

董晓超,熊康宁,朱大运,等.喀斯特生态环境风险评价:以贵州省为例[J].中国岩溶,2019,38(5):713-721.
DOI:10.11932/karst20190507

喀斯特生态环境风险评价 ——以贵州省为例

董晓超,熊康宁,朱大运,蓝家程,廖建军,曹洋,刘兴宜

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵阳 550001)

摘要:区域生态环境风险评价具有尺度大、风险源与风险受体多、空间异质性强等特点,开展区域生态环境风险研究是识别生态环境风险水平、制定防范应对策略的重要理论支撑。文章以贵州省为例,参考相对风险模型为风险评价原则,基于自然灾害成因,综合考虑区域自然及经济状况,建立贵州省喀斯特生态环境风险评价框架与指标体系,运用层次分析法及系统聚类分析法,对各评价单元的脆弱性、暴露性、脆弱性、防灾减灾能力进行分析,并划分了区域风险程度等级。结果表明:贵州省喀斯特生态环境风险分布与生态环境本底和社会经济发展水平相关性明显,高风险区主要分布在生态环境脆弱的高原山地、高原峡谷地区以及综合发展水平较高的贵阳中心城区,低风险区主要分布在喀斯特分布面积少、生态本底好、自然灾害较少的黔东南及黔西北地区。

关键词:喀斯特;生态环境;风险评价;脆弱性;贵州省

中图分类号:X171 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2019)05-0713-09 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

风险评价作为风险防范的基础工作和关键环节,其作用主要在于反映区域生态环境状况,凸显区域当前的主要环境问题,提出风险评价框架,为区域规划和风险防范提供一定的决策依据,对区域退化生态环境修复与可持续发展具有重要意义^[1-3]。目前国内外的评价方法主要为三大类,即基于层次分析的模糊数学法^[4]、神经网络^[5]、熵权法^[6]等,以RRM^[7]、PERA^[8]为代表的数学模型,以及基于突变理论^[9]的评价方法。我国的生态风险评价在研究内容上主要分为风险源较为单一的环境污染、自然灾害评价^[10-11],多风险源的区域生态风险评价^[12-13],但对多风险源、生态环境要素空间异质性强的区域生态风

险评价研究相对较少;研究趋势上已从单因素和多因素的单一风险评价向多因素的复合风险评价发展。随着科学技术的发展,计算机科学和遥感等空间信息先进技术的加入,使得评价的区域尺度得到较大扩展,评价模型也越来越依赖于风险评价软件^[14]。

中国南方喀斯特地区属于典型脆弱生态区,因其独特的水文地质结构,生态环境区异性强,加上人类活动的强烈干扰,水土流失和石漠化严重,生态脆弱度高,环境风险大,严重影响了区域生态安全与经济发展^[15-16]。近年来,对于喀斯特地区的生态风险评价多是基于风险过程、景观格局或土地利用等方面构建指标体系,通过RRM或AHP进行区域风险评价,研究内容多集中于生态脆弱性、敏感性,生态安

基金项目:国家十三五重点研发计划课题“喀斯特高原石漠化综合治理生态产业模式与技术集成示范”(2016YFC0502607);贵州省研究生教育创新计划项目“贵州省熊康宁喀斯特环境研究生导师工作室建设”(黔教研合GZS字[2016]04号)

第一作者简介:董晓超(1993-),男,在读硕士研究生,主要从事石漠化林灌草修复研究。E-mail:1715735757@qq.com。

通信作者:熊康宁(1958-),男,教授,博导,主要从事喀斯特地貌与洞穴、世界自然遗产、石漠化治理研究。E-mail:xiongkn@163.com。

收稿日期:2018-03-11

全,石漠化灾害等方面,利用3S技术的风险评价也逐渐增多^[17-22]。由于大区域的风险评价是以复杂的空间综合信息为基础,监测数据较难获取,长期以来研究进展缓慢。贵州省地处中国南方喀斯特的中心地带,地表碳酸盐岩广布,石漠化灾害严重,人口压力大,社会经济发展水平低下,是典型的喀斯特生态环境脆弱地区。本文以贵州省为例,基于88县区的自然及社会经济数据,依据相对风险模型分级思想,运用层次分析法,对其进行风险分析并划分区域风险等级,以为贵州省脆弱生态修复、风险防范及管理政策的制定提供科学依据。

1 区域概况及研究方法

1.1 研究区概况

贵州省(24°30'N-29°13'N, 103°31'E-109°30'E)喀斯特面积 10.91 万 km², 占全省国土总面积的 61.92%, 整个区域主要由黔西高原山地峡谷区、黔中高原台地区、黔东低山丘陵区三大地理单元组成。在生态区划上,除黔东北及黔东南地区属于湘西及黔鄂山地常绿阔叶林生态区外,其余地区绝大多数属于黔桂喀斯特生态脆弱区。区内碳酸盐岩广布、生态系统结构复杂、空间异质性强、环境容量低、敏感度高、承灾阈值小,生境条件极度脆弱^[23-24]。

