DOI: 10.5846/stxb201801300247

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分析.生态学报,2018,38(12): - . Lin J H, Hu G J, Qi X H, Xu C Y, Zhang A, Chen W H, Shuai C, Liang C Y.Ecological environmental vulnerability and its driving forces in urban agglomeration in the Fujian Delta region. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力分析

林金煌1,2,胡国建1,祁新华1,徐曹越1,张 岸2,陈文惠1,*,帅 晨1,梁春阳1

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101

摘要:生态安全是地区社会经济可持续发展的基本前提之一,而生态环境脆弱性会威胁地区的生态安全,进行生态环境脆弱性 评价具有重要意义。以闽三角城市群为例,分别选取 2000 年和 2015 年的高程、坡度、岩性、土壤类型、NDVI、年均降水量、年均 温、人口密度、人均 GDP、路网密度、景观多样性、土地利用程度和工业固体废弃物排放量等 13 个指标,基于空间主成分分析法, 并结合全局 Moran'I 和 LISA 聚类图,从整体特征、空间差异、空间集聚、地类脆弱性分异以及驱动力 5 个方面,探讨闽三角城市 群的生态环境脆弱性及其驱动力。结果表明:2000—2015 年间,闽三角城市群的生态环境脆弱性整体处于中度脆弱,但呈现出 由中度脆弱向重度脆弱过渡的趋势;2000—2015 年间,生态环境脆弱性呈现出由东南沿海向西北内陆逐渐增强的整体趋势,并 存在明显的地带性特征,东南沿海增长不明显,部分地区有所下降,而西北内陆增长明显;生态环境脆弱性存在显著的空间自相 关性,且为显著正相关,在西北部山区地带为显著的高高聚集,在东南沿海平原地带为显著的低低聚集,16 年间集聚性特征在 空间上有所迁移和扩张;2000—2015 年间,生态环境脆弱性在各地类存在着一定的异质性,其生态环境脆弱性指数大小顺序始 终为:林地>未利用地>草地>耕地>水域>建设用地,整体由中度脆弱向重度脆弱过渡;2000—2015 年间,生态环境脆弱性的驱 动力有所变化,但人口密度、景观多样性、岩性和土壤类型一直是闽三角城市群生态环境脆弱性主要的驱动力。 **关键词**;生态环境脆弱性;驱动力;生态安全;闽三角城市群

Ecological environmental vulnerability and its driving forces in urban agglomeration in the Fujian Delta region

LIN Jinhuang^{1,2}, HU Guojian¹, QI Xinhua¹, XU Chaoyue¹, ZHANG An², CHEN Wenhui^{1,*}, SHUAI Chen¹, LIANG Chunyang¹

1 College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Ecological security is one of the fundamental guarantees for regional social and economic sustainable development; however, ecological environmental vulnerability threatens regional ecological security, which is essential for evaluating ecological environmental vulnerability in urban agglomeration in the Fujian Delta region. We selected 13 factors, including elevation, slope, lithology, soil type, normalized difference vegetation index, annual mean precipitation, annual mean temperature, population density, per capita GDP, road density, landscape diversity index, degree of land use, and industrial solid waste emissions in 2000 and 2015, based on the spatial principal component analysis method, combined with global Moran 'I and LISA clusters based on five quantitative characteristics, spatial patterns, spatial clustering, vulnerability differentiation of land use, and driving force to analyze the ecological environmental vulnerability and its

收稿日期:2018-01-30; 修订日期:2018-05-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502901);福建省科技计划项目(2017Y6101);福建省自然科学基金资助项目(2015J01122)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: whchenfz@ sohu.com

driving force in urban agglomeration in the Fujian Delta region. The results showed medium ecological environmental vulnerability in urban agglomerations in the Fujian Delta region, but showing an increasing trend from medium to strong vulnerability from 2000 to 2015. From 2000 to 2015, ecological environmental vulnerability showed an overall gradual increasing trend from the southeastern coast to the northwestern inland, with obvious zonal characteristics. The increase in the ecological environmental vulnerability was not obvious in the southeastern coastal area, and even declined in some areas, but increased significantly in the northwestern inland. Ecological environmental vulnerability had a significant spatial autocorrelation, and significant positive correlation, with a significant high-high clustering in the northwestern inland and a significant low-low clustering in the southeastern coastal area. The clustering characteristics showed some spatial migration and expansion over 16 years; from 2000 to 2015, there was a relative heterogeneity under different land use types, and the ecological environmental vulnerability index was always in the following order; forest land > unused land > grassland > farmland > wetland > construction land, with a transition from medium to strong vulnerability. The driving force of ecological environmental vulnerability changed from 2000 to 2015, but population density, landscape diversity, lithology, and soil type were the main driving forces in urban agglomeration in the Fujian Delta region.

Key Words: ecological environmental vulnerability; driving forces; ecological security; urban agglomeration in the Fujian Delta region

20世纪初期,自美国著名生态学家 Clement 首次提出"生态过渡带"后,"生态环境脆弱性"、"生态环境脆弱区"等理念便得到了国内外相关学者的广泛关注^[1-2],尤其是 20 世纪 80 年代以来,生态环境脆弱性的研究 一直是生态学的一个重要的研究热点^[3-4]。关于生态环境脆弱性的定义,国内外学者还未形成统一的理 念^[5],如 Smith 等认为生态环境脆弱性是暴露程度与适应能力二者共同决定的函数关系^[6];徐广才等提出生 态环境脆弱性由敏感性、暴露性与适应性 3 方面构成,是人地系统对环境变化响应时表现出的一种属性^[7];刘 斌涛等则认为生态环境脆弱性是自然、人为共同作用下,生态系统受干扰而出现的生态功能下降的一种 现象^[8]。

