

嘉陵江流域生态系统服务价值与生态风险时空分异特征及关联性*

周建伟^{1,2,3}, 罗君^{2,3}

(1. 西华师范大学 生命科学学院; 2. 四川省干旱河谷土壤侵蚀监测与控制工程实验室, 四川 南充 637009;

3. 大小凉山干旱河谷土壤侵蚀与生态修复野外科学观测研究站, 四川 凉山 616753)

摘要:为嘉陵江流域及相关地区的生态环境保护 and 生态安全格局构建提供参考, 基于 2000、2010 和 2020 年 3 期地表覆盖数据, 应用生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)和生态风险指数(ecological risk index, ERI)评估模型、地理探测器、双变量空间自相关模型等方法, 定量评估了嘉陵江流域 ESV 和 ERI 的时空演变、分异特征和关联性。结果显示: 2000—2020 年嘉陵江流域土地利用类型以林地和耕地为主, 建设用地和水域增长迅速; 研究期内流域 ESV 增长了 1.50%, 且高和极高等级单位面积 ESV 区域在流域内分布较广, 水域面积增加是 ESV 增长的重要原因; 研究期内流域 ERI 逐步降低, 且极低和低等级 ERI 区域在流域内分布较广; 人为影响指数与土地利用是 ESV 和 ERI 空间分异的主导因子; ESV 和 ERI 具有统计学意义上的空间负相关性, 主要关系为高价值-低风险, 即 ESV 较高区域的 ERI 较低。推动土地利用结构优化, 合理控制城镇建设规模, 加强林地和水域保护力度, 对嘉陵江流域生态服务功能提升和生态安全格局构建具有深远意义。

关键词:生态系统服务价值; 生态风险; 时空关联; 时空分异; 嘉陵江流域

中图分类号:X171.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)05-0072-12

随着全球经济一体化进程加快, 人口急剧膨胀、城镇化快速推进等人类活动对自然和经济环境造成了深远影响^[1], 由此带来的土地利用结构恶化、生态用地流失等问题不仅严重影响区域生态安全格局^[2], 也不利于生态文明建设, 更制约着人类福祉的持续提升^[3]。生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)和生态风险指数(ecological risk index, ERI)评估作为生态环境评价的重要组成部分, 同生态安全评价密不可分^[4]。生态系统服务是指人类从生态系统的结构、过程和功能直接或间接获得的众多产品和服务^[5], 对保障人类健康和可持续发展的生态安全至关重要^[6]。通用的 ESV 评估框架主要基于市场理论构建。实际市场法、替代市场法和假想(虚拟)市场法为 3 类主要 ESV 定价方法^[7], 其中替代市场法因基于单位面积生态系统价值的等效因子法而直观易用、所需数据相对较少并具有高度可比性和综合性, 故被广泛用于各级范围程度 ESV 评估^[7-8]。生态风险是生态系统及它的组成部分对外界干扰做出退化反映的可能性^[9], 其中景观生态风险是指自然要素和社会经济要素制约下景观格局和生态过程共同作用下可能引起的不利影响^[10]。景观生态风险评价可综合反映因自然与人为干扰而产生的生态环境问题^[11], 能引导区域综合风险防范, 可推动景观格局优化和管控^[12]。

近些年来, 学者对 ESV 和 ERI 的研究正逐步从独立分析转向关联分析, 并主要分成 2 类: 一类是基于 ESV 来构建 ERI 评价体系或框架^[13], 将生态系统过程与人类福祉相联系来进行风险表征, 可极大提高评价的时效性^[14]; 另一类利用双变量空间自相关模型等方法分析 ESV 和 ERI 的时空关联性^[4], 发现二者具有统计学意义上的正向或负向空间相关性^[4,9]。目前众多研究对 ESV 和 ERI 之间的时空关联进行了探索, 但这些研究不仅忽视了建设用地对 ESV 的影响, 也缺乏对 ESV 和 ERI 空间分异的动态性探测, 因此难以分析城镇建设用对生态环境的影响, 更难以深入探究 ESV 和 ERI 的空间分异及两者相互作用机理。

嘉陵江流域北连关中平原城市群与兰西城市群、南接成渝城市群, 与三峡库区有紧密联系, 在丝绸之路经济带及长江流域经济带占据重要地位, 是中国长江上游生态屏障的重要组成部分。受国家宏观政策引导, 嘉陵江流域内经济在近年来得到快速发展, 城镇化进程也得以加快。与此同时, 嘉陵江流域内土地利用变化剧烈, 流

* 收稿日期: 2022-07-13 修回日期: 2022-09-13 网络出版时间: 2023-06-26 T11:06

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41971015)

第一作者简介: 周建伟, 男, 研究方向为水土保持与荒漠化防治, E-mail: gesang3650@163.com; 通信作者: 罗君, 男, 讲师, 博士, E-mail: luojunxmx@126.com

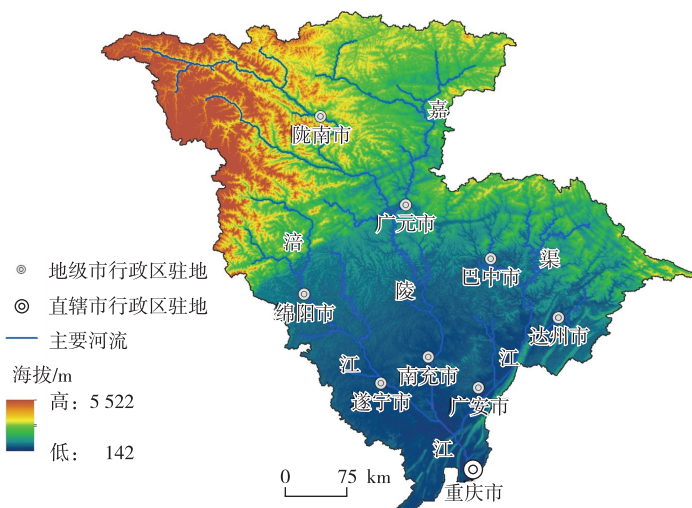
网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20230625.1738.024>

域生态环境及生态安全也面临着一系列挑战^[15-16]。因此,分析嘉陵江流域 ESV 和 ERI 的变化,对该流域生态环境保护与可持续发展具有重要意义。本研究利用 2000—2020 年地表覆盖数据,对嘉陵江流域 ESV 和 ERI 时空分异特征及关联性进行了深入研究,以期对嘉陵江流域及相关地区的生态环境保护 and 生态安全格局构建提供参考资料。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

嘉陵江源于秦岭南麓,流经陕西、甘肃、四川、重庆等省(直辖市),地理位置在东经 $102.55^{\circ} \sim 109.00^{\circ}$ 、北纬 $29.67^{\circ} \sim 34.50^{\circ}$ 之间(图 1),流域面积达 15.91 万 km^2 ,是长江水系内流域面积最大的支流,包括嘉陵江干流、渠江、涪江等 3 个大水系。嘉陵江主体流经四川盆地东北部,地处一、二级阶梯过渡的地形急变带,地势大致自西北向东南倾斜;该区域位于亚热带季风气候区,夏季炎热多雨,冬季温暖湿润;年平均气温、年平均降水量分别为 10°C 和 912.80 mm ^[17],且自东南向西北方向递减。嘉陵江流域内人口约 4 000 万人,耕地密集,是中国重要的粮食产地。



注:底图来源于四川省水利厅(<http://slt.sc.gov.cn/>)印发的四川省行政区域内嘉陵江流域范围划定示意图,下同。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

