

杭州主城区生态环境敏感性与社会经济发展耦合协调评价

曾楠, 唐薇*, 徐文静, 王明香, 徐逸飞

云南大学地球科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2023年5月4日; 录用日期: 2023年6月14日; 发布日期: 2023年6月25日

摘要

伴随着中国社会经济的高速发展, 生态破坏、环境污染问题日益突出, 调控社会经济发展与区域生态环境本底间的空间匹配与协调具有重要意义。本研究以杭州市主城区为例, 通过敏感性表征区域生态环境条件, 结合夜间灯光强度表征经济空间强度, 运用耦合度与耦合协调度模型、冷热点分析方法, 探讨研究区社会-生态系统间相互影响与协调发展特征。结果显示: 1) 生态敏感性以轻度、中度为主, 总体呈现“东北低-西南高”、“河网两侧多高值”的空间格局。2) 耦合度以微度、轻度为主, 呈现“中心-圆环-外围”的多圈层式空间格局, 具有明晰的冷热点集聚特征。3) 耦合协调度以高度失调、中度失调及基本协调为主, 呈现由核心城区向四周递减的空间格局, 冷热点集聚显著。研究区社会经济与生态环境协调发展的压力较大。研究可为研究区及相似区域提升社会经济发展与生态环境本底间的协调适配性、促进区域可持续发展提供参考。

关键词

生态环境敏感性, 夜间灯光强度, 耦合度, 耦合协调度, 冷热点分析

Coupling Coordination Evaluation of Ecological Environment Sensitivity and Social and Economic Development in Hangzhou Main Urban Areas

Nan Zeng, Wei Tang*, Wenjing Xu, Mingxiang Wang, Yifei Xu

School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: May 4th, 2023; accepted: Jun. 14th, 2023; published: Jun. 25th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 曾楠, 唐薇, 徐文静, 王明香, 徐逸飞. 杭州主城区生态环境敏感性与社会经济发展耦合协调评价[J]. 地理科学研究, 2023, 12(3): 396-405. DOI: 10.12677/gser.2023.123037

Abstract

With the rapid development of China's social economy, the problems of ecological destruction and environmental pollution have become increasingly prominent, so it is of great importance to promote the spatial matching and coordination between social and economic development and regional ecological environment background. This study takes the main urban area of Hangzhou as an example, based on the evaluation of ecological environment sensitivity, combined with the night light intensity to characterize the economic space intensity, uses the coupling degree and coupling coordination degree model and hot and cold spot analysis method to explore the interaction and coordination development characteristics between natural-economic systems in the study area. The results show that: 1) The ecological sensitivity was mainly mild and moderate, presenting a spatial pattern of "low in northeast high and in southwest" and "multiple high values on both sides of the river network", with significant spatial differences. 2) The coupling degree was mainly slight and mild, presenting a multi-circle spatial pattern of "center-ring-periphery", with a clear agglomeration characteristic of cold and hot spots. 3) The coupling coordination degree was mainly high imbalance, moderate imbalance and basic coordination, presenting a spatial pattern of decreasing from the core urban area to the surrounding areas, with a significant concentration of cold and hot spots. The coordinated development of social economy and ecological environment in the study area is under great pressure. The study provides a reference for evaluating the coordination and adaptation between the economic development and the environmental background of the study area and promoting sustainable and coordinated development.

Keywords

Ecological Environment Sensitivity, Night Light Intensity, Coupling Degree, Coupling Coordination Degree, Cold and Hot Spot Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着中国工业化与城市化的高速发展,生态破坏、环境污染等问题日益突出,严重危害居民健康、影响其日常生活[1],引起了党和国家的高度关注[2] [3]。党的十九大报告明确提出“实施重要生态系统保护和修复重大工程,优化生态安全屏障体系,构建生态廊道和生物多样性保护网络,提升生态系统质量和稳定性”。其中,生态环境敏感性评价作为生态环境治理和保护的重要参考依据,已引起广泛关注[1] [4] [5]。通过分析其与区域社会经济发展间的协调关系,有助于评估、改善社会经济发展与环境本底间的空间不匹配[3]。

目前,学术界对生态环境敏感性的研究与应用主要集中于生态敏感性综合评价及时空演变分析[3]、生态功能空间划定与分区[6] [7]、生态安全格局构建[8] [9] [10]等方面,并结合地理探测器、障碍度模型、主成分分析等模型探讨其影响因素,运用统计回归、灰色预测、马尔科夫、系统动力学、神经网络等方法对未来情景开展科学预测。在研究尺度上,多集中于流域、地市、县区等单元,在国家、洲际等宏观尺度以及城市经济发展片区的研究相对较少。在研究方法上,常基于PSR、SPRI、SDI、STI等框架构建多层次指标体系,以多维度地表征生态环境敏感性,近年来景观格局指标也被纳入;并结合加权求和的乘算模型、全排列多边形图示指标法、模糊综合评价、灰色加权关联度、可拓云等模型方法开展综合评

