

汉江生态经济带景观生态风险与生态系统服务价值的时空变化及关联性

张静^{1,3}, 秦公伟², 成升魁⁴, 文雅婷³

(1.陕西理工大学 陕南绿色发展与生态补偿研究中心, 陕西 汉中 723000; 2.陕西理工大学 生物科学与工程学院, 汉中 陕西 723001; 3.陕西理工大学 人文学院, 汉中 陕西 723001; 4.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: [目的] 研究汉江生态经济带景观生态风险与生态系统服务价值的时空变化及关联性, 不仅为区域生态安全及生态系统的可持续发展提供理论依据, 也为经济带景观格局优化和土地资源合理配置提供理论支撑。[方法] 基于生态系统服务价值当量表, 对汉江生态经济带土地景观格局及生态系统服务价值进行了评估, 分析二者之间的内在联系, 揭示景观生态风险与生态系统服务价值的时空变化规律, 探析了二者的互馈关系。[结果] ①1990—2020 年汉江生态经济带景观破碎度逐渐增强, 景观生态风险有微增现象; 空间上呈现“上游低风险, 中游中高风险与低风险相伴, 下游高风险”的格局。②1990—2020 年汉江生态经济带生态系统服务价值有微增态势, 增加了 86.6 亿元, 年增长率为 0.06%, 其中调节服务的贡献率高达 66.8%, 支持服务贡献率为 22.2%; 空间上呈现“上游山区为中高值区, 中游中高价值与低价值相伴生, 下游低价值”的格局; ③1990—2020 年二者呈现负相关的波动性变化, 低生态服务价值面临高生态风险, 而高价值存在低生态风险, 2005 年以前显著性有所下降, 2005 年以后显著性有所上升。[结论] 总体来看, 应重视该经济带的生态系统整体性, 加强流域内部的有机协同发展, 上游重视生物多样性保护, 下游加强生态空间用途管制, 综合提高经济带生态系统服务价值。

关键词: 土地利用; 生态系统服务价值; 景观生态风险; 汉江生态经济带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0294-13

中图分类号: X171.1

文献参数: 张静, 秦公伟, 成升魁, 等. 汉江生态经济带景观生态风险与生态系统服务价值的时空变化及关联性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 294-306. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.035; Zhang Jing, Qin Gongwei, Cheng Shengkui, et al. Spatiotemporal changes and correlation between landscape ecological risk and ecological service value in Hanjiang eco-economic belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 294-306.

Spatiotemporal Changes and Correlation Between Landscape Ecological Risk and Ecological Service Value in Hanjiang Eco-economic Belt

Zhang Jing^{1,3}, Qin Gongwei², Cheng Shengkui⁴, Wen Yating³

(1.Southern Shaanxi Center for Green Development and Ecological Compensation

Research, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China;

2.School of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi

723001, China; 3.School of Humanities, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

4.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal changes and correlations between landscape ecology risks and ecosystem service values in the Hanjiang eco-economic belt were studied in order to provide a theoretical basis for regional ecological security and sustainable development of the ecosystem and support for the optimization of landscape pattern and rational allocation of land resources. [Methods] We evaluated the ecological risk and ecosystem service value of landscape in the Hanjiang eco-economic belt based on an ecosystem service value

收稿日期: 2022-11-30

修回日期: 2022-12-27

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“移民安置区乡村重构机理及优化模式的实证研究”(42001207); 陕西省科技厅重点研发项目(2021SF-487); 陕西省教育厅哲社重点研究基地项目(21JZ022); 陕西理工大学重点科研机构开放课题(SLGPT2019KF04-06; SLG-PT2019KF01-32); 陕西理工大学秦巴人地关系地域系统与可持续发展科技创新团队项目

第一作者: 张静(1981—), 女(汉族), 陕西省汉中市人, 博士, 教授, 主要从事资源环境评价与 GIS 研究。Email: zhangjing@snut.edu.cn。

equivalence table. We determined the internal relationship between these parameters, and the spatiotemporal variation law of landscape ecological risk and ecosystem service value. [Results] ① Landscape fragmentation gradually increased, and the landscape ecological risk slightly increased in the Hanjiang eco-economic belt from 1990 to 2020. A spatial pattern of “low risk in the upstream, high risk accompanied with low risk in the midstream, and high risk in the downstream” was observed. ② The ecosystem service value showed a slight increase from 1990 to 2020 of 8.66 billion yuan, with an annual growth rate of 0.06%. Regulation service accounted for 66.8% of the increase and support service accounted for 22.2%. A spatial pattern of “medium-high values in the upstream mountainous area, medium-high and low values in the middle reaches, and low values in the downstream” was observed. ③ Changes in ecosystem service value and ecological risk were negatively correlated. Low ecosystem service value was associated with high ecological risk, while high ecosystem service value was associated with low ecological risk. The significance of the correlations decreased before 2005 and increased after 2005. [Conclusion] Greater attention should be given to the system integrity of the Hanjiang eco-economic belt, and organic coordinated development within the basin should be strengthened. Additionally, greater attention should be given to protecting biodiversity in the upstream region and to strengthening the control of ecological space use in the downstream region so as to comprehensively improve the ecosystem service value of the economic belt.

Keywords: land use; ecosystem service value; landscape ecological risk; Hanjiang eco-economic belt

国土空间是生态文明建设的空间载体,优化国土空间结构和布局是防范化解生态风险,推进生态文明建设的重要组成部分。随着生态文明建设和新型城镇化的推进,土地利用发生较大变化,改变着土地景观格局,并对景观中存在的生态过程产生较大影响,进而影响生态系统服务^[1],从而构成了“景观格局—生态过程—生态系统服务”之间的生态风险传递过程。综合应用生态系统服务价值和生态风险评价可为区域生态环境保护提供更好的决策支持^[2]。景观生态风险是自然因素或人类社会因素干扰下,不同因素交互作用对景观生态环境可能产生的不利影响,景观生态风险评价能够综合反映区域风险的空间分布,是“景观格局—生态过程关联”研究的热点^[1,3]。而生态系统服务作为自然与人类社会沟通的重要纽带,为区域生态安全保障和社会经济发展起着关键作用,它将土地利用/覆被变化与人类福祉紧密相连^[4-7]。生态系统服务价值是生态系统服务的经济价值评估,基于单位面积价值的评估方法主要受到 Costanza 研究的影响,方法简单直观,评估全面且可比性高^[8-9]。在借鉴已有研究的基础上,谢高地等^[10]提出了中国生态系统分类及价值评估方法,为我国生态系统服务价值测算提供了思路和方法。因此,进行景观生态风险与生态系统服务价值之间的关系研究,能更好地揭示区域生态环境与人类福祉之间的相互关系及作用机理,也能更好地反映区域景观格局与生态环境保护之间的利益关系,为服务区域生态安全奠定了理论基础。

国内学者积极开展了景观生态风险与生态系统服务价值二者之间关系的研究。贾艳艳等^[11]研究发

现长江流域安徽段高生态系统服务价值存在高生态风险;靳甜甜等^[12]以子午岭区为例,研究了黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险之间存在显著的负相关性且具有负向空间关联性;李辉等^[13]研究发现三峡库区生态系统服务价值和生态风险指数变化具有非同步性,高生态风险指数所对应的生态系统服务价值具有降低的可能性,曹祺文等^[14]通过文献梳理发现基于生态系统服务的景观生态风险评价为景观生态风险研究提供了更为完善、综合的评价方法,强调景观生态风险评价为景观格局—生态过程互馈研究提供了新视角。相关研究成果表明景观生态风险与生态系统服务价值之间存在一定的相互关系,生态系统服务价值变化势必引起景观生态风险变化,而这种变化也必然存在空间差异和尺度效应。开展区域景观生态风险与生态系统服务价值之间关系的研究,是科学判定区域生态环境质量及分析区域生态风险与人类福祉协调程度的内在要求。因此,基于不同空间尺度,探明景观生态风险与生态系统服务价值之间的内在关系,有助于揭示景观格局变化对人类福祉影响的空间尺度效应,为区域景观格局优化和生态安全提供了理论基础。汉江流域作为长江流域的重要组成部分及南水北调中线工程水源地,区域生态环境质量极为重要,而生态系统服务价值测算不仅关系到区域多元化生态补偿体系的建立,也关系到区域经济发展与生态保护的协同推进。本研究在近 30 a 汉江生态经济带景观格局变化的基础上,分析区域景观生态风险,测算了区域生态系统服务价值,并进行二者之间的相关性分析,以揭示汉江经济带景观生态风

