

基于景观格局的喀斯特山区流域生态风险评估 ——以贵州省乌江流域为例

奚世军^{1, 2} 安裕伦^{1, 2} 李阳兵¹ 蔡沛伶³ 龙立美¹ 陈啟英^{1, 21}

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550001;

3. 贵州师范大学 教育科学学院, 贵州 贵阳 550001)

【摘要】: 以小流域为采样单元开展流域景观生态风险评估, 对建立流域景观生态风险预警机制、改善流域生态环境、构建生态安全格局具有重要意义。以 2000~2015 年土地利用数据为基础, 基于景观格局法构建景观生态风险评估模型对贵州省乌江流域景观生态风险及时空特征进行评估与分析。结果表明: (1) 15 年来, 乌江流域景观格局变化显著, 其中林地面积增加了 2.85%, 湿地增加了 0.13%, 耕地减少了 4.52%, 其它用地增加了 0.02%; (2) 乌江流域 2000、2005、2010、2015 年的景观生态风险度块金值与基台值的比值分别为 11.81%、12.05%、13.29%、14.04%, 变程分别为 10.9、22.8、10.7、12.8km; (3) 15 年来, 不同景观生态风险等级在面积上表现出不同变化趋势, 其中高、极高风险区面积分别增加了 8.46%、5.57%, 弱、低风险区面积分别减少了 6.28%、7.28%。由此可见, 由于频繁的人类活动强烈干扰使得流域内景观生态风险整体呈现上升趋势。

【关键词】: 乌江流域 喀斯特 景观生态风险 景观格局

【中图分类号】: X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)03-0712-10

流域景观生态风险评价是以自然地貌分异与水文过程构成的生态空间格局为评价区域, 评价自然灾害、人为干扰等风险源对流域内生态系统及其组分造成不利影响的可能性及其危害程度的复杂过程^[1~3]。流域是一个复杂综合生态地域系统, 也是人类活动的重要场所^[4]。在人为活动占优势的景观内, 不同土地利用方式和强度对生态系统影响具有区域性和累积性的特征, 并且直观地反映在生态系统的结构和组成上^[5]。流域内频繁的人类社会生产活动使得流域景观格局发生变化, 随之引起生态环境脆弱性和生态系统压迫程度增强等一系列环境问题。因此, 及时开展科学的流域景观生态风险评估与时空演变研究对流域生态文明建设、流域生态系统修复、流域景观生态风险预警等具有重要意义。

此前, 国内外学者对流域水生环境、流域灾害、流域综合生态风险评价有较深入研究。国外学者, Luxon M 等^[6]和 Angela M 等^[7]以 Willamette River 和 Lower McKenzie River 流域以及 Codoris Creek 流域为研究区域, 基于相对风险模型 (RRM) 分别对区

作者简介: 奚世军 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统与景观生态学研究. E-mail: 1874791784@qq.com; 安裕伦, E-mail: anyulun@126.com。

基金项目: 贵州省科技计划课题 (黔科合计 Z 字 [2015] 4007)。

域暖水鱼类生境风险效应和各种风险源对风险受体影响进行评估。Paul A 等^[8]提出 general framework and specific procedures 对 the Brunette River watershed 因城市化而改变流域生态环境进行生态风险评估。Cormier S M 等^[9]以多重风险源对美国 Big Darby River 流域进行生态风险评估。Diamond J M 等^[10]利用流域景观生态风险评估框架确定本地水生动物的压力来源。国内学者, 巩杰等^[4, 11]、潘竞虎等^[12]以构建综合景观生态风险模型分别对甘肃白龙江流域、疏勒河流域的生态风险进行评价并提出管理策略。许妍等^[13, 14]以构建景观生态风险评价模型、构建危险度-脆弱度-损失度以及构建风险源危险度评价模型对太湖流域景观生态风险展开研究。综上所述, 国内外对流域景观生态风险评价在指标选取与方法已经取得较大进展, 但研究区域主要集中在湿润区、半湿润区以及干旱区的湖泊、河流、河口三角洲^[14], 而针对典型喀斯特地区大尺度流域景观生态风险研究报道较少, 尤其缺乏以小流域为采样单元评估流域景观生态风险。

