

2000—2020 年喀斯特地区煤矿资源城市生态敏感性的时空演变

杨柳¹, 索萌萌¹, 柴娇娇², 高顺前¹

(1. 贵州大学 公共管理学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 山西鑫盛达土地规划设计咨询有限公司, 山西 太原 030000)

摘要: [目的] 以喀斯特地区典型煤矿资源城市贵州省六盘水市为例, 分析研究区 2000—2020 年生态敏感性时空演变特征, 为喀斯特地区煤矿资源城市的生态保护工作提供科学依据。[方法] 根据研究区实际, 选择遥感生态指数、水土流失敏感性指数、石漠化敏感性指数、景观开发强度指数、碳排放量构建综合生态敏感性指数, 并借助空间自相关分析方法分析六盘水市生态敏感性时空演变特征。[结果] ① 2000—2020 年, 六盘水市极敏感、高度、轻度、中度敏感区域呈波动下降趋势, 不敏感区持续上升, 生态环境明显改善; ② 2000—2020 年六盘水市极敏感、高敏感区空间演变趋势为零散分布在全市, 同时向东南部转移, 并向西北部扩散, 范围持续缩减, 除钟山区南部有轻微扩散外, 其余区域均呈现持续或波动缩减趋势, 环境趋向于改善; ③ 2000—2020 年六盘水市综合生态敏感性 Global Moran's I 分别为 0.525、0.570 和 0.476, 说明六盘水市生态敏感性在空间上呈正相关关系, 且相关性随时间变化而逐渐减弱。LISA 图显示高高、低低聚集区减少, 生态敏感性聚集程度有所降低。[结论] 六盘水市生态敏感性以轻度敏感为主, 主要分布在生态禀赋较好的西北部地区; 极敏感性区域比例较小, 集中于自然条件较脆弱的东南部。随着时间推移, 六盘水市的营造林等工程措施在一定程度上缓解了人类过度干预所带来的环境恶化, 使区域内极敏感、高敏感区范围不断缩减, 生态环境得到显著改善。

关键词: 生态敏感性; 空间自相关; 时空格局; 喀斯特地区; 煤矿资源城市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0338-09

中图分类号: X826

文献参数: 杨柳, 索萌萌, 柴娇娇, 等. 2000—2020 年喀斯特地区煤矿资源城市生态敏感性的时空演变[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 338-346. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.042; Yang Liu, Suo Mengmeng, Chai Jiaojiao, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sensitivity at coal mining cities in a karst region during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 338-346.

Temporal and Spatial Evolution of Ecological Sensitivity at Coal Mining Cities in a Karst Region During 2000—2020

Yang Liu¹, Suo Mengmeng¹, Chai Jiaojiao², Gao Shunqian¹

(1. School of Public Administration, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. Shanxi Xinshengda Land Planning and Design Consulting Co., LTD., Taiyuan, Shanxi 030000, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial evolution characteristics of ecological sensitivity in a typical coal mine resource city (Liupanshui City in Guizhou Province) in a karst region from 2000 to 2020 were analyzed in order to provide a basis for the ecological protection of coal mine resource cities in karst regions. [Methods] We chose a remote sensing ecological index, a water loss and soil erosion sensitivity index, a rocky desertification sensitivity index, a landscape development intensity index, and an index of carbon emissions to build an integrated ecological sensitivity index, and analyzed the ecological sensitivity of Liupanshui City with the aid of spatial autocorrelation analysis. [Results] ① From 2000 to 2020, the extremely sensitive, highly sensitive, mildly sensitive, and moderately sensitive areas in Liupanshui City showed a trend of fluctuation and decline, while the insensitive areas continued to rise. The ecological environment of Liupanshui City improved significantly over time. ② From 2000 to 2020, the spatial evolution trend of

收稿日期: 2021-12-29

修回日期: 2022-02-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“空间公平性视角下贵州贫困山区乡村聚落空间重构研究: 以滇黔桂石漠化区为例”(41861038)

第一作者: 杨柳(1982—), 女(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用规划、数据挖掘等方面的研究。Email: yang_whu.edu@163.com.

通讯作者: 索萌萌(1995—), 女(汉族), 山东省青岛市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用规划。Email: 3088569058@qq.com.

extremely sensitive and highly sensitive areas in Liupanshui City was scattered over the entire city, shifted to the southeast, and spread to the northwest, and the area continued to shrink. Except for the slight spread in the south of Zhongshan District, other areas showed a continuous or fluctuating shrinking trend, and the environment tended to improve. ③ From 2000 to 2020, the Global Moran's I values for Liupanshui City were 0.525, 0.570 and 0.476, respectively, indicating that the ecological sensitivity of Liupanshui City had a positive spatial correlation, and the correlation gradually weakened with time. The LISA diagram showed that the high and low aggregation areas decreased, and the degree of ecological sensitivity aggregation decreased. [Conclusion] The ecological sensitivity of Liupanshui City is mainly mild, mainly distributed in the northwest region with better ecological conditions. The proportion of extremely sensitive areas was small, concentrated in the southeast where the natural conditions are more fragile. With the passage of time, afforestation and other engineering measures in Liupanshui City have alleviated the environmental deterioration caused by excessive human intervention to a certain extent, reducing the area of extremely sensitive and highly sensitive areas in the region and significantly improving the ecological environment.

