DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.06.013

谢贤健, 苟千陶, 吴汉. 重庆市土地利用变化特征及生态敏感性评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 178-194.

XIE Xianjian, GOU Qiantao, WU Han. Characteristics of land use change and evaluation of ecological sensitivity in Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):178-194.

## 重庆市土地利用变化特征及生态敏感性评价

谢贤健, 苟千陶, 吴汉

(内江师范学院地理与资源科学学院,四川 内江 641112)

摘 要:[目的] 重庆市作为我国长江上游地区经济中心及保障长江中下游生态安全的屏障,是我国典型的生态功能区和生态脆弱区,研究其土地利用的变化特征及生态敏感性对研究区土地利用重构及生态环境保护具有重要意义。[方法] 利用 2000 年、2010 年、2020 年 3 期遥感数据,基于 ArcGIS、Fragstats 等软件,应用耦合空间距离指数模型、空间自相关分析、地理探测器模型、格网编码等方法综合评价重庆市生态敏感性。[结果](1)研究区景观基质主要以耕地为主,占全区面积 45%以上,2000—2020 年,耕地、草地大面积减少,林地、城乡建设用地面积显著增加。(2)2000—2020 年,综合生态敏感性指数平均值从 1.037 上升到1.045,表明研究区生态环境整体得到改善;空间自相关分析显示重庆市综合生态敏感性全局 Moran's I指数均>0,说明综合生态敏感性空间异质性明显,呈现为由内向外逐级递减的变化趋势,高度敏感和较高敏感主要集中在渝西地区、渝东新城、渝东北三峡库区;敏感性等级显著变化的区域位于中心城区和渝东南武陵山区。(3)研究区综合生态敏感性的时空演变是自然环境因素和社会经济因素共同作用的结果;单因子检测结果显示年平均气温、土壤类型及土地利用程度综合指数为主要的驱动因子;交互探测结果均表现为双因子增强和非线性增强,年平均气温、年降水量、第一产业增加值、人均 GDP、土壤类型的交互作用对综合生态敏感性的影响具有显著的协同增强作用。[结论]根据综合生态敏感性时空演变特征,将重庆市划分为综合发展区、生态改善区、潜在治理区、生态退化区及严格保护区 5 个区域,并针对性提出治理措施,研究结果可以为重庆市生态安全格局重构及可持续发展提供理论支撑和决策依据。

关键词: 生态敏感性; 时空演变; 空间距离指数; 地理探测器; 重庆市

中图分类号:F293.2 文献标识码:A 文章编号:1009-2242-(2024)06-0178-17

# Characteristics of Land Use Change and Evaluation of Ecological Sensitivity in Chongqing

XIE Xianjian, GOU Qiantao, WU Han

(School of Geography and Resource Sciences, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641112, China)

Abstract: [Objective] Chongqing, as the economic center of the upper reaches of the Yangtze River in China and a barrier to ensure ecological security in the middle and lower reaches of the Yangtze River, is a typical ecological functional and fragile area in China. Studying the spatiotemporal evolution characteristics and ecological sensitivity of its land use is of great significance for the reconstruction of land use and ecological protection in the research area. [Methods] A comprehensive assessment of the ecological sensitivity of Chongqing City was conducted by using remote sensing data from the years 2000, 2010 and 2020. This evaluation integrated various analytical approaches with software tools such as ArcGIS and Fragstat. Specifically, the Coupled Spatial Distance Index Model, Spatial Autocorrelation Analysis, Geodetector Model, and Grid Coding techniques were applied to evaluate the ecological sensitivity comprehensively. [Results] (1) In the study area, the landscape matrix was predominantly composed of farmland, accounting for more than 45% of the total area. There had been a significant reduction in both cropland and grassland,

收稿日期:2024-06-05

修回日期:2024-07-23

录用日期:2024-08-07

**网络首发日期(**www.cnki.net):2024-11-22

**资助项目:**国家自然科学基金项目(42207413);长江科学院开放研究基金项目(CKWV2017523/KY)

第一作者:谢贤健(1978—),男,博士,教授,主要从事 3S 技术及应用。E-mail:249983710@qq.com 通信作者:谢贤健(1978—),男,博士,教授,主要从事 3S 技术及应用。E-mail:249983710@qq.com

while the areas of forest land and urban-rural construction land had increased markedly from 2000 to 2020. (2) Over the course of 20 years, the average value of the comprehensive ecological sensitivity index rose from 1.037 to 1.045, indicating an overall improvement in the ecological environment of the study area. Spatial autocorrelation analysis revealed that the Global Moran's I index for the comprehensive ecological sensitivity in Chongqing consistently exceeded 0, indicating a clear spatial heterogeneity in the sensitivity. Specifically, sensitivity decreased in a stepwise manner from the inner to the outer regions. Areas of high and very high sensitivity were predominantly found in the western part of Chongqing, the eastern new town, and the northeastern Three Gorges Reservoir area. Regions with significant changes in sensitivity levels were located in the central urban area and the southeastern Wuling Mountainous area of Chongqing, (3) The temporal and spatial evolution of comprehensive ecological sensitivity in the study area was the result of the joint action of natural environmental factors and social economic factors. Single-factor detection results indicate that the comprehensive index of average temperature, soil type, and land use degree were the main driving factors. The results of interactive exploration showed both linear and nonlinear enhancements, and the impact of the interaction between average temperature, annual rainfall, first industry added value, and per capita GDP on comprehensive ecological sensitivity showed a significant synergistic enhancement effect. [Conclusion] Based on the characteristics of ecological sensitivity spatial and temporal evolution in the study area, Chongqing City is divided into five zones, i.e. the comprehensive development zone, ecological improvement zone, potential governance zone, ecological regression zone, and strict protection zone, and corresponding measures are proposed for each zone. The research findings can provide theoretical support and decision-making basis for the reconstruction of ecological security pattern and sustainable development of Chongqing.

**Keywords:** ecological sensitivity; space-time evolution; spatial distance index; geographic detector; Chongqing

**Received**: 2024-06-05 **Revised**: 2024-07-23 **Accepted**: 2024-08-07 **Online**(www.cnki.net): 2024-11-22

土地生态敏感性是指土地生态系统对人类活动 和自然环境变化的响应程度,其强调生态系统的脆弱 性和对干扰的响应度,是评价和管理土地资源的重要 指标[1]。在健康的生态环境系统中,人类活动与自然 环境之间存在着某种相对稳定的耦合关系。当区域 生态系统平衡点遭受外界人类生产实践活动干扰或 者内在因素突变而失去平衡时,生态系统将引起一系 列严重的生态环境问题。故土地生态敏感性越高的 区域,其生态系统平衡点越容易被打破,是生态环境 保护与国土空间规划过程中的重点对象。目前,国内 外大量研究者从构建不同模型的角度出发对区域的 生态风险进行了评价,主要包括土地类型面积比重评 价模型[2]、生态安全分级模型[3]、相对生态风险模型、 等级动态框架、生态等级风险模型及景观生态风险指 数评价[4-5]。其中景观生态风险指数模型得到广泛的 应用,景观生态风险评价作为生态风险评价的重要组 成部分,是对生态风险评价的延伸与补充,反映了在 自然环境因素或人类活动干扰下空间格局与景观生 态过程相互作用可能产生的不利影响,区别于传统的 生态风险评价,景观生态风险评价依托景观生态学的

生态过程与空间格局的耦合关联视角,更注重风险的 时空异质性与尺度效应所产生后果[6],故基于景观生 态风险指数模型对区域的生态风险现状和景观的高 度空间异质性更具说服力。司琪等[7]通过对耦合 Markov-PLUS 模型与景观生态风险评价指数的复 合,分析并预测新疆叶尔羌河流域土地利用与景观生 态风险的演变特征及未来多情景下的变化趋势,以此 为流域景观生态安全格局优化与生态风险管理区域 的划分提供参考;吕乐婷等[8]通过划分生态风险评价 单元来构建风险小区的景观生态风险指数模型。进 而评价细河流域近30年景观生态风险时空分布特征 及空间关联格局;魏靖阳等[9]从自然、经济、社会3个 层面计算人类活动强度指数、构建景观生态风险指 数模型,并建立二者的耦合系数来探讨景观生态风险 受人类活动强度的影响效应及变动趋势,该研究方法 的应用也在原有的基础上进一步深化了景观生态风 险的研究。近年来,前人对生态风险的研究尺度覆盖 国家[10]、流域、高原湖泊[11]、城市群[12]、海岸带[13]、 特殊地貌区[14]、农牧交错带[15]、自然保护区[16]及地 理区划[17]等典型生态脆弱区,研究方向从单一敏感 性评价向多元化方向转变及向人类活动与生态环境的耦合关系方向发展。然而,现有的研究主要针对生态环境相对脆弱的区域,而就社会经济发展迅速的直辖市进行生态敏感性评价的报道较少,尤其是基于生态敏感性综合指数评价进行的生态安全格局规划未见报道。

重庆市作为中国西部腹地唯一的直辖市,是推动 长江上游经济带发展的关键引擎,经济发展势头强劲, 在西部大开发中承担着增长极作用,在长江经济带中 发挥示范作用。随着城镇化进程的加快,土地利用模 式、效率等的转变导致区域土地利用结构发生巨大改 变,同时该区域地貌类型复杂多样,自然灾害频繁发 生,加之受人类活动的过度干扰,生态环境十分脆弱, 是我国的重点生态功能区与生态脆弱区。目前,针对 重庆市生态安全格局的研究仍以单因子敏感性的权重 叠加为主,指标的选取尚未形成统一的标准。传统的 权重赋值法容易造成评价结果的客观性较差或某一单 因子主导结果的现象,而忽略人为干扰对生态基底的 影响,从而无法体现生态敏感性的综合性。因此,本文 拟采用格网空间分析法从自然环境、人为干扰 2 个维 度对重庆市生态敏感性进行评价。在定量构建景观生 态敏感性、水土流失敏感性的基础上,通过空间距离 指数模型对重庆市的生态敏感性指数进行综合评价。 同时利用空间自相关来揭示研究区综合生态敏感性 指数的空间聚集和异质性,并使用地理探测器对综合 生态敏感性时空演变的驱动因素开展定量分析,为重 庆市生态安全格局的重构以及水土流失防治提供理 论支撑与科学管理规划提供决策依据。

