

DOI: 10.5846/stxb201811112441

王贝贝, 丁明军, 管琪卉, 艾嘉会. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价研究. 生态学报, 2019, 39(15): - .
Wang B B, Ding M J, Guan Q H, Ai J H. Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang city. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): - .

基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价研究

王贝贝¹, 丁明军^{1,2,*}, 管琪卉¹, 艾嘉会¹

¹ 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

² 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域教育部重点实验室, 南昌 330022

摘要: 科学评价生态环境的脆弱性, 对合理利用土地资源和促进区域生态安全具有重要意义。本文以公里格网为基本评价单元, 以快速城市化区域典型代表南昌市为研究区, 通过 SRP 概念模型构建评价指标体系并选取 17 个评价指标, 基于空间主成分分析法、全局 Moran'I 指数以及 LISA 聚类图, 量化分析了 2000—2015 年南昌市生态环境脆弱性的时空分布特征及驱动力。结果表明: (1) 2000—2015 年南昌市生态环境脆弱性呈现由轻度脆弱向中度脆弱演变的趋势; (2) 2000—2015 年南昌市各县区生态环境脆弱性差异明显, 东湖区、西湖区、青山湖区、青云谱区、湾里区脆弱性程度最高, 其他县区脆弱性增幅较大; (3) 2000 和 2015 年南昌市生态环境脆弱性具有明显的空间自相关性, 且为正相关, 高高聚集区主要分布在极度脆弱区, 低低聚集区与微度和轻度脆弱区相关; (4) 研究时段内, 南昌市生态环境脆弱性主要驱动力为人口密度、人均 GDP、人均耕地、坡度、地形起伏度、年均气温、极端最高温、极端最低温、年均降水量。

关键词: 生态环境脆弱性; 格网尺度; 驱动力; 南昌市

Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang city

WANG Beibei¹, DING Mingjun^{1,2,*}, GUAN Qihui¹, AI Jiahui¹

¹ School of Geographic and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

² Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: Scientific evaluation of the fragility of the ecological environment is of great significance for the rational use of land resources and regional ecological security. Taking the Nanchang City as a case study area, we developed an index-based system for eco-environmental vulnerability assessment based on the ecological sensitivity-ecological recovery-ecological pressure model. Utilizing the spatial principal component analysis method, the global Moran' I index and LISA clustering map, seventeen indicators were selected and used to analyze the spatial and temporal distribution and driving factors of the eco-environmental vulnerability of Nanchang City from 2000 to 2015. Our analyses show there was an increasing trend from light to medium vulnerability in Nanchang City from 2000 to 2015. The spatial heterogeneity of eco-environmental vulnerability in Nanchang City is obvious in both 2000 and 2015. Among the administrative divisions in Nanchang City, the areas with the highest environmental vulnerability were mainly distributed in Donghu, West Lake, Qingshan Lake and Wanli districts. In 2000 and 2015, there was significant global spatial autocorrelation of the eco-environmental vulnerability. High-high (HH) areas were mainly distributed in extremely vulnerable regions, and low-low (LL) regions were associated with negligible and lightly vulnerable areas. From 2000 to 2015, the drivers of eco-environmental vulnerability in Nanchang City were population density, per capita GDP, per capita arable land, slope, topographic relief, average annual temperature, extreme maximum temperature, extreme minimum temperature, and average annual precipitation.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761020); 江西省自然科学基金(20151BAB203041)

收稿日期: 2018-11-11; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dingmingjun1128@163.com

Key Words: eco-environmental vulnerability; grid scale; driving forces; Nanchang City

生态环境脆弱性是指在特定时空尺度下,生态系统对于外界干扰所表现出的敏感反应和自我恢复能力,是自然属性和人类经济行为共同作用的结果^[1]。科学认知、评价以及合理调控生态环境,是资源环境领域研究的热点问题,也是生态文明建设的迫切要求^[2-3]。全球变化和人类活动强度的加剧,对人类赖以生存和发展的生态系统造成巨大影响,使得生态环境脆弱性问题凸显^[4]。

当前学者已从多个角度对生态环境的脆弱性展开研究。从研究尺度来看,宏观尺度主要以县域^[5]、市域^[6-7]、省域^[8-9]及城市群^[10]等为评价单元,微观尺度多以栅格^[11]为评价单元,基于格网尺度的研究较少。从研究内容来看,主要是从特征、类型、形成机理、评价方法、评价指标体系、空间分布格局等方面^[12-14]来研究特定区域单一年份的生态环境脆弱性变化,但对不同年份的生态环境脆弱性变化、空间集聚特征探究的案例较少^[10]。从实证研究采用的方法上看,层次分析法^[15-16]、熵值法^[17]、主成分分析法^[4,18-19]、模糊评价法^[20]等单一方法和模糊层次分析法^[21-23]、主成分-聚类分析法^[24]等耦合模型得到了广泛应用。从研究区域上看,主要集中于两类地区,第一类地区为自然条件较差的地区,包括极端灾害易发地区(如地震^[25-26]、海啸^[27]、火灾^[28])、气候不适宜区(如干旱和半干旱区^[29-30])、高原^[31-33]及山区^[34];第二类地区为人为干扰严重的地区,如三峡库区^[4]、煤炭矿区^[35-37]、农牧交错区^[38]、城乡交错结合带^[39]、水陆交界区^[40-43]、农业区^[44];但对南昌市这类处于快速城市化进程且位于南方红壤水土流失区的研究鲜少。

针对当前研究中评价单元粒度较粗糙、研究时段跨度较小、典型案例区涵盖不全面、评价指标相对单一的现状^[45],本文以公里格网为评价单元,将南方红壤水土流失区快速城市化典型代表南昌市作为研究区,以SRP概念模型为评价体系,采用空间主成分分析法,并结合全局Moran'I指数和LISA聚类图,对南昌市2000—2015年生态环境脆弱性进行动态定量评价,进而揭示南昌市生态环境脆弱性的时空分布特征及其驱动力,力图为市域范围内的生态建设和恢复提供理论依据。

1 研究区概况

南昌市(115°27'—116°35'E,28°10'—29°11'N)位于江西省中北部,辖东湖、西湖、青云谱、青山湖、湾里、新建6区和南昌、进贤、安义3县。该区属亚热带湿润季风气候,是典型的“夏炎冬寒”型城市,年降水量1600—1700mm,年平均气温17.0—17.7℃。境内以地丘、岗地和平原为主,东南较为平坦,西北丘陵起伏,区内水网密布,湖泊众多。南昌市是中国唯一一个毗邻闽南金三角、珠江三角洲和长江三角洲的省会城市,是鄱阳湖生态经济区核心城市,是生态文明先行示范区,是国家级新区赣江新区中心城市,是全国首批低碳试点城市,也是中国重要的综合交通枢纽和现代制造业基地^[46-47]。近几十年来,随着人类活动强度的加大,区域内土地利用变化剧烈,出现了诸多生态问题;另一方面该地区西郊隐伏断裂发育,夏季多短时强降雨,容易引发泥石流、崩塌、滑坡等地质灾害,这对该地区生态安全造成了严重的威胁^[48]。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