流域内土地利用数据源于 GlobeLand 30 平台(www.globallandcover.com/),空间分辨率为 30 m,该数据基于 30 m Landsat、HJ-1 和 16 m GF-1 多光谱影像研制,总体精度在 83.50% 以上,Kappa 系数达 0.78 以上^[18],满足研究需求。年平均气温和年降水数据源自国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn/)。DEM 数据源自地理空间数据云(www.gscloud.cn/),流域边界和坡度由 DEM 处理所得。植被归一化指数数据源自国家生态科学数据中心(www.nesdc.org.cn/)。人口密度和地均 GDP 数据源于中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn/),人为影响指数利用文献^[19]中的相关公式计算而得,各因子按自然断点法离散为地理探测器所需的类型数据。粮食产量数据源自流域所涉省级行政区统计年鉴,粮食价格来自四川粮食和物资储备局(www.lwj.sc.gov.cn/)。

1.3 ESV 核算模型

以 Costanza 等人^[5]关于 ESV 的估算方法和谢高地等人^[20]制定的中国 ESV 当量表为基础。2000—2020 年嘉陵江流域粮食平均产量为 $5\,438.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,又因嘉陵江流域主体位于四川省境内,故本研究以 2020 年四川省小麦、玉米、稻谷平均收购价格($2.41 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$)作为全流域这 3 种农作物平均收购价格。由此计算得到研究区 ESV 当量为 $1\,872.41 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,根据修正后的价值当量(表 1)和各土地利用类型面积得到研究区 ESV,计算公式为:

$$V_{\text{ESV}} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (A_k V_{ki}),$$

其中: V_{ESV} 表示 ESV(单位:元·hm⁻²); m 为土地利用类型的数量; n 为生态系统服务功能类型数; A_k 表示第 k 种土地利用类型的面积(单位:hm²); V_{ki} 表示第 k 种土地利用类型下第 i 类生态系统功能的价值系数。

1.4 景观生态风险评价模型

生态风险由不同景观生态系统受到外部干扰强度和内部抵抗能力决定,基于前人研究成果^[21],从景观格局视角出发构建生态风险评价模型,具体计算公式如下:

$$E_k = \sum_{i=1}^I ((A_{ki}/A_k)R_i), L_i = F_i E_i, E_i = aC_i + bN_i + cD_i,$$

其中: E_k 表示第 k 个风险网络的 ERI; I 为风险网络数量; A_{ki} 是第 k 个风险网络中第 i 种土地利用类型的面积; A_k 为第 k 个风险网络面积; L_i 为第 i 类景观的景观损失度指数; F_i 为景观脆弱度指数,它的计算方法参考文献[22],即将流域土地利用的脆弱性分为 6 级并进行赋值,并按赋值从高到低对土地利用类型进行排序,依次为未利用地、水域、耕地、草地、林地、建设用地,然后进行归一化处理,最后得到各景观类型的脆弱度指数; E_i 为景观干扰度; C_i 为景观破碎度指数; N_i 为景观分离度指数; D_i 为景观优势度指数; a 、 b 和 c 为计算景观干扰度的指标权重,参考文献[23]分别赋为 0.5、0.3 和 0.2。

表 1 研究区单位面积 ESV 系数

Tab. 1 Coefficients of the ESV in the study area

元·hm⁻²

生态系统功能构成		土地利用类型					
一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	2 546.48	580.45	430.65	1 497.93	18.72	18.72
	原料生产	748.96	1 329.41	636.62	430.65	0.00	56.17
	水资源供给	37.45	692.79	355.76	15 522.28	-14 061.80	37.45
调节服务	气体调节	2 078.38	4 400.16	2 265.62	1 441.76	-4 531.23	93.62
	气候调节	1 067.27	13 163.04	5 972.99	4 287.82	0.00	187.24
	净化环境	318.31	3 726.10	1 966.03	10 391.88	-4 606.13	280.86
	水文调节	5 092.96	6 572.16	4 381.44	191 435.20	0.00	187.24
支持服务	土壤保持	18.72	5 355.09	2 752.44	1 741.34	37.45	243.41
	维持养分循环	355.76	411.93	205.97	131.07	0.00	18.72
	生物多样性	393.21	4 868.27	2 509.03	4 774.65	636.62	224.69
文化服务	美学景观	168.52	2 134.55	1 104.72	3 538.85	18.72	93.62
合计		12 826.01	43 233.95	22 581.26	235 193.42	-22 487.64	1 441.76

1.5 ESV 与景观生态风险分异模型

地理探测器可通过分析各驱动因子层内方差和总方差的关系,因此借助它表现出的空间分层异质性^[24]来探索嘉陵江流域 ESV 和 ERI 的空间分异特征,计算公式如下:

$$q = 1 - \sum_{h=1}^L ((N_h \sigma_h^2)/(N \sigma^2)),$$

其中: q 表示某驱动因子对要素空间分异的影响力; L 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为评价单元 h 和全区单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为评价网格和研究区要素的方差。

1.6 ESV 与景观生态风险关联模型

空间自相关模型能够反映要素在空间位置的相关程度,分为全局空间自相关和局部空间自相关^[4]。为探索 ESV 和 LER 的空间相关特征,借助双变量空间分析模型,利用全局自相关 Moran's I 指数反映两者整体空间关联和差异状况,计算公式^[25]如下:

$$I_{vr} = \left(M \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (W_{ij} ((y_{iv} - \bar{y}_v) / \sigma_v) ((y_{ir} - \bar{y}_r) / \sigma_r)) \right) / \left((M - 1) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W_{ij} \right),$$

其中: I_{vr} 为单位面积 ESV(v)和 ERI(r)的双变量全局自相关系数; y_{iv} 和 y_{ir} 分别为第 i 个评价网格单位面积 ESV 和 ERI; $\bar{y}_v$ 和 $\bar{y}_r$ 分别为单位面积 ESV 和 ERI 的平均值; σ_v 和 σ_r 分别为评价单元内单位面积 ESV 和 ERI 方差; M 为评价网格数; W_{ij} 是基于空间邻接关系建立的权重矩阵。同时采用 LISA 局部自相关直观反映单位面积 ESV 和 ERI 局部集聚和离散状况。

2 结果与分析

2.1 ESV 时空变化特征

2000—2020 年嘉陵江流域土地利用类型以林地和耕地为主(表 2),二者面积占比分别在 50.54%和 42.17%以上。由图 2 可知:嘉陵江流域耕地多集中于四川盆地东北部地区和陇南地区、林地多集中于秦巴山地;研究期内流域土地利用变化呈现耕地与草地面积减少、林地和建设用地面积增长的典型特征。在研究期内,整个流域的草地面积减少 2 366.27 km²,建设用地面积增长了 1 761.37 km²,两者变化率分别达 -27.75%和 246.92%(表 2);嘉陵江中下游主要城市的建设用地面积增长迅猛(图 2)。

表 2 研究区不同土地利用类型的面积和 ESV 变化
Tab. 2 The area and ESV changes of different land use types in the study area

土地利用类型	面积/km ²			ESV/亿元		
	2000 年	2010 年	2020 年	2000 年	2010 年	2020 年
耕地	68 299.43	68 781.49	67 107.49	876.009	882.192	860.721
林地	80 413.14	81 911.58	81 667.63	3 476.579	3 541.360	3 530.814
草地	8 525.97	6 200.99	6 159.69	192.527	140.026	139.094
水域	1 163.64	1 292.02	1 699.93	273.680	303.874	399.813
建设用地	713.33	929.26	2 474.70	-16.041	-20.897	-55.650
未利用地	2.06	2.22	8.11	0.003	0.003	0.012
合计	159 117.56	159 117.56	159 117.56	4 802.757	4 846.557	4 874.803