Keywords: ecological sensitivity; spatial autocorrelation; spatio-temporal pattern; karst area; coal resource city

生态环境敏感性是指生态系统对自然环境演变和人类活动影响的敏感程度,实际是对自然环境变化和人类活动影响下可能发生的生态问题以及对这些问题承受能力的分析^[1]。随着经济发展,资源日趋紧张、环境污染加重,生态保护迫在眉睫。对生态敏感性进行分析,根据评价结果提出建议,可为区域生态保护和国土空间布局提供依据,有利于推动区域生态文明建设和可持续发展,具有重要意义。

目前,国内外学者针对生态敏感性已经开展了众多研究,具体来说主要集中在4个方面:①从研究目的来看,有单一的针对生态敏感性的评价,也有将其与土地利用变化模拟预测^[2]、生态系统服务价值等^[3]内容相结合,为土地利用、生态布局 and 空间规划等提供依据;②从研究对象和研究尺度来看,有针对省、市等^[4]大尺度行政单元,也有对流域^[5]、矿区^[6]、湿地^[7]、公园^[8]、风景区等^[9]中小尺度进行分析评价,涉及对象较多,范围较广;③从评价指标来看,研究区不同,评价对象不同,评价指标也有差异,但均是根据研究区实际情况进行选择;④从评价方法来看,评价因子的确定对于敏感性评价至关重要,比较常用的是层次分析法^[10],也有采用变异系数^[11]、空间距离指数^[12]、最大熵模型等^[13]方法确定评价因子权重。

目前针对生态敏感性的分析大多是单一年份,并且在分析人为活动对其造成的影响方面也存在欠缺。本文以六盘水市为例,分析其2000—2020年生态敏感性演变情况。研究区内喀斯特地貌分布较广,生态环境脆弱,针对区域生态质量情况,引入遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)进行分析,该指数直接从遥感影像中提取与人类活动密切相关的绿色、湿度、干度和热度4个指标,利用主成分分

析将其耦合构建RSEI^[14],更客观、合理;此外,人为活动对环境产生的影响在以往的研究中涉及较少,本文引入景观开发强度指数来表征人类对环境施加压力的程度。

贵州省六盘水市是典型的煤矿资源城市,煤炭储量位居贵州省第一,铁、铝等矿产资源也比较丰富。丰富的煤矿资源是六盘水市产业发展的资源基础,区域内煤炭开采、黑色金属冶炼和压延加工业等在工业中占有重要地位,是六盘水市经济收入的重要来源。然而这种以资源为导向的传统工业和能源消费结构在带来经济收入的同时,也使得区域内二氧化碳排放量较高,随着全球气温上升,碳排放问题也逐渐引起重视,其对生态环境也有重要影响。因此,本研究引入碳排放量对研究区生态敏感性进行分析,以期对六盘水市的生态保护和节能减排提供建议,为喀斯特地区煤炭城市的可持续发展和绿色发展提供科学参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

六盘水市位于贵州省西部,是贵州省的地级市,地理范围为 $104^{\circ}18'20''$ — $105^{\circ}42'50''$ E, $25^{\circ}19'44''$ — $26^{\circ}55'33''$ N,由六枝特区、盘州市、水城区、钟山区4个县级行政区组成,总面积为 9914 km^2 。区域内以山地丘陵为主,地势西北高,东南低,起伏大,地形比较复杂。区内属于季风性湿润气候,年降水量大,局部差异明显。喀斯特地貌是研究区比较独特的地理现象,区内生态环境较为脆弱,水土流失和石漠化现象比较严重。

1.2 数据来源及处理

主要运用DEM数据、Landsat 5TM, Landsat 8OLI遥感影像数据,源于地理空间数据云,为减小

误差,所选影像植被生长情况应该相近,避免因季节差距过大影响评价结果。

因此,本文选择 2001,2009 和 2020 年 4—6 月 3 期影像来进行分析,所选影像时间相近,云量较少,质量良好;地形坡度、地势起伏度数据,利用 DEM 数据在 ArcGIS 中提取;植被覆盖度数据由 Google Earth Engine 平台采用最大值合成法^[15]获取的 NDVI 数据,经像元二分法^[16]处理获得;土地利用数据来自中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),解译精度较高;土壤数据源于中科院南京土壤研究所 1:100 万土壤数据库;降水数据来源于国家地球系统科学数据中心;碳排放量数据来自人为二氧化碳开放数据清单^[17],由于数据获取问题,2020 年采用 2019 年数据进行分析,所有数据统一投影为

WGS_1984_UTM_Zone_48 N,重采样为 30 m×30 m 分辨率。

2 研究方法

2.1 综合生态敏感性指数构建

根据研究区煤矿资源城市的特点以及位于喀斯特地区、生态环境脆弱的实际情况,同时考虑到人为活动对环境的影响,本文选取遥感生态指数、水土流失敏感性指数、石漠化敏感性指数、碳排放量、景观开发强度指数 5 项指标结合变异系数法确定各指标权重,最终构建综合生态敏感性指数,并对六盘水市的生态环境敏感性进行了分析。

2.1.1 各指标选择及计算 各指标选择、定义及计算方法详见表 1。

表 1 生态敏感性指标及其计算

指 标	定义及计算
遥感生态指数 ^[18]	$RSEI=f(NDVI,Wet,LST,NDBSI)$ 。式中:NDVI 为归一化差值植被指数;Wet 为缨帽变换湿度分量;LST 为大气矫正法反演获得的地表温度;NDBSI 由建筑和裸土指数的平均值合成
水土流失敏感性指数 ^[19]	$SS_i=\sqrt{R_i\times K_i\times LS_i\times C_i}$ 。式中:SS _i 为水土流失敏感性指数;R _i 为降雨侵蚀力因子;K _i 为土壤可蚀性因子;LS _i 为地形起伏度;C _i 为地表植被覆盖度
石漠化敏感性指数 ^[20]	$S_i=\sqrt[3]{D_i\times P_i\times C_i}$ 。式中:S _i 为研究区石漠化敏感性指数;D _i 为研究区碳酸岩出露面积比例;P _i 为地形坡度;C _i 为地表植被覆盖度
碳排放量	本研究运用人为二氧化碳开放数据清单中的碳排放量数据,依据碳排放对区域环境造成的影响,将该碳排放量数据分为 5 级,对其进行敏感性分析。
景观开发强度指数	根据 Brown 等 ^[21] 人的研究以及研究区土地利用情况,可以得到研究区 LDI 为:耕地 4.54;林地 1.58;草地 2.77;水域 1.00;建设用地 8.66;未利用土地 6.92,根据 LDI 指数对相对应的土地利用类型进行赋值,得到区域景观开发强度分布。