2.1.1 数据来源

本文所采用的数据主要包括遥感数据、气象数据、DEM数据和社会经济数据。土地利用/覆被数据选用基于2000和2015年2期分辨率为30m的Landsat遥感影像数据,采用目视解译构建的南昌市土地利用数据集中的两期数据^[46,49];2000和2015年归一化植被指数(NDVI)是基于美国地质调查局(<https://glovis.usgs.gov>)下载的Landsat-NDVI时序数据采用最大值合成而得,分辨率为30m;气象数据(月均温、月降水)来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>),数据年份为2000和2015年;DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为30m;社会经济统计数据来源于2000和2015年《江西省统计

年鉴》、《南昌市统计年鉴》以及南昌市各县区统计公报。

2.1.2 数据预处理

(1) DEM 数据:通过在 ArcGIS10.3 软件平台的 Surface 和 Neighborhood 工具获取坡度和地形起伏度数据。

(2) 景观多样性和景观破碎度数据:以栅格化后的两期土地利用/覆被数据为对象,基于 Fragstas 3.3 软件处理所得,计算方法见式(1)和式(2):

香农多样性指数:

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

式中: m 为景观类型数目, P_i 为景观斑块类型 i 所占的比率。

斑块密度:

$$PD = \frac{N_i}{A} \quad (2)$$

式中, N_i 为景观类型 i 的斑块数量, A 为研究区总面积。

(3) 土地利用程度综合指数数据:土地利用程度综合指数综合反映了某一地区土地利用程度^[50],计算公式见式(3):

$$L_a = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (3)$$
$$L_a \in 100, 400$$

式中: L_a 为土地利用程度综合指数; A_i 为第 i 级的土地利用程度分级指数; C_i 为第 i 级土地利用程度分级面积比。

(4) 气象数据:年均气温、年均降水量、极端最高温、极端最低温和极端暴雨日数基于南昌市及周边地区 15 个气象站点资料进行空间插值得到。

(5) 社会经济数据:人口密度为各县(区)的总人口/总面积;人均 GDP 为各县(区)的地区生产总值/总人口;人均耕地为各县区的耕地总面积/总人口;第二产业比重为各县(区)的第二产业总产值/全市第二产业总产值。

经过反复测试验证,本研究选择 1.5km×1.5km 的格网作为基本评价单元。为了确保数据准确性,在评价分析之前须对所有数据进行几何配准和重采样,并将选用的所有数据转化为分辨率为 30m 的栅格影像。为了将 17 个评价指标尽可能细化到格网单元,针对数据处理中出现部分空间属性缺失的数据,在参考已有研究成果的基础上,基于数据采集技术间接获取^[45]。

2.2 研究方法

2.2.1 评价指标体系

了解影响脆弱性的因素是生态环境脆弱性评估的前提条件。总的来说,生态环境脆弱性由内部脆弱性和外部脆弱性共同决定,内部脆弱性源于生态环境本身结构,通常受到地形、地貌、气候等本底条件的影响,外部脆弱性通常受到人类活动因素的影响。因此,科学合理的指标体系是生态环境脆弱性评价的关键。生态敏感性-生态恢复力-生态压力度(Ecological Sensitivity-Ecological Recovery-Ecological Pressure Model——SRP)概念模型是以生态系统稳定为前提而构建的,具有清晰的因果关系,被广泛应用于生态评价。在参考相关研究

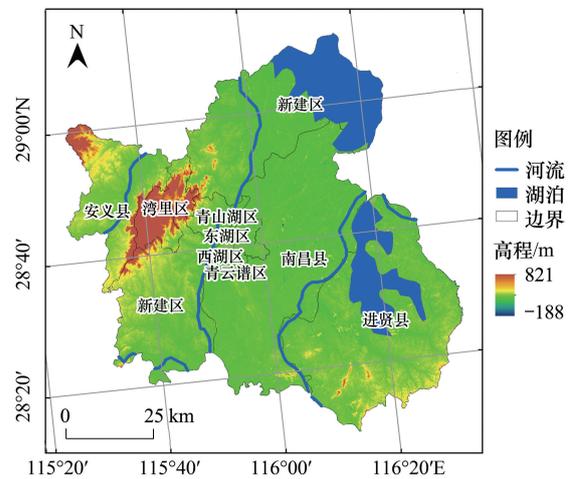


图 1 研究区位置示意图
Fig.1 Location of study area

成果的基础上^[51-52],结合南昌市生态环境脆弱性的表现和主要成因,遵循稳定性、主导性、科学性、可行性、独立性和适应性的原则,从生态敏感性、生态恢复力和生态压力度三个层面选取了 17 个指标构建南昌市生态环境脆弱性评价指标体系,并根据对生态环境脆弱性的影响,将所选用指标分为正向指标、负向指标和定性指标^[10,19],详见表 1。

表 1 南昌市生态环境脆弱性评价指标体系

Table 1 Eco-environmental vulnerability evaluation indicator system in Nanchang City

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Indicator layer	属性 Attributes
生态敏感性 Ecological sensitivity	地形因子	高程/m	正向
		坡度/(°)	正向
		地形起伏度/(°)	正向
	地表因子	景观多样性	负向
		景观破碎度	正向
		土地利用类型	定性
	气象因子	年均气温/°C	负向
		年均降水量/mm	正向
		极端最高温/°C	正向
		极端最低温/°C	负向
生态恢复力 Ecological recovery	植被因子	归一化植被指数(NDVI)	负向
生态压力度 Ecological pressure	社会因子	人口密度/(人/km ²)	正向
		人均 GDP/(万元/人)	正向
		人均耕地/(亩/人)	负向
		土地利用程度/%	正向
		第二产业比重/%	正向

2.2.2 评价指标标准化

由于各评价指标性质不同、量纲各异,因此需对原始数据进行标准化处理。

(1) 极差标准化:正向指标和负向指标采用不同的标准化公式^[4,19]:

$$\text{正向指标: } Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \times 10 \quad (4)$$

$$\text{负向指标: } Z_{ij} = \frac{X_{j\max} - X_{ij}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \times 10 \quad (5)$$

式中, Z_{ij} 为每年数据标准化后的指标数值,变化范围为 0—10, X_{ij} 为第 i 个指标的第 j 个格网指标值, $X_{j\max}$ 为所有格网中的最大值, $X_{j\min}$ 为所有格网中的最小值。

(2) 分级赋值法标准化

对于定性指标,依据研究区的土地利用实际特征,结合相关研究成果^[4],按照分级赋值法进行量化赋值(表 2)。

表 2 分等级赋值标准

Table 2 Standardized value assignment

指标 Indicator	标准化赋值 Standardized value				
	2	4	6	8	10
土地利用/覆被类型 Land use/cover type	林地、水体	草地	耕地	建设用地	裸地

2.2.3 生态脆弱性评价方法

本研究通过构建生态脆弱性指数模型来量化生态环境脆弱性状况。为了消除指标信息中的重叠性和相关性,本文基于 SPSS19.0 软件平台,选用基于数理统计原理的空间主成分分析法 (SPCA) 对 17 个评价指标进行分析,根据主成分特征值大于 1 确定了 2000 年和 2015 年的 6 个主成分 (表 3)。