1.2 研究方法

本文在参考美国环保局提出的生态风险评价基本框架和蒙吉军等人^[3,25-26]研究成果基础上,结合贵州省的自然及社会经济状况,运用层次分析法对贵州省喀斯特生态环境进行风险评价。具体评价流程为:首先,确定生态风险管理目标与生态终点,明确人类活动及自然灾害可能对生态环境造成的危害;其次,对评价区域内各种自然及人为风险源进行分析,并选择风险受体,再结合评价指标体系对评价区进行危险性、暴露性、脆弱性、防灾减灾能力等因素进行综合分析;最后,依据分析结果,对贵州省进行喀斯特生态环境风险分区。

2 评价指标体系及数据处理

2.1 评价指标体系的构建

根据贵州喀斯特区独特的自然及社会经济状况,从生态环境系统内外部影响因子的综合角度,同时遵循科学性、系统性、主导性、层次性、定量性等原则,共选取地质、地形、土壤、气象、环境、经济、人口、交通 8 类 30 项子指标(表 1),构建贵州喀斯特生态环境风险指标体系,以期能够全面地反映贵州喀斯特地区生态环境风险状况^[27]。指标权重由 AHP 法计算得出。

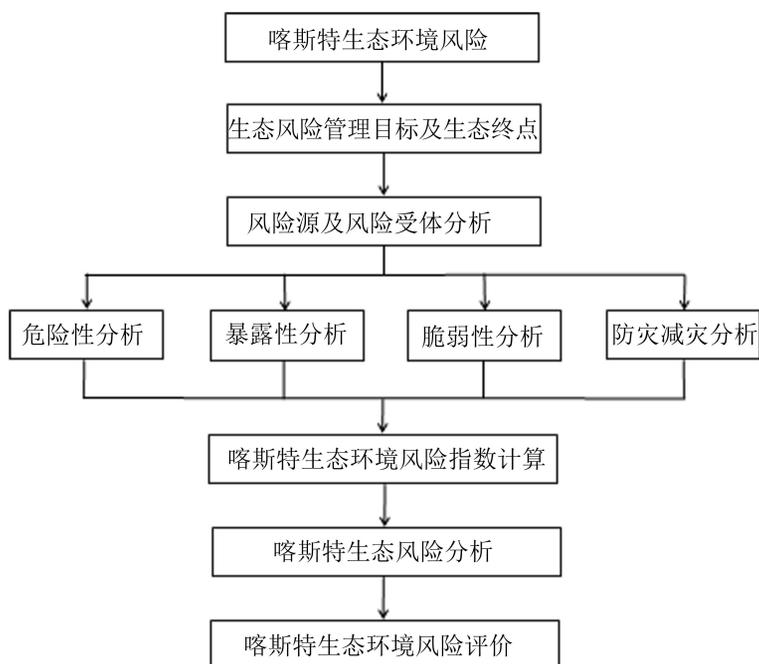


图 1 喀斯特生态环境风险评价流程图

Fig. 1 Flowchart of risk assessment of karst ecological environments

表 1 贵州喀斯特生态环境风险评价指标体系

Table 1 Index system of karst ecological environment risk assessment in Guizhou Province

目标层 A	准则层 B	指标层 C	子指标层 D	指标权重	
贵州省喀斯特 生态环境风险评价 指标体系 A	危险性 B ₁	土地退化 C ₁	石漠化强度 D ₁	0.073	
			水土流失强度 D ₂	0.059	
			旱灾频率 D ₃	0.033	
		气象灾害 C ₂	涝灾频率 D ₄	0.033	
			雹灾频率 D ₅	0.017	
			地质灾害 C ₃	滑坡泥石流频率 D ₆	0.069
		暴露性 B ₂	环境污染 C ₄	水资源质量状况 D ₇ ^①	0.017
				空气质量指数 D ₈ ^②	0.009
				固体废弃物产生量 D ₉	0.017
	社会经济暴露性 C ₅		人口密度 D ₁₀	0.033	
			GDP D ₁₁	0.029	
			工矿企业密度 D ₁₂	0.040	
			地均 GDP D ₁₃	0.044	
			森林面积比例 D ₁₄	0.011	
			草地面积比例 D ₁₅	0.021	
	生态环境暴露性 C ₆	水域湿地面积比例 D ₁₆	0.016		
		耕地面积比例 D ₁₇	0.026		
		建设用地面积比例 D ₁₈	0.032		
		社会经济脆弱性 C ₇	常住人口劳动力 D ₁₉	0.008	
			第一产业比重 D ₂₀	0.05	
			农村人口比例 D ₂₁	0.03	
	脆弱性 B ₃	生态环境质量脆弱性 C ₈	人均 GDP D ₂₂	0.022	
			人口受教育程度 D ₂₃	0.018	
		生态环境质量脆弱性 C ₈	碳酸盐岩比例 D ₂₄	0.035	
			地形坡度 D ₂₅	0.035	
	防灾减灾 B ₄	防灾减灾投入 C ₁₀	生态环境质量指数 D ₂₆ ^③	0.073	
财政收入 C ₉			财政预算收入 D ₂₇	0.033	
人均财政预算收入 D ₂₈			0.05		
环境保护投入 D ₂₉			0.023		
交通通达度 C ₁₁			道路网密度 D ₃₀	0.045	

