

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.004.

符蓉, 梁玉洁, 谢治国, 等. 汉江流域生态安全时空变化及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 139-148, 160.

Fu Rong, Liang Yujie, Xie Zhiguo, et al. Spatial and Temporal Changes in the Ecological Security of the Hanjiang River Basin and Its Influencing Factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 139-148, 160.

## 汉江流域生态安全时空变化及其影响因素

符蓉<sup>1</sup>, 梁玉洁<sup>1</sup>, 谢治国<sup>2</sup>, 韩沛东<sup>1</sup>, 王绒<sup>1</sup>, 温仲明<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 刘洋洋<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省林业科学院, 西安 710016)

**摘要:** [目的]探究汉江流域生态安全时空变化特征,探讨人类活动对该区域生态安全变化的影响,为汉江流域生态修复工作提供依据。[方法]以汉江流域为研究对象,利用 PSR 模型和综合指数法,结合土地利用及景观格局指数,从时空变化的角度对 2001—2020 年汉江流域生态安全状况进行了评估。[结果](1) 2001—2020 年汉江流域主要土地利用方式为森林与草地,占国土总面积的 71.82%,主要的土地利用转移方向为草地转变为森林。相比 2001 年,2020 年森林的面积增加幅度最大,增加了 1 221.87 km<sup>2</sup>。湿地、水体及城市用地的面积总体呈现增长的趋势,耕地面积有所下降。(2) 2001—2015 年汉江流域生态安全状况呈现逐渐变好的趋势,在 2015 年生态安全水平达到了 20 年内最佳水平,一般安全及以上生态安全区面积从 2001 年的 27 623.86 km<sup>2</sup> 增加至 2020 年的 38 514.67 km<sup>2</sup>。总体来说,生态安全等级差的区域占比最大,生态安全状况仍需提升。(3) 2001—2020 年汉江流域生态安全指数的莫兰指数值分别为 0.187, 0.174, 0.185, 0.180 和 0.133,存在显著的空间正相关关系及空间聚集性。(4) 地理探测器结果显示研究期间内对生态安全指数解释程度最强的因子主要为植被覆盖度、最大斑块指数及景观蔓延度。因子之间存在着显著的交互增强效应,年降水量和其他因子交互作用时对生态安全指数的解释力得到了显著提升。[结论]汉江流域生态安全水平仍需提升,需要提升植被覆盖度,改善气候条件,优化土地利用模式,促进汉江流域生态安全建设和可持续发展。

**关键词:** 生态安全; 生态安全指数; 综合指数法; 汉江流域

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0139-10

## Spatial and Temporal Changes in the Ecological Security of the Hanjiang River Basin and Its Influencing Factors

Fu Rong<sup>1</sup>, Liang Yujie<sup>1</sup>, Xie Zhiguo<sup>2</sup>, Han Peidong<sup>1</sup>,  
Wang Rong<sup>1</sup>, Wen Zhongming<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>, Liu Yangyang<sup>1</sup>

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University,  
Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the characteristics of spatiotemporal changes in ecological security in the Hanjiang River Basin, to explore the influence of human activities on ecological security changes in the region, so as to provide a basis for ecological restoration work in the Hanjiang River Basin. [Methods] Hanjiang River Basin was taken as the research object. The ecological security status of the Hanjiang River Basin from 2001 to 2020 was evaluated from the perspective of spatial and temporal changes by using the PSR model and the comprehensive index method, combining with the index of land use and landscape pattern. [Results] (1) From 2001 to 2020, the main land use modes in the Hanjiang River Basin were forest and grassland, accounting for 71.82% of the total land area. The main direction of land use transfer was the change from grassland to forest. Compared with 2001, in 2020, the area of forests increased

收稿日期: 2023-11-18

修回日期: 2024-01-10

资助项目: 陕西省林业科技创新重点专项(SXJK2022-02-7); 国家自然科学基金(42107512)

第一作者: 符蓉(2001—), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 研究方向为生态恢复研究。E-mail: 1585321335@qq.com

通信作者: 张伟(1990—), 男, 重庆巫山人, 副教授, 博士, 主要从事植被恢复生态重建研究。E-mail: zwgwyd@163.com

刘洋洋(1991—), 男, 河南洛阳人, 副教授, 博士, 主要从事植被生态水文研究。E-mail: hnlylcbtks@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

the most, with an increase of 1 221.87 km<sup>2</sup>. The area of wetlands, water bodies and urban land showed a general trend of growth, while the area of arable land declined. (2) The ecological security status of the Hanjiang River Basin from 2001 to 2015 showed a trend of gradual improvement. In 2015, the ecological safety level reached the best level in 20 years, and the area of general safety and above ecological safety areas increased from 27 623.86 km<sup>2</sup> in 2001 to 38 514.67 km<sup>2</sup> in 2020. In general, the area with poor ecological safety grade accounted for the largest proportion. The ecological safety status still needs to be improved. (3) The values of Moran's *I* of ESI in the Hanjiang River Basin from 2001 to 2020 were 0.187, 0.174, 0.185, 0.180 and 0.133, respectively, with significant positive spatial correlation and spatial aggregation. (4) The results of the Geodetector showed that the strongest factors explaining the ESI during the study period were vegetation cover, maximum patch index and landscape spread. There was a significant interaction enhancement effect between the factors, and annual precipitation interacted with other factors to enhance the interpretation of the ecological security index. [Conclusion] The ecological security level of the Hanjiang River basin still needs to be improved. It is necessary to enhance the vegetation cover, to improve the climate conditions, to optimize the land use pattern, and to promote the construction of ecological security and sustainable development of the Hanjiang River Basin.

**Keywords:** ecological security; ecological security index; comprehensive index method; Hanjiang River Basin

二十大报告指出要推动绿色发展,促进人与自然和谐共生,我国“十四五”规划也明确地提出了要“坚持生态优先绿色发展”的发展理念,生态安全仍然是我国针对生态系统研究的热点和重大科学问题之一。迄今为止,国内外对生态安全还没有统一的定义,狭义上的生态安全指的是自然和半自然生态系统的安全,而广义上的生态安全则包括了自然生态系统安全、经济生态安全和社会生态安全,组成一个复合人工生态安全系统<sup>[1-2]</sup>。随着社会经济飞速地发展,自然资源的减少以及人类对资源的不合理开发利用导致我国部分区域生态安全面临着巨大威胁<sup>[3]</sup>。生态退化问题对社会经济的发展有着重要影响,目前针对生态安全的研究开展的研究内容丰富、尺度多维、方法多元,多从最初的定性研究转变为定量研究,因此对生态功能区进行生态安全评价,分析其生态系统变化的趋势,从而采取措施防治生态系统的退化,这对保护恢复生态系统的服务功能、促进经济的可持续发展具有重要的实际意义和指导价值。