当前,国内外学者对生态环境脆弱性展开了诸多研究,并已取得了丰硕成果^[5,9-12]。从研究对象来看,多 集中在湖泊水库^[13-16]、干旱区^[7,17]、高寒区^[18-19]、煤炭矿区^[20-22]、西南喀斯特地貌^[23-24]等领域,但针对闽三角 城市群这类近年来经济快速发展而又处于南方红壤侵蚀脆弱区的研究还相对缺乏。从研究方法来看,当前国 内外进行生态环境脆弱性评价的方法主要有 AHP 模型法^[18-19,20]、熵值法^[20]、主成分分析法^[13,15,25]、模糊综合 评价法^[26-27]、神经网络法^[28]、信息量模型法^[29-30]等。如于伯华等基于 AHP 模型法,从地貌、气候、植被和人类 干扰 4 个方面共选取了 10 个指标对青藏高原的生态环境脆弱性及其空间分异进行了系统评估^[19];孙平军等 基于 PSE 模型,选取熵值法对矿业城市的生态环境脆弱性进行评价^[20]。然而这些方法主要存在两方面的问 题:一是评价因子赋权的主观性,如 AHP 模型评价法对各个因子的权重赋值人为作用对评价结果的影响较 大;二是评价因子的重叠性,由于生态系统是一个相互关联、相互依存的有机体,评价指标之间存在一定的共 性和重叠性^[15],这会导致评价结果出现重复冗余的问题,进而影响最终的评价精度。从研究内容来看,多是 在不同时空尺度下,从数量特征、空间分布、空间分异及区划等方面对特定研究区单一年份的生态环境脆弱性 进行分析,而针对不同年份的生态环境脆弱性变化及其驱动力的分析则相对不足,并且关于生态环境脆弱性 的空间集聚特征分析的成果也鲜见于报道。

鉴于此,本文以经济发展较快的闽三角城市群为例,采用空间主成分分析法(Spatial Principal Components Analysis,SPCA),既减少了人为权重赋值的主观性,又有效降低了评价指标之间的重叠性,并结合全局 Moran' I、LISA 聚类以及土地利用方式,从总体特征、空间差异、空间集聚、地类脆弱性分异以及驱动力等方面,对闽 三角城市群 2000—2015 年的生态环境脆弱性进行综合评估,力图揭示该地区生态环境脆弱性的时空演变特 征及其驱动力,为重建和恢复生态系统稳定性,有效防止生态环境进一步恶化,保障城市群生态安全提供理论

依据。

3

1 研究区概况

闽三角城市群由厦门市、泉州市和漳州市3个设区市构成,地处116°53′21′′—119°01′38′′E,23°33′20′′— 25°56′45′′N,位于中国东南沿海,福建省的东南部,与台湾隔海相望,辖区总面积约2.5万km²(不含金门)。 闽三角城市群属典型的亚热带湿润季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,年均降水量1000—2000 mm,年 均温21℃^[31],地带性植被是常绿阔叶林,林业资源丰富。城市群地势西北高、东南低,多山地丘陵,平原主要 分布于东南沿海一带(图1),鹰厦铁路、龙厦高铁、厦深高铁、沈海高速、厦蓉高速、厦沙高速等贯穿全境,交通 便捷,是福建省经济较为发达的地区。随着人类活动强度的加大,生态环境遭到破坏^[9],且该地区以红壤侵 蚀性土壤为主,由于是台风登陆的高发地,夏季多短时强降雨,区域内的滑坡、洪涝等自然灾害频发,水土流失 也较为严重^[29],这对区域内生态安全造成了严重威胁。因此,针对闽三角城市群进行生态环境脆弱性评价具 有迫切需求。

2 研究方法与数据来源

2.1 评价指标选取

前人关于生态环境脆弱性的研究已表明,区域生态 环境脆弱性主要由自然本底的敏感性和不稳定性所造 成的脆弱性以及人为活动的干扰性和胁迫性所导致的 脆弱性两部分构成^[13,15]。闽三角城市群山地、丘陵的 面积占比超过 80%,地形起伏破碎、坡度较大、地质状 况脆弱,且位于我国东南沿海台风高发区,常伴有短时 强降雨^[32],因此自然本底较为脆弱。而闽三角城市群 也是我国东南沿海经济较为发达的地区,近年来社会经 济取得了重大突破,在经济高速发展的同时,也在一定 程度上威胁到了原有生态环境的稳定性,人为胁迫作用 正日益凸显。

当前,"成因-结果"模型并广泛应用于生态环境脆弱性的指标体系构建,它是基于研究区的地理特征来考虑影响地区生态环境脆弱性的因子,进而来评价地区生态环境脆弱性的总体特征^[4-5]。如邓伟等基于"成因-结果"模型,从气候、植被、地形、社会和经济等方面选取了20个指标,对榆林市的生态环境脆弱性进行综合评



Fig.1 Location of the urban agglomeration in the Fujian Delta Region

估^[33]。因此,参考国内外相关研究成果^[5,7,9,29],针对研究区特殊的地形地貌特征,并且为确保所选取指标体 系能反映区域的整体特征,本研究基于"成因-结果"模型,从导致研究区生态环境脆弱性的自然-社会-经济 三方面的成因出发,并考虑到数据的可获取性、可操作性和科学性,从地形、地貌、土壤、岩石、气候等方面分别 选取了高程^[2,15]、坡度^[8-9,19,21]、岩性^[15,29]、土壤类型^[7,9,29]、NDVI^[13,19-20]、年均降水量^[2,9,21]和年均温^[2,15]来表 征其自然本底脆弱性特征;从社会和经济等方面分别选取人口密度^[9,13,21]、人均 GDP^[13,15,20]、路网密 度^[7,15,19]、景观多样性^[2,14]、土地利用程度^[5,21]和工业固体废弃物排放量^[13,20]来表征人为胁迫脆弱性特征,并 建立评价指标体系(表1)。其中,坡度和高程为正向指标,其反映的是区域的地形地貌特征,坡度和高程越 大,坡体的稳定性越差,同时也较容易受暴雨侵蚀,进而增强其生态环境脆弱性;土壤类型反映的是土壤侵蚀 强度的本底特征,研究区处于南方红壤侵蚀生态脆弱区,且多短时强降雨,不同类型的土壤决定了其易发性和 侵蚀强度,从而影响生态环境脆弱性;岩性反映的是地区的地质状况,研究区地质较为脆弱,不同岩石类型通 过影响其抗干扰、抗风化能力,进而影响生态环境脆弱性;NDVI为负向指标,其反映了区域内的植被生长状 况,NDVI值越大,其保持水土的能力越强,抗干扰能力也越强,生态系统就越稳定,则生态环境脆弱性越低; 年均温和年均降水量反映的是气候条件的影响,年均降水量为正向指标,其会影响降水侵蚀能力,降水量大的 地区,水土侵蚀较严重,研究区年均降水充沛且多暴雨,会增强生态环境脆弱性;而年均温为负向指标,其通过 积温的形式影响区域内作物的生长环境,积温越大,越有利于植被的生长,生态系统越稳定,从而降低生态环 境脆弱性;人口密度、人均 GDP、路网密度和工业固体废弃物排放量为正向指标,其反映社会经济的发展对生 态环境的胁迫作用,由于研究区内社会经济发展的不均衡,不同的社会经济条件会对生态环境脆弱性产生不 同程度的增强作用;景观多样性和土地利用程度反映的是不合理的土地利用所带来的环境压力,土地利用程 度为正向指标,其越大对环境的破坏程度越大,而景观多样性则为负向指标,反映用地类型的多样化。在成因 分析的基础上,参考了相关研究的分级赋值标准^[12],并基于研究区实际的数据特征,对这 13 个指标进行标准 化赋值为 2、4、6、8、10,由此来反映区域的生态环境整体特征与差异。