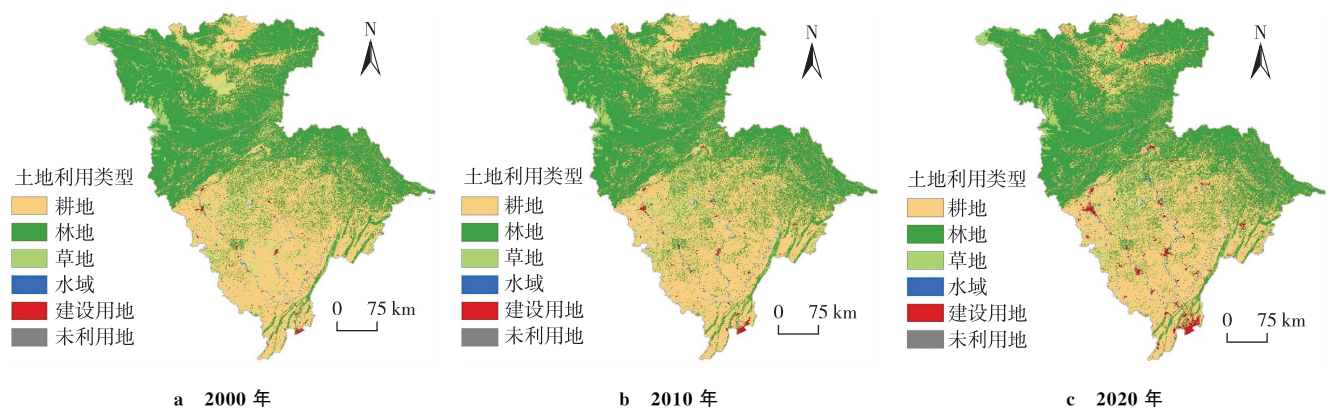


图 2 2000—2020 年研究区域土地利用空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of land use in the study area from 2000 to 2020

受土地利用变化影响,2000—2020 年嘉陵江流域 ESV 总体呈增长趋势(表 2),总计增加 72.046 亿元,增长率为 1.50%。除林地、水域和未利用地的 ESV 有所增长外,其他土地利用类型的 ESV 不同程度减少,林地和耕地的 ESV 贡献突出,二者贡献率分别在 72.43%和 17.66%以上。从生态系统服务功能一级类型来看(图 3a),嘉陵江流域除供给服务的 ESV 呈减少趋势外,调节服务、支持服务和文化服务的 ESV 均逐步增长,且调节服务的 ESV 价值最高,占 ESV 总量的 66.30%以上。在生态系统服务功能二级类型中,除气候调节、水文调节、土壤保持、生物多样性和美学景观的 ESV 呈增加趋势外,其余类型的 ESV 均在降低,其中气候调节和水文调节的

ESV 贡献最为突出,两者贡献率均占 ESV 总量的 24%左右(图 3b)。总的看来,2000—2020 年嘉陵江流域水域面积的增加是该流域 ESV 总体增长的重要原因。

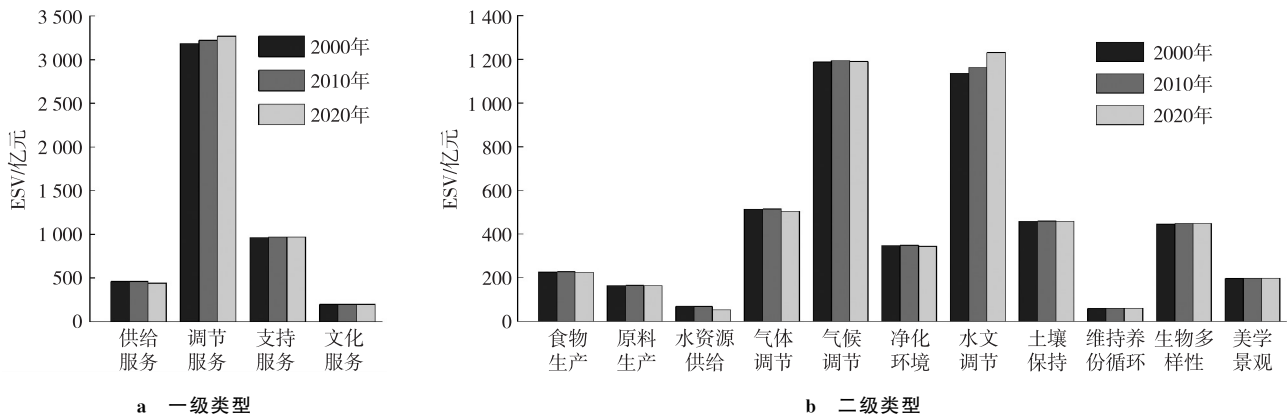


图 3 2000—2020 年研究区生态系统服务功能的 ESV 变化

Fig. 3 The ESV changes of ecosystem service functions in the study area from 2000 to 2020

通过 ArcGIS 10.7 计算 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 研究区评价网格内单位面积 ESV (万元 $\cdot\text{hm}^{-2}$),以自然断点法将该指标划分为极低 $[0, 1.728 7)$ 、低 $[1.728 7, 2.511 8)$ 、中等 $[2.511 8, 3.305 1)$ 、高 $[3.305 1, 4.002 0)$ 和极高 $[4.002 0, \infty)$ 共 5 个等级。2000—2020 年嘉陵江流域内除极高和高等级单位面积 ESV 空间分布区域呈增加趋势(增加率分别为 6.47%和 0.46%)外,其余 3 个等级单位面积 ESV 单位面积 ESV 空间分布区域均小幅减少。研究期内嘉陵江流域极高和高等级单位面积 ESV 区域分布较广,两者面积占比在 25.25%和 21.73%以上,其余等级单位面积 ESV 的面积占比在 14.85%~19.86%之间(图 4a)。极高和高等级单位面积 ESV 集中于嘉陵江流域北部秦巴山地和南部河流、水库等水域集中区,中等级单位面积 ESV 多位于流域内耕地、林地过渡带和西部边缘草地集中区,低和极低等级单位面积 ESV 分别集中在城镇等建设用地密集区和耕地连片地区(图 4b、c、d)。在研究期内,研究区评价网格内平均单位面积 ESV 由 3.026 3 万元上升为 3.065 12 万元,增长了约 1.28%,整体呈增长态势。这一结果表明在嘉陵江流域经济快速增长阶段,流域内生态环境得到较为有力的保护,整体生态状况在不断好转。

2.2 生态风险时空变化特征

运用 ArcGIS 10.7 计算 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 研究区评价网格内 ERI,采用自然断点法将该指标划分为极低 $[0, 0.015 3)$ 、低 $[0.015 3, 0.022 2)$ 、中等 $[0.022 2, 0.037 5)$ 、高 $[0.037 5, 0.068 8)$ 和极高 $[0.068 8, \infty)$ 共 5 个等级。嘉陵江流域极低和低等级 ERI 区域分布较广,2000—2020 年两者面积占比分别为 55.00%和 18.34%;流域内除极低等级 ERI 面积有较大增长外(增幅为 21.30%),其余等级 ERI 面积均不同程度减少,其中高等级 ERI 面积减少了 27.89%(图 5a)。极高和高等级 ERI 分布区主要位于嘉陵江流域西北部草地集中区,且零星分布于四川省南部县的升钟水库等水域周边;中等级 ERI 分布区集中于四川省绵阳、南充等城市及重庆市的建设用地连片带及陇南北部耕地集中区,低等级 ERI 分布区多位于渠江、涪江、嘉陵江干流等流域,极低等级 ERI 分布区集中于秦巴山脉林地密布区和流域南部植被盖度较高区域(图 5b、c、d)。2000—2020 年,嘉陵江流域评价网格内平均 ERI 值由 0.018 5 下降为 0.017 0,下降了 8.11%,说明流域生态风险整体呈降低趋势。