注:①水资源质量状况采用2015年贵州省各市州环境质量公报中数据;②空气质量指数采用2015年1-12月贵州省环境质量月报中各县区环境空气质量综合指数(AQI)的均值;③生态环境质量指数采用贵州省环境保护公报中生态环境质量指数EI,其综合反映了生物丰度、植被覆盖、水网密度等环境因子。

2.2 数据来源及处理

2.2.1 数据来源

贵州省喀斯特生态环境风险评价数据主要分为四类,即:危险性数据、暴露性数据、脆弱性数据及防灾减灾能力数据。其中,危险性数据主要包括土地

退化、自然灾害、环境污染数据;暴露性数据主要包括部分社会经济数据及土地利用数据;脆弱性数据主要包括部分社会经济数据、地形、岩性及生态环境质量数据;防灾减灾数据库主要包括财政收入、防灾减灾投入及道路网数据(表2-表5)。

表2 数据来源
Table 2 Sources of data

数据类型	数据来源	数据类型	数据来源
石漠化及水土流失强度	国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心	人口密度、常住人口劳动力、受教育程度	贵州省各市州第六次人口普查主要数据公报
气象及地质灾害数据	贵州省气象局	GDP、地均GDP、人均GDP、农村人口比例	各县区2016年政府工作报告
空气质量指数	2015年1—12月贵州省环境质量月报均值统计	第一产业比重、人均/总财政预算收入	各县区2015年国民经济与社会发展统计公报
水资源质量状况	2015年贵州省水资源公报	防灾减灾投入	各县区2015年财政预算执行情况
固体废弃物产生量	各市州2015年环境质量公报	生态环境质量	贵州省2015年环境保护公报
道路网密度	Google earth 提取分析	工矿企业数据	各市州第三次经济普查
地形坡度	DEM 高程提取分析	土地利用数据	国土资源二次调查数据

2.2.2 数据处理

贵州喀斯特生态环境风险,评价指标包括正向评价指标和负向评价指标。正向评价指标是指评价指标的数值越大,喀斯特生态环境风险等级越大;负向评价指标则相反。由于评估中收集的数据量巨大且数据质量不同,需要对收集来的原始数据进行标准化处理^[28]。

正向评价指标的标准化数学函数为:

$$D_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}}$$

负向评价指标的标准化数学函数为:

$$D_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad i=(1, 2, 3, \dots, 87, 88), j=(1, 2, 3, \dots, 21, 22)$$

式中: i 表示第 i 个评价单元; j 表示第 j 项评价指标; D_{ij} 表示第 i 个评价单元第 j 项评价指标的标准化数值; X_{ij} 表示第 i 个评价单元第 j 项评价指标的原始数值; $X_{j\max}$ 表示第 j 项评价指标的最大值; $X_{j\min}$ 表示第 j 项评价指标的最小值。

本文30项指标中, D_1-D_{13} 、 $D_{17}-D_{21}$ 、 D_{24} 、 D_{25} 20项指标为正向评价指标,其余10项指标为负向评价指标。

3 喀斯特生态环境风险分析模型及分级标准

3.1 风险指数计算模型

生态环境风险指数是在各项指标权重以及指标数据充分完备的情况下,利用层次分析法和加权综合法,对数据进行处理,得出生态环境风险指数。处理步骤为:首先对88个县市区各项子指标进行归一化

处理,再利用各项子指标的权重求出其相对风险指数,将各项子指标相对风险指数加权之和得到指标层的相对风险指数,依此类推,求出准则层和目标层相对风险指数,最后将目标层相对风险指数进行无量纲化处理,从而完成生态环境风险指数的计算。贵州喀斯特生态环境风险指数模型如下:

$$S_{D_{ij}} = D_{ij} \times W_j$$

$$S_{B_{1i}} = \sum_{j=1}^9 S_{D_{ij}}$$

$$S_{B_{4i}} = \sum_{j=19}^{22} S_{D_{ij}}$$

$$S_{A_i} = \frac{(\sum S_{B_{1i}} - \min \sum S_{B_{1i}})}{(\max \sum S_{B_{1i}} - \min \sum S_{B_{1i}})}$$

$$i=(1, 2, 3, \dots, 87, 88), n=(1, 2, 3, 4)$$

式中, S_{A_i} 代表第 i 个评价单元的生态环境风险指数, $S_{B_{1i}}$ 、 $S_{B_{4i}}$ 分别代表第 i 个评价单元危险性指数,暴露性指数,脆弱性指数和防灾减灾指数, $S_{D_{ij}}$ 表示第 i 个评价单元第 j 项评价指标的相对风险指数, D_{ij} 表示第 i 个评价单元第 j 项指标的标准化数值, W_j 表示第 j 项子指标的权重值。根据风险指数模型计算出的各项指标风险指数,均为数值越大风险越高。