## 1 研究区概况与数据来源

#### 1.1 研究区概况

重庆市(105°11′—110°11′E,28°10′—32°13′N) 位于中国西南地区的内陆腹地,长江上游,四川盆地东部边缘,青藏高原与长江中下游平原的过渡地带(图1)。属亚热带湿润季风气候,雨热同期,常年降水量995~1585 mm。土壤类型多样,以紫色土、黄壤及水稻土为主。从"一区两城镇群"协调发展格局来看,渝西地区地形以丘陵为主,地势较为平缓;渝东南武陵山区城镇群大地构造复杂,属中高山过渡地带,地貌类型以丘陵与低山为主,该区域石灰岩广泛分布,岩溶地貌特点明显;渝东北三峡库区城镇群地处大巴山弧形褶皱带,地质构造多复式背(向)斜和穹隆构造。重庆市辖38个区县(26区,8县,4自治县),总面积约8.24×10⁴km²,大体可分为主城都市区(中心城区、渝西地区、渝东新城)、渝东北三峡库区 城镇群、渝东南武陵山区城镇群三大协调区域,呈"大城市、大农村、大库区、大山地"的地域性特征。长江上游作为长江流域源头与中下游的过渡区域,是继青藏高原三江源地区之后我国第2道生态安全屏障,对我国的生态安全格局构建具有重要的战略地位。重庆地处长江上游和三峡库区腹心地带,是长江上游生态屏障的最后一道关口,对长江中下游地区生态安全承担着不可替代的作用。因此,重庆市不仅充当着西部地区社会经济高速发展的增长极,同时也是保障长江中下游生态安全的屏障,是我国的重点生态功能区与生态脆弱区。但近年来随着城市化进程加快和重大工程的实施(如百亿工程),社会经济发展与生态环境的矛盾日益突出,使得区域生态系统面临诸多问题。故本文选取重庆市作为研究区,具有较好的典型性与代表性。

## 1.2 数据来源

本研究使用 2000 年、2010 年、2020 年 3 个时期的 土地利用数据、数字高程模型(DEM)数据、坡度、植被 归一化指数(NDVI)数据、夜间灯光数据集、第一产 业增加值、气象数据(年降水量、年平均气温)、土壤 数据集(HWSD)、地貌类型、重庆市人口与国内生产 总值(GDP)及研究区其他基础信息数据。(1)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/)分辨率为 30 m×30 m,并遵 循中国科学院制定的土地利用覆盖现状分类标准 (GB/T 2010-2017)[18],综合考虑研究区的地理和生 态特征,分为耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和 未利用地6个地类;(2)高程数据来源于地理空间数据 云(http://www.gscloud.cn),分辨率为 30 m×30 m; (3)植被归一化指数(NDVI)数据来源于 MODIS NDVI, 其分辨率为1km;(4)重庆市及周边地区35个气象站的 气象数据均来源于中国气象数据网(https://data.cma. cn/wa);(5)1:100万中国土壤数据库,来源于中国科学 院南京土壤所(http://www.issas.cas.cn/);(6)人口、 GDP、第一产业增加值数据来源于中国人口普查数据与 《重庆市统计年鉴》[19]:(7)其他基础数据来源于国家基 础地理信息系统(http://www.ngcc.cn.njtc.vpn358. com/)。(8)夜间灯光数据集来源于 Harvard Dataverse 数据平台(http://dataverse.harvard.edu/),分辨率为1 km。(9)坡度的获取是使用 ArcGIS 10.8 以 DEM 数据 为基础通过表面分析算法得出。为保证后续数据分析 的一致性,利用 ArcGIS 10.8 软件对源数据进行投影与 变换,变换后投影坐标统一为 WGS-1984-UTM-Zone-48,空间分辨率统一为 30 m×30 m。

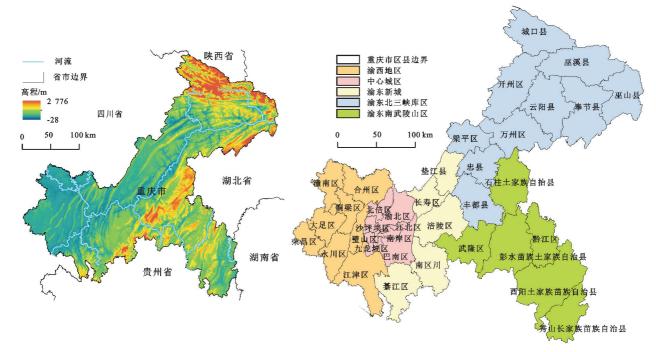


图 1 研究区域

Fig.1 Map of the research area

## 2 研究方法

## 2.1 土地利用变化分析

转移矩阵是基于马尔可夫模型原理,可用于解释在一定时间段内客观事物从一种状态向另一种状态转变的可能性。因此,应用转移矩阵可以对土地利用变化情况进行一个定量描述,并清晰地刻画出区域土地类型转移的空间分布情况。本文参考文献[20],对研究区 20 年土地利用变化进行分析。

#### 2.2 生态风险小区划分

为了更清晰地揭示景观生态风险在地理空间上的分布模式和变化趋势,本文基于 ArcGIS 10.8 软件通过等间距系统网格采样法创建格网。借鉴前人[17]研究,最优风险小区的面积为景观斑块平均面积 2~5倍,对比 5,8,10 km 3 种不同的采样粒度,重庆市的景观斑块平均面积约为 15 km²,基于计算精度选择以 8 km×8 km 的格网将重庆市划分为 1 481 个风险小区,其中有效采样区为 1 373 个(落在第 n 个格网内的研究区的面积达整个格网面积的 50%以上的点)。通过景观生态风险评价模型,利用 Frgstats 4.2 软件对每个风险小区进行景观风险指数计算,并作为空间插值分析的样本。

#### 2.3 景观生态风险敏感性指数

景观生态风险敏感性评价在研究上更注重空间异质性与景观格局的过程反馈,土地利用作为地表景观格局的自然基底,在空间维度上呈现出不同土地利用类型构成的多尺度斑块镶嵌体,其斑块化格局反映空间异质性和尺度敏感性。因此通过计算景观生态风险

敏感性指数可衡量区域土地利用格局引起的生态风险。结合研究区的实际情况和已有研究[2,10]成果,本文以景观破碎度指数( $C_i$ )、景观分离度指数( $N_i$ )、景观分维数指数( $F_i$ )、景观干扰度指数、景观脆弱度指数、景观损失指数( $R_i$ )构建景观生态风险敏感性指数指标体系,并借鉴前人[21]研究结果以景观生态风险敏感性指数指标体系,并借鉴前人[21]研究结果以景观生态风险敏感性指数作为风险小区中心点的值,在 ArcGIS 10.8 软件中利用普通 kring 值法,获得重庆市的景观生态风险敏感性指数空间分布图,进而分析研究区由土地利用变化引起的景观生态风险敏感性的时空演变特征。景观生态风险敏感性指数模型为:

$$ERI_{k} = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_{ki}}{A_{k}} \times R_{i}$$
 (1)

式中:  $ERI_k$  为第 k 个生态风险小区的景观生态风险敏感性指数;n 为景观类型的总个数; $A_{ki}$  为第 k 个风险小区中第 i 类景观的面积; $A_k$  为第 k 个风险小区的总面积; $R_i$  为景观损失度指数,由景观干扰度指数与景观脆弱度指数计算而来,表示第 i 类景观在人为活动或自然干扰下生态系统的自然属性损失度程度; $ERI_k$  值越大表示景观生态风险程度越高,反之则越低。

#### 2.4 水土流失敏感性指数

本文在借鉴前人<sup>[22]</sup>研究的基础上,采用修正的通用土壤流失方程 RUSLE 模型定量评估重庆市的土壤流失量来表示水土流失敏感性。

#### 2.5 综合生态敏感性指数

传统的生态敏感性评价多采用对不同的单因子指标根据主观或客观方法赋予不同的权重进行叠加

分析,为克服传统赋值法带来的缺陷。本文将计算得到的景观生态风险敏感性指数、水土流失敏感性指数归一化,利用耦合空间距离指数模型计算其他点到敏感性最高点的距离来构建综合生态敏感性指数(comprehensive ecological sensitivity index,CESI)。指数越小,则表示生态敏感性越高,生态环境的脆弱性变强[23]。CESI 计算公式为:

CESI= $\sqrt{(\text{ERI}-\text{ERI}_{\text{max}})^2+(A-A_{\text{max}})^2}$  (2) 式中:CESI 为综合生态敏感性指数;ERI 为某一像元的景观生态风险敏感性指数;A 为某一像元的水土流失敏感性指数;ERI<sub>max</sub>、 $A_{\text{max}}$ 分别为归一化后的景观生态敏感性指数、水土流失敏感性指数的最大值。

## 2.6 空间自相关分析

为揭示研究区生态敏感性的空间关联性,本文应用全局自相关 Moran's I 和局部自相关 Moran's I 的 LISA 图,分析重庆市综合生态敏感性指数的空间异质性特征及潜在的聚集现象。全局自相关 Moran's I 和局部自相关 Moran's I 分别参照文献[10]。

## 2.7 地理探测器模型

地理探测器是由王劲峰等<sup>[24]</sup>提出的一种基于统计学原理,从空间分异的角度探究因变量与自变量之间的空间分布关系,并揭示其背后驱动因子的一种新型统计学方法。本文并针对自然环境基础、经济发展水平及社会生活状况3个维度选取相关指标作为研究区景观生态风险指数变化探测因子。

因子探测:探测因变量 Y 的时空变化分异性,即探测某自变量因子 X 对变化属性 Y 的解释力,用 q 值来衡量,q 的取值范围为[0,1],q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释能力越强,反之则弱。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2$$
 (3)