险与生态系统服务价值时空变化规律,并探明二者之间的相关性,为区域生态安全及生态系统的可持续发展提供理论依据,也为经济带景观格局优化和土地资源合理配置提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉江生态经济带地跨陕、豫、鄂三个省份,地理位置介于 $30^{\circ}54'—34^{\circ}38'N$, $105^{\circ}13'—114^{\circ}51'E$ 之间,总面积达 $1.92 \times 10^5 \text{ km}^2$,截至2020年底统计常住人口4 024.72万人,生产总值达2.42万亿元,范围包括陕西省汉中市、商洛市、安康市,湖北省十堰市、神农架林区、襄阳市、荆门市、天门市、潜江市、仙桃市和河南省南阳市等全境以及毗邻的其他县区,其中上游以十堰市为界,中下游以钟祥市为界。汉江生态经济带不仅作为我国植物区系的重要过渡带和交汇带,拥有着我国原始森林植被资源最丰富的神农架林区,对于全国气候调节和生态系统服务价值发挥着极为重要的作用,且是南水北调中线工程水源地,是中华民族文化的重要发祥地,生态地位重要,区位优势独特^[15]。汉江生态经济带空间差异大,上游地处秦岭和巴山之间,以山地地貌为主;中游以丘陵和盆地为主,下游为平原,流域内上游水土流失问题和下游干流水质问题较为突出^[16-17]。21世纪以来,汉江流域植被覆盖情况逐渐变好,植被净初级生产力和水质净化能力有所改善,但受地形及水热条件影响,水源涵养能力和生态恢复力空间异质性强^[18-20],目前汉江经济带尚未形成协同发展格局。

1.2 数据来源

本文土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为1 000 m;DEM数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为90 m;汉江生态经济带的行政界线、城市驻地等的基础地理数据来源于国家基础地理信息中心1:400万数据库(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>);汉江经济带范围是根据2018年11月国家发展改革委印发的《汉江生态经济带发展规划》。栅格数据统一采用Albers等积投影,参考椭球体为Krasovsky,空间分辨率1 000 m。此外,文中涉及到的人口、经济数据主要来自于《河南统计年鉴(2021年)》《陕西省统计年鉴(2021年)》和《湖北省统计年鉴(2021年)》等。文中参考谢高地等^[21]学者的生态系统服务价值的地类分类体系和《土地利用现状分类(GB/T21010-2017)》,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利

用地6个一级类。根据研究区面积、计算效率和数据有效性等,对汉江经济带采用 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的网格化采样,共形成7 965个评价网格。基于此,进行景观生态风险指数和生态系统服务价值的核算,并将值赋予标识中心点,采用反距离加权插值方法,分析二者空间格局的变化特征。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值测算

(1) 当量因子法。结合社会经济发展状况,对汉江生态经济带单位面积粮食产量创造的经济价值进行修正(修正方法:一个标准生态系统服务经济价值等效系数是单位面积农田的食物生产经济价值的1/7,简称“1/7公式”)。

$$E_a = (1/7) \times \sum_{i=1}^n (m_i p_i q_i / M) \quad (1)$$

式中: E_a 为单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值(元/ hm^2); i 为农作物种类; p_i 为*i*种农作物某年的全国平均价格(元/t); q_i 为*i*种农作物单位面积产量(t/ hm^2); m_i 为*i*种农作物种植面积(hm^2); M 为所有农作物的种植面积(hm^2)。根据汉江生态经济带各市统计年鉴(2021年),计算出汉江生态经济带2020年平均粮食产量为 $5\ 205.23 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。根据《中国农产品价格调查年鉴(2021)》全国粮食平均收购价格为2.7元/kg,因此, $E_a = 5\ 205.23 \times 2.7/7 = 2\ 007.73 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 。

以谢高地修改后的中国生态系统单位面积生态服务当量表为基础^[22],根据“单位面积生态系统服务价值系数=当量 $\times E_a$ ”,从而计算出汉江生态经济带不同陆地生态系统单位面积生态服务价值系数(表1)。借鉴已有研究^[8,23],生态系统的农田、森林、草地和荒漠分别与用地类型的耕地、林地、草地和裸地相对应。其中,将生态系统中的湿地和水系独立计算,湿地为用地类型中的湖泊、水库坑塘、滩涂和滩地。因建设用地的生态服务价值尚未作出确切的评价结果,故文中对其不进行核算。

(2) 生态系统服务价值核算。借鉴Costanza和谢高地等关于生态系统服务价值评估模型^[24-25],测算汉江生态经济带不同时期土地景观的生态系统服务价值及总价值。具体计算公式为:

$$ESV = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m VC_{ij} \cdot A_j \quad (2)$$

式中:ESV(ecosystem service values)为研究区生态系统服务总价值(元); i 为生态系统服务类型; j 为土地景观类型; A_j 为第*j*种景观类型的面积(hm^2); VC_{ij} 为第*j*种土地景观的第*i*种生态系统服务类型的价值系数。

表1 汉江生态经济带单位面积生态服务价值当量表

Table 1 Equivalent table ecosystem service values per hectare in Hanjiang eco-economic belt

元/hm²

生态系统服务	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
旱地	1 706.6	803.1	40.2	1 345.2	722.8	200.8	542.1	2 068.0	240.9	261.0	120.5
水田	2 730.5	180.7	5 280.3	2 228.6	1 144.4	341.3	5 461.0	20.1	381.5	421.6	180.7
林地	507.0	1 164.5	602.3	3 829.8	11 459.1	3 357.9	7 498.9	4 663.0	356.4	4 246.4	1 862.2
草地	468.5	689.3	381.5	2 422.7	6 404.7	2 114.8	4 691.4	2 951.4	227.5	2 683.7	1 184.6
湿地	1 023.9	1 003.9	5 200.0	3 814.7	7 227.8	7 227.8	48 647.4	4 637.9	361.4	15 800.9	9 496.6
水系	1 606.2	461.8	16 644.1	1 546.0	4 597.7	11 142.9	205 270.6	1 867.2	140.5	5 119.7	3 794.6
裸地	0.0	0.0	0.0	40.2	0.0	200.8	60.2	40.2	0.0	40.2	20.1

注:农田(耕地)生态系统包括旱地和水田;水域包括水系和湿地。

1.3.2 景观生态风险评价

(1) 景观生态风险。景观生态风险指数计算公式为:

$$ERI = \sum_i \frac{S_{ki}}{S_k} \sqrt{E_i \cdot F_i} \quad (3)$$

式中:ERI(index of ecological risk)为景观生态风险指数; N 为景观类型数量; S_{ki} 为第 k 个风险小区第 i 类景观的面积; S_k 为第 k 个风险小区总面积; i 为评价网格景观类型,分别是耕地、林地、草地、水域、建设用地和裸地 6 种类型^[25]。

(2) 景观格局指数。

① 景观破碎度指数(C_i):反映景观破碎化程度,值越大,景观破碎化程度越高,人类对景观的干扰越强。计算公式为:

$$C_i = n_i / A_i \quad (4)$$

式中: n_i 为景观类型 i 的斑块数; A_i 为景观类型 i 的总面积。

② 景观优势度指数(DO_i):反映斑块在景观中的重要地位,值越大,斑块对景观格局形成及变化的影响越大,对应的生态风险越高。计算公式为:

$$DO_i = (Q_i + M_i) / 4 + L_i / 2 \quad (5)$$

式中: Q_i = 斑块 i 出现的网格数/总网格数; M_i = 斑块 i 数目/斑块总数; L_i = 斑块 i 的面积/样方总面积;

③ 景观分离度指数(S_i):反映斑块分布的分离程度,值越大,景观分布越复杂,景观生态稳定性越低,生态风险越高。计算公式为:

$$S_i = D_i \cdot A / A_i \quad (6)$$

式中: D_i 为景观类型 i 的距离指数, $D_i = \sqrt{n_i} / (2\sqrt{A})$ 。

④ 景观干扰度指数(E_i):反映不同景观所代表的生态系统受到干扰的程度,主要是人类活动。计算公式为:

$$E_i = aC_i + bS_i + cDO_i \quad (7)$$

式中: a, b, c 为相应各景观指数权重, $a + b + c = 1$, 分别为 0.5, 0.3, 0.2。

⑤ 景观脆弱度指数(F_i):反映不同景观类型对外界干扰的敏感性,值越大,生态风险越高。该指标由专家打分后,归一化获取。参考已有研究,景观脆弱度指数赋值分别为裸地 6, 水域 5, 耕地 4, 草地 3, 林地 2, 建设用地 1, 归一化后各脆弱度指数 F_i 分别为 0.285 7, 0.238 1, 0.190 5, 0.142 9, 0.095 2, 0.047 6。