2.1.2 变异系数法确权 变异系数法是一种基于指标已有数据求其权重的客观确权方式^[22]。通常,指标数据的属性值相差越大,说明该指标包含的信息量越大,在评价中越重要,因此,可以通过变异系数法,根据指标包含的信息量大小确定其权重。其公式为:

$$CV_i = \sigma_i / \bar{x}_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

式中:CV_i 是第 i 项指标的变异系数;σ_i 是第 i 项指标的标准差; \bar{x} 是第 i 项指标的平均数。

其权重公式为:

$$W_i = V_i / \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

式中:W_i 是第 i 项指标的权重;V_i 是第 i 项指标的变异系数。

2.1.3 综合生态敏感性计算 根据单指标生态敏感性和变异系数法确定的权重计算综合生态敏感性,其公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n W_i F_i \quad (3)$$

式中:P 为综合生态环境敏感性值;W_i 为变异系数法获取的第 i 项指标的权重值;F_i 为第 i 项指标敏感性值;n 为指标个数。

2.2 空间自相关

为进一步把握研究区内生态敏感性分布的空间规律,本文引入空间自相关对生态敏感性的空间分异特征及领域关系进行探究,该方法通过全局自相关和局部自相关对空间上相近地域的对象其属性相似程度以及其在空间上的聚集程度进行描述,以客观分析研究对象的空间分布情况。计算公式^[23]为:

Global Moran's I 计算:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Local Moran's I 计算:

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (5)$$

式中:I 表示 Moran's I 指数;x_i,x_j 代表的是第 i

个、第 j 个格网的综合生态敏感性指数平均值; \bar{x} 表示全部格网的综合生态敏感性平均值; W_{ij} 表示空间权重矩阵; S 表示空间权重矩阵各因素之和。

3 结果与分析

3.1 单指标时空演变分析

将各指标进行归一化处理,根据发生生态问题的可能性以及对外界施加压力的承受程度,将各指标按自然断点法分为5级,对其敏感性进行分析。

3.1.1 生态质量敏感性分析 通过遥感生态指数评价区域环境,得到研究区生态质量情况。通常,生态质量越差的地区由于自然条件比较恶劣或者因人类活动的过度干预,产生生态问题的可能性越大,敏感性越高。由研究结果可知(图1),区内不敏感区呈上升趋势,占总面积的比重由19.75%升至23.87%;轻度、高度敏感区呈波动下降趋势;中度敏感区持续下降,缩减了396.19 km²;极敏感区波动上升,但上升幅度较小,总体来看,研究区内敏感性较高的区域缩减

幅度较大,表明区域内生态环境明显改善。从空间分布来看,极敏感、高敏感区主要集中在北部和南部山区,六枝特区等山势低缓地区生态质量敏感性相对较低,这说明自然条件越好的区域发生生态问题的可能性越小,其生态质量越高、敏感性越低;反之亦然。2000—2020年,六盘水市极敏感和高度敏感区呈现扩散趋势,从南部向西部地区转移,其中盘州市和钟山区变动较大。盘州市极敏感、高度敏感性区不断缩减,主要原因在于早期盘州市传统资源产业基础良好,虹吸效应的催动导致区域高耗能产业不断聚集,煤炭开采等人为活动激增,加剧了生态环境的破坏。而近几年盘州市生态保护工作的积极推进以及传统资源产业的转型使当地生态环境质量得到大幅改善,敏感性有所降低。钟山区极敏感、高敏感区则表现出先缩减后增加的态势,整合煤矿企业等一系列措施对早期区域生态环境的改善起到了积极作用,但随着行政区划调整,区域开发力度加大,导致北部地区敏感性增加。

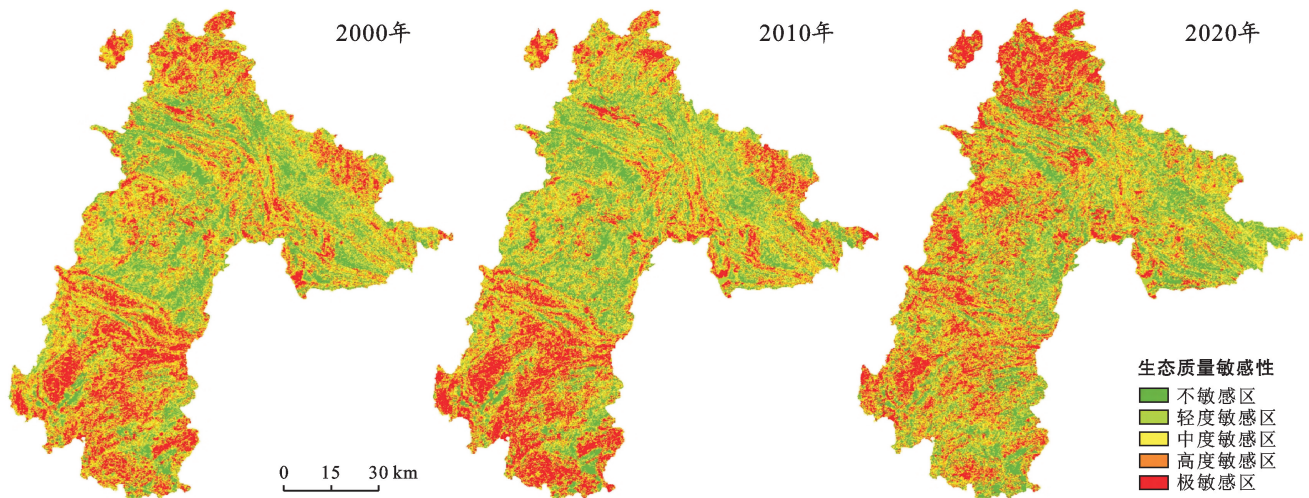


图1 六盘水市2000—2020年生态质量敏感性

3.1.2 水土流失敏感性分析 通常水土流失敏感性指数越高的区域,外界环境发生改变或者人为施加压力时,引发水土流失现象的可能性越高、敏感性越强。由研究结果可知(图2),区域内轻度、中度敏感区所占比例高,极敏感性所占比例最低。2000—2020年不敏感区呈波动下降趋势,轻度敏感区持续上升,中度敏感区所占比例由28.25%波动下降至24.56%,高敏感性区域波动上升,极敏感区持续下降,缩减136.31 km²,总体上,易发生水土流失的区域有所减少,说明六盘水市采取的营造林等治理水土流失的措施效果显著。从空间上看,敏感性较高的区域主要集

