

基于PSR模型的珠江三角洲生态环境脆弱性评价

郑慧玲¹, 王永红^{1,2}, 马卫³

(1.中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2.中国海洋大学 海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3.淮北师范大学 经济与管理学院, 安徽 淮北 235000)

摘要: [目的] 揭示珠江三角洲生态环境脆弱性的时空演变特点及其原因, 为区域发展提供理论依据。[方法] 利用生态压力度—生态敏感度—生态恢复力(pressure-sensitivity-restoration, PSR)模型、量化分级法和层次分析法(AHP), 构建生态环境脆弱性综合指数, 分析珠江三角洲不同时期的生态环境脆弱性特征。在此基础上, 借助地理探测器的因子探测工具分析变量因素对生态环境脆弱性时空分布差异的影响程度。[结果] ①2000—2020年珠江三角洲生态环境脆弱性指数的变化范围为1.206 5~4.594 8, 呈现微度脆弱等级; ②空间分布上, 珠江三角洲中部地区的脆弱等级较高, 东西部脆弱等级较低。此外, 随着高程的增加, 生态环境脆弱性程度减轻, 中度和重度脆弱区面积比例减小; ③林地表现为潜在和微度脆弱等级, 草地表现为中度脆弱, 耕地、水域和未利用地以轻度脆弱等级为主, 建设用地主要分布于重度和中度脆弱区; ④珠江三角洲生态环境脆弱性空间分异的主要影响因子为人口密度、植被覆盖指数及生物丰富度指数。[结论] 受人口增长压力的影响, 研究时段内珠江三角洲生态环境脆弱等级提升。

关键词: 生态压力度—生态敏感度—生态恢复力(PSR)模型; 生态环境脆弱性; 珠江三角洲; 时空特征; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0210-08

中图分类号: P901

文献参数: 郑慧玲, 王永红, 马卫. 基于PSR模型的珠江三角洲生态环境脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 210-217. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.027; Zheng Huiling, Wang Yonghong, Ma Wei. Evaluation of eco-environmental vulnerability of Pearl River delta based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 210-217.

Evaluation of Eco-environmental Vulnerability of Pearl River Delta Based on PSR Model

Zheng Huiling¹, Wang Yonghong^{1,2}, Ma Wei³

(1.College of Marine and Earth Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2.Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE China, College of Marine and Earth Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 3.College of Economics and Management, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal evolution characteristics and its reasons of eco-environmental vulnerability in the Pearl River delta were studied in order to provide theoretical basis for regional development. [Methods] The pressure-sensitivity-restoration (PSR) model, quantitative grading method and analytic hierarchy process (AHP), as well as the combination of the eco-environmental vulnerability index were used to analyze the characteristics of eco-environmental vulnerability of the Pearl River delta at different periods. On this basis, the degree of influence of variable factors on differences in the spatio-temporal distribution of ecological vulnerability was analyzed with the help of factor detection of Geodetector. [Results] ① From 2000 to 2020, the eco-environmental vulnerability index ranged from 1.206 5~4.594 8, indicating slight vulnerability grade. ② In terms of spatial distribution, the vulnerability level was higher in the central part

收稿日期: 2021-12-19

修回日期: 2022-01-24

资助项目: 国家重点研发计划项目“珠江河口与河网演变机制及治理研究: 基于长序列及多要素原型观测的水沙异变研究(子课题)”(2016YFC0402602); 国家自然科学基金项目(41376054, 41176039)

第一作者: 郑慧玲(1994—), 女(汉族), 山西省临汾市人, 博士研究生, 研究方向为海洋沉积学。Email: zhl5765@stu.ouc.edu.cn.

通讯作者: 王永红(1969—), 女(汉族), 山东省青岛市人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋地质方面的研究。Email: yonghongw@ouc.edu.cn.

of the Pearl River delta and lower in the eastern and western. In addition, with the increase of elevation, the degree of eco-environment vulnerability tended to decrease on the whole, the proportion of moderate and severe vulnerability decreases. ③ Forest land exhibits potential and slight vulnerability grade, grassland showed moderate vulnerability, cultivated land, water and unused land are mainly located in mild vulnerability areas and construction land showed severe and moderate vulnerability grade. ④ The main factors influencing the spatial variation of eco-environmental vulnerability in the Pearl River delta were population density, NDVI and biological richness index. [Conclusion] Affected by the pressure of population growth, the eco-environmental vulnerability level of the Pearl River delta increased during the study period.