3.2 贵州喀斯特生态环境风险等级划分

根据指数模型计算出各评价单元的风险指数,并进行标准化处理,然后通过统计软件SPSS22.0进行系统聚类分析,根据分析结果并结合实际情况将贵州省喀斯特生态环境风险分为轻度风险、中度风险、强度风险、极强度风险4个等级(表3)。

表 3 贵州喀斯特生态环境风险等级划分标准
Table 3 Division criteria of karst ecological environment risk grade in Guizhou Province

风险等级	风险区间
轻度风险	0~0.303
中度风险	0.304~0.458
强度风险	0.459~0.750
极强度风险	0.751~1

4 贵州省喀斯特生态环境风险评价

4.1 风险源选择

风险源是指可能对区域生态环境产生危害的一种或多种自然或人为的风险来源^[29]。根据贵州省独特的喀斯特发育过程及强烈人类干扰而产生的剧烈地水土流失和基岩裸露的现象,选取石漠化和水土流失 2 项指标作为喀斯特生态环境中的土地退化风险源;利用贵州省气象局自然灾害统计数据并结合各项自然灾害出现的频率、数据的完整性,选取旱灾、暴雨洪涝、冰雹和地质灾害 4 项指标分别作为气象灾害和地质灾害的风险源;针对近年来出现的环境污染状况,依据贵州省各市环保单位的环境数据,选取大气污染、水污染、固体废弃物污染 3 项指标作为环境污染的风险源。利用上述 9 项指标对贵州喀斯特生态环境进行危险性分析。

4.2 受体分析及生态终点的确定

风险受体是生态环境中风险的承担者,在生态环境风险评价中,是指可能会受到风险源影响的生态系统类型或组分。它可能是生物体,如:动植物,也可能是非生物体,如:人工建筑物^[30]。本研究区域尺度较大,区域内生态系统复杂多样,不便于进行系统分析,因此,根据贵州省土地利用状况及特有的石漠化现象,把农田、森林、草地、建设用地、水域、裸岩地 6 大类生态系统作为此次评价的风险受体,其中林地占地比例最高,达 51.14%,耕地、草地、建设用地占地比例分别为 26.8%、9.03%、3.83%,裸岩地和水域占地比例最小,分别为 2.73% 和 0.99%。生态终点指风险源可能对生态系统产生的损害。本次生态风险评估主要为喀斯特地区,因此生态终点确定为不合理的人类活动以及自然灾害造成的植被退化、水土流失、土地石漠化加剧、生态系统结构和功能遭到破坏。

4.3 贵州省喀斯特生态环境风险指数分析

4.3.1 危险性指数分析

贵州省喀斯特生态环境危险性在空间分布特征大体为自西向东递减,其中黔西地区危险性最高,而黔东南州和黔西北赤水市危险性最低。此外,沿河、德江、思南县所在的线状区域及长顺县,危险性较周围地区明显偏高(图 2)。主要原因是:①黔西处于云南高原向黔中高原的过渡地带,沿河至思南一线为乌江干流流经区,大河峡谷深切,地形陡峭^[31],坡度 > 25° 的地形比例均在 10% 以上,部分县区高达 20%,加之断裂构造发育,使得黔西与乌江沿线土壤侵蚀强烈,地质灾害频发。②在岩性空间分布上,连续性灰岩和白云岩主要分布在黔西及黔南地区,其为石漠化的发展提供了良好的物质基础;黔北和黔东北地区主要为碳酸盐岩与碎屑岩的夹层或互层区,石漠化程度较低,集中分布在乌江沿线地区;黔东南和黔西北的赤水地区岩性主要为碎屑岩,基本无石漠化分布^[32]。③人口压力上,黔中和黔东地区生态环境良好,合理人口承载力较大,而黔西地区人口密度高达 288 人/km²,远远超出了合理人口容量,人类活动又加速了土地退化和环境污染,诱发一系列次生灾害。④由于长顺县土地退化严重,强度以上石漠化及土壤侵蚀面积分布比例高达 17.17% 和 6%,加之其气象灾害发生频率较高,使其危险性明显高于周边县区。