乌江流域是长江流域的重要组成部分, 是典型喀斯特地区, 是《全国生态功能区划》划定的重要水源涵养区、土壤保持区, 同时也是国家发改委确定的全国 18 个国土资源重点开发区之一。流域内由于多以低山丘陵为主, 水土流失、石漠化问题十分严峻, 生态环境极为脆弱^[15~17]。近年来, 随着流域内社会经济发展速度加快, 流域景观格局发生强烈变化, 最终流域生态系统结构、生态过程、生态服务功能受到严重影响, 生态环境质量逐渐恶化^[18~20]。因此, 本着响应流域生态文明建设为契机的可持续发展战略对乌江流域景观生态风险评估甚为必要。本文采用景观分析法^[21]以乌江流域 2000~2015 年的景观类型及格局为评价受体, 人类社会生产活动主要为评价风险源, 对乌江流域景观生态风险和时空特征进行评估与分析, 以期对典型喀斯特地区流域生态安全格局构建、景观生态风险预警机制形成、生态系统修复与生态环境管理、社会经济可持续发展提供合理有效的理论依据和技术支持。

1 研究区域概况

贵州省境内乌江流域(以下简称“乌江流域”)是长江上游南岸最大的支流水系, 也是贵州省境内最大的水系^[16]。位于云贵高原的东部(26° 15' N~29° 21' N, 104° 31' E~108° 79' E), 流域面积约为 66195.46km², (图 1)。乌江流域地势西南高, 东北低, 可分为上游(河源-化屋基)、中游(化屋基-思南)、下游(思南-出境入重庆)。乌江流域纯喀斯特、亚喀斯特、非喀斯特地貌分明^[17], 分别约占流域面积的 76.05%、18.29%、5.2%。乌江流域属于亚热带高原季风湿润气候, 植被主要以常绿针叶林、常绿阔叶林为主^[22]。



图 1 研究区域地理位置

2 研究数据及方法

2.1 数据来源与处理

本文以乌江流域 2000、2005、2010、2015 年 4 期土地利用、小流域为基础数据。其 2000、2005、2010 年土地利用数据来源于“贵州省生态环境十年(2000~2010)变化遥感调查与评估”(项目已经通过环保部验收), 2015 年土地利用数据来源于笔者更新而来, 其主要是以 2010 年土地利用数据为基础并参考 2015 年影像数据通过人机交互式更新而来, 最后对其进行野外验证; 小流域数据来源笔者基于 SRTMDEM(分辨率为:30m)数据提取而来^[23,24], 最终提取出 324 个小流域, 其 SRTMDEM 来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。笔者在参考其他学者的研究^[29~32]以及考虑到流域景观特征, 将流域景观类型划分为人工表面、湿地、耕地、林地、其它、草地 6 种。

2.2 采样单元

参考其他学者的研究^[25,26], 本文以 324 个小流域作为采样单元。本研究区因流域地貌特征, 故采样单元存在纯喀斯特、亚喀斯特^[27]、非喀斯特、混合采样单元(图 2)。