Keywords: pressure-sensitivity-restoration (PSR) model; eco-environmental vulnerability; Pearl River delta; spatio-temporal characteristics; Geodetector

21 世纪以来,全球气候变化与人类活动的增加,导致生态系统自我调节能力下降,生态环境问题日益严重,生态环境脆弱性的关注度提升^[1-2]。相关研究源于 20 世纪初期美国学者 Clements(1905 年)将 Ecotone 引入生态学的契机,迄今,国内外学者就生态环境脆弱性的内涵、类型、成因、特点等问题进行了深入研究。生态环境脆弱性(eco-environmental vulnerability)指当生态环境的退化程度超过了利用当前社会经济和技术水平能使其恢复的程度时,生态环境所呈现的状态^[3],由区域自然环境特征和人类经济活动共同决定^[4]。生态环境脆弱性评价是脆弱性研究的重要内容^[5],主要针对特定区域的生态环境状况,分析其脆弱性特征的变化规律,并在此基础上分析成因机制,为生态保护和恢复提供建议和方向^[6]。从研究内容来看,生态环境脆弱性评价主要基于区域特征、相关评价方法、指标以及体系等内容。从研究方法来看,相关研究多利用 PSR,SRP,ESA 等模型结合层次分析法、模糊评价法、主成分分析法、综合评价法等综合评价方法深入研究。从研究区域来看,早期集中于青藏高原、岩溶石漠化区、吉林西部等地区,近年来广泛关注海岸带区域^[7]、陆海交互带等^[8]。随着计算机技术的发展,生态环境脆弱性评价研究开始借助遥感(RS)、地理信息系统(GIS)来获取数据并进行分析,研究结果的可视化效果良好^[9]。

三角洲作为“黄金”海岸地带,其生态环境不仅受自然胁迫的影响,还受到强烈社会经济活动的影响,呈现明显的脆弱性特征^[10-11]。珠江三角洲作为我国经济发展最快速的地区之一,也是生态环境较脆弱的区域。韩喜彬^[12]研究指出珠江三角洲的脆弱性包括自然固有的基底沉降、新构造运动、地震等脆弱性,又包括污染、过渡采砂和抽水等人为特殊的脆弱性。徐庆勇^[9]综合自然和人为两方面的因素构建指标体系对珠江三角洲的生态环境脆弱性进行了评价并分析其成因。岳增友^[13]通过构建综合指标体系对比了珠

江三角洲、长江三角洲、黄河三角洲的脆弱性特征。以往研究基于静态视角,选择不同因素构建指标体系探究三角洲的生态环境脆弱性^[9,14-15]或对比不同三角洲环境脆弱性特征^[13],从时空二维视角进行的综合分析较少。

鉴于生态环境动态演变的趋势及其脆弱性的时空分布特点,本文以珠江三角洲为研究区,运用生态压力度—生态敏感度—生态恢复力(pressure-sensitivity-restoration, PSR)模型,量化分级法,层次分析法(AHP),结合生态环境脆弱性综合指数,分析生态环境脆弱性的空间分布特征和时间变化特点,在此基础上,借助地理探测器的因子探测工具量化指标因素对生态环境脆弱性时空分异的影响程度。

1 研究区域

珠江三角洲位于广东省东部沿海地区(21°17′—23°55′N, 111°59′—115°25′E),东临南海,西接内陆,与东南亚地区隔海相望,地理位置优越。珠三角域内属于亚热带季风气候,气候温和,雨量充沛,区域内有 20% 的面积为丘陵和台地。珠江分八大口出海,形成“三江汇合,八口分流”的独特地貌特征。行政区划包括广州、深圳、珠海、佛山、东莞、中山、江门、惠州、肇庆等 9 市 48 县(区)(东莞市、中山市不设区县),陆地总面积 55 368.7 km²,占广东省总面积的 23.2%(见封 3 附图 2)。该区域聚集广东省 54% 的人口和 80% 的经济总量,是我国重要的经济中心区,密集的人口、快速发展的城市化进程导致该地耕地、能源、矿产资源短缺,环境污染严重,生态环境问题突出,逐渐制约了区域的可持续发展。

2 研究方法

2.1 评价模型

2.1.1 PSR 模型 PSR 模型综合评价特定区域的生态环境脆弱性,包括生态压力度、敏感性和恢复力 3

个因子^[16]。生态压力指标反映人类活动对生态系统所造成的负荷,选取人口密度和经济密度指标表征。生态敏感性指区域在一定时间段内受内部或外在因素干扰的敏感程度,选取地形因子、地表因子以及气象因子表征。生态恢复力指区域系统在内外干扰下的调节和恢复能力,选取生态适应能力和社会经济支撑因子表征。

2.1.2 指标量化分级法 为了消除各个指标性质、单位和量纲的分析差异,按照一定的标准对指标进行量化分级。高程按照陆地地形的特点结合珠江三角洲特殊的地貌将其划分为: <100 , $[100\sim 300)$, $[300\sim 500)$, $[500\sim 700)$, ≥ 700 共 5 类赋值。根据自然地形坡度的特点将其划分为: $<3^\circ$, $3^\circ\sim 5^\circ$, $5^\circ\sim 15^\circ$,

$15^\circ\sim 25^\circ$, $>25^\circ$ 共 5 类赋值。其余各项指标根据数据特点结合其属性(对生态环境脆弱性的影响是正向还是负向)特征分别赋值为 1,2,3,4,5。