1.3.3 空间自相关模型 空间自相关分析是研究邻近位置上某一属性在空间上的相关性^[26]。包括全局自相关和局部自相关。

(1) 双变量全局自相关。全局空间自相关是用来描述整个研究区内地域单元与相邻单元的总集聚力特征^[27],通常采用全局 Moran's I 指数分析总体空间关联程度,计算模型为:

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中: n 为评价网格单元总数; m 为评价单元 i 的邻近单元个数; w_{ij} 为空间权重矩阵 w 中的元素,当空间单元 i 与 j 相邻时, $w_{ij} = 1$, 反之 $w_{ij} = 0$; Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, Moran's $I > 0$ 表示空间正相关,值越大,正相关空间集聚性越强; Moran's $I = 0$ 表示空间不相关,呈随机分布;反之, Moran's $I < 0$ 呈负相关,值越小,负空间集聚性越强^[28]。

(2) 双变量局部自相关。由于局部空间自相关指标(LISA)能够进一步度量研究区域在空间上的关联程度。所以,生态系统服务价值局部空间自相关适用于反映研究区域中,一个局部空间小区域上的生态系统服务价值与相邻局部空间单元上生态系统服务价值的相关性程度^[29]。空间关联区域分为以下 5 个

象限:高一高型聚集表示高生态服务价值和高风险生态风险集聚并存;低—低型聚集表示低生态服务价值和低生态风险集聚并存;低—高型聚集表示低生态服务价值与高风险生态风险集聚并存;高一低聚集表示高生态服务价值与低生态风险集聚并存^[30];非显著聚集表示空间分布不具有集聚性。

2 结果与分析

2.1 汉江生态经济带景观生态风险的时空变化

2.1.1 景观格局的基本特征 1990—2020 年汉江生态经济带斑块数量、斑块密度、景观分割度指数、分离度指数、香农多样性指数和香农均匀度指数均为逐年增加,而平均斑块面积、斑块形状指数和蔓延度指数逐年减小(表 2)。表明近 30 a 来汉江生态经济带土地景观呈破碎化现象。2005 年以后,景观破碎化程度呈快速增加趋势。对比 2000 年和 2005 年斑块数和

斑块密度,可以看出后者是前者的二倍,从而呈现景观多样性的明显增加。同时,由于汉江生态经济带生态风险表现较为明显的增加趋势,尤其是 2000—2005 年生态风险增加速度较快,2015 年以后生态风险略有降低。

因此,1990—2020 年汉江生态经济带景观格局呈现较大变化,20 世纪末表现为先降后增的态势,21 世纪以来呈现持续上升的现象,直到 2020 年。汉江生态经济带土地利用格局的变化在一定程度上仍受制于国家土地政策的影响,20 世纪 90 年代初到 90 年代末全国土地所有权和使用权相分离,土地市场交易明显增加;21 世纪初到 2012 建立了用途管制为核心的土地管理制度,但城镇化率的明显增加,城市土地扩张极为明显;党的十八大以来,土地政策深化改革,优化国土空间,激发全社会基于土地的生产创造力和市场活力^[31]。

表 2 景观生态格局的基本特征值及风险指数

Table 2 Basic values and risk index of landscape ecological pattern

指标	斑块数/ 个	斑块密度/ (个·hm ⁻²)	平均斑块 面积/km ²	形状指数	蔓延度 指数	景观分割 度指数	分离度 指数	香农多样 性指标	香农均匀 度指标	生态风险
1990	7 047	3.68	2 715.5	1.25	47.7	0.885 5	8.7	1.16	0.647	0.147 1
1995	6 879	3.59	2 781.8	1.25	47.9	0.887 2	8.9	1.16	0.647 6	0.146 6
2000	7 162	3.74	2 671.9	1.25	47.4	0.886 9	8.8	1.16	0.650 1	0.147 4
2005	14 819	7.74	1 291.3	1.21	37.7	0.892 6	9.3	1.25	0.696 1	0.166 7
2010	14 871	7.77	1 286.8	1.21	37.5	0.893 1	9.4	1.25	0.697 8	0.166 7
2015	15 160	7.92	1 262.3	1.21	36.8	0.894 7	9.5	1.26	0.704 7	0.166 8
2020	15 236	7.96	1 256.0	1.21	36.6	0.911 4	11.3	1.27	0.706 9	0.166 4

2.1.2 景观生态风险的空间变化 根据评价网格,文中计算了 1990—2020 年汉江生态经济带景观生态风险多年状况,均呈“上游低风险,中游中高风险与低风险相伴,下游高风险”的格局,如图 1 所示。按照等数量分级法,以多年平均景观生态风险值为参照,将其分为 5 级:低风险(<0.128 047 522)、中低风险[0.128 047 522, 0.144 019 258)、中等风险[0.144 019 258, 0.159 990 993)、中高风险[0.159 990 993, 0.187 94 153)、高风险(\geq 0.187 94 153)。由图 1 可知,1990—2000 年之间,高风险主要分布在下游中下游汉江沿江地带、武汉境内及汉川市。低风险集中在神农架地带、伏牛山一带以及陕南三市的山区。2005 年以后,高风险明显扩张,涉及整个下游地区和南阳盆地区,陕南三市出现巴山局部中高风险,低风险面积明显缩小,主要集中在神农架核心区和伏牛山片区。可能在于陕南移民搬迁,景观的破碎度明显增加,部分宅基地没有修复。

图 2 为不同等级风险的面积变化情况。由图 2 可知,1990—2020 年汉江生态经济带低风险面积显著减少,高风险面积显著增加。其中,1995—2015 年,低风险区面积呈非匀速减少,在 2000—2005 年显著减少 20.19%;高风险区面积呈突变式增加,在 2000—2005 年显著增加 20.23%;中低风险呈微波动性减少,中高风险为波动性微增,中等风险在 1995—2005 年表现为微增现象。总体来看,在 1995 年以来,景观生态风险等级变化较大,尤其是在 2000—2005 年之间高风险区显著增加,且高风险区增加快于低风险区的减少;2015 年以后高风险区减少,低风险区增加。主要在于 20 世纪 90 年代末到 2013 年是我国快速城市化时期,尤其是 2000—2005 年地毯式的城市扩张;2014 年我国提出新型城镇化战略,注重政治建设、经济建设、社会建设、文化建设和生态文明建设的协同发展,转向高质量发展阶段,加强生态保护与修复工程的实施。