价。生态环境敏感性的研究对于社会经济的空间优化布局具有决策意义，体现在对两者间不协调区域的精确识别。其中，耦合度与耦合协调度模型在测度不同系统间相互影响与协调关系方面具有简单、直观、科学等特点，并可将其结果落于地理空间像元，现已得到广泛应用[11] [12]。例如：Chen 等人以华南喀斯特中心贵州高原为研究对象，运用多维贫困指数、生态环境脆弱性指数，分析生态环境与贫困的耦合关系[11]；吕拉昌等人以北京市为研究区，利用耦合协调度模型和多元线性回归模型，分析城市舒适性与创新能力的关系[13]。

鉴于此，本研究通过构建评价指标体系，综合评估 2020 年杭州市主城区生态环境敏感性；并采用夜间灯光数据，表征城市经济活动强度；运用耦合度与耦合协调度模型、冷热点分析法，探究研究区生态环境系统与社会经济系统间相互影响与协调发展特征。以期为评估杭州主城区经济发展与生态本底间协调适配性、促进城市高质量健康发展提供科学参考。

2. 研究区、数据来源及研究方法

2.1. 研究区概况

本研究以杭州市拱墅区、西湖区、滨江区、富阳区、上城区、下城区、江干区、萧山区、余杭区等 9 个主要城区作为研究区(图 1)。研究区地处浙江省杭州市东北部(29°45'N~30°34'N, 119°26'E~120°43'E)，国土总面积达 5157.5 km²；地属亚热带季风气候区，冬季寒冷干燥，春秋气候宜人；位于钱塘江下游流域，平均海拔为 94.9 m，是浙江省为数不多的平原区。截至 2020 年末，区域内人口达 1007.6 万，GDP 总量达 14496.7 亿元；人均 GDP 达 143873.1 元，远高于全省平均水平(100620 元/人)，是杭州市乃至浙江省经济最发达的地区。在深入国际化发展背景下，2016~2020 年杭州市年平均常住人口增长高达 1.6%，流入地以主城区为主体。伴随人口增长带来的社会经济迅速发展，区域社会 - 生态系统的稳定性受到严重冲击，易造成人地关系的失调，并制约区域可持续发展的实现。

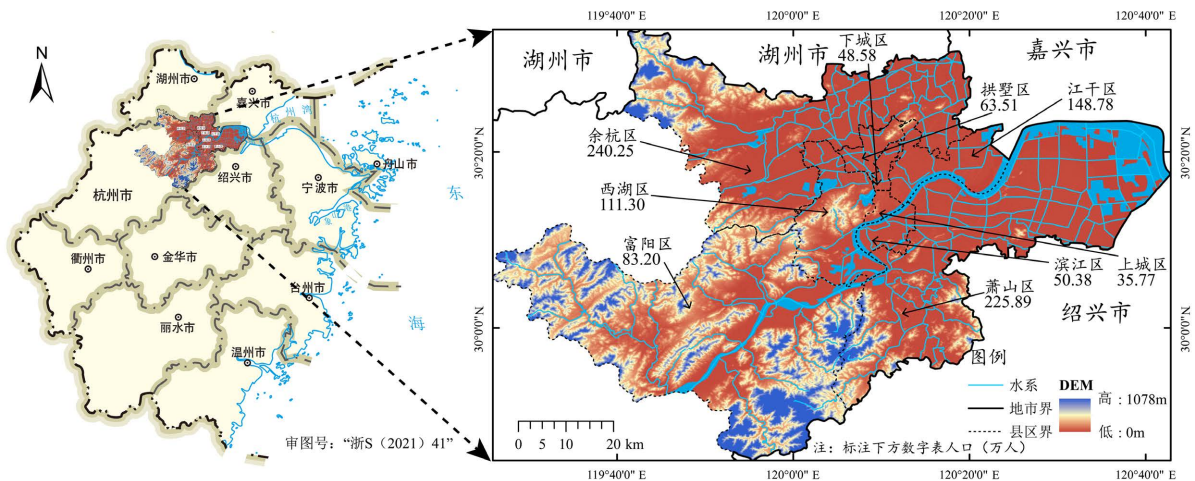


Figure 1. Location map of the study area
图 1. 研究区区位图

2.2. 数据来源

从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)平台获取 2020 年 Landsat 8 OLI 影像(空间分辨率 30 × 30 m)及 DEM 数据(空间分辨率 30 × 30 m)；水域数据分为线、面两类，来源于全国地理信息资源目录服务系统下(<https://www.webmap.cn/>) 1:100 万基础地理数据库。2020 年“类 NPP-VIIRS”夜间灯光数据集(空间