2.1.3 评价指标体系构建 生态环境脆弱性评价指标体系的建立需要呈现区域的脆弱性特征,结合研究区的环境特点,利用 PSR 模型^[2],选取 11 个评价指标构建珠江三角洲的生态环境脆弱性评价指标体系。采用层次分析法(AHP)确定指标的权重,分析步骤为:①建立多层次评估指标体系;②分析目标层、准则层、指标层各变量关系,两两比较,建立判断矩阵,确定要素内部指标间的相对权重;③检验判断矩阵一致性比例(CR), $CR<0.1$ ^[17],表明判断矩阵具有满意的一致性,指标权重设置合理(表 1)。

表 1 珠江三角洲生态环境脆弱性评价指标体系的指标权重

目标层(权重)	准则层(权重)	指标层(权重)	指标最终权重	
压力度(0.476 2)	人口压力(0.750 0)	人口密度(1.000 0)	0.357 2	
	经济压力(0.250 0)	经济密度(1.000 0)	0.119 1	
敏感度(0.190 5)	地形因子(0.103 1)	高程(0.311 4)	0.006 1	
		坡度(0.574 9)	0.011 3	
		坡向(0.113 8)	0.002 2	
	地表因子(0.291 5)	植被覆盖指数(1.000 0)	0.055 5	
		气象因子(0.605 4)	年均气温(0.333 3)	0.038 4
		年均降水量(0.666 7)	0.076 9	
恢复力(0.333 3)	生态适应能力(0.250 0)	生物丰富度指数(1.000 0)	0.083 3	
		地方财政一般预算收入(0.800 0)	0.200 0	
	社会经济支撑(0.750 0)	普通中学在校学生数(0.200 0)	0.050 0	

2.1.4 生态环境脆弱性评价模型 利用 PSR 模型和层次分析法(AHP)得到指标的权重系数,生态环境脆弱性指数值(EEVI)的计算公式为:

$$EEVI = \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i \quad (1)$$

式中:EEVI 表示生态环境脆弱性指数; X_i 表示第 i 个指标的分级数值; Y_i 表示第 i 个指标的权重值。EEVI 指数值的范围为 0~5,值越大,生态环境脆弱性等级越高。

2.1.5 地理探测器模型 采用地理探测器测度珠江三角洲生态环境脆弱性空间分异现象的成因,考虑珠江三角洲生态环境实际情况,借助因子探测工具量化各指标因素的影响程度。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (2)$$

式中: q 为某指标的空间分异性, $q \in [0, 1]$; N 为研究区样本总数; σ^2 为该指标的方差; i 表示分区($i = 1, 2, \dots, L$)。 q 的大小反映了空间分化的程度。 q 值越大,空间分层的异质性越强;反之,空间分布的随机

性越强。

2.2 数据源及预处理

(1) 生态压力度指标。人口密度数据来源于 WorldPop 网站(<https://www.worldpop.org/>),结合广东统计年鉴(<http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/index.html>(2001,2011 和 2021 年))在 ArcGIS 10.2 中进行栅格修正,修正系数分别为 0.94,0.97,1.09。经济密度数据源于广东统计年鉴。人口密度、经济密度两个指标对生态系统的影响均为正向,指标值越大,生态系统承受的负荷越大。

(2) 生态敏感性指标。数字高程模型(DEM)源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>),利用 ArcGIS 10.2 软件对 DEM 数据进行裁剪、数据转换等处理,提取研究区的坡度、坡向和高程。植被覆盖指数(NDVI)、年降水量、年均气温源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),利用 ArcGIS 10.2 软件进行裁剪、投影并重采样与研究栅格匹配。

(3) 生态恢复力指标。选择生物丰度指数表征区域生态系统的自我修复能力,根据 2000,2010 和 2020 年的土地利用数据,数据源于 GlobalLand 30 (<http://www.globallandcover.com/>),计算珠江三角洲不同时期的生物丰富度指数。生物丰度指数 = $(0.35 \times \text{林地面积} + 0.21 \times \text{草地面积} + 0.28 \times \text{水域面积} + 0.11 \times \text{耕地面积} + 0.04 \times \text{建设用地} + 0.01 \times \text{未利用地}) / \text{区域面积}$ 。社会经济支撑层面选择地方财政一般预算收入和普通中学在校学生数表征,数据源于中国县域统计年鉴 (<https://navi.cnki.net/knavi/yearbooks/YXSKU/detail?uniplatform=NZKPT>),栅格数据大小为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 。

3 结果与分析

3.1 生态环境脆弱性整体分布情况

珠江三角洲生态环境脆弱性等级利用 ArcGIS 10.2 计算每个栅格生态环境脆弱性指数,根据数据特征,将生态环境脆弱性分为潜在脆弱(1.2~1.9)、微度脆弱(1.9~2.6)、轻度脆弱(2.6~3.3)、中度脆弱(3.3~4.0)、重度脆弱(4.0~4.7)这 5 种类别(图 1)。