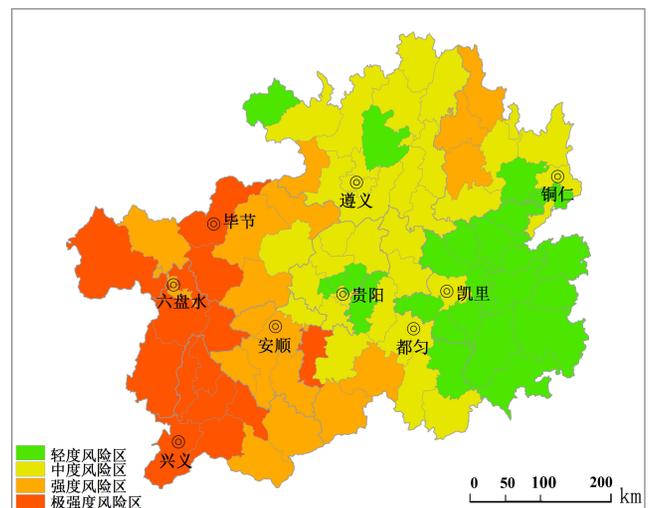


图 2 贵州省喀斯特生态环境危险性指数分布图

Fig. 2 Distribution of karst ecological environment risk indexes in Guizhou Province

4.3.2 暴露性指数分析

贵州省喀斯特生态环境暴露性指数差异较大,暴露性指数在0.276以下的县区占比高达88.6%,兴义—铜仁一线以东县域暴露性指数更是不足0.145,暴露性指数较高地区主要为贵阳、毕节、安顺、遵义、六盘水的主城区以及仁怀等经济发达和人口密集区(图3)。原因在于:①社会经济上,贵州省区域经济发展差异较为显著,贵阳、遵义、仁怀等经济较发达地区面积仅占贵州省国土面积的6.2%,但人口占贵州省的19.0%,平均人口密度达624.4人/km²,人口暴露性高;均为区域的经济中心,经济发达,2015年GDP占贵州省GDP总量1/3以上,企业厂矿密度均在2个/km²以上,经济密度高,在不考虑防灾能力的情况下,当自然灾害发生时,其受到的经济损失较大,社会经济暴露性较高,而兴义—铜仁一线以东县域则与之相反。②土地利用上,经济较发达区地形较为平坦,二三产业相对发达,基础设施较为完善,耕地、建设用地占地比例相对较高,植被覆盖度相对较低,生态环境暴露性指数较高。而兴义—铜仁一线以东县域耕地、建设用地比例一般不足20%,个别县区更是不足10%,致使其生态环境暴露性指数极低。

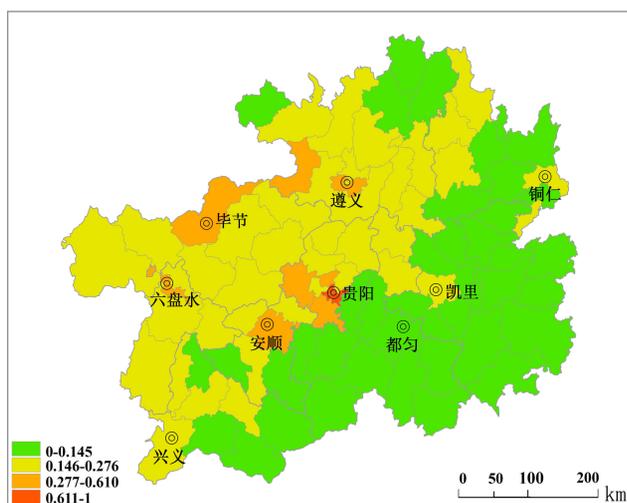


图3 贵州省喀斯特生态环境暴露性指数分布图

Fig. 3 Distribution of karst ecological environment exposure indexes in Guizhou Province

4.3.3 脆弱性指数分析

贵州省喀斯特生态环境脆弱性整体上呈现出黔西、黔北及黔南州部分地区较高,黔东南、贵阳及遵义西南部地区较低的空间分布规律(图4)。主要原因:①社会经济上,黔西及黔东北地区人口受教育程

度低,高中及以上受教育人口比例仅20%,远低于贵阳地区的36%;且除钟山区和盘县外,区域发展水平较低,产业结构落后,第一产业比重均在10%以上,个别县区第一产业比重更是高达30%以上;城市化水平低,农村人口比例高,多在60%以上,社会经济脆弱度高。因此黔西地区社会经济脆弱度最高,而贵阳等发达地区则恰恰相反。②生态环境上,黔东南州及赤水市属低山丘陵地貌,地形起伏小,且属于非喀斯特地区,土层深厚肥沃,加之人口密度小,人类活动对生态系统干扰较小,使得其境内环境质量状况较好;黔西及黔北地区则反之,在2014年贵州省环境状况公报公布生态环境质量状况指数中,黔东南州和遵义市最高分别为72.89、68.19,黔西南州、安顺市、毕节市、六盘水市较低,分别为60.17、58.56、58.05、54.21,说明黔西地区生态环境状况较差,黔东南及黔西北的遵义地区生态环境状况较为良好。③钟山、盘县虽然经济发展水较好,但其采矿业、化工业发达,生态破坏及环境污染较为严重且喀斯特地貌较高,生态系统较为脆弱,因此其脆弱性指数相对较高。

