

引用格式:王钰,胡宝清.西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究[J].地球信息科学学报,2018,20(7):947-956. [Wang Y, Hu B Q. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability of Xijiang river in Guangxi and its driving mechanism based on GIS[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(7):947-956.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170633

西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究

王钰,胡宝清*

1. 广西师范学院 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室 南宁 530001; 2. 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001; 3. 广西师范学院 地理科学与规划学院 南宁 530001

Spatial and Temporal Differentiation of Ecological Vulnerability of Xijiang River in Guangxi and Its Driving Mechanism

WANG Yu, HU Baoqing*

1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Guangxi Teachers Education University), Ministry of Education, Nanning 530001, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning 530001, China; 3. School of Geography and Planning, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China

Abstract: As a hydrologic unit with dense population, abundant resource and intensive capital, the stability of ecosystem structure of a basin lays the foundation of regional economy's development. Influenced by ecosystem's evolution together with human being's activities, the basin environment becomes more and more sensitive and vulnerable. In case of Xijiang River in Guangxi, the thesis is to make an analysis on the cause of its ecological vulnerability and construct evaluation indexes system with eleven indices under the framework of sensitivity- pressure- recovery. Supported by GIS technology, the ecological vulnerability index (EVI) was calculated and analyzed by Principal Component Analysis and difference method, which probes into the spatial and temporal characteristics of ecological vulnerability change from 2000 to 2010. Based on the factor and the interaction detect modules of geographical detector, it aims to analyze the explanatory power of impact factors on ecological vulnerability and the driving forces of factor interaction to the changes of ecological vulnerability in the basin. The results are as following: from 2000 to 2010, the ecological vulnerability index means kept at 0.69 for years, which was at moderate vulnerability. Spatially, the central basin is more sensitive than the surround area showing a declining trend from center to suburbs. The maximum of the average ecological vulnerability composite index of the whole basin for 2000-2010, is 3.40 at Guigang City. The minimum is 2.23 at Baise City. During the past ten years, the ecological fragility of the basin showed a slight deterioration. In year 2005, central and eastern parts of the basin were influenced by high temperature, which led to the higher ecological vulnerability comprehensive index in 2005 than other years. The order of the explanatory power intensity of the six factors on the ecological vulnerability is as follows: biological abundance index (0.475) >

收稿日期 2017-12-26;修回日期:2018-02-06.

基金项目:国家自然科学基金项目(41661021、41361022);广西自然基金创新团队项目(2016JJF15001);广西科技开发项目(14125008-2-24)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41661021, 41361022; Guangxi Natural Fund Innovative Team Project, No.2016JJF15001; Guangxi Science and Technology Development Project, No.14125008-2-24.]

作者简介:王钰(1993-),女,广西北海人,硕士生,研究方向为脆弱性环境演变与生态安全。E-mail: wangyu175@163.com

*通讯作者:胡宝清(1966-),男,江西临川人,教授,博士,主要从事脆弱环境演变与整治研究。E-mail: h bq1230@gxtc.edu.cn

temperature at high temperature season (0.340) > vegetation coverage (0.211) > NPP (0.183) > rainfall erosivity (0.098) > Rainfall in flood season (0.030), and the explanatory power on results will be strengthened by factors cooperative interaction.

Key words: ecological vulnerability; geographical detector; spatial and temporal differentiation; driving mechanism; Xijiang River in Guangxi

***Corresponding author:** HU Baoqing, E-mail: hbq1230@gxgc.edu.cn

摘要 流域作为人口、资源、资本都相对集中的水文单元,其生态系统结构的稳定性是区域社会经济发展的基础。流域在生态系统演变及人类频繁活动的共同胁迫下,生境敏感性增强,脆弱易损。本文以广西西江流域为例,通过对其生态脆弱性成因机制分析,依循“敏感性-压力度-恢复力”评估框架,选取11个指标构建完成流域生态脆弱性评价指标体系,以GIS技术为支撑,采用空间主成分分析法和差值法对生态脆弱性指数进行计算与分析,探究2000–2010年广西西江流域生态脆弱性时空变化特征。基于地理探测器的因子探测和交互探测模块分析各影响因子对流域生态脆弱性结果的解释力及因子交互作用对流域生境脆弱性变化的驱动机制。结果表明:① 2000–2010年,广西西江流域生态脆弱性指数多年平均值为0.69,整体处于中度脆弱状态。空间上,流域生态脆弱性表现为中部高于四周,由城市核心区往外逐步减弱的格局特征,研究时段内流域生态脆弱性综合指数多年平均值最大的为贵港市(3.40),最小的为百色市(2.23);时间上,10年间,流域整体生态脆弱性呈现轻微恶化的趋势,2005年流域中部及东部地区受高温影响,导致2005年流域生态脆弱性指数整体高于其他两年;② 6个因子对流域生态脆弱性的解释力强度为生物丰度指数(0.475) > 高温季节温度(0.340) > 植被覆盖度(0.211) > NPP(0.183) > 降雨侵蚀力(0.098) > 汛期降雨量(0.030),因子交互协同作用后对结果解释力增强。

