

中国典型河口三角洲生态系统 服务价值的时空异质性

刘永超^{1,2}, 王荣雪^{1,2,3}, 李东霖^{1,4}, 陈柳蒙¹, 施琪¹, 李加林¹

(1. 宁波大学 陆海国土空间利用与治理浙江省协同创新中心,

浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 地理科学与遥感技术学院, 浙江 宁波 315211;

3. 绍兴市新昌县知新中学, 浙江 绍兴 312580; 4. 宁波市发展规划研究院, 浙江 宁波 315042)

摘要: [目的] 系统解析中国沿海典型河口三角洲生态系统服务价值(ESV)的时空分异规律,为区域协调发展与生态保护策略的制定提供科学依据。[方法] 综合利用多源时空数据,结合空间分析与计量模型评估方法,研究 1985—2024 年典型河口三角洲珠江三角洲、长江三角洲和黄河三角洲(以下简称“珠三角、长三角和黄三角”)ESV 的时空演变特征。[结果] ①研究期内,各区域城镇化水平持续提升,但空间模式存在显著差异,珠三角呈“核心-次中心”组团式结构,长三角表现为“都市圈+发展轴”形态,黄三角则为分散型点状发展格局。②ESV 空间分布特征各异,珠三角呈现西南部高值集聚,长三角表现为明显的南北梯度分异,黄三角则形成中心低、外围高的同心圆结构。③城镇化与 ESV 的空间关联性存在区域差异,珠三角与长三角呈显著空间正相关,而黄三角表现为负相关,揭示了不同发展阶段人地关系的差异。[结论] 针对典型河口三角洲高质量发展与生态系统服务提升的需求,应实施差异化发展路径:珠三角需强化空间治理协同,长三角应加强生态系统综合管控,黄三角宜构建以资源开发与气候适应为导向的生态价值实现机制。

关键词: 城镇化; 生态系统服务价值; 时空特征; 相关性; 三角洲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0340-13

中图分类号: X171.1, F299.27

文献参数: 刘永超, 王荣雪, 李东霖, 等. 中国典型河口三角洲生态系统服务价值的时空异质性[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 340-352. Liu Yongchao, Wang Rongxue, Li Donglin, et al. Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service value in typical estuarine deltas of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 340-352.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.035

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.035

Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service value in typical estuarine deltas of China

Liu Yongchao^{1,2}, Wang Rongxue^{1,2,3}, Li Donglin^{1,4}, Chen Liumeng¹, Shi Qi¹, Li Jialin¹

(1. Zhejiang Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and

Governance Research, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China; 2. School of Geography and

Remote Sensing, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China; 3. Zhixin Middle School, Xinchang

County, Shaoxing, Zhejiang 312580, China; 4. Ningbo Development Planning Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315042, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal differentiation patterns of ecosystem service value (ESV) in typical estuarine deltas of coastal regions in China (hereinafter referred to as the Pearl River delta, Yangtze River delta, and Yellow River delta) were systematically analyzed, in order to provide a scientific basis for the formulation of regional coordinated development and ecological conservation strategies. [Methods] By comprehensively utilizing multi-source spatiotemporal data and combining spatial analysis with econometric modeling methods, this study investigated the spatiotemporal evolution characteristics of ESV in typical estuarine deltas in 1985—2024.

收稿日期: 2025-07-23

修回日期: 2025-12-14

采用日期: 2025-12-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“21 世纪海上丝绸之路海岸带韧性演变过程及其对开发活动响应研究”(42206236); 浙江省省属高校基本科研业务费专项资金项目“浙东甬江流域乡村湿地景观研究”(SJWY2022012); 甬江社会科学青年人才项目; 宁波大学浙江省陆海国土空间利用与治理协同创新中心开放课题“陆海统筹视角下宁波沿海产业带发展路径研究”(LHGTXT-2025-015)

第一作者: 刘永超(1990—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 博士, 副研究员, 主要从事滨海城市资源环境演变研究。Email: liuyongchao@nbu.edu.cn.

通信作者: 李东霖(1985—), 男(汉族), 辽宁省营口市人, 硕士, 高级经济师, 主要从事滨海城市资源经济研究。Email: lidonglin52@163.com.

[Results] ① During the study period, the urbanization levels of all regions continuously increased, but the spatial patterns showed significant differences. The Pearl River delta presented a ‘core-subcenter’ clustered structure, the Yangtze River delta showed a ‘metropolitan area + development axis’ pattern, and the Yellow River delta exhibited a dispersed, point-like development pattern. ② The spatial distribution characteristics of ESV differed substantially among regions. The Pearl River delta showed high-value clustering in the southwest, the Yangtze River delta exhibited a pronounced south-north gradient differentiation, and the Yellow River delta formed a concentric structure characterized by low values in the center and high values in the periphery. ③ The spatial correlation between urbanization and ESV showed regional differences. The Pearl River delta and Yangtze River delta demonstrated a significant positive spatial correlation, whereas the Yellow River delta showed a negative correlation, revealing the differences in human-environment relationships at different stages of development. [Conclusion] In response to the demands for high-quality development and ecosystem service enhancement in typical estuarine deltas, differentiated development pathways should be adopted. The Pearl River delta should strengthen coordinated spatial governance, the Yangtze River delta should enhance integrated ecosystem management, and the Yellow River delta should establish mechanisms for realizing ecological value oriented towards resource development and climate adaptation.

Keywords: urbanization; ecosystem service value; spatiotemporal characteristics; correlation; delta

在人口集聚、产业转型与土地利用格局演变的协同驱动下,社会生态系统正经历着重构过程^[1],该过程与城镇化发展密切相关。尤其在快速城镇化阶段,不透水地表扩张与地表覆盖变化加剧了生态系统服务的供需失衡^[2]。城镇化通过人口集聚与经济增长等路径,对生态系统产生双重效应,一方面资源消耗与空间扩张形成的胁迫,导致生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)衰减,同时集约发展与环境规制发挥调控作用,促进其维持与提升,二者动态平衡最终决定区域ESV的演变趋势^[3]。因此,探究快速城镇化进程中ESV的演变动态,对实现可持续发展目标具有重要意义^[4]。

自Costanza等首次系统界定生态系统服务概念并量化全球ESV以来^[5],相关研究已经形成多尺度评估体系,成为生态保护政策制定与成效评估的重要科学依据^[6]。在城镇化评估方面,现有研究构建了涵盖人口、经济、社会及土地利用等多维指标的综合评价体系^[7],常用指标权重确定方法包括熵值法^[8]、主成分分析法^[9]及综合指数法等^[10]。在ESV评估的发展过程中,形成了经济价值评估和物质量空间化评估两大范式^[11-12],并且广泛应用于跨区域生态补偿机制设计^[13]与自然资源资产核算等^[14]方面;城镇化水平与土地ESV空间分异的多层次分析框架^[15]对内陆城市群的相关研究具有重要的借鉴作用^[16]。河口三角洲地区作为高强度开发与生态敏感性高度叠加的区域,快速城镇化进程对生态环境造成的胁迫效应尤为突出,亟需通过土地利用结构优化与生态安全格局构建进行调控。因此,分析典型河口三角洲地区ESV的时空动态,揭示其与城镇化过程的响应

