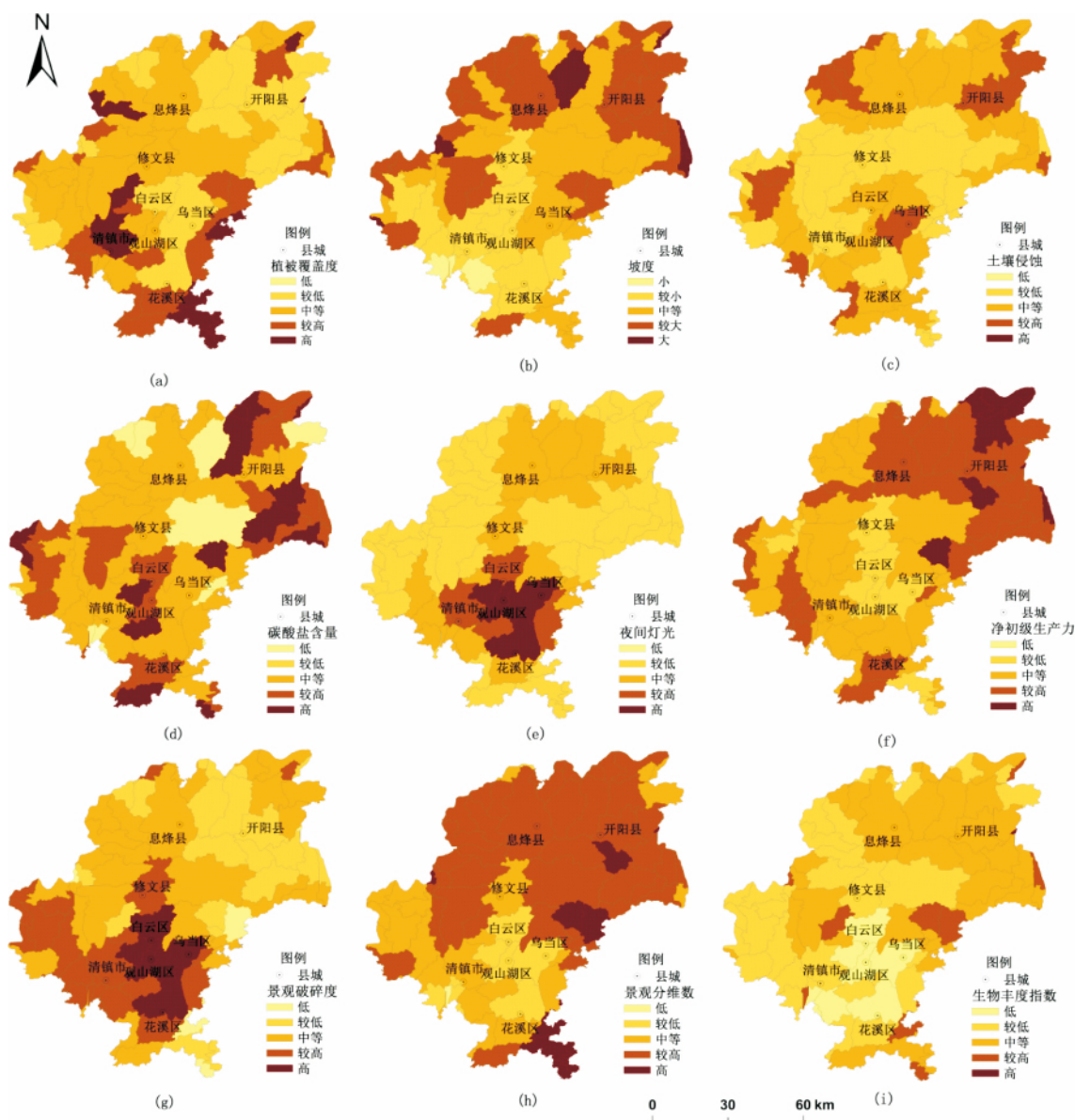


图2 贵阳市生态风险评价指标

(a) 植被覆盖度; (b) 坡度; (c) 土壤侵蚀; (d) 碳酸盐含量; (e) 夜间灯光; (f) 净初级生产力;
(g) 景观破碎度; (h) 景观分维数; (i) 生物丰度指数