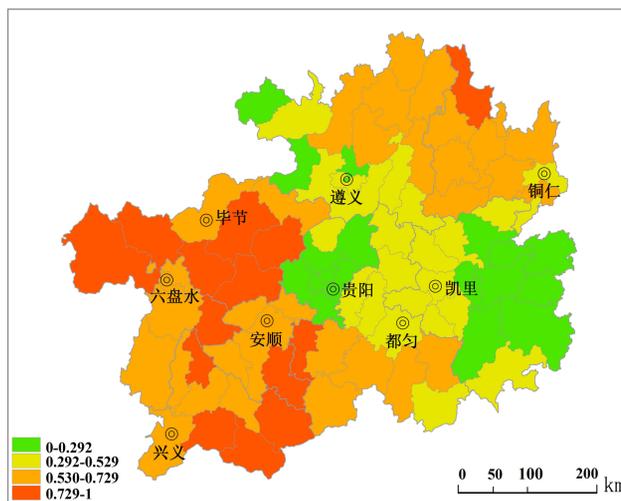


图4 贵州省喀斯特生态环境脆弱性指数分布图

Fig. 4 Distribution of karst ecological environment vulnerability indexes in Guizhou Province

4.3.4 防灾减灾指数分析

贵州省喀斯特生态环境防灾减灾能力总体上较弱,其主要受地区经济发展水平及财政收入的影响,在空间分布上呈现出东部和南部地区防灾减灾能力弱,经济较发达地区及黔西南地区防灾减灾能力较高的格局(图5)。其在于:①防灾减灾投入的多寡主

要受当地经济发展水平和财政收入影响,各市州首府所在地一般为地区的政治、经济、交通、文化中心,综合发展水平较高,财政实力雄厚,人均财政预算收入和公共财政预算收入较高,防灾减灾投入较多。此外,这些地区基础设施较为完善,二级以上公路密度较高,一般在 0.3 km/km^2 以上,灾害应急管理能力和防灾减灾能力较强。②黔东北、黔东南及黔南部分县区则经济发展相对落后,地方税收较少,直接导致了其防灾减灾投入及基础设施建设不足,交通设施不完善直接延长了灾后救援时间,不利于灾后重建工作的开展。③黔西南州虽经济较为落后,但其属于国家石漠化重点治理区及生态恢复区,中央及地方财政生态投资及基础设施援建较多,县均防灾减灾投入近亿元,因此其防灾减灾能力相对较强。

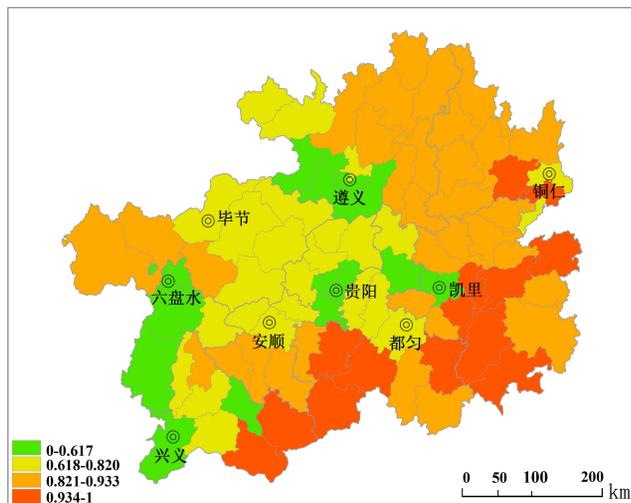


图 5 贵州省喀斯特生态环境防灾减灾指数分布图

Fig. 5 Distribution of karst ecological environment disaster prevention and mitigation index in Guizhou Province

4.4 贵州省喀斯特生态环境风险综合分析

贵州省喀斯特生态风险在空间分布上总体呈现出西部和北部较高,自赤水向东南方向放射状延伸的片状区域呈现较低的态势,与喀斯特生态环境脆弱性的空间分布规律较为一致(图6)。主要原因为:①黔西和黔北地区碳酸盐岩分布比例较高,生态环境本底较差,加之大量不合理的人类活动,导致生态系统逐步发生逆向演替,自然灾害频发,经济发展相对落后,防灾减灾投入少,交通设施不完善;贵阳中心城区则受社会经济因素影响较大,社会经济发达,基础设施完善,防灾减灾能力强,但植被覆盖率较

低,暴露性极高,且碳酸盐岩出露比例达 80% 以上,喀斯特生态环境风险高。②遵义西南部及铜仁、江口地区主要为碳酸盐岩与碎屑岩夹层及互层地区,石漠化灾害较轻,土地退化不严重,生态环境本底相对较好,各种风险源发生几率较小;黔南则相反,虽然石漠化相对严重,土地退化程度高,但人口与经济密度低,暴露性较低,其它则与上述地区较为类似,因此同属喀斯特生态环境中度风险区。③黔东南及赤水市主要受岩性地质因素影响,属非喀斯特区,基本不受石漠化灾害影响,植被覆盖度较高,生物多样性丰富,且两地经济落后,工业化程度低,环境污染小,生态环境灾害风险、脆弱性、暴露性均较低,此外赤水防灾减灾能力也较高;贵阳外围城区社会经济相对发达,但经济密度略低,暴露性指数远低于中心城区,财政预算收入较多,防灾减灾能力较强,生态环境质量相对较好,生态环境脆弱度低,均为喀斯特生态环境轻度风险区。