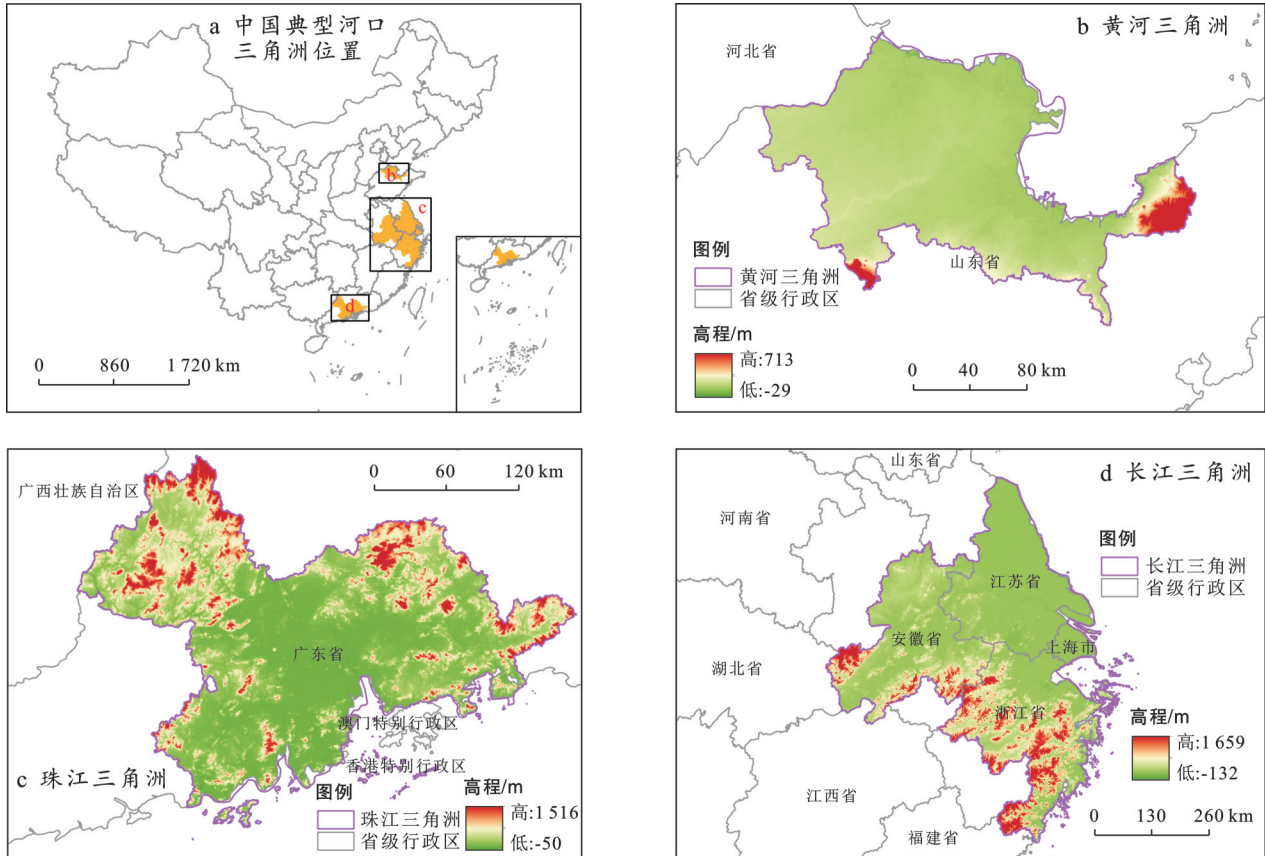
关系,不仅有助于推动低碳城镇化发展,也可为国土空间格局优化提供科学依据。

中国典型河口三角洲复合生态系统因其独特的自然地理属性,在全球生态格局中占据重要地位^[17]。长江、黄河及珠江三角洲(简称“黄三角、长三角和珠三角”)依托显著区位优势,已成为国家城镇化战略实施的关键区域^[18]。城镇化过程中,在人口与经济集聚的驱动下,建设用地不断扩张,进而影响到生态系统服务功能。

本研究采用改进的单位面积价值当量因子法,融合土地利用、夜间灯光及人口密度等多源数据,测算ESV和城镇化水平,结合空间自相关分析方法,系统解析典型河口三角洲城镇化水平与ESV的关系,以期为沿海地区高质量可持续发展提供有效支撑。

1 研究区概况

中国沿海三大典型河口三角洲地处东部沿海地区(图1)。珠三角位于南海北岸,属典型的亚热带海洋性季风气候区,年均气温20~23℃,年降水量约1800mm^[19]。2024年该地区GDP占广东省总量的80%,其中广州与深圳两大核心城市的GDP贡献率超过50%^[20]。长三角地跨3省1市,地势低平,河网密集,同属亚热带季风气候区。2000—2024年,常住人口由1.56亿增至2.38亿,以全国3.73%的国土面积承载了16.9%的人口总量,已成为全球六大城市群之一^[21]。黄三角位于渤海湾南岸,是由泥沙冲积形成的年轻湿地生态系统^[22]。2006—2024年,该区域GDP增长了 1.86×10^{12} 元,人口规模扩大至 1.05×10^7 人,展现出较强的发展潜力^[23]。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)1822号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 中国典型河口三角洲概况图

Fig.1 Overview of typical estuarine deltas in China

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究综合中国典型河口三角洲的多源数据,包括土地利用数据、数字高程(DEM)数据、夜间灯光

数据以及社会经济统计数据(见表1)。社会经济数据主要包括农作物产量、市场价格及播种面积等核心变量。同时将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,共6类,并统一空间坐标系。

表 1 数据来源、属性及用途
Table 1 Data sources, attributes, and applications

类别	数据名称	时间	空间分辨率	数据来源	数据用途
地形	数字高程数据	—	30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)	明晰研究区地势特征
土地利用	土地利用数据	1985—2024年	30 m	武汉大学(https://doi.org/10.5281/zenod)	计算ESV
社会经济	农作物产量	1985—2024年	—	各市统计年鉴	核算ESV、修正当量因子
	市场价格				
	作物播种面积				
	人口密度	1995—2020年	1 km	WorldPop平台(https://hub.worldpop.org/)	评估人口城镇化
GDP	1995—2020年	1 km	WorldPop平台(https://hub.worldpop.org/)	评估经济城镇化	
夜间灯光数据	1995—2020年	1 km	国家地球系统科学数据中心(https://nnu.geodata.cn/)	评估空间城镇化	

2.2 研究方法

2.2.1 城镇化水平评估

城镇化是一个涉及人口、经济、空间和社会等多维度的复杂过程^[24]。遵循系统性、代表性与数据可获性原则,构建包含经济、人口与空间3个维度的综

合评估指标体系,体现不同维度对城镇化的贡献差异^[25]。其中,经济城镇化以地区GDP表征生产要素的空间集聚效应;人口城镇化采用人口密度反映人力资本的空间再配置过程;空间城镇化则选取夜间灯光数据表征建成区空间扩展特征。鉴于3个维度共同

表征了城镇化的核心内涵,本研究对指标进行标准化处理后,采用等权重法加权测度城镇化水平,并依据自然断点法划分城镇化梯度区域。计算公式为

$$U_{DI} = \frac{U'_{POP} + U'_{NLI} + U'_{CON}}{3} \quad (1)$$

式中: U'_{POP} 为单位网格的人口密度; U'_{NLI} 为单位网格的夜间灯光指数; U'_{CON} 为单位网格的建设用地比例; U_{DI} 为城镇化综合发展水平。

2.2.2 生态系统服务价值测度

基于生态系统服务评估框架,首先划分出供给、调节、支持和文化服务 4 项一级类型,进一步细分为 11 项二级类型^[26]。结合研究区空间尺度特征,分别构建矢量网格单元,并统计各网格单元内不同地类面积占比。参考谢高地等^[26-27]价值当量因子法,计算得到 1985—2024 年两个区域单位面积 ESV 系数。计算公式为

$$VC_{kf} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i q_i p_i}{M} \quad (2)$$

式中: VC_{kf} 为 k 类土地利用类型中第 f 项生态系统服务修订后的价值系数(元/hm²); m_i 为第 i 类农作物的播种面积(hm²); p_i 为第 i 类农作物的平均市场价

格(元/t); q_i 为第 i 类农作物的平均单位面积产量(t/hm²); M 为研究区农作物总播种面积(hm²); n 为主要农作物类别总数。系数 1/7 表示单位 ESV 当量的经济价值相当于粮食生产平均市场价值的 1/7。

鉴于长三角地区空间尺度较大,为便于经济社会数据的获取与计算,本研究依据小麦与稻谷的平均产量,结合 2000 年复种指数,测算出该区域 ESV 当量为 1 008.73 元/hm²,得到单位面积 ESV 系数(表 2)。运用修订后的单位面积价值系数,进一步计算三角洲区域的 ESV 总量,计算公式为

$$ESV = \sum_{k=1}^v A_k VC_{kf} \quad (3)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值(元); A_k 为 k 类土地利用类型的面积(hm²); VC_{kf} 为 ESV 系数(元/hm²)。

应用自然断点法,将珠三角、长三角和黄三角的 ESV 划分为 5 个等级:低(I 级 < 1.25 × 10⁷)、中低(1.25 × 10⁷ ≤ II 级 < 1.71 × 10⁷)、中(1.71 × 10⁷ ≤ III 级 < 2.75 × 10⁷)、中高(2.75 × 10⁷ ≤ IV 级 < 6.79 × 10⁷)和高(6.79 × 10⁷ ≤ V 级 < 2.99 × 10⁸)。