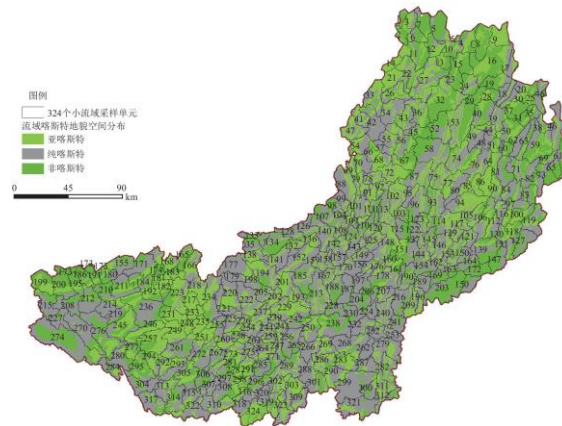


图 2 乌江流域采样单元

2.3 景观生态风险指数构建

本文以干扰度指数和流域景观脆弱度来构建综合景观生态风险指数模型, 以便对流域景观生态风险进行量化。

2.3.1 干扰度指数

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, 同时, 景观类型对外界干扰的抵抗能力也是不同的^[5]。以景观格局分析为基础, 构建一个景观干扰度指数 E_i , 通过各个指数简单叠加用来反映不同景观所代表的生态系统受到干扰(主要是人类开发活动)的程度^[5,20]。 E_i 计算公式为:

$$E_i = a \times M_i + b \times S_i + c \times F_i \quad (1)$$

式中^[28~30]: M_i 为地表粗糙度; S_i 为景观分离度; F_i 为景观分维数; a 、 b 、 c 分别为地表粗糙度、景观分离度、景观分维数, 其权重分别为: 0.3、0.4、0.3。

2.3.2 流域景观脆弱度

不同生态系统的易损性,生态系统的脆弱性与其在景观自然演替过程中所处的阶段有关^[5]。参考相关文献^[31,32],景观脆度(F_i)是按景观类型脆弱程度对景观类型赋值,最后进行归一化后而得到。乌江流域6种景观类型的脆弱度赋值分别为:人工表面为1、林地地为2、草地为3、耕地为4、湿地为5、未利用地为6。

2.3.3 综合景观生态风险指数

为建立景观结构与综合景观生态风险之间的经验联系,本文以景观组分的面积比重构建景观生态风险指数,其目的用于描述采样单元景观生态风险的相对大小,以便通过采样方法将景观空间结构转化成空间化的生态风险变量^[4,5]。参考其他学者的研究^[28~33],基于景观干扰度指数和流域景观脆弱度指数构建流域综合景观生态风险指数模型,计算公式如下所示:

$$ERI = \sum_{i=1}^N \frac{S_{ki}}{S_k} \sqrt{E_i \times F_i} \quad (2)$$

式中:ERI为综合生态风险指数; E_i 为景观类型*i*的干扰度指数; F_i 为景观类型*i*的脆弱度指数; N 景观类型的数量; S_{ki} 第*K*个风险小区*i*类景观组分的面积; S_k 为第*K*个风险小区总面积。

2.4 空间分析方法

2.4.1 空间自相关分析法

对于探究区域化变量在空间上的是否相关,常用的统计量为Moran's I、Geary's C和Getis-Ord统计量^[12,33]。笔者在此次研究中用全局空间自相关指数Moran的I系数和局部空间自相关指数LISA来分析景观生态风险指数空间模式。其公式如下:

全局Moran的I系数公式如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y}) (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (3)$$

式中:设研究区域存在*n*个面积单元;第*i*个单元上的观测值记为 y_i ;观测变量在*n*个单元上的均值为 $\bar{y}$; w 表示空间权重矩阵; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, $I = 1, 2, 3, \dots, n$ 构成的列向量。

局部Moran的I系数的公式如下:

$$\text{Moran's } I_{\text{局部}} = \left(\frac{y_i - \bar{y}}{\sigma} \right) \sum_{j=1}^n \left(\frac{y_j - \bar{y}}{\sigma} \right) \quad (4)$$

式中: σ 表示观测值之间的标准差。当Moran's $I_{\text{局部}}$ 的值为高值,表示该区域具有相近变量值单元在空间周围聚集;当

Moran’ I_{局部}的值为低值时,表示非相似的区域单元空间相邻。

2.4.2 地统计分析法

景观生态风险指数是一种典型的区域化变量,它在空间上的异质性规律可以用半方差函数来分析^[12,28]。其计算公式为:

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

(5)