关键词:生态脆弱性;地理探测器;时空分异;驱动机制;广西西江流域

1 引言

自20世纪初期Clements将Ecotone概念引入生态学开始,20世纪60年代的国际生物学计划(IBP)、70年代的人与生物圈计划(MAB)、80年代的国际地圈生物圈计划(IGBP)、21世纪初期政府间气候变化专业委员会(IPCC)发表的《气候变化、影响、适应和脆弱性报告》,生态脆弱性都是研究热点,该理论经过科学研究的不断深化,概念逐渐清晰,研究内容不断深化^[1–3]。生态脆弱性是指在一定时空尺度内,生态环境在某种或多种自然及人类活动压力下所表现出来的易变性,它是自然属性和人类活动共同作用的结果^[4–5],这种变化往往会向不适宜利用的方向发展,主要体现了生态系统的不稳定性和对外界干扰的敏感性,是生态系统的一种固有属性^[6]。当自然因素和人类活动的不良影响超过生境的承受力及生态阈限,导致脆弱生境出现^[7]。对区域生态系统脆弱性进行评价,不仅能正确认识区域生境脆弱状况,掌控其空间分布差异,还可促进资源有效利用,对维持系统可持续发展具有实际意义^[8–9]。迄今为止,国内外学者对生态脆弱性进行了广泛而深入的研究,在研究区域方面,涉及县、省、流域等多个尺度。在评价方法方面,形成了主成分分析法^[5,9–11]、层次分析法^[12–13]、模糊评价法^[14–15]等多种

评价方法。总体来说,在3S技术的支持下,生态脆弱性评价空间尺度不断扩大,评价单元日渐精细,评价方法多样。然而,当前的生态脆弱性评价还存在一些局限性,如对同一区域生态脆弱性的时空分异特征研究较少,多偏向于单一时间尺度的评价;评价区域主要以行政单元划分,对以自然边界划定的流域为研究区域的研究有待深化。

西江作为连接沿海发达地区和大西南的黄金水道,是广西的重要水系,境内河长869 km,流域内以山地丘陵性盆地地貌为主,岩溶地貌发育^[16–17]。随着社会经济的高速发展和人口的急剧增加,资源需求增加,无序过度开发严重,生物多样性锐减,水土流失,环境污染,生态系统脆弱易损。通过查阅文献可知,目前各方学者对广西西江流域的研究着重于暴雨洪涝分析^[18–20]、经济协调发展研究^[21–22]及民俗文化探索^[23],对流域脆弱生境方面的研究内容和深度还需拓展,研究成果较少。在此基础上,流域生态脆弱性评价,具有一定的创新性,并对广西西江流域的综合治理和可持续性发展具有现实意义。

本文以广西西江流域为例,景观生态学、自然地理学、数理统计等多学科融合,采用GIS技术、空间主成分分析、地理探测器模型分析等交叉研究方法,以地形地貌、土壤植被、水文气象、经济发展等为主要表征,分析流域生态脆弱性程度及时空分异

特征,对流域脆弱生境的主要驱动因素进行探测,通过对流域脆弱生境时空变化的综合分析,对流域脆弱生境驱动机制的探究,阐明流域环境演变过程,为广西西江流域生态环境保护和恢复治理提供理论基础和技术支持。

2 研究区概况

西江是华南地区最长的河流,珠江水系中最长的河流(图1)。发源于云南,流经广西,在广东佛山三水与东江、北江交汇。其干流在江门、中山注入南海,与东江、北江合称珠江。广西西江流域位于 $104^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 之间。西江流域广西段主要支流有南盘江、红水河、郁江、柳江、桂江等,流域集水面积共计 20.24万 km^2 ,水资源总量约占广西水资源总量的85.5%。流域属亚热带季风气候,年均气温在 $16.5\sim 23.1^{\circ}\text{C}$ 之间,年均降水量为 $1080\sim 2760\text{ mm}$ 。土壤类型主要以红壤、赤红壤、水稻土为主。植被类型主要有针叶林、灌丛,及水稻、大豆、甘蔗、油茶等栽培植物。

人类频繁活动使流域生态系统胁迫不断增加,广西西江流域水环境遭到开发式破坏,工业废水废物的过量排放超过环境自净能力,河流污染,植被被破坏,水源涵养能力持续下滑,自然灾害频发。西江经济带的迅猛发展及西江黄金水道建设破坏了鱼类生境,造成生态系统脆弱易损。种种问题将会导致流域综合承载力降低,脆弱性增强。

3 数据与方法

3.1 数据来源与处理

本研究主要用到的数据有:气象数据、多源遥感数据、其他数据等。

气象数据主要来源于中国气象科学数据共享服务平台(<http://cdc.cma.gov.cn/>),本研究选取广西西江流域内15个气象站点2000、2005和2010年降雨和气温观测值数据。

多源遥感数据主要包括广西西江流域2000、2005和2010年的MOD13Q1 250M植被指数16d合成产品和流域ASTER GDEM V2 30 m分辨率数字高程数据,数据主要来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS) (<http://glovis.usgs.gov/>)。