目前对生态安全评价仍然缺乏统一的指标体系和评价方法。王韩民等<sup>[4]</sup>首次将“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR)框架引入生态安全评价体系。当前评价生态安全普遍使用的方法包括压力-状态-响应(PSR)模型,驱动力-压力-状态-影响-响应(Driving-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR)模型<sup>[5]</sup>,改进的 TOPSIS 模型等<sup>[6]</sup>来量化生态安全。生态安全评价的对象包括城市、国家公园、流域等。研究内容仅针对生态安全进行定量评价,将土地利用

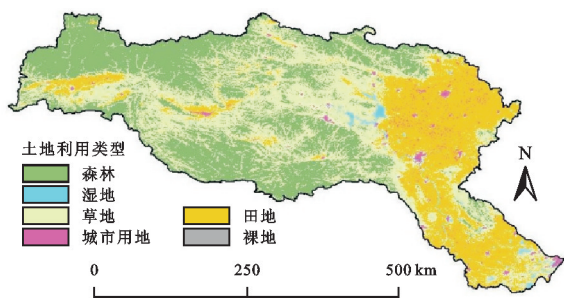
变化与景观格局变化相结合来分析生态安全状况的研究较少。因此,对汉江流域内生态安全形势进行深入分析和探讨,将为流域下一步生态治理奠定良好基础,对流域高质量发展具有重要意义<sup>[7]</sup>。

汉江流域是我国重要的生态功能区,自然生态条件良好,随着南水北调工程的进行,人类对汉江流域的干扰程度逐渐增强,经济、资源和环境相互作用明显增强,流域内土地利用方式产生变化,景观破碎化程度随之加深,研究区的生态系统受到了威胁,出现了植被退化、水土流失等一系列生态问题<sup>[8]</sup>。以往的研究中针对汉江流域开展的生态安全研究多集中在局部地区的生态风险评估上,对整个流域进行定量评价的研究较少。基于此,为了全面了解汉江流域生态安全状况及其时间尺度上的变化,探讨人类活动对汉江流域生态状况的影响,本研究以 2001 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的遥感数据和社会经济数据为基本数据源,基于 PSR 模型和景观生态学原理,构建生态安全评价体系,针对汉江流域整体生态安全状态进行定量评价,从土地利用、生态安全及其影响因子层面探究汉江流域近 20 年以来的生态安全时空变化状况,可以更清楚地了解近 20 年来流域内生态安全变化状况,分析影响生态安全变化的驱动因子,为保障流域生态安全提供理论支持,旨在为生态环境的保护与治理提供合理的建议。

## 1 研究区概况

汉江作为长江最大的支流,同时也是南水北调工

程的核心水源,是我国重要的生态保护区和水源涵养地,是长江经济带的重要组成部分,其生态安全对实现长江区域高质量发展意义重大。汉江发源于陕西省秦岭南麓,经流陕西、湖北两省,位于 $30^{\circ}8'—34^{\circ}11'N$ , $106^{\circ}12'—114^{\circ}14'E$ ,干流全长1 577 km,其中陕西境内干流长657 km,湖北境内长920 km,流域面积15.9万 $km^2$ 。该流域属亚热带季风气候,气候温和湿润,多年平均气温在 $12\sim 16^{\circ}C$ 。降水多为降雨,降雪及冰雹较少,但随着气候变化的影响,流域内汛期与非汛期降水量不平衡,多年降水为700~1 400 mm,总体水资源呈现下降的趋势。流域内湖北、陕西及河南省人口众多,生态区位重要,环境承载力压力巨大,是退耕还林还草工程实施的重点区域。21世纪以来,汉江流域植被覆盖程度逐渐提高,但流域上游水土流失和下游干流水质问题仍较为突出。研究区土地利用状况如图1所示。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 研究区土地利用类型

Fig. 1 Land use map of the study area

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

研究基于栅格尺度开展,数据主要包括研究期间的遥感影像数据和社会经济统计数据两部分,其中人口密度、植被净初级生产力、GDP空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)空间分辨率为1 km,降水数据来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geo-data.cn/aboutus.html>),空间分辨率为1 km,土地利用数据来源于Earthdata search(<https://search.earthdata.nasa.gov/>,MCD12Q1),空间分辨率为500 m,利用IGBP分类体系结合研究区现状将其分类为森林、草地、湿地、水体、耕地、建设用地及未利用土地7类。夜间灯光数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的NGDC数据中心(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html>),空间分辨率为1 km,景观格局指数通过Fragstats4.2中的移动窗口法进行计算,统一

空间参考坐标系为Krasovsky\_1940\_Albers,基于ArcGIS 10.8平台利用重采样将数据分辨率统一为1 km。

### 2.2 研究方法

2.2.1 确定评价模型 压力-状态-响应(PSR)模型最初在1979年由加拿大统计学家Tony Friend和David J.Rapport提出并应用于分析生态系统健康状况<sup>[9]</sup>,反映着人类与环境之间的双向因果关系。本研究以PSR模型为基础,结合汉江流域生态特点,将问题分解为不同层次来建立层次分析结构,进行汉江流域生态安全评价。

2.2.2 构建评价体系 综合考虑汉江流域生态系统的复杂性和实际情况,结合PSR模型及其环境条件,从压力、状态和响应三层面共选取了11个评价指标来构建评价体系(表1)。压力维度反映着社会经济发展及环境条件的变化对生态系统造成的压力,研究区内人口众多,人类活动对生态环境干扰较大, $C_1$ (人口密度)在一定程度上反映着人类活动对生态系统造成的压力<sup>[10]</sup>,人口密度大代表着所需的生产生活物资多,对生态系统构成的压力也随之增大。研究区为长江第一大支流,在国家区域生态安全和社会经济发展格局中占据着重要地位。 $C_2$ (夜间灯光指数)可以反映一个地区的经济繁荣程度,能够客观地反映出人类社会的工商业发展情况。研究区内汛期与非汛期水量不平衡,水资源主要来源于降雨, $C_3$ (年降水量)的变化影响着水资源的变化从而影响着土地利用类型的改变。状态维度反映着环境和资源当前所处的状态,汉江流域内植被近年出现了退化情况, $C_4$ (植被净初级生产力)和 $C_5$ (植被覆盖率)反映着生态系统的环境质量以及植被资源的丰富程度,植被净初级生产力可以表征生态系统的活力<sup>[11]</sup>。 $C_6$ (香农多样性指数)、 $C_7$ (香农均匀度指数)以及 $C_8$ (最大斑块指数)均为景观格局指数, $C_6$ 反映着生态系统结构的稳定性, $C_7$ 反映着景观的异质性,值越大,景观破碎度越高, $C_8$ 表示景观中的优势类型,反映人类活动的干扰方向<sup>[12]</sup>。响应维度体现着人类对环境压力的响应所采取的措施, $C_9$ (景观蔓延度)反映着景观的破碎化程度<sup>[13]</sup>。 $C_{10}$ (GDP空间分布)反映着经济发展程度, $C_{11}$ (景观干扰度)代表着生态系统受到外部干扰的程度,干扰度越大,所受风险越大。

2.2.3 评价指标标准化 将各指标转化为无量纲、无数量级差别的标准值,进一步进行分析评价。为了能够更加合理科学地进行指标标准化处理,按照生态安全与指标的相关性将所选指标分为正指标和负指标两类,具体计算过程在ArcGIS 10.8中的栅格计算器中进行。