式中:h 为配对抽样的空间分隔距离;N(h)为抽样间距为 h 的样点对的总数;x_i和 x_i+h 空间位置上对应的观测值为 Z(x_i)、Z(x_i+h)。

3 结果与分析

3.1 景观类型动态演变

15 年来,乌江流域各景观类型面积发生了显著变化。流域内各景观类型中草地、林地、人工表面、湿地、其它用地面积增加,而耕地面积减少。其中林地面积由 2000 年的 44.25%增加至 2015 年的 47.10%,年均增长 0.18%,其变化率最快,主要受政府大力倡导流域生态文明建设,如天然林保护、封山育林、发展经济果木林、实施退耕还林、还草等政策影响;其它用地面积到 2015 年增加至 2.17%,15 年来增加了 0.02%,其变化率最慢;人工表面面积增加主要受城市化进程的加快以及贵州省实行“县县通高速”的方针影响;湿地面积由 2000 年的 0.55%增加至 2010 年的 0.67%,而后 5 年间流域内湿地面积基本保持不变,主要受水利工程建设如水库、储水池、水塘、发电站等水利设施影响;耕地面积由 2000 年的 36.33%减少至 2015 年的 31.81%,15 年来减少了 4.52%,年均下降率达到 0.3%,主要受城市化占用区位条件较好的耕地以及因农民工进城导致形成大量的撩荒地影响。从表 1 可以看出人工表面主要为转入类型,面积的增加主要来源于草地、耕地、林地、湿地;林地面积增加主要来源于草地、其它;耕地面积减少主要转出为人工表面、林地、草地、湿地。

乌江流域景观类型变化在一定程度上体现了流域内频繁的人类社会活动对流域内景观类型的影响。流域内城市化进程的加快和高速社会经济发展使得流域内具有较高生态意义的景观类型减少,而人工和半人工景观面积的增加,最终使得流域内生态环境恶化,景观生态风险升高。

表 1 2000~2015 乌江流域景观类型的转移矩阵(km²)

年份	2000							
	景观类型	人工表面	林地	草地	耕地	湿地	其它	总计
2005	人工表面	1004.65	7.42	0.16	84.74	0.00	0.00	1096.98
	林地	0.00	29269.12	0.00	941.01	0.00	0.00	30210.12
	草地	0.00	0.14	10079.07	545.84	0.00	0.00	10625.05
	耕地	0.00	0.00	0.00	22423.26	0.00	0.00	22423.26

	湿地	0.00	15.21	0.64	29.13	368.00	0.00	412.98
	其它	0.00	0.00	0.00	1.18	0.00	1425.89	1427.07
	总计	1004.65	29291.89	10079.88	24025.17	368.00	1425.89	66195.46
年份	2005							
	景观类型	人工表面	林地	草地	耕地	湿地	其它	总计
2010	人工表面	1096.91	17.42	8.49	188.76	0.02	0.00	1311.61
	林地	0.05	30165.82	253.92	743.32	0.01	0.00	31163.14
	草地	0.01	0.01	10362.39	387.02	0.01	0.00	10749.44
	耕地	0.00	0.00	0.03	21084.00	0.01	0.00	21084.04
	湿地	0.00	26.88	0.21	4.78	412.93	0.01	444.80
	其它	0.00	0.00	0.01	15.38	0.00	1427.05	1442.44
	总计	1096.98	30210.12	10625.05	22423.26	412.98	1427.07	66195.46
年份	2010							
	景观类型	人工表面	林地	草地	耕地	湿地	其它	总计
2015	人工表面	446.45	178.05	95.37	592.62	4.40	5.90	1322.80
	林地	228.31	20053.61	4917.20	5693.01	59.36	940.73	31892.22
	草地	120.20	3979.87	1928.58	2750.28	18.69	177.58	8975.21
	耕地	501.90	6695.46	3714.86	11850.09	50.12	304.47	23116.90
	湿地	12.04	185.43	72.67	153.84	311.53	11.43	746.94
	其它	8.40	67.17	19.38	43.58	0.63	2.24	141.40
	总计	1317.31	31159.60	10748.06	21083.42	444.72	1442.37	66195.46