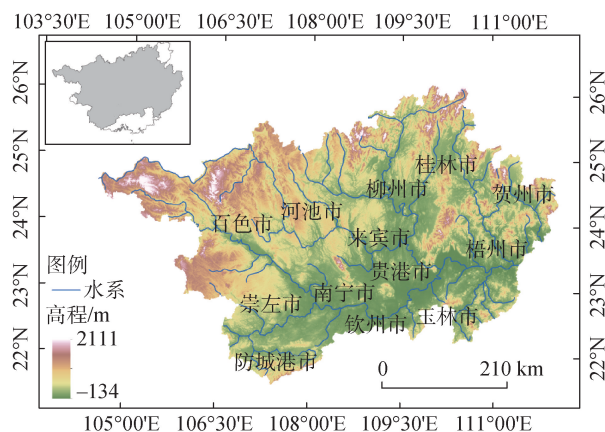


图1 研究区地势状况图

Fig.1 Topography of the study area

其他数据主要包括广西西江流域2000、2005和2010年土地利用现状遥感监测数据,人口和GDP空间化数据以及植被净初级生产力(NPP)数据等,数据主要来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

数据预处理主要包括遥感数据、气象站点监测数据、土地利用数据等的处理。① 遥感数据以MOD13Q1 250 m植被指数16 d合成产品为基础,采用MODIS Reprojection Tool工具对数据进行镶嵌合成转投影,并通过像元二分模型利用ArcGIS 10.1软件计算植被覆盖度;② 气象站点监测数据通过导入EXCEL进行统计整理后利用ArcGIS 10.1软件采用反比距离权重插值法进行空间插值;③ 土地利用监测数据分别通过Fragstats 4.1软件和ArcGIS 10.1软件进行景观干扰度指数和生物丰度指数的计算。在对研究区多平台、多时相遥感数据处理、信息提取的基础上建立流域生态脆弱性评价数据库^[24]。本研究以 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的栅格为基本评价单元,采用极差标准化方法对各因子进行标准化处理,消除单位和量纲等的差异。

3.2 研究方法

3.2.1 评价指标

结合广西西江流域生态环境的特殊性、胁迫的多重性以及高敏感性等特征^[25],依据指标选取的科学性、系统性、可行性等原则,在“敏感性-压力度-恢复力”框架下选取11个指标,对广西西江流域生态脆弱性进行评价。依据指标与生态脆弱性的相关关系,将对生境演化产生不利影响的指标作为正向指标,其值越大,生境状况越差,脆弱生境出现的

几率越大;反之为负指标。完成广西西江流域生态脆弱性评价指标体系(表1)。

表1 广西西江流域生态脆弱性评价指标体系
Tab. 1 Ecological vulnerability evaluation indexes system of Guangxi Xijiang river basin

目标层	要素层	指标层	指标性质
生态脆弱性	生态敏感性	高程	正向
		地形起伏度	正向
		植被覆盖度	负向
		汛期降雨量	正向
		高温季节温度	正向
		降雨侵蚀力	正向
		景观干扰度	正向
		人口密度	正向
	生态压力度	植被净初级生产力	负向
	生态恢复力	生物丰度指数	负向
		经济密度	负向

3.2.2 无量纲化模型

为解决原始指标量纲不一致不可对比的问题,本研究采用极差标准化方法分别对正、负向指标进行标准化处理^[26],指标极差标准化公式如下:

正向指标处理方法:

$$X_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \tag{1}$$

负向指标处理方法:

$$X_i = (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \tag{2}$$

式中: X_i 为指标*i*的标准化值; x_i 为指标*i*的初始值; x_{\min} 为指标*i*的最小值; x_{\max} 为指标*i*的最大值。

3.2.3 空间主成分分析法

在ArcGis 10.1软件支持下,通过旋转原始空间坐标轴,把原始变量因子转化为少数几个综合主成分指标,在最大程度保留信息的同时减少数据量^[27]。对指标进行空间主成分分析,本研究选取累计贡献

率85%以上的主成分来替代原始指标,确定主因子,并在此基础上计算主成分综合指标,公式如下:

$$PC_i = \alpha_{1i}X_1 + \alpha_{2i}X_2 + \alpha_{3i}X_3 + \cdots \alpha_{pi}X_p \tag{3}$$

式中: PC_i 为第*i*个主成分; $\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, \cdots, \alpha_{pi}$ 为第*i*个主成分各个指标因子对应的特征向量; X_1, X_2, \cdots, X_p 为各个指标因子。

根据空间主成分分析结果,计算生态脆弱性指数(EVI)。

$$EVI = r_1PC_1 + r_2PC_2 + r_3PC_3 + \cdots r_nPC_n \tag{4}$$

式中: EVI 为生态脆弱性指数; r_i 为第*i*个主成分对应的贡献率; PC_i 为第*i*个主成分; n 为累计贡献率超过85%的前*n*个主成分。

3.2.4 生态脆弱性分级与生态脆弱性综合指数

为比较多年生态脆弱性指数(EVI)结果,对 EVI 进行标准化处理^[28],计算方法如下:

$$S_i = \frac{EVI_i - EVI_{\min}}{EVI_{\max} - EVI_{\min}} \tag{5}$$

式中: S_i 为第*i*年生态脆弱性标准化值,取值区间为0-1; EVI_i 为第*i*年生态脆弱性指数实际值,; EVI_{\max} 为多年生态脆弱性指数的最大值; EVI_{\min} 为多年生态脆弱性指数的最小值。