表 1 汉江流域生态安全评价体系  
Table 1 Ecological security evaluation system  
of Hanjiang River Basin

目标层	准则层	指标层	指标性质
流域生态安全评价指数 A	压力 B <sub>1</sub>	人口密度 C <sub>1</sub>	负
		夜间灯光指数 C <sub>2</sub>	负
		年降水量 C <sub>3</sub>	正
	状态 B <sub>2</sub>	植被净初级生产力 C <sub>4</sub>	正
		植被覆盖率 C <sub>5</sub>	正
		香农多样性指数 C <sub>6</sub>	正
		香农均匀度指数 C <sub>7</sub>	正
		最大斑块指数 C <sub>8</sub>	负
	响应 B <sub>3</sub>	景观蔓延度 C <sub>9</sub>	正
		GDP 空间分布 C <sub>10</sub>	正
		景观干扰度 C <sub>11</sub>	负

公式如下<sup>[14]</sup>：

正指标：

$$P_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{1}$$

负指标：

$$P_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{2}$$

式中： $P_i$  为指标的标准化值； $X_i$  为指标的原始数据； $X_{\max}$  为指标的最大值； $X_{\min}$  为指标的最小值。

2.2.4 指标权重计算方法 本研究采用层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 来确定评价指标的权重,按不同属性自上而下分为目标层、准则层、指标层 3 个层级。目标层为汉江流域生态安全评价,准则层为压力、状态及响应三部分,指标层为 11 个评价指标,通过构造判断矩阵来表示各个要素之间的相互重要关系,采用成对比较法和 1~9 分赋值法来表

示要素间的相对重要关系,通过检验矩阵中的定义一致性指标和随机一致性比例来判断是否满足一致性,根据层次结构模型从第二层开始对影响上一层的同层次因素进行成对比较矩阵构建并检验<sup>[15]</sup>。通过构造判断矩阵来计算得出指标权重,结果见表 2。  
2.2.5 计算生态安全评价指数 参考流域生态安全评价相关文章,本文采用综合评价法计算生态安全评价指数 (ESI) 对汉江流域湿地资源进行生态安全评价。公式如下<sup>[16]</sup>：

$$ESI = \sum_{i=1}^n w_i \times p_i \tag{3}$$

式中:ESI 为生态安全评价指数; $W_i$  为单项指标权重; $P_i$  为该指标的标准化值。

2.2.6 评价等级 参考现有生态安全研究,结合研究区生态安全值,将汉江流域生态安全等级分为优秀、良好、一般、较差及差 5 个等级(表 3)。

表 2 汉江流域生态安全评价指标权重

Table 2 Weighting of ecological security evaluation indicators in Hanjiang River Basin

目标层	准则层		指标层		总权重
	名称	权重	名称	权重	
A	B <sub>1</sub>	0.1638	C <sub>1</sub>	0.2721	0.0446
			C <sub>2</sub>	0.1199	0.0196
			C <sub>3</sub>	0.6080	0.0996
			C <sub>4</sub>	0.2520	0.1358
			C <sub>5</sub>	0.3279	0.1767
	B <sub>2</sub>	0.5390	C <sub>6</sub>	0.1623	0.0875
			C <sub>7</sub>	0.1712	0.0923
			C <sub>8</sub>	0.0865	0.0466
			C <sub>9</sub>	0.5390	0.1602
	B <sub>3</sub>	0.2973	C <sub>10</sub>	0.1638	0.0487
			C <sub>11</sub>	0.2973	0.0884

表 3 生态安全等级划分标准

Table 3 Criteria for classifying ecological safety levels

等级	生态安全状况	特征
0.0~0.26	差	生态压力极大,生态功能脆弱,生态系统处于即将崩溃边缘,生态环境受到严重破坏
0.26~0.36	较差	生态问题较大,生态功能较弱,生态系统出现了缺陷,生态环境受到较大破坏
0.36~0.46	一般	生态压力较大,生态功能及响应一般,生态系统尚稳定,生态环境受到一定破坏
0.46~0.56	良好	生态压力较小,生态功能比较完善,生态环境很少受到破坏,生态系统处于较完善状态
0.56~0.66	优秀	生态结构合理,生态压力很小,生态系统基本没有受到破坏

2.2.7 土地利用变化矩阵 在 ArcGIS 10.8 中,利用交互重叠的方法计算得到土地利用变化矩阵,以分析汉江流域近 20 年来的土地利用类型的转入与转出变化。公式如下<sup>[17]</sup>：

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: $S$  为不同类型的土地面积; $n, m$  为不同类型的土地; $i, j$  为土地利用时期。

2.2.8 景观格局指数 本研究从破碎化与多样化的角度来分析研究区景观格局的时空演变特征,参考以往研究在景观层面上选取了香农多样性指数 (SHDI)、香农均匀度指数 (SHEI)、最大斑块指数 (LPI)、景观蔓延度指数 (CONTAG) 以及景观干扰度 ( $E_i$ )<sup>[18-20]</sup>。采用 fragstats4.2 中的移动窗口法来分析景观格局数据,该方

法要求选择合适的窗口半径,本研究选用 500 m 作为窗口半径。

$$E_i = aC_i + bF_i + cD_i \quad (5)$$

$$C_i = \frac{N_i}{A_i} \quad (6)$$

$$F_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{N_i}{A_i}} \quad (7)$$

$$D_i = \frac{M_i + L_i}{2}, \quad M_i = \frac{N_i}{N}, \quad L_i = \frac{A_i}{A} \quad (8)$$

式中: $E_i$ 为景观干扰度; $C_i$ 为景观破碎度; $F_i$ 为景观分离度; $D_i$ 为景观分维度; $M_i$ 为景观类型相对密度; $L_i$ 为景观类型相对盖度; $A$ 为景观的总面积; $A_i$ 为斑块面积; $N$ 为景观斑块总面积; $N_i$ 为斑块数量; $a, b, c$ 分别为 $C_i, F_i, D_i$ 的权重,结合相关研究成果对 $a, b, c$ 分别赋权为 0.5, 0.3, 0.2。

**2.2.9 空间自相关分析** 空间自相关分析用于分析空间变量是否存在聚集性,可分为全局自相关分析与局部自相关分析。在 ArcGIS 10.8 中利用全局莫兰指数(Global Moran's  $I$ )来分析空间总体的差异性。当 Moran's  $I$  值为正值时,表示该变量呈现空间正相关性;当 Moran's  $I$  值为负值时,表示变量呈现空间负相关性;Moran's  $I$  值为 0 时,则表示变量在空间上不存在相关性<sup>[21]</sup>。进一步利用冷热点分析来分析局部空间自相关性,分析研究区冷点及热点的聚类。对于具有显著统计学意义的正的  $Z$  得分, $Z$  得分越高,热点的聚类就越紧密。对于统计学上的显著性负  $Z$  得分, $Z$  得分越低,冷点的聚类就越紧密<sup>[22]</sup>。

