

珠江三角洲城市群生态安全空间分异与聚集特征^{*}

李森, 胡蒙蒙, 夏北成
(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 珠江三角洲城市群是粤港澳大湾区的重要组成部分, 在国家实施粤港澳大湾区建设的重大政策背景下, 研究珠江三角洲城市群生态安全及其空间格局, 具有重要意义。基于 PSR 概念模型构建珠江三角洲城市群生态安全评价体系, 采用集对分析和空间自相关分析方法, 探究城市群生态安全空间异质性及聚集特征。结果表明: 珠江三角洲城市群受城市化的影响, 生态安全水平呈现出较显著的空间差异, 其空间分布特征为中部城市化水平较高的区域生态安全水平显著低于外围区域, 外围区域对于中心区域形成一个生态屏障; 生态安全水平与区域经济发展有显著关系, 生态安全水平与经济发展水平在空间上呈现负相关状态; 生态安全在城市间呈现“低—高”或“高—低”聚集态势, 生态安全较高的城市趋于和生态安全较低的城市相邻, 呈现互补空间格局。这一空间分异和聚集特征对于珠江三角洲城市群以及大湾区的未来生态规划、城市生态建设和生态管理具有较重要的指导意义。

关键词: 集对分析; Moran's I 指数; 空间分异; 生态安全; 珠江三角洲城市群

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2020) 01-0096-09

Spatial differentiation and aggregation characteristics of ecological security of urban agglomeration in the Pearl River Delta

LI Miao, HU Mengmeng, XIA Beicheng
(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510275, China)

Abstract: The Pearl River Delta (PRD) urban agglomeration is an important part of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay. It is of great significance to study the ecological security and spatial pattern of the PRD urban agglomeration under the background of the national policy of implementing the construction of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay. The ecological security evaluation system of urban agglomeration was constructed in the PRD based on the PSR conceptual model, and the set pair analysis and spatial autocorrelation analysis methods were applied to analyze the spatial heterogeneity and aggregation characteristics of urban agglomeration ecological security. The results show that the PRD is affected by urbanization, and the ecological security level shows an obvious spatial differentiation. The ecological security level of the central area, where it highly urbanized, is significantly lower than that of the peripheral area. The peripheral area forms an ecological barrier to the central area. The level of ecological security has a significant relationship with regional economic development, and the level of ecological security and economic development are negatively correlated in space. The clustering of ecological security in cities shows a “low-high” or “high-low” agglomeration situation. Cities with higher ecological

* 收稿日期: 2019-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502803)

作者简介: 李森 (1994 年生), 女; 研究方向: 城市生态学; E-mail: 15622256007@163.com

通信作者: 夏北成 (1957 年生), 男; 研究方向: 环境生态学与景观生态学; E-mail: xiabch@mail.sysu.edu.cn

security tend to be adjacent to cities with lower ecological security, showing a complementary spatial pattern. This spatial differentiation and aggregation characteristics have important guiding significance for the future ecological planning, urban ecological construction and ecological management of the urban agglomerations of the PRD and Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay.

Key words: set pair analysis; Moran's *I* index; spatial differentiation; the ecological security; urban agglomeration of the Pearl River Delta

由于生态环境的污染和破坏对人类生存与可持续发展构成严重威胁，生态安全问题成为 21 世纪人类面临的主要挑战之一，引起了国际社会的广泛关注^[1]。生态安全的本质是研究人类与自然资源的交互作用并降低生态风险^[2]，研究此问题对于人类如何适应全球变化实现可持续发展，调控自身的行为以维护自身安全具有重要意义^[3]。国外对生态安全研究起步于 20 世纪 40 年代，集中于生态风险、生态系统健康等方面，主要研究城市环境压力与安全的内在关系和机理探求^[4-5]。在研究尺度上，对宏观层面如全球和国家的研究较多，微观层面的研究较少^[6]。国内关于生态安全的研究出现较晚，始于 20 世纪 90 年代，主要是研究自然和社会经济活动与区域的作用过程，或景观格局与区域的作用过程^[7]，集中于生态安全的概念及特征、生态安全评价等。

生态安全评价是生态安全研究的一项重要内容，国内外学者在评价方法方面已进行了广泛研究，包括 PSR 模型法^[8]、生态承载力分析法^[9]，生态模型方法^[10]，景观生态学方法^[11]以及生态系统服务价值法^[12]等。目前国内外学者对于生态安全评价的研究尚处于探索阶段，没有形成系统统一的评价指标体系，张蕾等^[13]基于人口、自然环境和生物三方面因素综合决策构建生态廊道适宜性评价指标体系判定潜在生态廊道；郑洋等^[14]从土地利用变化-生态系统服务-生态系统安全角度研究海岸带生态安全状况。解决生态环境问题需综合社会科学、自然科学和安全科学的知识，掌握生态系统的安全性和完整性，基于概念框架构建包含多类指标的研究体系，从多个角度进行评价^[15]。