表 2 长三角单位土地面积 ESV 系数

Table 2 ESV coefficients per unit land area in Yangtze River delta

单位:元/hm²

类别	土地面积ESV系数					
	生态系统服务	耕地	林地	草地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	857.65	221.98	221.98	807.20	0
	原料生产	403.60	524.68	332.97	232.07	0
	水资源供给	20.18	272.43	181.62	8 364.61	0
调节服务	气体调节	676.03	1 715.30	1 150.26	776.93	20.18
	气候调节	363.24	5 115.63	3 047.18	2 310.61	0
	净化环境	100.90	1 503.41	1 009.00	5 599.95	100.90
	水温调节	272.43	3 370.06	2 229.89	103 160.16	30.27
支持服务	土壤保持	1 039.27	2 078.54	1 402.51	938.37	20.18
	维持养分	121.08	161.44	110.99	70.63	0
	生物多样性	131.17	1 896.92	1 281.43	2 572.95	20.18
文化服务	美学景观	60.54	827.38	565.04	1 907.01	10.09
总计		4 048.09	17 687.77	11 532.87	126 740.49	201.80

2.2.3 相关性分析

采用双变量空间自相关分析方法揭示生态系统服务与城镇化发展之间的空间耦合关系^[28]。全局 Moran's I 指数用于衡量研究区域内城镇化水平与单位面积 ESV 在整个空间范围的关联强度;局部 Moran's I 指数用于识别二者在局部空间单元上的集聚模式。计算公式为

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} U_i A_j}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (4)$$

$$I_L = U_i \sum_{j=1}^n W_{ij} A_j \quad (5)$$

式中: I_G 表示双变量全局 Moran's I 指数; I_L 表示双变量局部 Moran's I 指数; n 为研究区内县域单元的总

数; W_{ij} 为空间权重矩阵中对应单元 i 与 j 的权重系数; U_i 为第 i 个县域单元的城镇化水平; A_j 为第 j 个县域单元的地均 ESV。

3 结果与分析

3.1 城镇化水平时空演变特征

1995—2020年,珠三角、长三角和黄三角的综合城镇化指数均值呈上升趋势(图2),反映出区域城镇化水平的整体提升格局。其中,珠三角地区城镇化指数由1995年的5.50增长至2020年的13.34,始终处于领先地位,显示出强劲的城镇化发展动力;长三角地区同期从2.87增长至10.98,增幅为8.11,与珠三角的差距逐步缩小;黄三角地区则由3.27增长至9.34,增幅为6.07,发展速度相对较缓,区域间形成了明显的城镇化梯度发展格局。

中国典型河口三角洲城镇化空间格局呈现显著分异性特征(图3)。珠三角地区形成了以广州、深圳和东莞都市区为核心,向东西两翼拓展的“单核双翼”空间结构;高城镇化区域集中于珠江口东岸的城市走廊,而低值区则主要分布于肇庆西北部山地及惠州东北部丘陵地带。长三角地区呈现出“核心-圈层-轴

带”的空间组织模式,以上海为核心形成高城镇化核心区,沿沪宁、沪杭甬等交通廊道延伸为轴向扩展带,环太湖城市群构成次级发展圈层;相比之下,浙西南山区城镇化水平显著低于沿江冲积平原片区。黄三角表现为“点-轴”渐进式发展特征,城镇化高值区集中于滨州-东营临港产业带,依托当地资源条件与港口区位优势,形成以石油化工产业为主导的城镇化发展路径,与周边农业区形成明显的空间梯度差异。

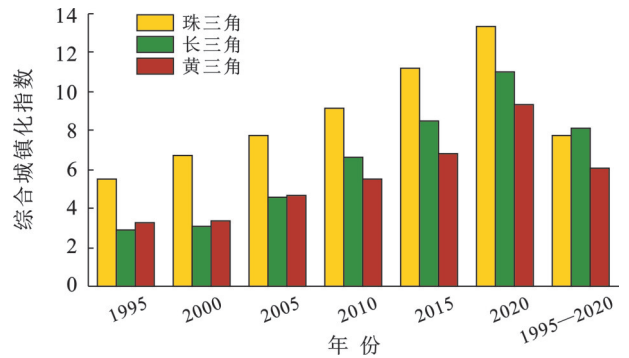


图2 1995—2020年中国典型河口三角洲城镇化水平时序演变特征

Fig.2 Temporal evolution characteristics of urbanization levels in typical estuarine deltas of China (1995—2020)

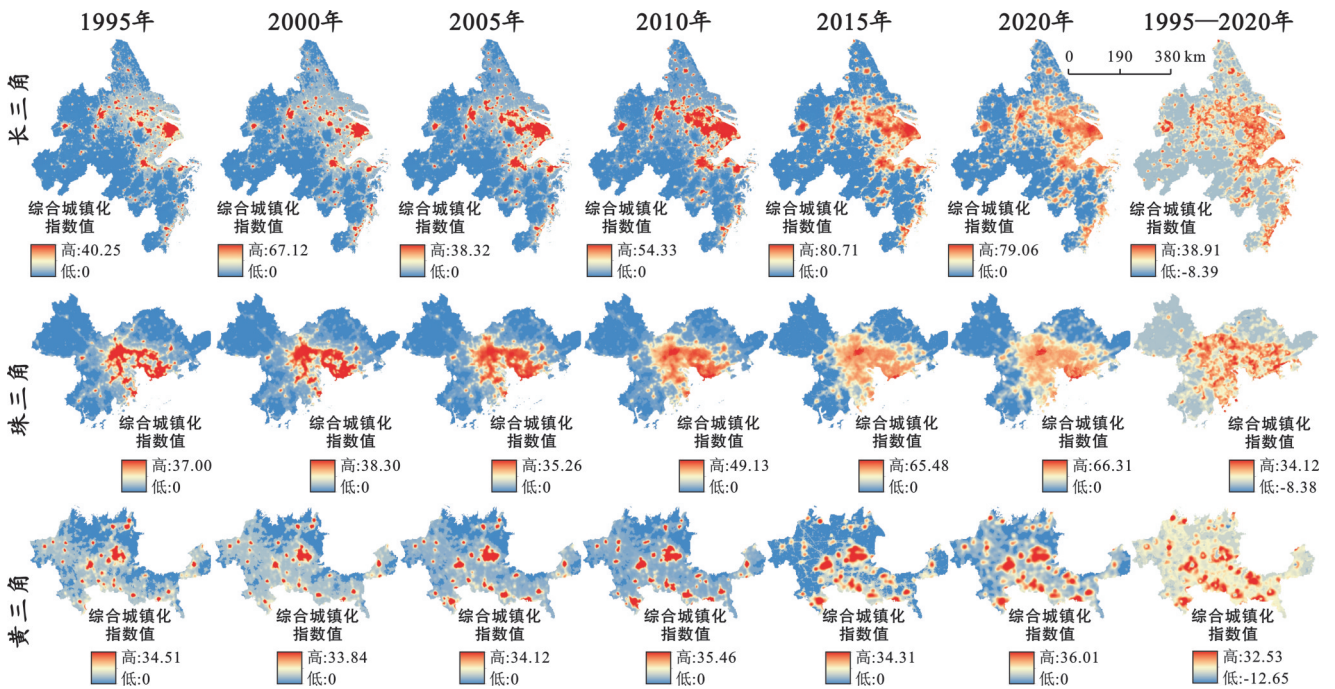


图3 1995—2020年中国典型河口三角洲城镇化空间格局演变特征

Fig.3 Evolution characteristics of spatial patterns of urbanization in typical estuarine deltas of China (1995—2020)

3.2 生态系统服务价值时空格局特征

3.2.1 生态系统服务价值时间演变特征

中国典型河口三角洲地区的ESV演变特征存在显著差异。其中,珠三角地区的ESV在1985—2015年总体呈现先增后减的演变趋势(表3)。2015—

2024年,除支持服务外,其他服务功能价值均持续下降。调节服务在ESV结构中占据主导地位,其峰值出现于1995年(1 009.4亿元),占年总价值的75%,其次为支持服务。同时,水文调节、气候调节及土壤保持构成了珠三角地区的核心服务功能体系,占比超

过ESV总量的50%。除水资源供给与水文调节呈现阶段性上升外,其余9项服务价值在1985—2024年均

呈下降态势,其中气候调节与土壤保持功能的下降幅度最为显著。

表3 1985—2024年珠三角ESV变化
Table 3 Changes in ESV of Pearl River delta (1985—2024)