式中:h 为具体类型( $h=1,2,\cdots,h$ );L 为变量 Y 或自变量 X 的分层,即分类或分区; $N_h$  及 N 为层 h 与全区单位数; $\sigma^2$  及  $\sigma_h^2$  分别为层 h 及全区 Y 值的方差。  $\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2$  及  $\frac{1}{N^2}$  分别为层内方差之和及全区总方差。

交互作用探测用于识别并量化风险因子  $X_i$ 与  $X_j$ 之间的交互作用是否会改变对因变量 Y 的解释 力,2 个评估因子之间的交互作用可分为 5 类。

## 2.8 格网编码分析

格网编码法通过将栅格离散值转换为栅格编码的形式,有助于长时序地观察和分析研究区域内生态敏感性的动态变化和空间格局[22]。本文将综合生态敏感性指数等级由轻度敏感到高度敏感分别赋值为1,2,3,4,5,利用 ArcGIS 10.8 软件中的 Raster Calculator 工具对不同时期的生态敏感性分级结果进行空间叠加分析,从而揭示不同时期综合生态敏感性的时空演变模式,公式为:

$$Code = Code_{2000} \times 100 + Code_{2010} \times 10 + Code_{2020}$$
(4)

式中:Code 为综合生态敏感性变化模式编码; $Code_{2000}$ 、 $Code_{2010}$ 、 $Code_{2020}$  分别为 2000 年、2010 年、2020 年综合生态敏感性等级划分结果。

## 3 结果与分析

## 3.1 土地利用空间格局变化

3.1.1 土地利用时室演变 通过 ArcGIS 10.8 软件对重庆市 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用现状进行分析发现,重庆市土地利用空间分布不均(图 2),主要类型为耕地、林地和草地。林地集中在渝东南和渝东北,耕地在川中丘陵等地区,草地在三峡库区和武陵山区。水域主要在长江等流域,城乡建设用地多在主城区及各县域中心。未利用地面积小,分布零散。

具体来讲,在3期时间点上,耕地面积占比分别为46.88%,46.26%,45.67%,呈递减的趋势,但总体面积占比保持在45%以上,是研究区的主要景观基质,林地面积在2000—2010年从36.97%增加到39.83%,2010—2020年从39.83%增加到40.97%,林地面积整体上呈先快后慢的增长趋势;草地由2000年的14.28%衰减至2020年的9.27%;水域面积在2000年以后为缓慢增长,变化幅度较小;城乡建设用地所占地面从2000年以后为逐步扩张,并且空间上呈聚集式分布;未利用地变化幅度较小。

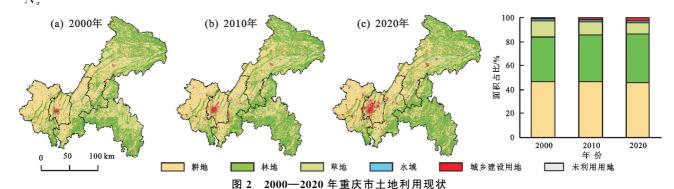


Fig.2 Distribution and proportion of land use status in Chongqing from 2000 to 2020

3.1.2 土地利用类型转化过程 应用土地利用转移矩阵并借助桑基图(图 3)对土地利用转移情况进行可视化分析。2000—2020年,重庆市土地利用变化显著,耕地、草地和未利用地减少,林地、城乡建设用

地和水域增加。耕地主要流向城乡建设用地、水域和林地,草地转移以林地和耕地为主。城乡建设用地扩张主要由城镇化推动,林地面积上升受益于退耕还林政策和生态建设工程。

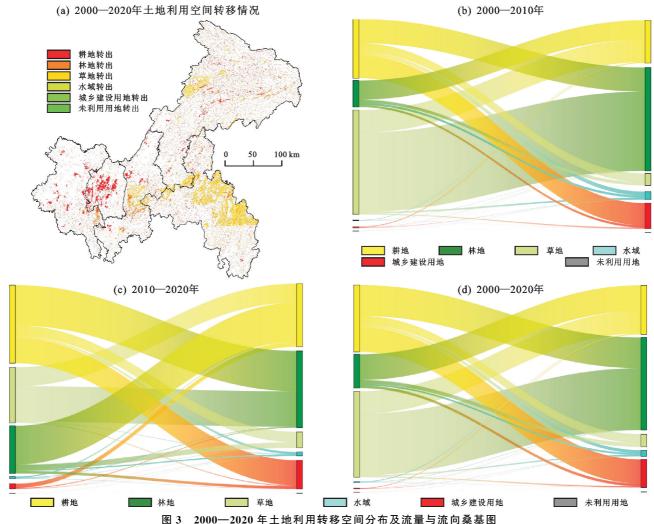


Fig.3 Sangi map of the spatial distribution, flow and direction of land use transfer from 2000 to 2020

具体来讲,2000—2010年土地利用转移面积表现出较高的活跃度,表明该时间段内重庆市土地利用类型受人类活动干扰强烈。在该时间段内向外转移的类型为草地、耕地,面积分别向外转移2830.70,502.19 km²;向内转移的类型为城乡建设用地、林地。分别增加753.40,2351.34 km²。耕地主要流向城乡建设用地,从空间分布上看主要发生在以渝中区为中心向四周扩张,主要原因是重庆市城镇化率从2000年的33.06%上升到53.02%,大量的农村人口流向城市,促使自然景观持续向城市景观转变,土地利用结构发生变化,进而增加对城乡建设用地的需求;草地主要流向林地,从空间分布上看主要发生在渝东南武陵山区的黔江区、彭水苗族土家族自治县、酉阳土家族苗族自治县。2010—2020年土地利用转移面积相对稳定,该时间段内土地转移类型主要为耕地、林地、草地。其中耕地的转出量略小于转人

量,损失的部分主要流向城乡建设用地,流入量为 823 km²;林地面积转入量略高于转出量,高出的部分主要来源于草地的流入,高出面积约为 1 154.00 km²;草地的转出量远大于转入量,损失部分主要转向林地。

## 3.2 景观生态风险敏感性时空演变特征分析

利用 Fragstats 4.2 及 Excel 2010 软件计算得到重庆市 2000 年、2010 年、2020 年的景观格局指数,基于 ArcGIS 10.8 软件,利用普通 kring 插值法,对1 373个格网的景观生态风险指数进行空间插值,得到3个时间段的景观生态风险敏感性的空间分布图(图4)。为进一步探讨研究区生态风险的空间等级分布,首先利用 ArcGIS 10.8 软件中的地统计分析模块对生态风险值进行正态分布探索发现,景观生态风险值近似于正态分布状态。因此,选择自然间断点法将研究区分成轻度敏感、较轻敏感、中度敏感、较高敏

感、高度敏感 5 个等级<sup>[9]</sup>。基于 ArcGIS 10.8 统计, 总体趋势表现为高敏感、较高度敏感区面积占比下

降,轻度敏感、较轻敏感、中度敏感区面积占比增加, 说明研究区整体生态风险性随时间推移而降低。

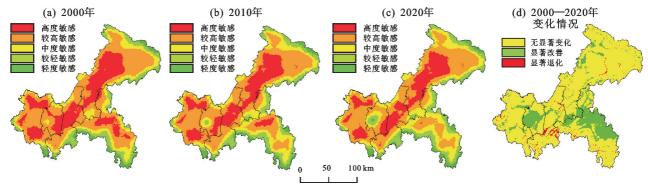


图 4 2000-2020 年景观生态风险敏感性分布

Fig.4 Distribution of landscape ecological risk sensitivity from 2000 to 2020

由图 4 可知,研究区的景观生态风险敏感性呈中 间高四周低的模式,3个时间点敏感性空间分异明 显。但研究区仍以高度敏感、较高敏感及中度敏感区 分布为主,且呈空间聚集分布的特征。其中高度敏感 区面积占比从 2000 年的 24.91%下降到 2020 年的 18.49%,但仍呈聚集状分布在地势平坦的丘陵及平 行岭谷地区,其中渝西地区呈片状分布,在渝东北三 峡库区及渝东新城呈带状分布,渝东南武陵山区由 2000年的片状分布到2020年转变成零星分布的高 度敏感区及片状分布的较高敏感区。高度敏感区的 景观基质类型主要以耕地为主,林地、草地次之,受人 为活动干扰后损失程度大,其中耕地受到户籍制度改 革,大量农村人口及务工人员涌入城市导致基础设施 建设需求增加的影响,以及耕地复垦让土地斑块几何 形状变得更复杂、空间变得分散,容易导致景观破碎 度和分离度增大;林地受退耕还林的影响,大量耕地、 草地转化为林地,导致斑块数量增加,继而使景观破 碎度和分离度加剧。较高敏感性区主要镶嵌于高度 敏感区的外围地带,在主城都市区、渝东北三峡库区 及渝东南武陵山区的内部,呈"T"形分布,面积占比 从 2000 年的 42.90%下降到 2020 年的 40.27%,面积 占比减少2.63%。从空间分布上看,敏感性等级下降 的区域主要发生在渝东南武陵山区,自2002年起退 耕还林工程的实施,渝东南地区的黔江区、彭水苗族 土家族自治县、酉阳土家族苗族自治县实施封山育 林、人工造林的措施,植被得到明显恢复和增加,森林 覆盖率大幅提高,从而使林地的分布更加集中,降低 斑块破碎化带来的景观生态风险。轻度敏感区、较 轻敏感区、中度敏感区主要在重庆市的边缘呈环状分 布,从 2000—2020 年面积占比分别增加 0.39%,3.21%, 5.45%。主要的景观基质类型为耕地、林地,这些景观虽 然面积较小,但在空间上呈连续分布,景观破碎度和分 离度较小,因此,景观生态风险较低。

总体而言,2000-2020年重庆市的景观生态风险

敏感性指数存在显著的下降趋势。由图 4 可知,景观生态敏感性显著改善的区域主要集中在中心城区、渝东南武陵山区聚集分布和在渝西地区和渝东北三峡库区零星分布,显著退化主要分布在渝东新城的南川区。重庆市景观生态风险敏感性的降低主要得益于重庆市加强与长江流域国土空间规划的衔接,实施国土空间分区、分类用途管制及生态工程的修复(退耕还林、天然林保护修复等)降低景观的破碎度和分离度。