研究珠江三角洲城市群的生态安全空间组织及结构形态对城市群健康发展具有重要意义。目前，对珠江三角洲城市群个别城市如广州^[16]、深圳^[17]、佛山^[18]的生态安全研究较多，对珠江三角洲城市群整个区域的生态安全研究很少，也未对其空间分异与聚集特征开展过研究。本文以珠江三角洲城市群为研究对象，利用 2015 年珠江三角洲城市群 9 市的社会、经济数据为驱动，通过集对分析

法测度城市单元的生态安全，依此识别城市群系统属性。并根据空间自相关方法表征城市时空分异特征，从而探索城市群系统时空分异的自组织规律，为城市群科学发展规划及合理布局提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

珠江三角洲城市群位于中国南部的广东省境内，总面积约为 5.4 万 km²，是我国南部最大的冲积平原。包括广州、深圳、珠海、惠州、佛山、东莞、中山、江门、肇庆 9 个城市，下辖 40 多个区县。区域内土壤肥沃，水资源充沛，动植物资源丰富，是全国光、热、水资源最丰富的地区之一。毗邻港澳的优越地理位置及改革开放的政策引导，使珠江三角洲城市群成为全球最具活力的经济区之一。作为国家前期策略的主体区域，2015 年珠江三角洲城市群常住人口数约 5 874 万人，人均 GDP 近 11 万元，以不到广东省 30% 的人口创造了全省 77% 的 GDP。据世界银行发布的报告显示，珠江三角洲超越日本东京成为世界人口和面积最大的城市群。

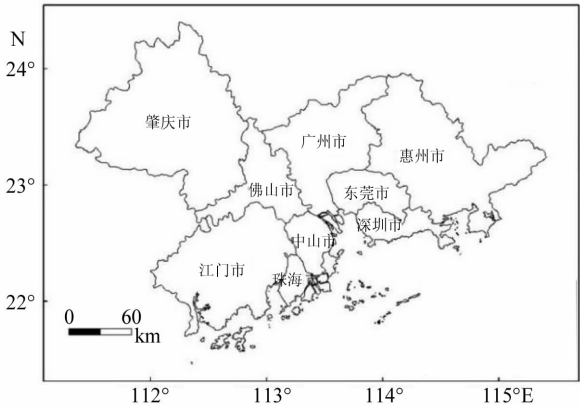


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of study area

1.2 数据来源

本文所采取的数据为珠江三角洲城市群各市场地

理空间分布的矢量数据，数据中所有属性数据均来自于《广东省统计年鉴（2016）》^[19]、《珠三角城市群年鉴（2016）》^[20]、2016 年广东省环境状况公报、各市统计年鉴等。

1.3 研究方法

1.3.1 城市群生态安全测度方法 集对分析（Set Pair Analysis, SPA）是由我国学者赵克勤^[21]提出的研究事物之间的确定与不确定性关系的理论方法。通过将两个集合作为一个集对，按照集对的某一特性建立这两个集合的同一、差异、对立的联系度公式，计算多个评价指标与最优评价集的相对贴合度，使得研究结果贴近最优解集，从而达到解决多目标决策和多属性评价的目的，被广泛应用于安全评价、风险灾害等研究领域^[22]。

其原理为：假设一个多属性评价问题，记为 $Q = \{F, D, E, W\}$ ，其中 F 表示评价方案集， D 为评价指标集， E 为评价对象集， W 为指标权重集， U 、 V 分别为评价方案的最优评价集和最劣评价集，集对 $\{F_m, U\}$ 在 $[U, V]$ 上的联系度为：

$$\begin{cases} u(f_m, U) = a_m + b_m i + c_m j, \\ a_m = \sum w_p a_{pk}, \quad p = (1, 2, \cdots, n) \\ c_m = \sum w_p c_{pk}, \end{cases} \quad (1)$$

式中， a_{pk} 和 c_{pk} 分别为评价指标 d_{pk} 与集合 $[v_p, u_p]$ 的同一度和对立度， w_p 为第 p 项指标的权重。当 d_{pk} 对评价结果起正向作用时：

$$\begin{cases} a_{pk} = \frac{d_{pk}}{u_p + v_p} \\ c_{pk} = \frac{u_p v_p}{d_{pk}(u_p + v_p)} \end{cases} \quad (2)$$

当 d_{pk} 对评价结果起负向作用时：

$$\begin{cases} a_{pk} = \frac{u_p v_p}{d_{pk}(u_p + v_p)} \\ c_{pk} = \frac{d_{pk}}{u_p + v_p} \end{cases} \quad (3)$$

方案 f_m 与最优方案集 U 的相对贴近度 r_m 可定义为：

$$r_m = \frac{a_m}{a_m + c_m} \quad (4)$$

r_m 反映被评价方案 f_m 与最优方案集 U 的贴近度， r_m 值越大，表示被评价对象越接近最优方案。

1.3.2 生态安全空间分异研究 空间自相关分析可揭示整个研究区域内各个单元与邻近单元的相似

性，衡量变量空间分布的聚集特征，反映城市发展的可持续状态^[23]。可通过在 GeoDa 软件中引用 Moran's I 指数来表征不同城市单元的空间关系，Moran's I 指数的取值在 $[-1, 1]$ 之间，小于 0 表示负相关，等于 0 表示不相关，大于 0 表示正相关，其计算公式为：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (5)$$