中在六枝特区的南部、盘州市的东北部、水城区的东南部,这些区域降水丰富,有众多河流流经侵蚀,地势起伏大,气候和地形地势条件为水土流失的发生提供了动力,使得区域在受到外界施加的压力时,易引发水土流失,敏感性较强;而钟山区、盘州市西南部大部分地区处于不敏感和轻度敏感区,这些地区降水侵蚀相对较小,敏感性也相对较低。2000—2020年研究期内极敏感、高敏感区明显缩减,水土流失现象显著改善。这是因为近年来六盘水市通过对采矿等活动实行严格控制,尽可能地减少人为活动对植被的破坏,同时通过增加营造林等方式提高植被覆盖率,进

一步提高水源涵养能力,改善区域自然条件,减少了水土流失的可能性。但水城区和钟山区内较易发生水土流失的高敏感区域有扩散趋势,主要是区域内经

济活动强度加大,使得区域植被遭到破坏的程度增加,导致引发水土流失的可能性升高,在今后的开发利用中需要注意水土保持。

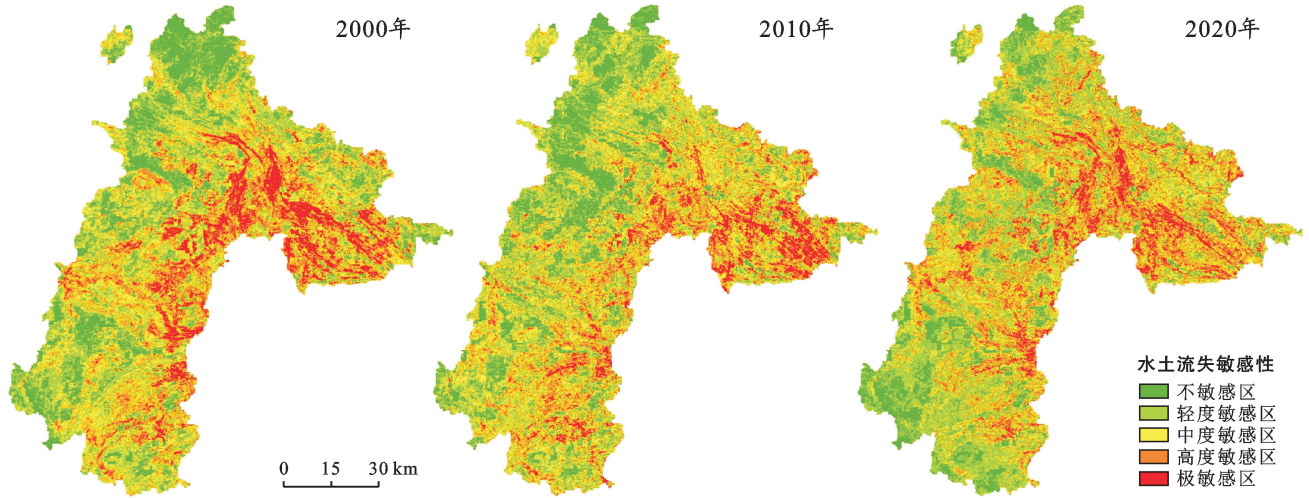


图 2 六盘水市 2000—2020 年水土流失敏感性

3.1.3 石漠化敏感性分析 当外界环境承受的压力增大、生态系统遭到破坏时,石漠化指数高的区域易引发石漠化问题,敏感性较高。由图 3 可知,该市大部分区域处于不敏感、轻度敏感区,极敏感区所占比例较低。

从时空变化来看,2000—2020 年,研究区内不敏感区、轻度敏感呈波动上升趋势,在空间上呈现出大面积的规则分布;中度敏感表现为波动下降,缩减 247.41 km²;极敏感、高敏感区所占比例较小,零散分布在各个区人口比较密集、水土流失频发的地区,这些地区由于土层较薄,受降水侵蚀大,更易引发水土流失,使得区域自然条件较差,又因人口较为密集,人为活动对环境施加的压力较大,对周边环境造成一定

程度破坏,因而敏感性较高。随着时间演变,极敏感、高敏感区不断缩减,呈持续下降趋势,占总面积的比重由 2.41%,9.17%下降到 1.56%,5.57%。总体上看区域内大部分区域处于不敏感和轻度敏感状态,极敏感、高敏感、中度敏感程度较低且不断降低,易发生石漠化的区域不断减少,这表明六盘水市石漠化治理成效显著。主要是区域内严格控制煤炭开采等人为活动,使得环境遭到人为破坏的程度减轻,避免了研究区石漠化现象进一步恶化;同时石漠化治理工程的实施和绿地面积的持续增加在提高植被覆盖率的同时,改善了区域自然环境及土壤条件,增加了土层厚度,减轻了碳酸盐岩裸露的可能性,使得易发生石漠化的区域明显减少。

