

DOI: 10.20103/j.stxb.202402250391

徐彩瑶, 曹露丹, 汪婧宇, 孔凡斌, 王宁. 京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展的耦合协调研究. 生态学报, 2025, 45(3): 1137-1153.

Xu C Y, Cao L D, Wang J Y, Kong F B, Wang N. The coupling and coordination relationship between ecosystem services and economic development in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal and its contribution/obstacle factors identification. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1137-1153.

京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展的耦合协调研究

徐彩瑶¹, 曹露丹¹, 汪婧宇¹, 孔凡斌^{2,*}, 王 宁³

1 浙江农林大学浙江省乡村振兴研究院/“千万工程”研究院/经济管理学院, 杭州 311300

2 南京林业大学数字林业与绿色发展研究院/经济管理学院, 南京 210037

3 浙江大学城乡规划设计研究院有限公司, 杭州 310030

摘要: 京杭大运河承载着文化遗产传承、经济社会发展与生态系统保护及人与自然和谐共生示范样板的多重使命, 探明其生态系统服务与经济发展的内在关系及其关键影响因素, 可以为新时代京杭大运河区域创新协调发展提供科学支撑。以京杭大运河江苏段为研究区域, 综合运用 InVEST 模型、spearman 相关系数、耦合协调度模型、障碍度模型以及贡献度模型, 刻画 2001—2020 年京杭大运河江苏段生态系统服务时空分布与经济发展水平动态变化特征及其规律, 探究生态系统服务与经济发展之间的耦合协调关系特征及其贡献/障碍因素。结果表明: (1) 京杭大运河江苏段生态系统服务存在明显的空间分异性, 南北差异明显。(2) 京杭大运河江苏段生态系统服务关系的年际变化相对稳定, 除生境质量与水源涵养关系由协同转变为权衡外, 其余生态系统服务之间权衡系数逐渐减小或协同系数增大。(3) 2001—2020 年京杭大运河江苏段各县区域单元经济发展水平和生态系统服务综合水平整体变化不大, 且由北向南逐渐增加, 两极分化较为严重。2001—2020 年京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展的耦合协调关系整体呈现逐步好转的趋势, 且南段优于北段。(4) 从系统层看, 京杭大运河江苏段各区县经济发展水平和生态系统服务综合水平对生态系统服务与经济发展耦合协调关系的平均贡献度分别为 0.74 和 0.27, 平均障碍度分别为 0.69 和 0.31。从指标层看, 各区县的关键贡献因素和阻碍因素各不相同。据此提出推动生态系统服务与经济发展协同发展的政策建议。

关键词: 生态系统服务; 耦合协调; 贡献因素; 障碍因素; 京杭大运河江苏段

The coupling and coordination relationship between ecosystem services and economic development in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal and its contribution/obstacle factors identification

XU Caiyao¹, CAO Ludan¹, WANG Jingyu¹, KONG Fanbin^{2,*}, WANG Ning³

1 Rural Revitalization Academy of Zhejiang Province/Green Rural Revival Program Academy/College of Economics and Management, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

2 Institute of Digital Forestry and Green Development/College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Zhejiang University Urban-Rural Planning & Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China

Abstract: The Beijing-Hangzhou Grand Canal carries the multiple missions of cultural heritage inheritance, economic and social development and ecosystem protection, and the demonstration model of harmonious coexistence between human and nature. Exploring the internal relationship between ecosystem services and economic development and its changing rules can

基金项目: 国家社科基金重大项目 (23ZDA105)