3.2 景观生态风险度的空间分异

通过使用 GS+软件开展景观生态风险度的空间分异研究,经过拟合可得到 2000~2015 年各模型的拟合参数。从表 2 可知,4 期景观生态风险度的块金值/基台值 $[C_0/(C_0+C)]^{[34]}$ 分别为 11.81%、12.05%、13.29%、14.04%,表明景观生态风险度的空间分异仍存一些非结构性因素制约,其结构性因素(地质、地貌、水文和土壤等自然因素)对景观生态风险度空间分异有一定程度的影响;4 期景观生态风险度变程 $^{[34]}$ 分别为:10.9、22.8、10.7、12.8km,其表明乌江流域景观生态风险度的空间分异主要受城市化进程加快、退耕还林、还草以及生态环境保护与修复以及石漠化、水土流失、滑坡等作用的影响。

表 2 2000~2015 年景观生态风险指数变异函数的拟合模型参数

年份	模型	C ₀ 块金值	C ₀ +C 基台值	C ₀ /C ₀ +C (%)块金值 /基台值	A ₀ 变程	R ²	RSS(×10 ⁻⁷)残差
2000	指数	0.00045	0.00381	11.81	10900	0.789	3.023
2005	指数	0.00051	0.00423	12.05	22800	0.373	7.798
2010	指数	0.00063	0.00474	13.29	10700	0.805	4.121
2015	指数	0.00105	0.00748	14.04	12800	0.926	5.059

3.3 景观生态风险时空格局分析

为探究乌江流域景观生态风险空间分布特征,笔者通过使用普通克里金插值法对4期小流域综合景观生态风险指数进行插值,再利用自然间断法对插值后的景观生态风险值划分为5个等级:弱、低、中、高、极高风险区,最后得到4期景观生态风险等级空间分布图,见图3。

