

涪江流域景观生态风险空间异质性特征分析

张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 袁 川, 廖传露, 王 飞

(绵阳师范学院 资源环境工程学院, 生态安全与保护四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要:对涪江流域景观生态风险进行评估可以为该区域制定生态风险防控措施、提高生态系统服务功能提供科学参考。从“自然—社会—景观格局”3 个维度选择海拔、土壤类型、地表覆被类型等 10 个景观生态风险胁迫因子构建评价指标体系,利用空间主成分分析(SPCA)、空间自相关分析等方法对涪江流域景观生态风险的空间异质性特征展开了研究。结果表明:(1) 整体上涪江流域的景观生态风险等级呈西北部高于东南部地区,并呈集聚分布模式,其中在松潘、平武、北川、安岳、潼南等区县形成了“热点”区域,梓潼、游仙、盐亭、中江等区县形成“冷点”区域,主要受自然和景观格局维度因子影响较为明显;(2) 研究区处于中度及以上风险等级区的面积为 25 596.51 km²,占流域总面积的 65.36%,主要分布于上游的松潘、平武、北川等县(区);(3) 景观类型与生态风险等级空间分布有密切的联系,低度、较低生态风险区的分布与涪江干流走向契合。涪江流域景观生态风险的空间异质性特征明显,且面临的生态风险问题较大。

关键词:景观生态风险评价;空间主成分分析;空间自相关分析;空间异质性;涪江流域

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0156-08

Analysis on Spatial Heterogeneity of Landscape Ecological Risk in Fujiang River Basin

ZHANG Xuemao, DONG Tingxu, DU Huaming, YUAN Chuan, LIAO Chuanlu, WANG Fei

(Mianyang Teachers College, Ecological Security and Protection

Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: The assessment of landscape ecological risks in the Fujiang River Basin can provide a scientific reference for the development of ecological risk prevention and control measures in the region and the improvement of ecosystem service functions. From the three dimensions of ‘nature-society-landscape pattern’, 10 landscape ecological risk stress factors, including altitude, soil type, and land cover type, et al., were selected to construct an evaluation index system, and spatial principal component analysis, autocorrelation analysis, and other methods were used to analyze the spatial heterogeneity of landscape ecological risk in the Fujiang River Basin. The results show that: (1) as a whole, the landscape ecological risk level of the Fujiang River Basin is higher in the northwest than in the southeast, and it has a concentrated distribution pattern; among them, the ‘hot spot’ areas in Songpan, Pingwu, Beichuan, Anyue, Tongnan and other districts and counties and ‘cold spot’ areas in Zitong, Youxian, Yanting, Zhongjiang and other districts and counties have formed form, which are mainly affected by the dimensional factors of the natural and landscape pattern; (2) the study area is in the middle or above risk level area; the area is 25 596.51 km², accounted for 65.36% of the total area of the basin, mainly distributes in the upstream counties (districts) such as Songpan, Pingwu and Beichuan; (3) landscape types are closely related to the spatial distribution of ecological risk levels, and the distribution of low-level and lower ecological risk areas coincides with the direction of the mainstream of the Fujiang River; the spatial heterogeneity of landscape ecological risks in the Fujian River Basin is obvious, and the ecological risks faced by them are large.

收稿日期:2021-04-22

修回日期:2021-05-14

资助项目:涪江流域土地利用覆被变化及生态环境效应研究(MYSY2018T003);绵阳师范学院硕士研究生创新项目(CX202019);绵阳师范学院科研启动项目(QD2016A001)

第一作者:张雪茂(1995—),女,四川省珙县人,硕士研究生,研究方向为生态环境监测与治理。E-mail:1505006095@qq.com

通信作者:董廷旭(1965—),男,四川省苍溪县人,教授,硕士生导师,主要从事 3S 技术集成与应用,土地利用与区域生态安全等方面研究。E-mail:852798223@qq.com

Keywords: landscape ecological risk assessment; spatial principal component analysis; spatial autocorrelation analysis; spatial heterogeneity; Fujiang River Basin