Fig. 2 Ecological risk assessment indices in Guiyang City

(a) vegetation coverage; (b) slope; (c) soil erosion; (d) carbonate; (e) night light; (f) NPP;
(g) landscape fragmentation; (h) landscape fractal dimension; (i) biologic abundance index

① 如果 $q = 1$ 则

$$\begin{cases} P(H_{iq}) = \frac{U \times P_{iq}}{P_{iq} + P_{i(q+1)}} \\ P(H'_{iq}) = 1 - P(H_{iq}) \end{cases} \quad (3)$$

② 如果 $q = 5$ 则

$$\begin{cases} P(H_{iq}) = \frac{U \times P_{iq}}{P_{iq} + P_{i(q-1)}} \\ P(H'_{iq}) = 1 - P(H_{iq}) \end{cases} \quad (4)$$

③ 其他情况 则

$$\begin{cases} P(H_{iq}) = \frac{U \times P_{iq}}{P_{i(q-1)} + P_{iq} + P_{i(q+1)}} \\ P(H'_{iq}) = 1 - P(H_{iq}) \end{cases} \quad (5)$$

3) 计算模拟风险值 根据各流域不同风险的概率分布 结合综合风险概率的计算公式进行计算 并求均值 得到模拟的平均生态风险值:

$$E_i = \frac{\sum_{s=1}^T E_{is}}{T} = \frac{(\sum_{s=1}^T \sum_{j=1}^A w_{ij} \times H_{ijs}) \times T_i \times V_i \times R_i}{T} \quad (6)$$

采用蒙特卡洛模型,设定模拟次数为1 000次,分别设定25%和50%的不确定性,分别对应低不确定性和高不确定性,对贵阳市生态风险评价进行不确定性分析。本研究采用Excel插件Crystal Ball(水晶球)进行计算,并将结果用ArcGIS 10.0进行可视化,结果如图4。

3 结果分析

3.1 区域生态风险空间特征

表1 贵阳市生态风险指标、权重及分级

Tab.1 Ecological risk indices classification in Guiyang City

准则层	指标层	权重
风险源(D_i)	植被覆盖度	0.093
	坡度	0.200
	土壤侵蚀度	0.011
	碳酸盐含量	0.076
	夜间灯光强度	0.620
生态终点(T_i)	净初级生产力	1.000
生态脆弱度(V_i)	景观破碎度	0.979
	景观分维数	0.021
生态系统恢复力(R_i)	生物丰度指数	1.000

从图3可以看出,贵阳市生态风险空间差异呈现出以市区为核心的生态风险高值区向周围辐射减小,北部和东北部风险较低的空间格局。生态风险的相对高值区主要集中在贵阳市中南部,尤其以贵阳市区风险最高,其西部生态风险值也较高;北部和东北部生态风险值相对较低。

从评价结果上看,云岩区全部、观山湖区大部分、南明区西部、乌当区西南部和花溪区的北部具有最高的生态风险值,主要是因为市区范围内森林覆盖率相对较低,生物多样性较小,景观破碎化严重,景观异质性较低,而市区又是人类活动强度最为剧烈的区域,因而增大了生态风险的概率。市区周围的区县包括白云区、南明区和花溪区,由于受到市区高生态风险辐射的影响,具有较强的人类活动和较大的景观破碎度,因此表现出相对高的生态风险值。相对而言,市区边远区县包括息烽县、开阳县、修文县、清镇市、乌当区中北部生态风险较小。主要原因