式中， i 、 j 为区域的观测值， W_{ij} 为空间权重矩阵， $\bar{x}$ 为观测的平均值， S^2 为方差。

城市之间的空间分异特征，会随着社会、经济、环境等城市功能属性和距离摩擦、网络组织等空间连接关系的变化而演变^[24]。通过探索性空间数据分析（ESDA）模型的 Getis-Ord G^* 指数，探讨 2015 年珠江三角洲城市群生态安全的空间分异，其计算公式为：

$$G_i^*(d) = \sum_{i=1}^n W_{ij}(d) X_i / \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

式中， X_i 为 i 地区的观测值， W_{ij} 为空间权重矩阵。若 $G_i^*(d)$ 值为正数，表明 i 地区周围的值相对较高，属于高值集聚的热点地区；反之则为低值集聚的冷点地区。

1.3.3 构建指标体系 建立科学、完善的指标体系是客观准确评价的基础，但由于每个人对不同区域、不同生态系统的认识不同，目前尚未有被普遍采纳的统一指标体系，生态安全的定量评估是生态安全研究的困境^[25]。目前被广泛使用的概念模型有联合国经济合作开发署（OECD）提出的压力－状态－响应（P－S－R）模型、驱动力－状态－响应（D－S－R）模型和驱动力－压力－状态－影响－响应（D－P－S－I－R）模型等^[26]。

城市生态安全反映城市生态系统的健康和稳定，根据 PSR 概念模型的原理，在借鉴相关生态安全评价指标^[27-29]的基础上，基于评价指标的科学性、可获取性等原则，并咨询相关专家，从社会－经济－环境 3 类因子中选取 22 项指标构建生态安全评价指标体系（表 1）。由于每个指标对生态安全的反馈不同，对生态安全水平有促进作用的指标称为正向指标，用“+”表示，反之为负向指标，用“-”表示。

表 1 城市群生态安全评价指标体系及指标权重
Table 1 Indicator system of ecological security assessment and their weights in urban agglomeration of Pearl River Delta

	指标名称	指标释义影响性质	权重	指标名称	指标释义影响性质	权重
社会因素	A1:城市化率(%)	衡量人口结构(+)	0.025 1	A2:公路里程(km)	衡量基础设施状况(+)	0.063 6
	A3:人口密度(人/km ²)	衡量人口特征(-)	0.022 4	A4:各县(市)区人均粮食产量(t)	衡量城市群粮食安全状况(+)	0.108 3
	A5:人口自然增长率(‰)	衡量人口发展速度(-)	0.020 8	A6:恩格尔系数(%)	衡量人民贫困程度(-)	0.034 7
经济因素	A7:人均 GDP(元)	衡量经济发展状况(+)	0.057 8	A8:第二产业产值占 GDP 的比重(%)	衡量第二产业在国民经济中的地位(-)	0.038 1
	A9:第三产业产值占 GDP 的比重(%)	衡量第三产业在国民经济中的地位(+)	0.052 1	A10:人均地方财政一般预算支出(元)	衡量地方政府经济实力(+)	0.069 4
环境因素	A11:万元 GDP 能耗(吨标准煤)	衡量节能降耗状况(-)	0.023 1	A12:废水排放总量(t)	衡量废水排放导致的生态压力(-)	0.032 7
	A13:SO ₂ 年均浓度(μg/m ³)	衡量大气污染物排放强度(-)	0.034 1	A14:NO ₂ 年均浓度(μg/m ³)	衡量大气污染物排放强度(-)	0.026 9
	A15:PM ₁₀ 年均浓度(μg/m ³)	衡量大气污染物排放强度(-)	0.037 3	A16:降水 pH 值	衡量酸雨程度(+)	0.035 4
	A17:空气质量优良(二级)天数	衡量空气质量(+)	0.075 6	A18:森林覆盖率(%)	衡量绿化程度(+)	0.056 3
	A19:城镇生活垃圾无害化处理率(%)	衡量固体废弃物处理情况(+)	0.018 0	A20:污水处理率(%)	衡量污水处理能力(+)	0.020 8
	A21:造林总面积(hm ²)	衡量人工恢复环境(+)	0.119 7	A22:人均公园绿地面积(m ²)	衡量绿色空间(+)	0.027 7

在一个构建的指标体系中,还需要对每一个指标的贡献率进行分析计算并获得指标的权重值。确定权重的方法分为主观和客观两种,为了使评价结果不被主观判断所影响,采用熵值法对生态安全评价指标体系进行权重赋值^[30]。根据熵值法确定的各指标权重及公式(1)~(4),将系统生态安全在(0,1)的范围内划分为6级^[31~32], $r_m = 0.0 \sim 0.3$ 为恶化等级, $r_m = 0.3 \sim 0.4$ 为敏感等级, $r_m = 0.4 \sim 0.5$ 为临界安全等级, $r_m = 0.6 \sim 0.7$ 为较安全等级, $r_m = 0.7 \sim 1.0$ 为一般安全等级,1为安全等级。