基于 SPCA 的基础上,进一步计算生态环境脆弱性指数 (EVI) 公式如下^[4,10]:

$$EVI = r_1 Y_1 + r_2 Y_2 + r_3 Y_3 + \dots + r_n Y_n \quad (6)$$

式中,EVI 为格网单元的生态脆弱性指数; r_i 为第 i 个主成分, Y_i 为第 i 个主成分对应的贡献率。

表 3 各主成分的特征值、贡献率和累计贡献率

Table 3 Eigenvalue, contribution rate and accumulated contribution rate of principal components

年份 Year	主成分系数 Coefficients of principal component	主成分 Principal component					
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
2000	特征值 λ	4.143	3.942	2.529	1.446	1.096	1.006
	贡献率/%	24.370	23.188	14.879	8.507	6.448	5.920
	累积贡献率/%	24.370	47.559	62.437	70.944	77.393	83.312
2015	特征值 λ	4.080	3.539	2.749	1.692	1.187	1.079
	贡献率/%	23.998	20.820	16.171	9.956	6.985	6.346
	累积贡献率/%	23.998	44.818	60.989	70.944	77.929	84.275

基于 SPCA 的基本原理,由式 (6) 和表 3 得到生态环境脆弱性指数的计算公式:

$$EVI_{2000} = 0.2437 \times Y_1 + 0.23188 \times Y_2 + 0.14879 \times Y_3 + 0.08507 \times Y_4 + 0.06448 \times Y_5 + 0.0592 \times Y_6$$

$$EVI_{2015} = 0.23998 \times Y'_1 + 0.2082 \times Y'_2 + 0.16171 \times Y'_3 + 0.09956 \times Y'_4 + 0.06985 \times Y'_5 + 0.06346 \times Y'_6$$

式中, EVI_{2000} 和 EVI_{2015} 分别为 2000 年和 2015 年的生态环境脆弱性指数; $Y_1 - Y_6$ 、 $Y'_1 - Y'_6$ 分别是根据空间主成分分析法提取的前 6 个主成分。

2.2.4 生态环境脆弱性分级与生态脆弱性综合指数

为了便于生态脆弱性指数 (EVI) 的度量和比较,需对其进行标准化处理。公式如下^[4]:

$$S_{EVI} = \frac{EVI - EVI_{\min}}{EVI_{\max} - EVI_{\min}} \times 10 \quad (7)$$

式中, S_{EVI} 为格网单元的生态脆弱性指数标准化值,变化范围为 0—10;EVI 为格网单元的生态脆弱性指数实际值; EVI_{\max} 为所有格网单元生态脆弱性指数的最大值; EVI_{\min} 为所有格网单元生态脆弱性指数的最小值。

在生态环境脆弱性指数 (EVI) 标准化的基础上,参照国内外同类研究的相关评价标准,并结合南昌市生态环境的实际特征,基于自然断点法对 2000 年和 2015 年的生态环境脆弱性指数进行分级。为了确保评价结果的可比性,本文以 2000 和 2015 年等级标准的平均值作为最终的分级标准^[8] (表 4)。

2.2.5 空间自相关分析

本文选用全局 Moran'I 和局部 Moran'I 指数两个指标,在 GeoDa 软件平台的支持下,基于格网尺度,分别对 2000 和 2015 年的生态环境脆弱性综合指数的空间差异及集聚特征进行分析,公式见式 (8) 和式 (9):

$$\text{全局 Moran'I 指数: } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

$$\text{局部 Moran'I 指数: } I = \frac{(X_i - \bar{X})}{S^2} \sum_j W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (9)$$

式中, I 代表 Moran'I 指数; X_i 、 X_j 代表的是第 i 个、第 j 个格网的脆弱性指数均值; \bar{X} 指的是全部格网的脆弱

性均值; W_{ij} 指的是空间权重矩阵; S 代表空间权重矩阵各元素之和。

表 4 生态环境脆弱性分级标准及其生态特征

Table 4 Classification standard and its ecological characteristics of eco-environmental vulnerability

脆弱性程度 Vulnerability degree	等级 Level	生态脆弱性指数标准化值 Standardized value of ecological vulnerability index (S_{EVI})	生态特征 Ecological characteristic
微度脆弱 Negligible vulnerability	I	$S_{EVI} \leq 2.444$	生态系统结构和功能合理完善, 所承受压力小, 生态系统稳定, 抗外界干扰能力和自我恢复能力强, 无生态异常出现, 生态脆弱性低。
轻度脆弱 Light vulnerability	II	$2.444 < S_{EVI} \leq 3.385$	生态系统结构和功能较为完善, 所承受压力较小, 生态系统较稳定, 抗外界干扰能力和自我恢复能力较强, 存在潜在的生态异常, 生态脆弱性较低。
中度脆弱 Medium vulnerability	III	$3.385 < S_{EVI} \leq 4.411$	生态系统结构和功能尚可维持, 所承受压力接近生态阈值, 生态系统较不稳定, 对外界干扰较为敏感, 自我恢复能力较弱, 已有少量生态异常, 生态脆弱性较高。
重度脆弱 Strong vulnerability	IV	$4.411 < S_{EVI} \leq 6.316$	生态系统结构和功能出现缺陷, 所承受压力大, 生态系统不稳定, 对外界干扰敏感性高, 受损后恢复难度大, 生态脆弱性高。
极度脆弱 Extreme vulnerability	V	$S_{EVI} > 6.316$	生态系统结构和功能严重退化, 所承受压力极大, 生态系统极不稳定, 对外界干扰极度敏感, 受损后恢复难度极大, 甚至不可逆转, 生态脆弱性极高。

在计算局部 Moran'I 指数的基础上进行空间聚类得到空间 LISA 聚类图, 在 95% 的置信区间内, 将生态环境脆弱性进一步划分为 5 种不同的类型, 即高高聚集区 (H-H)、高低聚集区 (H-L)、低高聚集区 (L-H)、低低聚集区 (L-L) 和不显著 (No significant)。具体含义见表 5:

表 5 不同的 LISA 聚集模式的内涵

Table 5 The connotation of different LISA clustering models

集聚类型 Clustering types	含义 Connotation
高高聚集区 (H-H) High-High clustering	区域自身生态环境脆弱性和周边水平都较高的空间集聚特征
高低聚集区 (H-L) High-Low clustering	区域自身生态环境脆弱性较高, 但周边区域较低的空间集聚特征
低高聚集区 (L-H) Low-High clustering	区域自身生态环境脆弱性较低, 但周边区域较高的空间集聚特征
低低聚集区 (L-L) Low-Low clustering	区域自身生态环境脆弱性和周边水平都较低的空间集聚特征
不显著 No significant	不存在显著的空间集聚特征