2.3 ESV 与 ERI 空间分异的驱动分析

空间分异性是自然和社会经济因子复杂耦合作用的空间表现,利用地理探测器对所选取的影响嘉陵江流域 ESV(或 ERI)空间分异的 10 个驱动因子即土地利用(X_1)、年平均气温(X_2)、年降水量(X_3)、地均 GDP(X_4)、人口密度(X_5)、归一化植被指数(X_6)、高程(X_7)、坡度(X_8)、ERI(或 ESV)(X_9)和人为影响指数(X_{10})进行探测。

ESV 空间分异驱动因子的地理探测结果显示(图 6a):2000—2020 年嘉陵江流域 ESV 空间分异受自然要素和社会经济要素共同作用影响,按对 ESV 空间分异的解释力由大到小对驱动因子进行排序,依次为 X_{10} 、 X_2 、 X_7 、 X_1 、 X_9 、 X_4 、 X_8 、 X_3 、 X_6 、 X_5 ,其中: X_{10} 对研究区 ESV 空间分异的贡献最大,研究期内 q 值均在 0.77 以上; X_2 、 X_7 和 X_1 的贡献也较大,研究期内 q 值分别在 0.46、0.45 和 0.43 以上; X_9 、 X_8 和 X_4 的贡献也较突出,研究期内

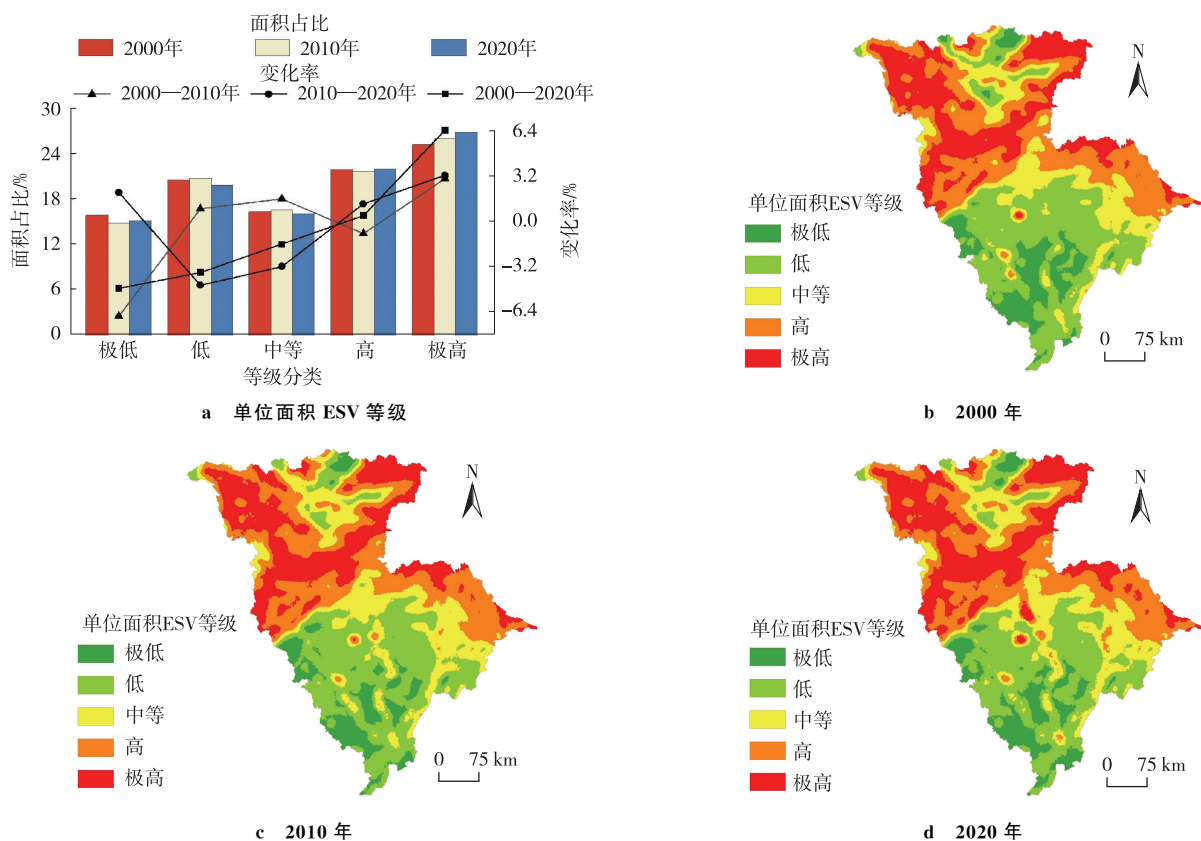


图 4 研究区不同等级单位面积 ESV 的面积占比变化及空间分布

Fig. 4 Changes of area proportion of the ESV at different levels and spatial distribution of ESV per unit area in the study area