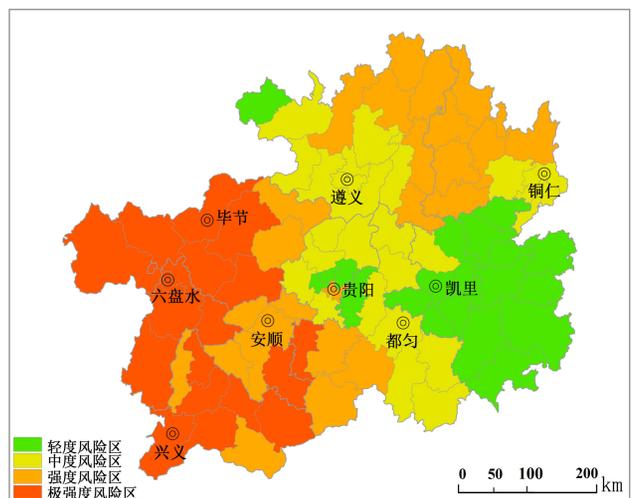


图 6 贵州省喀斯特生态环境风险分布图

Fig. 6 Distribution of karst ecological environment risks in Guizhou Province

5 结论与讨论

贵州省喀斯特生态环境风险空间分布规律明显,大致上风险程度由西部和北部向中东部逐渐降低,强度、极强度风险区主要分布在黔西、黔北地区及贵阳中心城区,其风险指数均高于 0.459;轻度风险区主要分布在黔东南、贵阳主城区外围及赤水地区,其风险指数均低于 0.299,并有部分县区风险指数低于 0.1;黔中及黔东北地区属于中度风险区,风险指数均在 0.304~0.458 之间。这与李雪冬在贵阳

进行的喀斯特生态评价结果较为相似,均表明在地形、岩性等自然条件差距较小的情况下,城市的生态风险度要高于周边地区^[33];与梁英在冀北地区的风险评价结果也较为类似,高风险区均分布在生态环境本地较差地区,表明喀斯特与非喀斯特地区的生态风险空间分布有一定的相似性,但岩性条件、石漠化灾害和区域经济发展水平差异等仍对喀斯特地区影响较大^[34];而与胡宝清在广西所做的喀斯特环境脆弱性评价结果有一定差异,这可能与早年的区域社会经济发展差异较小及选取指标有关^[22]。

本文所应用的评价模型和方法已较为广泛的应用于区域生态风险评价,但在指标体系构建时综合考虑了喀斯特地区的风险源和脆弱的喀斯特生态系统,将石漠化和岩性因子引入评价指标体系,既突出了石漠化地区特有的风险源,又较好地反映了喀斯特地质状况,评价结果客观反映了贵州喀斯特生态环境风险,但评价区域空间尺度较大,生态环境空间异质性强,影响因子众多,且受数据获取的限制。本文评价指标仍不够全面,应进一步优化评价指标体系,使之涵盖范围更加全面,同时应注意各评价指标之间的关联性,避免评价指标过于冗杂。此外,目前的生态风险评价对于风险源、暴露性、脆弱性、防灾能力与生态终点之间还未实现量化表达,其仍是未来风险评价领域亟需解决的问题。