2 生态安全研究结果

2.1 城市生态安全测度

通过对珠江三角洲城市生态安全指标体系进行计算,得到各城市生态安全测度值(表2)。由表2可知,珠江三角洲各城市生态安全测度值均大于0.3,最大值为惠州市(0.618 9),最小值是佛山市(0.390 1)。按照生态安全分级标准,可将珠江三角洲城市群分为四类:惠州、肇庆为一般安全,

江门、珠海为较安全,广州、深圳、中山、东莞为临界安全,佛山为敏感等级,珠江三角洲城市群中没有出现恶化等级的城市区域。区域空间上呈现中部较差、东西部较好的状况,原因是中部区域人口密度和经济强度均较大,自然要素损害较多,环境压力较大。如佛山第二产业相对较发达,环境污染等问题对城市生态环境压力较大,其绿化程度在珠江三角洲城市群中相对较低,导致其生态安全测度处于敏感等级。广州、深圳的人口压力以及产业结构问题,影响区域的生态安全水平,而边缘地区(惠州、肇庆),经济发展相对较缓慢,生态系统中自然要素存在状态较好,环境压力较小。

应用 SPSS19.0 对 9 市生态安全测度值进行聚类分析,以平方欧几里得距离为区间尺度,可将上述城市生态安全分为 4 个聚类(图 2a),基于 Arc-GIS 将聚类结果空间化表达,按降序排列得到珠江三角洲城市群空间聚类图(图 2b),分别是(1)肇庆、江门、惠州;(2)珠海;(3)广州、深圳;(4)佛山、中山、东莞。惠州、肇庆、江门位于珠江三角洲城市群的外围区域,空间广阔,森林覆

盖率较高，以肇庆为例，森林覆盖率超过 70%，经济发展相对较缓慢，生态系统受破坏程度相对较低，生态安全水平等级较高，属于Ⅰ类区域。珠海单独成为生态安全Ⅱ类区域，作为珠江口西岸的核心城市，国家生态园林城市，绿色覆被面积较大，生态保护较好，其生态安全水平相对较高。经济发展水平较高的广州和深圳，城市化高度发展使得人口及环境压力较大，导致生态安全测度值相对较低。佛山、中山、东莞产业密集发展，森林覆盖低，属于资源环境问题更加突出的地区，生态安全测度值最小。

表 2 珠江三角洲城市群生态安全评价结果

Table 2 The estimation result of ecological security of urban agglomeration in Pearl River Delta

地区	a_m	b_m	c_m
广州	0.389 5	0.439 4	0.469 9
深圳	0.398 1	0.467 6	0.459 9
佛山	0.316 2	0.494 4	0.390 1
中山	0.338 0	0.474 6	0.415 9
惠州	0.510 6	0.314 5	0.618 9
东莞	0.327 7	0.473 3	0.409 1
珠海	0.454 2	0.341 2	0.571 1
江门	0.532 2	0.360 6	0.596 1
肇庆	0.611 1	0.383 3	0.614 5

基于各指标的数值以及各城市生态安全测度值，采用 SPSS19.0 软件进行相关性分析，得到每个指标与生态安全测度值的相关性水平（图 3）。根据图 3 的结果可知，造林总面积、人均粮食产量、森林覆盖率和恩格尔系数是与生态安全呈正相关的最重要因子，这里包含了生态系统绿色空间、生态保护投入以及经济水平等重要信息。城市化率、人口密度、CO₂ 年均浓度、人均 GDP 是与生态安全呈负相关的最重要因子，这里包含的主要是城市化水平和经济强度水平。

2.2 全局自相关空间分异分析

基于 GeoDa 软件，对生态安全结果进行全局空间自相关分析。研究结果表明（图 4），各城市生态安全值空间相关的点大部分位于第二、四象限内（Moran's $I = -0.359\ 1$ ），属于“高-低”、“低-高”集聚类型。生态安全较高的城市趋于和生态安全较低的城市相邻，生态安全差距悬殊，且其