评价指标	—————————————————————————————————————								
Evaluating indicators	2	4	6	8	10				
高程 Elevation/m	<300	300—600	600—900	900—1200	>1200				
坡度 Slope/(°)	<5	5—15	15—25	25—35	>35				
归—化植被指数(NDVI) Normalized difference vegetation index	>0.65	0.5—0.65	0.35—0.5	0.2—0.35	<0.2				
年均温/℃ Annual mean temperature	>21`	19—21	17—19	15—17	<15				
年均降水量/mm Annual mean precipitation	<1200	1200—1400	1400—1600	1600—1800	>1800				
岩性 Lithology	泥岩、石灰岩、黏 土岩、页岩	砾岩、角砾岩、粉 砂岩、粗、中、细 砂岩	片岩、石英岩、大 理岩、角闪岩、辉 长岩、辉绿岩、碳 酸岩	安山岩、流纹岩、 凝灰岩、玄武岩、 英安岩	花岗岩、花岗斑岩、 正长岩、闪长岩、二 长岩				
土壤类型 Soil type	水稻土、灰潮土	盐土、风砂土、草 甸土、石灰土	砖红壤、赤红壤、 赤 土、红 壤、赤 砂土	黄壤、黄红壤、粗 骨土、石质土	紫色土				
景观多样性指数 Landscape diversity index	>1.2	1.0—1.2	0.8—1.0	0.6—0.8	0.6<				
人口密度/(人/km ²) Population density	<300	300—600	600—900	900—1200	>1200				
路网密度/(km/km ²) Road density	< 0.4	0.4—0.7	0.7—1.0	1.0—1.3	>1.3				
人均 GDP/(万元/人) Per capita GDP	<1	1—3	3—6	6—10	>10				
土地利用程度/% Degree of land use	<20	20—30	30—40	40—50	>50				
工业固体废弃物排放量/万 t Industrial solid waste emissions	<10	10—20	20—30	30—40	>40				

表 1	生态环境脆弱性评价指标的赋值与标准化

Table 1 Evaluation and standardized of ecological environment vulnerability assessment indicator

2.2 评价模型构建

构建生态环境脆弱性指数(Eco-environment Vulnerability Index, EVI)以评价闽三角城市群的生态环境脆弱性状况。为消除指标信息中的重叠性和相关性,利用空间主成分分析法对13个评价指标进行分析,根据主成分累计贡献率达到85%以上确定2000年和2015年的6个主成分(表2)。

基于闽三角城市群生态环境脆弱性的评价模型,结合各指标间的相互关系,并根据 SPCA 的基本原理,在 尽可能损失较少信息的前提下,将多个指标综合成几个能代表区域整体特征的主成分,进而确定其 EVI 值,公 式如下:

$$EVI = r_1 Y_1 + r_2 Y_2 + r_3 Y_3 + \dots + r_n Y_n$$
(1)

式中,EVI为生态环境脆弱性综合指数,Y_i为第*i*个空间主成分的数值,r_i为第*i*个空间主成分对应的贡献率。

	Table 2 Eigenvale,	contribution ra	te and accumulat	lea contribution	rate of principal	component		
年份 Year	主成分系数 Coofficients of principal	主成分 Principal component						
	component	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	
2000	特征值λ	5.15	1.71	1.36	0.86	0.83	0.58	
	贡献率%	43.39	14.41	11.46	7.21	7.03	4.88	
	累计贡献率%	43.39	57.79	69.26	76.47	83.50	88.38	
2015	特征值λ	9.65	3.92	2.18	1.79	1.21	1.16	
	贡献率%	41.27	16.75	9.31	7.65	5.20	4.97	
	累计贡献率%	41.27	58.02	67.33	74.99	80.18	85.15	

表 2 各主成分特征值、贡献率与累计贡献率

基于 SPCA 的基本原理,由表 2 和式(1)得到闽三角城市群生态环境脆弱性指数的计算公式:

EVI₂₀₀₀ = 0.4339 × Y1 + 0.1441 × Y2 + 0.1146 × Y3 + 0.0721 × Y₄ + 0.0703 × Y₅ + 0.0488 × Y₆ (2) EVI₂₀₁₅ = 0.4127 × Y1' + 0.1675 × Y2' + 0.0931 × Y3' + 0.0765 × Y₄' + 0.052 × Y₅' + 0.0497 × Y₆' (3) 式中,EVI₂₀₀₀和 EVI₂₀₁₅分别是 2000 年和 2015 年的生态环境脆弱性指数, Y₁—Y₆、Y₁'—Y₆'分别是 2000 年和 2015 年基于空间主成分分析法提取的前 6 个主成分。