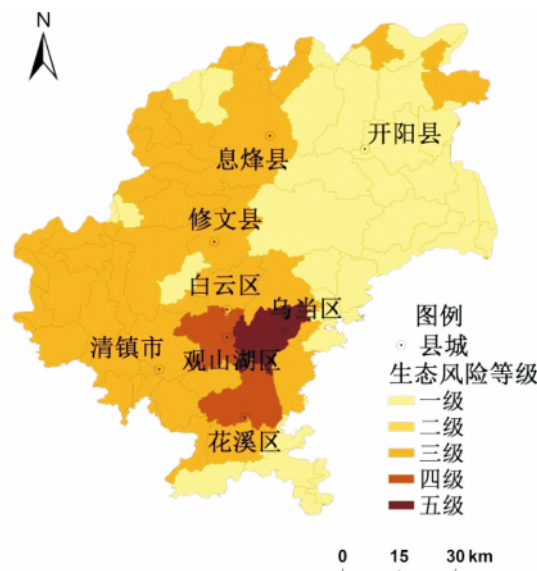


图3 贵阳市生态风险评价结果

Fig. 3 Ecological risk assessment results in Guiyang City

是该区域植被覆盖较高,生物多样性较大,景观破碎度相对较小,景观形态异质性较强,具有更稳定的格局。人类活动的干扰作用较小也是该区域生态风险较低的重要因素。

可以看出:首先,人类活动强度是影响贵阳市生态风险的最主要因素之一,人类活动较强的区域生态风险的概率也较大;其次,景观格局的稳定性也非常重要。稳定的景观格局能够有效降低风险源对生态系统的损伤,并能加速受损生态系统的恢复,破碎化较大的景观格局抵抗风险的能力和恢复能力均较弱。此外,地形条件、石漠化程度一定程度上也加剧了生态风险的程度。

3.2 不确定性分析

从图4可以看出,加入不确定性对贵阳市生态风险的计算结果没有显著影响。低不确定性、高不确定性模拟值与计算值的kappa系数分别为0.661和0.669(kappa系数介于0.61~0.80之间代表高度一致性),即模拟值与计算值具有较好的拟合关系,说明即使存在风险源的不确定性,相对风险评价方法同样能够表征贵阳市生态风险的概率分布,也进一步说明模型的有效性。从模拟值的空间分布可以看到,高风险区域依然是集中在市区及周围,三级和四级风险分布在市区周围的县市,而远离市区的开阳县、息烽县及修文县和乌当区的西北部则具有较小的风险概率,其结果RRM的评价结果相同。

低不确定性和高不确定性的模拟结果差异主要体现在一级和二级的低风险概率上,相比较而言,低

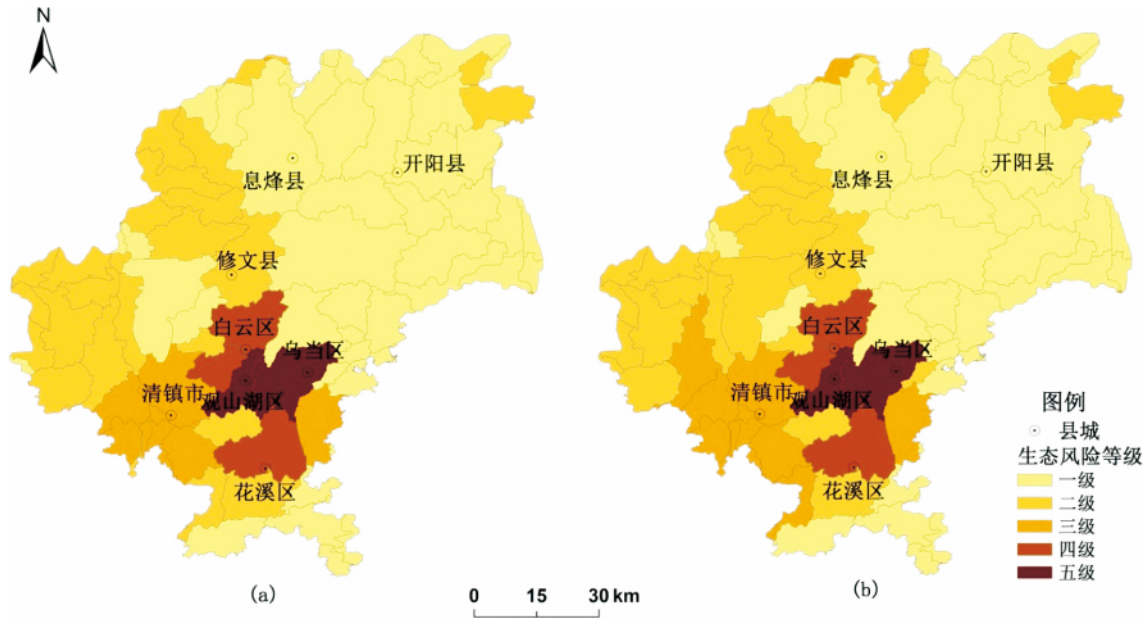


图 4 贵阳市不确定性生态风险模拟结果
(a) 低不确定性; (b) 高不确定性
Fig. 4 Ecological risk simulation result with uncertainty in Guiyang City
(a) low uncertainty; (b) high uncertainty