#### 3.3 水土流失敏感性时空演变特征分析

根据修正的通用土壤流失方程计算研究区土壤 侵蚀模数,并通过 ArcGIS 10.8 软件的 Image Analyst 工具将各因子的栅格图层进行相乘得到重庆市 土壤侵蚀模数[t/(hm² · a)]空间分布图即水土流失 敏感性分布,参考前人[25]的研究将其分为5类敏感 区(图 5),并统计每个等级的面积及占比。3个时间 段,总体趋势表现为轻度敏感面积占比大幅度上升, 较轻敏感、中度敏感区、较高敏感区、高敏感区面积占 比较大幅度下降,说明研究区整体生态风险性随时间 推移而降低,与景观生态风险性评估结果相一致。从 空间分布看,研究区水土流失显著改善的区域主要分 布在渝东北三峡库区、渝东南武陵山区及渝东新城, 主要是得益于重庆市对石漠化严重区域实施了一系 列的综合治理工程,如封山育林、人工造林及三峡库 区后续植被恢复等林业重点工程,有效增加石漠化地 区林草植被覆盖。同时渝东北、渝东南地区依托特殊 自然与人文风光,大力发展文旅融合产业,拓宽农民 增收渠道,减少农民对土地的依附性,退耕地及撂荒 地现象增多,水土流失现象得到明显改善。显著退化 的区域在主城都市区及渝东南武陵山区表现为零星 点状分布,在渝东北三峡库区则主要分布在巫山县、 奉节县、云阳县及开州区四地。且这些区域随着社会 经济不断发展,承载着大量的农村人口进行农业生产 活动,如土地开垦、坡耕地种植等,对自然生态环境造 成一定扰动。

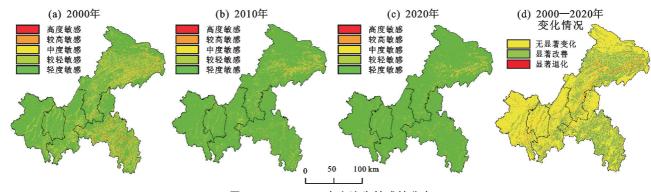


图 5 2000—2020 水土流失敏感性分布

Fig.5 Distribution of soil erosion sensitivity from 2000 to 2020

由通用土壤流失方程 RUSLE 模型可知,水土流 失的形成主要受降水量、植被覆盖度、土壤类型及下 垫面的影响。由图 5 可知,研究区水土流失敏感区主 要是集中在渝东北三峡库区、东南武陵山区;中心城 区、渝西地区及渝东新城的水土流失敏感区相对较 少,且主要分布在主城九区的"四山"(缙云山、中梁 山、铜锣山、明月山)山麓与平坦地区的过渡地带。其 主要原因是渝东北三峡区和渝东南武陵山区地势起 伏较大,岩溶地区石漠化现象严重,植被自行演化速 度较慢。加之川东平行岭谷、盆周边缘山地阻挡来自 印度洋和太平洋水汽的输送。在研究区内形成2个 降水量高值区与1个低值区,导致重庆市的降雨侵蚀 力均呈现渝东北、渝东南偏大,渝中、渝西地区偏小 的空间格局。此外,降水侵蚀力因子高值区主要集中 在地形起伏较大的高坡度山地及丘陵地带,在坡度 增加、降水集中的情况下,径流冲刷作用加强。因此, 上述区域在长期受降水径流冲刷,水土流失情况最为 严重。水土流失敏感性低值区主要分布在渝中地区, 这里以丘陵为主,地势相对平坦,年降水量低、受降水 径流冲刷影响小。

#### 3.4 综合生态敏感性时空演变特征分析

利用空间距离指数计算模型计算归一化后的景观 生态风险敏感性指数和水土流失敏感性指数,结果表 明,2000-2020年重庆市的综合生态敏感性指数(CESI) 平均值呈上升趋势,从 2000 年的 1.037 上升到 2010 年的 1.044,再上升到 2020 年的 1.045,综合生态敏感性指数逐 渐增加,表明自2000年以后研究区的生态敏感性逐年下 降,区域生态环境明显开始好转,整体呈现良好的发 展趋势。为了更好地探讨重庆市生态敏感性的时空变 化特征,本文对3个时期的综合生态敏感性进行分类, 在借鉴前人[23]研究基础上,结合研究区实际情况,将 综合生态敏感性共分为 5 级:高度敏感(CESI<1.006)、 较高敏感(1.006 < CESI < 1.018)、中度敏感(1.018 < CESI<1.040)、较轻敏感(1.040<CESI<1.160)、轻度 敏感(CESI>1.160),并统计每个等级的面积占比,综合 生态敏感性面积转移流量与流向桑基图见图 6。总体趋 势表现为高敏感、较高敏感面积占比减小,轻度敏感、较 轻敏感、中度敏感区面积占比增加,说明研究区综合生 态风险性随时间推移而降低,与景观生态风险性和水 土流失风险评估结果相一致。

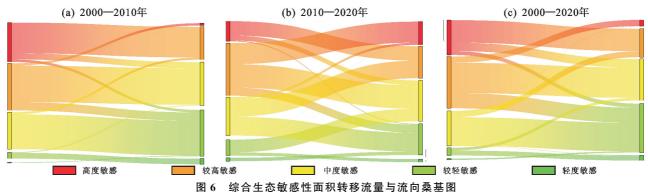


Fig.6 Sangi map of comprehensive ecological sensitivity area transfer flow and flow direction

由图 6 可知,高度敏感区面积先降后升,主要流向较高和中度敏感区。较高敏感区面积自 2000 年的 25.69%降至 21.03%,主要流向中度敏感区。中度敏感区缓慢增长,较轻敏感区显著上升,轻度敏感区变化较小。

总体来看,高度敏感区、较高敏感区面积在 20 年都有所下降,其主要得益于 2002 年后国家退耕还林(草)政策的实施、废弃矿山的生态修复和石漠化治理等生态工程的开展及生态脆弱区域移民搬迁。

从空间分布来看,重庆市的综合生态敏感性在空

间上整体表现为由内向外递减,为了对重庆市生态安全格局构建提供科学参考,本文参照《重庆市国土空间总体规划(2021—2023)》[26]将从渝西地区、中心城

区、渝东新城、渝东北三峡库区、渝东南武陵山区分析 重庆市综合生态敏感性的空间分布及各小区域面积 占比变化趋势(图7、图8)。

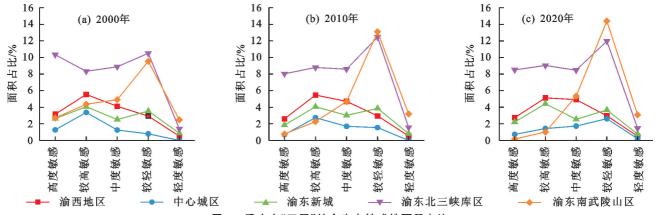


图 7 重庆市"五区"综合生态敏感性面积占比

Fig. 7 Proportion of comprehensive ecological sensitivity area in the five districts of Chongqing City

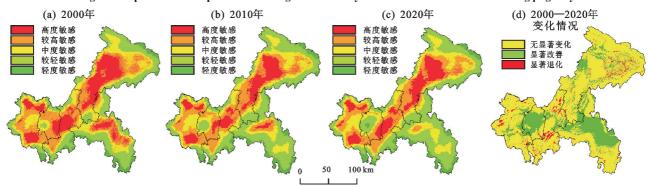


图 8 2000—2020年综合生态敏感性分布及空间分布变化

Fig.8 Distribution and spatial distribution changes of comprehensive ecological sensitivity from 2000 to 2020

渝西地区的高度敏感区呈片状分布,集中在合 川区、潼南区、永川区、江津区。2000-2020年面积 占比呈"增一减一增"的变化趋势,3个时间段分别占 比3.16%,2.60%,2.74%,整体下降 0.42%;较高敏感 区呈环状分布于大足区、铜梁区及高度敏感区外围, 从 2000-2020 年渝西地区的较高敏感呈下降趋势, 共减少 0.41%,但在渝西地区仍是占居主导地位,面 积分别为 5.54%,5.47%,5.13%;中度敏感区镶嵌于 较高敏感区外围,2000-2020年呈"增一增一增"的 变化,2000-2020年面积共增加 0.80%,在渝西地区 所有敏感等级里面积变化最大;较轻敏感区主要分布 在渝西的外围边缘,面积变化较小;轻度敏感区分布 于江津区金佛山和四面山地区。渝西地区的生态基 底以耕地为主,是重庆市高标准农田建设的示范基 地。因此,随着严格保护基本农田及对城镇开发边界 的限制的实施,减少了对景观基底分割。

中心城区在 2000—2010 年敏感性等级以渝中区为中心向四周分别为较轻敏感、中度敏感、较高敏感, 2010—2020 年敏感性等级分布与此前趋同, 但在渝中区有 0.2%的轻度敏感分布。2000—2020 年中心城区

的敏感性等级变化整体上较为一致,主要表现为渝中区中部的较轻敏感区向轻度敏感区转变 0.2%;较轻敏感区及中度敏感性向渝北区、北碚区方向扩散,面积分别增加 1.83%,0.47%;高度敏感性主要分布在巴南区,20年高度敏感区不断向渝东新城转移,面积缩小 0.55%;2000—2020年中心城区的生态环境一直保持良好的发展趋势,主导敏感性等级由较高敏感转变成轻度敏感。生态环境逐渐好转,主要得益于中心城区合理的国土空间规划,减少对景观斑块的分割,同时政府部门在中心城区大力推进"两江四岸"及在缙云山片区启动生态搬迁,并且开展多维度的生态系统修复活动,从而系统性地改善和提升当地特色自然资源保护和生态环境质量。

渝东新城的敏感性等级呈南北低、中部高的分布现象,高度敏感区主要在涪陵区、长寿区呈片状分布,较高敏感区从东北方向西南方呈带状分布,中度敏感性镶嵌在较高敏感区外围,2000—2020年渝东新城敏感性等级面积占比呈"M"形结构,其中高度敏感及轻度敏感面积占比分别降低 0.41%和 0.11%,较高敏感、中度敏感和较轻敏感分别增加 0.36%,0.03%和