参照国内外生态环境脆弱性评价的相关划分标准^[29],综合考虑闽三角城市群特殊的生态环境特征,基于 自然断点法(Natural Breaks)对 2000 年的生态环境脆弱性指数进行分级,将生态环境脆弱性划分为微度脆弱、 轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱 5 个等级,各脆弱性等级的生态特征如表 3,而 2015 年的等级划分 标准与 2000 年保持一致,以确保评价结果的可对比性。

Table 3	Classification standard and its ecological characteristics of ecological environment vulnerability					
脆弱性等级	脆弱性指数	生态特征				
Vulnerability level	Vulnerability index	Ecological characteristic				
微度脆弱 Negligible vulnerability	<6.17	生态环境良好,结构配置合理,抗干扰能力强,生态系统稳定,生态安 全度高				
轻度脆弱 Light vulnerability	6.17—7.95	生态环境较好,结构配置较为合理,抗干扰能力较强,生态系统较稳定,生态安全度较高				
中度脆弱 Medium vulnerability	7.95—9.58	生态环境一般,结构配置一般,抗干扰能力一般,生态系统较不稳定, 生态安全度一般				
重度脆弱 Strong vulnerability	9.58—11.95	生态环境较差,结构配置较不合理,抗干扰能力较差,生态系统不稳定,生态安全度较低				
极度脆弱 Extreme vulnerability	>11.95	生态环境差,结构配置不合理,抗干扰能力差,生态系统极不稳定,生 态安全度低				

表 3	生态环境脆弱性分级标准及其生态特征

当	前,国内外针对单	一要素的空间自对	相关性可由全	局 Moran'I オ	和局部 Moran	l'I 两个指标来	描述。	生态环
境脆弱	性是一种自然的地	1理特征,而传统的	的行政区划统计	计分析会对	其特征产生不	下合理的割裂,	存在着	尺度不
匹配的	现象,无法较好的。	反映其实际的空间	可格局特征。	因此,本文在	闽三角城市	群生态环境的	评价结	果基础
上,以I	DEM 提取的二级子	流域为评价单元	,计算每个流	域内的生态	环境脆弱性	均值,进而基于	于全局 N	/loran' l
指数来	分析其空间自相关	性,并基于 LISA	聚类图从流域	(自然单元的	角度来探讨	闽三角城市群	生态环境	境脆弱

性的空间集聚性特征。

全局 Moran'I 指数的计算公式^[34]为:

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

局部 Moran'I 指数的计算公式^[35]为:

$$I = \frac{(X_i - \bar{X})}{S^2} \sum_j W_{ij}(X_j - \bar{X})$$
(5)

式中,*I* 代表 Moran'I 指数; X_i 、 X_j 代表的是第i 个、第j 个评价单元内的脆弱性指数均值; \overline{X} 指的是全部评价单元的脆弱性均值; 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。

空间关联局部指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)聚类图是在局部 Moran'I 指数的计算结果 上进行空间聚类得到的,它主要包含 5 种不同的空间聚集模式:高高聚集(H-H)、高低聚集(H-L)、低高聚集 (L-H)、低低聚集(L-L)和不显著(No significant)。不同空间聚集模式的含义^[35-36]如表 4。

表 4 不同的 LISA 聚集模式的内涵 Table 4 The connectation of different LISA clustering model

1000	The combination of unterent Libra clustering models
集聚类型 Clustering types	含义 Connotation
高高聚集(H-H) High-High clustering	高观测值的区域周围被同是高值的区域所包围的空间集聚方式
高低聚集(H-L) High-Low clustering	高观测值的区域周围被低值的区域所包围的空间集聚方式
低高聚集(L-H) Low-High clustering	低观测值的区域周围被高值的区域所包围的空间集聚方式
低低聚集(L-L) Low-Low clustering	低观测值的区域周围被同是低值的区域所包围的空间集聚特征
不显著 No significant	不存在显著的空间集聚特征

2.3 数据来源

本研究所选用的数据主要包括 2000 年和 2015 年的土地利用、地形(高程、坡度)、岩性、土壤类型、归一化 植被指数(NDVI)、气象(降水、气温)、景观多样性、土地利用程度、社会经济数据(人口密度、人均 GDP、路网 密度、工业固体废弃物排放量)和二级子流域等数据集。其中土地利用数据由 30 m 分辨率的 Landsat 系列遥 感影像进行遥感目视解译,将其分为林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用地6种类型;DEM数据由1:10 万数字线划图进行栅格化处理,分辨率为30m,并由此提取出高程和坡度数据;岩性来源于福建省地矿局,由 1:20万的福建省地质图进行数字化;土壤类型数据来源于福建省农业厅,由1:50万福建省土壤类型图进行 数字化;NDVI、年均温和年均降水量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn),其 中,NDVI由 SPOT_Vegetation 利用最大值合成法(MVC)进行合成,年均降水量和年均温数据是由各气象站点 的年均温、年均降水量进行插值得到;景观多样性是将土地利用数据转成栅格,再基于 Fragstas 4.2 软件进行 提取;土地利用程度是在已分类的土地利用类型基础上,根据土地利用类型的数量、面积及不同类型的土地利 用程度参数^[37]来计算得到;人口密度、人均 GDP、路网密度、工业固体废弃物排放量等社会经济指标主要来源 于 2001 年和 2016 年《福建省统计年鉴》、《漳州市环境质量公报》、《厦门市环境质量公报》和《泉州市环境质 量公报》等,其中人口密度为各县(市、区)的总人口/总面积,人均 GDP 为各县(市、区)的地区生产总值/总人 口,路网密度为各县(市、区)的道路总长度/总面积;二级子流域则是基于阈值法确定河流网络,进而对 30 m 分辨率的 DEM 数据进行子流域提取;为确保数据的准确性,将投影坐标系统一为 WCS1984,并将所有评价指 标数据均转化为 30 m 分辨率的栅格影像。