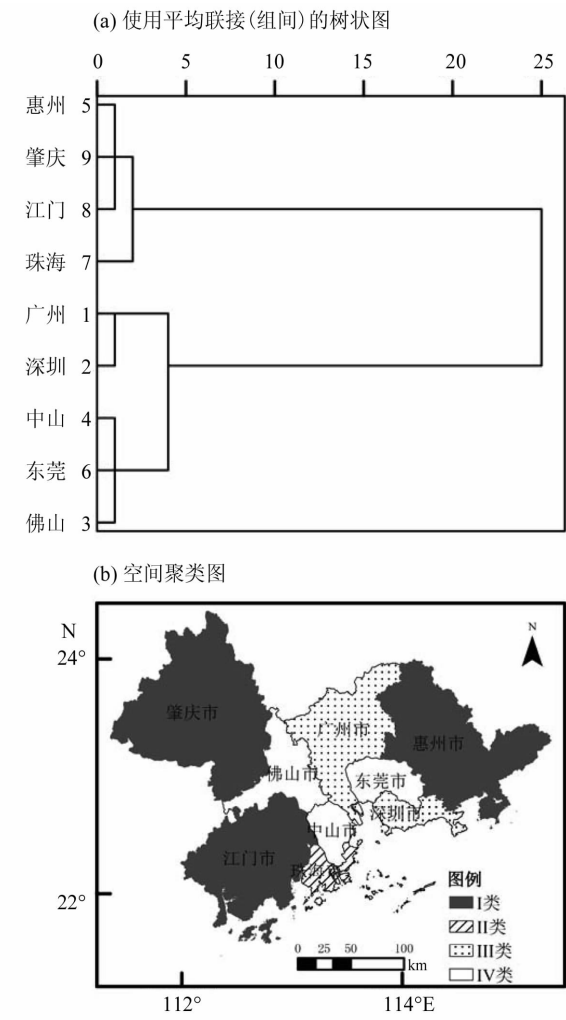


图 2 珠江三角洲城市群生态安全聚类图

Fig. 2 The cluster map of ecological security of urban agglomeration in the Pearl River Delta

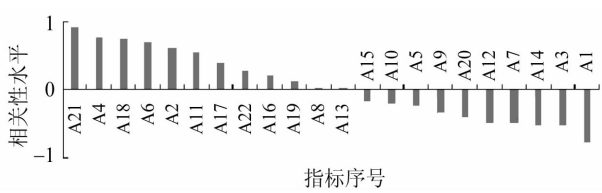


图 3 生态安全指标相关性图

Fig. 3 The diagram of correlations of ecological security indicators

分布较为分散，对自然区位、经济发展、政策条件具有较强的依赖，城市发展的同构性和异质性并存。城市之间生态安全呈现高与低集聚，在一定程度上缓减珠江三角洲城市群的环境压力，但离“高-高”集聚存在一定的距离。城市间生态安全缺少集聚能力，需加强各市间生态环境联动管理，使得生态安全空间发展趋向同向聚类趋势发展。

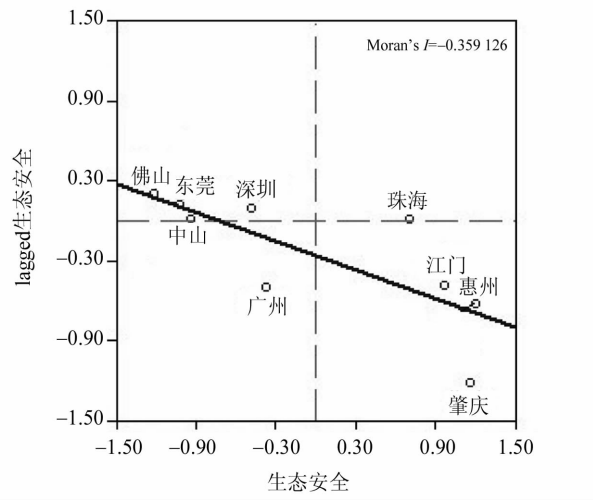


图 4 Moran 散点图

Fig. 4 Moran scatter diagram

为了研究单个城市生态安全结果对珠三角城市群生态安全的影响, 将数据源设置为去除某一城市的其余 8 市生态安全结果, 并输入 GeoDa 软件中得到 9 张 Moran 散点图 (图 5)。结果表明, 去除广州、深圳、东莞、珠海中任意城市, 其生态安全 Moran's I 值愈低, 愈趋向于高低聚集。而去除佛山或肇庆, 这一生态安全测度极低或极高点, 空间格局的聚集就不再明显, 表明珠江三角洲城市群现有的安全格局不稳定, 受单个城市的影响较明显。

2.3 城市群生态安全的空间聚集特征

根据城市生态安全的计算结果, 利用 Getis-Ord G_i^* 计算各行政区域的局域空间关联指数, 基于自然间断点分级法将 G_i^* 统计值分为 4 类, 得到珠江三角洲城市群生态安全热点区域分析结果 (图 6)。图 6 表明, 生态安全冷点区域相对聚集,