不确定性的模拟结果识别出更多的一级风险区域。为进一步分析不确定性对生态风险模拟的影响,从计算值和模拟值的拟合矩阵(表 2)可以看出,不确定性的干扰只在小范围内起作用,评价结果具有明显的空间差异性。无论是低不确定性的模拟还是高不确定性的模拟,风险等级的数量都趋于一致。但对于第一级和第二级,低不确定性和高不确定性对评价值的偏差都相对较大,分别达到 18.75%、29.27% 以及 7.14%、24.39%,而对于高风险区则评价结果和模拟值都相对趋于一致。

表 2 计算值和模拟值拟合矩阵(子流域数)

Tab.2 Fitting matrix between calculation and simulation(watershed number)

不确定性	相对生态风险评价					
		一级	二级	三级	四级	五级
低不确定性	一级	39	9	0	0	0
	二级	0	26	3	0	0
	三级	0	6	4	0	0
	四级	0	0	1	2	0
	五级	0	0	0	1	2
高不确定性	一级	38	4	0	0	0
	二级	1	27	3	0	0
	三级	0	10	4	0	0
	四级	0	0	1	2	0
	五级	0	0	0	1	2

不确定性分析证明了 RRM 评价的有效性,提高了评价结果的可信度。高、低不确定性的对比分析说明不确定性对风险评价的干扰是局部的,并表明高风险位于市区及附近,而低风险则位于远离市区的县市,生态风险管理必须根据风险评价等级提出不同的防范措施。

3.3 生态风险管理

区域生态风险管理是个复杂、动态、综合的过程。生态风险评价为风险管理提供了科学依据,需依据不同等级的生态风险区,综合考虑生态系统自身的活力、调节及抵抗各种压力与干扰的能力,并结合风险源的类别、发生频率和强度建立防范机制。

① 高生态风险区,主要分布于云岩区、南明区和观山湖区,由于人口密度大、社会经济活动相对集中,控制人类干扰引发的生态灾害是降低生态风险的关键措施。包括解决农村能源紧缺问题,杜绝过度樵采、砍伐薪柴的现象;保护市区及周边的湿地,防止湿地退化和污染。景观破碎化是导致生态风险较高的另一重要因素,编制区域景观生态规划、促进城市有序发展,减少湿地、林地等生态用地的侵占是主要的防范措施。

② 中生态风险区,主要分布于花溪区、白云区 and 乌当区等近郊区,受市区社会经济活动的直接辐射。但由于该区域森林覆盖度较大、景观异质性较

强,故生态风险相对较小。该区的防范措施包括:保护并适当增加森林、草地、湿地等生态用地,对不宜耕作的坡地和丘陵地实施退耕还林还草,增加区域生物多样性,提高生态系统服务功能;另外,该区要协调好与市区发展的衔接,合理用地规划,提高土地利用集约度,防止景观破碎度的加深。

③ 低生态风险区,包括开阳县、息烽县、修文县和清镇等距离市区较远区域,人类活动干扰相对较小,但生态环境条件较差。该区的防范措施包括:在坡度较大、土壤侵蚀敏感区域植树造林,增加植被覆盖度,防止水土流失;减少对石漠化敏感区的干扰,禁止生产活动,控制石漠化的加剧;改善洼地、谷地、盆地和台地等“坝子”的农业生产基础条件,成为贵阳市粮食生产基地。

4 结论与讨论

本文基于“风险源-暴露-受体-响应机制”的区域生态风险表征,运用 RRM 对贵阳市区域生态风险进行评价,并进行不确定性分析,进而提出相应生态风险管理措施。得到以下主要结论:

1) RRM 能够有效表征贵阳市生态风险的空间格局。贵阳市生态风险空间差异较大,呈现出以市区为核心的生态风险高值区向周围辐散减小、北部和东北部呈现低风险的空间格局。

2) 人类活动强度是影响贵阳市生态风险的最主要因素,生态风险值大的区域主要集中在市域中部市区。其次,生态脆弱度也是重要的影响因素。稳定的景观格局能有效降低风险源对生态系统的损伤,并能加速受损生态系统的恢复,破碎化较大的景观格局抵抗风险的能力和恢复能力都比较弱。此外,石漠化程度一定程度上也加剧了生态风险的程度。