**2.2.10 地理探测器** 地理探测器用于分析地理现象的空间分异性<sup>[23]</sup>,本研究利用地理探测器中的因子探测器来探测各个评价指标对汉江流域生态安全指数空间分异性的解释程度。 $q$  值越大代表驱动因子对生态安全指数(ESI)的解释力越强。利用交互

作用探测器来识别不同因子之间的交互作用,探测两个因子共同作用时对研究区 ESI 的解释力时是增强还是减弱<sup>[24]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化分析

利用 ArcGIS 10.8 得到 2001—2020 年汉江流域土地利用空间分布图(图 2)和土地利用转移矩阵(图 3),结果显示 2001—2020 年,研究区森林面积呈现持续增加趋势,20 年来森林面积增加约 11 740.73 km<sup>2</sup>,整体增幅为 25.77%,这与陕西省、湖北省相继出台相关政策开展防护林工程息息相关。2020 年为止,森林面积约占汉江流域总面积的 38.88%。相反,草地面积呈现持续降低趋势,20 年间草地面积降低约 12 150.15 km<sup>2</sup>,2001—2005 年降低幅度最大,约为 7.43%。进一步进行土地利用转移矩阵分析,约 26.63%的草地转变为森林,流域中部草地大面积转变为森林。随着政府对湿地保护意识的提升,研究区内大力建设湿地公园,湿地面积一直呈现增加趋势,相较于 2001 年,2020 年湿地面积共增加约 483.34 km<sup>2</sup>,增幅为 106.47%,湿地面积增加了近一倍。研究期内,为响应退耕还林的国家政策,耕地面积先增加后减少,在 2005 年增至 41 646.32 km<sup>2</sup>后开始降低,到 2020 年耕地面积为 39 146.59 km<sup>2</sup>,较 2005 年降低 4.86%。减少的耕地面积大部分转变为城市用地。随着城市化进程加快,城市用地面积也呈现着增加趋势,相比 2001 年,2020 年城市用地面积约增加了 407.67 km<sup>2</sup>,整体增幅为 17.52%。水体面积总体呈现增加趋势,2001—2010 年水体面积增加约 21.48 km<sup>2</sup>,自 2014 年引江济汉工程正式通水后,水体面积迅速增加,2010—2020 年水体面积增加约 141.60 km<sup>2</sup>,2020 年水体面积增至 943.29 km<sup>2</sup>,相比 2001 年增幅为 20.90%。

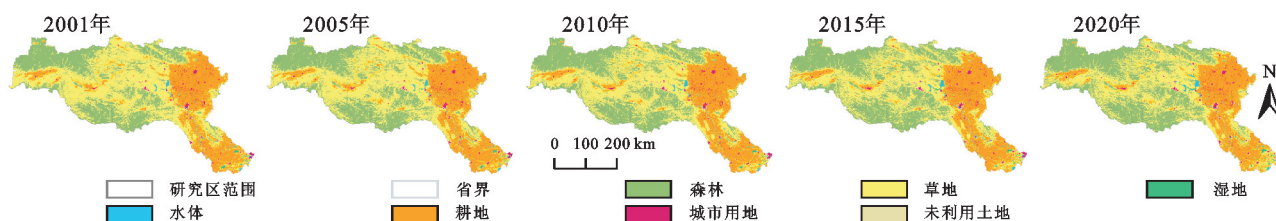


图 2 2001—2020 年汉江流域土地利用空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution patterns of land use in Hanjiang River Basin from 2001 to 2020

#### 3.2 生态安全评价分析

图 4 显示了 2001—2020 年汉江流域生态安全状况,总体来看,近 20 年生态安全水平呈现缓慢上升态势,但整体水平不高。生态安全水平差的区域主要集中在流域中部和东部,该地区以农耕经济为主,耕地

分布广泛,且城市用地面积扩张,人类活动干扰了生态环境,景观干扰度较高,导致景观的稳定性受到破坏。生态安全水平良好及以上的区域在全域均有零散分布,这些区域草地和森林所占面积比重大,稳定性好,植被覆盖度高且景观连通性强,生态环境较为稳定。

为更深入分析汉江流域生态安全面积增减变化情况,对  
不同时期各等级生态安全区的面积和比例进行计算(表  
4)。其中,2001 年,生态安全水平较差及以下的区域达  
到了 111 887.023 km<sup>2</sup>,约占总面积的 80%,总体生态水  
平较差。生态安全良好及优秀的面积共为 6 865.037  
km<sup>2</sup>,仅占总面积的 4.921%。2005 年,生态安全水平差  
的面积较 2001 年有所下降,由 42 024.768 km<sup>2</sup>降至  
14 911.016 km<sup>2</sup>,而生态安全较差的面积有所上涨,达到  
了 91 048.340 km<sup>2</sup>,占比约为 65.084%,生态安全良好及  
优秀的区域面积有所上涨,达到了 9 288.813 km<sup>2</sup>,占  
总面积的 6.636%。流域东部地区生态水平差的情况得  
到了缓解。值得注意的是,在 2010 年后生态安全良好  
的面积上升趋势极为明显,仅 2010—2015 年面积上涨  
了 18 868.579 km<sup>2</sup>,这是由于 2012 年,湖北省政府出  
台相关政策推行汉江流域绿色发展,加大自然生态系  
统与环境保护力度。流域中部及东部生态水平差的  
情况得到了缓解,生态安全较差的区域面积为 3 218.894  
km<sup>2</sup>,仅占 2.184%。生态安全良好及优秀的区域为  
28 471.596 km<sup>2</sup>,约占 19.318%,且大多分布于流  
域中部,该区域多为森林景观,说明森林为景观提供  
了优势。到 2020 年

时,生态安全良好的面积有所降低。汉江流域生态安全  
良好的面积持续增加,整体生态安全状况在向着好的  
方向发展。

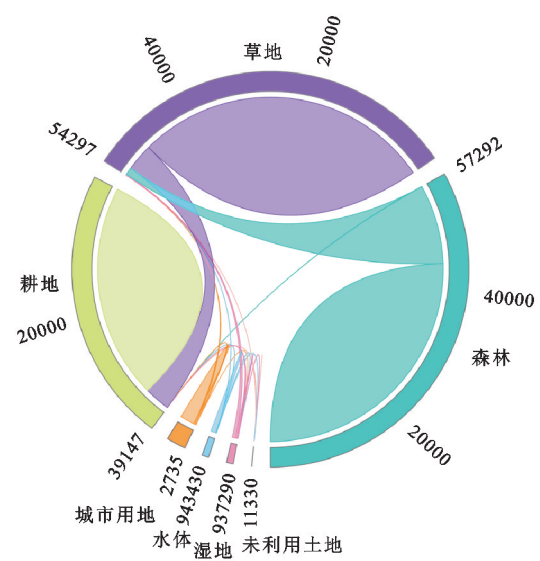


图 3 2001—2020 年汉江流域土地利用转移矩阵(km<sup>2</sup>)