一级类型	二级类型	ESV值/10 ⁸ 元								
		1985年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2024年
供给服务	食物生产	28.78	27.70	27.26	26.77	24.86	24.06	23.77	23.47	23.14
	原材料生产	28.04	27.22	26.93	26.66	25.59	25.11	25.02	24.77	24.13
	水资源供给	48.88	51.32	52.60	52.32	51.04	49.92	46.86	48.42	47.65
调节服务	气体调节	79.16	77.36	76.84	76.27	74.04	72.97	72.65	72.15	71.32
	气候调节	202.94	199.90	199.39	198.54	195.16	193.24	192.24	191.57	191.43
	净化环境	82.44	83.07	83.70	83.31	81.66	80.49	78.41	79.16	78.92
	水文调节	603.69	633.71	649.46	646.06	630.13	616.38	578.60	597.87	595.05
支持服务	土壤保持	100.26	97.77	97.00	96.19	93.06	91.60	91.22	90.51	92.39
	维持养分	8.57	8.32	8.24	8.16	7.83	7.69	7.66	7.59	7.44
	生物多样性	83.30	82.72	82.80	82.44	80.96	80.04	79.05	79.13	80.11
文化服务	美学景观	40.03	40.02	40.18	39.99	39.24	38.74	38.02	38.20	38.04
合计		1 306.10	1 329.10	1 344.40	1 336.70	1 303.60	1 280.20	1 233.50	1 252.80	1 170.70

1985—2024年,长三角地区ESV呈现先增后减的演变趋势(表4)。ESV由1985年的4 169.8亿元上升至2010年的4 321.3亿元,随后下降至2024年的4 178.9亿元,这一演变过程反映了城镇化发展与生态保护政策之间的复杂关系。其中,调节服务中的水文调节功能始终占据主导地位,2010年价值达

2 429.54亿元,占当年ESV总量的56%,体现了水相关生态系统服务在区域生态结构中的关键作用。支持服务中的土壤保持与生物多样性维持功能呈持续下降趋势,表明生态系统存在结构性退化风险。文化服务价值则保持相对稳定并略有提升,体现出生态旅游与景观保护政策的实施成效。

表4 1985—2024年长三角ESV变化
Table 4 Changes in ESV in Yangtze River delta (1985—2024)

一级类型	二级类型	ESV值/10 ⁸ 元								
		1985年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2024年
供给服务	食物生产	138.11	136.88	134.28	132.48	129.16	125.71	123.42	121.81	121.19
	原材料生产	88.13	87.96	87.51	86.95	85.50	83.45	82.21	81.57	83.35
	水资源供给	184.41	182.97	185.16	187.76	192.79	196.75	191.69	189.42	187.94
调节服务	气体调节	213.42	213.50	214.09	213.13	210.60	207.13	204.46	203.41	202.44
	气候调节	438.14	439.60	447.87	447.27	445.59	443.54	439.07	438.72	436.03
	净化环境	225.28	224.85	228.12	229.51	232.06	233.93	229.78	228.31	224.11
	水文调节	2 277.61	2 259.90	2 286.89	2 318.85	2 380.78	2 429.54	2 367.11	2 339.06	2 325.32
支持服务	土壤保持	284.52	284.42	284.37	282.91	279.07	273.76	270.05	268.43	269.32
	维持养分	26.82	26.78	26.63	26.46	26.02	25.41	25.03	24.84	25.29
	生物多样性	197.05	197.38	200.49	200.80	201.22	201.30	198.67	198.07	199.78
文化服务	美学景观	101.71	101.71	103.21	103.59	104.25	104.66	103.05	102.56	104.17
合计		4 169.80	4 151.00	4 193.80	4 225.70	4 283.70	4 321.30	4 230.60	4 192.30	4 178.90

黄三角地区ESV总体呈现稳步增长态势,1985—2024年,总价值由542.8亿元上升至705.7亿元,累计增幅达30.6%(表5)。从服务类型结构来看,供给服务中水资源供给价值增幅显著;调节服务则表现出差异化演变特征,气体调节与气候调节价值维持

相对稳定,而净化环境与水文调节功能明显增强,其中水文调节价值增长率达38.1%,对保障区域生态系统稳定性具有关键作用;支持服务中土壤保持与养分循环功能价值波动较小,表现出较强的功能稳定性。

表 5 1985—2024 年黄三角 ESV 变化
Table 5 Changes in ESV of Yellow River delta (1985—2024)

一级类型	二级类型	ESV 值/10 ⁸ 元								
		1985年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2024年
供给服务	食物生产	17.60	17.52	17.39	17.64	18.18	18.87	18.75	18.66	18.54
	原材料生产	8.27	8.33	8.21	8.34	8.40	8.34	8.27	8.22	8.31
	水资源供给	30.43	28.74	31.66	30.88	33.98	41.03	42.18	42.05	41.14
调节服务	气体调节	16.53	16.72	16.62	16.82	16.68	16.26	16.21	16.12	16.08
	气候调节	20.93	21.38	21.85	21.82	20.97	19.70	20.03	19.92	19.79
	净化环境	23.97	23.06	24.94	24.44	25.97	29.63	30.41	30.30	29.75
支持服务	水文调节	375.77	354.92	390.87	381.22	419.52	506.38	520.62	519.05	519.43
	土壤保持	23.69	23.93	23.71	24.03	23.96	23.49	23.38	23.25	23.43
	维持养分	2.50	2.53	2.49	2.53	2.54	2.51	2.49	2.48	2.52
文化服务	生物多样性	14.11	13.95	14.72	14.55	14.79	15.63	15.99	15.92	15.78
	美学景观	9.01	8.78	9.39	9.24	9.64	10.68	10.95	10.91	10.97
合计		542.80	519.90	561.90	551.50	594.60	692.50	709.30	706.90	705.70

3.2.2 生态系统服务价值空间演变特征

2000—2024 年,珠三角 ESV 整体呈现西南高、东北低的空 间分布格局(图 4)。

珠三角地区西南部远离城市核心区,森林与湿 地资源丰富,人类活动干扰较弱,因而成为 ESV 高值 集聚区;而东北部城市核心区因建设用地扩张和绿

地面积缩减,致使生态环境质量显著降低。随着生 态建设持续推进,部分区域的 ESV 呈现明显恢复趋 势。其中,深圳市和东莞市 1995 年 ESV 处于中高至 高等级,2000 年后受快速城市化影响而显著下降; 2015 年以来得益于生态修复与环境保护措施实施, 其 ESV 逐渐增大,呈现稳步恢复态势。

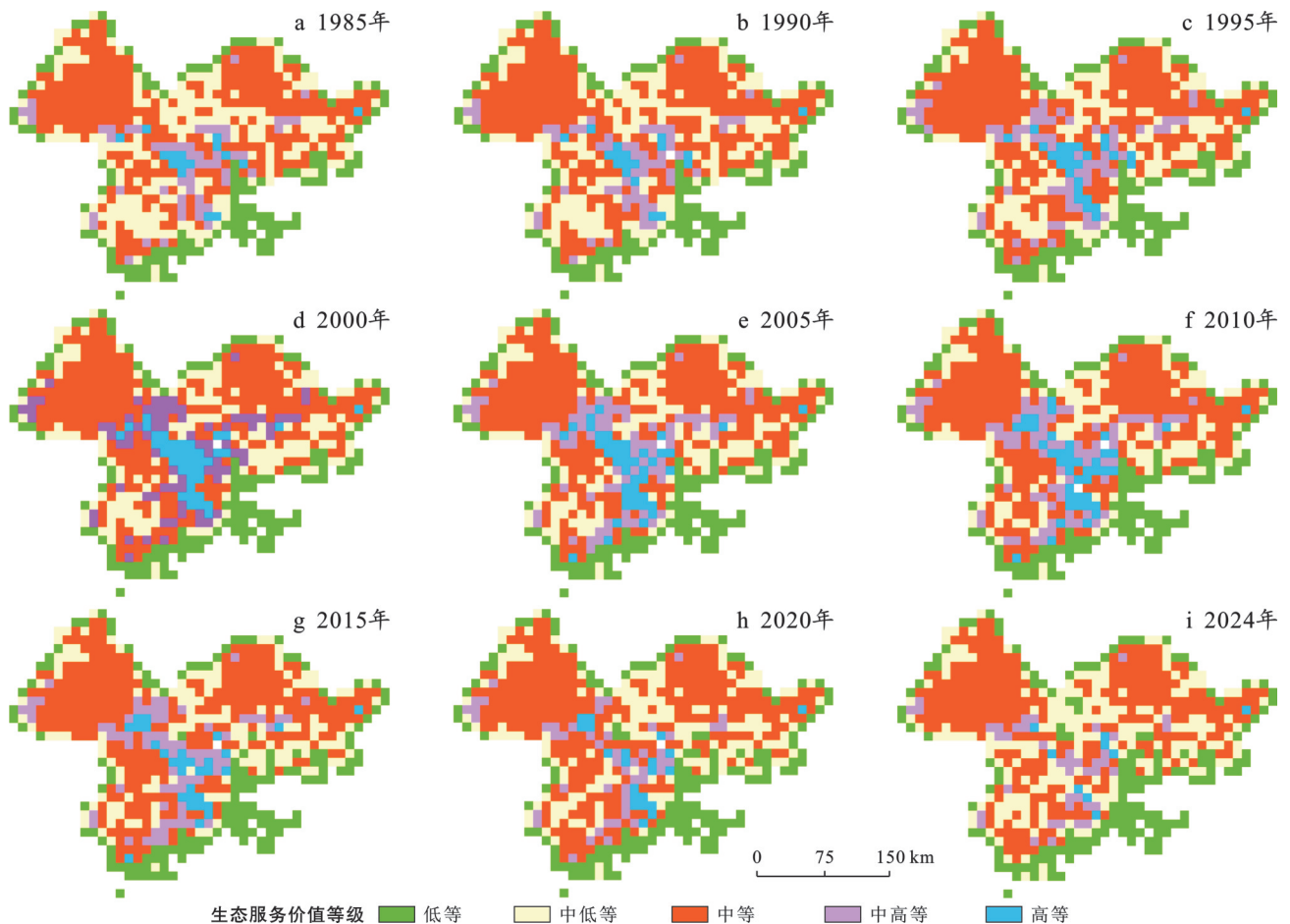


图 4 1985—2024 年珠三角 ESV 空间分布
Fig.4 Spatial distribution of ESV in Pearl River delta (1985—2024)