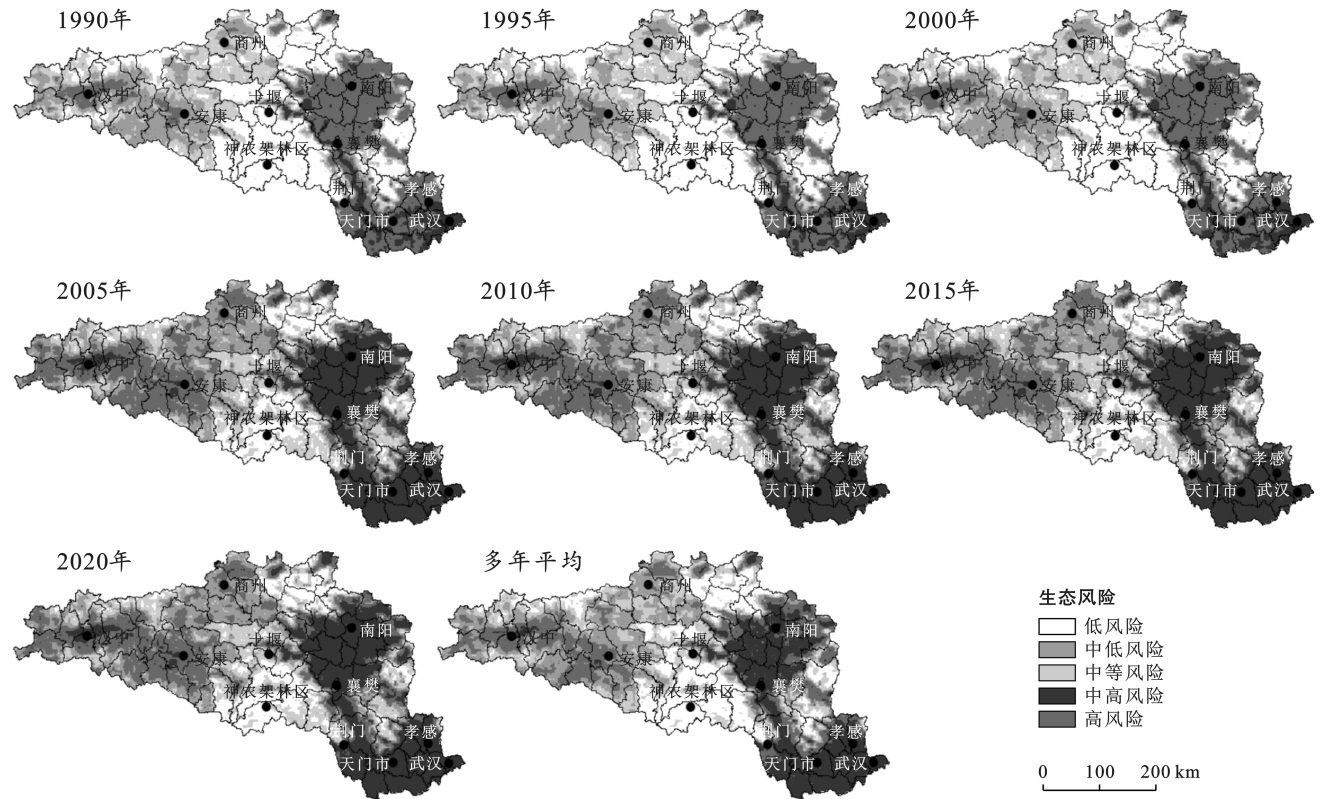


图 1 汉江生态经济带 1990—2020 年景观生态风险的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of landscape ecological risk in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

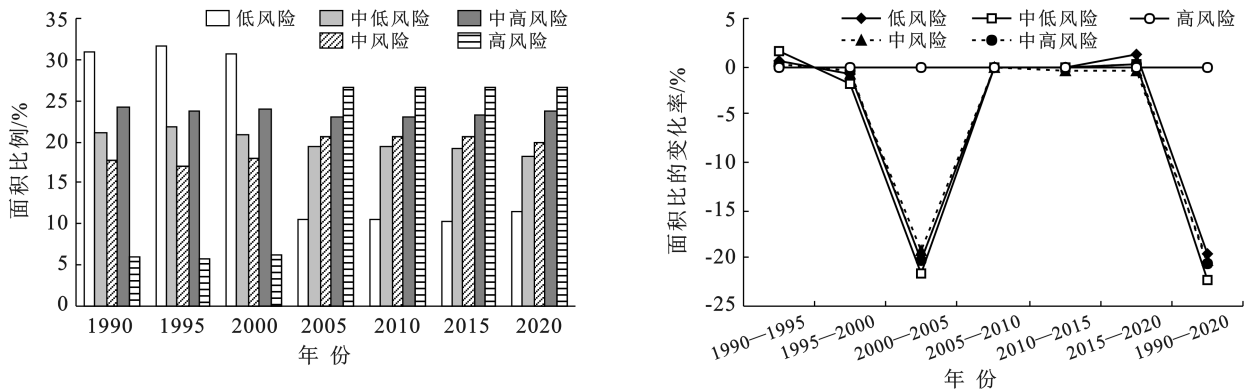


图 2 汉江生态经济带 1990—2020 年不同等级生态风险的面积比例和变化

Fig.2 Area proportion and change rate of ecological risk at different levels in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

2.2 汉江生态经济带生态系统服务价值的时空变化

2.2.1 生态系统服务价值的时间变化 由图 3—4 可以看出,1990—2020 年汉江生态经济带生态系统服务价值呈阶段性微增态势,从 5 173.7 亿元增加到 5 260.3 亿元,增加了 86.6 亿元,年增长率为 0.06%。1990—1995 年呈微增现象,主要表现为林地和水域的增加,草地的减少;1995—2000 表现下降趋势,主要在于林地和水域生态系统服务价值的明显下降,尤其是水域;2000—2020 年表现为上升趋势,林地和草地生态系统服务价值有降低,但水域生态系统服务价

值增加,尤其是湿地在 2000 年以后稳步增加。从不同土地利用类型来看,林地提供的生态系统服务价值最高约 3 200 亿元,所占比例约 60%左右,表明其重要的生态系统服务功能,但近年来有下降趋势;耕地生态系统服务价值在 545 亿元,所占比例约 10.5%,呈现先增后降态势,2010 年以来有下降现象;草地的生态系统服务价值约 860 亿元,所占比例约 16.6%左右,2000 年以来有减少趋势,年递减率 0.37%;水域生态系统服务价值波动性增加趋势,增加了 334.0 亿元,年增长率 2.14%,但在 1995—2000 年之间呈下降

态势,其中,湿地生态系统服务价值近 400 亿元,其生态系统服务价值逐年增加,增加了 165.3 亿元,年增长率 1.93%。林地和草地生态系统服务价值减少而水域生态服务价值的增加与我国生态保护政策息息相关,20 世纪 90 年代初,我国将环境保护纳入到国民经济与社会发展建设中^[32],汉江生态经济带上游多山地,耕地后备资源不足,同时该区域地质结构复杂,降水集中且雨量大,同加之经济发展水平低下,人

们环境保护意识较为淡薄,极易造成水土流失问题;下游为重点城镇化地区,人口、社会经济压力大,加剧耕地和林地萎缩。近年来水域生态系统服务增加明显,主要在于南水北调中线工程的建设,上游为南水北调中线工程水源地,国家高度重视汉江水资源和环境的保护与利用。中下游水体较为发达,雨热同期,光照充足,有利于植物的生长。因此,1990—2020 年汉江生态经济带生态系统服务价值稳中有升的现象。

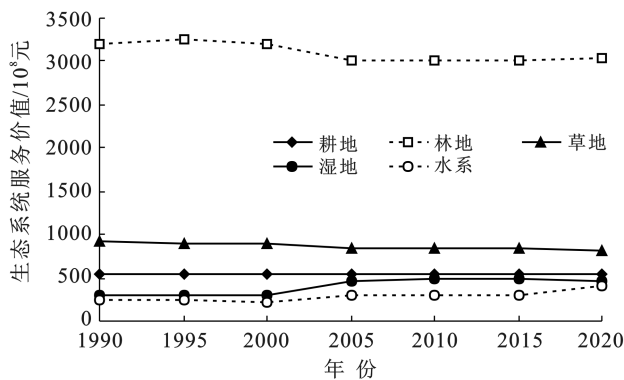


图 3 汉江生态经济带 1990—2020 年不同地类生态系统服务价值及其比例

Fig.3 Ecosystem services value and its ratio of land types in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

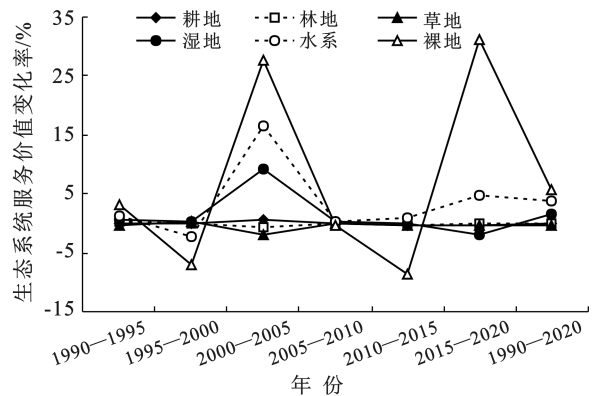
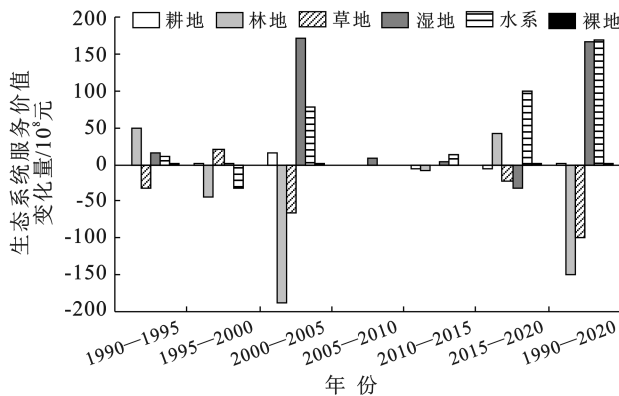
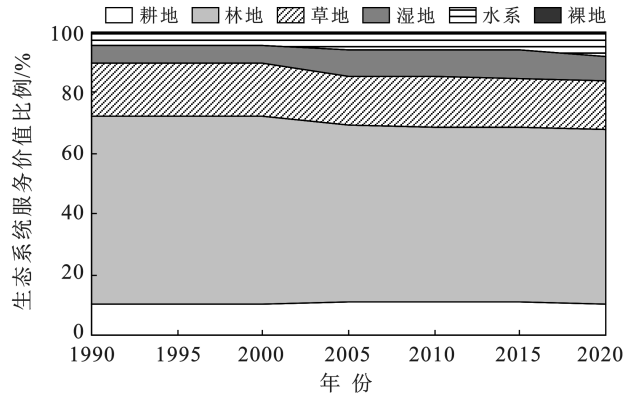