0.13%。其中在 2000—2010 年涪陵区高度敏感变化较为显著,收缩面积较大;较高敏感由周边向内收缩,面积变小;中度敏感、较轻敏感在南川区、垫江县面积增加,生态敏感性出现显著退化。渝东新城生态敏感性呈"M"形结构的原因在于,应区域的南川区是重庆市石漠化最严重的区域之一,伴随着人类活动对区域的干扰,水土流失现象明显。

渝东北三峡库区的敏感性自东北向西南呈带状分 布,从带状中部依次向外敏感等级递减,高度敏感区 主要分布在开州区、梁平区、云阳县、忠县、丰都县、万 州区,其余地区零星分布;较高敏感区的分布大体上 与高度敏感区趋于一致;中度敏感区分布于较高敏感 区和较轻敏感区的过渡带;较轻敏感区主要分布于渝 东北的边缘,且分布较为连续。2000-2020年,渝东北 三峡库区的生态敏感性等级占比呈阶段性变化,高度 敏感区面积占比缩小 2.30%,主要转变成较高敏感区 与中度敏感区,较高敏感区面积略有扩张,增加0.46%, 中度敏感区向内部收缩 0.29%,分布在边缘地区的较 轻敏感区与轻度敏感区分别内部扩散 1.95%和 0.17%。 2010-2020 年高度敏感区面积增加 0.48%,增加的 原因主要是零星点状分布的高度敏感区,在人类对土 地复垦及坡耕地种植过程中,耕地的破碎度增大,水 土流失加剧,导致零星点状转变成聚集状分布;较高 敏感区的变化主要发生在云阳县、奉节县、巫溪县等 地区,变化主要表现为向三县的中部迁移;中度敏感 区、较轻敏感区及轻度敏感区面积缩小。从整体来 看,2000-2020年渝东北三峡库区的高度敏感区、中 度敏感区所占面积减少;较高敏感区、较轻敏感区、轻 度敏感区面积增加。但较轻敏感区的占比始终保持 在10%以上,且占比呈递增的趋势。渝东北作为重 庆市水土流失严重区,在国家储备林、长江防护林、新 一轮退耕还林(草)、天然林保护修复等重点工程实施 后,加强区域林草植被保护修复;同时,政府部门积极 探索石漠化治理新技术,开展石漠化区域替代产业开 发,推动石漠化区域生态化利用。并且对生态环境脆 弱地区积极稳妥推进生态脆弱移民搬迁、实施封山育 林等政策。降低人类活动对山体生态系统的负面影 响及有效遏制石漠化进程。

渝东南武陵山区在 2000—2020 年生态基底变化最为明显,敏感性等级占比由 2000 年的较轻敏感 (9.54%)>中度敏感(4.91%)>较高敏感(4.37%)>高度敏感(2.70%)>轻度敏感(2.48%)到 2020 年转变成较轻敏感(14.39%)>中度敏感(5.34%)>轻度敏感(3.08%)>较高敏感(1.02%)>高度敏感(0.17%),是 5 个区域中敏感性变化最为显著的地

区。除2000年外,渝东南武陵山区的较轻敏感和轻 度敏感面积占比均是重庆最多。2000-2020年渝东 南的敏感性变化具有高度的一致性,高度敏感区从 2000年的聚集分布转变为2020年的零星分布,较高 敏感区由 2000 年的带状分布转变为 2020 年聚集于 彭水苗族土家族自治县片状,是重庆市高度敏感及较 高敏感面积占比降低的主要地,分别降低2.54%和 3.36%;中度敏感区由环状分布转变为片状分布,面 积增加,分布主要集中在彭水苗族土家族自治县、黔 江区、酉阳土家族苗族自治县;较轻敏感区由边缘环 状分布转变为聚集分布,面积在20年内迅速向内扩 张,扩张速度表现为先快后慢,是重庆市较轻敏感面 积增加的主要区域,轻度敏感区变化较小。渝东南武 陵山区生态环境自2000-2020年-直处于良好的发 展趋势。主要得益于政府部门在渝东南岩溶地貌中 石漠化集中连片区域,实施一系列科学的生态修复策 略,包括开展封山育林养草、人工造林、退耕还林等多 维度措施;并且积极探索武陵山区不同程度石漠化治 理新技术、新方案,开展石漠化区域替代产业开发(如 种植经果林),探索石漠化区域生态化利用,对生态环 境脆弱的地区实施生态移民,引导人口合理分布;由 于渝东南人口以少数民族聚居为主,土地耕种粗放, 社会经济发展相对滞后,为确保区域生态安全,渝东 南武陵山区聚焦生态环境与社区生计双向输出,依托 少数民族文化特色、喀斯特地貌景观和山地特色农 业,大力发展文旅融合产业。不仅拓宽农民增收渠 道,同时也减少农民对土地的依附性,退耕地及撂荒 地数量增多,水土流失现象得到明显改善,区域成功 实现由"靠山吃山"向"养山就业"转变。

## 3.5 生态敏感性空间聚集特征

3.5.1 生态敏感性全局空间自相关分析 参考前人 [25]研究成果结合研究区实际情况发现,4 km×4 km 的格网更能体现出研究区综合生态敏感性指数时空变化特征。因此,运用 ArcGIS 10.8 的 Fishet 4.2 工具按照 4 km×4 km 的采样间隔提取重庆市综合生态敏感性指数值;同时,利用空间计量软件(GeoDa 1.12)以采样格网为基础计算研究区 2000-2020 年综合生态敏感性指数的空间分布数据得到 Moran's I 指数,重庆市综合生态敏感性 2000 年、2010 年、2020 年的 Moran's I 分别为 0.968,0.967,0.966。 3 个时期的 Moran's I 的数值均为正,I 统计量均I 2.58,I 值均I 6.001,表明重庆市的综合生态敏感性在空间上呈较强的空间正相关,空间依赖程度高。

3.5.2 生态敏感性局部空间自相关 本文运用 Geo-Da 1.12 软件在计算研究区综合生态敏感性 Moran's *I* 

指数的基础上进行空间聚类分析,得到 LISA 空间聚类 图(图 9),在 99%的置信度区间内,按其性质划分为 5 种不同的聚集类型,分别为高一高聚集区(H-H)、 高一低聚集区(H-L)、低一高聚集区(L-H)、低一低 聚集区(L-L)和不显著区(Not, Significant)5类。其 中高一高聚集与低一低聚集在空间上具有较强的正相 关;高一低聚集与低一高聚集在空间分布关系上呈负 相关。由图 9 可知,2000-2020 年重庆市的综合生态 敏感性指数均以高一高聚集与低一低聚集结构为主, 其中高一高聚集表示综合生态敏感性指数高值聚集 区,主要与轻度及较轻敏感区空间分布格局相似,即在 空间上主要分布于研究区东南部、南部的边缘地带及 渝中区,格网数量由 2000 年的 748 个增加到 2020 年 的809个,整体呈连续上升的趋势。从划分的5个区 域来看,2000-2020年中心城区、渝东北三峡库区、渝 东南武陵山区 Moran's I 格网数量分别增加 25,81,61

个,渝西地区及渝东新城 Moran's I 格网数量则分别 减少7,21个,并且增加的格网在空间结构上趋向离 散;低一低聚集表示综合生态敏感性指数低值聚集区, 主要与高度及较高敏感区空间分布格局相似,即在空 间上主要分布于渝西、渝东新城、渝东北三峡库区,格 网数量由 2000 年的1 723降至 2020 年的 1 713,整体呈 波动下降的趋势,但 Moran's I 格网数量在渝西地区、 渝东新城及渝东北三峡库区分别增加 92,107,32 个, 并且在这个3个区域呈现出"相连成片、带状分布"的 特征。因此,空间结构趋向聚集。重庆市的综合生态 敏感性评价表明,2000-2020年,综合生态敏感性整体 上逐渐下降,国土空间规划更为完善,自然生态环境 得到改善,但高度及较高敏感区在空间分布上更加聚 集,结构性质更加稳定;轻度及较轻敏感区在空间分 布上为较离散且主要分布于研究区边缘地带,这说明 重庆市的生态环境蕴藏较大的潜在风险。

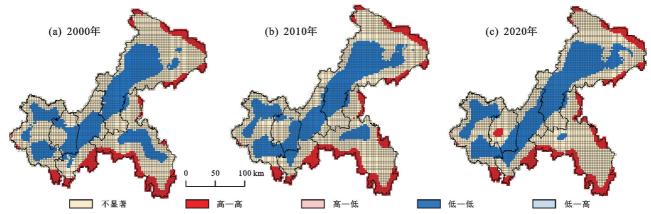


图 9 2000-2020 年重庆市综合生态敏感性指数空间自相关局部(LISA)聚类图

Fig.9 Spatial autocorrelation local (LISA) clustering diagram of Chongqings comprehensive ecological sensitivity index from 2000 to 2020

## 3.6 地理因子对生态敏感性演变的贡献度

前文基于综合生态敏感性指数定性分析综合生态 敏感性时空演变情况及受哪些自然环境因素与社会经 济发展因素的影响。且根据综合生态敏感性指数的空 间自相关研究[10]发现,研究区综合生态敏感性具有明 显的空间聚集与异质性,因此,为进一步研究重庆市综 合生态敏感性时空演变的驱动因素,本文基于自变量 因子的典型性、科学性、获取性及区域的特殊性,充分 考虑综合生态敏感性时空演变与自然环境、气候变化、 下垫面、人类活动干扰的关联性。围绕研究区的实际 情况从自然环境因素、社会状况及经济发展水平3个 维度选取 12 个指标作为自变量因子对重庆市综合生 态敏感性进行定量分析(表 1),其中坡度分为 5 类(0~  $3^{\circ}, 3^{\circ} \sim 5^{\circ}, 5^{\circ} \sim 8^{\circ}, 8^{\circ} \sim 15^{\circ}, 15^{\circ} \sim 25^{\circ}, > 25^{\circ})^{[27]}$ 、土壤 类型参考《1:100万中华人民共和国土壤图》[28]分为 15个亚类、地貌类型参考《中华人民共和国地貌图集 (1:100万)》[29]分为7类(平原、分割平原、中坡度丘 陵、中坡度山地、高坡度山地、高坡度山丘及内陆水域),其他自变量因子均采用自然断点法分为6类。使用地理探测器模型计算各因子对综合生态敏感性的解释力,从而揭示其背后的驱动机制。