3 结果分析

3.1 市域范围内生态环境脆弱性整体特征

结合 2000—2015 年南昌市生态环境脆弱性评价结果 (表 6) 和空间分布图 (图 2), 2000 年微度脆弱面积占比最高, 占据全市总面积的 51.27%, 主要集中在新建区中部及南部地区、南昌县北部及中部地区、安义县东部地区; 其次为轻度脆弱, 面积占比为 32.15%, 主要分布于安义县西部、进贤县东部地区; 中度和极度脆弱面积占比近似, 分别为 7.82%、7.76%, 中度脆弱区集中于新建区东北部、安义县西北角及进贤县东北角, 极度脆弱区在南昌市建成区集中分布; 重度脆弱区面积占比最小, 仅占研究区面积的 1%。

2000 年以后, 伴随着国内城市化步伐逐渐加快, 城镇化水平不断地提高, 南昌市人地矛盾日益激化。在人类活动对城市生态环境的严重干扰下, 使得全市生态环境进一步恶化。到 2015 年, 重度脆弱面积占比占据全市首位, 由 2000 年的 1% 增至 35.72%, 呈片状分布在南昌市西北部及南部地区; 中度脆弱次之, 面积占比由

2000 年的 7.82% 增至 26.19%, 主要集中在南昌市西南部及东部地区; 极度脆弱面积占比由 2000 年的 7.76% 增至 15.64%, 呈片状集中分布于南昌市建成区、西南部及北部地区; 轻度脆弱面积占比由原先的 32.15% 缩减至 15.33%; 而微度脆弱面积从 2000 年的 51.27% 萎缩至 7.12%, 在新建区中部及进贤县分布。

总体而言, 2000—2015 年间南昌市生态环境脆弱性主要表现为由微度和轻度脆弱向中度和重度脆弱快速转变的趋势, 且微度和轻度脆弱面积不断缩减、重度和极度脆弱不断扩张。

表 6 南昌市 2000—2015 年生态环境脆弱性评价结果

Table 6 The results of eco-environmental vulnerability evaluation in Nanchang City from 2000 to 2015

脆弱性等级 Vulnerability level	2000			2015		
	格网数/个 Grid	面积/km ² Area	占比/% Percentage of total area	格网数/个 Grid	面积/km ² Area	占比/% Percentage of total area
微度脆弱 Negligible vulnerability	1815	3800.28	51.27	269	528.46	7.12
轻度脆弱 Light vulnerability	1111	2383.16	32.15	539	1136.03	15.33
中度脆弱 Medium vulnerability	291	579.38	7.82	911	1941	26.19
重度脆弱 Strong vulnerability	38	74.08	1	1263	2647.15	35.72
极度脆弱 Extreme vulnerability	256	574.89	7.76	529	1159.15	15.64
总计 Total	3511	7411.8	100	3511	7411.79	100

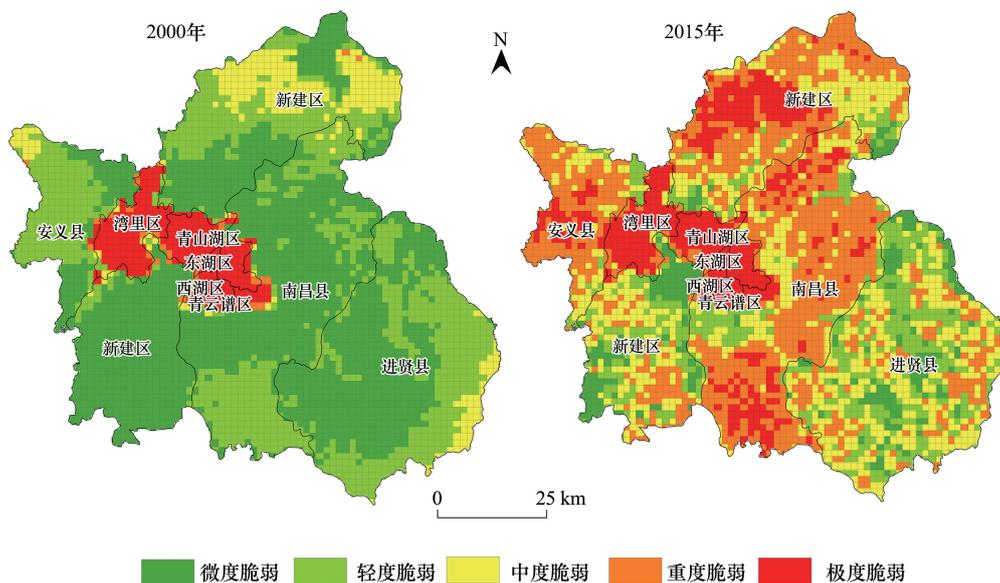


图 2 2000—2015 年生态环境脆弱性空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of eco-environmental vulnerability from 2000 to 2015

3.2 县(区)域范围内生态环境脆弱性变化特征

2000—2015 年间, 东湖区和西湖区生态环境脆弱性皆以极度和重度脆弱为主, 东湖区和西湖区是历史悠久的老城区, 也是经济快速发展区域, 旧城面积大, 人口密度大, 生态持续恶化。青山湖区是典型的老工业城区, 区内“三湖三河”交错环绕, 但随着工业化进程的迅速推进, 区内生态环境破坏严重, 尤其是玉带河流域区域。因此, 青山湖区一直处于极度脆弱水平。青云谱区 2000 年以极度脆弱为主, 而 2015 年转变为极度和重度脆弱为主。湾里区由 2000 年的以极度和轻度脆弱为主转变为极度和重度脆弱为主。湾里区作为南昌市和鄱阳湖生态经济区的后花园, 森林覆盖率达到 73.15%, 区内旅游业发达。加之夏季多短时大范围集中降水, 容易引发小规模滑坡及水土流失等。新建区 2000 年以微度和轻度脆弱为主, 2015 年变为重度和中度脆弱为主。由于新建区为南昌建成区西进的主要拓展区域, 与红谷滩新区毗邻, 正处于经济快速发展时期, 生态环境

受人类活动干扰剧烈。2000 年安义县以轻度和微度脆弱为主,2015 年转变为重度和中度脆弱为主,可见该县生态环境脆弱程度逐渐加深。作为长珠闽三个经济三角洲共同腹地的进贤县,2000 年以微度和轻度脆弱为主,2015 年转变为中度和轻度脆弱为主,这与其优越地区位密切相关。南昌县,素有江西“首府首县”之称,与南昌主城区无缝衔接的区位优势,使其经济发展得到带动,人为扰动日益加剧,使生态环境由微度和轻度脆弱为主转为重度和中度脆弱为主。

表 7 2000—2015 年不同县区生态环境脆弱性评价结果(面积比重/%)

Table 7 The results of eco-environmental vulnerability evaluation in different administrator divisions