图 4 汉江生态经济带 1990—2020 年不同地类生态系统服务价值变化量及其变化率

Fig.4 Changes in ecosystem service values of different land types and their change rates in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

由图 5 可知,汉江生态经济带主要服务功能为调节服务和支撑服务,其中调节服务的贡献率高达 66.8%,支撑服务贡献率为 22.2%。1990—2020 年汉江生态经济带供给服务和调节服务略有增加,而支撑服务略有降低,文化服务呈波动性变化。其中 1995—2000 年调节服务和支撑服务均有不同程度的降低,2000 年以来供给服务和调节服务均呈现不同程度的增加,而支撑服务呈波动性降低,文化服务呈波动性微增。

从单项服务价值来看(表 3),汉江经济带气候调节和水文调节的贡献率最高,分别约为 23.50% 和

25.69%;其次是气体调节、净化环境、土壤保持和生物多样性,分别约为 9.97%,7.63%,11.17% 和 9.95%;食物生产、原料生产、维持养分循环和美学景观贡献率低。1990—2020 年水资源供给服务有下降的倾向,食物生产、原料生产、气体调节、气候调节和土壤保持均有微降态势。2000 年以来水文调节功能显著增强。表明汉江经济带生态系统服务功能中调节服务尤为重要,特别是水文调节和气候调节功能。近年来调节服务中水文调节和生物多样性逐渐增强,支撑服务正面临逐步改善的状态,因此,汉江生态经济带要注重水土保持,维持区域养分循环。

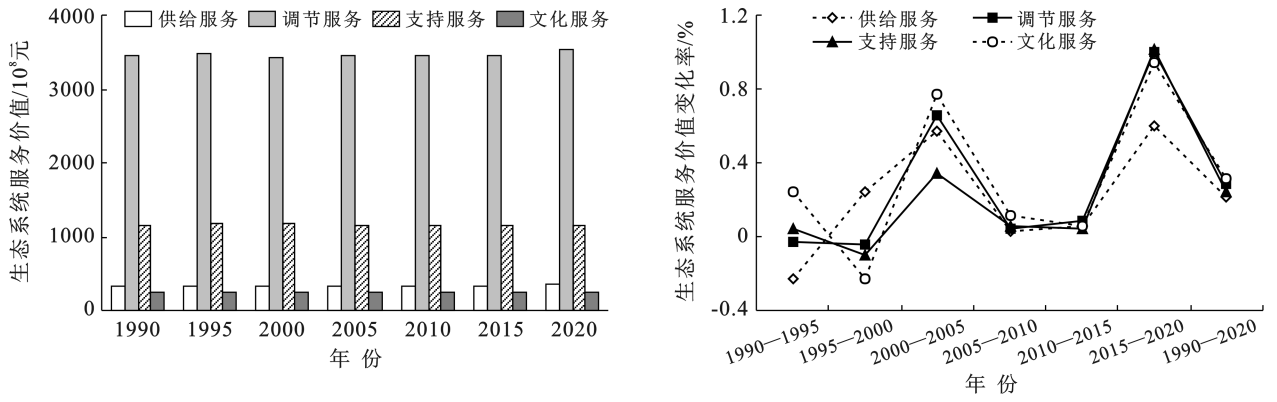


图 5 汉江生态经济带 1990—2020 年 4 大生态系统服务价值及其变化率

Fig.5 Values of four ecosystems service functions and its changes in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

表 3 汉江生态经济带 1990—2020 年单项服务功能的价值及变化

Table 3 Values of various service functions and its changes in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

生态系统服务	生态系统服务价值/亿元							变化率/%						
	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	1990—1995年	1995—2000年	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年	1990—2020年
食物生产	205.6	206.6	205.3	206.5	206.1	204.5	202.4	0.10	-0.13	0.12	-0.04	-0.15	-0.21	-0.05
原料生产	161.7	161.4	161.8	157.9	157.8	157.3	157.9	-0.03	0.04	-0.48	-0.01	-0.07	0.08	-0.08
水资源供给	-43.2	-47.7	-42.8	-30.8	-29.9	-26.9	-15.4	2.11	-2.08	-5.58	-0.58	-2.01	-8.55	-2.14
气体调节	527.4	530.2	527.0	511.1	510.9	509.0	508.2	0.11	-0.12	-0.60	-0.01	-0.07	-0.03	-0.12
气候调节	1 252.4	1 259.5	1 251.5	1 194.2	1 194.2	1 191.5	1 196.4	0.11	-0.13	-0.92	0.00	-0.04	0.08	-0.15
净化环境	398.8	401.7	398.4	392.3	392.7	392.7	396.0	0.15	-0.17	-0.30	0.02	0.00	0.17	-0.02
水文调节	1 273.1	1 296.5	1 260.1	1 354.6	1 357.4	1 366.6	1 428.5	0.37	-0.56	1.50	0.04	0.14	0.91	0.41
土壤保持	590.0	589.7	590.2	572.8	572.8	571.4	573.8	-0.01	0.02	-0.59	0.00	-0.05	0.09	-0.09
维持养分循环	58.6	58.9	58.5	57.2	57.2	56.9	56.7	0.10	-0.12	-0.44	-0.02	-0.10	-0.08	-0.11
生物多样性	514.6	518.9	515.8	516.3	517.3	517.0	515.6	0.17	-0.12	0.02	0.04	-0.01	-0.05	0.01
美学景观	234.6	236.9	235.4	240.3	240.9	240.9	240.1	0.19	-0.13	0.42	0.05	0.00	-0.07	0.08

2.2.2 评价网格生态系统服务价值的空间变化

1990—2020 年汉江生态经济带生态系统服务价值空间分布呈现“上游山区为中高价值区,中游中高价值与低价值相伴生,下游低价值”的格局(图 6)。本文结合汉江生态经济带的实际情况,基于 1990—2020 年多年平均生态系统服务价值,按照等数量分级法,将其分为 5 级:1 级 < 419 471.15 元(低价值区),2 级 [419 471.15, 597 859.50)(中低价值区),3 级 [597 859.50, 740 570.18)(中等价值区),4 级 [740 570.18, 901 119.69)(中高价值区),5 级 > 901 119.69 元(高价值区)。低价值区主要集中在汉中河谷盆地、月河谷地、南阳盆地和下游平原区;高价值区主要分布在神农架地区、伏牛山片区;中高价值区主要集中在秦岭中高山区。近年来神农架区的高价值逐渐减少,秦岭、伏牛山区和巴山区的中高价值面积逐渐增加,沿

江低价值逐渐减少。总体来看,汉江生态经济带生态服务价值空间差异大,受景观破碎度的影响,生态服务价值斑块化现象明显。

图 7 为汉江生态经济带不同等级生态服务价值的面积变化情况。由图 7 可知,1990—2020 年汉江生态经济带单元生态系统服务价值由 68.57 万元,减少到 67.06 万元,年均变化率为 0.07%,以高价值和低价值为主,向以中低、中等和中高价值为主转变,呈现较为明显的变化。低价值区和高价值区分别减少了 4.43%和 7.14%,中低价值、中等价值区和高等价值区分别增加了 4.39%,3.04%和 4.14%。其中在 2000—2005 年变化明显。2015 年以来,高价值和中高价值微增,中等价值以下略有减少。总体表现为近年来汉江经济带生态服务价值整体不断提高,局部有降低的倾向。