由图 1 和表 2 可知,2000 年生态环境脆弱性指数在 1.828 6~4.503 3 之间,均值为 2.447 9。微度脆弱、轻度脆弱和中度脆弱面积较大,分别占 82.28%,16.21%,1.34%(表 2),表明该时期珠江三角洲大多数区域的生态环境呈现微度脆弱。潜在脆弱区集中在肇庆市鼎湖区西北部,端州区北部亦有零星分布;微度脆弱区分布面积较广,肇庆市、佛山市该类型区的分布较为集中,其余地市的分布相对分散。轻度脆弱区主要集中于广州市市辖区、东莞市、深圳市、惠州市中部,佛山市、中山市、江门市,珠海市该类别区域的分布则较分散。中度脆弱区以广州市区,佛山市禅城区,深圳市辖区等地分布最为集中。重度脆弱区则主要分布在广州市越秀区、海珠区以及佛山市禅城

区。2010 年生态环境脆弱性指数在 1.206 5~4.423 6 之间,均值为 2.356 9。微度脆弱、轻度脆弱、潜在脆弱区比例分别为 73.79%,14.13%和 10.26%,微度脆弱和轻度脆弱区面积减少,潜在脆弱区面积增加,表明这一时期珠三角的生态环境有所改善。伴随着大多数区域的脆弱等级降低,部分地区向中度脆弱和重度脆弱类别转化,区域面积分别增加 244 km^2 , 2.2 km^2 。2010 年珠三角潜在脆弱区面积有所增加,空间上主要分布在肇庆市、广州市、惠州市、深圳市、珠海市以及江门市的部分地区。微度脆弱区面积与 2000 年相比有所减少,空间上主要分布在肇庆市大部,佛山市西部,广州市北部,惠州市北部和东部,江门市该类别的分布则较为分散。轻度脆弱区面积与 2000 年相比有所减少,空间上零星分布于佛山市、广州市交界处,东莞市大部、深圳市西部、中山市北部以及江门市中南部。中度脆弱区面积与 2000 年相比有所增加,分布于广州市、佛山市、东莞市、深圳市以及中山市的部分地区。重度脆弱区面积变化不明显,空间上分布于东莞市北部和南部。2020 年生态环境脆弱性指数在 1.551 7~4.594 8 之间,均值为 2.533 3。统计结果显示微度脆弱、轻度脆弱和中度脆弱区面积比例分别为 74.63%,19.78%和 4.79%,潜在脆弱区面积比例最小,仅为 0.05%(30.19 km^2),中度脆弱区增幅最显著。该时期,潜在脆弱区面积比例降至最低;大部分地区的生态环境仍为微度脆弱,与 2010 年相比面积变化不显著,空间上则明显不同,佛山市、广州市、中山市交界及外缘的大部分区域脆弱性等级变化,不再属于微度脆弱,肇庆市、惠州市、江门市的分布变化较小。轻度、中度、重度脆弱区面积明显增加,空间上集中于广州市、佛山市、中山市交界及外缘区域,2010 年为微度脆弱的区域,脆弱等级提升,生态环境变差。与此同时,惠州市南部、深圳市大部分区域的脆弱性等级较高,生态环境较差。

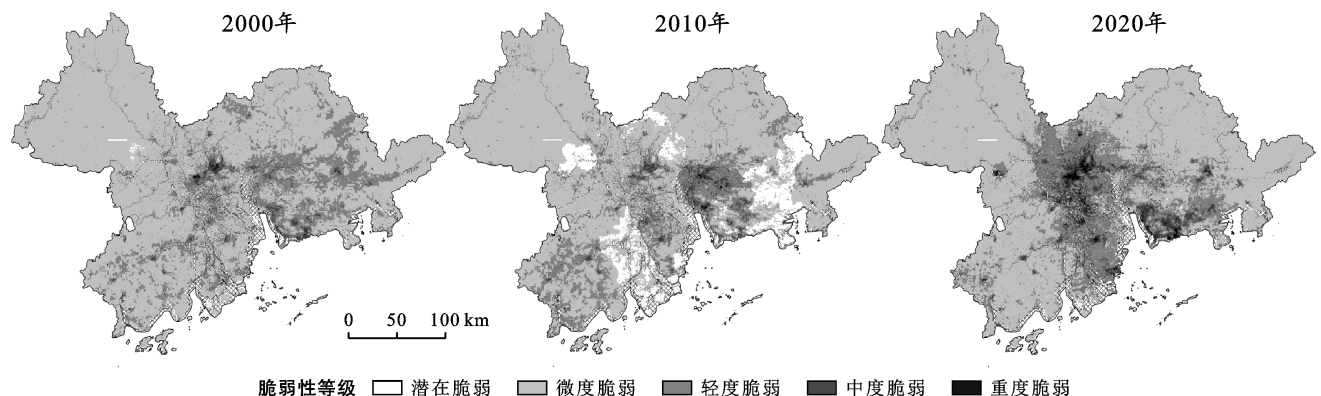


图 1 珠江三角洲 2000—2020 年生态环境脆弱性等级分布

表 2 珠江三角洲 2000—2020 年 3 期生态环境脆弱性面积及比例

脆弱度等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
潜在脆弱	58.75	0.10	5 990.81	10.26	30.19	0.05
微度脆弱	48 028.00	82.28	43 101.25	73.79	43 592.25	74.63
轻度脆弱	9 459.19	16.21	8 253.00	14.13	11 552.69	19.78
中度脆弱	781.44	1.34	1 025.44	1.76	2 797.19	4.79
重度脆弱	41.31	0.07	43.50	0.07	442.69	0.76