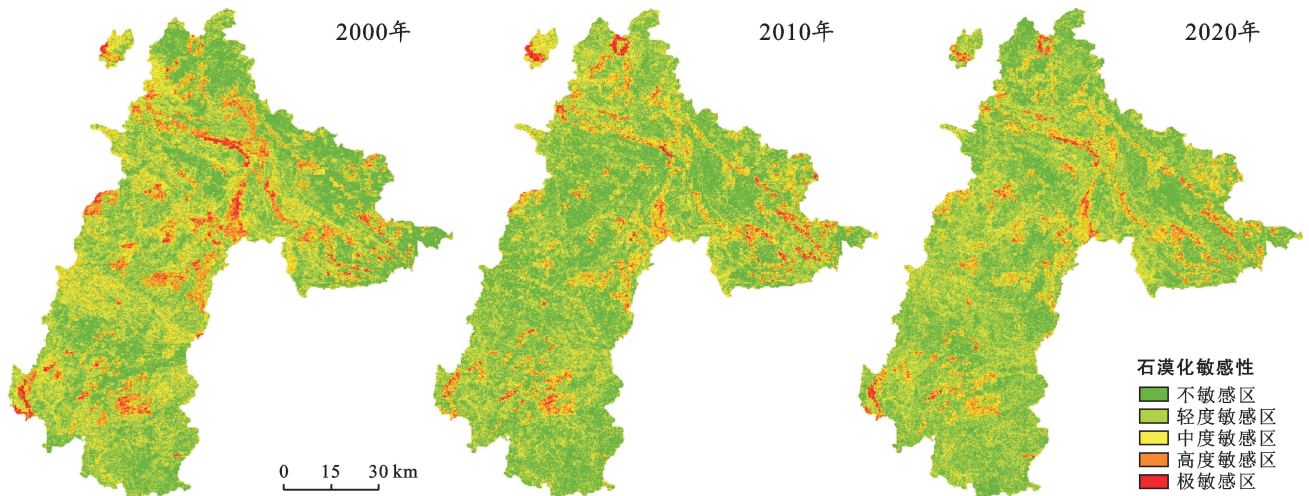


图 3 六盘水市 2000—2020 年石漠化敏感性

3.1.4 碳排放敏感性分析 通常来说,区域内传统产业聚集或者人口密集的地区碳排放量高,引发生态问题的可能性高,敏感性强;反之亦然。由研究可知(图4),全市各区大部分地区处于不敏感区,其所占比例最高;轻度敏感次之,主要分布在钟山区南部、水城区北部、盘州市西部、六枝特区东部;中度敏感主要分布在钟山区、盘州市西南部;极敏感、高度敏感区零星分布在盘州市和水城区。

2000—2010年研究区内轻度敏感区大幅度缩减,主要是因为六盘水市是典型的煤矿资源城市,以煤炭开采等传统资源型产业为主,较为发达的产业基础吸引了区域劳动力的持续注入,使得产业和人口在此形成聚集,在产业发展和人类活动过程中排放了大

量二氧化碳,周边环境因此遭到了一定程度的破坏,随着环境污染加剧,节能减排观念形成,六盘水市调整以传统资源为主导的产业结构,发展节能环保的新兴产业,因此,全市各区轻度敏感区均有不同程度的缩减。2010—2020年,研究区人为活动造成的碳排放量增幅较早期出现明显降低且空间分布上较为稳定,主要原因在于为响应国家“十二五”规划期间明确提出的节能减排政策,进一步控制温室气体的排放,六盘水市制定了节能减排和控制温室气体的行动方案,鼓励企业研发使用技术,提高利用率;同时积极推动能源结构优化,控制高污染能源的消费量。通过这些措施,六盘水市有效遏制了碳排放量的过快增长,敏感性逐渐降低。

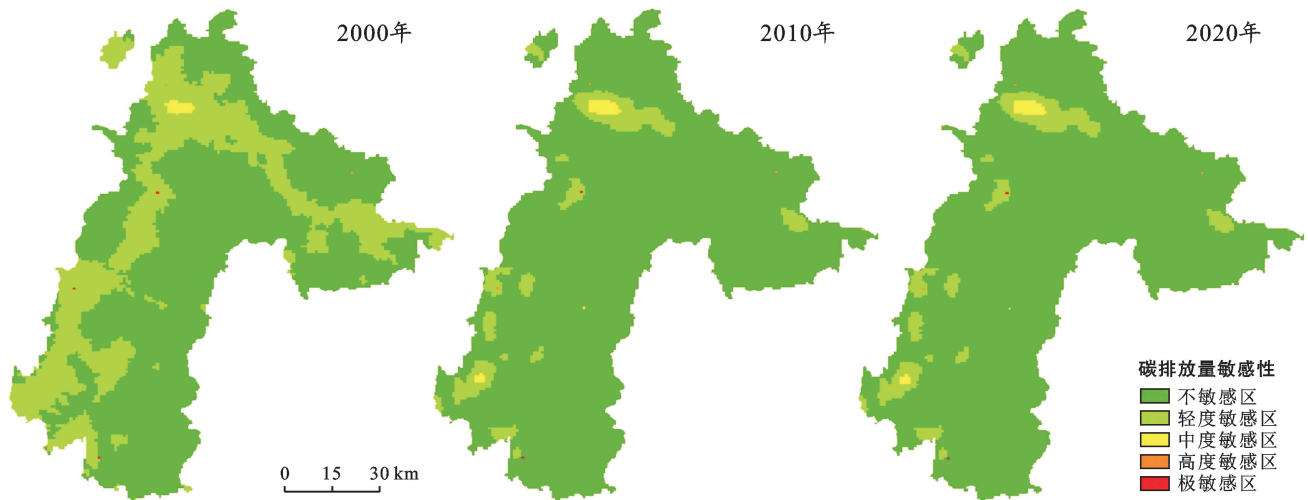


图4 六盘水市2000—2020年碳排放量敏感性

3.1.5 景观开发强度敏感性分析 景观开发强度指数越大,说明在开发利用土地的过程中消耗的不可更新能源越多,人类对土地的开发利用强度越大,对环境施加的压力越大,引发生态问题的可能性越高,敏感性越强。由研究可知(图5),不敏感和轻度敏感所占比例较大,遍布全市,极敏感、高敏感区所占比例较小且呈零星分布。从时空变化上看,2000—2020年,研究区域内各敏感性等级变化幅度相对稳定,空间上变动较小,高强度敏感区域主要集中在钟山区、盘州市和六枝特区,这些地区多为建设用地,区域内人口密集,经济活动频繁,开发利用强度较大,已经形成产业或人口聚集,对土地的利用强度较高,对生态环境施加的压力较大,在开发过程中引发生态问题的可能性高,因此生态敏感性较强。中度敏感区主要分布在六枝特区西南部,区域内易受降水侵蚀,在今后对土地进行开发利用时应注意对环境的保护;轻度敏感区分布较广,不敏感区次之,钟山区、盘州市、六枝特区均有分布,这些区域林地等自然程度较高的土地利用