长三角地区 ESV 的空间分异格局与城市群发展结构密切相关,区域 ESV 空间异质性明显(图 5)。南部地区 ESV 以中低值为主,其空间分布与森林、草地等植被类型具有较高一致性;北部 ESV 低值区主要分布于平原区域及上海、苏锡常等城市群周边,该区

域受快速工业化与高度城市化影响,建设用地比例占比较高,生态环境质量相对较低。ESV 高值区主要集中分布于长江干流沿岸及太湖、巢湖等大型湖泊周边,形成长三角地区生态系统服务功能的核心供给区域。

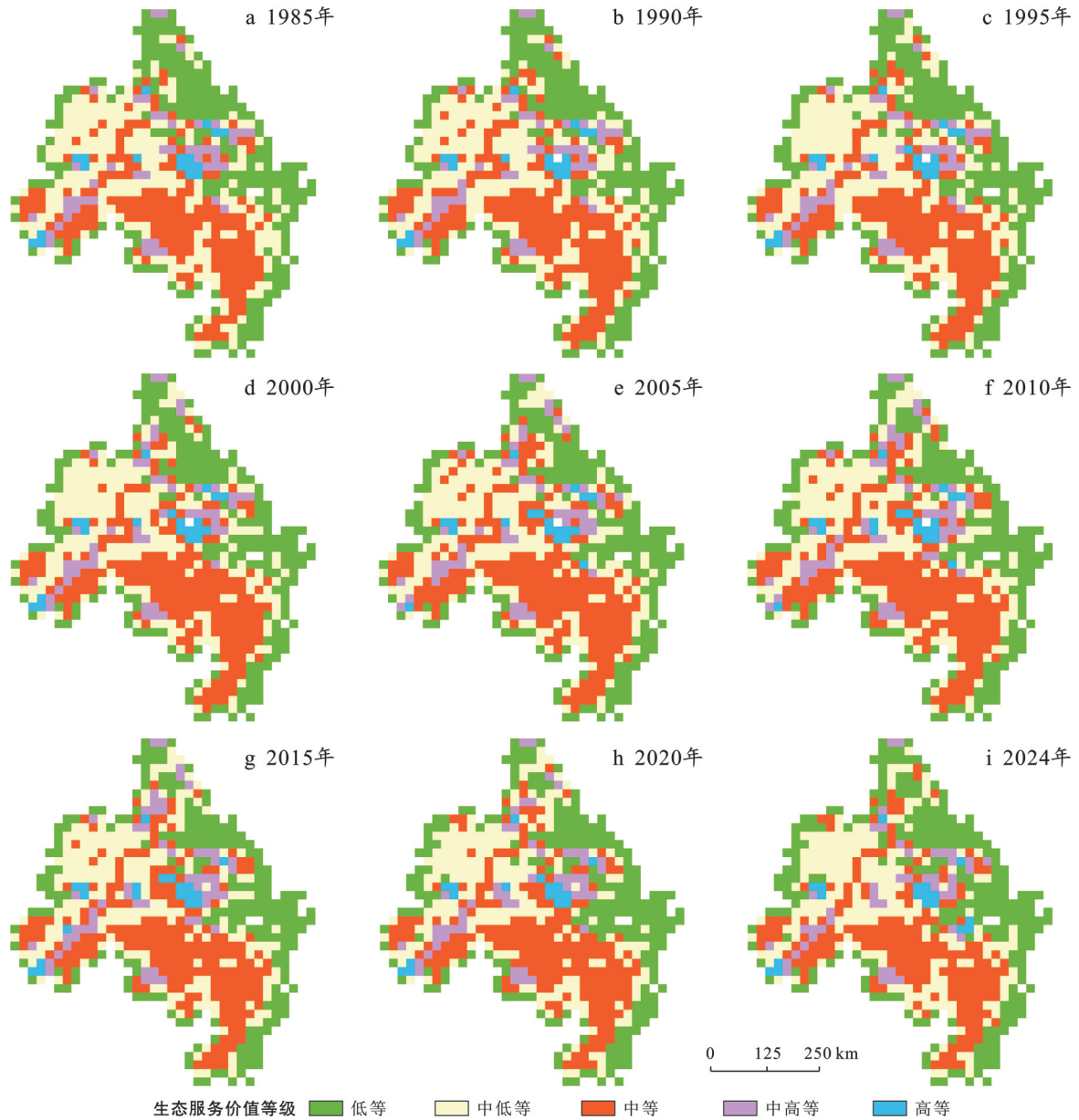


图 5 1985—2024 年长三角 ESV 空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ESV in Yangtze River delta (1985—2024)

黄三角 ESV 空间分异特征显著,整体呈现由核心区向周边区域递增的分布格局(图 6)。高值区主要集中于黄河入海口湿地生态系统及国家级自然保护区范围内,低值区广泛分布于三角洲冲积平原及盐碱土区域。受黄河水沙转移与河口演变的影响,该区域生态环境表现出明显的脆弱性特征。近年来,通过推进黄河口国家公园建设、滨海湿地生态修

复及盐碱地生态治理等系统性工程,区域生态系统服务功能得到有效提升。然而,黄三角 ESV 总量仍显著低于珠三角和长三角地区。

3.3 城镇化与 ESV 相关性分析

3.3.1 全局空间自相关

1995—2020 年全球 Moran's *I* 变化表明(表 6),三大三角洲综合城镇化水平均呈现显著的空间正相

关($Moran's I > 0$),反映出城镇化过程在空间上具有明显的集聚特征。其中,珠三角城镇化的空间集聚程度最高,其 $Moran's I$ 值由 1995 年的 0.805 8 波动上升至 2020 年的 0.843 4,整体维持在较高水平。长三角城镇化的空间关联性呈波动增强趋势, $Moran's I$ 值从 1995 年的 0.628 2 上升至 2015 年的 0.704 7,2020 年降至 0.667 7,这种变化特征可能与区域多中心协

同发展战略的推进有关。黄三角城镇化空间集聚程度在研究期间逐步提升, $Moran's I$ 值由 1995 年的 0.586 5 上升至 2015 年的 0.701 8,2020 年回落至 0.690 9。