收稿日期: 2024-02-25; 网络出版日期: 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kongfanbin@aliyun.com

provide scientific support for the innovative and coordinated development of the Beijing-Hangzhou Grand Canal region in the new era. In this paper, the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal was taken as the research area, and the InVEST model, spearman correlation coefficient, coupling coordination degree model, obstacle degree model and contribution degree model were comprehensively used to describe the spatial and temporal distribution of ecosystem services and the dynamic change characteristics and laws of economic development level, and to explore the coupling and coordination relationship between ecosystem services and economic development and its contribution/obstacle factors. The results showed that: (1) There was significant spatial differentiation in ecosystem services within the Jiangsu section of the Grand Canal, with pronounced differences between the northern and southern regions. (2) The interannual variation of ecosystem service relationship in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal was relatively stable. Except that the relationship between habitat quality and water conservation changed from a synergistic relationship to a trade-off relationship, the trade-off coefficient between other ecosystem services gradually decreased or the synergistic coefficient increased. (3) From 2001 to 2020, the economic development level and the comprehensive level of ecosystem services of each county in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal did not change much, and gradually increased spatially from north to south, and the polarization was more serious. From 2001 to 2020, the coupling and coordination relationship between ecosystem services and economic development in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal showed a gradual improvement trend, and the southern section was better than the northern section. (4) From the system layer, the average contribution degree of the economic development level and the comprehensive level of ecosystem services of the districts and counties in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal to the coupling and coordination relationship between ecosystem services and economic development was 0.74 and 0.27, respectively, and the average obstacle degree was 0.69 and 0.31, respectively. From the indicator layer, the key contribution factors and obstacle factors of each district and county were different. Based on the results, policy recommendations are proposed to promote the coordinated development of ecosystem services and economic development.

Key Words: ecosystem service; coupling and coordination; contribution factor; obstacle factor; Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

经济快速发展给人们带来高质量物质生活的同时,也带来了生态环境恶化,生物多样性减少,生态系统退化等一系列复杂的生态环境问题^[1-2]。随着人类活动对生态系统的深度干预,我国大部分地区出现生态系统服务功能退化和生物多样性锐减等问题^[3]。如何平衡经济快速发展与生态系统功能维持和提升成为备受关注的热点话题^[4]。2019年2月,国家印发《大运河文化保护传承利用规划纲要》明确大运河国家文化公园建设目标,提出要将大运河建设成山水秀丽的绿色生态带,这为更高水平促进大运河人与自然和谐共生提供有利契机。2021年7月,国家印发《大运河文化保护传承利用“十四五”实施方案》将强化生态系统保护能力作为大运河保护传承的重要任务,协同推进文化保护传承利用和生态系统服务功能提升成为新时代大运河国家文化公园建设保护的核心任务之一。由此,评估并厘清大运河区域内生态系统服务功能时空特征及其权衡/协同关系变化规律,进一步探究生态系统服务与经济发展的耦合协调关系变化规律及其贡献/障碍因素,既是科学评估大运河文化保护传承利用规划实施成效的必然要求,也是不断优化大运河文化保护传承利用实施方案的重要科学命题。

生态系统服务是指人类通过直接或间接方式从生态系统获取到的产品和服务^[5-6]。生态系统服务相关研究主要聚焦生态系统服务价值核算^[5,7]、生态系统服务供需量核算^[8-10]、生态系统服务供需关系^[11-12]、生态系统服务权衡/协同^[13-15]、生态系统服务模拟^[16-19]、生态补偿^[20-21]以及生态修复分区^[22-24]等方面。对生态系统服务进行量化评估是生态系统服务研究的基础^[25]。InVEST、CASA、ARIES及SolVES等模型^[26-27]被广泛运用于各生态系统服务评估中,但多数模型只能量化部分生态系统服务,InVEST模型则能够对不同生态

系统服务进行系统性的定量评估。生态系统服务权衡/协同关系分析旨在探究不同生态系统服务之间的关系变化特征及其规律,是正确认识生态系统服务功能变化以及科学制定生态系统服务功能保育措施的关键科学依据。既有研究大多采用相关性分析^[28]、贝叶斯网络^[29]、地理加权回归^[30]、双变量空间自相关的方法^[31—32]等方法探究生态系统服务的权衡/协同关系。以上生态系统服务相关探索为京杭大运河生态系统服务及其权衡/协同关系的量化研究奠定了理论和方法基础。