类型较多,开发程度相对较低,对生态的破坏较小,敏感性较低,产生生态问题的可能性较小。特别指出的是,钟山区高敏感区范围略有扩大,由于该地区地势较高,在今后的开发利用过程中应注意水土保持,避免引发更严重的生态问题。

3.2 综合生态敏感性时空演变

将单指标敏感性分析结果与变异系数法所得指标权重加权叠加得到综合生态敏感性结果,按照自然断点法进行分区统计。由研究可知(图6,表2),区域内轻度敏感所占比例最高,极敏感所占比例最小。从时空变化结果来看,综合生态极敏感区2000—2020年变化趋势呈V形,2000—2010年呈减少趋势,下降1.95%,主要集中在水城区东部以及盘州市中部地区,这主要归结于产业结构的转型所带来的环境质量的改善以及碳排放量的降低;2010—2020年又呈现上升趋势,增加1%,虽有增加,但增速较缓。2000—2010年,高敏感区域由1659.47 km²减少至1261.05 km²,缩减面积较大,空间变化规律与极敏

感区域类似;2010—2020 年回升至 1 340.71 km²,且集中在钟山区,主要是因为该区域煤矿资源比较丰富,是重要的矿产品加工基地,同时空间边界的调整使得开发力度加大,导致区域生态脆弱性及景观开发的强度指数有所上升,对环境施加的压力增加,敏感性在一定程度上升高。但是近年来随着产业、环境方面的趋利政策,二氧化碳在一定程度上得到控制,碳排放量有所下降,因此,尽管高敏感区域有所增加,但增幅较小,整体上仍然呈波动下降趋势。中度敏感变化趋势与极敏感、高敏感区相似,呈波动下降态势,区

域内极敏感、高敏感、中度敏感区明显减少且涉及范围较广,说明通过优化产业结构、提高营造林等措施,六盘水市环境明显改善,发生生态问题的可能性降低,敏感性降低。轻度敏感 2000—2020 年变化幅度呈倒 V 形,即先于 2000—2010 年增加,后于 2010—2020 年下降;不敏感区域则持续增加,且增幅较大。总体来说区域生态环境明显改善,质量不断提高,说明六盘水市在生态文明大背景下,在发展经济的同时注重生态保护,转变依靠资源的传统发展方向,加速产业和能源结构调整,努力做到绿色、可持续发展。