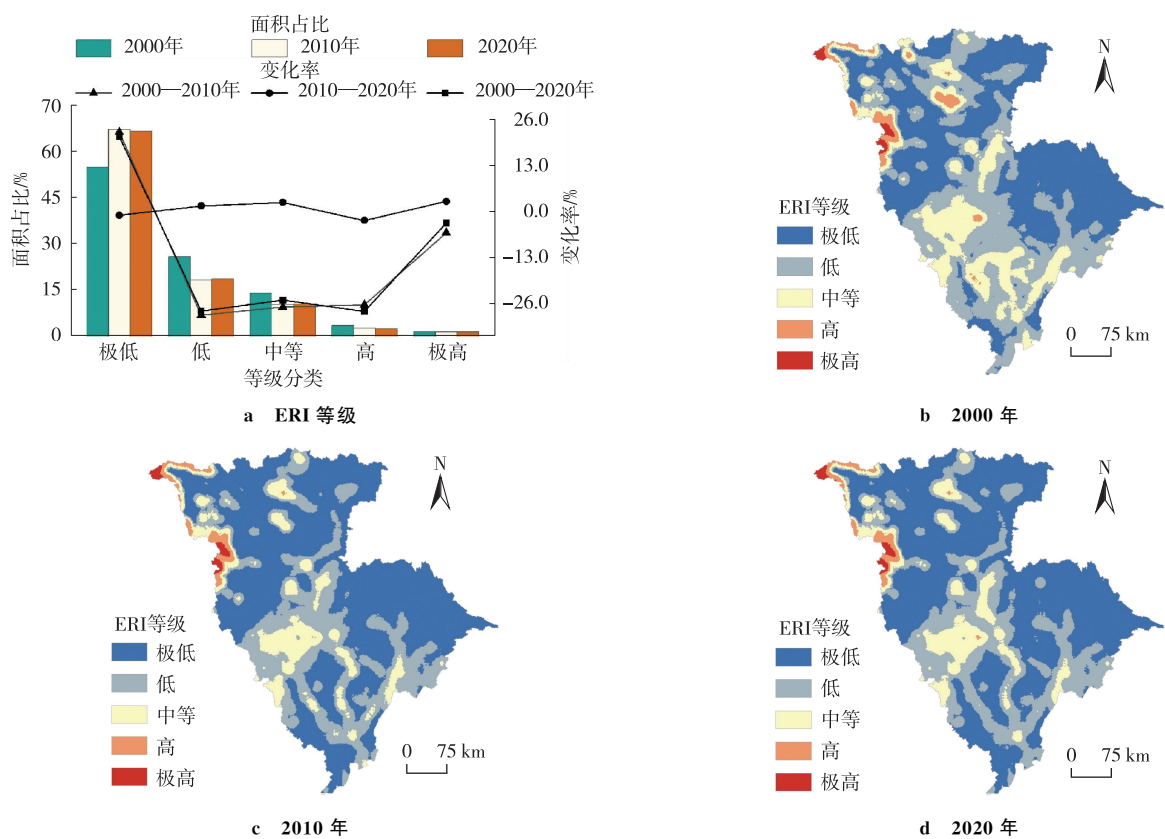


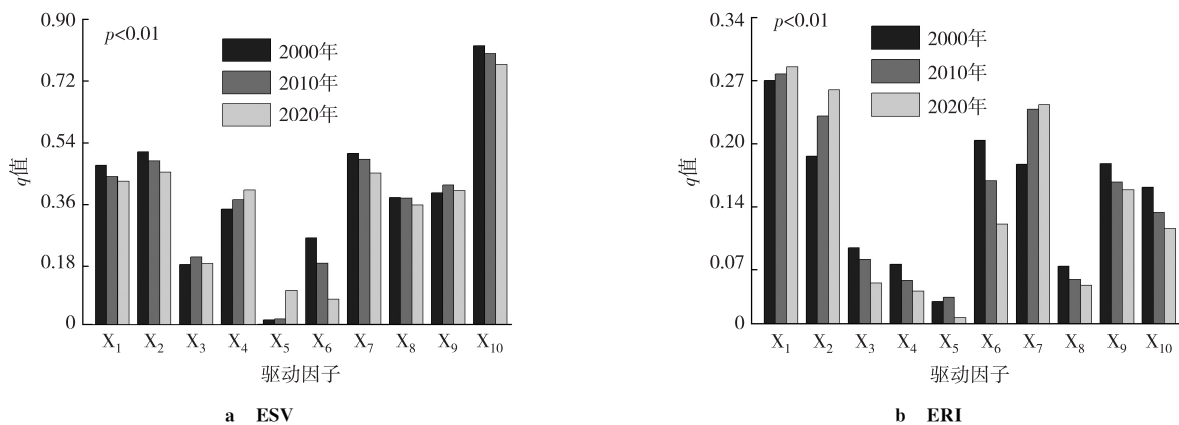
图 5 研究区不同等级 ERI 的面积占比变化及空间分布

Fig. 5 Changes of area proportion of the ERI at different levels and spatial distribution of ERI in the study area

q 值分别在 0.39、0.36 和 0.35 以上; X_3 、 X_5 和 X_6 在研究期内的 q 值在 0.26 以下, 同样也对 ESV 空间分异起到一定作用。从各驱动因子对 ESV 空间分异解释力的时间变化来看, 除 X_4 、 X_5 和 X_9 对 ESV 空间分异的解释力在增强外, 其余因子对 ESV 空间分异的解释力均不同程度减弱, 其中 X_6 对 ESV 空间分异的解释力下降最为明显(q 值在 2000—2020 年间降低了 0.18)。上述结果说明社会经济要素对于嘉陵江流域 ESV 空间分异的影响程度在逐步增强, 应规范流域人为土地利用活动、加强流域生态保护力度、优化流域土地资源配置、促进生态系统健康发展。

从 ERI 空间分异驱动因子的地理探测结果来看(图 6b), 2000—2020 年嘉陵江流域 ERI 空间分异同样受自然要素和社会经济要素共同作用影响, 按对 ERI 空间分异的解释力由大到小对驱动因子进行排序, 依次为 X_1 、 X_2 、 X_7 、 X_9 、 X_6 、 X_{10} 、 X_3 、 X_8 、 X_4 、 X_5 , 其中: X_1 对研究区 ERI 空间分异的贡献最大, 2000—2020 年研究期内 q 值均在 0.27 以上; X_2 和 X_7 的贡献较大, 研究期内 q 值分别在 0.19 和 0.18 以上; X_9 、 X_6 和 X_{10} 的贡献也较突出, 研究期内 q 值分别在 0.15、0.12 和 0.11 以上; 其余因子研究期内的 q 值在 0.10 以下, 但同样也对 ERI 空间分异起到一定作用。从各驱动因子对 ERI 空间分异解释力的时间变化来看, 除 X_1 、 X_2 和 X_7 对 ERI 空间分异的解释力在增强外, 其余因子对 ERI 空间分异的解释力均不同程度减弱, 其中 X_6 下降最为明显(q 值在 2000—2020 年间降低 0.09)。上述结果说明嘉陵江流域 ERI 空间分异受土地利用方式、降水空间分布和高程影响深远, 故需遵循因地制宜原则、优化土地利用结构、切实降低区域生态风险。

ESV 和 ERI 空间分异的驱动因子交互探测结果显示(图 7、图 8): 任意两个驱动因子交互作用对 ESV 和 ERI 空间分异的影响均大于单个因子, 表明流域内 ESV 和 ERI 空间分异受多种驱动因子共同作用影响, 其中: X_9 与 X_{10} 的交互作用对 ESV 和 ERI 的空间分异的影响最明显, 2000—2020 年 q 值分别在 0.86 和 0.56 以上; X_2 与 X_9 、 X_7 与 X_9 以及其余因子与 X_{10} 的交互作用对 ESV 空间分异的解释力较高, 研究期内 q 值在 0.64 以上; X_2 与 X_9 、 X_7 与 X_9 、 X_9 与 X_{10} 的交互作用对 ERI 空间分异的解释力也较高, 研究期内 q 值在 51% 以上。由此可见, 在嘉陵江流域自身地形和气象条件约束下, 人为活动会强烈干扰流域内 ESV 和 ERI 的空间分异, 需采取与流域自然和经济环境相适应的土地利用开发模式, 规避不合理经济活动对流域生态系统的压力。



注: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 和 X_{10} 分别代表土地利用、年平均气温、年降水量、地均 GDP、人口密度、归一化植被指数、高程、坡度、ERI(或 ESV)和人为影响指数, 下同。

图 6 ESV 和 ERI 空间分异驱动因子的地理探测结果

Fig. 6 Geodetection results of driving factors for spatial differentiation of ESV and ERI

2.4 ESV 与 ERI 的关联性分析

运用 GeoDa 空间分析工具, 计算得到嘉陵江流域 2000 年、2010 年和 2020 年 ESV 和 ERI 的双变量全局自相关 Moran's I 指数分别为 -0.179、-0.130 和 -0.113(图 9), 说明流域 ESV 和 ERI 具有统计学意义上的空间负相关性, 且两者相关性呈减弱趋势。ESV 的升高将促使 ERI 下降, 这主要是在退耕还林还草等生态政策推动下, 嘉陵江流域内林地等高 ESV 土地利用类型面积增加, 景观破碎程度下降, 有效抑制了生态风险的蔓延。