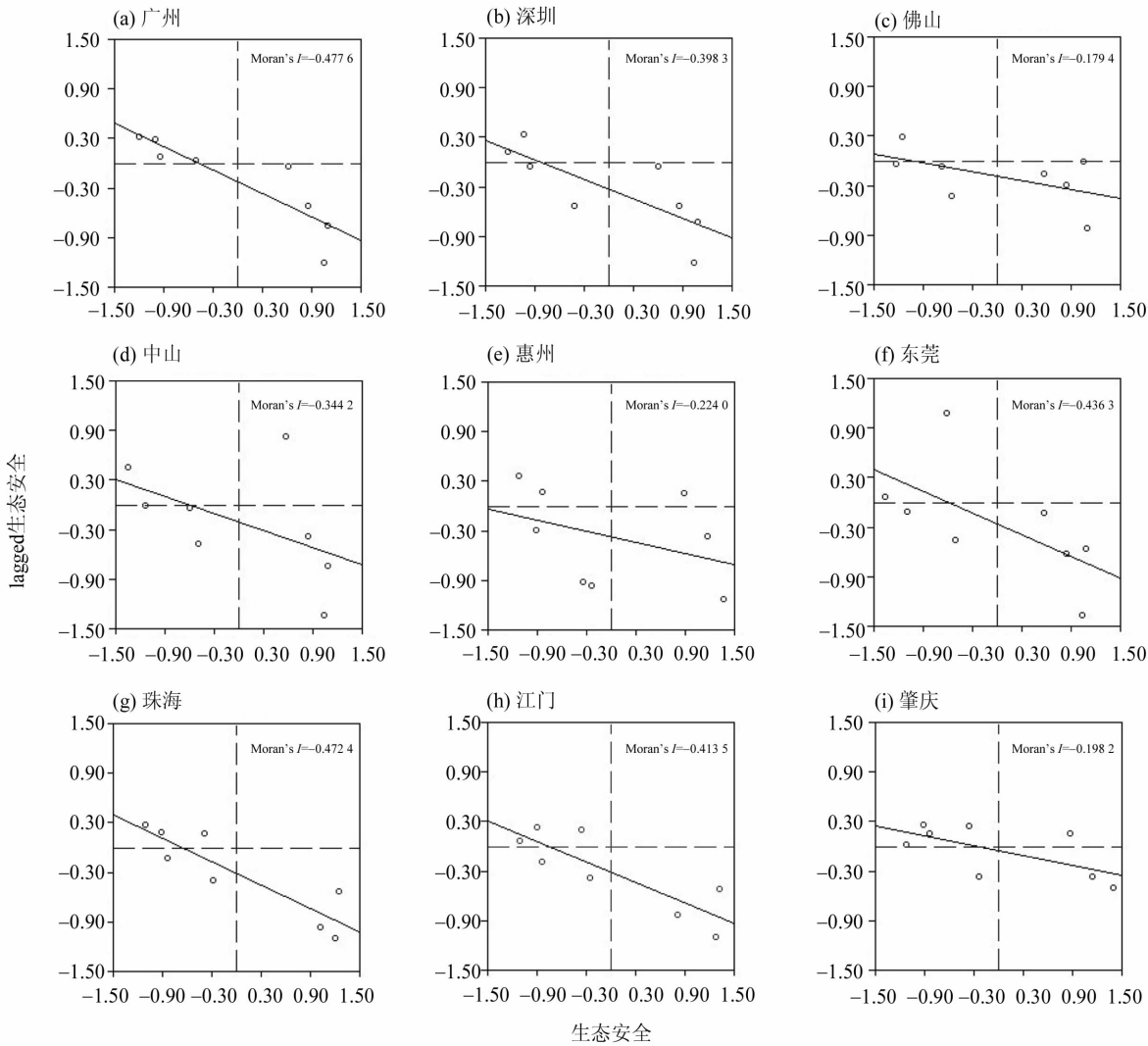


图 5 去除单个城市后城市群生态安全 Moran 散点图

Fig. 5 The Moran scatter diagram of ecological security of the urban agglomeration moved one city

主要位于国家中心城市广州市、以及制造业基地之一的中山市。广州市的生态安全测度值在珠三角城市群中处于中等水平，但由于其周边城市值较低（佛山市、东莞市、中山市），位于冷点区域，属低值空间集群。而热点区域较为分散，位于植被覆盖率高的肇庆、珠海市。冷热点区域总体呈现中部低，四周高的形式， G_i^* 统计值的正负呈现非平衡状态。

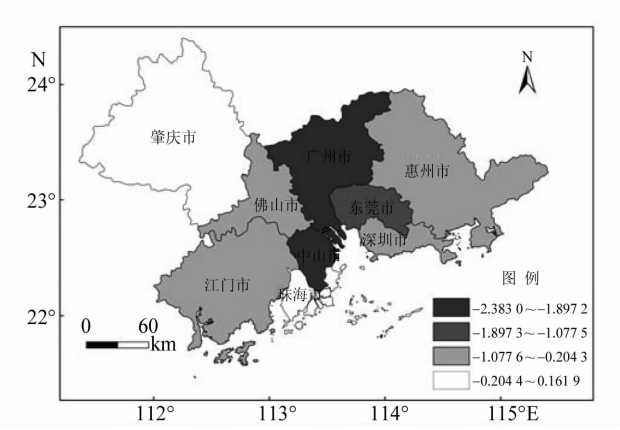


图 6 珠江三角洲城市群生态安全热点区域图
Fig. 6 The hot spots of ecological security of urban agglomeration in the Pearl River Delta

3 讨 论

Sun 等^[33]通过 Mamdani 模糊推理的方法评价珠江三角洲城市群生态安全状况，结果表明肇庆市由于人口压力低、资源丰富，其生态安全测度值最高，而佛山由于人口压力大、产业集中、资源有限，其生态安全测度值最低。胡志仁等^[34]通过 PSR 模型综合评价得出珠江三角洲城市群生态安全