分辨率 500 × 500 m)由 Harvard Dataverse 平台(<https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD>)获取。为确保空间一致性,将所有空间数据统一至 WGS_1984_UTM_Zone_50N 投影坐标系。

2.3. 研究方法

在基于指标体系综合评价生态环境敏感性、以夜间灯光强度表征社会经济发展的基础上,运用耦合度与耦合协调度模型,并结合冷热点分析方法,探究 2020 年杭州主城区生态环境系统与社会经济系统间的空间耦合协调特征(图 2)。

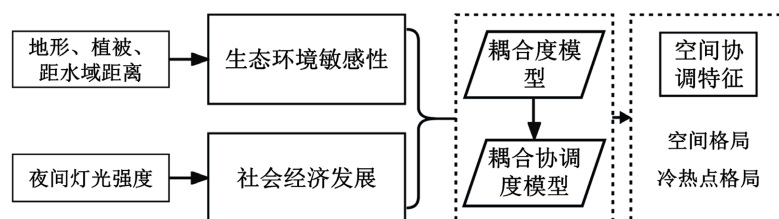


Figure 2. Research framework
图 2. 研究框架

2.3.1. 生态环境敏感性评价

生态环境敏感性是指生态系统对人类活动反应的敏感程度,反映出生态失衡与生态环境问题的可能性[1] [3]。本研究从 DEM 数据中分别提取坡度、高程、坡向作为地形敏感性因子,从遥感影像中提取 NDVI 作为植被敏感性因子;将其划分为极度、高度、中度、轻度、微度等 5 类敏感性等级;以距离水域要素的欧氏距离作为水域敏感性因子,划分为极度、高度、中度、微度等 4 类敏感性等级(表 1)。综合考虑研究区特征及指标相对重要性并参考相关研究,采用专家打分法确定权重,叠加计算各因子得分得到综合评价结果,在 ArcGIS 10.5 中利用自然断点法将结果划分为极度、高度、中度、轻度、微度等 5 类敏感性等级。

Table 1. Assignment and weight of each factor of ecological sensitivity

表 1. 生态敏感性各因子等级赋值与权重

因子	分类	敏感性等级	赋值	权重	因子	分类	敏感性等级	赋值	权重
坡度	>60°	极度	5	0.25	坡向	正东、正西	中度	3	0.25
	45~60°	高度	4			东南、西南	轻度	2	
	25~45°	中度	3			平地、正南	微度	1	
	10~25°	轻度	2		NDVI ≥ 0.6	极度	5		
	0~10°	微度	1			0.4 ≤ NDVI < 0.6	高度	3	
高程	>1000 m	极度	5	0.15	植被	0.2 ≤ NDVI < 0.4	中度	2	0.25
	750~1000 m	高度	4			0 < NDVI < 0.2	轻度	1	
	500~750 m	中度	3			NDVI ≤ 0	微度	4	
	250~500 m	轻度	2		水域区域	极度	5		
<250 m	微度	1	周边 300 m 范围	高度		4			
坡向	正北	极度	5	0.1	水域	300~800 m 范围	中度	3	0.25
	东北、西北	高度	4			其他区域	微度	1	

2.3.2. 耦合协调度评价

生态环境敏感性一定程度上反映出城市经济建设的空间布局合理性，其中敏感地区应适当减小土地开发强度。夜间灯光强度是城市经济活动强度的有效表征，有效反映出对自然环境系统的潜在压力。科学合理的城市经济建设应在社会-生态系统耦合层面具有协调一致性，即生态高敏感区应匹配较低的经济建设，高强度经济建设应尽量布局于生态低敏感区。为消除量纲、数量级和正负趋向等影响，分别将生态环境敏感性、夜间灯光强度评价结果极差标准化[14][15]，公式如下：

$$\text{生态环境敏感性(负向): } X_{sta}(i) = \frac{\max(X_i) - X_i}{\max(X_i) - \min(X_i)}$$

$$\text{夜间灯光强度(正向): } X_{sta}(i) = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)}$$

式中： $X_{sta}(i)$ 为各指标在空间像元*i*的极差标准化值； X_i 为各指标在空间像元*i*的原始值； $\max(X_i)$ 为各指标在空间像元*i*的最大值， $\min(X_i)$ 则为最小值。