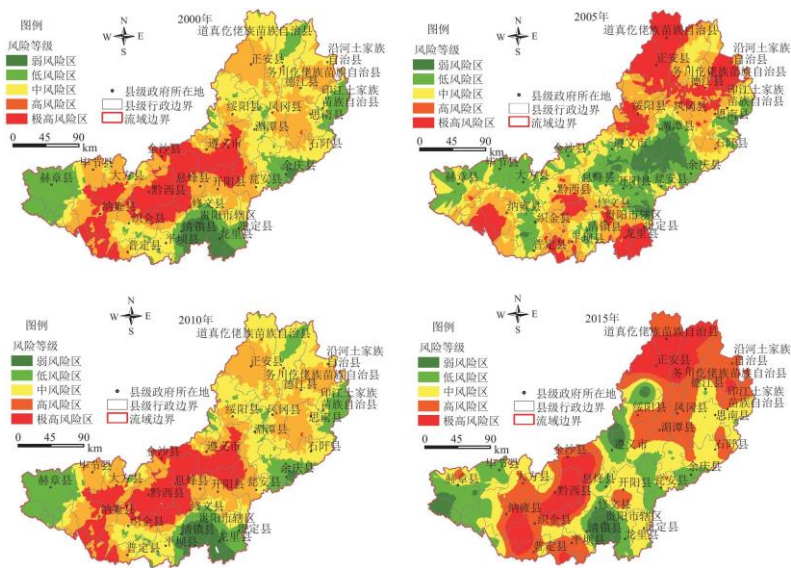


图3 乌江流域景观生态风险空间分布图

从总体上看,乌江流域15年来景观生态风险呈现上升趋势(表3),说明流域生态环境对外界的抗干扰能力呈现出减弱趋势。从空间分布上看,流域上游和下游东北部景观生态风险较高,中游景观生态风险较低。弱、低两风险区主要零散分布于流域边缘地区,此区域主要以林地为主;高、极高两风险区主要以同心圆形式分布于乌江流域中游区域,此区域主要以耕地为主,其它用地零星分布,耕地景观破碎度高,受人类活动影响程度大。流域的4期景观生态风险指数的Moran's I均大于零,且落入置信区间[-1.96, 1.96],呈现正的空间自相关性,其能够佐证流域内景观生态风险度高的区域其周边区域也高,景观生态风险低的区域周边区域也低,总体上呈现出空间集聚效应。从地貌类型看,4期流域喀斯特区的弱、低和中风险区面积之和的比例分别为29.29%、25.57%、27.55%、26.62%,均分别高于亚喀斯特区和非喀斯特区弱、低、中风险区的面积之和的比例,其由于流域内喀斯特地区生态环境极其脆弱,石漠化和水土流失严重。从时间上看,2000~2010年间,流域内弱、低、中景观生态风险区面积减少,而高、极高景观生态风险区面积增加。其中高、极高风险区景观生态风险变化面积显著,具体以黔西县、遵义县为中心向周边县、市扩散,其主要是受该区域人口密度逐渐增加、工矿业发展、水利工程建设等人类活动以及生境本底脆弱,使得流域耕地破碎度增高

和景观脆弱度较高的其它用地、未利用地面积增加。2010~2015 年间,流域内中、高、极高景观生态风险区的面积占比分别为 30.05%、31.09%和 16.77%,占流域总面积的 77.90%,相比较 2000 年具有显著升高的态势,但流域内高、极高风险区面积较 2010 年下降为 9.57%,流域景观生态风险有所降低。主要是由于流域内开展石漠化综合治理工程、退耕还林还草等生态环境治理工程和城市化的进程加快,使得流域内草地、林地以及人工表面面积有所增加且景观类型从无序状态向有序状态转变,具有抗干扰能力的景观类型有所增加,生态系统稳定性逐步增强。

表 3 2000~2015 年各景观生态风险等级百分比(%)

年份	风险等级地貌类型	弱风险区	低风险区	中风险区	高风险区	极高风险区	总计
2000 年	喀斯特区	4.47	10.78	14.03	9.52	6.55	45.35
	亚喀斯特	2.59	6.27	9.25	9.06	3.78	30.94
	非喀斯特	4.32	7.22	7.24	4.05	0.87	23.71
	总计	11.39	24.27	30.52	22.63	11.20	100.00
2005 年	喀斯特区	3.26	11.46	10.85	10.82	8.96	45.35
	亚喀斯特	1.53	6.16	6.82	9.08	7.35	30.94
	非喀斯特	1.03	5.79	6.12	5.49	5.27	23.70
	总计	5.83	23.41	23.80	25.39	21.57	100.00
2010 年	喀斯特区	2.38	8.39	16.78	11.40	6.40	45.35
	亚喀斯特	0.99	3.73	11.97	9.97	4.28	30.94
	非喀斯特	0.38	6.90	10.20	4.95	1.28	23.70
	总计	3.75	19.02	38.95	26.33	11.96	100.00
2015 年	喀斯特区	3.12	8.88	14.62	12.77	5.96	45.35
	亚喀斯特	1.18	3.88	8.17	10.87	6.84	30.94
	非喀斯特	0.80	4.23	7.26	7.45	3.96	23.71
	总计	5.11	16.99	30.05	31.09	16.77	100.00

4 讨论

4.1 流域景观生态风险影响因素

由于受自然环境与人类社会生产活动等因素的共同作用,景观生态风险源会因区域不同风险源也将不同。笔者认为乌江流域景观生态风险增加主要是受频繁的人类活动影响,其改变了流域景观结构组分与要素在数量、空间上的变化、景观功能上的变化以及景观类型的演变。流域内人工表面增加以及耕地减少,使得具有较高生态意义的自然/半自然景观面积减少,生物多样性减少,