3 结果分析

3.1 生态环境脆弱性整体特征

基于 SPCA 进行权重赋值计算,得到 2000—2015 年闽三角城市群的生态环境脆弱性空间分布特征。结

果发现,2000—2015年间,闽三角城市群的生态环境脆弱性均主要集中在轻度脆弱、中度脆弱和重度脆弱 3 个等级,但生态环境脆弱性整体变大,重度脆弱和极度脆弱的比重有所上升。如表 5 所示:2000年,闽三角城 市群不同生态环境脆弱性等级的面积大小顺序为:中度脆弱>轻度脆弱>重度脆弱>微度脆弱>极度脆弱,其对 应面积占比分别为 28.90%、27.41%、24.51%、17.95%和 1.24%;2015年,闽三角城市群不同生态环境脆弱性等 级的面积大小顺序为:重度脆弱>中度脆弱>轻度脆弱>微度脆弱>极度脆弱,其对应面积占比分别为 42.44%、 27.68%、16.78%、8.09%和 5.00%。

Table 5 Area and its proportion of different ecological environment vulnerability from 2000 to 2015							
脆弱性等级	20	000	2015				
Vulnerability level	面积 Area/km ²	占比 Percent/%	面积 Area/km ²	占比 Percent/%			
微度脆弱 Negligible vulnerability	4345.35	17.95%	1956.10	8.09%			
轻度脆弱 Light vulnerability	6636.12	27.41%	4056.55	16.78%			
中度脆弱 Medium vulnerability	6998.32	28.90%	6692.02	27.68%			
重度脆弱 Strong vulnerability	5935.64	24.51%	10260.81	42.44%			
极度敏感 Extreme vulnerability	299.06	1.24%	1209.42	5.00%			

表 5 2000—2015 年不同生态环境脆弱性等级面积及其占比

3.2 生态环境脆弱性空间差异特征

由 2000 年和 2015 年闽三角城市群生态环境脆弱性的空间分布特征(图 2)可知,2000—2015 年间,闽三 角城市群的生态环境脆弱性呈现出由东南沿海向西北内陆逐渐增强的态势,呈现明显的地带性特征。其中, 极度脆弱和高度脆弱主要集中于西北山区地带,轻度脆弱和微度脆弱主要集中东海沿海平原地带。此外,在 空间变化上,2000—2015 年间,闽三角城市群的生态环境脆弱性表现出重度脆弱和极度脆弱的空间扩展以及 轻度脆弱和微度脆弱的空间萎缩,生态环境脆弱性整体增强。



图 2 2000—2015 年生态环境脆弱性空间分布图 Fig.2 Spatial distribution of ecological environment vulnerability from 2000 to 2015

对 2000 年和 2015 年的生态环境脆弱性进行差值运算,得到 2000—2015 年间闽三角城市群生态环境脆弱性变化量的空间分布特征,如图 3 所示:2000—2015 年间,闽三角城市群的生态环境脆弱性变化存在较大的空间异质性。其中,东南沿海平原地带的生态环境脆弱性增长较不明显,甚至有些地区的生态环境脆弱性

有所下降,特别是晋江市、石狮市、鲤城区、丰泽区以及 龙海市等地,表明这些地区的生态环境有所好转;而西 北内陆山区地带的生态环境脆弱性则增长较为明显,特 是是华安县、南靖县、安溪县、南安市和平和县等地,表 明这些地区的生态环境进一步恶化,且趋势明显。

3.3 生态环境脆弱性空间聚集特征

3.3.1 全局 Moran' I

本文在 2000 和 2015 年生态环境脆弱性的评价结 果基础上,对每个流域单元的生态环境脆弱性进行区域 统计,进而基于空间自相关工具,计算生态环境脆弱性 的全局 Moran'I(表 6)。结果显示:2000 和 2015 年闽三 角城市群生态环境脆弱性的的全局 Moran'I 指数分别 为 0.8595 和 0.8617, *Z* 得分分别为 19.4253 和 19.4919 (在 ρ<0.05 下,当|*Z*|>1.96 时,研究对象在空间上具有 显著的空间自相关性,且当 Moran'I 指数大于零则为正 相关,小于零则为负相关^[36]),说明 2000 年和 2015 年 闽三角城市群的生态环境脆弱性存在显著的空间自相 关性,且为显著正相关。



图 3 2000—2015 年生态环境脆弱性变化空间分布图 Fig. 3 Spatial distribution of change of ecological environment vulnerability from 2000 to 2015

3.3.2 局部 Moran' I

在全局 Moran' I 的基础上,进一步计算其局部

Moran' I,并由此得到 LISA 聚类图。如图 4 所示:2000 和 2015 年闽三角城市群生态环境脆弱性呈现出显著的 空间集聚性特征,并以高高聚集(H-H)和低低聚集(L-L)为主。两个年份的空间集聚性特征整体趋势大致 相同,即在研究区西北部山区地带呈现出显著的高高聚集,表明这些地区的是高值聚集区;而在东南沿海平 原、丘陵区地带则呈现出显著的低低聚集,表明这些地区的低值聚集区;而其余的评价单元集聚性则不显著。 但是,两个年份之间也有发生集聚性的迁移和扩张。如 2015 年相比 2000 年,在研究区西南部有个流域的高 高集聚特征凸显,西北部边缘地带的高高集聚特征也有所迁移;而在东南部的低低聚集带也所扩张和迁移。 可见,2000—2015 年间,闽三角城市群生态环境脆弱性在空间上的集聚特征均有不同程度的迁移和扩张,空 间集聚性越发明显。

Table 6	fable 6 Spatial autocorrelation parameters of ecological environment vulnerability from 2000 to 2015							
年份 Year	Moran' I 指数 Moran' I index	期望值 Expected value	Z 得分 Z-score					
2000	0.8595	-0.0063	19.4253					
2015	0.8617	-0.0063	19.4919					