东、中、西部呈现明显差异，中部显著低于东、西部地区。这些结论和本文的研究结果大致相符。

在珠江三角洲城市群地区，城市生态安全水平受人为干扰强烈，城市目前的经济发展与生态保护还不能完全同步进行，需进一步加强在生态保护领域的投入，使生态保护与经济发展同步，或者生态保护更优先。同时，珠江三角洲城市群是全球有影响力的工业制造业基地，产业的集聚与发展对增加 GDP 和经济水平有重要的作用^[35]，但是产业集聚对生态系统和环境的压力也会大增，如果协调不好，生态安全水平会出现下降。为促进城市群的可持续发展，应实施各种提高生态安全水平的战略，加快转变经济发展模式，严格控制污染物排放和治理，加大生态保护措施的实施，引导形成“以轴串群，以群托轴”新型城镇化规划^[36]。

4 结 论

本研究基于集对分析、PSR 模型及空间自相关理论等构建城市生态安全空间差异演化框架，定量、定性的描述城市群生态安全空间格局。从生态角度，揭示珠江三角洲城市群生态安全呈现中部差、东西部较好的局面，各城市间生态安全水平与经济发展水平呈现负相关状态；从地理层面，表达不同城市间吸引、集聚结构化发展模式，为研究城市群以及生态安全提供新的视角。研究结果可为城市规划或者大湾区规划、社会管理提供参考。

众多研究表明区域生态安全水平与所选指标和评价模型关系非常密切，因此，在未来研究中，城市生态安全概念的内涵还需要进一步丰富和完善，评价指标应更具代表性，发展功能更多兼顾更多维度的评价模型。

参考文献：

[1] MACLEOD N D, MCIVOR J G. Reconciling economic and ecological conflicts for sustained management of grazing lands[J]. *Ecological Economics*, 2006, 56(3):386-401.

[2] RUITENBEEK H J. Distribution of ecological entitlements; implications for economic security and population movement[J]. *Ecological Economics*, 1996, 17(1):49-64.

[3] 张琨, 林乃峰, 徐德琳, 等. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(12): 1057-1063.
ZHANG K, LIN N F, XU D L, et al. Research advanced on ecological security in China: Assessment models and management measures[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(12): 1057-1063.

[4] 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2012, 32(21): 6755-6766.
MENG J J, ZHU L K, YANG Q, et al. Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6755-6766.

[5] 刘洋, 蒙古军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6980-6989.

- LIU Y, MENG J J, ZHU L K. Progress in the research on regional ecological security pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6980–6989.
- [6] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 等. 生态安全研究进展 [J]. *生态学报*, 2005(4): 861–868.
- CUI S H, HONG H S, HUANG Y F, et al. Progress of the ecological security [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005 (4): 861–868.
- [7] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述 [J]. *地理科学进展*, 2005(6): 8–20.
- CHEN X, ZHOU C H. Review of the studies on ecological security [J]. *Progress In Geography*, 2005(6): 8–20.
- [8] 荣月静, 郭新亚, 杜世勋, 等. 基于生态系统服务功能及生态敏感性与 PSR 模型的生态承载力空间分析 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 323–329.
- RONG Y J, GUO X Y, DU S X, et al. Study of ecological carrying capacity using PSR model based on ecosystem services and ecological sensitivity [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 323–329.
- [9] 裴鹰, 杨俊, 李冰心, 等. 城市边缘区生态承载力时空分异研究——以甘井子区为例 [J]. *生态学报*, 2019(5): 1–9.
- PEI Y, YANG J, LI B X, et al. Study on spatial-temporal differentiation of ecological carrying capacity in urban fringe areas at community scale: A case study of Ganjingzi District in Dalian [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019(5): 1–9.
- [10] 程艳妹, 任彩凤, 郑欣, 等. 淮南市三维生态足迹及其驱动因子研究 [J]. *生态科学*, 2018, 37(6): 106–113.
- CHENG Y M, REN C F, ZHENG X, et al. The three dimensional ecological footprint and driving forces in Huainan, Anhui [J]. *Ecological Science*, 2018, 37 (6): 106–113.
- [11] 石玉琼, 王宁练, 李团胜, 等. 榆林市景观生态风险及其时空分异 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 494–504.
- SHI Y Q, WNAG N L, LI T S, et al. Landscape ecological risk and its spatiotemporal variation in Yulin [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(2): 494–504.
- [12] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 1984–2014 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应 [J]. *生态学报*, 2019(8): 1–12.
- DING L L, WANG Q, CHEN X, et al. The response of ecosystem services to land-use change in Dianshan lake area from 1984 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019(8): 1–12.
- [13] 张蕾, 危小建, 周鹏. 基于适宜性评价和最小累积阻力模型的生态安全格局构建——以营口市为例 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 229–236.
- ZHANG L, WEI X J, ZHOU P. Construction of ecological security pattern based on suitability evaluation and minimum cumulative resistance model: A case study of Yingkou city [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38 (1): 229–236.
- [14] 郑洋, 于格, 钟萍丽, 等. 基于土地利用变化和生态系统服务的海岸带生态安全综合评价——以胶州湾为例 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4097–4105.
- ZHENG Y, YU G, ZHONG P L, et al. Integrated assessment of coastal ecological security based on land use change and ecosystem services in the Jiaozhou Bay, Shangdong Peninsula, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4097–4105.
- [15] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究 [J]. *土壤*, 2003(1): 2–7.
- ZUO W, ZHOU H Z, WNAG Q. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety [J]. *Soils*, 2003(1): 2–7.
- [16] 王海鹰, 秦奋, 张新长. 广州市城市生态用地空间冲突与生态安全隐患情景分析 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1304–1318.
- WANG H Y, QIN F, ZHANG X C. The scenario analysis on urban ecological land spatial conflict and ecological security hidden danger in Guangzhou [J]. *Journal of Natural Resource*, 2015, 30(8): 1304–1318.
- [17] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别 [J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125–4133.
- WU J S, ZHANG L Q, PENG J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4125–4133.
- [18] 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 [J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1524–1534.
- SU Y X, ZHANG H O, CHEN X Z, et al. The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1524–1534.
- [19] 广东省统计局. 广东省统计年鉴—2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [20] 温国辉, 珠江三角洲城市群年鉴 2017 [M]. 北京: 方志出版社, 2017.
- [21] 赵克勤. 集对分析中的不确定性理论及若干应用 [J]. *有色冶金设计与研究*, 1995(3): 40–43.
- ZHAO K Q. Uncertainty theory and some application in Set-pair analysis [J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 1995(3): 40–43.