3) 不确定性的分析结果进一步验证了评价模型的有效性。高、低不确定性的对比分析表明不确定性对风险评价的干扰是局部的,主要体现在一、二级为主的低风险值区;对于高风险值区,不确定性影响很小。

4) 基于生态风险评价结果及不确定性的干扰分析认为,生态风险高值区要以控制区域人类活动可能引发的各类生态灾害为关键;生态风险中值区的防范重点在于依托生态恢复力、防止生态环境进一步恶化;生态风险低值区则需要划定石漠化敏感

区,进一步防止水土流失。总体上看,划定发展限制区域,适度植树造林和分散农业及人口压力是减缓喀斯特地区生态风险的主要途径。

5) 生态风险评价是区域生态安全管理的有效途径,能够为区域生态系统适应性管理提供灾害和风险规避的措施和建议。一方面,“综合”是生态风险研究的主要趋势,包括研究方法和模型的综合,以及尺度的综合。另一方面,越来越多的研究针对研究区特殊的生态环境问题,运用特定的研究视角和方法模型,使研究更加具有针对性,因地制宜为研究区生态风险管理提供有效的建议。此外,“情景分析”对生态风险评价也具有借鉴意义。不同情境下的生态风险特征能够揭露不同政策对区域生态安全的影响,从而引导管理和政策向着最有利于规避生态风险的方向发展,有效预防区域生态风险问题。

参考文献(References)

- [1] 付在毅,许学工. 区域生态风险评价[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-271 [Fu Zaiyi, Xu Xuegong. Regional ecological risk assessment [J]. Advanced in Earth Sciences, 2001, 16(2): 267-271]
- [2] 毛小琴,倪晋仁. 生态风险评价研究述评[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 646-654 [Mao Xiaoling, Ni Jinren. Recent progress of ecological risk assessment [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2005, 41(4): 646-654]
- [3] 陈春丽,吕永龙,王铁宇,等. 区域生态风险评价的关键问题与展望[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 808-816 [Chen Chunli, Lv Yonglong, Wang Tieyu et al. Emerging issues and prospects for regional ecological risk assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 808-816]
- [4] Landis W G, Wiegiers J K. Design considerations and a suggested approach for regional and comparative ecological risk assessment [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 1997, 3: 287-297
- [5] Wiegiers J K, Feder H M, Mortensen L S et al. A regional multiple-stressor rank-based ecological risk assessment for the fjord of Port Valdez, Alaska [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 1998, 4: 1125-1173
- [6] 蒙古军,周婷,刘洋. 区域生态风险评价:以鄂尔多斯市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5): 935-943 [Meng Jijun, Zhou Ting, Liu Yang. Research on regional ecological risk assessment: a case study of Ordos in Inner Mongolia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(5): 935-943]
- [7] 臧淑英,梁欣,张思冲. 基于 GIS 的大庆市土地利用生态风险分析[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 141-145 [Zang Shuying, Liang Xin, Zhang Sichong. GIS-based analysis of ecological risk on land-use in Daqing City [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(4): 141-145]
- [8] 赵岩洁,李阳兵,邵景安. 基于土地利用变化的三峡库区小流域