将极差标准化后的生态环境敏感性与夜间灯光强度评价结果重采样至500×500 m格网，引入耦合度模型[11]开展研究。公式如下：

$$C = m \left[\frac{I_{ie} \times I_{il}}{\prod(I_{ie} + I_{il})} \right]^{\frac{1}{m}}$$

式中： C 为耦合度，取值范围为0~1，耦合度越大，子系统间影响程度越大； I_{ie} 、 I_{il} 分别为生态环境敏感性、夜间灯光强度在格网*i*上的像元值；由于存在两个耦合要素， m 取2。

耦合度更多地反映出系统要素间的相似性，但是不能很好地反映出生态环境敏感性与城市社会经济活动间的整体水平及两者的协同效应[16]，因此进一步构建耦合协调模型。公式如下：

$$D = \sqrt{C \times (\alpha I_{ie} + \beta I_{il})}$$

式中： C 为耦合度， D 为耦合协调度，耦合协调度越大，子系统间的一致性水平越高； I_{ie} 、 I_{il} 分别为生态环境敏感性、夜间灯光强度在格网*i*上的像元值； α 和 β 为待定系数，两个子系统被认为同等重要，将 α 和 β 同取为0.5。

同时，参考相关研究[11]，对耦合度和耦合协调度分别分级(表2)。

Table 2. Rank classification of coupling degree and coupling coordination degree

表 2. 耦合度及耦合协调度等级划分

耦合度	耦合度等级	耦合协调度	耦合协调度等级
$0 \leq C \leq 0.2$	极度耦合	$0 \leq C \leq 0.2$	高度失调
$0.2 < C \leq 0.4$	高度耦合	$0.2 < C \leq 0.4$	中度失调
$0.4 < C \leq 0.6$	中度耦合	$0.4 < C \leq 0.6$	基本协调
$0.6 < C \leq 0.8$	轻度耦合	$0.6 < C \leq 0.8$	中度协调
$0.8 < C \leq 1$	微度耦合	$0.8 < C \leq 1$	高度协调

2.3.3. 冷热点分析

地理要素的分布通常具有空间自相关性，以此为理论基础的空间统计学应运而生[17][18][19]。冷热点分析是一种有效识别具有统计显著性高值(热点)和低值(冷点)的全局及局域聚簇特征的空间统计学方

法[20] [21]。在本研究中, Getis-Ord G_i^* 指数被用于识别不同空间位置上耦合度及耦合协调度的高值簇与低值簇[22]。

3. 结果分析

3.1. 生态环境敏感性评价

3.1.1. 单因子评价

2020年杭州主城区各评价因子的生态敏感性均呈现出显著的空间异质性,且各有特点(图3)。坡度因子以微度敏感型为主(66.45%),高度、极度敏感型累计占比极低(3.85%)。在空间分布上,总体呈现“东北低-西南高”的空间格局,高敏感性地带主要集中于富阳区及余杭区西北部,相对远离杭州市经济发展的核心区域。研究区东北部位于杭嘉湖平原区,平坦的地形与发达的水系网络,促使杭州成为历史悠久的经济繁荣地带。