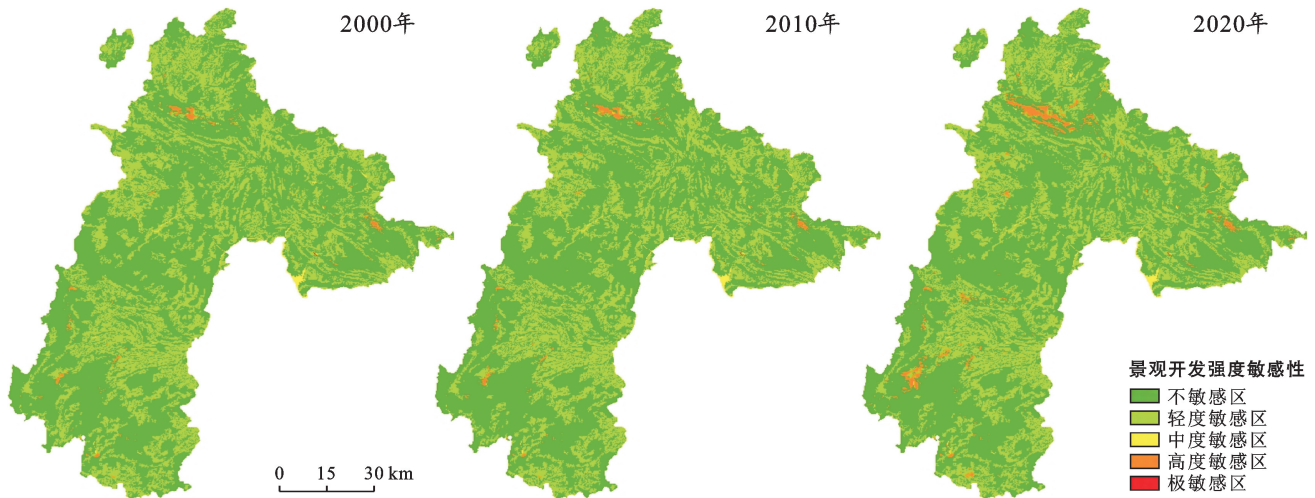


图 5 六盘水市 2000—2020 年景观开发强度敏感性

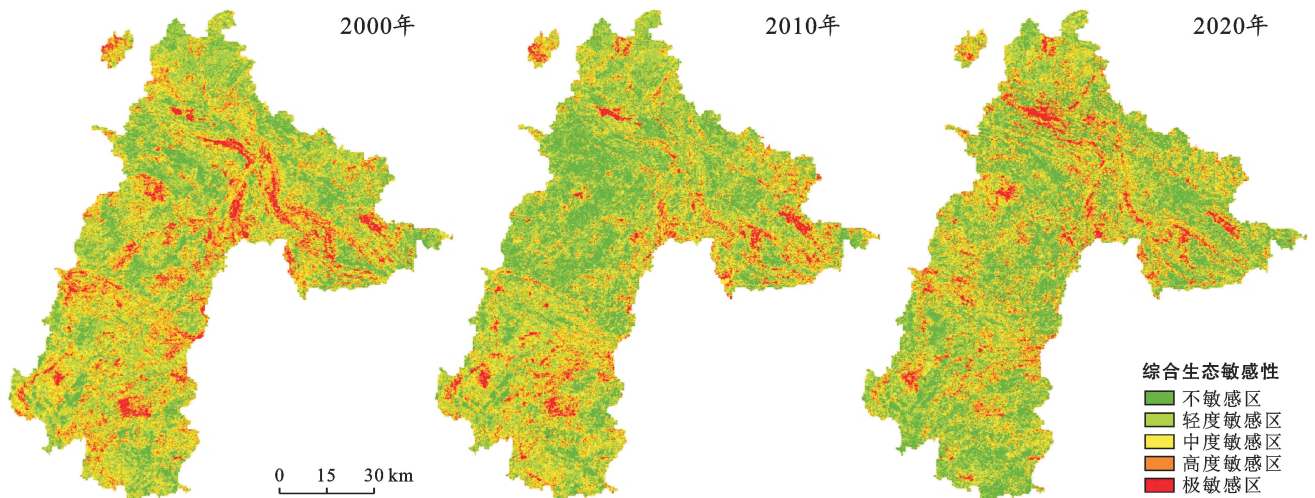


图 6 六盘水市 2000—2020 综合生态敏感性

表 2 六盘水市综合生态敏感性分区统计结果

敏感性分区	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例%	面积/km ²	比例%	面积/km ²	比例%
不敏感	2 105.76	21.24	2 851.92	28.77	3 246.38	32.75
轻度敏感	2 963.71	29.89	3 196.18	32.24	2 575.63	25.98
中度敏感	2 523.26	25.45	2 135.44	21.54	2 182.86	22.02
高度敏感	1 659.47	16.74	1 261.05	12.72	1 340.71	13.52
极敏感	661.81	6.68	469.41	4.73	568.43	5.73

3.3 空间自相关分析

全局自相关是对研究对象在空间上是否具有相关性进行分析,局部自相关则是对具有相关关系的研究对象在空间上是否聚集以及聚集程度进行分析。

3.3.1 基于 Global Moran's I 的空间相关性分析

Global Moran's I 是对研究对象与相邻对象的属性在空间上是否具有相关性的衡量,其范围在 $-1 \sim 1$, Global Moran's $I > 0$,则表示研究对象与邻近对象在空间上呈正相关关系,越接近 1,相关性越显著,聚集程度越高;Global Moran's $I < 0$,表示研究对象与邻近对象在空间上存在负相关关系,离 -1 越近,说明研究对象与邻近对象的差异性越大,越分散;Global Moran's $I = 0$,说明研究对象在空间上呈随机分布状态。利用 Geoda 对 2000,2010 和 2020 年六盘水市综合生态敏感性平均值进行全局自相关分析,得到的 Global Moran's I 分别为 0.525,0.570 和 0.476,均大于 0,说明六盘水市的生态敏感性在空间上具有正相关关系,从时间上来看,2000—2010 年 Global Moran's I 缓慢增加,2010—2020 年则呈明显下降趋势,整体来看,2000—2020 年六盘水市生态敏感性 Global Moran's I 呈波动下降趋势,说明六盘水市生态敏感性的正相关关系随时间演变逐渐减弱。

3.3.2 基于 Local Moran's I 的空间集聚分析

Moran's I 衡量的是研究对象在空间上是否聚集以及聚集程度,可以进一步分析六盘水市生态敏感性空间分布情况。

运用 Geoda 对研究区进行 Local Moran's I 计算,在此基础上进行空间聚类,得到六盘水市 2000—2020 年生态敏感性 LISA 结果,不显著、低—低、低—高、高一低、高一高聚集区分布情况如图 7 所示。由研究可知,研究区内高一高、低—低区聚集较为明显,高一低、低—高异常聚集区范围较小。高一高聚集区域主要集中在东南部地区,这些区域降水侵蚀力大,土壤可侵蚀性强,容易受侵蚀而引发水土流失、石漠化等生态问题,此外,这些地区人口比较密集,人为活动对生态环境也会造成一定程度破坏,因此区域敏感性较强;低—低聚集区在西北部地区比较集中,这些区域受降水侵蚀小,土壤相对东南部地区来说具有一定的抗侵蚀性,环境相对来说较好,敏感性较低。随着时间演变,高高聚集区由 2000 年的 230 个格网升至 2010 年的 255 个,到 2020 年又降至 204 个,整体来看,高高聚集区呈波动减少趋势;低—低聚集区与高高聚集区变化趋势相似,2000—2020 年由 251 个格网波动降至 212 个,从高高、低—低聚集区变化可看出六盘水市的综合生态敏感性聚集程度逐渐减弱,逐渐向离散化发展。

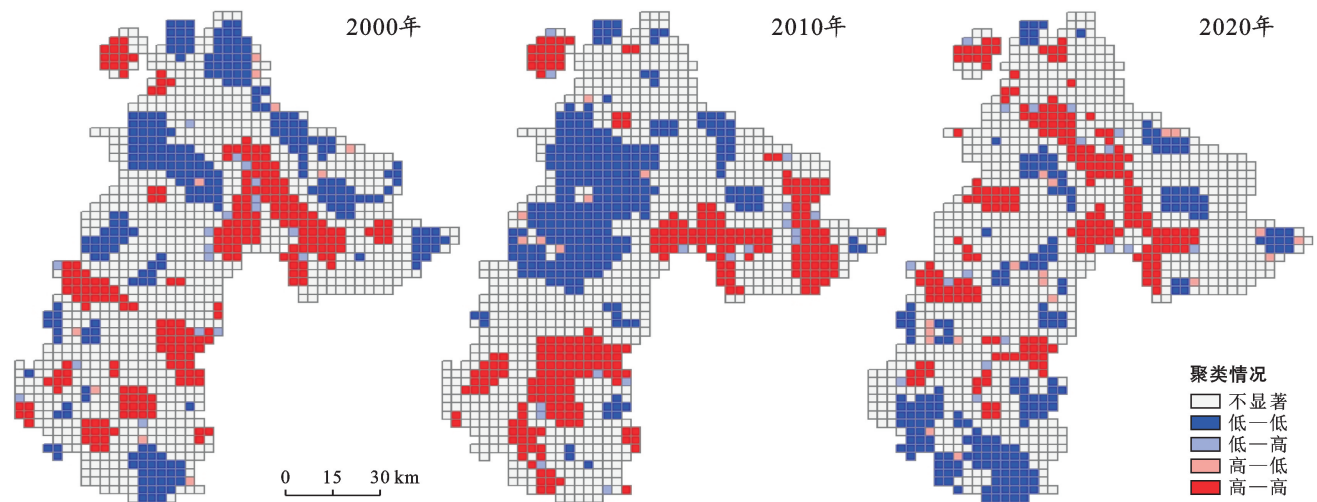


图7 六盘水市 2000—2020 年生态敏感性 LISA 聚类图

4 讨论与结论

4.1 结论

(1) 从时间上来看,极敏感、高度、中度、轻度敏感区虽有波动,但整体呈下降趋势,不敏感区呈持续上升趋势,整体来看,2000—2020 年,六盘水市生态环境明显改善,生态质量明显提高,说明六盘水市积