景观生态风险是指在自然因素或者是人类社会因素的干扰下,不同因素相互交错作用而对生态环境而产生的不利影响^[1-2]。近年来,随着人类对环境保护意识的觉醒,对于“人类—自然耦合关系”的研究在地球系统科学领域成为了研究热点^[2-3],景观生态风险评价作为景观生态学研究的重要内容之一,倡导将地理学的水平空间景观格局异质性与生态学的垂直空间景观功能关联性进行交叉融合^[4]。为此,许多专家学者开展了相应的研究,从研究对象来看,既有行政区域^[5-6]、城市^[7-8]、工矿开采区^[9]等受人类活动干扰较大的区域,也有高原^[10-11]、湿地^[12]以及自然保护区^[13]等生境较为脆弱的区域。从研究方法上可以分为因果分析法、生态风险等级评价法、相对风险评价模型、景观分析法以及数学概率模型 5 大类^[14],如 Ayre KK^[15]等利用贝叶斯网络模型构建生态风险评估框架,用以评估森林管理和自然干扰对生态资源的潜在影响;齐润冰^[16]、Cui L^[17]、杨彦昆^[18]、田鹏^[19]等基于景观格局指数构建景观生态风险评价模型,从多方面考虑影响因素对大连、秦岭地区、重庆三峡库区、浙江省等地的景观生态风险进行评估;李青圃^[2]、黄诗曼^[20]、常小燕^[21]等以景观格局为基础,对景观生态风险的时空异质性特征进行探究。由于流域生态系统本身所具有的复杂性特点,目前从综合的视角对整个流域生态风险进行研究的案例较少,目前已有的研究主要集中在尺度较小且经济较为发达的地区^[22]。流域作为特殊的景观生态系统,对特定区域的水循环、地表覆被类型、生物多样性等起着至关重要的作用,其为人类繁衍、人类活动的开展提供场所,因此以流域为研究尺度具有重要的现实意义^[23]。

涪江流域流经川西北丘状高原山区和盆中丘陵区,是四川省“十三五”规划中构建“四区八带多点”生态安全战略格局中的重要一带,也是长江流域上游重要的水源地和生态屏障。对涪江流域展开景观生态风险评价对维护其生态环境的健康发展,乃至整个长江流域的生态安全和生活水源补给至关重要。目前对其进行景观生态风险评价进行相关的研究尚且不足。本文根据涪江流域的生态环境和经济发展现状,从“自然—社会—景观格局”3 个维度选取流域生态风险胁迫因子构建评价模型,基于空间主成分分析、空间自相关分析等方法对涪江流域景观生态风险的空间异质性特征进行研究,为研究区制定综合景观生态风险防范措施提供科学参考、保护区域生态安全

和提高流域生态系统服务功能等,促进川渝两地自然与社会的可持续发展。

1 研究区概况、数据来源

1.1 研究区概况

涪江发源于四川省境内的雪宝顶,属于长江的二级支流,为嘉陵江右岸最大支流,在重庆市的合川区汇入嘉陵江,见图 1,研究区位于 29.10°—33.04°N, 103.30°—106.30°E,流域总面积 3.92 万 km²。主要有火溪河、白草河、梓潼江、凯江、安居河、通口河、安昌河、郫江、平通河、小安溪 10 条支流;区内海拔高差高达 5 300 m、地势起伏较为明显,地形主要以山地和丘陵为主;土壤类型在自然带的划分中以黄壤为主;研究区上游主要以林地为主,植被覆盖率较高,中下游以耕地和建设用地为主;主要气候类型为川西高原气候和亚热带湿润季风气候,年均温在 14.7~18.2℃,多年平均年降水量在 800~1 400 mm,降水量时空分异特征显著。由于特殊的自然环境状况以及人类活动影响的加剧,近年来研究区内崩塌、滑坡、泥石流等自然次生灾害频发,导致流域内的景观格局愈发破碎,所面临的景观生态风险问题愈加的突出。