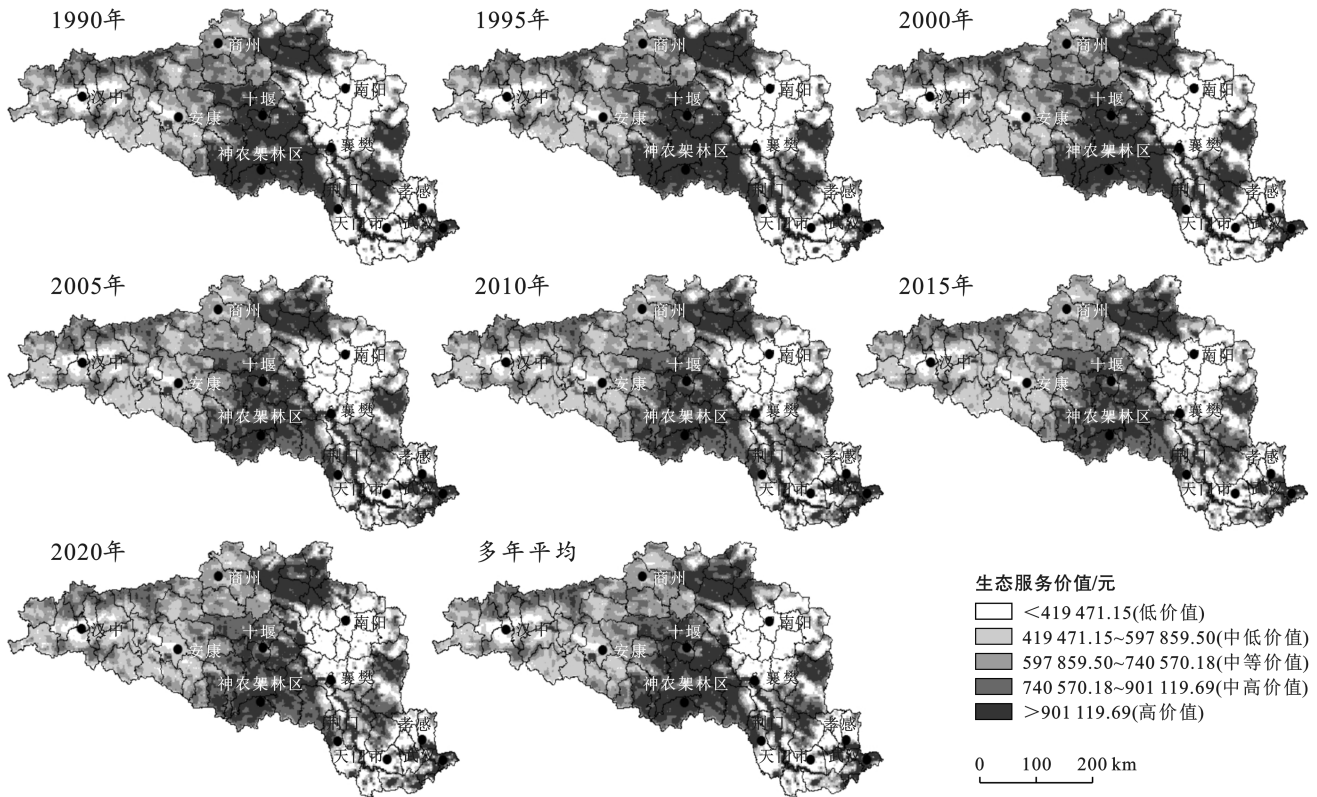


图 6 汉江生态经济带 1990—2020 年生态系统服务价值的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecosystem service value in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

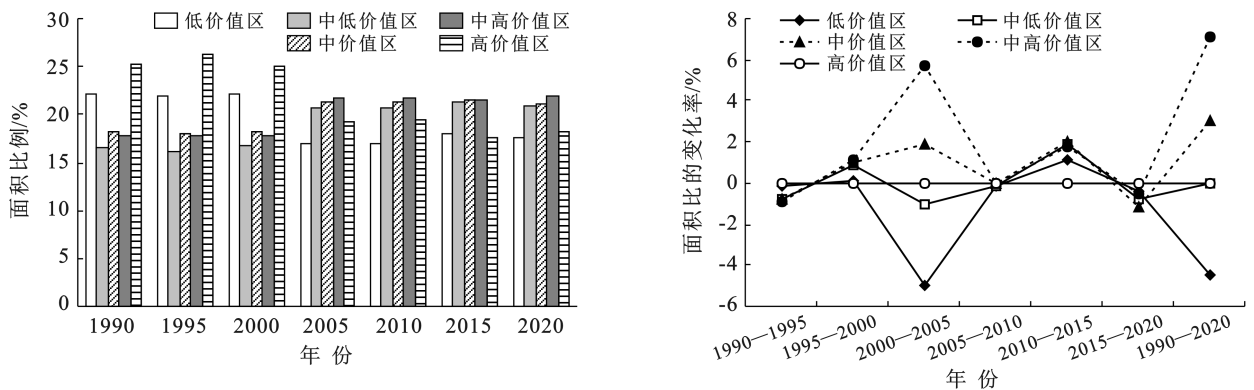


图 7 汉江生态经济带 1990—2020 年不同等级生态服务价值的面积比例和变化

Fig.7 Area proportion and change rate of ESV at different levels in Hanjiang eco-economic belt during 1990—2020

2.3 汉江生态经济带生态系统服务价值与景观生态风险关联性分析

2.3.1 双变量全局空间自相关性分析 对汉江生态经济带生态服务价值和景观生态风险进行了双变量全局空间自相关分析,发现研究区二者莫兰指数呈负相关性,且相关性具有波动性增加趋势(图 8)。1990—2005 年,生态服务价值与生态风险莫兰指数呈波动性下降,相关性逐渐减弱;2010 年以后莫兰指数显著上升,相关性逐渐增强。2000, 2015 和 2020 年莫兰指数均高于多年平均值,分别为 $-0.156\ 6$,

$-0.212\ 3$ 和 $-0.199\ 4$ 。表明研究区高生态服务价值往往处于低风险状态,而低生态服务价值面临高风险处境。表明经济带景观生态风险与生态系统服务价值之间存在负相关,即高风险区生态服务价值低,低风险区生态服务价值高,且这种空间集聚性有增强的态势。此外,1990—2005 年生态服务价值与景观生态风险的关联性强度不高,2005 年以后二者之间关联性强度增大,表明快速发展下景观生态风险与生态系统服务价值呈负相关,这种负相关的集聚性在逐年增强。