3.2 生态环境脆弱性随高程变化情况

根据地形分级标准结合珠江三角洲的区域特点,将研究区高程分为<100, [100, 300), [300, 500), [500, 700), ≥700, 叠加高程分级图和生态环境脆弱性等级图, 绘制生态环境脆弱性随高程分布图(图 2)。由图 2 可知, 2000 年高程小于 100 m 的主要是轻度脆弱区和微度脆弱区, 比重分别为 54.92% 和 33.32%, 中度脆弱区次之, 重度脆弱区面积比例 1.6%, 潜在脆弱区比例最小为 0.88%。100~300 m 的高程范围内, 潜在脆弱区面积比例最大(52.82%), 微度脆弱区、轻度脆弱区、中度脆弱区、重度脆弱区分别列 2~5 位。300~500 m 高程范围各脆弱度等级面积比例与前一等级高程范围的分布情况相同, 各脆弱度等级由轻到重面积比例为 92.71%, 6.18%, 0.95%, 0.10%, 0.05%。高程大于 500 m 的地区, 生态环境潜在脆弱区面积比例达 99% 以上, 其他地区呈现微度脆弱。2010 年高程小于 100 m 的地区生态环境脆弱等级有所提升, 微度脆弱区和轻度脆弱区面积比例下降, 潜在脆弱区面积比例上升至 63.95%, 中度脆弱和重度脆弱区的面积比例亦下降。100~300 m 的高程范围内, 潜在脆弱等级仍占绝大多数, 约 50% 以上的地区生态环境脆弱等级较优, 微度脆弱区占 30.09%, 轻度脆弱区占 12.07%, 中度和重度脆弱等级面积较小于 100 m 高程范围区域的面积比例大。300~500 m 高程范围内潜在脆弱等级面积占

94.81%, 微度脆弱等级面积占 4.49%, 其余脆弱度等级类型的面积比例不足 1%。500 m 以上的高程范围内, 潜在脆弱度等级比例达 99% 以上, 其中 ≥700 m 的范围内, 所有地区的生态环境脆弱等级均为潜在脆弱。2020 年高程小于 100 m 的范围内, 微度脆弱和重度脆弱两种类型的面积比例较 2010 年分别增加 8.66% 和 2.07%, 潜在脆弱、轻度脆弱、中度脆弱区面积比例分别为 54.75%, 6.05%, 1.53%。100~300 m 高程范围内, 各脆弱度等级的面积比例与 2010 年相比变化较小, 潜在脆弱、轻度脆弱、中度脆弱区面积比例较高, 分别为 49.39%, 31.72%, 12.64%, 其次为中度脆弱和重度脆弱区。300~500 m 高程范围内, 大部分区域(88.71%) 的生态环境呈现潜在脆弱等级, 但是微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱以及重度脆弱区的面积比例较 2010 年明显增加, 在一定程度上反映了该高程范围内生态环境的恶化。500 m 以上的高程范围内, 微度脆弱等级面积比例增至 1.74%, 轻度脆弱区首次出现。面积比例为 0.03%。整体来看, 随着高程的增加, 珠江三角洲重度脆弱区比重减小。高程 300 m 以下的区域, 潜在脆弱等级、微度脆弱等级、轻度脆弱等级均有分布, 在不同的时期, 面积比例发生变化; 高程大于 300 m 以上的区域, 潜在脆弱等级面积比例约 90%, 基本上没有中度脆弱等级和重度脆弱等级的区域分布。因此, 随着高程的增大, 生态环境脆弱程度减轻, 生态环境逐渐优化。