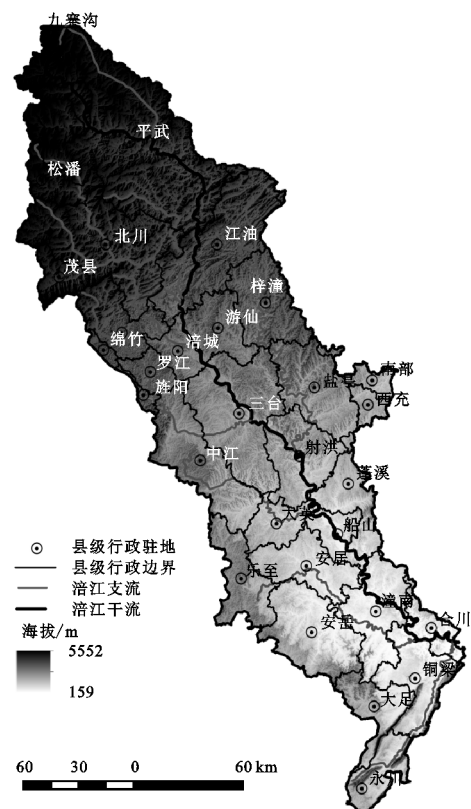


图 1 涪江流域概况

1.2 数据来源

DEM 数据、土壤类型数据、植被覆盖度数据、居民点数据、工矿用地数据等。数据来源见表 1。

表 1 数据来源

数据类型	数据来源	数据用途
地表覆盖数据	http://www.globallandcover.com/	计算香浓均匀度指数,蔓延度指数等
DEM 数据	http://www.gscloud.cn	提取坡度和高程数据
土壤类型数据	http://www.resdc.cn	评估土壤抗侵蚀能力
Landsat 8 OLI_TIRS 遥感影像	http://www.gscloud.cn	提取植被覆盖度指数
居民点、工矿用地以及河流数据	1:25 万全国基础地理数据库	计算距水体、居民点、工矿用地距离指数等

其中,地表覆盖数据年份为 2020 年,分辨率为 30 m,总体精度为 85.72%,Kappa 系数为 0.82,可以满足研究需要;DEM 数据分辨率为 30 m;土壤类型数据分辨率为 1 000 m;植被覆盖度指数(NDVI)利用 Landsat8 2018 年 7 月的遥感影像数据通过像元二分模型反演计算得出;居民点、工矿用地、河流等数据为 shp 格式 1:25 万的基础地理数据,通过 ArcGIS 欧式距离计算工具得到研究区范围内距居民点、距工矿用地距离等栅格数据。为保证后续计算结果的准确性,所有的栅格数据统一重采样为 30 m×30 m。

2 研究方法

2.1 生态风险评价因子选取

根据涪江流域的景观生态环境现状以及经济发展情况,基于风险“源—汇”理论^[3],从自然、社会、景观格局 3 个维度选取区域内 10 个生态风险胁迫因子——高程、坡度、土壤类型、地表覆盖类型、距河流距离、距工矿用地距离、距居民点距离、香浓均匀度指数、蔓延度指数、植被覆盖度指数等构建流域生态风险评价指标体系(表 2)。

在自然维度,选择了海拔、坡度、土壤类型、距水体距离等 4 个因子,海拔和坡度表征地形要素在土壤侵蚀过程中产生崩塌、滑坡以及泥石流等地质灾害所造成的潜在影响,值越大发生自然次生灾害的机率越大,景观生态风险越高^[24],指标分级见表 2。坡度对土壤侵蚀的强度有极大的影响,其中 3°,8°,15°,25°,35°是不同侵蚀程度的分界线,值越高对土壤的侵蚀越强^[25]。土壤的抗侵蚀性能对于植被的水土保持功能以及调节局地小气候具有重要的影响,因此根据研究区不同土壤类型的抗侵蚀能力进行分类,土壤抗侵蚀性能越低生态安全风险越高^[26]。水体的生态服务功能体现在固碳释氧、调蓄洪水、提供生物栖息地以及气候调节等方面^[27],大面积的水体对于维持和促进生态环境往良好的方向发展有重要的作用,因此本文将以距水体距离的远近为标准,距离水体越近的区域生态风险等级越低,利用自然断点法进行分级。