表 6 2000—2015 年生态环境脆弱性空间自相关参数

3.4 不同土地利用类型的脆弱性分异

在生态环境脆弱性的评价结果基础上,结合闽三角城市群 2000 和 2015 年的土地利用方式,进一步探讨 不同土地利用类型下的生态环境脆弱性时空分异特征。如表 7 所示,闽三角城市群生态环境脆弱性在不同土 地利用方式下存在着一定的异质性。在 2000 年时,林地主要以中度脆弱和重度脆弱为主;草地以轻度脆弱和 中度脆弱为主;水域、耕地和建设用地以微度脆弱和轻度脆弱为主;未利用地则以轻度脆弱和重度脆弱为主。 而 2015 年时,林地、草地主要以中度脆弱和重度脆弱为主;水域和耕地主要以轻度脆弱和中度脆弱为主,建设 用地仍以微度脆弱和轻度脆弱为主;未利用地仍以轻度脆弱和重度脆弱为主。





图 4 生态环境脆弱性 LISA 聚类图

Fig.4 Distribution of LISA clustering of ecological environment vulnerability

LISA:空间关联局部指标,Local Indicators of Spatial Association

Table /	Area of the ecological environment vulnerability level for different land use types from 2000 to 2015									
	微度脆弱		轻度	轻度脆弱		中度脆弱		重度脆弱		脆弱
土地利用类型	Negl	igible	Lig	ght	Med	lium	Str	ong	Ext	reme
Land use types	vulner	ability	vulner	ability	vulner	ability	vulner	ability	vulne	rability
	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015
林地 Forestland	974.54	250.10	4058.65	1448.39	5780.79	4535.52	5334.75	8659.30	290.16	1127.24
草地 Grassland	16.10	3.80	43.31	18.71	45.67	47.63	19.93	64.84	1.05	3.00
水域 Wetland	185.40	79.01	144.93	147.95	53.62	110.37	21.19	59.31	0.08	3.32
耕地 Farmland	1754.54	630.31	1853.39	1399.04	974.62	1430.47	492.59	1215.50	7.11	66.13
建设用地 Construction land	1400.19	984.83	506.09	1018.14	115.22	549.92	27.82	236.44	0.19	7.96
未利用地 Unused land	9.03	7.70	31.48	23.68	27.18	18.79	35.53	26.13	0.24	1.31

表 7 2000—2015 年不同土地利用类型下的生态脆弱性等级分布/km²

从不同土地利用类型下的生态环境脆弱性指数来看(表 8),2000—2015年间,闽三角城市群的生态环境 脆弱性总体上以中度脆弱为主,但呈现出由中度脆弱向重度脆弱过渡的总体趋势,不同土地利用类型下的生 态环境脆弱性指数大小顺序始终为:林地>未利用地>草地>耕地>水域>建设用地。其中,林地和未利用地从 中度脆弱向重度脆弱过渡,耕地从轻度脆弱向中度脆弱过渡,建设用地从微度脆弱向轻度脆弱过渡,而草地和 水域的脆弱性等级基本保持不变。不难发现,2000—2015年间,各类土地利用类型下的生态环境脆弱性均有 不同程度的增强,其中建设用地、水域和耕地的增长幅度最大,反映了其生态环境脆弱性恶化加剧。

	表 8 2000—2015 年不同土地利用尖型的生态环境脆弱性综合指数							
	Table 8 ecologi	ca environment v	vulnerability syn	thesis index for f	or different land use typ	es from 2000 to 201	5	
年份 Year	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Wetland	耕地 Farmland	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	总体 Total	
2000	8.79	8.09	6.57	7.09	5.82	8.50	8.14	
2015	9.93	9.42	7.77	8.34	7.06	9.63	9.24	

長 8 2000—2015 年不同土地利用类型的生态环境脆弱性综合指数

3.5 生态环境脆弱性驱动力分析

本文采用各评价因子的贡献率大小来表征其驱动作用的大小。由 2000 年主成分分析所得到的载荷矩阵 (表9)可知:第1 主成分为社会-经济驱动主成分,其中人口密度和景观多样性的贡献较大,表明人口密度和 景观多样性等社会经济的发展是 2000 年闽三角城市群生态环境脆弱性的核心驱动因子;而第2、第3和第4 主成分为自然驱动主成分,其中第2 主成分中土壤类型的贡献较大,第3 主成分中,岩性和土壤类型的贡献较 大,第4 主成分中坡度和土壤类型贡献较大,表明土壤类型、岩性和坡度等自然本底特征对该时期生态环境脆 弱性的驱动作用也较强。可见,2000 年闽三角城市群生态环境的主要驱动因子是人口密度、景观多样性、岩 性、土壤类型和坡度,而高程、路网密度、NDVI、年均温、年均降水量、人均 GDP、土地利用程度和工业固体废弃 物排放量这 8 个因子在前4 个主成分中的贡献率均较小,并非 2000 年闽三角城市群生态环境脆弱性的主要 原因。

Table 9 The le	oad matrix of prin	cipal component in 20	00			
评价指标	主成分 Principal component					
Evaluating indicators	PC1	PC2	PC3	PC4		
高程 Elevation	0.3313	0.3354	-0.0321	0.0987		
坡度 Slope	0.3368	0.3341	0.3220	0.4519*		
岩性 Lithology	0.0600	-0.3666	0.7593 *	0.2754		
NDVI Normalized difference vegetation index	-0.1978	-0.0125	-0.0573	-0.1377		
年均温 Annual mean temperature	0.2662	0.2902	-0.0803	0.1055		
土壤类型 Soil type	0.1882	0.4292 *	0.4152 *	-0.7325 *		
年均降水量 Annual mean precipitation	0.2067	-0.0379	-0.0422	-0.0606		
人均 GDP Per capita GDP	-0.0932	0.1320	-0.0440	0.0931		
人口密度 Population density	-0.4092 *	0.3767	0.0968	0.1175		
路网密度 Road density	-0.1239	0.3472	-0.1356	0.3074		
景观多样性 Landscape diversity	0.4831 *	-0.0530	-0.3138	0.0804		
土地利用程度 Degree of land use	-0.3898	0.2890	0.0775	0.1170		
工业固体废弃物排放量 Industrial solid waste emissions	-0.0908	0.0725	0.0241	0.0529		