进一步进行双变量局部自相关分析后可知(图 10): 1) 2000—2020 年, 嘉陵江流域 ESV 和 ERI 的显著区域为四川盆地东北部建设用地区域、河面宽阔区域、秦巴山脉南麓林地广布区域、青藏高原东缘林草过渡带。2) 流域内高价值-高风险区面积占比在 3.02% 左右, 在研究期内呈减小趋势; 该区域集中于流域的上游林地与林草过渡

带和中下游水库及宽阔河面区域,涵盖了能创造极高 ESV 的林地和水域,但极易受人为活动影响,易被草地和建设用地侵占,生态风险极高。3) 流域内高价值-低风险面积占比为 26.42%左右,在研究期内呈减少趋势;该区域集中于秦巴山脉南麓和青藏高原东缘地带,分布有连片能创造较高 ESV 的林地,且受人为影响有限,生态系统较为稳定,生态风险较低。4) 流域内低价值-高风险区面积占比为 4.18%左右,在研究期内呈减少趋势;该区域主要分布于流域内主要城市辐射圈和西北部草地密集区,土地利用类型以 ESV 较低的耕地和草地为主,易受城镇扩张和放牧等经济活动影响,生态风险较高。5) 低价值-低风险区在流域内的面积占比为 1.93%左右,在研究期内也呈减少趋势;该区域集中于秦巴山脉南麓和青藏高原东缘的山间谷地,以 ESV 较低的耕地为主,但得益于狭窄地形,较少受经济活动影响,生态风险较低。

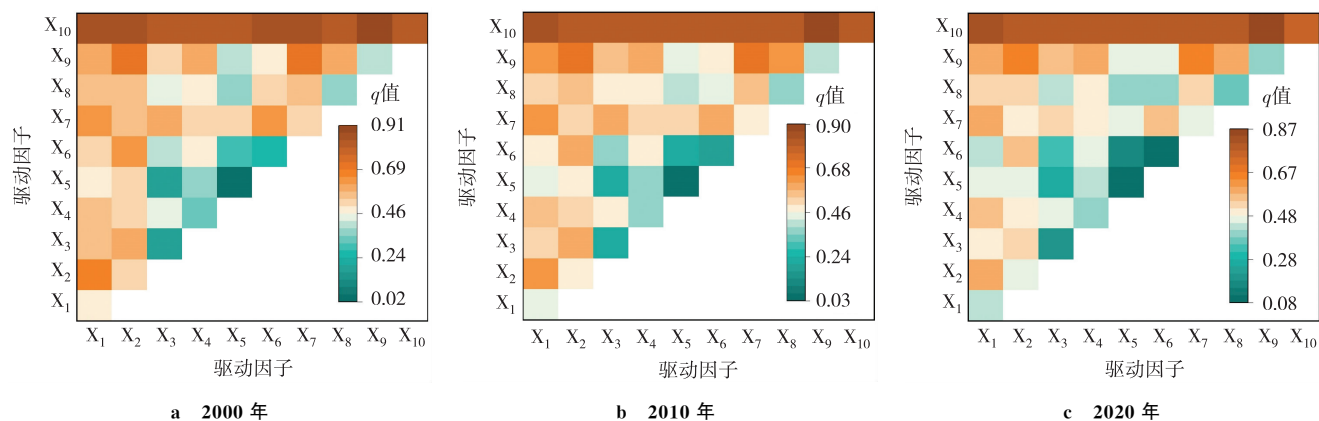


图 7 ESV 空间分异驱动因子交互探测结果

Fig. 7 Interaction detection results of driving factors for spatial differentiation of ESV

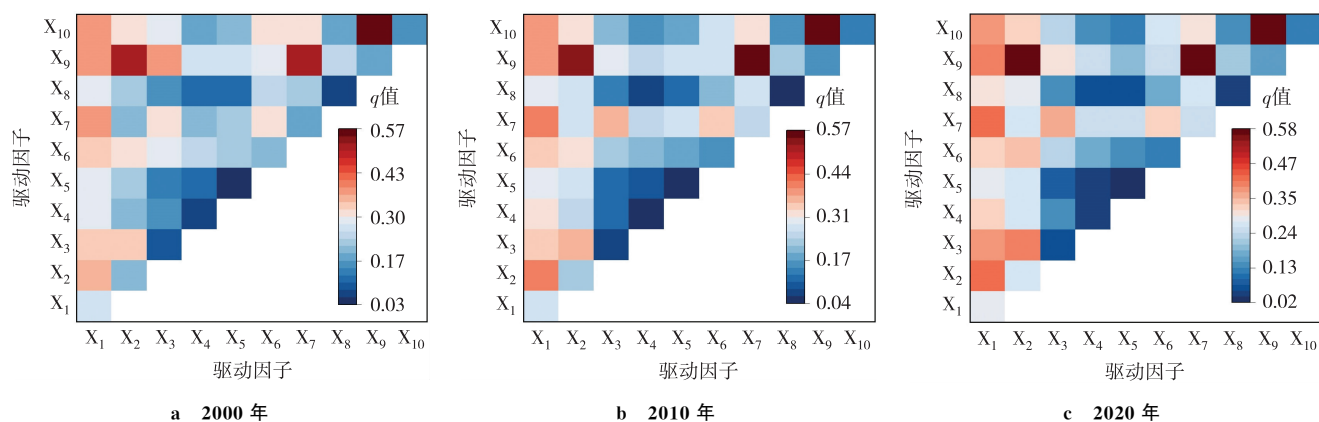


图 8 ERI 空间分异驱动因子交互探测结果

Fig. 8 Interaction detection results of driving factors for spatial differentiation of ERI