各县区 County	微度脆弱 Negligible		轻度脆弱 Light		中度脆弱 Medium		重度脆弱 Strong		极度脆弱 Extreme	
	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015
	东湖区	0	0	0	0	0	0	5.05	18.08	94.95
西湖区	0.32	0.58	1.44	2.51	0.84	1.58	20.02	47.66	77.38	47.66
青山湖区	1.9	0.52	0.19	0.27	1.97	1.6	7.5	9.61	88.45	88
青云谱区	0	0	0.89	3.89	0	2.76	0	46.68	99.11	46.68
湾里区	1.67	0.74	5.81	1.47	3.46	5.21	4.81	11.5	84.24	81.08
新建区	58.93	10.81	22.39	13.18	17.2	30.17	0.64	33.67	0.84	12.18
安义县	30.44	0.26	60.8	7.48	5.94	20.7	1.43	58.04	1.38	13.52
进贤县	53.86	13.22	41.19	31.31	4.95	37.67	0	17.66	0	0.14
南昌县	61.36	0.63	33.85	8.57	1.39	18.26	0.68	56.45	2.72	16.09

3.3 不同土地利用类型的生态环境脆弱性特征

从不同土地利用类型生态环境脆弱性综合指数来看(表 8),2000—2015 年间南昌市生态环境脆弱性呈现由轻度脆弱向中度脆弱转变的趋势,表明区内生态环境不断恶化。不同土地利用类型生态环境脆弱性综合指数由大到小为:2000 年,建设用地>草地>耕地>林地>未利用地>水域;2015 年,建设用地>耕地>水域>林地>草地>未利用地。其中,建设用地生态环境脆弱性综合指数始终最大;耕地和建设用地由轻度脆弱转变为重度脆弱;林地、草地、水域和未利用地由轻度脆弱变为中度脆弱。综上可见,研究区内各土地利用类型的生态环境脆弱性皆呈增强趋势,表明其生态环境恶化加剧。

表 8 2000—2015 年不同土地利用类型生态脆弱性综合指数

Table 8 Eco-environmental vulnerability synthesis index for different land use types from 2000 to 2015

年份 Year	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Wetland	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	合计 Total
2000	2.83	2.825	2.909	2.8	2.988	2.801	2.859
2015	4.662	4.177	4.052	4.381	4.762	3.999	4.339

从不同土地利用类型生态环境脆弱区面积可知(表 9),2000 年耕地、草地、未利用地以微度和轻度脆弱为主;林地以微度和轻度脆弱为主,极度脆弱次之;水域以微度和轻度脆弱为主,中度脆弱次之;建设用地以微度和极度脆弱为主。到 2015 年,耕地和林地表现为以重度和中度脆弱为主,极度脆弱次之;草地以微度和轻度脆弱为主;水域以重度和中度脆弱为主,轻度脆弱次之;建设用地以重度和极度脆弱为主,中度脆弱为次;未利用地以中度和重度脆弱为主。

3.4 生态环境脆弱性空间集聚特征

2000 年和 2015 年生态环境脆弱性的全局 Moran'I 指数分别为 0.8827 和 0.7686,可见 2000 年和 2015 年南昌市生态环境脆弱性具有明显的空间自相关,且为正相关(图 3)。从 LISA 聚类图来看(图 4),2000 年高高聚集区分布在极度脆弱区,集中于南昌市建成区、南昌县西部地区;低低聚集区分布在微度和轻度脆弱区,集中于新建区南部、中部及东北部地区、进贤县中部地区、安义县南部及东北部地区、南昌县西部地区;到 2015

年,高高聚集区进一步向周边县区扩展,主要集中在南昌市建成区、新建区北部、安义县西部、南昌县南部及北部地区,这与 2000 年后南昌市城镇化和工业化迅速发展、建设用地迅速扩张息息相关;低低聚集区呈片状主要分布在新建区南部、中部及东北部地区、进贤县北部、中部及南部地区、南昌县西部地区。可见,2000—2015 年南昌市生态环境脆弱性具有显著的聚集性特征,高高聚集区主要分布在极度脆弱区,低低聚集区主要与微度和轻度脆弱区相关。

表 9 2000—2015 年不同土地利用类型脆弱性评价结果(面积/km²)

Table 9 The results of eco-environmental vulnerability evaluation for different land use types from 2000 to 2015

土地利用类型 Land use types	微度脆弱 Negligible		轻度脆弱 Light		中度脆弱 Medium		重度脆弱 Strong		极度脆弱 Extreme	
	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015
耕地 Farmland	2358.91	130.81	1291.68	376.5	153.37	867.79	26.93	1455.11	164.92	559.82
林地 Forestland	428.97	110.48	386.33	190.43	98.62	253.76	19.84	220.02	218.56	211.17
草地 Grassland	32.18	11.54	31.61	16.77	9.08	9.56	0	9.75	3.13	5.66
水域 Wetland	693.1	127.56	524.64	362.1	288.23	369.68	19.17	523.07	60.09	97.05
建设用地 Construction land	198.94	88.97	78.41	125.95	10.11	240.18	7.37	337.07	125.28	277.9
未利用地 Unused land	88.19	59.1	70.49	64.28	19.97	200.04	0.78	102.13	2.9	7.55

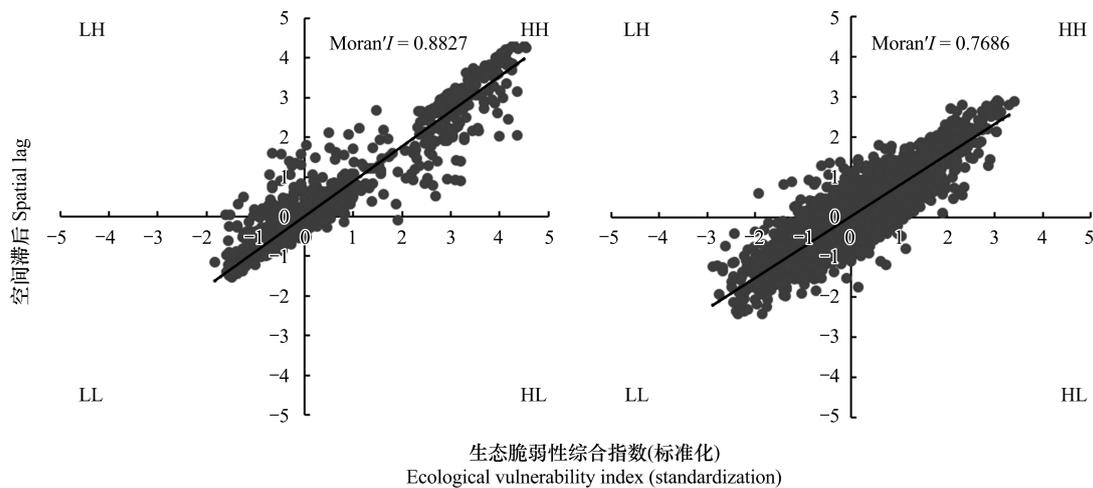


图 3 2000—2015 年生态环境脆弱性 Moran 'I 指数

Fig.3 Eco-environmental vulnerability Moran 'I index from 2000 to 2015

3.5 驱动力因素分析

结合 2000 和 2015 年主成分载荷矩阵(表 10 和表 11),载荷系数越大表示该驱动因子对生态环境脆弱性影响越大。2000 年,第 1 主成分与人口密度、人均 GDP、人均耕地、第二产业比重有较大的相关,这些因子主要反映人口和社会经济发展状况,可视为人口增长和社会经济发展主成分,贡献率为 24.37%;第 2、3 主成分与坡度、地形起伏度、年均气温、极端最高温、极端最低温、年降水量、极端暴雨日数有较大的相关,分别反映地形和气象状况,可看作自然本底主成分,贡献率分别为 23.188%、14.879%;第 4、5、6 主成分分别与归一化植被指数、景观多样性指数、景观破碎度相关,分别表征自然和社会经济发展状况,贡献率分别为 8.507%、6.448%、5.92%。综上所述,2000 年南昌市生态环境脆弱性的驱动因子主要为人口密度、人均 GDP、人均耕地、第二产业比重、坡度、地形起伏度、年均气温、极端最高温、极端最低温、年降水量、极端暴雨日数。