表 9 2000 年主成分载荷矩阵

* 表示各个主成分中贡献率较高的影响因子

由 2015 年主成分分析所得到的载荷矩阵(表 10)可知:第1主成分中仍为社会-经济驱动主成分,其中人口密度和景观多样性的贡献也较大,表明人口密度和景观多样性等社会经济的发展仍是该地区生态环境脆弱性最主要的驱动力;第2主成分为经济驱动主成分,其中路网密度和工业固体废弃物排放量的贡献较大,表明随着经济的发展,伴随而来的道路建设和工业的快速发展已成为该地区生态环境脆弱性的第二大的驱动力; 第3和第4主成分为自然驱动,并且均以岩性和土壤类型的贡献最大,表明了虽然第二驱动为经济驱动所替代,但自然本底特征仍对该地区的生态环境脆弱性起到一定的制约作用。可见,2015年闽三角城市群生态环境的主要驱动因子是人口密度、景观多样性、路网密度、工业固体废弃物排放量、岩性、土壤类型,而高程、坡度、NDVI、年均温、人均 GDP、年均降水量和土地利用程度这7个因子在前4个主成分中的贡献率均较小,并非2015年闽三角城市群生态环境脆弱性的主要原因。

4 结论与建议

4.1 结论

本文立足于闽三角城市群的特殊自然地理特征,基于成因-结果模型,选取了13个与该地区生态环境脆弱性相关的影响因子建立了评价指标体系,并基于空间主成分分析法,对2000—2015年闽三角城市群的生态环境脆弱性时空演变特征及其驱动力进行深入分析,主要结论如下:

Tables 10 The load matrix of principal component in 2015				
评价指标	主成分 Principal component			
Evaluating indicators	PC1	PC2	PC3	PC4
高程 Elevation	0.25347	0.29469	0.06089	-0.17773
坡度 Slope	0.26633	0.24456	0.37543	-0.15738
岩性 Lithology	0.05264	-0.12271	0.53663 *	0.65932 *
NDVI Normalized difference vegetation index	-0.25499	-0.0498	-0.25522	-0.27474
年均温 Annual mean temperature	0.09704	0.17119	0.17235	-0.16396
土壤类型 Soil type	0.13613	0.18511	0.49935 *	-0.47186 *
年均降水量 Annual mean precipitation	0.40828	0.24258	-0.29809	0.0936
人均 GDP Per capita GDP	-0.0283	0.03408	-0.10008	-0.1205
人口密度 Population density	-0.42561 *	0.19362	0.10715	-0.13683
路网密度 Road density	-0.20055	0.47455 *	-0.12337	0.16112
景观多样性 Landscape diversity	0.44193 *	0.1258	-0.2931	0.04082
土地利用程度 Degree of land use	-0.34654	-0.01062	0.10004	-0.15404
工业固体废弃物排放量 Industrial solid waste emission	ns -0.2546	0.65849 *	-0.04116	0.30094

表 10 2015 年主成分载荷矩阵 ables 10 The load matrix of principal component in 20

* 表示各个主成分中贡献率较高的影响因子

(1) 闽三角城市群 2000 年和 2015 年的生态环境脆弱性综合指数分别为 8.14 和 9.24,表明 2000—2015 年间,生态环境脆弱性整体处于中度脆弱,但呈现出由中度脆弱向重度脆弱过渡的趋势,表现出重度脆弱和极度脆弱的空间扩展以及轻度脆弱和微度脆弱的空间萎缩;

(2)闽三角城市群的生态环境脆弱性呈现出由东南沿海向西北内陆逐渐增强的整体趋势,并存在明显的 地带性特征,生态环境脆弱性存在显著的空间自相关性,且为显著正相关,在西北部山区地带为显著的高高聚 集,在东南沿海平原地带为显著的低低聚集,16年间集聚性特征在空间上有所迁移和扩张。

(3) 闽三角城市群的生态环境脆弱性在各地类存在着一定的异质性,其生态环境脆弱性指数大小顺序始 终为:林地>未利用地>草地>耕地>水域>建设用地。2000—2015年间,各地类的生态环境脆弱性均有不同程 度的增强,其中建设用地、水域和耕地的增长幅度最大,反映了其生态环境脆弱性恶化加剧。

(4)2000—2015年间,闽三角城市群生态环境脆弱性的驱动力有所变化,但人口密度、景观多样性、岩性和土壤类型一直是闽三角城市群生态环境脆弱性主要的驱动力。在2015年时,2000年的坡度驱动已逐渐退化,而路网密度和工业固体废弃物排放量的驱动作用则逐渐增强。

4.2 建议

(1)研究发现,2000—2015年间,闽三角城市群的生态环境脆弱性整体变大,不同土地利用方式下的生态 环境脆弱性呈现出不同程度的增长,并在西北部山区地带形成高脆弱的聚集带,且高高集聚愈发显著,而高脆 弱区的聚集会极大的扩大原有的生态风险,对地区的生态安全造成威胁。因此,在未来的城市群建设中,在发 展经济的同时,要因地制宜的制定科学合理的地区发展战略,要特别注意西北部生态环境脆弱性较强区域的 生态保护,防止进一步的生态环境恶化;此外,由于建设用地、水域和耕地等人类活动干扰作用最强的地类生 态环境脆弱性恶化程度最为严重,因此,也需要制定严格的控制保护措施,如建立保护区、禁止建设区、免耕区 和湿地保护公园等措施,从法律上避免人为的过度破坏,保护这些易脆弱区的生态环境,甚至实行相应的退耕 还林、还草等措施以恢复和改善该地区的生态环境质量。