参考文献

- [1] 吴绍洪,赵艳,汤秋鸿,等.面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究[J].地理科学进展,2015,34(1):10-17.
- [2] 彭贵芬,张一平,赵宁坤.基于信息分配理论的云南干旱风险评估[J].气象,2009,35(7):79-86.
- [3] 蒙吉军,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.
- [4] 杨华林,李明伦,刘邦显.模糊数学在岩溶储层地热资源勘探风险评价中的应用:以重庆山地型岩溶热储为例[J].中国岩溶,2013,32(4):384-390.
- [5] 李杨,李海东,施卫省,等.基于神经网络的土壤重金属预测及生态风险评价[J].长江流域资源与环境,2017,26(4):591-597.
- [6] 高长波,陈新庚,韦朝海,等.熵权模糊综合评价法在城市生态安全评价中的应用[J].应用生态学报,2006(10):1923-1927.
- [7] Landis W G, Landis W G. Regional scale ecological risk assessment: using the relative risk model[J]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
- [8] 杨沛,李天宏,毛小琴.基于PESR模型的深圳河流域生态风险分析[J].北京大学学报(自然科学版),2011,47(4):727-734.
- [9] 陈克亮,时亚楼,林志兰,等.基于突变理论的近岸海域生态风险综合评价方法:以罗源湾为例[J].应用生态学报,2012,23(1):213-221.
- [10] 刘丰,刘静玲,陈秋颖,等.海河南系表层沉积物中多环芳烃的污染特征与生态风险评价[J].科学通报,2013,58(12):1109-1116.
- [11] 刘毅飞,王欣凯,蔡廷禄,等.福建海坛岛地质灾害特征及风险评价[J].灾害学,2016,31(4):122-127.
- [12] 马骏,李昌晓,魏虹,等.三峡库区生态脆弱性评价[J].生态学报,2015,35(21):7117-7129.
- [13] 解雪峰,吴涛,肖翠,等.基于PSR模型的东阳江流域生态安全评价[J].资源科学,2014,36(8):1702-1711.
- [14] 曾建军,邹明亮,郭建军,等.生态风险评价研究进展综述[J].环境监测管理与技术,2017,29(1):1-5+10.
- [15] 王世杰.喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J].中国岩溶,2002,21(2):31-35.
- [16] CAO Jianhua, YUAN Daoxian, TONG Liqiang, et al. an overview of karst ecosystem in southwest china: current state and future management[J]. Journal of Resources and Ecology, 2015,6(4):247-256.
- [17] 黄晓云,常晟,王静爱,等.中国喀斯特脆弱生态环境石漠化风险评价方法[J].世界林业研究,2013,26(6):45-51.
- [18] 张军以,苏维词,苏凯.喀斯特地区土地石漠化风险及评价指标体系[J].水土保持通报,2011,31(2):172-176.
- [19] 王祺,蒙吉军,孙宁.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[J].山地学报,2016,34(4):476-484.
- [20] 梁玉华,张军以,樊云龙.喀斯特生态系统退化诊断特征及风险评价研究:以毕节石漠化为例[J].水土保持研究,2013,20(1):240-245.
- [21] 易武英,苏维词.基于RS和GIS的乌江流域生态安全度变化评价[J].中国岩溶,2014,33(3):308-318.
- [22] 禹艺娜,王中美.基于GIS和AHP的贵阳市环城林带生态敏感性评价[J].中国岩溶,2017,36(3):359-367.
- [23] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感—GIS典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- [24] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,等.中国生态区划方案[J].生态学报,2001,21(1):1-6.
- [25] USEPA. Framework for ecological risk assessment [R]. Washington DC: USEPA. 1992.
- [26] USEPA. Guidelines for ecological risk assessment [R]. Washington DC: USEPA. 1998.
- [27] 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[J].水土保持学报,2004,18(1):103-107.

- [28] 张继权,梁警丹,周道玮.基于GIS技术的吉林省生态灾害风险评价[J].应用生态学报,2007,18(8):1765-1770.
- [29] 蒙吉军,赵春红.区域生态风险评价指标体系[J].应用生态学报,2009,20(4):983-990.
- [30] 郭先华,崔胜辉,赵千钧.城市水源地生态风险评价[J].环境科学研究,2009,22(6):688-694.
- [31] 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[J].地理学与国土研究,2002,18(1):77-79.
- [32] 李瑞玲,王世杰,周德全,等.贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J].地理学报,2003,58(2):314-320.
- [33] 李雪冬,杨广斌,周越,等.基于3S技术的岩溶地区城市景观生态安全评价:以贵阳市为例[J].中国岩溶,2016,35(3):340-348.
- [34] 梁英.冀北土地利用变化的生态风险评价[D].石家庄:河北师范大学,2010.

Risk assessment of karst ecological environments: A case study of Guizhou Province

DONG Xiaochao, XIONG Kangning, ZHU Dayun, LAN Jiacheng, LIAO Jianjun, CAO Yang, LIU Xingyi

(School of Karst Science, Guizhou Normal University/State Key Engineering Technology Research Center for Karst Desertification Rehabilitation, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract The regional ecological risk assessment is characterized by large scale, a large number of risk sources and risk receptors, and strong spatial heterogeneity. Research on this issue is an important theoretical foundation for identifying the level of the ecological environment risk and formulating the preventive countermeasures. By referring to the relative risk model as the risk assessment principle, this article, taking Guizhou Province as an example, establishes a risk assessment framework and an index system for karst ecological environment in Guizhou Province. Based on a comprehensive consideration of regional natural and economic conditions and the causes of natural disasters, the study analyzed the risk, exposure, vulnerability, disaster prevention and mitigation capacity of each evaluation unit; it classified the regional risk levels by using analytic hierarchy process and system cluster analysis. The results show that the distribution of karst ecological environment risk in Guizhou Province is obviously related to the background of ecological environments and the level of social and economic development, in which the high risk areas mainly distribute in habitat fragile plateau mountain regions, plateau canyon areas and the center of Guiyang city which has a high comprehensive development, while the low risk areas are distribute in the southeast and northwest of Guizhou with less karst areas, better ecological environment and less natural disasters.

Key words karst; ecological environment, risk assessment, vulnerability, Guizhou Province

(编辑 张玲)