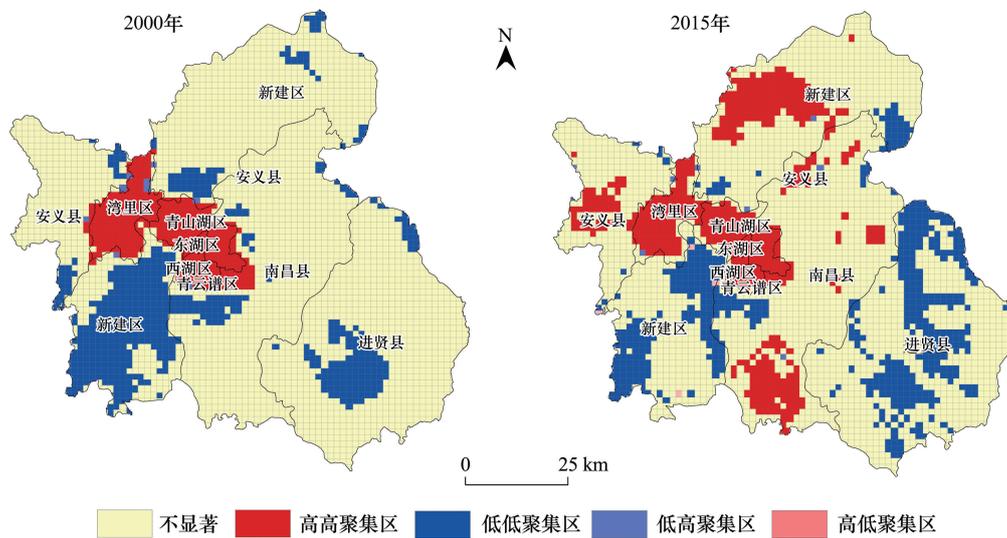


图 4 2000—2015 年生态环境脆弱性 LISA 聚类图

Fig.4 The LISA aggregation of eco-environmental vulnerability from 2000 to 2015

表 10 2000 年主成分载荷矩阵

Table 10 The load matrix of principal components in 2000

评价指标 Evaluating indicators	主成分 Principal component					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
高程 Elevation	0.56	0.5069	0.3821	0.3441	0.0905	-0.0411
坡度 Slope	0.4815	0.6562 *	0.4572	0.1686	0.1263	-0.0028
地形起伏度 Terrain relief	0.4701	0.6618 *	0.4507	0.1559	0.1331	-0.0032
景观多样性 Landscape diversity	-0.244	0.3354	-0.0395	-0.0417	0.8075 *	0.0379
景观破碎度 Landscape fragmentation	-0.0364	0.0011	0.0799	0.051	-0.0082	0.9913 *
土地利用类型 Land use type	-0.0441	-0.5217	-0.4096	0.4375	0.0961	0.0841
年均气温 Annual mean temperature	-0.4368	0.7396 *	-0.2605	0.2509	-0.1798	-0.0233
年均降水量 Annual mean precipitation	0.0246	-0.4545	0.7655 *	-0.1356	-0.0307	-0.0196
极端最高温 Extreme maximum temperature	0.4546	-0.7107 *	0.1448	0.1461	0.1453	0.0048
极端最低温 Extreme minimum temperature	-0.5918	0.6607 *	-0.0427	-0.0272	-0.0307	-0.0059
极端暴雨日数 Extreme rainstorm days	0.1323	-0.5462	0.6849 *	-0.2173	0.0659	-0.0091
NDVI Normalized difference vegetation index	-0.4555	0.0707	-0.1459	-0.7287 *	0.2706	0.0273
人口密度 Population density	0.8261 *	0.1914	-0.3877	-0.1946	0.0391	0.0481
人均 GDP Per capita GDP	0.8236 *	0.1915	-0.4615	-0.1248	-0.0133	0.0417
人均耕地 Per capita cultivated land	0.7061 *	-0.1189	-0.3614	-0.1708	0.2982	-0.0416
土地利用程度 Degree of land use	-0.1291	-0.5881	-0.3079	0.5106	0.2567	-0.0711
第二产业比重 Proportion of the second industry	0.6814 *	-0.0104	-0.1993	-0.2331	-0.3218	0.0283

* 表示各主成分中贡献率较高的影响因子

2015 年,第 1 主成分中坡度、地形起伏度、年均气温、极端最高温、土地利用程度的贡献率较高,与 2000 年相比,第 1 主成分由人口增长-经济发展主成分转变为自然本底主成分,这与 2015 年湾里区山体滑坡、建成区城市内涝、高温热浪密切相关。第 1 主成分贡献率为 23.998%。第 2 和 3 主成分与极端最低温、人口密度、人均耕地、人均 GDP、年均降水量有较大的相关,主成分贡献率分别为 20.82%、16.171%;可见,虽然第 1 主成

分被自然本底主成分取代,但人口-经济发展仍然是影响南昌市生态环境脆弱性的驱动力;第4和5主成分分别与归一化植被指数、景观多样性指数相关,贡献率分别为9.956%、6.985%;第6主成分由之前的景观破碎度转变为与第二产业比重相关,贡献率为6.346%。上述可知,2015年南昌市生态环境脆弱性主要驱动因子为坡度、地形起伏度、年均气温、极端最高温、土地利用程度、极端最低温、人口密度、人均耕地、人均GDP、年均降水量。