极推进生态文明建设,采取的营造林等水土流失、石漠化治理措施,调整能源结构等节能减排工作成效明显。

(2) 从空间来看,敏感性强的地区主要分布在东南部地区,这些区域降水量大且季节分配不均,易受降水侵蚀,区域内北盘江等河流流经,又加剧了侵蚀现象,导致引发水土流失等问题的可能性高。西北部

环境较好,敏感性较低。2000—2020年,六盘州市极敏感、高度敏感区由东南部向西北方向转移,盘州市、六枝特区、水城区内高敏感区均呈缩减趋势,钟山区南部则呈略微扩张态势。对于敏感性较高的区域,需要注意保护生态,进行合理开发,减少人为活动对植被造成的破坏,也可以通过营造林来提高植被覆盖率,提高保持水土的能力,改善自然环境条件。

(3) 六盘水市的生态敏感性在空间上具有明显的正相关性和聚集特征,随着时间演变,这种正相关关系呈波动减弱趋势,高高聚集区明显减少,聚集程度逐渐降低,环境明显改善。

4.2 讨论

本研究从自然、人文两个方面选取指标构建综合生态敏感性指数并结合空间自相关来分析 2000—2020 年六盘水市的生态敏感性演变特点。在指标的选取上,从节能减排背景下传统资源型城市可持续发展的角度出发,考虑了区域资源特点和当前政策规定,选取碳排放量指标;同时,考虑到区域环境脆弱,为客观分析区域生态质量,选取遥感生态指数;而对于人为活动的干扰则引入景观开发强度指数来表示人类对土地利用的强度。评价指标的选择既符合当前需要又考虑了区域特点,既考虑了自然因素又考虑了人类活动,更客观、更切合实际地反映了六盘水市长时段生态敏感性演变趋势。但由于区域地形比较复杂,获取连续的生长季影像有一定难度,因此,所得到的结果可能存在误差。此外,景观开发强度方法中,Brown 提出的土地利用类型对应的 LDI 指数在不同区域情况不同,今后还需进一步深化研究。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 李益敏,管成文,郭丽琴,等.基于生态敏感性分析的江川区土地利用空间格局优化配置[J].农业工程学报,2018,34(20):267-276,316.
- [3] 张慧,邱凯玉,王宇瑶,等.农业主产区土地生态安全格局构建:以克东县为例[J].水土保持研究,2021,28(6):274-282.
- [4] 李怡,赵小敏,郭熙,等.江西省南昌市生态敏感性空间分异研究[J].中国农业大学学报,2020,25(10):65-76.
- [5] 张广创,王杰,刘东伟,等.基于 GIS 的锡尔河中游生态敏感性分析与评价[J].干旱区研究,2020,37(2):506-513.
- [6] 刘炳攸,汪结明,彭文罡. GIS 平台下的重金属矿区生态敏感性可视化评价[J].环境科学与技术,2020,43(5):164-170.
- [7] 丁徽,赵小敏,郭熙,等.江西省鄱阳湖区生态敏感性评价[J].水土保持研究,2020,27(1):257-264.
- [8] 王佳利,胡希军,陈存友.基于 GIS 的上杭县袍岭山地公园生态敏感性评价研究[J].林业资源管理,2019(1):85-92.
- [9] 张蜜,陈存友,胡希军.苍南县玉苍山风景区生态敏感性评价[J].林业资源管理,2019(4):92-100,150.
- [10] 张寒,王浩程,王琳.基于 ArcGIS 的山东省潍坊市蔡家沟村生态敏感性差异分析[J].山东农业科学,2020,52(5):92-99.
- [11] 严军,王婷,秦珏.基于变异系数法的马鞍山江心洲生态敏感性定量研究[J].生态科学,2020,39(2):124-132.
- [12] 杨蕴雪,张艳芳.基于空间距离指数的延河流域生态敏感性时空演变特征[J].自然资源遥感,2021,33(3):229-237.
- [13] 张怡,杨羽佳,杨朝辉.2017 年苏州市典型湖泊的生态敏感性评价[J].湿地科学,2021,19(2):239-246.
- [14] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- [15] 张乐艺,李霞,冯京辉,等.2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J].水土保持通报,2021,41(5):276-286.
- [16] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.
- [17] Oda T, Maksyutov S. ODIAC Fossil Fuel CO₂ Emissions Dataset, Center for Global Environmental Research [M]. Japan: National Institute for Environmental Studies, 2015.
- [18] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- [19] 高梦雯,胡业翠,李向,等.基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建:以广西河池为例[J].生态学报,2021,41(7):2596-2608.
- [20] 闫利会,周忠发,谢雅婷,等.贵州高原石漠化敏感性与宏观地貌的空间关联分析[J].中国岩溶,2018,37(3):400-407.
- [21] Brown M T, Vivas M B. Landscape development intensity index [J]. Environmental monitoring and assessment, 2005, 101(1): 289-309.
- [22] 陈红光,李晓宁,李晨洋.基于变异系数熵权法的水资源系统恢复力评价:以黑龙江省 2007—2016 年水资源情况为例[J].生态经济,2021,37(1):179-184.
- [23] 王贝贝,丁明军,管琪卉,等.基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J].生态学报,2019,39(15):5460-5472.