在社会维度,选取了距居民点和距工矿用地距离等 2 个指标,人类生产生活行为会对景观格局产生影响,城市的扩展会对动物的自然栖息地造成严重的损害^[28],人类活动较频繁的区域生态风险强度相对而言较高^[6],因此本研究设定距居民点、距工矿用地距离越近生态风险越高。

在景观格局维度,选取了香浓均匀度指数(SHEI)、蔓延度指数(CONTAG)、地表覆盖类型以及植被覆盖度指数(NDVI)4 个指标。香浓均匀度指数和蔓延度指数通过 Fragstats 软件利用移动窗口法进行了可视化处理^[29]。香浓均匀度指数表示不同景观类型分布的均匀程度,景观分布均匀度越高的区域生态系统更加稳定,因此香浓均匀度指数值越高风险等级越低。蔓延度指数可以反映区域景观的破碎化程度,值越低表示景观越破碎,对于应对外界干扰时的阻力就越低,风险等级也就越高。地表覆盖类型以及植被覆盖度的分级参考文献^[2]和文献^[30]进行。

2.2 景观生态风险指数模型

基于上述所构建的景观生态风险评价指标体系,利用空间主成分分析法(SPCA)计算得出每个主成分原始载荷矩阵、贡献率以及累计贡献率,将累计贡献率超过 90%的主成分确定为有统计学意义的主成分^[33]。根据计量地理学原理^[33]计算得出研究区域每个景观生态风险胁迫因子的权重,再结合 ArcGIS 的地图代数工具进行加权叠加,最终得出涪江流域景观生态风险指数。权重(1)^[34]和景观生态风险指数(2)^[2]的表达式如下:

$$F_j = \sum_{j=1}^k |a_{ij}| \times G_j \tag{1}$$

式中: F_j 表示权重; a_{ij} 表示*i*因子在第*j*个主成分中的原始载荷系数; G_j 表示第*j*个主成分的特征贡献率。

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij} F_j) \tag{2}$$

式中: E 表示景观生态风险指数结果; b_{ij} 表示第*i*个栅格对应的第*j*个胁迫因子; F_j 表示第*j*个主成分的权重。

表 2 涪江流域景观生态风险评价指标及分级标准

指标维度	胁迫因子	分级	分级标准	参考文献
自然	海拔(m)	1	159~827	[25]
		2	827~1565	
		3	1565~2343	
		4	2343~3274	
		5	>3274	
	坡度(°)	1	0~3	[25]
		2	3~8	
		3	8~15	
		4	15~25	
		5	>25	
	土壤类型	1	酸性紫色土	[26,31]
		2	黄红壤、黄壤性土	
		3	水稻土、潯育水稻土、渗育水稻土、盐渍水稻土	
		4	黄棕壤、暗黄棕壤、棕壤、黄棕壤性土、黄壤性土、潮土	
		5	红色石灰土、棕色石灰土、酸性石质土、钙质石质土	
	距水体距离(m)	1	0~1000	[26]
		2	1000~2000	
		3	2000~3000	
		4	3000~4000	
		5	>4000	
社会	距居民点距离(m)	1	>17706	[30]
		2	10635~17706	
		3	6003~10635	
		4	3078~6003	
		5	0~3078	
	距工矿用地距离(m)	1	>13500	[32]
		2	10000~13500	
		3	7000~10000	
		4	3500~7000	
		5	0~3500	
景观格局	香浓均匀度指数	1	0.8~1	[2]
		2	0.6~0.5	
		3	0.4~0.6	
		4	0.2~0.4	
		5	0~0.2	
	蔓延度指数	1	>55	[2]
		2	23~40	
		3	12~23	
		4	4~12	
		5	0~4	
	地表覆盖类型	1	林地、湿地、水体	[2]
		2	草地、灌木	
		3	耕地、	
		4	永久冰川	
		5	建设用地	
	植被覆盖度	1	>0.84	[30]
		2	0.77~0.84	
		3	0.66~0.77	
		4	0.46~0.66	
		5	0~0.46	