生态系统功能减弱,景观连通性降低,景观分离度与破碎度增强,进而导致流域景观生态风险增高;流域内水利工程建设如水库、储水池、水塘、发电站等水利设施的建设使得湿地面积增加,以致水域面积斑块增多,分离度增大,阻碍物种的迁移与扩散,导致流域水域生态系统风险增大;流域内林地有增加的趋势但因受河流、交通、农村居民点等人类活动的分割,使得部分林地连通性降低,阻碍生物迁移、物质循环、能量流动,弱化了森林生态功能的发挥。此外,流域内因生境本底脆弱(流域内喀斯特发育显著),在加之频繁人类活动的影响下使得乌江流域生态系统脆弱性增强,生态环境承载力下降,生态环境退化。

4.2 对策与建议

为缓解流域景观生态风险的增加,本文针对乌江流域景观生态风险时空变化特征提出以下建议:

(1)政府应兼顾流域环境保护和经济可持续发展的思路,制定科学合理的土地利用规划和区域发展方略,尽快确定流域生态红线划定并坚决执行,严控大面积破坏森林、草地、灌木林地的项目建设,在经济建设发展的同时,尽早完成流域生态修复。

(2)在喀斯特地区的高、极高风险区因生态环境自身脆弱加之人类活动强烈,应合理调控人类社会生产活动;加强石漠化、水土流失等生态环境问题的治理。

(3)在亚喀斯特和非喀斯特地区的中等风险区应采取因地制宜发展区域工农业生产和建设活动,坚定实施退耕还林还草;低、较低风险区应采取措施严格控制不合理的人类活动、杜绝生境脆弱区域人为污染和破坏,有效保护好生态红线划定区域。

5 结论

本文以景观生态学为理论基础,构建综合景观生态风险指数评价模型对乌江流域景观生态风险进行综合评价。结果表明:

(1)2000~2015年,乌江流域景观类型都发生了变化,其中草地、林地、其它、人工表面、湿地面积增加,而耕地面积减少。乌江流域的优势景观类型为林地,其对乌江流域景观格局变化具有重要的作用。

(2)相比较于与其他学者以方格网为采样单元的研究,本文在考虑异质性问题^[35]的情况下以小流域为采样单元进行景观生态风险评价,其景观生态风险度的空间分异受乌江流域的结构因素(地质、地貌、水文和土壤等自然因素)与非结构因素的影响。

(3)2000~2015年,乌江流域景观生态风险格局发生了显著的变化。中风险区大致保持不变;弱、低风险区分别减少到5.10%和16.97%;高、极高增加到31.13%和16.77%;流域内2015年景观生态风险相比较于2000年显著升高,相比较2010年略有缓解,总体上,流域景观生态风险整体有明显升高的态势。

(4)乌江流域景观生态风险与乌江流域地理环境具有极高的耦合性。流域上游生态环境恶劣、人口密度大、人地矛盾突出,其对应的中、高、极高风险区面积相比于弱、低风险区面积较大;流域中游因人口密度大、较大一些城市集中在该区域、石漠化问题突出以及低山丘陵为主,因而高、极高风险区分布于流域北部,弱、低风险主要分布流域南部;流域下游因地势起伏较大、河流切割、地表破碎度高、以低山丘陵为主,高、极高风险集中分布在下游的东北部地区。

参考文献:

[1]HUNSAKER C T, GRAHAM R L M, SUTER G W, et al. Assessing ecological risk on a regional scale[J]. Environmental Management, 1990, 14 (3) :325-332.