3.6.1 单因子探测结果 由表 1 可知,2000—2020年,各指标因子对重庆市综合生态敏感性时空演变的贡献度(%)从高到低依次为年平均气温(15.58)>土壤类型(12.68)>土地利用程度综合指数(12.38)>人口密度(10.58)>高程(10.54)>第一产业增加值(9.22)>植被归一化指数(7.79)>年降水量(6.76)>地貌类型(5.15)>人均 GDP(4.26)>坡度(2.90)>夜间灯光(2.16),其中年平均气温、土壤类型、土地利用程度综合指数、人口密度、高程的贡献度均高于10%,为主要的驱动力。在自然因素中,年平均气温对重庆市综合生态敏感性时空演变的解释力最强,因子贡献度分别为15.92%,16.58%,14.25%,其主要原因是区域的水热条件影响植被的生长状况及土壤

的形成速度,而区域水热状况直接受年平均气温的影响,其次气温高将导致植被蒸腾作用、土壤蒸发量增大,进而影响研究区自然生态环境的水源涵养能力。在社会经济因素中,土地利用程度综合指数贡献度最强,贡献度分别为14.40%,11.63%,11.12%,说明社会经济发展中人类活动对土地利用方式的高度干扰仍然是影响区域综合生态敏感性时空演变的主要

驱动因素,而贡献度在 2000—2020 年下降的原因主要与退耕还林、生态环境修复等措施有关;从自然环境因素与社会状况及经济发展水平因素 3 个维度看,自然环境因素的总贡献度高于社会经济因素的总贡献度,其主要原因是自然环境因素是孕育生态系统的基础性条件,对生态敏感性的时空变化起着明显的削弱或增强作用。

表 1 2000-2020 年重庆市综合生态敏感性驱动因素的单因子探测结果

Table 1 Single-factor detection results of the driving factors of comprehensive ecological sensitivity in Chongqing from 2000 to 2020

			贡	献度/%	
驱动因素	因子	2000年	2010年	2020年	2000—2020 年平均值
	坡度(X1)	3.02	3.16	2.50	2.90
	高程(X <sub>2</sub> )	10.99	11.41	9.23	10.54
	植被归一化指数(X3)	9.26	7.61	6.51	7.79
4 W EI #	年降水量(X <sub>4</sub> )	3.38	3.41	13.49	6.76
自然因素	年平均气温 $(X_5)$	15.92	16.58	9.23 6.51 13.49 14.25 12.28 4.21 62.47 9.37 5.12	15.58
	土壤类型(X6)	12.76	13.00		12.68
	地貌类型 $(X_7)$	地貌类型(X <sub>7</sub> ) 6.00 5.24	5.24	4.21	5.15
	总贡献度	61.32	60.42		61.40
	人口密度 $(X_8)$	11.25	11.12	9.37	10.58
)	人均 GDP(X <sub>9</sub> )	3.54	4.12	5.12	4.26
社会状况及 经济发展 水平因素	夜间灯光(X <sub>10</sub> )	1.46	2.85	2.16	2.16
	第一产业增加值 $(X_{11})$	8.03	9.87	9.76	9.22
	土地利用程度综合指数(X12)	14.40	11.63	11.12	12.38
	总贡献度	38.68	39.58	37.53	38.60

由图 10 可知,在自然环境因素中,年平均气温  $(X_5)$  对综合生态敏感性的驱动力始终居于最强驱动力位置;其中波动程度较大的是年降水量因子 $(X_4)$ ,主要原因是 2000—2020 的研究区的年降水量空间分布格局发生变化,降水量高值区由东北逐步向西南移动,而降水是影响植被生长及石漠化发生的基本要素之一。由

图 10 可知,社会状况及经济发展因素的驱动力波动较小,说明 2000—2020 年人类活动对综合生态敏感性的干扰程度较为稳定,其中人均 GDP 的驱动力( $X_9$ )缓慢上升,说明经济发展对重庆市综合生态敏感性的驱动力增强;人口密度( $X_8$ )、夜间灯光( $X_{10}$ )、第一产业增加值( $X_{11}$ )的驱动力表现为先上升后下降。

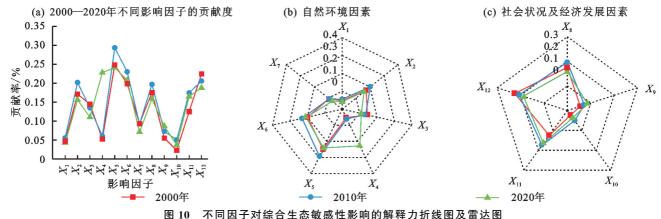


Fig. 10 Line chart and radar chart of the explanatory power of different factors on the impact of comprehensive ecological sensitivity

3.6.2 交互因子探测结果 由图 11 可知,重庆市综合生态敏感性驱动因子中任意 2 个因子的交互结果均大于单因子的解释力,故驱动因子均表现出双因子增强和非线性增强,说明 2 个因子间的交互作用对综

合生态敏感性时空演变的驱动作用相对于单个驱动 因子均有明显协同增强作用,也说明综合生态敏感性 的时空演变不仅仅是依靠其中一个单因子的作用,而 是不同因子相互作用进行不同程度影响的结果。其

中,2000 年 $X_4$ (年降水量) $\bigcap X_5$ (年平均气温)对综合 生态敏感性的解释力最强, $X_5$ (年平均气温) $\cap X_{11}$ (第一产业增加值)、 $X_5$  (年平均气温)  $\bigcap X_9$  (人均 GDP)次之,表明自然环境因素对综合生态敏感性时 空演变的驱动占主导地位,其中年平均气温与年降水 量是导致区域水热状况变化的主要因素,水热条件影 响区域的土壤形成、植被生长、农业分布等一系列因 素,故2个因子的交互作用可以形成多方面因素来影 响区域综合生态敏感性的演变。2010年以 $X_4$ (年降 水量) $\bigcap X_5$ (年平均气温)、 $X_5 \bigcap X_{11}$ (第一产业增加 值)为主要驱动因素; $X_5 \cap X_9$ (人均 GDP)次之,与 2000年相比,2010年驱动力位列前3的交互作用结 果解释力分别上升 0.02, 0.05, 0.05, 但顺序变化不大, 说明 2010 年水热状况条件仍然是影响区域综合生态 敏感性的主要驱动力,但驱动力增长速度不及年平均 气温与人均 GDP 的交互结果;且 2010 年  $X_2, X_5, X_6$ 与其他因子的交互作用明显增强,表明年平均气温、海 拔及土壤类型对综合生态敏感性的演变影响很大。 2020 年以  $X_5$  (年平均气温)  $\cap X_4$  (年降水量) 占主导地 位, $X_5$ (年平均气温) $\cap X_9$ (人均 GDP)、 $X_4$ (年降水量)  $\bigcap X_{6}$ (土壤类型)次之,其中  $X_{4} \bigcap X_{6}$  首次跻身当年主 要驱动因子前3,其主要原因是:降水量是影响水热变 化的基本因素之一,区域水热条件的变化影响土壤形 成速度和厚度,而不同土壤类型所含的矿物质不同又 影响植被的生长状况及空间分布,对耕地、草地、林地 的破碎度产生不同程度的影响,并且不同土壤类型的 保水能力也有所区别。2020年相较于2010年、2000年,  $X_4$ 与其他地理因子的交互作用明显增强,主要与 2020 年重庆市年降水量空间分布格局的变化有关。2000年、 2010年重庆市的年降水量在空间上表现为渝东北、渝东 南偏大、渝中及渝西地区偏小的空间格局,在2020年降 水量在空间上表现为渝东北的东北部偏小、渝中及渝西 地区增加,2000-2020年降水量由东北逐步向西南移 动。综上所述,2000—2020年研究区的年平均气温与年 降水量、年平均气温与人均 GDP 的交互作用结果一直 都是综合生态敏感性的主导因子,其他因子的交互作 用对综合生态敏感性的影响有所差异,但均表现为非 线性增强和双因子增加,说明重庆市的综合生态敏感 性是各因素综合作用的结果。

## 3.7 生态敏感性时空演变模式分析

为进一步探究重庆市综合生态敏感性时空演变特征和规律,促进其与重庆市国土空间规划的有效衔接,做到生态安全格局构建的分区、分类发展和规划。本文通过格网编码法将2000—2020年综合生态敏感性的时空演变模式进行编码,从空间分布和敏感性等

级变化 2 个方面确定每个栅格上生态敏感性动态变化情况<sup>[23]</sup>。按照演变模式的具体特征,将重庆市划分为综合发展区、生态改善区、潜在治理区、生态退化区及严格保护区 5 个区域(图 12、表 2)。

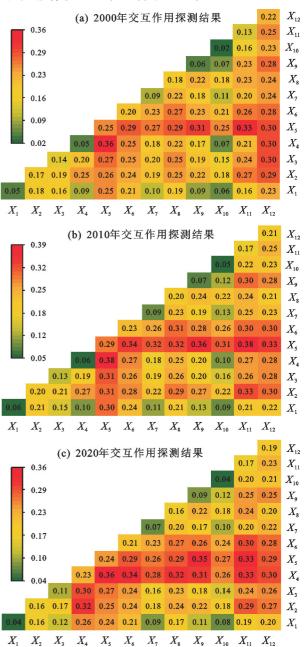


图 11 2000—2020 年重庆市综合生态敏感性驱动因子交互 作用探测结果

Fig.11 Detection results of the interactions between the driving factors of the comprehensive ecological sensitivity in Chongqing from 2000 to 2020