2.3 空间自相关分析

空间自相关性是指在地理空间上越靠近的事物

或现象越相似,其基本度量是空间自相关系数,可以用全局和局部两种指标进行衡量^[35]。本文所用的指

标为全局空间自相关,用于描述区域单元内景观生态风险指数的整体分布状况,判断景观风险指数在空间上是否存在集聚性的特点,常用全局 Moran's *I* 指数表示,通过该指数评估研究区内所有景观风险指数是集聚分布、离散分布还是随机分布。表达式如下^[36]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中:*I* 表示 Moran's *I* 指数;*n* 表示参与分析的栅格单元数;*x_i*、*x_j* 分别表示栅格单元 *i* 和 *j* 处景观生态风险的观测值 *i* ≠ *j*; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; *W_{ij}* 表示空间权重矩阵。Moran's *I* 指数的值域为 [−1,1], 大于 0 表示正相关, 小于 0 为负相关, 值越大表示空间分布的相关性越强, 集聚现象越明显; 值越小表示相关性弱, 分散程度越强。

3 结果与分析

3.1 主成分分析确定指标权重

本文基于“自然—社会—景观格局”所选取的 10 个景观生态风险胁迫因子, 利用空间主成分分析 (SPCA) 得出前 7 个主成分的累计方差贡献率为 91.43% (>90%), 因此前 7 个主成分基本可以对研究区的景观生态风险信息进行有效的概括 (表 3)。从各主成分原始载荷矩阵 (表 4) 中可以得出第 1 主成分在距河流距离、DEM、蔓延度指数上的载荷较大, 第 2 主成

分在蔓延度、香浓均匀度上的载荷较大, 第 3 主成分在距工矿用地距离上的载荷较大, 第 4 在主成分在香浓均匀度上的载荷较大, 第 5 主成分在坡度、土壤类型以及香浓均匀度上所占的载荷较大, 第 6 主成分在植被覆盖度和土壤类型上所占的载荷较大, 第 7 主成分在坡度、植被覆盖度上所占的载荷较大。

表 3 各主成分特征值以及累积贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	1.891	37.638	37.638
2	0.947	18.848	56.486
3	0.511	10.171	66.657
4	0.391	7.792	74.448
5	0.322	6.415	80.864
6	0.281	5.593	86.457
7	0.250	4.974	91.430
8	0.201	3.995	95.426
9	0.139	2.774	98.200
10	0.090	1.800	100.000

根据前 7 个主成分的初始特征根以及贡献率按照公式 (1) 得出各景观生态风险胁迫因子的权重值 (表 4), 从计算结果可以得出蔓延度指数 (CONTAG)、距水体距离、香浓均匀度指数 (SHEI)、坡度所占比例较大, 分别为 0.129 3, 0.128 0, 0.119 7, 0.109 8, 说明其对涪江流域景观生态风险评价结果的影响较大。因此, 从计算出的权重可以得出涪江流域景观生态风险评价结果受自然因子和景观格局因子影响较大, 社会因子影响相对较小。