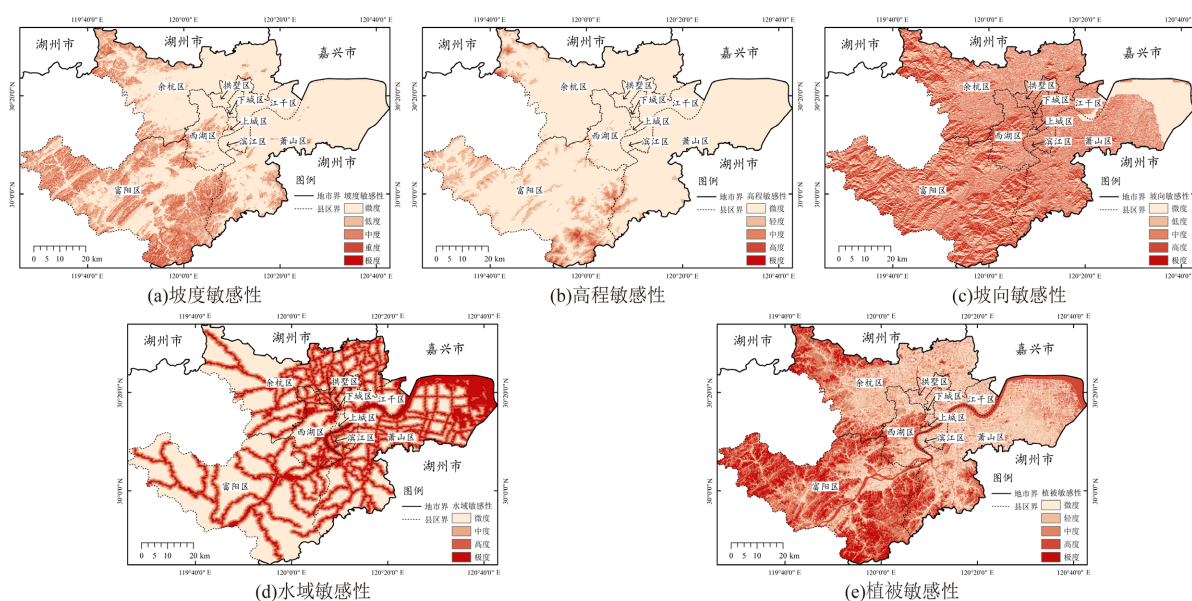


Figure 3. Results of single factor evaluation of ecological environment sensitivity

图3. 生态环境敏感性单因子评价结果

高程因子以微度敏感型为主(81.51%),高度、极度敏感型累计占比极低(0.26%)。在空间分布上,除富阳区、余杭区及萧山区部分区域敏感性等级相对较高外,其他区域均以微度敏感型为主,这是因为研究区绝大部分区域高程变化不大。

坡向因子在各敏感性等级的分布较为均衡,微度、轻度、中度、高度敏感型占比分别为25.26%、22.49%、21.06%、22.50%,而极度敏感型占比较低(8.69%)。由于坡向要素的空间高随机性,除研究区东部以平地坡向为主的钱塘江水系区外,空间集聚特征并不明显。

水域因子以微度敏感型占比最高(38.58%);中度、高度、极度敏感型占比相近,分别为21.52%、21.07%、18.83%。研究区地处钱塘江下游流域,以平原地形为主,而水域敏感性高值区多沿密度较高的河网分布,呈现出“东北密-西南疏”的空间格局。

植被因子以中度敏感型占比最高(29.08%),高度敏感型占比最低(9.01%);微度、轻度、极度敏感型占比相近,分别为22.56%、21.97%、17.38%。研究区内总体呈现“西南高-东北低”的空间格局,敏感

性高值多集中于千里岗山、龙门山、天目山等丘陵山地区；同时，沿钱塘江两侧呈现出敏感性高值。

3.1.2. 生态环境敏感性综合评价

2020 年杭州主城区生态环境敏感性以轻度(35.12%)、中度(26.79%)为主，微度、高度、极度敏感型分别占比 11.66%、18.39%、8.04%，生态环境敏感性总体较高。在空间分布上，整体呈现出“东北低 - 西南高”及“河网两侧多高值”的空间格局(图 4)，而敏感性低值区主要集中于平原地带。

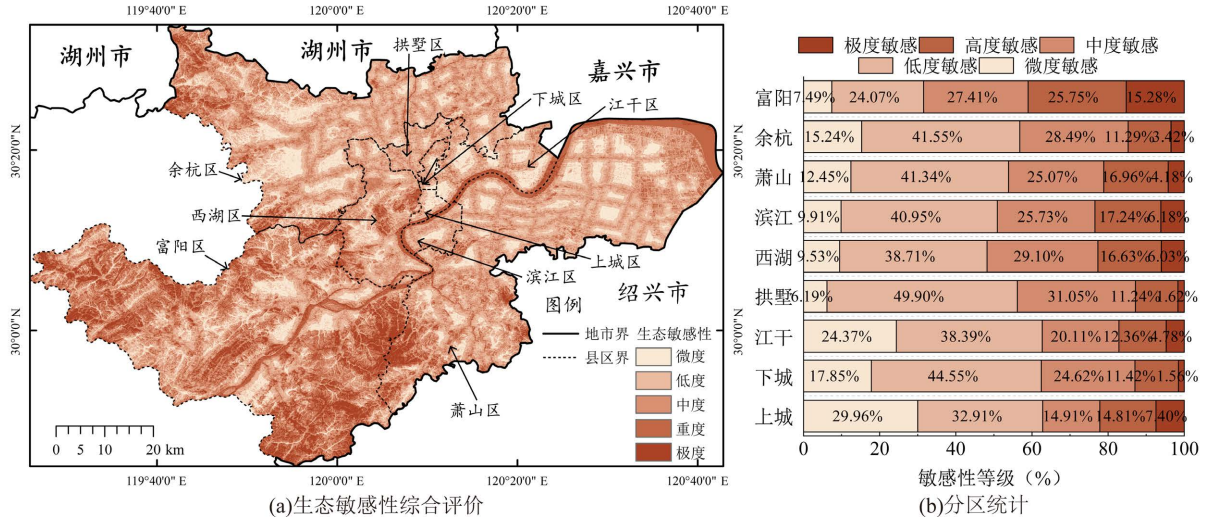


Figure 4. Comprehensive evaluation and regional statistics of ecological sensitivity
图 4. 生态敏感性综合评价及分区统计