- 生态风险评价——以草堂溪为例[J]. 自然资源学报 2013 28(6): 944–956 [Zhao Yanjie, Li Yangbing, Shao Jingan. Ecological risk assessment of small watershed of the Three Gorges Reservoir area based on land use change: a case study of Caotang River [J]. Journal of Natural Resources 2013 28(6): 944–956]
- [9] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J]. 生态学报 2008 28(10): 5020–5026 [Xie Hualin. Regional eco-risk analysis of based on landscape structure and spatial statistics [J]. Acta Ecologica Sinica 2008 28(10): 5020–5026]
- [10] 魏伟, 石培基, 雷莉, 等. 基于景观结构和空间统计方法的绿洲区生态风险分析——以石羊河武威、民勤绿洲为例[J]. 自然资源学报 2014 29(12): 2023–2035 [Wei Wei, Shi Peiji, Lei Li, et al. Eco-risk analysis of oasis region based on landscape structure and spatial statistics method: a case study of Wuwei and Minqin Oases [J]. Journal of Natural Resources 2014 29(12): 2023–2035]
- [11] 肖琳, 田光进. 天津市土地利用生态风险评价[J]. 生态学报 2014 33(2): 469–476 [Xiao Lin, Tian Guangjin. Eco-risk assessment of land use in Tianjin City [J]. Chinese Journal of Ecology 2014 33(2): 469–476]
- [12] 张学斌, 石培基, 罗君, 等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析——以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报 2014, 29(3): 410–419 [Zhang Xuebin, Shi Peiji, Luo Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: a case study on Shiyang River Basin [J]. Journal of Natural Resources 2014 29(3): 410–419]
- [13] 张璐. 区域生态安全评价方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 15–21 [Zhang Lu. Methodology assessment of regional ecological security [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology 2006: 15–21]
- [14] 孙洪波, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 沿江地区土地利用生态风险评价——以长江三角洲南京地区为例[J]. 生态学报 2010 30(20): 5616–5625 [Sun Hongbo, Yang Guishan, Su Weizhong, et al. Ecological risk assessment of land use in the area along Changjiang River: a case study of Nanjing, China [J]. Acta Ecologica Sinica 2010 30(20): 5616–5625]
- [15] 许学工, 颜磊, 徐丽芬, 等. 中国自然灾害生态风险评价[J]. 北京大学学报(自然科学版) 2011 47(5): 901–908 [Xu Xuegong, Yan Lei, Xu Lifan, et al. Ecological risk assessment of natural disasters in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis 2011 47(5): 901–908]
- [16] Meng Jijun, Xiang Yunyun, Yan Qun, et al. Management of ecological risk in an agricultural–pastoral ecotone: case study of Ordos, Inner Mongolia, China [J]. Natural Hazards. 2015, DOI 10.1007/s11069–015–1836–1
- [17] 周婷, 蒙吉军. 区域生态风险评价方法研究进展[J]. 生态学报 2009 28(4): 762–767 [Zhou Ting, Meng Jijun. Research progress in regional ecological risk assessment methods [J]. Chinese Journal of Ecology 2009 28(4): 762–767]
- [18] 李丽, 张海涛. 基于BP人工神经网络的小城镇生态环境质量评价模型[J]. 应用生态学报 2008 19(12): 2693–2698 [Li Li, Zhang Haitao. Assessment model of townlet eco-environmental quality based on BP-artificial neural network [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2008 19(12): 2693–2698]
- [19] 李双成, 郑度. 人工神经网络模型在地学研究中的应用进展[J]. 地球科学进展 2003 18(1): 68–76 [Li Shuangcheng, Zheng Du. Applications of artificial neural networks to geosciences: review and prospect [J]. Advance in Earth Sciences, 2003 18(1): 68–76]
- [20] 陈辉, 李双成, 郑度. 基于人工神经网络的青藏公路铁路沿线生态系统风险研究[J]. 北京大学学报(自然科学版) 2005, 41(4): 586–593 [Chen Hui, Li Shuangcheng, Zheng Du. Ecological risk assessment of regions alongside Qinghai–Xizang highway and railway based on artificial neural network [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis 2005 41(4): 586–593]
- [21] 张思峰, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评[J]. 生态学报 2010 30(10): 2735–2744 [Zhang Sifeng, Liu Hanmeng. Review of ecological risk assessment methods [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010 30(10): 2735–2744]
- [22] 汪疆玮, 蒙吉军. 漓江流域干旱与洪涝灾害生态风险评价与管理[J]. 热带地理 2014 34(3): 366–373 [Wang Jiangwei, Meng Jijun. Ecological risk assessment and management of floods and droughts in the Li River Basin [J]. Tropical Geography, 2014 34(3): 366–373]
- [23] 吴金华, 张伟, 刘小玲. 基于RRM模型的神木县土地整治规划生态风险评价[J]. 中国土地科学 2014 28(3): 76–82 [Wu Jinhua, Zhang Wei, Liu Xiaoling. Ecological risk assessment in land reclamation plan of Shenmu County based on relative risk model [J]. China Land Sciences 2014 28(3): 76–82]
- [24] 彭士涛, 覃雪波, 周然, 等. 渤海湾港口生态风险评估[J]. 生态学报 2014 34(1): 224–230 [Peng Shitao, Qin Xuebo, Zhou ran, etc. Ecological risk evaluation of port in Bohai Bay [J]. Acta Ecologica Sinica 2014 34(1): 224–230]
- [25] Yuan Daoxian. Rock desertification in the subtropical karst of south China [J]. Z Geomorph N F, 1997 1(108): 81–90
- [26] 张盼盼, 胡远满, 李秀珍, 等. 基于GIS的喀斯特高原山区石漠化景观格局变化分析[J]. 农业工程学报 2009 25(12): 306–311 [Zhang Panpan, Hu Yuanman, Li Xiuzhen, et al. Analysis of rocky desertification landscape pattern change in Karst plateau area based on GIS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2009 25(12): 306–311]
- [27] 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价[J]. 地理学报 2009 64(5): 609–618 [Bai Xiaoyong, Wang Shjie, Chen Qiwei, et al. Spatio-temporal evolution process and its evaluation method of karst rocky desertification in Guizhou Province [J]. Acta Geographica Sinica 2009 64(5): 609–618]
- [28] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报 2012 67(7): 878–888 [Xiong Kangning, Li Jin, Long Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification [J]. Acta Geographica Sinica 2012 67(7): 878–888]