表 4 各主成分载荷原始矩阵及权重

评价维度	评价指标	主成分										权重
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
自然因子	DEM	0.433	−0.098	−0.108	0.022	0.177	0.342	0.096	−0.213	0.123	0.757	0.0839
	坡度	0.219	−0.177	0.132	−0.154	0.432	−0.360	0.667	0.326	−0.101	−0.040	0.1098
	土壤类型	0.225	−0.123	0.070	−0.006	0.389	0.383	−0.487	0.593	−0.146	−0.146	0.0882
	距河流距离	0.584	−0.220	0.162	0.213	−0.681	−0.046	0.069	0.230	0.041	−0.118	0.1280
社会因子	距工矿用地距离	−0.178	−0.011	0.853	0.263	0.064	0.321	0.152	−0.180	−0.090	−0.001	0.0998
	距居民点距离	−0.308	0.049	0.239	0.014	−0.097	−0.303	−0.154	0.475	0.549	0.440	0.0715
景观格局因子	SHEI	0.191	0.521	−0.128	0.759	0.242	−0.179	0.015	0.030	0.070	−0.063	0.1197
	CONTAG	0.301	0.757	0.234	−0.522	−0.084	0.037	−0.006	0.032	−0.002	−0.012	0.1293
	地表覆盖类型	−0.285	0.184	−0.129	0.109	−0.278	0.084	0.165	0.351	−0.689	0.382	0.0765
	NDVI	−0.194	0.123	−0.258	0.024	−0.107	0.608	0.478	0.246	0.403	−0.217	0.0933

3.2 流域景观生态风险空间异质性分析

研究区景观生态风险空间异质性特征如图 2 所示: (1) 低度生态风险: 风险指数为 1.30~2.43, 主要位于河流、湿地以及植被覆盖度较高的区域, 面积为 5 453.52 km², 在整个研究区范围内所占比例最小, 仅为 13.92%,

此类区域距离人类活动场所较远, 受干扰较小。(2) 较低生态风险: 风险指数为 2.44~2.79, 面积为 8 117.26 km², 所占研究区总面积的 20.72%, 主要的景观类型以耕地、草地以及灌木为主。(3) 中度生态风险: 风险指数为 2.80~3.11, 较为零星的分布于旌阳、中江、三台、乐

地、草地、永久冰川主要集中分布于上游地区的松潘、平武、北川等县(区),由于上游地区的地形起伏明显、坡度较大、土壤的抗侵蚀能力较弱,因此研究区上游虽然以生态服务功能较强的景观类型为主,但是区域生态风险等级仍然较高,中度及以上等级的生态风险区的面积占比分别达到了 64.87%, 55.96%, 100%。耕地在整个研究区内呈均匀分布,此景观类型长期受人类活动的影响,导致其景观破碎度较高、