采用乘算模型计算生态脆弱性综合指数($EVSI$),计算方法如下:

$$EVSI = \sum_{i=1}^n P_i \times \frac{A_i}{S} \tag{6}$$

式中: $EVSI$ 为生态脆弱性综合指数; P_i 为第*i*类脆弱性等级值; A_i 为第*i*类脆弱性面积; S 为区域总面积。

参照已有的生态脆弱性评价研究的分级标准,采用等间距分级法对流域生态脆弱性指数标准化后的值 S_i 进行分级^[29],分级标准见表2。

3.2.5 地理探测器模型

一种地理事物的空间布局总是某些因素作用

表2 广西西江流域生态脆弱性分级标准
Tab. 2 Ecological vulnerability classification criterion of Guangxi Xijiang river basin

脆弱性等级	生态脆弱性指数标准化值	脆弱程度	生态特征
I	< 0.2	潜在脆弱	生态系统功能完整,对各类干扰敏感性弱,承受生态压力小,自我恢复能力强,无生态异常出现
II	0.2-0.4	微度脆弱	生态系统功能较为完善,对各类干扰敏感性较弱,承受生态压力较小,自我恢复能力强,存在潜在的生态异常
III	0.4-0.6	轻度脆弱	生态系统功能尚可维持,对各类干扰敏感性中等,承受生态压力接近阈值,自我恢复力较弱,出现少量生态异常
IV	0.6-0.8	中度脆弱	生态系统功能部分退化,对各类干扰敏感性较强,承受生态压力较大,受损后恢复难度较大,生态异常较多
V	> 0.8	重度脆弱	生态系统功能退化严重,对各类干扰敏感性强,承受生态压力大,受损后恢复难度极大,生态异常集中连片出现

的结果,地理探测器是由中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰空间分析小组开发的探寻地理空间分区因素对疾病风险影响机理的一种方法^[31]。地理探测器能有效诊断各影响因素对地理事物分布与发展的解释力的大小,该方法能对地理现象的驱动机制进行定量分析,无需过多的假设条件,克服了传统方法处理类别遍历的局限性^[32-33]。本研究采用因子探测器和交互探测器对广西西江流域生态脆弱性驱动因子进行分析,探究流域脆弱生境的主要驱动机制。其中,因子探测器主要用于探测各影响因子对流域生态脆弱性的影响力的大小,计算方法如下:

$$P_{D,H}=1-\frac{1}{n\sigma^2}\sum_{h=1}^Ln_h\sigma_h^2$$

(8)

式中: $P_{D,H}$ 为影响因子 D 对生态脆弱性 H 的因子解释力; n 为样本量; L 是指标因子分类数; n_h 和 σ_h^2 分别为 h 层样本量和生态脆弱性的方差。 $P_{D,H}\in[0,1]$,值越大说明影响因子 D 对流域生态脆弱性的因子解释力越强。

交互探测器主要用于探测多因子交互作用后对地理事物的因子解释力,即影响因子 X_1,X_2 相互作用后是否会强化或弱化对流域生态脆弱性的影响,主要类型如表3所示。

表3 交互探测类型

Tab. 3 Type of interactive detection

判断依据	交互作用
$P(X_1\cap X_2) < \min(P(X_1),P(X_2))$	非线性减弱
$\min(P(X_1),P(X_2)) < P(X_1\cap X_2) < \max(P(X_1),P(X_2))$	单线性减弱
$P(X_1\cap X_2) > \max(P(X_1),P(X_2))$	双线性增强
$P(X_1\cap X_2)=P(X_1)+P(X_2)$	相互独立
$P(X_1\cap X_2) > P(X_1)+P(X_2)$	非线性增强

表4 各主成分的特征值、贡献率及累计贡献率表

Tab. 4 Eigenvalue, contribution rate and accumulated contribution rate of principal components

年份	主成分系数	主成分				
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
2000	特征值 λ	0.0390	0.0219	0.0155	0.0095	0.0073
	贡献率/%	37.4154	21.0766	14.8903	9.1736	7.0614
	累计贡献率/%	37.4154	58.4920	73.3823	82.5559	89.6173
2005	特征值 λ	0.0362	0.0198	0.0105	0.0087	0.0079
	贡献率/%	38.4644	20.9905	11.2189	9.2838	8.4047
	累计贡献率/%	38.4644	59.4549	70.6738	79.9575	88.3623
2010	特征值 λ	0.0377	0.0224	0.0100	0.0089	0.0080
	贡献率/%	37.1375	22.0626	9.8852	8.7832	7.8885
	累计贡献率/%	37.1375	59.2001	69.0854	77.8686	85.7570