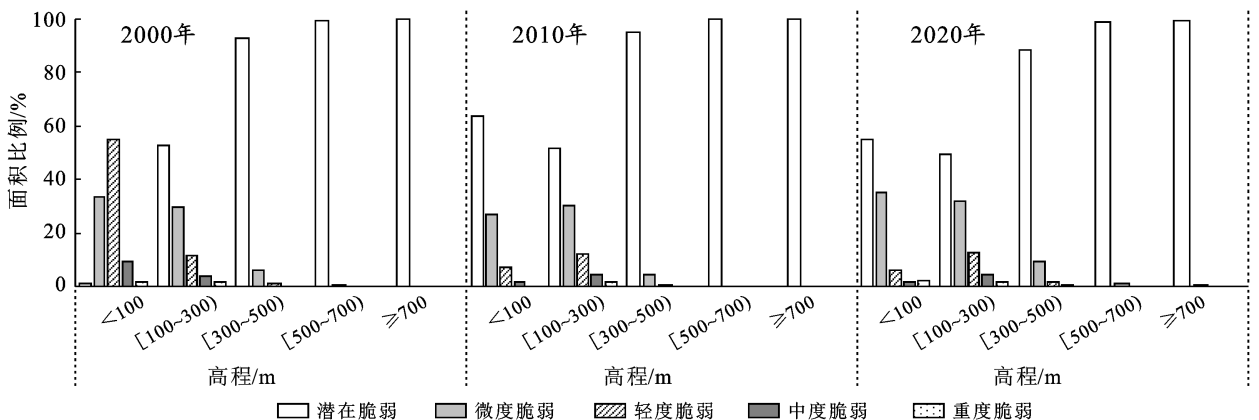


图 2 珠江三角洲 2000—2020 年 3 期生态环境脆弱性随高程面积比例情况

3.3 生态环境脆弱性随土地利用变化情况

叠加珠江三角洲三期的生态环境脆弱性分级图和土地利用数据(LUCC)分级图,对不同时期各土地利用类型中的生态环境脆弱性等级比例进行统计,结果详见表 3。由表 3 可知,对 2000,2010 和 2020 年不同地类的生态环境脆弱性变化情况统计分析,潜在脆弱区和微度脆弱区在不同时期中的主要土地利用类型均为林地,林地在潜在脆弱区的面积比重范围是 54.37%~95.01%,在微度脆弱区的面积比重范围是 61.37%~62.88%。耕地、草地、未利用地在潜在脆弱区的面积比重呈现波动变化,2010 年有所增加,2020 年面积比例下降,总体上所占比例较小。水域和建设用地在潜在脆弱区的面积比重呈缓慢增加的趋势,2020 年分别占 12.99%和 15.25%。微度脆弱区,除了林地占 60%以上的比例外,其余用地类型比

例较少,且变化幅度小。2000 年轻度脆弱区面积比例前 3 名的用地类型为耕地(40.80%)、建设用地(24.36%)和林地(22%);2010 年 3 类用地面积有所增减,但整体排名未发生变化;2020 年轻度脆弱区中,建设用地面积比例跃居首位(39.06%),林地和耕地分别占 25.42%和 20.60%,草地、水域和未利用地在该脆弱区中的面积比例较小。中度和重度脆弱区中建设用地面积比例最大,中度脆弱区建设用地面积比例持续上升,从 2000 年的 76.90%上升至 2010 年的 77.56%,2020 年为 82.66%,重度脆弱区建设用地面积比例始终为 90%以上,其余用地类型的面积比例不足 10%。整体来看,林地主要分布于潜在脆弱区和微度脆弱区,草地主要分布于中度脆弱区,耕地、水域和未利用地以轻度脆弱区为主,建设用地主要分布于重度和中度脆弱区。

表 3 珠江三角洲 2000—2020 年 3 期生态环境脆弱性在不同土地利用类型下的分布

年份	用地类型	潜在脆弱		微度脆弱		轻度脆弱		中度脆弱		重度脆弱	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
2000	耕地	0.82	1.42	11 548.79	23.93	3 878.12	40.80	48.90	6.41	0.03	0.09
	林地	54.87	95.01	29 690.08	61.52	2 091.16	22.00	48.17	6.31	1.17	2.94
	草地	2.06	3.57	3 393.63	7.03	495.05	5.21	28.16	3.69	0.42	1.05
	水域	0.00	0.00	2 006.93	4.16	718.44	7.56	51.05	6.69	1.74	4.37
	建设用地	0.00	0.00	1 612.14	3.34	2 315.64	24.36	586.93	76.90	36.51	91.56
	未利用地	0.00	0.00	5.64	0.01	6.78	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00
2010	耕地	1 256.29	20.88	9 807.28	22.64	3 285.79	39.70	89.16	8.81	1.29	3.19
	林地	3 600.13	59.83	26 584.76	61.37	1 822.10	22.02	60.74	6.00	0.80	1.98
	草地	330.96	5.50	3 186.35	7.36	422.10	5.10	33.03	3.26	0.75	1.86
	水域	448.10	7.45	1 668.85	3.85	530.75	6.41	44.18	4.36	1.06	2.63
	建设用地	377.50	6.27	2 067.71	4.77	2 215.12	26.77	785.02	77.56	36.45	90.34
	未利用地	4.42	0.07	4.29	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2020	耕地	4.73	16.07	9 571.15	21.87	2 395.94	20.60	107.90	3.86	4.42	1.02
	林地	0.39	54.37	2 744.82	62.88	417.11	25.42	44.30	6.46	4.73	2.47
	草地	0.39	1.32	2 743.07	6.27	415.16	3.57	44.30	1.59	4.73	1.09
	水域	37.77	12.99	47 688.12	3.20	17 487.07	11.33	5 254.40	5.43	848.62	2.88
	建设用地	4.49	15.25	2 527.38	5.77	4 542.75	39.06	2 309.15	82.66	401.81	92.52
	未利用地	0.00	0.00	5.53	0.01	1.42	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00