杭州主城区各行政分区生态环境敏感性呈现出不同的数量与空间结构特征，可划分为不同类别。其中：第 I 类包括上城区、江干区、下城区、余杭区等 4 个敏感性相对最低区域，微度、低度敏感型累计占比高于其他区域，分别达到 62.87%、62.75%、42.42%、56.80%。第 II 类包括萧山区、滨江区、拱墅区、西湖区，其生态环境敏感性水平仅次于第 I 类区域，高度、极度敏感型累计占比均高于 20%。该区域应注重探索在人口高度稠密地区营造良好生态环境的建设路径，其中滨江区是国务院批准的首批国家级高新技术产业开发区之一，2020 年人均 GDP 达到 352320 元，远高于 136617 元的杭州市平均水平，应重点将生态环境敏感性纳入集约化、密集型的经济建设与产业开发框架中。第 III 类是富阳区，它是生态环境敏感性最高的区域，这与其多山地丘陵地形分布有关，尤需注意城市经济建设对环境的潜在不利影响。

3.2. 耦合协调性评价

3.2.1. 耦合度评价

耦合度综合反映出以生态环境敏感性和社会经济发展为代表的社会 - 生态系统间的相互影响程度。2020 年杭州主城区耦合度以微度(35.33%)、轻度耦合型(29.54%)为主，中度、高度、极度耦合型占比分别为 18.62%、12.98%、3.53%；仅有不足 16% 的区域耦合度等级在高度及以上，两系统间整体耦合程度较低。在空间分布上具有明显的集聚特征，呈现出以下城区、上城区、拱墅区、江干区、西湖区、滨江区等核心城区为高耦合度中心，向外递减的“中心 - 圆环 - 外围”的多圈层空间格局(图 5)。与此同时，耦合度低值区主要集中于富阳区、余杭区内的丘陵山地地带。该区域的地形条件不利于形成大规模的人口与产业集聚，社会经济系统活力相对较低。

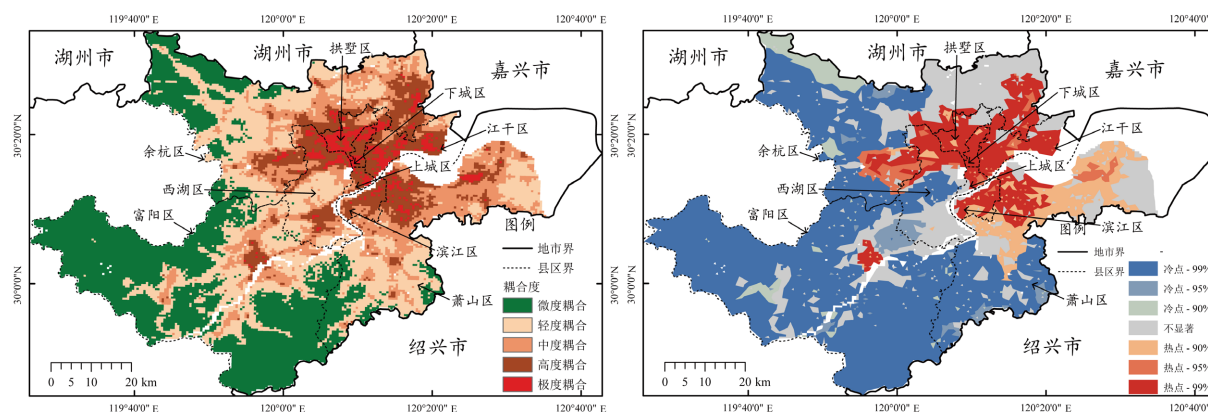


Figure 5. Coupling degree and its cold-hot spot spatial distribution
图 5. 耦合度及其冷热点空间分布

冷热点分析结果同样印证了“中心-圆环-外围”的空间格局，表明杭州主城区生态环境敏感性和社会经济发展之间的耦合度在空间上具有明晰的冷热点集聚特征。研究区以冷点集聚区为主，占比达 57.80%，其中 51.90% 通过 99% 显著性检验；热点集聚区次之(21.48%)，其中 12.27% 通过 99% 显著性检验；冷热点不显著区域相对较少(20.73%)。在空间分布上，以下城区等为代表的杭州核心城区是高度显著的耦合度热点区域，并形成大范围空间集聚，是杭州市社会-生态系统间深度耦合的连片地带。此外，在热点区域外围多分布不显著地带作为过渡；耦合度冷点区域成规模集聚于研究区西南片区，该区域社会经济发展处于相对滞后水平。