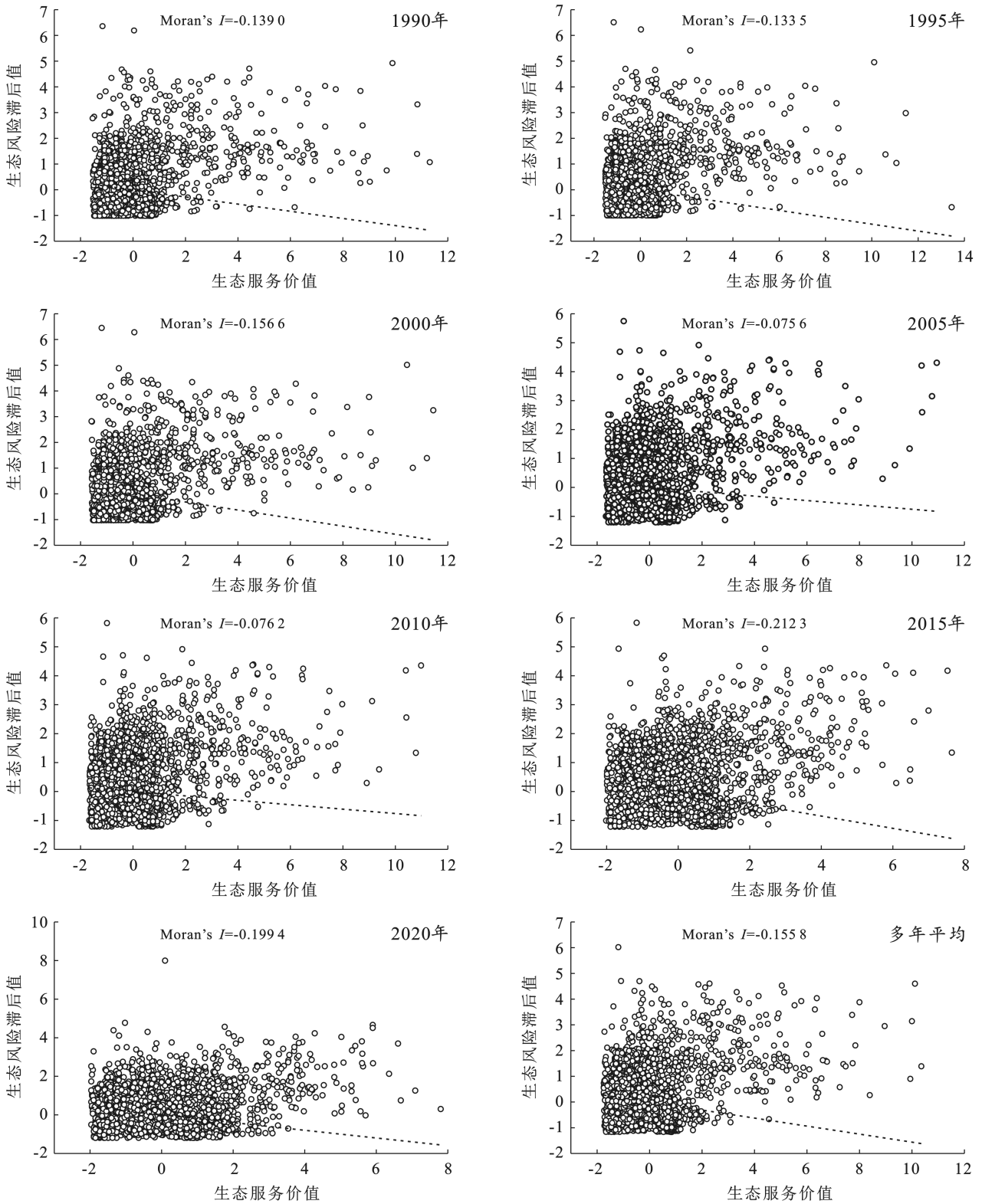


图 8 汉江生态经济带生态服务价值与生态风险的 Moran 散点图

Fig.8 Moran's I scatter map of ecosystem service value and ecological risk in Hanjiang eco-economic belt

2.3.2 双变量局部空间自相关性分析 图 9 为汉江生态经济带生态服务价值与生态风险之间的局部空间自相关性分析结果。由图 9 可知,在 0.05 的显著性水平下约有 38.21% 的评价网格呈现显著性相关,

显著性区域主要集中在秦岭山脉、伏牛山、神农架区、南阳盆地区和汉江下游区。1990—2020 年在 0.05 的水平上显著性集聚面积所占比例分别为 38.0%, 38.59%, 38.53%, 38.44%, 38.53%, 38.08% 和 37.3%。

其中,高一高型由 1990 年的 3.89% 增加到 2005 年的 5.08%,再降到 2020 年的 4.81%,主要分布在汉江中下游主河道周围,该区域主要为城镇建设区,景观较为破碎;低一低型由 1990 年的 1.43% 增加到 2005 年的 1.62%,再减少到 2020 年 1.58%,主要分布在经济带边缘处南阳盆地区下游平原区;低一高型由 1990 年的 9.5% 增加到 2010 年 10.41%,再减少到 2020 年的 9.6%,主要集中在中下游区,耕地多生态系统服务价值贡献少;高一低型由 1990 年的 23.18% 增加到 2000 年的 23.28%,再减少 2020 年的 21.31%,分布面积最广,主要集中在神农架区、伏牛山区和秦岭山区,该区域森林覆盖率高。

通过显著性检验,二者在 0.01 的显著性水平上呈现负相关,Pearson 相关系数 $R = -0.057$ 。总体来

看,汉江生态经济带为高生态服务价值低生态风险,尤其是神农架区、伏牛山区和秦岭山区最为典型,生态环境质量较好。上游山地区森林资源丰富,林地的生态系统服务价值贡献高,表现明显的低生态风险高生态系统服务价值;中下游平原区耕地面积大,生态系统服务价值贡献低,为明显的低价值高风险区,二者存在一定的互馈关系,生态风险越低,生态系统服务价值越高;反之生态风险越低,生态系统服务价值越高。此外,经济带高价值低风险的空间集聚效应有所上升。未来需统筹协调经济带生态风险与生态系统服务价值之间的发展关系,应加强上游生态修复,保护生物多样性,提高生态系统服务价值;同时重视汉江主河道附近及下游平原区的生态保护与修复,以降低生态风险。

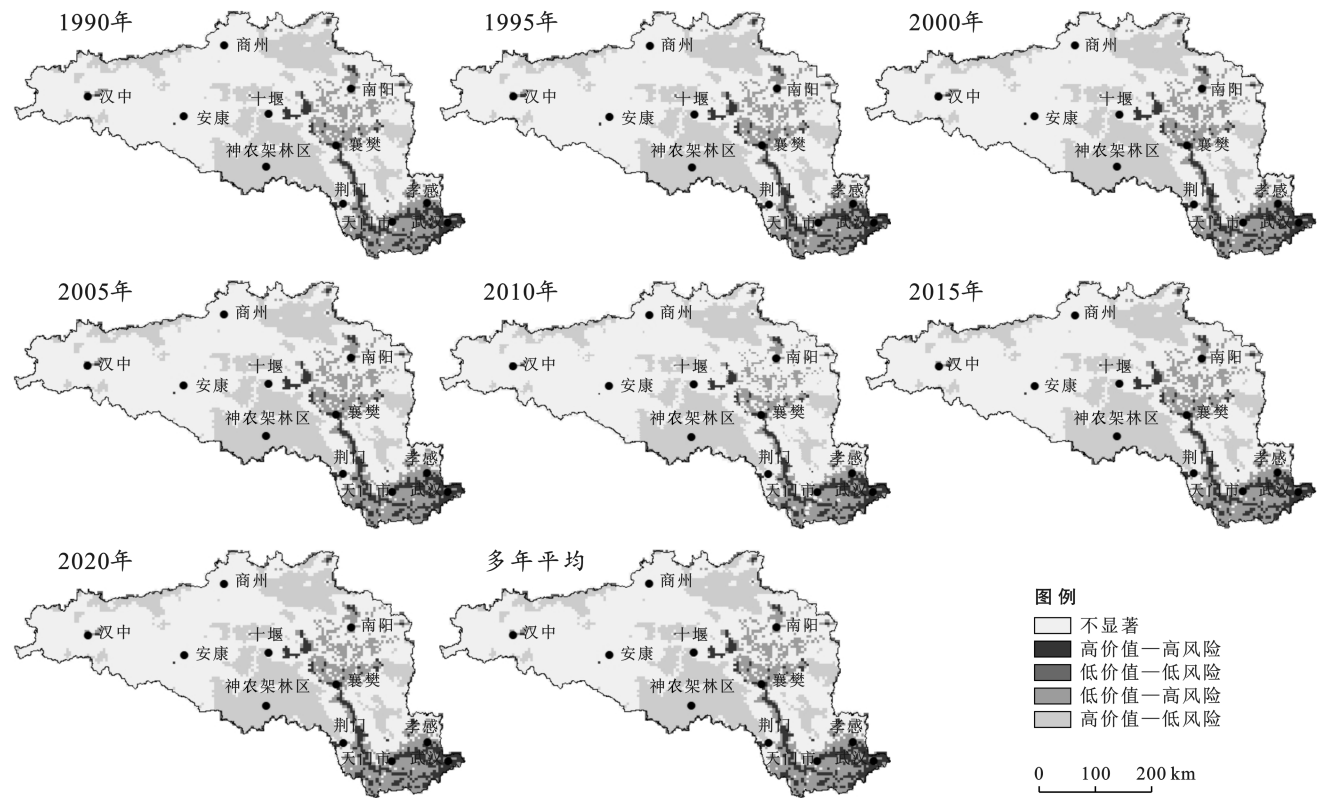


图 9 汉江生态经济带生态服务价值与生态风险的 LISA 聚类图

Fig.9 LISA cluster map of ecosystem service value and ecological risk in Hanjiang eco-economic belt

3 讨论与结论

3.1 结论

(1) 1990—2020 年汉江生态经济带景观斑块数量、斑块密度逐年增加,斑块形状指数逐年减小,表明景观破碎度逐渐增强,景观生态风险有微增现象,尤其是 2000 年以后。空间上,景观生态风险呈现“上游低风险,中游中高风险与低风险相伴,下游高风险”的

格局,高风险主要集中在中游的南阳盆地区和下游的邻近武汉城市圈范围内。

(2) 1990—2020 年汉江生态经济带生态系统服务价值呈阶段性微增态势,从 5 173.7 亿元增加到 5 260.3 亿元,增加了 86.6 亿元,年增长率为 0.06%;生态服务功能以调节服务和支撑服务为主,其中调节服务的贡献率高达 66.8%,支撑服务贡献率为 22.2%。空间上,生态服务价值呈现“上游山区为中