Fig. 3 Land use transition matrix of Hanjiang River Basin from 2001 to 2020

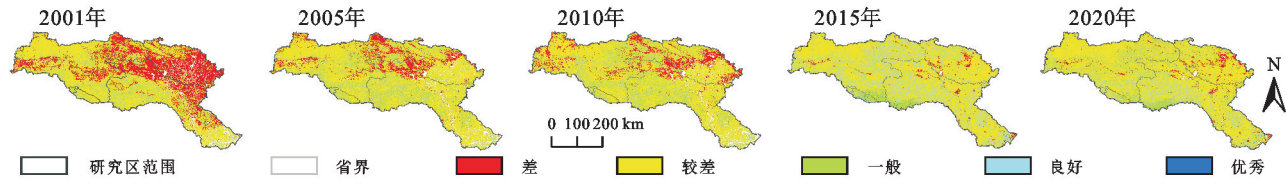


图 4 2001—2020 年汉江流域生态安全指数时空分布格局

Fig. 4 Spatial-temporal distribution pattern of ESI in Hanjiang River Basin from 2001 to 2020

表 4 2001—2020 年汉江流域生态安全区面积统计

Table 4 Statistical analysis of ecological security zone area in Hanjiang River Basin from 2001 to 2020

等级	2001 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
差	42024.768	30.123	14911.016	10.653	15689.659	11.209	3218.894	2.184	5355.821	3.651
较差	69862.259	50.077	91048.340	65.048	90174.862	64.421	105032.423	71.264	102834.571	70.096
一般	20758.826	14.880	24721.920	17.662	24782.814	17.705	10661.585	7.234	20433.394	13.928
良好	6864.039	4.920	9279.829	6.630	9318.761	6.657	28187.340	19.125	17916.128	12.212
优秀	0.998	0.001	8.984	0.006	10.981	0.008	284.256	0.193	165.149	0.113

3.3 空间相关性分析

对生态安全指数进行空间自相关分析,结果见表  
5。2001—2020 年汉江流域生态安全指数的莫兰指  
数值分别为 0.187,0.174,0.185,0.180 以及 0.133,均  
大于 0,且  $p<0.01$ ,通过显著性检验,这表明研究区  
生态安全指数存在显著的空间正相关关系。

由于莫兰指数反映生态安全指数存在空间相关  
性,为了进一步分析汉江流域内各地区之间的空间聚  
集性,进行冷热点分析,结果如图 5 所示,在 2001 年,  
冷点区域占比超过了热点区域,说明此时汉江流域生

态安全水平总体较差,热点区域零散分布于陕西省和  
湖北省,在河南省无分布。这与河南省农业发达,耕  
地分布广泛,人类活动影响较大有关系。2005 年热  
点区域占比有所上涨,超过了冷点区域占比。冷点区  
域多分布于陕西省与河南省交界处,该区域生态安全  
水平差,热点区域分布于流域南部,该区域内主要土  
地利用方式为森林。2010 年冷点区域面积超过了热  
点区域,说明此时汉江流域生态安全低值聚集程度更  
高,热点区域在陕西、湖北及河南省均有分布。2015—  
2020 年冷热点区域趋于稳定,热点区域占据了汉江流



域大部分面积,说明汉江流域内生态安全分布状况存在着显著的空间聚集性。

表5 汉江流域生态安全指数莫兰指数

Table 5 Table of Moran's  $I$  of ESI in Hanjiang River Basin

年份	莫兰指数	预期指数	Z 得分	$p$ 值
2001 年	0.181	-0.000046	125.905	0.000
2005 年	0.174	-0.000044	119.574	0.000
2010 年	0.185	-0.000043	13.018	0.000
2015 年	0.180	-0.000068	71.193	0.000
2020 年	0.133	-0.000046	13.711	0.000

### 3.4 生态安全指数驱动因子分析

利用地理探测器来进一步分析汉江流域时空分布格局的成因,结果如图6所示。2001年,除 $C_2$ 以外,其余10个变量均达到了99%的显著性水平( $p < 0.01$ ),对当年 ESI 解释力最强的因子为 $C_5$ 植被覆盖度(0.189)。2005年,除 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_{10}$ 以外,其余8个变量均达到了

99%的显著性水平( $p < 0.01$ ),对 ESI 解释力最强的因子为 $C_8$ 最大斑块指数(0.137)。在2010年,除了 $C_1$ 和 $C_2$ 以外,其余9个因子均达到了99%的显著性水平( $p < 0.01$ ),对 ESI 解释力最强的因子为 $C_9$ 景观蔓延度(0.138)。2015年,除 $C_2$ 和 $C_{10}$ 以外,其余9个因子均达到了99%的显著性水平( $p < 0.01$ ),对 ESI 解释力最强的因子为 $C_9$ (0.154)。说明 $C_5$ 和 $C_9$ 是对研究区 ESI 影响程度最大的因素, $C_8$ 次之。表明可以通过调整优化 $C_5$ 植被覆盖度、 $C_8$ 最大斑块指数和 $C_9$ 景观蔓延度来影响汉江流域生态安全水平。结合土地利用类型的变化,可以通过提高森林覆盖面积来提高汉江流域生态安全水平。 $C_8$ 与 $C_9$ 反映着人类活动对生态安全的干扰,随着城市工业化发展进程的加快,建设用地无序扩张,对生态安全造成了压力。

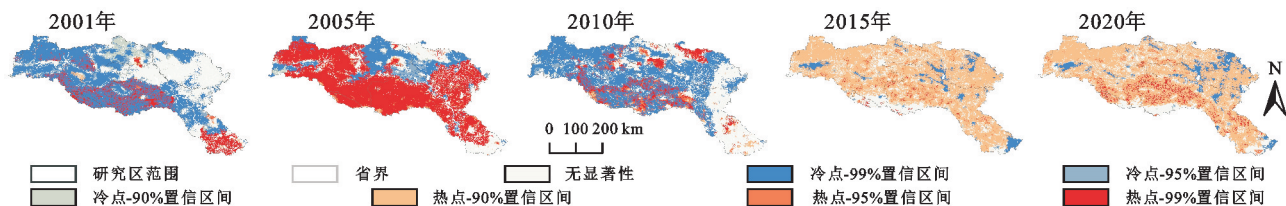


图5 汉江流域2001—2020年生态安全指数冷热点分析

Fig. 5 Cold hotspot analysis of the ESI index in Hanjiang River Basin from 2001 to 2020

地理探测器双因子交互作用探测结果如图7所示,双因子交互探测能反映两个因子共同作用对生态安全水平的影响是增强还是减弱。近20年来任意两因子交互作用均强于单个因子作用,呈现非线性增强或双因子增强。其中,2001年交互作用最强的因子组合为 $C_3 \cap C_4$ , $q$ 值达到了0.298,2005年交互作用最强的因子组合为 $C_3 \cap C_9$ , $q$ 值达到了0.253,2010年交互作用最强的因子为 $C_3 \cap C_7$ , $q$ 值达到了0.261,2015年交互作用最强的因子为 $C_3 \cap C_5$ , $q$ 值达到了0.257,2020年交互作用最强的因子组合为 $C_3 \cap C_9$ , $q$ 值达到了0.249。说明 $C_3$ (年降水量)在因子交互作用时起到了重要作用,虽然对研究区 ESI 单因子解释力不是最高,但与其他因子交互作用时 $q$ 值得到了显著提高。说明改善研究区的气候条件可以很大程度上影响生态安全水平,适宜的降雨量有利于植被的生长,可以提高植被覆盖率,增强景观的连通性,改善水资源的减少状况。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