3.2.2. 耦合协调度评价

耦合协调度综合反映出以生态环境敏感性和社会经济发展为代表的社会-生态系统间协调发展的整体水平。2020 年杭州主城区耦合协调度以高度失调(27.14%)、中度失调(43.55%)、基本协调型(26.26%) 为主，中度、高度协调型占比仅为 2.99%、0.06%；基本及以上协调型累计占比不足 30%，研究区社会-生态系统面临社会经济发展压力下的生态环境失衡挑战，亟需对其深度认识并重点改善。在空间分布上，总体呈现以下城区、上城区、拱墅区、江干区、滨江区等核心城区为高耦合协调度中心，由中心四周递减的空间格局(图 6)。同时，耦合协调度低值区主要集中于余杭区西北部、富阳区西南部、富阳区东北部等三大地带，该区域生态环境敏感性相对较高，在经济发展布局时尤需注重其与生态环境间的协调关系。

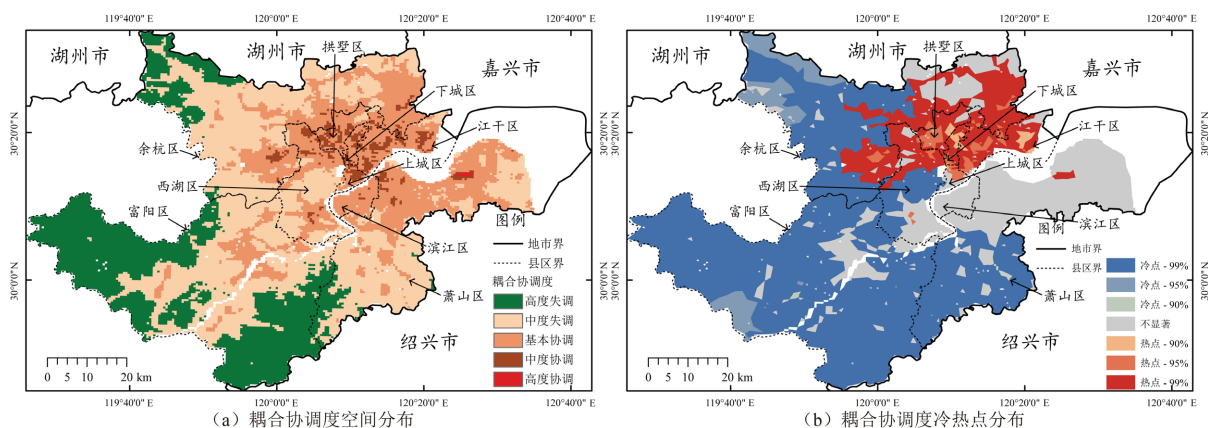


Figure 6. Coupling coordination degree and its cold-hot spot spatial distribution
图 6. 耦合协调度及其冷热点空间分布

冷热点分析结果表明, 研究区耦合协调度以冷点集聚区为主(62.01%), 其中 57.28% 区域通过 99% 显著性检验; 热点集聚区占比为 14.81%; 冷热点不显著区域占比为 23.19%, 意味着杭州市市区社会 - 生态系统间耦合协调度在空间上具有明晰的冷热点集聚特征。在空间分布上, 冷点集聚区主要集中于研究区西南片区, 该区域在社会经济发展时应特别注意当地生态环境的高敏感性特征, 适当调控经济建设强度; 而在东北片区, 沿钱塘江两侧呈现不同的集聚特征, 上侧为热点集聚区, 下侧为冷点集聚区。以下城区等为代表的杭州核心城区主要分布于热点集聚区, 意味着社会经济发展热区与生态环境敏感性低值区形成较好的空间匹配关系, 有利于维持区域人地关系地域系统的可持续协调发展, 应在未来予以保持、并实施内涵式优化。冷热点不显著区域主要集中于萧山区, 萧山区在 2020 年坐拥 226.4 万人口, 人均 GDP 仅为 92324 元, 是杭州市各市区最低值, 在未来深入挖掘社会经济发展潜力的同时, 应尤为注意与生态系统间的协调共生, 警惕实施以牺牲环境可持续利用为代价的经济发展范式。

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本研究以 2020 年为基期, 在综合评估杭州市市区生态环境敏感性的基础上, 结合夜间灯光强度表征经济空间强度, 探究生态环境系统与社会经济系统之间相互影响与协调发展的关系。主要结论如下:

1) 杭州市市区生态环境敏感性以轻度、中度为主, 总体呈现出“东北低 - 西南高”及“河网两侧多高值”的空间格局, 在各行政分区间呈现不同特征。

2) 杭州市市区生态环境敏感性与社会经济发展间耦合度以微度、轻度耦合型为主, 并以杭州核心城区为高值中心, 呈现“中心 - 圆环 - 外围”的多圈层式空间格局。此外, 耦合度呈现明晰的冷热点集聚特征, 热点区域多集中于核心城区, 冷点区域多集聚于西南片区。

3) 杭州市市区生态环境敏感性与社会经济发展间耦合协调度以高度、中度失调及基本协调型为主, 社会 - 生态系统面临较大的生态环境失衡压力。在空间分布上, 呈现由核心城区向四周递减的空间格局。此外, 耦合协调度呈现明晰的冷热点集聚特点, 热点区域多集中于钱塘江上侧和核心城区, 社会经济发展热区与生态环境敏感性低值区形成较好的空间匹配; 冷点区域多集聚于西南片区。

4.2. 讨论

杭州市市区生态环境敏感性与各评价因子密切相关, 应结合各评价因子的数量与空间结构特征分析敏感性的内在形成原因。尽管本研究从地形、植被、距水域距离等核心要素评价生态环境敏感性, 但在全面性上可能有所欠缺, 未来可补充大气、地质、土壤、区域生物等评价因子。与此同时, 尽管夜间灯光强度是表征经济活动的有效手段, 但测度误差可能难以避免, 可补充考虑 GDP 空间分布、人口密度等指标予以检验及修正。总而言之, 在本研究中, 耦合度被用于揭示社会 - 生态系统间相互影响强度, 耦合协调度被用于揭示系统间协调发展水平, 两者相结合的评价方式对于指导杭州市市区经济建设的科学规划布局、促进人地关系地域系统可持续发展具有科学意义。

基金项目

云南省教育厅科学研究基金项目(2023J0001)。

参考文献

- [1] 李振亚, 魏伟, 周亮, 等. 中国陆地生态敏感性时空演变特征[J]. 地理学报, 2022, 77(1): 150-163.
- [2] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于 MODIS 的 2006-2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. 地理学报,

- 2019, 74(7): 1438-1449.
- [3] 刘海龙, 王炜桥, 王跃飞, 等. 汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3952-3964.
- [4] 姜雨璇, 查小春, 纪惠文. 秦巴山区中部生态敏感性时空演变及影响因素[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2022, 61(2): 48-56.
- [5] 何苏玲, 邹凤琼, 王金亮. 基于 AHP 和 MSE 赋权法的龙南县生态敏感性评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2927-2935.
- [6] Liu, Q.Q. and Hu, Y. (2020) Functional Zoning Mode and Management Measures of Qianjiangyuan National Park Based on Ecological Sensitivity Evaluation. *Journal of Resources and Ecology*, **11**, 617-623.
<https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2020.06.009>
- [7] 王李睿, 邓西鹏, 王晨, 等. 基于生态系统服务重要性与生态敏感性的生态空间划设——以福建省永春县为例[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 166-173.
- [8] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨珞, 等. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8241-8253.
- [9] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258.
- [10] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [11] Chen, Q.W., Lu, S.X., Xiong, K.N. and Zhao, R. (2021) Coupling Analysis on Ecological Environment Fragility and Poverty in South China Karst. *Environmental Research*, **201**, Article ID: 111650.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111650>
- [12] 李思楠, 赵筱青, 普军伟, 等. 西南喀斯特典型区国土空间功能质量评价及耦合协调分析——以广南县为例[J]. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2350-2367.
- [13] 吕拉昌, 于英杰, 栾惠. 北京城市舒适性、差异性与创新能力的关系[J]. 地理科学, 2022, 42(1): 115-125.
- [14] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [15] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [16] 孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 等. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制[J]. 经济地理, 2017, 37(2): 163-170.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] 王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 地理学时空数据分析方法[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1326-1345.
- [19] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [20] 应奎, 李旭东, 程东亚. 贵州人口老龄化空间格局演变及环境成因[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 334-345.
- [21] 王昀, 陶建斌. 基于 DMSP/OLS 夜光数据的中国省域经济发展时空变化[J]. 地理空间信息, 2019, 17(11): 75-79.
- [22] 聂晶鑫, 刘合林. 中国人才流动的地域模式及空间分布格局研究[J]. 地理科学, 2018, 38(12): 1979-1987.