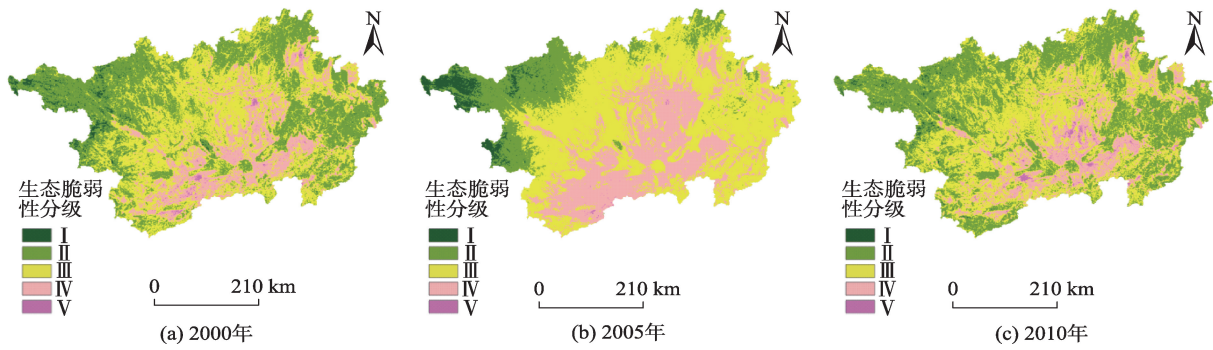


图2 2000、2005和2010年广西西江流域生态脆弱性分级图
Fig. 2 Ecological vulnerability classification figure in 2000, 2005, 2010

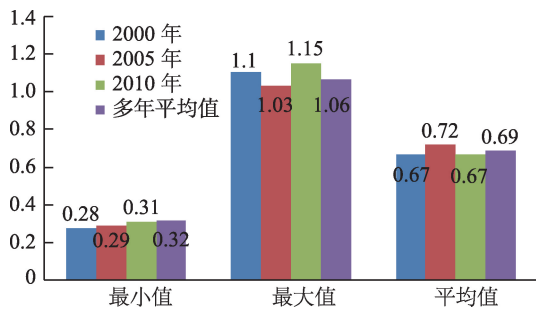


图3 广西西江流域生态脆弱性最小值、最大值及平均值直方图
Fig. 3 Histograms of the minimum, maximum and average ecological vulnerability of Xijiang River

的为贵港市。其中流域内生态脆弱性综合指数多年平均值 <2.5 的是百色市, $2.5\leq$ 生态脆弱性综合指数多年平均值 <3 的为河池市、梧州市、贺州市和桂林市,其它8个市的生态脆弱性综合指数多年平均值 ≥ 3.0 。

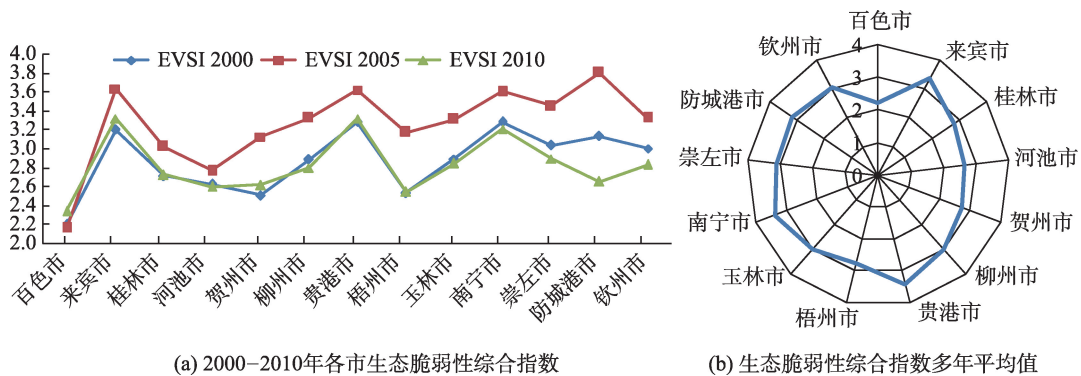
4.2 流域生态脆弱性变化趋势分析

将2000、2005和2010年3期生态脆弱性结果进

行差值处理,分析广西西江流域生态脆弱性指数变化情况,结果如图5所示。2000–2005年差值最大为0.3324,流域东部、西南部及中部部分地区呈现生态状况轻微恶化的趋势,流域西北部地区呈现生态脆弱性差值负增长趋势,该地区生境状况恢复。生态脆弱性差值不变区域零散分布于流域各处。2005–2010年流域整体生境状况好转,但流域西北部生态脆弱性出现恶化。结合主成分分析结果,高温季节温度对主成分贡献较大,2005年广西西江流域中部及东部地区受高温影响,导致2005年流域生态脆弱性指数偏高,总体上,崇左、河池、柳州等地呈现生态状况好转趋势,反之,流域西北部及中部部分地区呈现生态状况恶化趋势。2000–2010年广西西江流域生态环境状况整体呈现轻微恶化趋势。

4.3 流域生态脆弱性驱动机制分析

通过本研究空间主成分分析结果可知,由于各原始指标因子存在年份差异,在不同年份的表现力不尽相同,但主要驱动因子基本一致。本研究选取生物丰度指数、高温季节温度、汛期降雨量、NPP、



(a) 2000–2010年各市生态脆弱性综合指数
(b) 生态脆弱性综合指数多年平均值

图4 广西西江流域内各市生态脆弱性综合指数
Fig. 4 Ecological vulnerability composite index of cities in Xijiang river