3.4 生态环境脆弱性成因探讨

利用地理探测器中因子探测工具,分析 2000,2010 和 2020 年各驱动因素对珠江三角洲生态环境脆弱性空间分异的影响程度。2000 年,对生态环境脆弱性空间分布解释能力排名前三的因子为:人口密度(50.61%)、植被覆盖指数(32.37%)、生物丰富度指数(29.80%),其余因子的影响力均不足 10%,坡向因子未通过显著性检验。2010 年,各因子对生态环境脆弱性空间分布的解释贡献率发生显著变化,经济密度(45.10%)、地方财政一般预算收入(44.71%)、普通中

学在校学生数(28.28%)的解释力排名前 3,人口密度、植被覆盖指数、生物丰富度指数的贡献率有所降低,分别为 26.44%,14.51%和 15.34%,坡向因子未通过显著性检验,其余四项因子的影响程度不足 10%。2020 年,对生态环境脆弱性空间分布解释能力排名前 3 的因子与 2000 年的影响因子一致:人口密度(55.27%)、植被覆盖指数(42.05%)、生物丰富度指数(37.49%)影响程度提高,地方财政一般预算收入(35.33%)、普通中学在校学生数(28.70%)和经济密度(26.12%)的贡献率紧随其后,坡向因子未通过显

著性检验,高程、坡度、气温和年降水量对生态环境脆弱性空间分异的影响仍不足 10%(表 4)。整体来看,人口密度、植被覆盖指数、生物丰富度指数是影响珠江三角洲生态环境脆弱性空间分布的主要因子。2010 年以后,区域经济密度、地方财政一般预算收入

以及普通中学在校学生数这三项指标因素对生态环境脆弱性空间分布的影响程度明显提升。高程、坡度、年均气温、年均降水量对生态环境脆弱性空间分异的影响程度较小,坡向对珠江三角洲生态环境脆弱性的空间分布没有影响。

表 4 珠江三角洲生态环境脆弱性空间分布驱动因素的探测结果

驱动因素	2000 年		2010 年		2020 年	
	q 值	p 值	q 值	p 值	q 值	p 值
人口密度	0.506 1	0	0.264 4	0	0.552 7	0
经济密度	0.068 5	0	0.451 0	0	0.261 2	0
高程	0.056 6	0	0.038 2	0	0.055 5	0
坡度	0.043 1	0	0.032 5	0	0.046 8	0
坡向	0.000 1	0.533 0	0.000 2	0.345 6	0.000 0	0.862 6
植被覆盖指数	0.323 7	0	0.145 1	0	0.420 5	0
年均气温	0.050 2	0	0.027 5	0	0.086 1	0
年均降水量	0.061 7	0	0.094 4	0	0.100 7	0
生物丰富度指数	0.298 0	0	0.153 4	0	0.374 9	0
地方财政一般预算收入	0.028 0	0	0.447 1	0	0.353 3	0
普通中学在校学生数	0.037 6	0	0.282 8	0	0.287 0	0

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究基于 PSR 模型,通过分级赋值法、层次分析法,利用 2000,2010 和 2020 年 3 期数据的 11 个指标对珠江三角洲进行了生态环境脆弱性评价,借助地理探测器的因子探测工具量化分析指标因素对生态环境脆弱性空间分布差异的影响程度,从理论层面对生态环境脆弱性的特征、变化和影响机制进行了探讨,以期对该区域的可持续发展和生态修复提供参考和技术指导。研究结果显示,从 2000—2020 年,珠江三角洲的脆弱性指数值为 1.206 5~4.594 8,平均值分别为 2.447 9,2.356 9 和 2.533 3,整体呈现微度脆弱等级。2000—2010 年,生态环境脆弱性表现较复杂的变化特点,潜在脆弱区面积比重增加显示了生态环境的好转,同时中度脆弱区面积比重亦有所增加,表明部分地区生态环境压力增加,脆弱等级提升。2010—2020 年,不同等级的生态环境面积均有所增加,中度和重度区域面积增加显著,生态环境呈现恶化趋势。空间上,珠江三角洲的生态环境脆弱性呈现中部明显脆弱、东西部有所缓解的特征,这与徐庆勇^[9]、岳增友和李连伟^[13]对珠江三角洲生态环境脆弱性综合评价的结果一致。中部地区所辖地市深圳、东莞、中山以及珠海由于较大的人口压力和经济压力,自然环境所受风险和威胁增加,生态环境脆弱程度提高。西部地区生态环境多呈现潜在脆弱等级,一