总体来看,区域城镇化空间格局的演变既受内部发展动力的驱动,也受到区域政策与生态条件综合调控作用的影响。

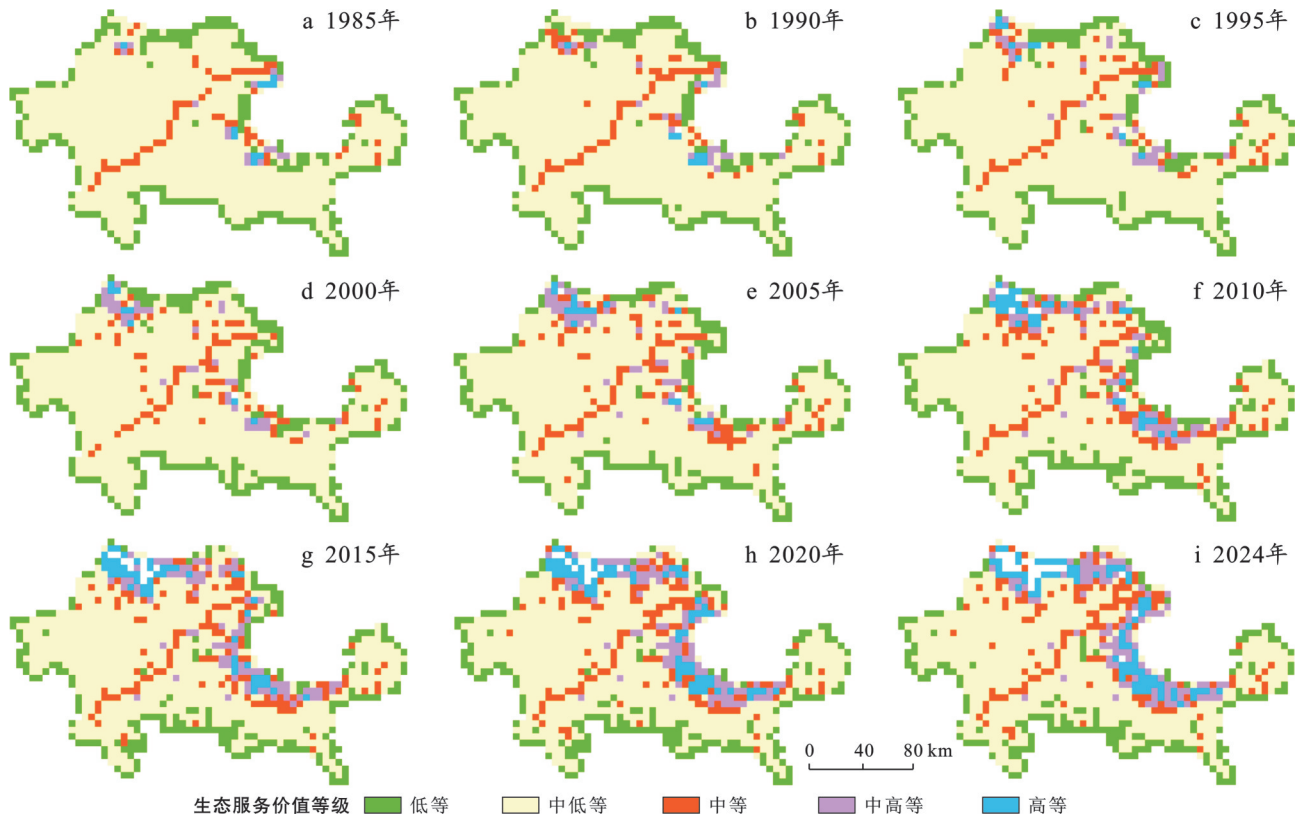


图 6 1985—2024 年黄三角 ESV 空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ESV in Yellow River delta (1985—2024)

表 6 1995—2020 年三角洲综合城镇化的全局 $Moran's I$ 变化

Table 6 Changes in Global $Moran's I$ of comprehensive urbanization in deltas (1995—2020)

年份	全局 $Moran's I$		
	珠三角	长三角	黄三角
1995	0.805 8	0.628 2	0.586 5
2000	0.839 8	0.590 1	0.583 2
2005	0.865 5	0.675 5	0.634 9
2010	0.859 1	0.710 6	0.635 4
2015	0.850 9	0.704 7	0.701 8
2020	0.843 4	0.667 7	0.690 9

由表 7 可知,1995—2000 年珠三角与长三角 ESV 呈现显著的空间正相关性($Moran's I > 0$),黄三角则表现出空间负相关特征($Moran's I < 0$)。时序变化分析表明,珠三角 ESV 的空间集聚性呈波动增强趋势,其 $Moran's I$ 指数由 2000 年的 0.046 9 上升至

2015 年的 0.073 5,2020 年回落至 0.022 5;长三角 ESV 的空间关联性呈现先增后减的演变特征,2000—2010 年 $Moran's I$ 值由 0.011 9 上升至 0.047 3,2020 年下降至 0.000 4,该变化趋势可能与区域一体化政策推动下的空间均衡发展有关;黄三角 ESV 的空间异质性持续增强, $Moran's I$ 值始终为负值,2010 年达到最低值(-0.204 3),主要受河口湿地修复工程的点状分布格局和油气资源分散开发的影响。因此,珠三角与长三角 ESV 空间格局演变由政策调控与经济转型双重驱动,而黄三角 ESV 空间格局主要受自然地理条件与资源开发布局的刚性制约。

3.3.2 局部空间自相关

研究结果表明,典型河口三角洲 ESV 网络单元的空间集聚特征主要表现为高城镇化-高价值、高城镇化-低价值、低城镇化-低价值和低城镇化-高价值

4 种类型。由图 7 可知,1995—2020 年珠三角 ESV 空间格局具有显著的时空异质性。其中,高城镇化-高价值型主要分布于广州与深圳的核心区域,其较高 ESV 得益于城镇化进程中同步推进的生态建设措施;高城镇化-低价值型集中于工业化和城市快速扩展区域,高强度土地开发导致 ESV 明显下降;低城镇化-低价值型多见于区域边缘地带,因生态保护力度不足,ESV 长期处于较低水平;低城镇化-高价值型集中在山地森林区,受益于自然生态系统的完整保护。1995—2010 年,高城镇化-高价值型呈现向外围扩展的趋势,低城镇化-低价值型范围有所缩减,而低城镇化-高价值型相对稳定;2010—2020 年,高城镇

化-高价值型相对稳定,低城镇化-低价值型进一步收缩,同时低城镇化-高价值型区域显著减小。

表 7 1995—2020 年三角洲 ESV 的全局 Moran's I 变化
Table 7 Changes in global Moran's I of ESV in deltas (1995—2020)

年份	全局 Moran's I		
	珠三角	长三角	黄三角
1995	0.047 4	0.027 7	-0.173 6
2000	0.046 9	0.011 9	-0.164 2
2005	0.036 9	0.024 2	-0.125 6
2010	0.057 5	0.047 3	-0.204 3
2015	0.073 5	0.032 1	-0.128 0
2020	0.022 5	0.000 4	-0.121 6

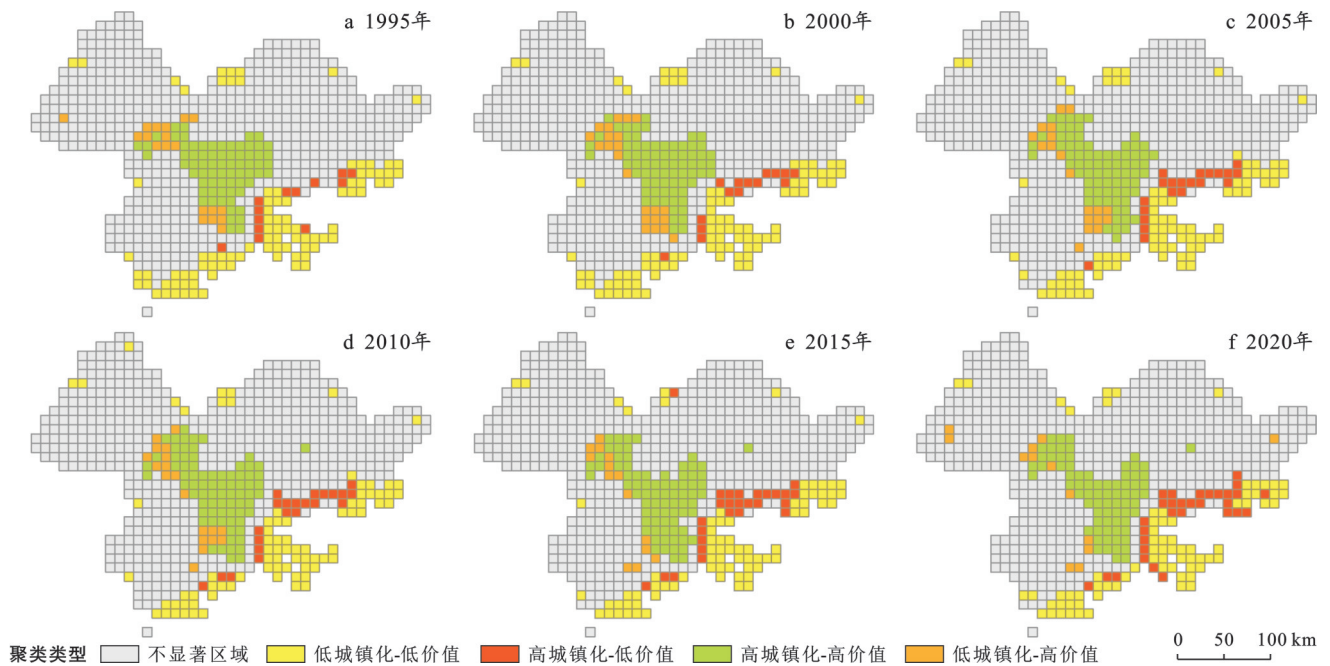


图 7 1995—2020 年珠三角城镇化与 ESV 聚类分析

Fig.7 Cluster analysis of urbanization and ESV in Pearl River delta (1995—2020)