生态环境较脆弱,生态风险等级为低度和较低的面积占比仅为 37.93%。建筑用地主要分布于研究区中下游地区的河流沿岸以及地势较为平坦的区域,是人类

进行社会活动的主要场所,受人为活动的干扰最为严重,因此导致其生态风险等级为中度及以上的面积总和占比达到了 71.20%。

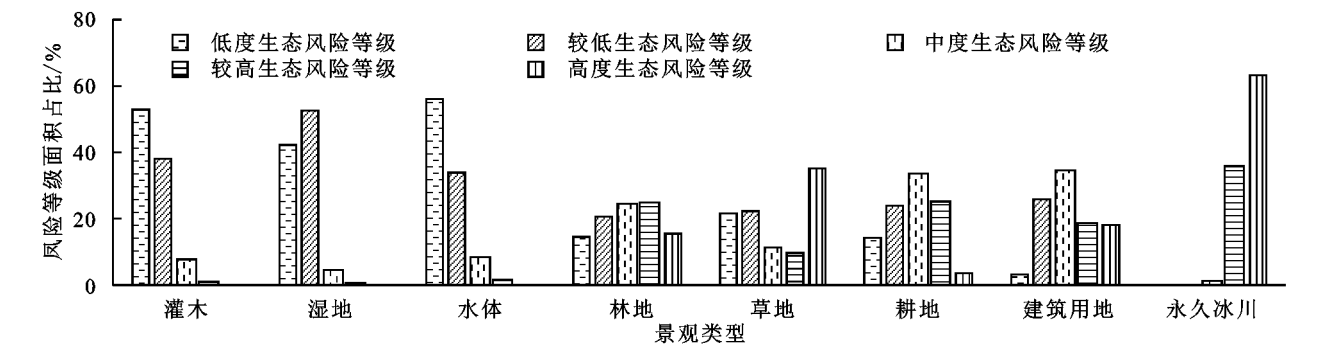


图 4 涪江流域各景观类型生态风险等级分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

在研究思路和方法上,与利用压力—状态—响应模型(PSR)^[37]、驱动力—状态—响应模型(DSR)^[38]、驱动力—压力—状态—冲击响应模型(DPSIR)等^[39]方法研究景观生态风险相比较,本研究着重从“自然—社会—景观格局”3个维度选取景观生态风险胁迫因子构建生态风险评价模型,基于空间主成分分析法(SPCA)和空间自相关分析方法着重对涪江流域景观生态风险的空间异质性特征进行探讨,从3个维度综合的选取景观生态风险胁迫因子进行景观生态风险指数计算,可以改善单一指标对风险赋值的单一性和主观性。而空间主成分分析法(SPCA)可以客观的计算出各生态风险胁迫因子的权重,避免了多指标评判权重的不完善,进一步揭示了区域景观生态风险形成的内在机制^[40]。通过研究发现,研究区景观生态风险指数值在空间上的分布中不是随机的,而是存在显著的空间依赖性和异质性特征,得出的结果与研究区的景观生态环境现状较为吻合,对今后涪江流域的景观生态建设具有一定的指导意义。但是由于本研究侧重点在于景观生态风险的空间异质性研究,由于篇幅的限制以及其他的客观原因对于生态风险的变化趋势方向以及优化等内容尚未展开研究,在后续的研究工作中需要更进一步的深化。

4.2 结论

(1) 生态风险评价的结果主要受自然因子和景观格局因子的影响较大,社会因子的作用较小。景观生态风险指数在空间分布上呈聚集模式,“热点”主要分布在研究区上游和下游区域,“冷点”主要分布在中游区域,并且具有很强的空间正相关性。

(2) 由于受多种因子相互作用和影响,涪江流域的景观生态风险指数的空间异质性特征较为明显,生态风险等级整体上呈西北部的高于东南部;低度、较低、中度、较高、高度生态风险等级在整个研究区内所占的比例分别为 19.32%,20.72%,25.43%,25.38%,14.55%,中度及以上的生态风险等级占了总面积的 65.36%。研究表明涪江流域所面临的生态风险问题较为严峻。

(3) 综合景观生态风险空间分布与景观类型有着密切的联系,较低、低度生态风险区主要分布于灌木、湿地和水体等景观类型中;中度及以上生态风险区受海拔、坡度、土壤类型等自然因素影响,主要分布于上游以林地、草地、等为主的景观类型中。

参考文献:

- [1] 阳文锐,王如松,黄锦楼,等.生态风险评价及研究进展[J].应用生态学报,2007,18(8):1869-1876.
- [2] 李青圃,张正栋,万露文,等.基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J].地理学报,2019,74(7):1420-1437.
- [3] 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.
- [4] 傅伯杰.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [5] 刘珍环,张国杰,付凤杰.基于景观格局—服务的景观生态风险评价:以广州市为例[J].生态学报,2020,40(10):3295-3302.
- [6] 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.
- [7] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.干旱区城市生态安全格局优化研究:以内蒙古呼和浩特市为例[J].水土保持研究,2020,27(4):336-341.
- [8] 戴璐,刘耀彬,黄开忠.基于 MCR 模型和 DO 指数的九