表 11 2015 年主成分载荷矩阵

Table 11 The load matrix of principal components in 2015

评价指标 Evaluating indicators	主成分 Principal component					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
高程 Elevation	0.5343	0.5699	-0.3087	0.3265	0.1704	0.0145
坡度 Slope	0.6829 *	0.5057	-0.3518	0.1707	0.1437	-0.204
地形起伏度 Terrain relief	0.6885 *	0.4936	-0.3454	0.1579	0.1444	-0.2128
景观多样性 Landscape diversity	0.3563	-0.056	-0.049	-0.3923	0.6188 *	0.252
景观破碎度 Landscape fragmentation	-0.2826	-0.0188	-0.1613	0.4807	-0.5763	0.0664
土地利用类型 Land use type	-0.5018	-0.0612	0.3845	0.2622	0.2929	0.3265
年均气温 Annual mean temperature	0.6621 *	-0.5897	0.0102	0.3063	-0.0549	0.2383
年均降水量 Annual mean precipitation	-0.4791	0.2577	-0.745 *	-0.2223	-0.0652	0.1665
极端最高温 Extreme maximum temperature	-0.6588 *	0.5664	0.0666	0.1021	0.1348	-0.2514
极端最低温 Extreme minimum temperature	0.5702	-0.6584 *	-0.192	-0.0077	-0.0999	0.1463
极端暴雨日数 Extreme rainstorm days	-0.5414	0.3599	-0.5919	-0.3016	-0.0735	0.0602
NDVI Normalized Difference vegetation index	0.0729	-0.4419	0.123	-0.7465 *	-0.07	-0.2253
人口密度 Population density	0.3258	0.6857 *	0.4903	-0.1124	-0.1845	0.3001
人均 GDP Per capita GDP	0.3145	0.3139	0.8073 *	-0.0176	-0.1177	-0.0309
人均耕地 Per capita cultivated land	0.0082	0.6918 *	0.5392	-0.2554	-0.1094	0.0179
土地利用程度 Degree of land use	-0.6288 *	-0.0803	0.1247	0.359	0.3998	0.2673
第二产业比重 Proportion of the second industry	-0.263	-0.4013	0.2723	0.2626	0.2252	-0.6564 *

* 表示各主成分中贡献率较高的影响因子

4 结论

本文以南昌市为研究区,结合空间主成分分析法、全局 Moran'I 指数和 LISA 聚类图,基于公里格网尺度,对 2000—2015 年南昌市生态环境脆弱性的现状、特征及驱动力进行评价分析,所得主要结论如下:

(1) 2000—2015 年间南昌市生态环境脆弱性呈现由轻度脆弱向中度脆弱演变的趋势,且微度和轻度脆弱面积不断缩减、重度和极度脆弱不断扩张。南昌市生态环境脆弱性是由人类活动和自然环境相互作用形成,人口密度、人均 GDP、人均耕地、坡度、地形起伏度、年均气温、极端最高温、极端最低温、年均降水量为主要驱动力因子。

(2) 2000—2015 年南昌市各县区生态环境脆弱性差异明显,其中东湖区、西湖区、青山湖区、青云谱区、湾里区 5 个区的脆弱性程度最高,始终保持在极度和重度脆弱水平,其他县区脆弱性程度增幅较大。

(3) 2000—2015 年南昌市耕地和建设用地由轻度脆弱转为重度脆弱,林地、草地、水域和未利用地由轻度脆弱转为中度脆弱,可见研究区内各土地利用类型的生态环境脆弱性皆呈增强趋势,表明其生态环境恶化加剧。

(4) 南昌市生态环境脆弱性具有明显的空间自相关性,且为正相关,高高聚集区集中于极度脆弱区,低低

聚集区与微度和轻度脆弱区相关。

5 讨论

21 世纪以来,南昌市城市化进程明显加快,快速的经济的发展使人类活动对生态环境干扰加剧。土地利用作为人类活动的直观反映,直接影响着生态环境脆弱性^[8]。

2000—2015 年,南昌市生态环境脆弱性逐渐增强,区内生态环境明显恶化,这一研究成果与南昌市实际情况一致。2000—2015 年南昌市土地利用变化剧烈,按照各土地利用类型转出面积由大到小为:耕地>水域>林地>建设用地>未利用地>草地。其中,耕地由 3995.81 km² 缩减至 2904.49 km²,有 56.47% 转为建设用地;水域转出面积为 470.67 km²,占初期面积的 29.69%,有 23.02%、17.61% 分别转化为耕地和建设用地;林地面积由 1152.32 km² 缩减为 798.5 km²,其中复垦面积占林地减少面积的 72.17%。可见,随着城市化进程的加快,南昌市耕地面积锐减,导致人地矛盾进一步激化,区内复垦现象明显,引发了广泛的水文变化、水土流失及生态环境恶化^[53]。

本研究与同类研究的区别主要体现在以下三个方面:(1) 基于格网微观尺度来研究市域条件下的生态环境脆弱性,不仅体现了评价数据在空间分布上的异质性细节信息,而且有助于分析其空间分布特征和形成机理;(2) 从自然本底和人为胁迫两个方面选取 17 个指标构建生态环境脆弱性评价体系,使该类研究评价指标更为完善;(3) 选择南昌市为研究区,不仅弥补了典型案例区涵盖不全面的现状,而且为类似区域的生态建设和恢复提供了理论基础。

参考文献 (References):

- [1] 张笑楠, 王克林, 张伟, 陈洪松, 何寻阳. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性. 生态学报, 2009, 29(2): 749-757.
- [2] 张学玲, 余文波, 蔡海生, 郭晓敏. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述. 生态学报, 2018, 38(16): 5970-5981.
- [3] Lavorel S, Flannigan M D, Lambin E F, Scholes M C. Vulnerability of land systems to fire: Interactions among humans, climate, the atmosphere, and ecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 12(1): 33-53.
- [4] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 马朋, 杨予静, 任庆水, 张雯. 三峡库区生态脆弱性评价. 生态学报, 2015, 35(21): 7117-7129.
- [5] 王瑞燕, 赵庚星, 周伟, 姜曙千, 秦元伟. 县域生态环境脆弱性评价及其动态分析——以黄河三角洲垦利县为例. 生态学报, 2009, 29(7): 3790-3799.
- [6] 王录仓, 史凯文, 梁珍. 城市脆弱性综合评价与动态演变研究——以兰州市为例. 生态经济, 2017, 33(9): 137-141, 179.
- [7] Tapia C, Abajo B, Feliu E, Mendizabal M, Martinez J A, Fernández J G, Laburu T, Lejarazu A. Profiling urban vulnerabilities to climate change: An indicator-based vulnerability assessment for European cities. *Ecological Indicators*, 2017, 78: 142-155.
- [8] Ding Q, Shi X, Zhuang D F, Wang Y. Temporal and spatial distributions of ecological vulnerability under the influence of natural and anthropogenic factors in an eco-province under construction in China. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3087.
- [9] Wang Y, Ding Q, Zhuang D F. An eco-city evaluation method based on spatial analysis technology: A case study of Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 37-46.
- [10] 林金煌, 胡国建, 祁新华, 徐曹越, 张岸, 陈文惠, 帅晨, 梁春阳. 闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力. 生态学报, 2018, 38(12): 4155-4166.
- [11] 毛学刚, 汪航. 基于栅格尺度的北京市密云县生态环境脆弱性评价. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41(1): 96-102.
- [12] 靳毅, 蒙吉军. 生态脆弱性评价与预测研究进展. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2646-2652.
- [13] 徐广才, 康慕谊, 贺丽娜, 李亚飞, 陈雅如. 生态脆弱性及其研究进展. 生态学报, 2009, 29(5): 2578-2588.
- [14] 蔡海生, 陈美球, 赵小敏. 脆弱生态环境脆弱度评价研究进展. 江西农业大学学报, 2003, 25(2): 270-275.
- [15] 袁烽迪, 张溪, 魏永强. 青藏高原生态屏障区生态环境脆弱性评价研究. 地理空间信息, 2018, 16(4): 67-69.
- [16] Nguyen A K, Liou Y A, Li M H, Tran T A. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 100-117.
- [17] 孙平军, 修春亮, 王忠芝. 基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究——以辽宁阜新为例. 经济地理, 2010, 30(8): 1354-1359.
- [18] Hou K, Li X X, Zhang J. GIS analysis of changes in ecological vulnerability using a SPCA model in the loess plateau of northern Shaanxi, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(4): 4292-4305.
- [19] 王志杰, 苏娜. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析. 生态学报, 2018, 38(2): 432-442.
- [20] 康永辉, 解建仓, 黄伟军, 王宝红. 广西大石山区农业干旱成因分析及脆弱性评价. 自然灾害学报, 2014, 23(3): 24-32.
- [21] Liu D, Cao C X, Dubovyk O, Tian R, Chen W, Zhuang Q F, Zhao Y J, Menz G. Using fuzzy analytic hierarchy process for spatio-temporal analysis of eco-environmental vulnerability change during 1990-2010 in Sanjiangyuan region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 612-625.