方面由于其地势较高,自然环境压力小;另一方面由于肇庆市的人口和经济压力低于中部各地市,因此脆弱性等级整体较低。随着高程的增加,生态环境脆弱性程度整体缓解,这是因为高程较大的地区自然环境条件相对优越,人类活动影响小,大多数区域为自然保护区。基于地理探测器定量化分析的结果来看,人口密度和经济密度在很大程度上影响着珠三角生态环境脆弱性的空间分布格局,中部地区密集的人口、高度发达的经济对区域发展造成了巨大压力,东西部的人口数量和经济密集程度小于中部,生态环境压力较小。植被覆盖指数对生态环境脆弱性空间分布格局的影响程度也较大,中部的植被覆盖指数小于东西部地区,生态敏感性程度较高。从适应力角度来看,中部地区的生物丰富度指数小于东西部地区,生态适应能力较差,但是其社会经济支撑能力较强,地方财政一般预算收入和普通中学在校学生数高于东西部地区,生态恢复潜力大。生态环境的优化,社会经济的持续性发展离不开制度的保障和相应管理措施的实施。因此,从政府层面看,珠江三角洲地区应该建立并完善生态环境监测保护管理体系,了解其动态演化特征;从具体实施方案的角度来看,采取因地制宜的原则,对区域资源进行合理且适度地开发利用。本文综合自然和人文因素分析珠江三角洲生态环境脆弱性时空演变特征,借助地理探测器的因子分析工具量化指标的影响程度,鉴于生态环境脆弱性评价的指标体系尚未形成统一规范,未来的研究需考虑数据的

可得性和可用性,完善相关指标体系,综合全面评估三角洲生态环境脆弱性的变化特征及影响机制。

4.2 结论

(1) 2000—2020年3期生态环境脆弱性指数在1.2065~4.5948,平均值分别为2.4479,2.3569和2.5333,整体属于微度脆弱等级。空间上珠江三角洲的生态环境脆弱性呈现中部明显脆弱、东西部有所缓解的特征。随着高程的增加,生态环境脆弱性程度减轻,中度和重度脆弱区面积比重越来越小。高程小于300m的区域,5种脆弱等级区均有分布,微度和轻度脆弱区面积比重较大;高程大于300m的地区,生态环境良好,潜在脆弱区面积比例明显增加,随着高程的不断增大,99%的区域为潜在脆弱等级。

(2) 林地主要分布于潜在脆弱区和微度脆弱区,草地主要分布于中度脆弱区,耕地、水域和未利用地以轻度脆弱区为主,建设用地主要分布于重度和中度脆弱区。

(3) 珠江三角洲生态环境脆弱性空间分异的主要影响因子为人口密度、植被覆盖指数、生物丰富度指数、区域经济密度、地方财政一般预算收入以及普通中学在校学生数。高程、坡度、年均气温、年均降水量对生态环境脆弱性空间分异的影响程度较小,坡向对珠江三角洲生态环境脆弱性的空间分布没有影响。

[参 考 文 献]

- [1] 牛文元.生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J].生态学报,1989,9(2):97-105.
- [2] 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.
- [3] 赵跃龙.中国脆弱生态环境类型分布及其综合整治[M].北京:中国环境科学出版社,1999.
- [4] 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.
- [5] 田超,杨夏捷,鞠园华,等.吉林省西部地区生态脆弱性的

动态评价[J].水土保持研究,2018,25(4):298-303.

- [6] Song Guoba, Chen Yu, Tian Meirong, et al. The ecological vulnerability evaluation in southwestern mountain region of China based on GIS and AHP method [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):465-475.
- [7] 张泽,胡宝清,丘海红,等.桂西南喀斯特—北部湾海岸带生态环境脆弱性时空分异与驱动机制研究[J].地球信息科学学报,2021,23(3):456-466.
- [8] 张泽,胡宝清,丘海红,等.基于山江海视角与SRP模型的桂西南—北部湾生态环境脆弱性评价[J].地球与环境,2021,49(3):297-306.
- [9] 徐庆勇,黄玫,刘洪升,等.基于RS和GIS的珠江三角洲生态环境脆弱性综合评价[J].应用生态学报,2011,22(11):2987-2995.
- [10] Mohamed S A. Coastal vulnerability assessment using GIS-based multicriteria analysis of Alexandria-northwestern Nile Delta, Egypt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2020,163:103751.
- [11] Abderraouf H, Essam H, Oula A, et al. Alarming coastal vulnerability of the deltaic and sandy beaches of North Africa [J]. Scientific Reports, 2021,11:2320.
- [12] 韩喜彬,龙江平,李家彪,等.珠江三角洲脆弱性研究进展[J].热带地理,2010,30(1):1-7.
- [13] 岳增友,李连伟,徐洋峰,等.大河三角洲环境脆弱性评价方法与应用[J].安全与环境工程,2019,26(6):114-121.
- [14] 李连伟,刘展,宋冬梅,等.黄河三角洲环境脆弱性评价方法及其应用[J].中国农业大学学报,2013,18(1):195-201.
- [15] 吴春生,黄翀,刘高焕,等.基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J].生态学报,2018,38(13):4584-4595.
- [16] 张金茜,李红瑛,曹二佳,等.多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性:以甘肃白龙江流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2897-2906.
- [17] 刘正佳,于兴修,李蕾,等.基于SRP概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J].应用生态学报,2011,22(8):2084-2090.