汉江流域内人口众多,各地区发展不平衡,导致

不同区域经济发展水平存在差异,环境保护和生态恢复的投入不均衡,生态环境保护和管理方面存在显著差异,区域内各地区生态安全水平差异明显,分析其生态安全所处水平,对流域进行生态安全评价可以判断整体生态安全状态,缓解人类活动对生态环境造成的压力,提高流域内整体生境状况<sup>[25]</sup>。目前,区域尺度上的生态安全受到各级政府的关注,从区域尺度上进行研究有利于从宏观层面把握生态安全动态,为管理与决策提供建议<sup>[26]</sup>。汉江流域作为我国重要的生态功能区,承担着重要的生态功能,目前生态功能区生态安全已成为维护我国生态安全的重要抓手<sup>[27]</sup>。因此对汉江流域进行生态安全评价有助于掌握整体生态安全水平,为研究区后续高质量发展提供科学依据。本研究利用 PSR 模型构建评价体系,基于栅格尺度分析 2001—2020 年汉江流域土地利用状况和生态安全水平在时空上的特征。分析土地利用变化,20 年来,森林和湿地的面积有所增加,耕地的面积下降,这与孟晓璐等<sup>[28]</sup>的研究结果相互印证。草地面积有所减少,但减少的草地大部分转变为森林,汉江流域生态安全水平总体上有待进一步加强,经历了逐渐提升又下降的发展过程。

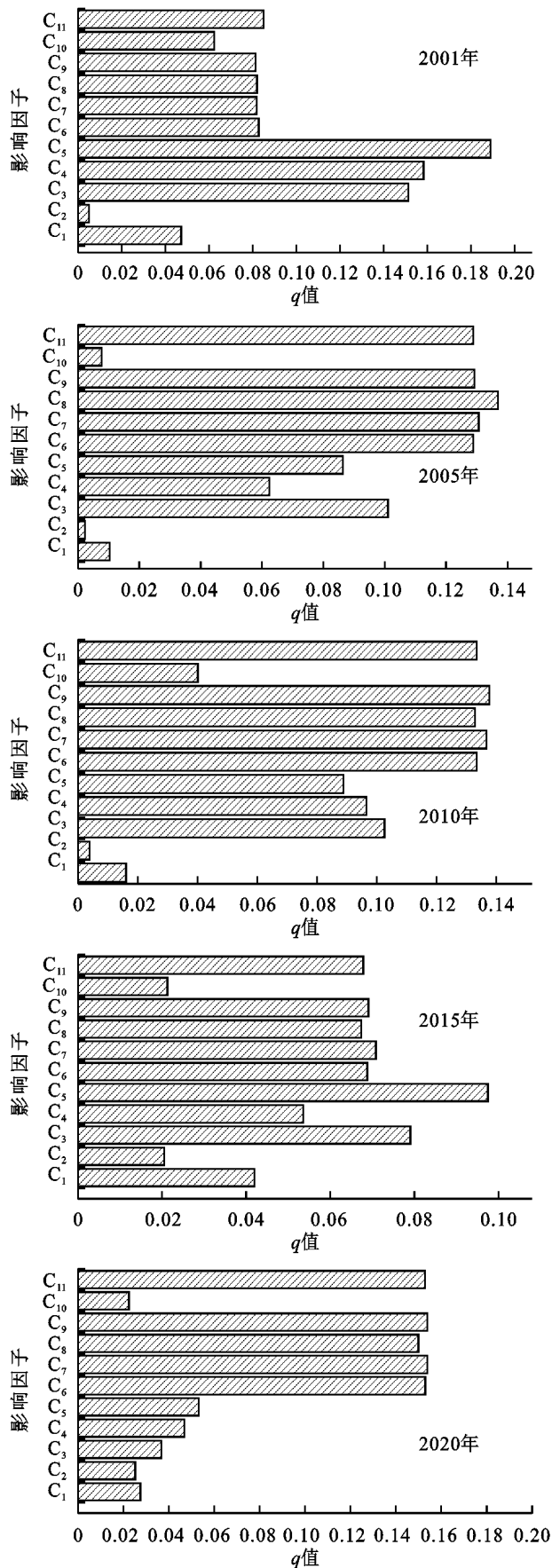


图 6 汉江流域生态安全指数单因子探测结果  
Fig. 6 Single-factor exploration results of ESI in Hanjiang River Basin

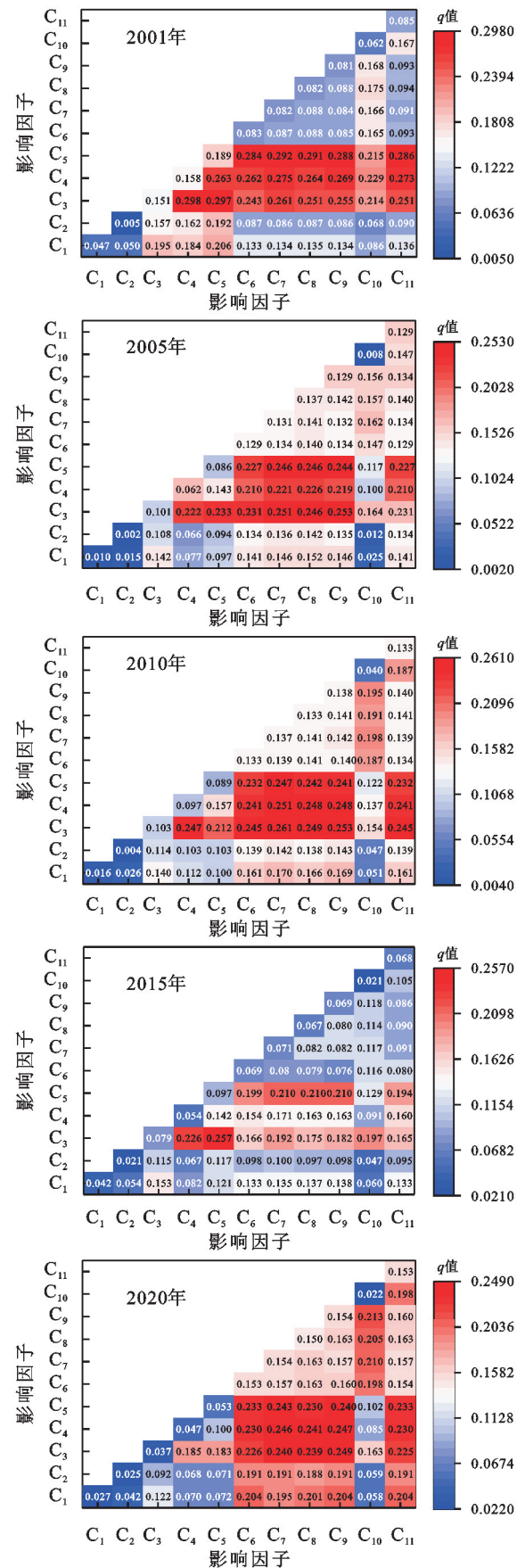


图 7 汉江流域生态安全指数双因子交互探测结果  
Fig. 7 Dual-factor interaction detection results of the ESI in Hanjiang River Basin