-
- [2]付在毅, 许学工, 林辉平, 等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 生态学报, 2001(3):365-373.
- [3]许妍, 高俊峰, 赵家虎, 等. 流域生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(1):284-292.
- [4]巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 等. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7):2041-2048.
- [5]曾辉, 刘国军. 基于景观结构的区域生态风险分析[J]. 中国环境科学, 1999(5):454-457.
- [6]LUXON M, LANDIS W G. Application of the relative risk model to the upper Willamette River and Lower McKenzie River, Oregon[J]. Regional Scale Ecological Risk Assessment: Using the Relative Risk Model, 2005: 91-117.
- [7]ANGELA M, OBERY, WAYNE G. Landis: A regional multiple stressor risk assessment of the codorus creek watershed applying the relative risk model[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2002, 8:2, 405-428.
- [8]ZANDBERGEN P A. Urban watershed ecological risk assessment using GIS: A case study of the Brunette River watershed in British Columbia[J]. Canada. Journal of Hazardous Materials, 1998,61(1).
- [9]CORMIER S M. SMITH M. NORTON S. Neiheisel T. Assessing ecological risk in watersheds: A case study of problem formulation in the Big Darby Creek watershed . Ohio . USA[J]. Environmental Toxicology Chemistry and Chemistry, 1999, 19(4):1082-1096.
- [10]DIAMOND J M, SERVEISS V B. Identifying sources of stress to native aquatic fauna using a watershed ecological risk assessment framework[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 35(24).
- [11]巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8):2153-2160.
- [12]潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3):791-799.
- [13]许妍, 高俊峰, 高永年. 基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4):642-648.
- [14]许妍, 高俊峰, 郭建科. 太湖流域生态风险评价[J]. 生态学报, 2013, 33(9):2896-2906.
- [15]易武英, 苏维词. 基于 RS 和 GIS 技术的乌江流域生态环境质量现状诊断[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4):447-452.
- [16]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.
- [17]苏维词, 李久林. 乌江流域生态环境预警评价初探[J]. 贵州科学, 1997(3):207-214.
- [18]郜红娟, 韩会庆, 俞洪燕, 等. 乌江流域重要生态系统服务地形梯度分布特征分析[J]. 生态科学, 2016, 35(05):154-159.
- [19]王传辉, 郭振亚, 高超, 等. 基于遥感的巢湖流域景观格局变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12):1586-1592.

-
- [20]黄木易,何翔.巢湖流域土地景观格局变化及生态风险驱动力研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(5):743-750.
- [21]吕乐婷,张杰,孙才志,等.基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J].生态学报,2018,33(16):1-8.
- [22]石悦樾,银正彤,郑文锋.基于MODIS数据乌江流域植被覆盖变化与气候变化关系研究[J].林业资源管理,2017(1):127-134.
- [23]李宗梅,马周琴,聂芹,等.生态流域水文单元划分方法研究[J].水文,2017,37(5):27-30.
- [24]吕一兵,张斌,陈智虎,等.基于DEM的不同地貌类型区小流域划分及分布特征研究——以贵州省赤水河流域为例[J].测绘通报,2017,(9):110-115.
- [25]PENG J, ZONG M L, HU Y, et al. Assessing landscape ecological risk in a mining city: A case study in Liaoyuan City, China[J]. Sustainability, 2015, 7:8312-8334.
- [26]PENG J, WANG Y L, ZHANG Y A, et al. Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns[J]. Ecological Indicators, 2010, 10:217-2236.
- [27]胡锋,安裕伦,许璟.“亚喀斯特”概念与景观特征的初步探讨——以贵州为例[J].地理研究,2015,34(8):1569-1580.
- [28]陈鹏,潘晓玲.干旱区内陆流域区域景观生态风险分析——以阜康三工河流域为例[J].生态学杂志,2003(4):116-120.
- [29]卢远,苏文静,华瑾,等.左江上游流域景观生态风险评价[J].热带地理,2010,30(5):496-502.
- [30]谢花林.基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析——以江西兴国县为例[J].中国环境科学,2011,31(4):688-695.
- [31]胡金龙.漓江流域土地利用变化及生态效应研究[D].华中农业大学,2016.
- [32]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,(10):5020-5026.
- [33]赵卫权,杨振华,苏维词,等.基于景观格局演变的流域生态风险评价与管控——以贵州赤水河流域为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1218-1227.
- [34]苏海民,何爱霞.基于RS和地统计学的福州市土地利用分析[J].自然资源学报,2010,25(1):92-99.
- [35]彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.