综合发展区是重庆市生态敏感性较低的区域,主要分布在渝西、渝东新城、渝东南、渝东北外围,占研究区的44.09%。这些区域生态本底良好,林地连片,生态系统自我恢复能力强,是生态屏障的主要分布区。应加强生态环境保护,实施生态修复工程,以维护区域生态安全。

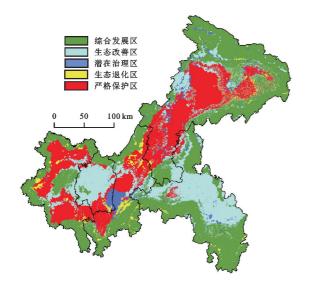


图 12 基于综合生态敏感性变化模式的重庆市保护管理区划
Fig. 12 Protection and management zoning of Chongqing City
based on the comprehensive ecological sensitivity change
model

生态改善区面积占 22.84%,主要集中在中心城区和渝东南、渝东北部分区县。这些区域自 2002 年以来,通过退耕还林(草)、封山育林等措施,水土流失和景观破碎度降低,生态环境得到改善。未来应继续实施针对性生态修复工程,推动文旅融合产业发展,加强城市绿地生态空间建设。

潜在治理区面积占 4.24%,分布在南川区、巴南区及渝东南、渝东北的部分地区。这些区域生态敏感性波动明显,稳定性差,可能受气候变化和经济发展影响。应对策略包括落实城镇开发边界限制,探索石漠化治理新技术,以遏制南川区石漠化进程。

生态退化区面积占 3.21%,零星分布在渝西、渝东新城、渝东北等地区。这些区域原景观基质以耕地及草地为主,受城镇建设扩张和生态工程影响,景观破碎度增加,生态风险上升。后期可通过提高分辨率及时间尺度对区域生态退化的原因开展具体研究,以制定解决措施。

严格保护区是指敏感性常年为重度和极度敏感的区域,在渝西地区呈环状分布、渝东新城和渝东北三峡库区呈条带状分布、中心城区外围呈片状分布及武隆区有零星分布。占研究区的25.62%,仅次于综合发展区的面积,且分布集中。严格保护区的景观基质以耕地为主,是重庆市重要的农产品保护区和特色农产品优势区,因此,受人为活动干扰频繁。在保证生态系统不退化的前提下,严守耕地保护红线,减少耕地破碎化程度,优化永久性基本农田格局,建设高标准基本农田。针对集中连片分布的坡耕地,采取"坡改梯"的措施,增加耕地的保水保土保肥能力。同时,可参考国内外梯田修建方案,打造高山景观梯田,

发展旅游业,提高农民收入。

#### 表 2 重庆市不同生态保护管理分区

Table 2 Statistical table of different ecological protection management zones in Chongqing City

	0 01 0 1		
保护管理分区	格网编码	占比/%	
综合发展区	111,222,333	44.09	
生态改善区	211, 221, 311, 321, 322, 332, 411, 421, 422, 432,		
	433,442,443,511,521,522,531,532,533,541,	22.84	
	542,543,544,551,552,553,554		
潜在治理区	121,212,213,214,231,232,242,252,253,312,		
	313、323、324、325、342、343、352、353、354、412、		
	423,424,425,434,435,452,453,454,512,523,	4.24	
	524,525,534,535,545		
1. + 11 /1. 5	112,113,122,223,224,225,233,234,235,244,		
生态退化区	245,255,334,335,344,345,355,445,455	3.21	
严格保护区	444,555	25.62	

## 4 讨论

本文从土地利用角度入手研究重庆市生态敏感 性时空演变特征。其中,土地利用演变情况与王朝阳 等[30]研究结果相一致,耕地作为研究区主要的景观 基质,受三峡库区移民搬迁、户籍制度改革及退耕还 林还草政策影响,大量农村人口涌入城市,一方面,农 村劳动力大量流失,导致耕地粗放耕作、撂荒等现象 加剧;另一方面人口涌入增加对城乡建设用地的需 求,仅2000-2020年城乡建设用地的需求量增加 251%。土地利用模式、效率等的快速转变导致区域 不同景观类型斑块数量与面积变化,景观破碎度、分 离度、分维度指数出现波动,其中,耕地、林地的斑块 数量先下降后上升,呈"V"形结构;草地、未利用地的 斑块数量呈现下降趋势,水域和城乡建设用地的斑块 数逐年上升。从斑块面积来看,耕地、草地、未利用地 面积一直处于下降趋势;林地、水域、城乡建设用地的 斑块面积逐渐增加。故景观生态风险敏感性整体呈 中间高四周低的模式,与魏靖阳等[9]对成渝城市群景 观生态风险的研究结果相一致。

袁贞贞等<sup>[31]</sup>研究表明,重庆市 2000—2020 年土地利用变化对生态系统健康的影响程度整体向较好的趋势发展,但区域之间的差异较为显著,与本文研究结论相一致。2000—2020 年重庆市的综合生态敏感性指数(CESI)平均值呈上升趋势,从1.037 上升到1.045,表明随时间推移,研究区综合生态敏感性逐渐降低,生态环境整体呈良好的发展趋势,而在2000—2010 年综合生态敏感性指数上升最为明显,其主要原因在于上世纪90 年代,三峡库区(重庆段)人地活动频繁,一方面三峡大坝的修建侵占大量的耕地、草地、林地,城乡建设用地、水域面积增加;另一方面,重庆是三峡库区移

民的主要迁入地,占全库区移民的86.4%。三峡库区 (重庆段)作为集山区、农业区、移民迁入区、水库区域 于一体的典型生态脆弱区在频繁的人地活动下生态环 境受到严重的破坏[32-33]。生态敏感性在 2000-2020 逐渐朝向较好的态势发展的原因与一系列的生态治 理工程和政策密不可分,如《退耕还林还草保护工程》 《重庆市石漠化综合治理规划(2011-2020年)》《重 庆市石漠化地区生态修复工程实施方案》《天然林资 源保护工程》《重庆市生态文明建设规划(2016— 2020年)》《重庆市生态环境保护"十三五"规划》等一 系列文件的制定和实施,生态治理工程的实施进一步 加强重庆市在生物多样性、水源涵养、水土保持、石漠 化等方面的保护与修复。重庆市还依托少数民族文 化特色、喀斯特地貌景观和山地特色农业,大力发展 文旅融合产业。不仅拓宽农民增收渠道,同时也减少 农民对土地的依附性,退耕地及撂荒地数量增多,水 土流失现象得到明显改善。

虽然目前重庆市综合生态敏感性向良好的趋势 发展,但是重庆市综合生态敏感性指数的局部空间自 相关的低一低聚集呈现出"相连成片、带状分布"的特征,高一高聚集的空间结构则较为离散,表明重庆市 生态环境仍蕴藏较大风险。因此,本文运用格网编码 法,按照生态敏感性演变模式,将重庆市划分为综合 发展区、生态改善区、潜在治理区、生态退化区及严格 保护区5个区域,并与重庆市"十四五"生态安全屏障 构建相结合,对各区域提出针对性保护措施,为区域 生态安全格局构建与治理方向提供参考。同时,针对 潜在治理区、生态退化区等区域可采用更高分辨率、 更长时序的遥感影像进行研究分析。

## 5 结论

(1)重庆市土地利用空间分布差异明显,研究期间景观基质主要以耕地为主,占全区面积 45%以上。2000—2020年,草地面积减少最为显著,林地、城乡建设用地明显增加;其中城市建设用地的增加主要发生在中心城区及渝西地区,流入地类以耕地为主,但草地向耕地的转化,在一定程度上弥补城乡建设用地对耕地的侵占。草地减少的主要原因是渝东南武陵山区对石漠化集中连片区实施封山育林人工造林等生态修复工程。

(2)重庆市综合生态敏感性指数在 2000 年、2010 年、2020 年的平均值分别为 1.037 1,1.044 1,1.044 8,平均值呈上升趋势,表明随时间推移,研究区生态敏感性整体改善。其中高度敏感区面积占比从 2000 年的 20.09%下降到 2020 年的 14.35%。下降的面积分别流向较高敏感区、中度敏感区及较轻敏感区。敏感等

级上升最快的是较轻敏感区,从2000-2020年上升 8.31%,增加的面积主要来源于较高敏感区及中度敏 感区。其中,渝西地区较高敏感区面积占比从 2000-2020 年呈下降趋势,减少 0.41%,但在渝西地 区仍是占居主导地位;2000-2020年中心城区的敏 感性等级变化表现为较轻敏感区及中度敏感性向渝 北区、北碚区方向扩散,面积分别增加1.83%,0.47%;渝 东新城敏感性等级面积占比从 2000-2020 年呈"M" 形结构,高度敏感及轻度敏感面积占比分别降低 0.41%,0.11%,较高敏感、中度敏感和较轻敏感分别 增加 0.36%, 0.03%, 0.13%; 渝东北三峡库区的敏感 性自东北向西南呈带状分布,从带状中部依次向外敏 感等级递减;渝东南武陵山区的综合生态敏感性在空 间上变化最为显著,是重庆市高度敏感及较高敏感面 积占比下降的主要地区,分别下降2.54%,3.36%,敏 感性空间聚集以较轻敏感为主,生态环境逐渐好转。 但重庆市综合生态敏感性指数局部 Moran's I 指数, 低一低聚集呈现出"相连成片、带状分布"的特征, 高一高聚集空间结构较为离散,表明重庆市生态环境 仍蕴藏较大风险。

(3)地理探测器研究结果表明,研究区综合生态敏感性的时空演变是自然环境因素、社会状况及经济发展水平等多因素共同作用的结果。从整体来看,单因子检测结果显示年平均气温、土壤类型、土地利用程度综合指数为主要的影响因子,2000—2020年贡献度均高于10%。从自然环境因素、社会状况及经济发展水平因素3个维度看,自然环境因素的总贡献度大于社会经济因素的总贡献度;交互探测结果均表现为双因子增强和非线性增强,3个时间点年平均气温、年降水量、第一产业增加值、人均GDP、土壤类型的交互作用对综合生态敏感性的影响均为显著的协同增强作用。