流域生态安全在2015年达到了近20年最优水平。2015年,“绿水青山就是金山银山”这一理念正式被写进中央、国务院推进生态文明建设和生态文明体制改革等重要文件,成为中国建设生态文明的重要思想。但在2020年,汉江流域生态安全水平又有所下降,因此应积极开展全域生态保护修复工作。根据对流域内生态安全指数的解释力,应提高研究区植被覆盖度,提高景观连通性高,聚合度高的森林面积的占比,减少人类活动的干扰,降低景观破碎化程度。加强流域内林草植被建设,继续推进退耕还林工作,集约化利用建设用地,优化区域资源配置。生态安全水平差的地区多集中于流域中部及东北部地区,该地区土地利用类型主要为耕地及城市用地,受人类活动影响较大,景观破碎化程度高。流域内主要土地利用类型为森林及草地,整体来看,景观连通性较高,随着时间的变化,部分草地演替为森林,森林的群落结构更为复杂,相比草地更加稳定<sup>[29-30]</sup>,生态安全指数呈现逐渐提高的趋势。在未来的发展中应注意协调发展,优化土地利用方式,在发展经济的同时兼顾生态安全。通过植树造林等方式恢复植被,退田还湖,扩大水体及湿地面积,有助于增加空气湿度,进一步增加降雨,提高研究区整体生态安全水平。

尽管本文在汉江流域生态安全方面得到了一些结论,但仍然存在一些不足,未从市域或县域的角度来进行汉江流域生态安全相关研究。今后可以考虑针对汉江流域更小尺度上进行生态安全水平分析,明确各个县市生态所处状况并针对性地进行调整。

## 4.2 结论

(1) 2001—2020年汉江流域森林、湿地、水体及城市用地的面积总体呈现增长的趋势,研究期间森林、草地和耕地是汉江流域的优势土地利用类型。草地和耕地转变为森林,3类用地间的相互转化为土地利用主要变化方向。

(2) 2001—2020年汉江流域生态安全呈现着逐渐变好的趋势,20年来,生态安全水平差及较差的面积减少了3 696.635 km<sup>2</sup>,生态安全水平一般的面积变化不大,生态安全水平良好及优秀的面积增加了11 216.24 km<sup>2</sup>。生态安全水平较差的区域多分布于流域东部,该地区耕地为主要的土地利用方式,人口众多,对生态安全的干扰较大,未来需要针对该区域优化土地利用类型。

(3) 从空间自相关分析结果来看,汉江流域生态安全指数存在显著的空间正相关关系及空间聚集关系。

(4) 2001—2020年对生态安全指数解释力最强的因子各不相同,2001年和2015年解释力最强的因

子是植被覆盖度,2005年是最大斑块指数,2010年和2020年是景观蔓延度。从双因子交互探测的结果来看,年降水量与其他因子交互时解释力明显得到了提高,应优化土地利用方式,改善研究区的气候条件来提高生态安全水平。

## 参考文献(References):

- [1] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容[J].应用生态学报,2002,13(3):354-358.  
Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(3):354-358.
- [2] 王如松,欧阳志云.对我国生态安全的若干科学思考[J].中国科学院院刊,2007,22(3):223-229.  
Wang R S, Ouyang Z Y. Some considerations with scientific views on ecological security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2007,22(3):223-229.
- [3] Cao S X, Zhang J Z, Chen L, et al. Ecosystem water imbalances created during ecological restoration by afforestation in China, and lessons for other developing countries[J]. Journal of Environmental Management, 2016,183(3):843-849.
- [4] 王韩民,郭玮,程漱兰,等.国家生态安全:概念、评价及对策[J].管理世界,2001(2):149-156.  
Wang H M, Guo W, Cheng S L, et al. National ecological security: Concept, evaluation and countermeasures [J]. Journal of Management World, 2001(2):149-156.
- [5] 谢华晶,李克飞,李继清,等.基于DPSIR模型的滇池流域水生态安全评价[J].环境保护科学,2021,47(6):94-99.  
Xie H J, Li K F, Li J Q, et al. Water ecological security evaluation of Dianchi Lake Basin based on DPSIR model[J]. Environmental Protection Science, 2021,47(6):94-99.
- [6] 杨友宝,郭付友,韩国圣.我国主体功能限制开发区域旅游生态安全动态演变及其驱动因素:以张家界为例[J].生态学报,2023,43(20):8404-8416.  
Yang Y B, Guo F Y, Han G S. Dynamic evolution and driving factors of tourism ecological security in the region of major function restricted development: A case study of Zhangjiajie[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(20):8404-8416.
- [7] Qiu M, Zuo Q T, Wu Q S, et al. Water ecological security assessment and spatial autocorrelation analysis of prefectural regions involved in the Yellow River Basin [J]. Scientific Reports, 2022,12:5105.
- [8] 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.  
Zhang Z M, Liu X F, Qiu W T, et al. Evaluation of ecological resilience of Hanjiang River Basin based on vegetation index [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(2):436-442.