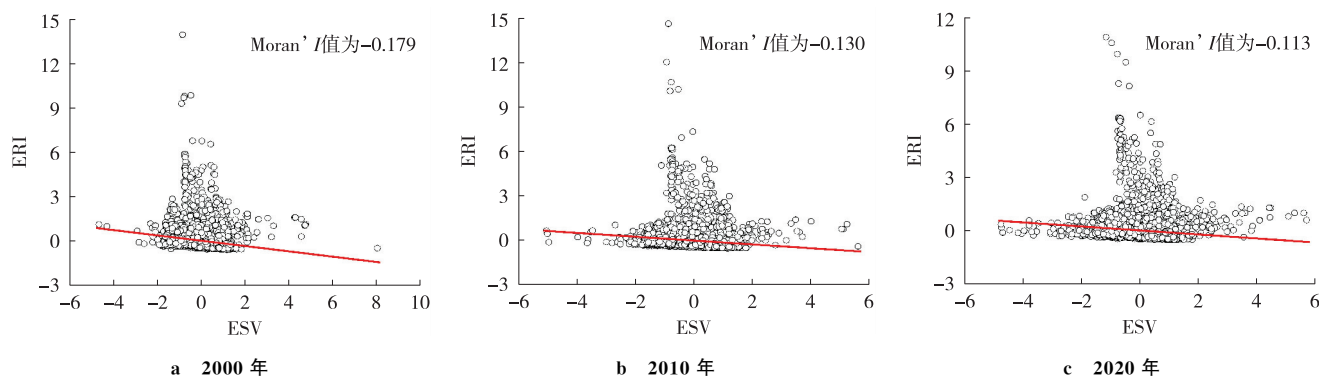


图 9 研究区 ESV 与 ERI 的 Moran 散点图

Fig. 9 Moran scatter plots of ESV and ERI in the study area

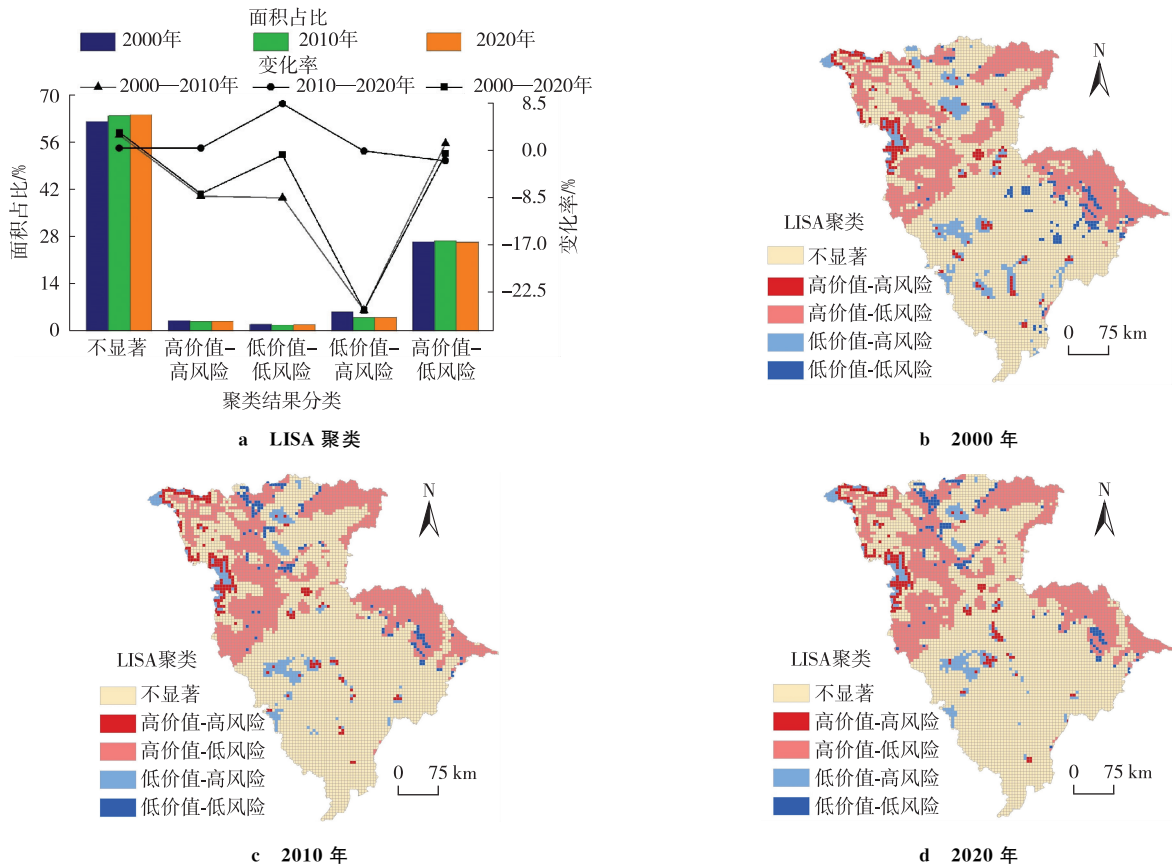


图 10 研究区 ESV 与 ERI 的 LISA 聚类图及不同等级 LISA 聚类的面积占比变化

Fig. 10 Changes of area proportion of the LISA cluster at different levels, LISA cluster map of ESV and ERI in the study area

3 结束语

本研究通过 ESV 和 ERI 评估模型、地理探测器和双变量空间自相关模型,研究了 2000—2020 年嘉陵江流域 ESV 和 ERI 的时空变化、时空分异特征及关联性,主要结果如下。

1) 2000—2020 年嘉陵江流域土地利用变化剧烈,其中林地、水域和建设用地的面积分别增长了 1.56%、46.09%和 246.92%;得益于林地、水域面积增加,流域总 ESV 不断上升,增长率达 1.50%,高与极高等级单位面积 ESV 区域在流域内分布较广;林地的 ESV 贡献较大,2000—2020 年贡献率在 72.39%以上,而建设用地对 ESV 增长的阻碍作用日益增强;生态系统功能一级类型中调节服务的 ESV 贡献较大,而调节服务下属的二级类型中气候调节和水文调节的 ESV 贡献尤为突出。

2) 2000—2020 年嘉陵江流域 ERI 总体持续下降,平均 ERI 值降低了 8.11%,极低、低等级 ERI 区域在流域内分布较广;流域上游林草过渡带、中下游主要城镇周边环境易被人类活动所侵占,ERI 为极高等级。人为影响指数与土地利用分别为研究期内嘉陵江流域 ESV 和 ERI 空间分异的主导因子,对应的 q 值分别在 0.77 和 0.27 以上。

3) 嘉陵江流域 ESV 和 ERI 呈统计学意义上的空间负相关性,主要关系为高价值-低风险,2000—2020 年对应区域面积占比在 26.42%以上,且集中于秦巴山脉南麓及青藏高原东缘林地广布区;其余类型的 ESV 和 ERI 关系显著区域多位于易受人类活动干扰的城镇周边及流域北部较为狭窄的山谷地带。

将 ESV 评价和 ERI 评价有机结合,能较好反映出人类活动所引起的生态环境状况的变化^[4],更有利于区域环保决策的制定及实施^[9]。2000—2020 年嘉陵江流域 ESV 和 ERI 存在较明显的北高南低空间分异特征,秦巴山脉南麓、青藏高原东缘、流域中下游等能创造较高 ESV 的林草、水域^[26]及缓冲地带是嘉陵江流域重要的生态屏障,但极易受人类活动干扰,景观破碎化严重,是流域生态风险的主要来源。因此,在继续巩固流域内退耕还林还草成果的同时,需严格控制草地连片区畜牧规模并加强旅游监管,维护草地生态系统的健康发展;亦需加强

大型水库管理,推进水库局地生态系统的持续健康发展。陇南部和嘉陵江干流及支流汇集的四川盆地东北部因地势较为平坦,人类活动频繁,以四川省德阳、遂宁、南充、广安等城市及重庆市为代表的成渝城市群迅速兴起,建设用地侵占大量耕地、水域和林地^[27],导致相关区域 ESV 急剧降低、ERI 增加,威胁区域生态安全。因此,需提高城镇地区土地利用效率,亦需配套实施生态修复战略,通过增加城镇绿化等措施改善城镇区生态环境。嘉陵江流域 ESV 和 ERI 空间分异受自然和社会经济要素共同影响,人类活动对流域 ESV 和 ERI 空间分异的影响力在逐步加强。随着流域内城镇化进程不断推进,需高度重视流域上游林草分布区及流域中下游城市密集带生态环境所面临的巨大挑战^[28],避免快速城镇化推进对耕地和水域的不合理占用,从自然、社会、经济多视角对流域生态环境进行综合管控,巩固生态屏障功能,减少经济活动对区域生态环境的破坏,防止局部生态风险恶化为系统性生态功能的下降。

需要注意的是,本研究仅从土地利用变化角度评估 ESV 和 ERI 的方法还有待进一步完善,而且有关驱动因子受数据源限制尚不能全面刻画 ESV 和 ERI 的空间分异。因此,未来相关研究需重点关注对 ESV 和 ERI 的模拟预测。

参考文献:

- [1] WANG J L,ZHOU W Q,PICKETT S T A,et al. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion[J]. *Science of the Total Environment*,2019,662:824-833.
- [2] OUYANG Z Y,ZHENG H,XIAO Y,et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. *Science*,2016,352(6292):1455-1459.
- [3] LIN Y,CHEN J S,JIN Z F,et al. Impacts of human activities on coastal ecological environment during the rapid urbanization process in Shenzhen,China[J]. *Ocean and Coastal Management*,2018,154:121-132.
- [4] 李辉,周启刚,李斌,等. 近 30 年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J]. *长江流域资源与环境*,2021,30(3):654-666.
LI H,ZHOU Q G,LI B,et al. Spatiotemporal change and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Three Gorges Reservoir Area in the past 30 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2021,30(3):654-666.
- [5] COSTANZA R,d'ARCE R,de GROOT R,et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*,1998,25(1):3-15.
- [6] CROSSMAN N D,BURKHARD B,NEDKOV S,et al. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services[J]. *Ecosystem Services*,2013,4:4-14.
- [7] 李丽,王心源,骆磊,等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. *生态学杂志*,2018,37(4):1233-1245.
LI L,WANG X Y,LUO L,et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2018,37(4):1233-1245.
- [8] COSTANZA R,de GROOT R,SUTTON P,et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*,2014,26:152-158.
- [9] 李俊翰,高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. *生态学报*,2019,39(21):7815-7828.
LI J H,GAO M X. Spatiotemporal evolution and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Binzhou[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2019,39(21):7815-7828.
- [10] 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.
LI Q P,ZHANG Z D,WAN L W,et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Acta Geographica Sinica*,2019,74(7):1420-1437.
- [11] 韩晓佳,刘小鹏,王亚娟,等. 基于景观格局的干旱区绿洲生态风险评价与管理:以青铜峡市为例[J]. *水土保持研究*,2017,24(5):285-290.
HAN X J,LIU X P,WANG Y J,et al. Ecological risk assessment and its management of oasis in arid area based on landscape pattern:a case study in Qingtongxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2017,24(5):285-290.
- [12] JIA Y Y,TANG X L,LIU W. Spatial-temporal evolution and correlation analysis of ecosystem service value and landscape ecological risk in Wuhu City[J]. *Sustainability*,2020,12(7):2803-2819.
- [13] 陈峰,李红波,张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价[J]. *地理学报*,2019,74(3):432-445.
CHEN F,LI H B,ZHANG A L. Ecological risk assessment based on terrestrial ecosystem services in China[J]. *Acta Geographica Sinica*,2019,74(3):432-445.

- [14] 康鹏,陈卫平,王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1192-1203.
KANG P, CHEN W P, WANG M E. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [15] 齐师杰,张行南,夏达忠,等. 嘉陵江流域土地利用/覆被变化特征及其驱动力分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 1-7.
QI S J, ZHANG X N, XIAD Z, et al. Characteristics and driving forces of land use/cover change in Jialingjiang River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(1): 1-7.
- [16] 汤庆新,张宝雷,周万村. 较大尺度流域的土地利用/覆盖和景观格局变化分析:以嘉陵江中下游地区为例[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 69-71.
TANG Q X, ZHANG B L, ZHOU W C. Research of the changes of land use/cover and landscape pattern in comparatively large scale: a case study on middle and lower reaches of the Jialing River Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2): 69-71.
- [17] MENG C C, ZHANG H L, WANG Y J, et al. Contribution analysis of the spatial-temporal changes in streamflow in a typical elevation transitional watershed of southwest China over the past six decades[J]. Forests, 2019, 10(6): 495-513.
- [18] CHEN F, CHEN J, WU H, et al. A landscape shape index-based sampling approach for land cover accuracy assessment[J]. Science China(Earth Sciences), 2016, 59(12): 2263-2274.
- [19] 陈浮,葛小平,陈刚,等. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究[J]. 地理科学, 2001, 13(3): 210-216.
CHEN F, GE X P, CHEN G, et al. Spatial different analysis of landscape change and human impact in urban fringe[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 13(3): 210-216.
- [20] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [21] LIN Y Y, HU X S, ZHENG X X, et al. Spatial variations in the relationships between road network and landscape ecological risks in the highest forest coverage region of China[J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 392-403.
- [22] 高宾,李小玉,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3441-3450.
GAO B, LI X Y, LI Z G, et al. Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on landscape pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3441-3450.
- [23] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等. 流域景观结构的城市化影响与生态风险评价[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3432-3440.
HU H B, LIU H Y, HAO J F, et al. The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3432-3440.
- [24] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1/2): 107-127.
- [25] 杨远琴,任平,洪步庭. 基于生态安全的三峡库区重庆段土地利用冲突识别[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 322-332.
YANG Y Q, REN P, HONG B T. The study of land use conflict based on ecological security of the Chongqing Section of Three Gores Reservoir Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 322-332.
- [26] 罗芳,潘安,陈忠升,等. 四川省土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(4): 734-744.
LUO F, PAN A, CHEN Z S, et al. Impact of land use change on the ecosystem service value in Sichuan Province[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2021, 36(4): 734-744.
- [27] 韩蕊,孙思琦,郭涿,等. 川东地区生态系统服务价值时空演变及其驱动力分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1136-1143.
HAN R, SUN S Q, GUO L, et al. Evolution of ecosystem service value and analysis of driving forces in the east region of Sichuan Province, China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(9): 1136-1143.
- [28] 贾艳艳,唐晓岚,任宇杰. 长江流域安徽段生态系统服务价值与景观生态风险时空演变及其关联分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 31-40.
JIA Y Y, TANG X L, REN Y J. Spatial-temporal evolution and correlation analyses of ecosystem service values and landscape ecological risks in Anhui Section of the Yangtze River Basin[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2022, 46(3): 31-40.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area**Spatial-Temporal Differentiation Characteristics and Correlation of Ecosystem Service Value and Ecological Risk of Jialing River Basin**ZHOU Jianwei^{1,2,3}, LUO Jun^{2,3}

(1. College of Life Sciences, China West Normal University; 2. Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil Erosion on Dry Valleys, Nanchong Sichuan 637009; 3. Liangshan Soil Erosion and Ecological Restoration in Dry Valleys Observation and Research Station, Liangshan Sichuan 616009, China)

Abstract: To provide reference for the construction of ecological environment protection and ecological security patterns in the Jialing River Basin and related areas, based on surface cover data from three periods of 2000, 2010, and 2020, the spatio-temporal evolution, differentiation characteristics and correlation of ecosystem service value (ESV) and ecological risk index (ERI) in the Jialing River Basin was quantitatively evaluated using methods such as ESV and ERI evaluation models, Geodetector, and bivariate spatial autocorrelation models. The results show that from 2000 to 2020, land use types in Jialing River Basin were mainly forest land and cultivated land, construction land and water area increased rapidly. During the research period, the ESV of the watershed increased by 1.50%, high and extremely high level ESV areas per unit area were widely distributed within the watershed. The increase in water area was an important reason for the ESV growth; during the research period, the ERI of the watershed gradually decreased, and areas with extremely low and low-level ERI were widely distributed within the watershed. The human impact index and land use are the dominant factors for spatial differentiation of ESV and ERI. There was a significant negative spatial correlation between ESV and ERI, main relationship was high value-low risk, ERI was lower in areas with higher ESV. Promoting the optimization of land use structure, rationally controlling the scale of urban construction, and strengthening the protection of forest land and water area are of far-reaching significance to the improvement of ecological service function and the construction of ecological security pattern of Jialing River Basin.

Keywords: ecosystem service value; ecological risk; spatio-temporal correlation; spatio-temporal differentiation; Jialing River Basin

(责任编辑 方 兴)