- 江滨水城市生态安全网络构建[J].地理学报,2020,75(11):2459-2474.
- [9] 周艳,陈楠,邓绍坡,等.西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J].环境科学,2018,39(6):2884-2892.
- [10] 李益敏,管成文,朱军,等.基于加权叠加模型的高原湖泊流域重要生态用地识别:以星云湖流域为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1251-1259.
- [11] 王洁,摆万奇,田国行.青藏高原景观生态风险的时空特征[J].资源科学,2020,42(9):1739-1749.
- [12] 任金铜,杨可明,陈群利,等.贵州草海湿地区域土地利用景观生态安全评价[J].环境科学与技术,2018,41(5):158-165.
- [13] 李海萍,高戈,李菁.基于GIS的盐城国家级自然保护区生态安全评价(英文)[J]. Journal of Resources and Ecology, 2020,11(1):38-49.
- [14] 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.
- [15] Ayre K K, Landis W G. A Bayesian approach to landscape ecological risk assessment applied to the Upper Grande Ronde Watershed, Oregon [J]. Hum. Ecol. Risk Assess, 2012,18(5):946-970.
- [16] 齐润冰.基于景观格局指数的生态风险定量评价[J].测绘通报,2019(S1):110-112.
- [17] Cui L, Zhao Y, Liu J. Landscape ecological risk assessment in Qinling Mountain [J]. Geological Journal, 2018,53:342-351.
- [18] 杨彦昆,王勇,程先,等.基于连通度指数的生态安全格局构建:以三峡库区重庆段为例[J].生态学报,2020,40(15):1-13.
- [19] 田鹏,李加林,史小丽,等.浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2697-2706.
- [20] 黄诗曼,胡庆武,李海东,等.基于RS和GIS的峨眉山风景区生态风险评价[J].环境科学研究,2020,33(12):2745-2751.
- [21] 常小燕,李新举,李西灿,等.矿区土地利用生态风险的时空异质性[J].生态学报,2019,39(9):3075-3088.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 刘蕴琨,巨能攀,刘秀伟,等.贵州省崩滑灾害影响因子易发区间评价[J].灾害学,2020,35(3):201-207.
- [25] 汤国安,宋佳.基于DEM坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J].水土保持学报,2006,20(2):157-160,192.
- [26] 王云琦,王玉杰,刘楠.三峡库区典型林分土壤抗侵蚀性能及评价[J].北京林业大学学报,2010,32(6):54-60.
- [27] 江波,陈媛媛,肖洋,等.白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J].生态学报,2017,37(8):2497-2505.
- [28] 何春阳,史培军.景观城市化与土地系统模拟[M].北京:科学出版社,2009.
- [29] 刘世梁,安南南,尹艺洁,等.广西滨海区域景观格局分析及土地利用变化预测[J].生态学报,2017,37(18):5915-5923.
- [30] 王琦,付梦娣,魏来,等.基于源—汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以安徽省宁国市为例[J].环境科学学报,2016,36(12):4546-4554.
- [31] 张学渊,魏伟,颜斌斌,等.西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建[J].自然资源学报,2019,34(11):2389-2402.
- [32] 谢余初,巩杰,张玲玲.基于PSR模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J].地理科学,2015,35(6):790-797.
- [33] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [34] 王琼,卢聪,李法云,等.基于主成分分析和熵权法的河流生境质量评价方法:以清河为例[J].生态科学,2017,36(4):185-193.
- [35] 金丹,孔雪松.湖北省城镇化发展质量评价与空间关联性分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(10):2146-2155.
- [36] 丁洋,赵进勇,张晶,等.松花湖水质空间差异及富营养化空间自相关分析[J].环境科学,2021,42(5):2232-2239.
- [37] Hu X, Xu H. A new remote sensing index based on the pressure-state-response framework to assess regional ecological change[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26(6):5381-5393.
- [38] Spanò M, Gentile F, Davies C, et al. The DPSIR framework in support of green infrastructure planning: A case study in Southern Italy[J]. Land Use Policy, 2017,61:242-250.
- [39] Pan W, Gulzar M A, Hassan W. Synthetic evaluation of China's regional low-carbon economy challenges by driver-pressure-state-impact-response model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(15):5463-5483.
- [40] Wei S, Pan J, Liu X. Landscape ecological safety assessment and landscape pattern optimization in arid inland river basin: Take Ganzhou District as an example[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020,26(3):782-806.