- [9] 曹文平,刘喜坤,赵天晴,等.基于压力-状态-响应(PSR)模型的潘安湖湿地水环境健康评价[J].环境工程,2021,39(5):231-237,245.  
Cao W P, Liu X K, Zhao T Q, et al. Evaluation of water environmental health of Pan'an Lake wetland based on Pressure-State-Response (PSR) model [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(5): 231-237, 245.
- [10] Cheng H R, Zhu L K, Meng J J. Fuzzy evaluation of the ecological security of land resources in mainland China based on the pressure-state-response framework[J]. Science of the Total Environment, 2022, 804: 150053.
- [11] 吴映梅,李琛,高彬媛,等.高原湖泊城市生态安全格局构建:以大理市为例[J].生态学报,2023,43(19):8153-8166.  
Wu Y M, Li C, Gao B P, et al. Construction of urban ecological security pattern in highland lakes cities: The case of Dali City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 8153-8166.
- [12] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报,2021,37(4):265-274.  
Liu X Z, Li X S, Jiang D M. Landscape pattern identification and ecological risk assessment using land-use change in the Yellow River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 265-274.
- [13] 梁加乐,陈万旭,李江风,等.黄河流域景观破碎化时空特征及其成因探测[J].生态学报,2022,42(5):1993-2009.  
Liang J L, Chen W X, Li J F, et al. Spatiotemporal patterns of landscape fragmentation and causes in the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1993-2009.
- [14] 肖钊富,李瑞,吕宛青.成渝城市群旅游生态安全时空格局演化研究[J].世界地理研究,2023,32(10):122-133.  
Xiao Z F, Li R, Lv W Q. Study on temporal and spatial pattern evolution of tourism ecological security in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. World Regional Studies, 2023, 32(10): 122-133.
- [15] 吴恒飞.青海湖流域生态系统健康评价研究[D].西宁:青海师范大学,2021.  
Wu H F. Study on Ecosystem Health Assessment in Qinghai Lake River Basin [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2021.
- [16] 向丽,周伟,任君,等.基于 DPSIRM 模型的高原城市湿地生态安全评价:以湟水流域西宁段为例[J].生态学报,2022,41(10):2064-2071.  
Xiang L, Zhou W, Ren J, et al. Ecological security evaluation of plateau urban wetland based on DPSIRM model: With Xining section of Huangshui Basin as an example [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(10): 2064-2071.
- [17] 田甜,牟凤云,王俊秀,等.重庆市主城区土地利用变化对地表径流的影响[J].水土保持研究,2021,28(4):128-135.  
Tian T, Mou F Y, Wang J X, et al. Impact of land use change on surface runoff in the main urban area of Chongqing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 128-135.
- [18] 杨帅琦,何文,王金叶,等.基于 MCR 模型的漓江流域生态安全格局构建[J].中国环境科学,2023,43(4):1824-1833.  
Yang S Q, He W, Wang J Y, et al. Ecological security pattern construction in Lijiang River Basin based on MCR model [J]. China Environmental Science, 2023, 43(4): 1824-1833.
- [19] 石金鑫,梁小英,李辉嵩,等.陕北黄土高原景观格局对生态系统服务权衡关系的影响[J].生态学报,2023,43(21):8958-8972.  
Shi J X, Liang X Y, Li H Q, et al. Impact of landscape pattern on ecosystem service trade-offs in the Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8958-8972.
- [20] 朱金峰,周艺,王世新,等.1975 年—2018 年白洋淀湿地变化分析[J].遥感学报,2019,23(5):971-986.  
Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, et al. Analysis of changes of Baiyangdian wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2019, 23(5): 971-986.
- [21] 王博,黄晓军,刘萌萌.区域建设用地开发强度格局演化及影响因素分析:以陕西省为例[J].干旱区地理,2020,43(6):1635-1647.  
Wang B, Huang X J, Liu M M. Pattern evolution and influencing factors of regional construction land development intensity: A case of Shaanxi Province [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1635-1647.
- [22] 施斌,井发明,张浩宽.基于 GIS 的乡镇工业用地空间分布研究[J].地理空间信息,2023,21(4):82-84.  
Shi B, Jing F M, Zhang H K. Research on spatial distribution of industrial land in towns based on GIS [J]. Geospatial Information, 2023, 21(4): 82-84.
- [23] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.  
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] 李鑫磊,李瑞平,王秀青,等.基于地理探测器的河套灌区林草植被覆盖度时空变化与驱动力分析[J].干旱区研究,2023,40(4):623-635.  
Li X L, Li R P, Wang X Q, et al. Spatiotemporal change and analysis of factors driving forest-grass vegetation coverage in Hetao Irrigation District based on geographical detector [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 623-635.

- models for location, scale and shape[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 2005, 54(3):507-554.
- [20] Stasinopoulos D M, Rigby R A. Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R [J]. *Journal of Statistical Software*, 2007, 23(7):1-46.
- [21] Lu E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(12). DOI:10.1029/2009GL038817.
- [22] Chang J X, Li Y Y, Wang Y M, et al. Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540:824-834.
- [23] 李珍, 李相虎, 张丹, 等. 基于 Copula 的洞庭湖—流域—长江系统水文干旱概率分析[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4):1319-1334.
- Li Z, Li X H, Zhang D, et al. Copula based hydrological drought probability analysis in the Lake Dongting-catchment-Yangtze River system [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4):1319-1334.
- [24] 顾佳帅, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于多维 Copula 函数的淮河流域上游气象干旱特征分析[J]. *中国农村水利水电*, 2019(8):83-87, 92.
- Gu J S, Li Q F, Niu M Y, et al. An analysis of meteorological drought characteristics in the upper reaches of Huaihe River based on multidimensional Copula function[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(8):83-87, 92.
- [25] 刘瑞琳, 孙鹏, 张强, 等. 基于 Copula 的横断山区非平稳性气象干旱特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1):213-223.
- Liu R L, Sun P, Zhang Q, et al. Characteristics of non-stationary meteorological drought in Hengduan Mountains based on Copula[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1):213-223.
- [26] 温克刚, 翟佑安. 中国气象灾害大典: 陕西卷[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- Wen K G, Zhai Y A. *China Meteorological Disasters Book: Shaanxi Volume*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.
- [27] Wang H J, Chen Y N, Pan Y P, et al. Spatial and temporal variability of drought in the arid region of China and its relationships to teleconnection indices [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523:283-296.
- [28] Zhang Y, Huang S Z, Huang Q, et al. Assessment of drought evolution characteristics based on a nonparametric and trivariate integrated drought index [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579:124230.
- [29] Sarhadi A, Burn D H, Concepción Ausín M, et al. Time-varying nonstationary multivariate risk analysis using a dynamic Bayesian copula[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(3):2327-2349.

~~~~~

(上接第 148 页)

- [25] 姚材仪, 何艳梅, 程建兄, 等. 基于 MCR 模型和重力模型的岷江流域生态安全格局评价与优化建议研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(17):1-14.
- Yao C Y, He Y M, Cheng J X, et al. Evaluation of ecological security pattern and optimization suggestions in Mingjiang River Basin on MCR model and gravity model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(17):1-14.
- [26] 高长波, 陈新庚, 韦朝海, 等. 区域生态安全: 概念及评价理论基础[J]. *生态环境*, 2006, 15(1):169-174.
- Gao C B, Chen X G, Wei C H, et al. Regional ecological security: The concept and assessment theoretical basis [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2006, 15(1):169-174.
- [27] 鞠昌华, 裴文明, 张慧. 生态安全: 基于多尺度的考察[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(5):626-634.
- Ju C H, Pei W M, Zhang H. Ecological security: Investigation based on multi-scale[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(5):626-634.
- [28] 孟晓璐, 张艳芳. 景观格局变化下陕西汉江流域生态价值与风险的相关性研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3):190-200.
- Meng X L, Zhang Y F. Study on correlation between ecological value and risk of Hanjiang River Basin in Shaanxi Province under landscape pattern change[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3):190-200.
- [29] Han Q G, Zhang J S, Shi X J, et al. Ecological function-oriented vegetation protection and restoration strategies in China's Loess Plateau[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323:116290.
- [30] 袁梓裕, 张路, 廖李容, 等. 黄土高原草地植物多样性与群落稳定性的关系及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(1):60-69.
- Yuan Z Y, Zhang L, Liao L R, et al. Relationship between grassland plant diversity and community stability and its driving factors on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1):60-69.