- [22] 吴春生, 黄翀, 刘高焕, 刘庆生. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价. 生态学报, 2018, 38(13): 4584-4595.
- [23] 范语馨, 史志华. 基于模糊层次分析法的生态环境脆弱性评价——以三峡水库生态屏障区湖北段为例. 水土保持学报, 2018, 32(1): 91-96.
- [24] 孟晋晋, 刘花台. 基于主成分-聚类分析模型的生态环境脆弱性分析: 以平潭综合实验区为例. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 179-182.
- [25] Cao C X, Yang B, Xu M, Li X W, Singh R P, Zhao X J, Chen W. Evaluation and analysis of post-seismic restoration of ecological security in Wenchuan using remote sensing and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, 7(6): 1919-1936.
- [26] Martins V N, e Silva D S, Cabral P. Social vulnerability assessment to seismic risk using multicriteria analysis: the case study of Vila Franca do Campo (São Miguel Island, Azores, Portugal). *Natural Hazards*, 2012, 62(2): 385-404.
- [27] Eckert S, Jelinek R, Zeug G, Krausmann E. Remote sensing-based assessment of tsunami vulnerability and risk in Alexandria, Egypt. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 714-723.
- [28] Buxton M, Haynes R, Mercer D, Butt A. Vulnerability to bushfire risk at Melbourne's urban fringe: the failure of regulatory land use planning. *Geographical Research*, 2011, 49(1): 1-12.
- [29] Qiao Z, Yang X, Liu J, Xu X L. Ecological vulnerability assessment integrating the spatial analysis technology with algorithms: a case of the wood-grass ecotone of Northeast China. *Abstract and Applied Analysis*, 2013, 2013: 1-8.
- [30] 马真臻, 王忠静, 顾艳玲, 夏婷. 中国西北干旱区自然保护区生态脆弱性评价——以甘肃西湖、苏干湖自然保护区为例. 中国沙漠, 2015, 35(1): 253-259.
- [31] 王铁军, 赵礼剑, 张溪. 青藏高原生态屏障区生态环境综合评价方法探讨. 测绘通报, 2018, (9): 112-116.
- [32] 韦晶, 郭亚敏, 孙林, 江涛, 田信鹏, 孙光德. 三江源地区生态环境脆弱性评价. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1968-1975.
- [33] Wang X D, Zhong X H, Gao P. A GIS-based decision support system for regional eco-security assessment and its application on the Tibetan Plateau. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(10): 1981-1990.
- [34] Song G D, Chen Y, Tian M R, Lv S H, Zhang S S, Liu S L. The ecological vulnerability evaluation in southwestern mountain region of China based on GIS and AHP method. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 465-475.
- [35] 马一丁, 付晓, 田野, 王辰星, 吴钢. 锡林郭勒盟煤电基地开发生态脆弱性评价. 生态学报, 2017, 37(13): 4505-4510.
- [36] Yang Y J, Ren X F, Zhang S L, Chen F, Hou H P. Incorporating ecological vulnerability assessment into rehabilitation planning for a post-mining area. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(6): 245.
- [37] 黄光球, 刘权宸, 陆秋琴. 基于状态 Petri 网的矿区生态环境脆弱度动态评价方法. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1583-1588.
- [38] 王林峰, 张平宇, 李鹤, 刘世薇. 东北西部农牧交错带社会生态系统脆弱性. 中国科学院大学学报, 2018, 35(3): 345-352.
- [39] 杨俊, 关莹莹, 李雪铭, 席建超. 城市边缘区生态脆弱性时空演变——以大连市甘井子区为例. 生态学报, 2018, 38(3): 778-787.
- [40] Bárcena J F, Gómez A G, García A, Álvarez C, Juanes J A. Quantifying and mapping the vulnerability of estuaries to point-source pollution using a multi-metric assessment: The Estuarine Vulnerability Index (EVI). *Ecological Indicators*, 2017, 76: 159-169.
- [41] Malekmohammadi B, Jahanishakib F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 293-303.
- [42] 王雪梅, 席瑞. 基于 GIS 的渭干河流域生态环境脆弱性评价. 生态科学, 2016, 35(4): 166-172.
- [43] 邵秋芳, 彭培好, 黄洁, 刘智, 孙小飞, 邵怀勇. 长江上游安宁河流域生态环境脆弱性遥感监测. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 175-181.
- [44] Pearson L J, Nelson R, Crimp S, Langridge J. Interpretive review of conceptual frameworks and research models that inform Australia's agricultural vulnerability to climate change. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(2): 113-123.
- [45] 李建春, 袁文华. 基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究. 自然资源学报, 2017, 32(6): 988-1001.
- [46] 丁明军, 王敏, 张华. 南昌快速城市化过程对环境多介质有机碳含量的影响. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2307-2314.
- [47] 冉凤维, 罗志军, 章磊. 2000—2015 年南昌市土地利用变化及驱动力分析. 江西农业大学学报, 2017, 39(4): 834-842.
- [48] 郭丽红, 廖明, 郭丽霞, 陈娟, 方俊. 基于 RS 和 GIS 的地质灾害易发性评价研究——以南昌市湾里区为例. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 61-65.
- [49] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用变化特征及驱动机制. 经济地理, 2015, 35(5): 148-154, 197.
- [50] 冯异星, 罗格平, 尹昌应, 周德成, 鲁蕾, 许文强, 戴丽. 干旱区内陆河流域土地利用程度变化与生态安全评价——以新疆玛纳斯河流域为例. 自然资源学报, 2009, 24(11): 1921-1932.
- [51] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 黄玫. 基于 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2084-2090.
- [52] 齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 谢余初, 张影. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价. 水土保持通报, 2017, 37(1): 224-228.
- [53] Shao H Y, Liu M, Shao Q F, Sun X F, Wu J H, Xiang Z Y, Yang W N. Research on eco-environmental vulnerability evaluation of the Anning River Basin in the upper reaches of the Yangtze River. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(5): 1555-1568.