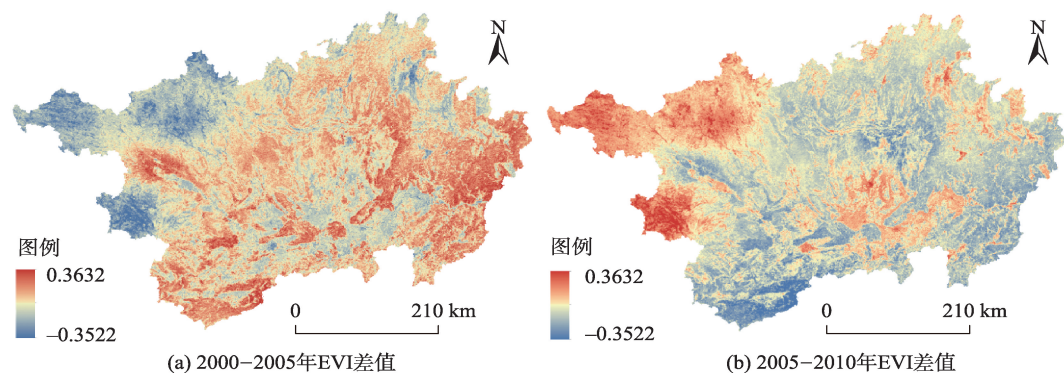


图5 广西西江流域生态脆弱性指数变化分布图
Fig.5 Ecological vulnerability change in Xijiang river

降雨侵蚀力、植被覆盖度6个主成分影响因子进行分析,探究因子对流域生态脆弱性的影响力与驱动力。将5 km×5 km 网格做掩膜提取,以6个因子的多年平均值为自变量,生态脆弱性指数多年平均值为因变量,提取样本点导入 GeoDetector 软件进行探测分析。

因子探测结果表明,6个因子对流域生态脆弱性的解释力强度为生物丰度指数(0.475) > 高温季节温度(0.340) > 植被覆盖度(0.211) > NPP(0.183) > 降雨侵蚀力(0.098) > 汛期降雨量(0.030)。整体来看,流域内的生物多样性状况对流域生态脆弱性影响较大,气温条件次之,植被情况影响力一般,水土保持及降雨对流域生态脆弱性影响力较小。通过对比2000–2010年各驱动因子发

现,2005 年高温季节温度整体偏高,并在流域中部及东部表现明显,因此可解释2005年流域生态脆弱性整体高于其他两年。

在单因子对环境产生影响的前提下,多因子的相互作用导致流域生态脆弱性变化。本研究采用地理探测器中的交互探测模块分析,两两因子相互作用下对流域生态脆弱性的驱动机制。因子交互作用对广西西江流域生态脆弱性影响如表5所示。

交互探测结果显示各因子具有交互协同作用,其中,高温季节温度和NPP,汛期降雨量和NPP以及NPP与降雨侵蚀力是非线性增强,其他两因子之间为双线性增强。此外,生物丰度指数和高温季节温度作为单因子解释力最高的2个因子,其交互作用后对流域生态脆弱性影响解释力最大,进一步说

表5 因子交互作用对广西西江流域生态脆弱性影响
Tab. 5 Interactive impact of factors on ecological vulnerability in Xijiang river

X1∩X2	P(X1∩X2)	判断	交互作用
生物丰度指数(0.475)∩高温季节温度(0.340)	0.676	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
生物丰度指数(0.475)∩汛期降雨量(0.030)	0.505	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
生物丰度指数(0.475)∩NPP(0.183)	0.518	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
生物丰度指数(0.475)∩降雨侵蚀力(0.098)	0.530	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
生物丰度指数(0.475)∩植被覆盖度(0.211)	0.529	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
高温季节温度(0.340)∩汛期降雨量(0.030)	0.351	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
高温季节温度(0.340)∩NPP(0.183)	0.533	$P(X1\cap X2) > P(X1)+P(X2)$	非线性增强
高温季节温度(0.340)∩降雨侵蚀力(0.098)	0.368	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
高温季节温度(0.340)∩植被覆盖度(0.211)	0.475	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
汛期降雨量(0.030)∩NPP(0.183)	0.230	$P(X1\cap X2) > P(X1)+P(X2)$	非线性增强
汛期降雨量(0.030)∩降雨侵蚀力(0.098)	0.125	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
汛期降雨量(0.030)∩植被覆盖度(0.211)	0.234	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
NPP(0.183)∩降雨侵蚀力(0.098)	0.286	$P(X1\cap X2) > P(X1)+P(X2)$	非线性增强
NPP(0.183)∩植被覆盖度(0.211)	0.314	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强
降雨侵蚀力(0.098)∩植被覆盖度(0.211)	0.281	$P(X1\cap X2) > \max(P(X1), P(X2))$	双线性增强

明生物丰度指数和高温季节温度为广西西江流域生态脆弱性的主要驱动因子。

5 结论和讨论

在分析流域生态脆弱内部结构和形成机制的前提下,以广西西江流域为例,设计了3个类别层次,11个指标,对广西西江流域的生态脆弱性时空分异特征及其驱动机制进行了评价,得到以下结论:

(1)空间上,广西西江流域生态脆弱性总体分布趋势为中部高于四周,由城市核心区往外逐步减弱;时间上,2000–2010年广西西江流域生态脆弱性呈现轻微恶化的趋势。

(2)通过地理探测器模型,可有效地对流域生态脆弱性驱动机制进行分析,结果显示,生物丰度指数对生态脆弱性结果解释力最强,汛期降雨量因子解释力最弱,说明生物多样性状况对广西西江流域生态脆弱性变化影响最大,反之,降雨条件影响最小;并且,任何两因子交互作用后其对流域生态脆弱性结果的解释力均大于单一因子解释力,说明多因素协同作用造成流域生境脆弱。

本文针对流域的本底特征,基于时间序列进行动态分析,不仅能反映区域在某一时间节点生态环境的脆弱性空间分布情况,还能反映其变化趋势,进行流域生境脆弱变化预警,是对当前生态脆弱性动态评价的补充。受本底条件限制,人类活动的扰动,及气候条件影响,导致生态系统抵抗力和恢复力较差,生境脆弱易损。另一方面,本研究在构建评价指标体系时,因考虑到数据的可获取性,所以个别代表性指标并未纳入指标体系,如何科学完备地选择指标来反映流域生态脆弱性还有待深入探究。此外,本研究对空间主成分分析驱动因子进行地理探测器分析,后续将对空间主成分分析和地理探测器两方法分析得到的主要驱动因子进行对比研究,验证不同方法驱动因子分析结果的一致性情况。

参考文献(References):

[1] 李永化,范强,王雪,等.基于SRP模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究——以辽宁省朝阳县为例[J].地理科学,2015,35(11):1452-1459. [Li Y H, Fan Q, Wang X, et al. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability under the frequency of natural hazard based on SRP model: A case study in Chaoyang county[J]. Sci-

entia Geographica Sinica, 2015,35(11):1452-1459.]

- [2] 杨强. 基于遥感的榆林地区生态脆弱性研究[D]. 南京: 南京大学, 2012. [Yang Q. The study on the ecological vulnerability based on remote sensing in Yulin region[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.]
- [3] 李平星,樊杰. 基于VSD模型的区域生态系统脆弱性评价——以广西西江经济带为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5):779-788. [Li P X, Fan J. Regional ecological vulnerability assessment based on VSD model: A case study of Xijiang River economic belt in Guangxi[J]. Journal of natural Resources, 2014,29(5):779-788.]
- [4] 吴琼. 基于景观格局的辽宁海岸带生态脆弱性评价[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2014. [Wu Q. Assessment of ecological vulnerability of Liaoning coastal zone on landscape pattern[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2014.]
- [5] 廖炜,李璐,吴宜进,等. 丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11):1879-1889. [Liao W, Li L, Wu Y J, et al. Land use change and eco-environmental vulnerability evaluation in the Danjiangkou reservoir area[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(11):1879-1889.]
- [6] 吴健生,宗敏丽,彭建. 基于景观格局的矿区生态脆弱性评价——以吉林省辽源市为例[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12):3213-3220. [Wu J S, Zong M L, Peng J. Assessment of mining area's ecological vulnerability based on landscape pattern: A case study of Liaoyuan, Jilin province of Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(12):3213-3220.]
- [7] 张龙生,李萍,张建旗,等. 甘肃省生态环境脆弱性及其主要影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(3):55-59. [Zhang L S, Li P, Zhang J Q, et al. Analysis of ecological vulnerability and its major influencing factors in Gansu province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013,34(3):55-59.]
- [8] 田海宁. 汉中市生态脆弱性评价及空间分布规律研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(3):148-152. [Tian H N. The ecological vulnerability assessment and spatial distribution of Hanzhong city[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(3):148-152.]
- [9] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. Proceeding of National Academy of Sciences, 2003, 100(14):8074-8079.
- [10] 卢亚灵,颜磊,许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2):303-308. [Lu Y L, Yan L, Xu X G. Ecological vulnerability assessment and spatial auto-correlation analysis over the Bohai Rim