- [29] 陈起伟,熊康宁,蓝安军. 基于3S的贵州喀斯特石漠化现状及变化趋势分析[J]. 中国喀斯特,2007,26(1): 37-42 [Chen Qiwei,Xiong Kangning,Lan Anjun. Analysis on karst rocky desertification in Guizhou based on 3S [J]. Carsologica Sinica,2007,26(1): 37-42]
- [30] 黄秋昊,蔡云龙. 基于RBFN模型的贵州省石漠化危险度评价[J]. 地理学报,2005,60(5): 771-778 [Huang Qiu hao,Cai Yunlong. Hazardous assessment of karst rocky desertification in Guizhou Province: an application of the RBFN Model [J]. Acta Geographica Sinica,2005,60(5): 771-778]
- [31] Landis W G,Wiegers J K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment [J]. Human and Ecological Risk Assessment,2007,13(1): 25-38
- [32] 许学工,林辉平,付在毅. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报(自然科学版),2001,37(1): 111-120 [Xu Xuegong,Lin Huiping,Fu Zaiyi. Regional ecological risk assessment of wetland in Huanghe River Delta [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis,2001,37(1): 111-120]
- [33] Peter M C,Anne F,Derek B. A critical evaluation of safety (uncertainty) factors for ecological risk assessment [J]. Environmental Toxicology and Chemistry,1998,17(1): 99-108
- [34] USEPA. Framework for ecological risk assessment [R]. EPA/630/R-92/001. Washington D C: ESEPA,1992: 30-31
- [35] 马禄义,许学工,徐丽芬. 中国综合生态风险评价的不确定性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2011,47(5): 893-900 [Ma Luyi,Xu Xuegong,Xu Lifen. Uncertainty analysis of integrated ecological risk assessment of China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2011,47(5): 893-900]

Ecological Risk Management in Karst Area based on RRM and Uncertainty Analysis: A Case Study in Guiyang City

WANG Qi¹, MENG Jijun¹, SUN Ning²

(1. Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education; College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Chinese Academy for Environmental Planning, MEP, Beijing 100012, China)

Abstract: Affected by natural conditions and human activities, karst areas have gained more ecological catastrophes. Regional ecological risk assessment combines regional ecological characteristics and measures ecological risk components and identifies ecological risk spatial differences, which provide a basis for risk management. We took Guiyang City, which is a typical karst ecological fragile area, as our research area and applied Relative Risk Model to identify regional ecological risk characteristics. Following Monte Carlo Simulation uncertainty analysis, we came up with ecological risk management measures for Guiyang City. Conclusions obtain: 1) RRM is efficient for representing ecological risk spatial pattern for Guiyang City, showing that ecological risk decreases from urban-dominated high level area outwards to suburb area; 2) Human activity intensity is the most important factor affecting ecological risk in Guiyang City, while landscape pattern stability affects ecosystem's stability and resilience. Terrain and rocky desertification will aggravate ecological risk to some extent; 3) Uncertainty analysis has furtherly verified models' validity. It showed that uncertainty will do local interference with risk assessment, mainly on low risk area. Results will hold an important and meaningful instruction to ecosystem spatial management in Guiyang City.

Key words: regional ecological risk; Relative Risk Model; uncertainty; karst area; Guiyang City