1995—2020 年,长三角地区高城镇化-高价值与高城镇化-低价值区面积占比显著上升,而低城镇化-高价值区面积占比呈明显下降趋势(图 8)。低城镇化-低价值区主要分布于苏北及浙南部分地区,该区域城市化进程相对缓慢,尽管生态本底条件优良,但 ESV 总体偏低;低城镇化-高价值区集中分布于浙西山区与苏中丘陵地带,具有优越的自然资源禀赋和较高的 ESV;高城镇化-低价值区高度集中于城市群核心区域(上海、南京及杭州中心城区),呈现高强度城镇化特征,建设用地快速扩张导致生态空间持续缩小;高城镇化-高价值区呈离散状,分布于核心城市外围(如上海郊区、南京近郊等地),通过实施系统性生态保护措施,有效维持了较高的生态服务水平。

黄三角 ESV 的高城镇化-高价值区主要分布于研究区北部及东北部,低城镇化-低价值区集中于南

部及西部边缘区域(图 9)。1995—2020 年,高城镇化-高价值区呈现显著的空间扩张态势,低城镇化-低价值区范围持续收缩,表明城镇化过程对 ESV 的负面影响趋于缓解。此外,低城镇化-高价值区稳定分布于黄河口国家级自然保护区范围内,并表现出明显的空间扩展特征;高城镇化-低价值区主要集中于东营市河口区、滨州港等工业集聚区,其空间分布与油气资源开发强度及盐田扩张密切相关,2010 年后该类型范围呈下降趋势。黄三角 ESV 空间分异格局受资源开发与生态补偿政策的共同驱动。未来应统筹协调盐碱地资源开发与湿地生态系统保护之间的矛盾关系,积极推进生态产业化发展路径,同时强化河口地区韧性景观规划,应对全球气候变化导致的海平面上升风险,为资源型三角洲区域可持续发展提供科学依据与实践参考。

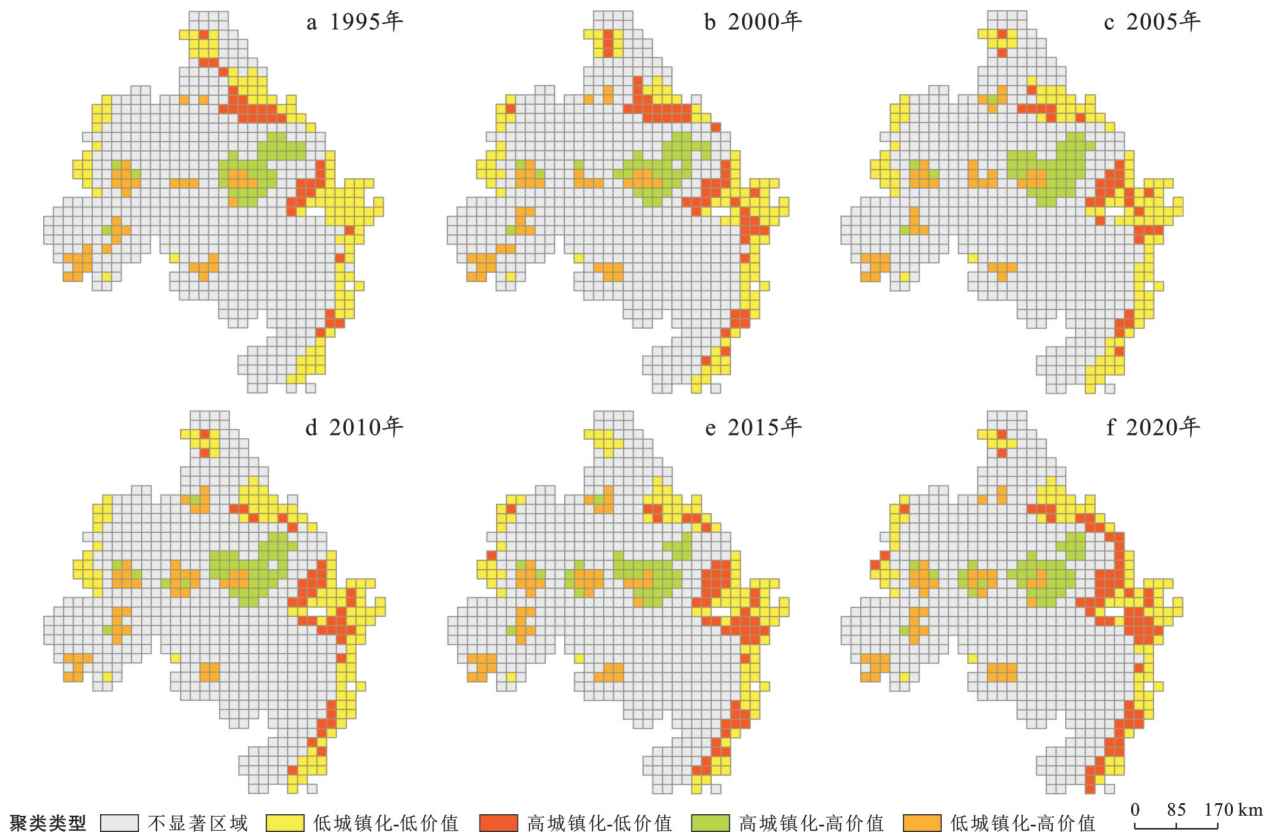


图8 1995—2020年长三角城镇化与ESV聚类分析

Fig.8 Cluster analysis of urbanization and ESV in Yangtze River delta (1995—2020)

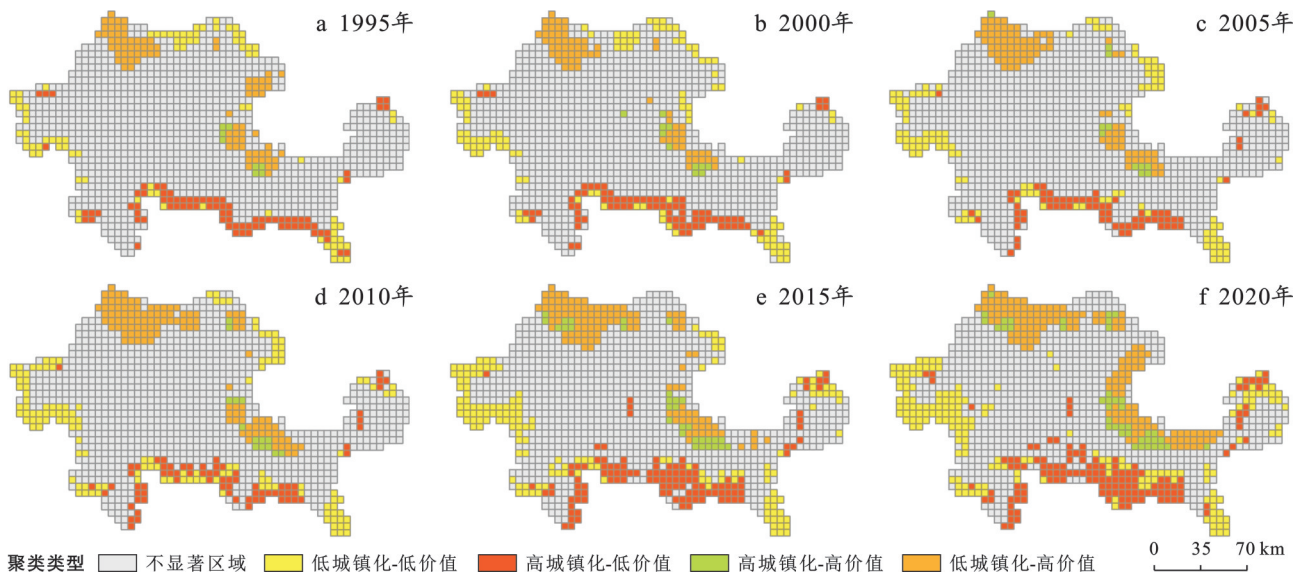


图9 1995—2020年黄三角城镇化与ESV聚类分析

Fig.9 Cluster analysis of urbanization and ESV in Yellow River delta (1995—2020)

4 结论

(1) 珠三角地区城镇化进程迅速,形成了以广州、深圳和东莞都市区为核心,向东西两翼拓展的“单核双翼”空间结构。该区域ESV在时间上呈现先增后减的演变趋势,在空间上呈现西南高、东北低的分布格局。

(2) 长三角地区经济社会发展水平较高,展现出“核心-圈层-轴带”的空间组织模式,其区域ESV空间异质性明显。

(3) 黄三角地区生态本底脆弱,城镇化与ESV的空间负相关特征显著。该区域高城镇化-高价值区主要分布于研究区北部及东北部,低城镇化-低价值区集中于南部及西部边缘地带。