- [22] 张艳, 刘永, 雷波, 等. 基于多层次集对分析的退役铀尾矿库区浅层地下水污染风险评价[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 778–783.
ZHANG Y, LIU Y, LEI B, et al. Multilevel set-pair analysis for groundlayer surface water pollution risk in the uranium-rejected tailing reservoir[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 778–783.
- [23] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J]. 生态学报, 2019(7): 1–11.
LEI J R, CHEN Z Z, WU T T, et al. Spatial autocorrelation pattern analysis of land use and the value of ecosystem services in northeast Hainan island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019(7): 1–11.
- [24] 金星星, 祁新华, 陆玉麒, 等. 福建省高温热浪风险评估与空间分异研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1820–1829.
JING X X, QI X H, LU Y Q, et al. Evaluation and spatial differentiation of heat waves risk of Fujian province[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(12): 1820–1829.
- [25] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题[J]. 应用生态学报, 2003(9): 1551–1556.
WANG G X, CHENG G D, QIAN J. Several problems in ecological security assessment research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003(9): 1551–1556.
- [26] 刘红, 王慧, 张兴卫. 生态安全评价研究述评[J]. 生态学杂志, 2006(1): 74–78.
LIU H, WANG H, ZHANG X W. Research review on ecological security assessment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006(1): 74–78.
- [27] 李悦, 袁若愚, 刘洋, 等. 基于综合权重法的青岛市湿地生态安全评价[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 847–855.
LI Y, YUAN R Y, LIU Y, et al. Ecological security evaluation of wetland in Qingdao city based on the comprehensive weighting[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 847–855.
- [28] HU M M, ZHANG J M, HUANG J L. Assessing social-ecological system resilience in mainland China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27: 1085–1096.
- [29] 赵烜, 李岚彬, 程煜, 等. 闽三角城市群生态安全动态评估[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(4): 451–457.
ZHAN X, LI L B, CHNEG Y, et al. Dynamic assessment of ecological security in the urban agglomeration of Min Delta[J]. Journal of Forest and Environment, 2018, 38(4): 451–457.
- [30] 张凤太, 苏维词, 周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1249–1254.
ZHANG F T, SU W C, ZHOU J X. Assessment of urban ecological security based on entropy-weighted gray correlation analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1249–1254.
- [31] 王耕, 王嘉丽, 龚丽妍, 等. 基于 GIS-Markov 区域生态安全时空演变研究——以大连市甘井子区为例[J]. 地理科学, 2013, 33(8): 957–964.
WANG G, WANG J L, GONG L Y, et al. Spatial-temporal evolution of regional eco-security based on GIS-Markov model——A case study of Ganjingzi district in Dalian, Liaoning province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(8): 957–964.
- [32] 蒙古军, 赵春红, 刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价——以鄂尔多斯市为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 578–590.
MENG J J, ZHAO C H, LIU M D. Regional ecological security assessment based on land-use change: a case study in Ordos city[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4): 578–590.
- [33] SUN J, LI Y P, GAO P P, et al. A Mamdani fuzzy inference approach for assessing ecological security in the Pearl River Delta urban agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 386–396.
- [34] 胡志仁, 龚建周, 李天翔, 等. 珠江三角洲城市群生态安全评价及态势分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 304–312.
HU Z R, GONG J Z, LI T X, et al. Ecological security assessment and situation analysis of Pearl River Delta Agglomeration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(2): 304–312.
- [35] 刘锦, 田银生. 粤港澳大湾区背景下的珠三角城市群产业—人口—空间交互影响机理[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1653–1662.
LIU J, TIAN Y S. Mutual influencing mechanism of industry-population-space in the Pearl River Delta urban agglomeration in the context of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area development[J]. Progress in Geography, 2018, 37(12): 1653–1662.
- [36] 方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130–1144.
FANG C L. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(8): 1130–1144.