高值区,中游中高价值与低价值相伴生,下游低价值”的格局,低价值区主要集中在汉中河谷盆地区、月河谷地、南阳盆地和中下游沿汉江主河道的平原区;高价值区主要分布在神农架地区、伏牛山片区。

(3) 1990—2020年汉江生态经济带生态服务价值与景观生态风险在0.05的水平上呈现负相关的波动性变化,1990—2005年显著性有所下降,2005—2020年显著性有所上升。主要体现在高价值—低风险的集聚分布在神农架和伏牛山片区,低价值—高风险的集聚分布在南阳盆地和汉江下游汉江平原区。表明汉江生态经济带低生态服务价值往往面临高生态风险,而高价值存在低生态风险,未来应注重汉江中下游生态空间管控,加强沿江区域的生态保护和南阳盆地区土地整治与整理,提高生态系统服务价值;同时应重视汉江上游地区的生态保护,通过生态修复工程、山区植被恢复等,提高秦岭和巴山生态服务价值。

3.2 讨论

汉江作为长江重要支流,汉江生态经济带空间范围大,功能分区明显,上游生态地位重要,为南水北调中线工程水源地,中游盆地面积大,为粮食主产区,下游紧邻武汉,地处长江中游湖北武汉城市群。本文通过空间自相关性,揭示了景观生态风险和生态系统服务价值之间的关系,二者存在负相关,生态风险低,则生态系统服务价值高;生态风险高,生态系统服务价值低,通过景观格局优化可权衡协调二者关系,为区域景观生态安全奠定了良好的基础。高生态风险区受人类活动干扰多,经济活动比较频繁,其生态价值有所降低,低生态风险区受人类活动干扰少,生态价值增加。根据生态系统的整体性和自我调控功能,在上下游之间、山区县与平川县之间建立生态补偿机制,将有利于汉江生态经济带生态价值的转化,形成生态经济带统筹协调的一体化发展格局。研究结果显示,上游山区生态系统服务价值高,中游中高价值和低价值相伴,下游生态价值最低,这与汉江生态经济带“上游限制开发区、中游重点发展区,下游优先发展区”功能分区具有一定的一致性。其中上游地区高生态系统服务价值低风险的空间集聚性主要集中在神农架区,秦岭和巴山的高生态系统服务价值低风险集聚性弱,未来应高度重视汉江经济带上游地区生态保护,加强移民安置后的宅基地生态恢复和景观廊道建设,重视巴山及秦岭中低山的生物多样性保护,提高其生态系统服务价值,降低其景观生态风险;中下游地区耕地资源丰富,生态系统服务价值较低,需通过不断加强沿江地带的土地整理和整治,在发展经济

的同时不降低生态系统服务价值。也应加强横向生态补偿,关注流域内生态价值的空间流转与集聚效应,不断提高汉江生态经济带的生态系统服务功能,将生态价值转化为“金山银山”,以增强流域人类福祉。

[参 考 文 献]

- [1] 王书明,张志华.景观格局—生态过程—生态系统服务的系统耦合[J].鄱阳湖学刊,2017(2):78-83,127.
- [2] Jia Yanyan, Tang Xiaolan, Liu Wei. Spatial-temporal evolution and correlation analysis of ecosystem service value and landscape ecological risk in Wuhu City [J]. Sustainability, 2020,12(7):2803.
- [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] Wang Xuechao, Dong Xiaobin, Liu Huiming, et al. Linking land use change, ecosystem services and human well-being: a case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China [J]. Ecosystem Services, 2017, 27: 113-123.
- [5] Xue Lianqing, Zhu Boli, Wu Yiping, et al. Dynamic projection of ecological risk in the Manas River basin based on terrain gradients [J]. Science of the Total Environment, 2019,653:283-293.
- [6] 杨清可,段学军,王磊,等.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2018,38(1):97-106.
- [7] 柳冬青,张金茜,巩杰,等.陇中黄土丘陵区土地利用强度—生态系统服务—人类福祉时空关系研究:以安定区为例[J].生态学报,2019,39(2):637-648.
- [8] 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.
- [9] 徐媛银,郭添,薛达元,等.赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J].生态学报,2019,39(6):1969-1978.
- [10] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [11] 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(03):31-40.
- [12] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等.黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性:以子午岭区为例[J].应用生态学报,2021,32(5):1623-1632.
- [13] 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.

- [14] 曹祺文,张曦文,马洪坤,等.景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J].地理学报,2018,73(5):843-855.
- [15] 国家发展改革委.汉江生态经济带发展规划[R].北京:国家发展改革委,2018.
- [16] 张玉,张用川,陈林.陕西省汉江流域 2000—2015 年土壤侵蚀时空分异特征研究[J].中国农村水利水电,2021(10):78-85,91.
- [17] 张怡雅,袁飞,张利敏,等.南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J].水利水电科技进展,2022,42(3):14-19.
- [18] 张志苗,刘孝富,邱文婷,等.基于植被指数开展汉江流域生态恢复力评估研究[J].环境工程技术学报,2022,12(2):436-442.
- [19] 张静,任志远.汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因[J].生态学报,2016,36(23):7667-7677.
- [20] 陈泽怡,余珮珩,陈奕云,等.汉江流域水源涵养和水质净化服务时空分析[J].生态经济,2022,38(4):193-200.
- [21] 王冰,田永中,高志勇,等.重庆市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].测绘科学,2010,35(2):150-152.
- [22] 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.
- [23] 周常萍.基于生态系统服务价值的土地利用和生态环境评价:以广东省为例[J].安徽农业科学,2010,38(18):9722-9724.
- [24] Costanza R, Darge R, Degroot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [25] 尉芳,刘京,夏利恒,等.基于 LUCC 的陕西渭北旱塬区景观生态风险评价[J].中国环境科学,2022,42(4):1963-1974.
- [26] 杨荔阳,易志辉,林斌,等.福建省耕地质量空间自相关分析与耕地保护分区[J].中国农业资源与区划,2018,39(11):52-58.
- [27] 朱增云,阿里木江·卡斯木.干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟[J].生态与农村环境学报,2019,35(12):1531-1540.
- [28] 朱磊,杨爱民,夏鑫鑫,等.基于空间自相关的 1975—2015 年玛纳斯河流域耕地时空特征变化分析[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(6):887-899.
- [29] 谢花林,李秀彬,张燕婷,等.基于 ESDA 的京津冀地区草地变化空间分异[J].自然资源学报,2012,27(7):1224-1232.
- [30] 叶云,赵小娟,胡月明,等.珠三角耕地质量局部空间自相关分析[J].江苏农业科学,2019,47(6):197-203.
- [31] 俞明轩,谷雨佳,李睿哲.党的以人民为中心的土地政策:百年沿革与发展[J].管理世界,2021(4):23-34.
- [32] 王金南,董战峰,蒋洪强,等.中国环境保护战略政策 70 年历史变迁与改革方向[J].环境科学研究,2019,32(10):1636-1644.

(上接第 255 页)

- [24] 王良杰,马帅,许稼昌,等.基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究:以南方丘陵山地带为例[J].生态学报,2021,41(5):1716-1727.
- [25] Tang Lanping, Ke Xinli, Zhou Ting, et al. Impacts of cropland expansion on carbon storage: a case study in Hubei, China [J]. Journal of Environmental Management, 2020,265:110515.
- [26] 陈泽怡,余珮珩,陈奕云,等.汉江流域水源涵养和水质净化服务时空分析[J].生态经济,2022,38(4):193-200.
- [27] 朱杰,龚健,李靖业.青藏高原东部生态敏感区生境质量时空演变特征:以青海省河湟谷地为例[J].资源科学,2020,42(5):991-1003.
- [28] 张学雷,屈永慧,任圆圆,等.土壤、土地利用多样性及其与相关景观指数的关联分析[J].生态环境学报,2014,23(6):923-931.
- [29] Peng Jian, Liu Yanxu, Wu Jiansheng, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China [J]. Landscape and Urban Planning, 2015,143:56-68.
- [30] 尹燕亭,运向军,郭明英,等.基于牧户感知和野外调查相结合的内蒙古东部草甸草原健康评价[J].生态学报,2019,39(2):709-716.
- [31] 欧维新,张伦嘉,陶宇,等.基于土地利用变化的长三角生态系统健康时空动态研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(5):84-92.