(2)由驱动力分析可知,2000—2015年间,闽三角城市群生态环境脆弱性的主要驱动力可分为三大部分, 即自然、社会和经济驱动,而研究发现,2000—2015年间,社会和经济驱动在该地区的影响一直很大,在第一 主成分的占据了较大的贡献率,甚至在2015年时,第二主成分也为经济驱动所占据。不难发现,人为活动所 带来的社会经济效应对该地区的生态环境脆弱性影响越来越大,人为胁迫的干扰性不可忽视,并主要通过人 口密度、景观多样性、路网密度和工业固体废弃物排放量等方面来反映。因此,在未来城市群发展建设的同 时,要想保持城市群的健康可持续发展,降低生态环境脆弱性,需要适度的控制地区的人口密度,切实的推行 发展与保护并重的策略,优化土地利用结构,避免不合理的开垦和建设,维持地区的景观多样性特征,并合理 规划道路、铁路等基础设施建设的空间布局,尽可能的集约化和高效化。此外,要避免走"先发展后治理"的 老路,政府需要切实的监管各个行业的发展,减少污染物的无处理排放,需要制定相应的政策以规范企业的排 污标准,减少对生态环境的破坏,努力建造一个经济繁荣而自然和谐的可持续发展的城市群。

参考文献(References):

- [1] Nelson R, Kokic P, Crimp S, Martin P, Meinke H, Howden S M, De Voil P, Nidumolu N. The vulnerability of Australian rural communities to climate variability and change: part II-integrating impacts with adaptive capacity. Environmental Science & Policy, 2010, 13(1): 18-27.
- [2] 李永化,范强,王雪,席建超,王诗阳,杨俊.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.地 理科学,2015,35(11):1452-1459.
- [3] 张龙,宋戈,孟飞,王学伟.宁安市土地生态脆弱性时空变化分析.水土保持研究,2014,21(2):133-137.
- [4] 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.
- [5] 田亚平,常吴.中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析.地理学报,2012,67(11):1515-1525.
- [6] Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 282-292.
- [7] 徐广才,康慕谊, Metzger M, 李亚飞. 锡林郭勒盟生态脆弱性. 生态学报, 2012, 32(5): 1643-1653.
- [8] 刘斌涛,陶和平,刘邵权,于慧,孔博.自然灾害胁迫下区域生态脆弱性动态——以四川省清平乡为例.应用生态学报,2012,23(1): 193-198.
- [9] 姚雄,余坤勇,刘健,杨素萍,何平,邓洋波,俞欣妍,陈樟昊.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变.应用生态学报,2016,27 (3):735-745.
- [10] Wang S Y, Liu J S, Yang C J. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China. Pedosphere. 2008, 18(2): 171-182.
- [11] Wang X D, Zhong X H, Liu S Z, Liu J G, Wang Z Y, Li M H. Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: development and application of a new method. Journal of Arid Environments, 2008, 72(10): 1929-1939.
- [12] Wu G Y, Li L H, Ahmad S, Chen X, Pan X L. A dynamic model for vulnerability assessment of regional water resources in arid areas: a case study of Bayingolin, China. Water Resources Management, 2013, 27(8): 3085-3101.
- [13] 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.
- [14] 张德君,高航,杨俊,席建超,李雪铭.基于 GIS 的南四湖湿地生态脆弱性评价.资源科学,2014,36(4):874-882.
- [15] 廖炜,李璐,吴宜进,史志华.丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价.自然资源学报,2011,26(11):1879-1889.
- [16] 王丽婧,席春燕,付青,苏一兵.基于景观格局的三峡库区生态脆弱性评价.环境科学研究,2010,23(10):1268-1273.
- [17] 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.
- [18] Song G B, 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.
- [19] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价. 地理研究, 2011, 30(12): 2289-2295.
- [20] 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.
- [21] 全占军, 李远, 李俊生, 韩煜, 肖能文, 付梦娣. 采煤矿区的生态脆弱性——以内蒙古锡林郭勒草原胜利煤田为例. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1729-1738.
- [22] Liao X Q, Li W, Hou J X. Application of GIS based ecological vulnerability evaluation in environmental impact assessment of master plan of coal mining area. Procedia Environmental Sciences, 2013, 18: 271-276.
- [23] 郭宾,周忠发,苏维词,陈全,魏小岛.基于格网 GIS 的喀斯特山区草地生态脆弱性评价.水土保持通报,2014,34(2):204-207.
- [24] 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.
- [25] Abson D J, Dougill A J, Stringer L C. Using principal component analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in southern Africa. Applied Geography, 2012, 35(1/2): 515-524.
- [26] 类淑霞, 郝晋珉, 王丽敏. 生态脆弱区宜耕未利用土地开发适宜性评价——以山西省大同市为例. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1417-1423.
- [27] 乔青,高吉喜,王维,田美荣,吕世海.生态脆弱性综合评价方法与应用.环境科学研究,2008,21(5):117-123.
- [28] 付博,姜琦刚,任春颖,谢振红.基于神经网络方法的湿地生态脆弱性评价.东北师大学报:自然科学版,2011,43(1):139-143.

- [29] 杜悦悦, 彭建, 赵士权, 胡智超, 王仰麟. 西南山地滑坡灾害生态风险评价——以大理白族自治州为例. 地理学报, 2016, 71(9): 1544-1561.
- [30] 邓辉,何政伟,陈晔,蔡宏,李璇琼.信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用——以四川泸定县为例.自然灾害学报, 2014,23(2):67-76.
- [31] 林金煌, 陈文惠, 祁新华, 程瑞彤, 陈增文. 闽三角城市群生态系统格局演变及其驱动机制. 生态学杂志, 2018, 37(1): 203-210.
- [32] 鹿世瑾, 王岩, 文明章. 福建雨季暴雨及台风暴雨诱发地质灾害的研究. 福建地质, 2010, 29(S1): 77-86.
- [33] 邓伟, 袁兴中, 孙荣, 张跃伟. 基于遥感的北方农牧交错带生态脆弱性评价. 环境科学与技术, 2016, 39(11): 174-181.
- [34] 李慧, 王云鹏, 李岩, 王兴芳, 陶亮. 珠江三角洲土地利用变化空间自相关分析. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1879-1885.
- [35] 朱子明, 祁新华. 基于 Moran'I 的闽南三角洲空间发展研究. 经济地理, 2009, 29(12): 1977-1980.
- [36] 胡庆芳,杨大文,王银堂,杨汉波,刘勇.利用全局与局部相关函数分析流域降水空间变异性.清华大学学报:自然科学版,2012,52 (6):778-784.
- [37] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,安静.城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应.生态学报,2013,33(8): 2565-2576.