5 展望

受自然地理本底条件与社会经济发展阶段差异的影响,中国典型河口三角洲区域城镇化水平持续提升,ESV总体呈波动下降趋势;城镇化对生态系统产生的胁迫效应及其转型路径呈现显著的空间异质性。尽管珠三角的城镇化与ESV空间集聚程度最高,但仍需优化国土空间开发格局,构建跨区域生态协同治理体系,以实现经济发展与生态保护的动态平衡;长三角城镇化与ESV呈现显著非线性耦合关系,建议在区域协同发展战略框架下,完善生态空间分区管控制度,全面提升生态系统服务功能;黄三角地区城镇化与ESV空间分异格局受到资源开发与生态补偿政策的共同驱动,导致资源开发与生态保护矛盾突出,亟需建立生态产品价值实现机制,增强河口湿地生态系统对全球气候变化的适应性与韧性。

本研究揭示了典型河口三角洲ESV的时空分异特征,阐释了城镇化与生态系统服务的关联机制,为理解三角洲地区城镇化的生态效应提供了依据。但受数据可获取性与宏观尺度可比性限制,人口密度指标在反映人口城镇化的多维属性(如户籍结构、生活方式及非农人口比例)方面尚存局限。此外,多期数据整合中虽有部分年份缺失导致分析时段划分存在差异,但研究结果仍较为清晰地呈现了ESV的长期演变规律。未来可借助日益丰富的多源数据,在多时空尺度下深入解析生态系统服务的空间流转与跨区域交互机制,以支撑区域可持续发展决策。随着人工智能与对地观测技术的发展,模型与监测能力的提升有助于更精准地量化人类活动对生态的影响,为三角洲及更广区域生态系统管理提供科学支持。

参考文献 (References)

- [1] 李源,李发祥,梁金水,等.滨海城市土地利用变化对陆地生态系统服务价值与储碳的影响:以辽宁省大连市为例[J].水土保持通报,2023,43(5):330-342.
Li Yuan, Li Faxiang, Liang Jinshui, et al. Effects of land use change on terrestrial ecosystem service value and carbon storage: A case study in Dalian City, Liaoning Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):330-342.
- [2] 万世龙,杨海楠,马丽,等.黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化权衡协同关系[J].资源科学,2024,46(3):505-523.
Wan Shilong, Yang Hainan, Ma Li, et al. Trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization in the Yellow River basin urban agglomeration [J]. Resources Science, 2024,46(3):505-523.
- [3] 王世豪,黄麟,徐新良,等.特大城市群生态空间及其生态承载状态的时空分异[J].地理学报,2022,77(1):164-181.
Wang Shihao, Huang Lin, Xu Xinliang, et al. Spatio-temporal variation characteristics of ecological space and its ecological carrying status in mega-urban agglomerations [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77 (1) : 164-181.
- [4] 黄春林,孙中昶,蒋会平,等.地球大数据助力“可持续城市和社区”目标实现:进展与挑战[J].中国科学院院刊,2021,36(8):914-922.
Huang Chunlin, Sun Zhongchang, Jiang Huiping, et al. Big earth data supports sustainable cities and communities: Progress and challenges [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021,36(8):914-922.
- [5] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.
- [6] 刘永超,李加林,袁麒麟,等.中美港湾流域生态系统服务价值变化比较:以浙江象山港与佛罗里达坦帕湾为例[J].地理研究,2019,38(2):357-368.
Liu Yongchao, Li Jialin, Yuan Qixiang, et al. A comparative study on the changes of ecosystem services values in the bay basin between China and the USA: A case study on Xiangshangang Bay basin, Zhejiang and Tampa Bay basin, Florida [J]. Geographical Research, 2019,38(2):357-368.
- [7] Chen Zhuang, Li Xiaoshun, He Weikang, et al. Study on coupling and coordination relationship between urbanization and ecosystem service value in Jiangsu Province, China [J]. Land, 2024,13(2):204.
- [8] 周玲燕,李维杰,王勇,等.重庆市城镇化与生态系统健康的时空耦合特征[J].水土保持通报,2023,43(2):397-408.
Zhou Lingyan, Li Weijie, Wang Yong, et al. Spatiotemporal coupling characteristics between urbanization and ecosystem health in Chongqing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):397-408.
- [9] 王彦霞,王培安.新型城镇化视角下县域城镇化时空格局及聚集特征:以浙江省为例[J].干旱区地理,2019,42(2):423-432.
Wang Yanxia, Wang Peian. Temporal-spatial pattern and accumulation characteristics of county scale urbanization from the perspective of new-type urbanization: A case of Zhejiang Province [J]. Arid Land Geography, 2019,42(2):423-432.
- [10] 赵雪雁,杜昱璇,李花,等.黄河中游城镇化与生态系统

- 服务耦合关系的时空变化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1):131-147.
- Zhao Xueyan, Du Yuxuan, Li Hua, et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the middle Yellow River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1):131-147.
- [11] 姚志强, 陈实, 胡文海, 等. 皖江城市带生态系统服务价值演变及驱动分析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(4): 218-226.
- Yao Zhiqiang, Chen Shi, Hu Wenhai, et al. Evolution and driving analysis of ecosystem service values in the Wanjiang urban belt [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(4):218-226.
- [12] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12):4106-4118.
- Chu Lin, Zhang Xinran, Wang Tianwei, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12):4106-4118.
- [13] 王怀毅, 李忠魁. 流域生态补偿研究的演进与热点分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3):304-311.
- Wang Huaiyi, Li Zhongkui. Evolution and hotspot analysis of ecological compensation research in watersheds [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3):304-311.
- [14] 谢高地, 林智钦. 生态系统资产与服务评估核算研究[J]. 中国软科学, 2024(S1):388-393.
- Xie Gaodi, Lin Zhiqin. Study on evaluation and accounting of ecosystem assets and services [J]. *China Soft Science*, 2024(S1):388-393.
- [15] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9):249-256.
- Yao Xiaowei, Zeng Jie, Li Wangjun. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan urban agglomeration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9):249-256.
- [16] 王兆峰, 汤桂林. 长株潭城市群旅游城镇化与生态系统服务价值耦合研究[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2021, 15(5):88-97.
- Wang Zhaofeng, Tang Guilin. Coupling of spatial and temporal evolution of land ecosystem service value and tourism urbanization: A case study of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences)*, 2021, 15(5):88-97.
- [17] 翟俊, 金点点, 陈妍, 等. 黄河三角洲高效生态经济区生态变化、问题与对策[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 517-526.
- Zhai Jun, Jin Diandian, Chen Yan, et al. Ecological changes, problems and countermeasures in the high efficiency eco-economic zone of the Yellow River delta [J]. *Resources Science*, 2020, 42(3):517-526.
- [18] Du Hongyu, Zhou Fengqi, Du Hongyu, et al. Study on the layout of ecological space and the integrated management mechanism of the Yangtze River delta urban agglomeration [J]. *Land*, 2023, 12(2):294.
- [19] 廖超明, 韦媛媛, 云子恒, 等. 基于PLUS-InVEST模型的珠三角碳储量时空演变与预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1):410-420.
- Liao Chaoming, Wei Yuanyuan, Yun Ziheng, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Pearl River delta based on PLUS-InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1):410-420.
- [20] Li Lixu, Ye Fei, Li Yina, et al. A bi-objective programming model for carbon emission quota allocation: Evidence from the Pearl River delta region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205:163-178.
- [21] Zhou Ziqi. Empirical analysis of the impact of industrial convergence on the regional economy of the Yangtze River delta [J]. *SHS Web of Conferences*, 2023, 163: 01023.
- [22] 欧阳竹, 王竑晟, 来剑斌, 等. 黄河三角洲农业高质量发展新模式[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2):145-153.
- Ouyang Zhu, Wang Hongsheng, Lai Jianbin, et al. New approach of high-quality agricultural development in the Yellow River delta [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(2):145-153.
- [23] Sun Caige, Zhang Shengyong, Song Chuncheng, et al. Investigation of dynamic coupling coordination between urbanization and the eco-environment: A case study in the Pearl River delta area [J]. *Land*, 2021, 10(2):190.
- [24] 杨宜男, 李敬, 王立, 等. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响[J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1555-1571.
- Yang Yinan, Li Jing, Wang Li, et al. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River delta [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6):1555-1571.
- [25] Zhang Fan, Xu Ning, Wang Chao, et al. Multi-scale coupling analysis of urbanization and ecosystem services supply-demand budget in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(2):340-356.