## 参考文献:

- [1] 魏伟,周陶,郭泽呈,等.基于遥感指数的干旱内陆河流域土地生态敏感性时空演变特征:以石羊河流域武威市为例[J].生态学杂志,2020,39(9):3068-3079.
  - WEI W, ZHOU T, GUO Z C, et al. Spatiotemporal evolution of land ecological sensitivity in arid inland river basin based on remote sensing index: A case of Wuwei City in Shiyang River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9):3068-3079.
- [2] 王卫林,叶燎原,杨昆,等.山地城镇化建设背景下的土地利用生态风险分析[J].水土保持研究,2016,23(6):358-362

WANG W L, YE L Y, YANG K, et al. Ecological risk analysis of land use change on the gentle hillside mountain urbanization construction based on GIS[J]. Research

- of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 358-362.
- [3] 南颖,吉喆,冯恒栋,等.基于遥感和地理信息系统的图 们江地区生态安全评价[J].生态学报,2013,33(15): 4790-4798.
  - NAN Y, JI Z, FENG H D, et al. On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS & GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15):4790-4798.
- [4] 乔蕻强,程文仕,乔伟栋,等.基于相对风险模型的土地利用变化生态风险定量评价:以石羊河流域为例[J].中国沙漠,2017,37(1):198-204.
  - QIAO H Q, CHENG W S, QIAO W D, et al. Evaluation of ecological risk of land use change based on the RRM model: A case in the Shiyanghe River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1):198-204.
- [5] ZIMMERMANN P, TASSER E, LEITINGER G, et al. Effects of land-use and land-cover pattern on landscape-scale biodiversity in the European Alps[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(1/2):13-22.
- [6] 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.
  - PENG J, DANG W X, LIU Y X, et al. Review on land-scape ecological risk assessment [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4):664-677.
- [7] 司琪,樊浩然,董文明,等.新疆叶尔羌河流域景观生态风险评价及预测[J].干旱区研究,2024,41(4):684-696. SI Q, FAN H R, DONG W M, et al. Landscape ecological risk assessment and prediction for the Yarkant River Basin, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2024,41(4):684-696.
- [8] 吕乐婷,张杰,孙才志,等.基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J].生态学报,2018,38(16):5952-5960. LÜLT, ZHANG J, SUN C Z, et al. Landscape ecological risk assessment of Xi River Basin based on landuse change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (16): 5952-5960.
- [9] 魏靖阳,於冉,付丹阳,等.成渝城市群景观生态风险与人类活动强度时空关联分析[J].安徽农业大学学报,2023,50(5):887-896.
  - WEI J Y, YU R, FU D Y, et al. Spatial-temporal correlation analysis of landscape ecological risk and human activity intensity in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2023,50(5):887-896.
- [10] 魏婵娟,蒙吉军.中国土地资源生态敏感性评价与空间格局分析[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(1): 157-168.
  - WEI C J, MENG J J. Ecological sensitivity assessment and spatial pattern analysis of land resources in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(1):157-168.
- [11] 向爱盟,赵筱青,黄佩,等.高原湖泊流域国土空间生态 修复优先区诊断及修复研究[J].生态学报,2023,43

- (15):6143-6153.
- XIANG A M, ZHAO X Q, HUANG P, et al. Diagnosis and restoration of priority area of territorial ecological restoration in Plateau Lake Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15):6143-6153.
- [12] 徐妍,李明玉,余洲.哈长城市群土地利用与景观生态风险时空演变及关联分析[J].延边大学农学学报,2023,45(4):64-73.
  - XU Y, LI M Y, YU Z. Spatial-temporal evolution of land use and landscape ecological risk in the Ha-Chang metropolitan region and its correlation analysis[J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2023, 45 (4):64-73.
- [13] 陈心怡,谢跟踪,张金萍.海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价[J].生态学报,2021,41(3):975-986.
  - CHEN X Y, XIE G Z, ZHANG J P. Landscape ecological risk assessment of land use changes in the coastal area of Haikou City in the past 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(3):975-986.
- [14] 程玉卓,王志杰,班先娅,等.城市化和生态文明建设对 喀斯特山地城市景观生态风险的影响评价:以贵阳市花溪区为例[J].水土保持研究,2023,30(5):351-357.
  - CHENG Y Z, WANG Z J, BAN X Y, et al. Evaluation of the impact of urbanization and ecological civilization construction on landscape ecological risk in Huaxi district of Guiyang characterized as Karst Mountain City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30 (5):351-357.
- [15] 徐兰,罗维,周宝同.基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价:以洋河为例[J].自然资源学报,2015,30(4):580-590.
  - XU L, LUO W, ZHOU B T. Landscape ecological risk assessment of farming-pastoral ecozone based on land use change: A case study of the Yanghe watershed, China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4):580-590.
- [16] 于航,刘学录,赵天明,等,基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学,2022,41(2):99-107. YU H, LIU X L, ZHAO T M, et al. Landscape ecological risk assessment of Qilian Mountain National Park based on landscape pattern[J]. Ecological Science,2022,41(2):99-107.
- [17] SHI Y S, LI J Q, XIE M Q. Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai[J]. Ecological Indicators, 2018, 85:729-741.
- [18] 吴涟敏,廖善刚.基于 GIS 和分形理论的土地利用空间 格局分析:以闽侯县为例[J].地球环境学报,2019,10 (2):156-165.
  - WU L M, LIAO S G. Spatial pattern analysis of land use in Minhou County, Fujian Province of China on the basis of GIS and fractal theory[J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(2):156-165.

- [19] 重庆市统计局.重庆市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2001,2011,2021.
  - Chongqing Statistical Bureau. Chongqing statistical year-book [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2001, 2011, 2021.
- [20] 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.
- [21] 王玲,汪淼.成渝城市群景观生态风险演变分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(3):626-637.
  - WANG L, WANG M. Chengdu-Chongqing urban landscape ecological risk evolution analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(3):626-637.
- [22] 池金洺,于洋,冯娟龙,等.基于 RUSLE 模型的妫水河流域土壤侵蚀时空变化特征[J].水土保持学报,2024,38 (1):70-78.
  - CHI J M, YU Y, FENG J L, et al. Spatial and temporal variation characteristics of soil erosion in Guishui River Basin based on RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):70-78.
- [23] 李振亚,魏伟,周亮,等.基于空间距离指数的中国西北 干旱内陆河流域生态敏感性时空演变特征:以石羊河流 域为例[J].生态学报,2019,39(20):7463-7475.
  - LIZY, WEIW, ZHOUL, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sensitivity in arid inland river basins of Northwest China based on spatial distance index: A case study of Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20), 7463-7475.
- [24] 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.
- [25] 赵正嫄,张云龙,李婷,等.基于空间距离指数的青藏高原生态敏感性综合评价及时空演变分析[J].生态学报, 2022,42(18):7403-7416.
  - ZHAO ZY, ZHANGYL, LIT, et al. Comprehensive evaluation and spatio-temporal variations of ecological sensitivity on the Qinghai-Tibet Plateau based on spatial distance index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7403-7416.
- [26] 重庆市规划与自然资源局.重庆市国土空间总体规划 (2021-2035 年) [EB/OL]. https://ghzrzyj.cq.gov.cn/zwgk\_186/tpjd/202403/t20240326\_13083515\_wap.html, 2024-03-26.
  - Chongqing Municipal Planning and Natural Resources Bureau. Overall land and space plan of Chongqing (2021-2035) [EB/OL].https://ghzrzyj.cq.gov.cn/zwgk

- \_ 186/tpjd/202403/t20240326 \_ 13083515 \_ wap. html, 2024-03-26
- [27] 李辉丹,史东梅,夏蕊,等.基于地理探测器的重庆坡耕地时空格局演变特征及驱动机制[J].农业工程学报,2022,38(12):280-290.
  - LI H D, SHI D M, XIA R, et al. Evolution characteristics and driving mechanism for the spatiotemporal pattern of sloping farmland in Chongqing based on geodetector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(12):280-290.
- [28] 中国科学院南京土壤所.中国土壤数据库[EB/OL].ht-tp://vdb3.soil.csdb.cn/front/detail-% E5%9C%9F% E5%A3%A4%E4%B8%93%E9%A2%98%E5%9B% BE%E5%BA%93\$prov?id=CQ.
  - Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. China soil database [EB/OL]. http://vdb3. soil. csdb. cn/front/detail% E5% 9C% 9F% E5% A3% A4%E4%B8%93%E9%A2%98%E5%9B%BE%E5% BA%93\$ prov? id=CQ.
- [29] 中华人民共和国地貌集编辑委员会.中华人民共和国地貌图[M].北京:科学出版社,2009. Editorial Committee of the Landform Collection of the People's Republic of China. Landform map of the people's

republic of China [M]. Beijing: Science Press, 2009.

- [30] 王朝阳,张军以,李海懿.多方法支持的重庆市土地利用格局时空演化及驱动力[J].水土保持通报,2023,43(1): 104-116.
  - WANG Z Y, ZHANG J Y, LI H Y. Spatio-temporal evolution and driving forces of land use patterns in Chongqing City supported by multiple methods[J].Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1):104-116.
- [31] 袁贞贞,王秋红,王勇,等.多情景模拟下重庆市土地利用变化对生态系统健康的影响[J].生态学报,2023,43 (20):8279-8291.
  - YUAN Z Z, WANG Q H, WANG Y, et al. Impacts of land use change on ecosystem health in Chongqing under multi-scenario simulation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20):8279-8291.
- [32] 王清荣,李阳兵,赵雯欣,等.近 30 年来三峡库区土地利用与生态环境效应研究热点演变及展望:基于 Citespace 的文献可视化分析[J].生态学报,2024,44(5):2159-2172. WANG Q R, LI Y B, ZHAO W X, et al. Evolution and
  - prospect of research hotspots on land use and eco-environmental effects in Three Gorges Reservoir area in recent 30 years—Based on Citespace's literature visualization analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2159-2172.
- [33] 吕霜霜.三峡库区土地利用变化及生态服务价值研究 [D].重庆:西南大学,2019.
  - LÜSS. Study on land use change and ecological service value in Three Gorges Reservoir area [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.