- region[J]. Resources Science, 2010,32(2):303-308.]
- [11] Huang F, Liu X, Zhang Y. GIS-based eco-environmental vulnerability evaluation in west Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003,23(1):95-100.
- [12] 陈金月,王石英.岷江上游生态环境脆弱性评价[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):471-479. [Chen J Y, Wang S Y. Eco-environmental vulnerability evaluation in the upper reaches of Minjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017,26(3):471-479.]
- [13] Thirumalaivasan D, Karmegam M, Venugopal K. AHP-DRASTIC: Software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS[J]. Environmental Modelling & Software, 2003,18(7):645-656.
- [14] Dixon B. Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool[J]. Applied Geography, 2005,25(4):327-347.
- [15] 姚建,王燕,雷蕾,等.岷江上游生态脆弱性的模糊评价[J].国土资源科技管理,2006,22(2):90-92. [Yao J, Wang Y, Lei L, et al. Assessment of ecological vulnerability in upper reaches of Minjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006,22(2):90-92.]
- [16] 李燕,周游游,胡宝清,等.基于TRMM数据的广西西江流域降水时空分布特征[J].亚热带资源与环境学报,2017,12(1):75-82,88. [Li Y, Zhou Y Y, Hu B Q, et al. Spatio-temporal distribution of precipitation in Xijiang River Basin of Guangxi based on TRMM data[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2017,12(1):75-82,88.]
- [17] 荣检,胡宝清,闫妍.广西西江流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J].生态学杂志,2017,36(4):1020-1028. [Rong J, Hu B Q, Yan Y. Spatial-temporal distribution and its influencing factors of vegetation net primary productivity in Guangxi Xijiang River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(4):1020-1028.]
- [18] 何慧,陆虹,欧艺.1959-2008年广西西江流域洪涝气候特征[J].气候变化研究进展,2009,5(3):134-138. [He H, Lu H, Ou Y. Flood characteristics of the Xijiang River Basin in 1959-2008[J]. Advances in Climate Change Research, 2009,5(3):134-138.]
- [19] 廖胜石,罗建英,姚秀萍,等.广西西江流域致洪暴雨过程中尺度特征及机制分析[J].高原气象,2008,27(5):1161-1171. [Liao S S, Luo J Y, Yao X P, et al. Mesoscale characteristic and mechanism analysis of a heavy flooding rainstorm process in Xijiang River Basin, Guangxi[J]. Plateau Meteorology, 2008,27(5):1161-1171.]
- [20] 朱颖洁,郭纯青,黄夏坤.广西西江流域降水极值趋势分析[J].水文,2012,32(02):72-77. [Zhu Y J, Guo C Q, Huang X K. Trend analysis of precipitation extreme values of Xijiang River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(2):72-77.]
- [21] 黄少琴,周丽萍.西江流域经济发展融入北部湾多区域合作研究[J].广西民族大学学报(哲学社会科学版),2007,29(3):107-113. [Huang S Q, Zhou L P. On the economic development of the Xijiang River Basin under the framework of multi-regional economic cooperation[J]. Journal of Guangxi University for Nationalities, 2007,29(3):107-113.]
- [22] 代明,覃剑.西江流域经济发展不平衡测度与分析[J].地域研究与开发,2009,28(2):11-14,34. [Dai M, Qin J. Measure and analysis of the imbalance in economic development among reaches of the west river[J]. Areal Research and Development, 2009,28(2):11-14,34.]
- [23] 宾长初.信仰·仪式·狂欢:广西西江流域迎神赛会习俗探析[J].广西师范大学学报(哲学社会科学版),2014,50(5):1-8. [Bing C C. Belief, rituals and carnival: A probe into customs of worship and related activities in Xijiang River Basin of Guangxi[J]. Journal of Guangxi Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition, 2014,50(5):1-8.]
- [24] 仙巍,李涛,邵怀勇.基于SVM的安宁河流域生态环境脆弱性评价[J].环境科学与技术,2014,37(11):180-184. [Xian W, Li T, Shao H Y. Ecological fragility evaluation of Anning River Basin in the upper Yangtze River based on support vector machine[J]. Environmental Science and Technology, 2014,37(11):180-184.]
- [25] 周永娟,仇江啸,王姣,等.三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J].生态学报,2010,30(24):6726-6733. [Zhou Y J, Qiu J X, Wang J, et al. Assessment of eco-environmental vulnerability of water-level fluctuation belt in Three-Gorges reservoir area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(24):6726-6733.]
- [26] 唐怡,韦仕川,王湃,等.基于GIS的区域土地利用均衡度时空差异研究——以海南省为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(5):41-47. [Tang Y, Wei S C, Wang P. Spatial-temporal differences of regional balance degree on land use based on GIS: A case study in Hainan Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(5):41-47.]
- [27] 雷波.黄土丘陵区生态脆弱性演变及其驱动力分析[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013. [Lei B. Eco-environment vulnerability evolution of Hilly Loess Plateau region and its driving force analysis[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment), 2013.]
- [28] 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. [Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J].

- China Environmental Science, 2013,33(5):889-897.]
- [29] 马骏,李昌晓,魏虹,等.三峡库区生态脆弱性评价[J].生态学报,2015,35(21):7117-7129. [Ma J, Li C X, Wei H, et al. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir region in Chongqing municipality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(21):7117-7129.]
- [30] 陈佳,杨新军,尹莎,等.基于VSD框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟[J].地理学报,2016,71(7):1172-1188. [Chen J, Yang X J, Yin S, et al. The vulnerability evolution and simulation of the social-ecological systems in the semi-arid area based on the VSD framework[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(7): 1172-1188.]
- [31] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(1):107-127.
- [32] 李华威,万庆.小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J].地球信息科学学报,2017,19(3):425-435. [Li H W, Wan Q. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watershed[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(3):425-435.]
- [33] 杨晶,胡茂桂,钟少颖,等.全国 γ 辐射剂量率空间分布差异影响机理研究[J].地球信息科学学报,2017,19(5):625-634. [Yang J, Hu M W, Zhong S Y, et al. Influencing mechanism of spatial distribution difference in national γ radiation dose rate based on geographical detector[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(5):625-634.]