如何协调经济增长与生态系统服务能力提升之间的关系一直是可持续发展研究领域的热点。生态系统服务与经济发展的耦合协调关系能够详细反映研究区内可持续发展能力和潜力水平,两者之间保持高水平耦合协调关系有助于维持和提升生态系统服务功能以及实现生态产品价值实现效率的最大化。既有研究主要集中于城市化或经济发展水平与生态环境之间的耦合协调关系^[33—34],且大多数采用碳排放量、绿地面积、污水处理率等统计数据或引入压力-状态-响应等指标构建模型^[32]对生态环境质量进行评估,这些方法难以精确量化大尺度区域生态系统服务综合水平。目前,京杭大运河生态环境领域相关研究主要集中在运河底泥样本的重金属分布状况^[35]、城市化与生态环境关系^[36—37]、国土空间用途管制^[34]等方面,而鲜有从大运河地区经济-生态系统的视角展开研究并进行关键影响因素诊断性研究。因此,从经济-生态系统视角对生态系统服务与经济发展的耦合协调关系进行分析,厘清生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献/障碍因素是推动京杭大运河经济增长与生态系统服务能力提升协同发展的重要内容。

鉴于此,本文以京杭大运河江苏段为研究区域,综合运用 InVEST 模型、spearman 相关系数、熵权法、耦合协调度模型以及障碍度/贡献度模型,探究 2001—2020 年京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展水平长的特征变化并识别两者耦合协调关系的贡献/障碍因素。据此,进一步为推动京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展水平协同提升提出建议,为优化大运河文化保护传承利用与生态环境保护规划及打造新时代人与自然和谐共生的中国式现代化示范样板提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

京杭大运河南起杭州,北到北京,是世界上里程最长、工程最大的古代运河,也是最古老的运河之一,沟通海河、黄河、淮河、长江、钱塘江五大流域。现在的京杭大运河能够正常通航的河段是从山东济宁到浙江杭州这一段,而这一段分布在江苏省境内的比例达到 75% 以上。由此,京杭大运河江苏段成为现代京杭大运河研究的主要区域。现今大运河江苏段全长 683km,主要包括中运河、里运河和部分江南运河,流经徐州、宿迁、淮安、扬州、镇江、常州、无锡、苏州 8 个地级市中 16 个县区(无锡市区、徐州市区、沛县、新沂市、邳州市、常州市区、苏州市区、淮安市区、扬州市区、宝应县、高邮市、镇江市、丹阳市、宿迁市区、泗阳县、泗洪县),总面积为 2.1 万 km²(图 1)。京杭大运河江苏段地形以平原为主,低山、丘陵等零星分布。研究区东亚季风气候区,处亚热带和暖温带的气候过渡地带,气候温和、季风显著、雨热同季、梅雨显著。至 2020 年底,研究区内总人口已达 3460.02 万人,实现国内生产总值 40178.44 亿元,人均地区生产总值 116122 元。处理好文化遗产保护、经济社会发展与生态环境保护之间的关系,是京杭大运河国家文化公园建设和可持续发展的重要任务。因此,研究京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展的耦合协调关系及其贡献/障碍因素识别,具有全局示范意义。

1.2 数据来源

本文以 2001 年、2010 年、2020 年为研究年份,数据主要包括高程数据、土地利用数据、降水数据、人口密度数据、归一化植被指数(NDVI)数据、土壤数据、潜在蒸散发数据(Potential evapotranspiration)、碳排放数据以及各年份统计数据。其中的土地利用数据采用武汉大学 30m 土地利用数据集^[38],主要包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地,人口密度数据来源于世界人口数据库,降水数据来源于国家地球系统科学数据中心,NDVI 数据来源于中科院资源环境数据中心,高程数据来源于地理空间数据云平台,土壤数据来源于世界土壤数据库,潜在蒸散发数据来源于《全球干旱指数和潜在蒸散(ET0)气候数据库 v2》。本文均采用分辨

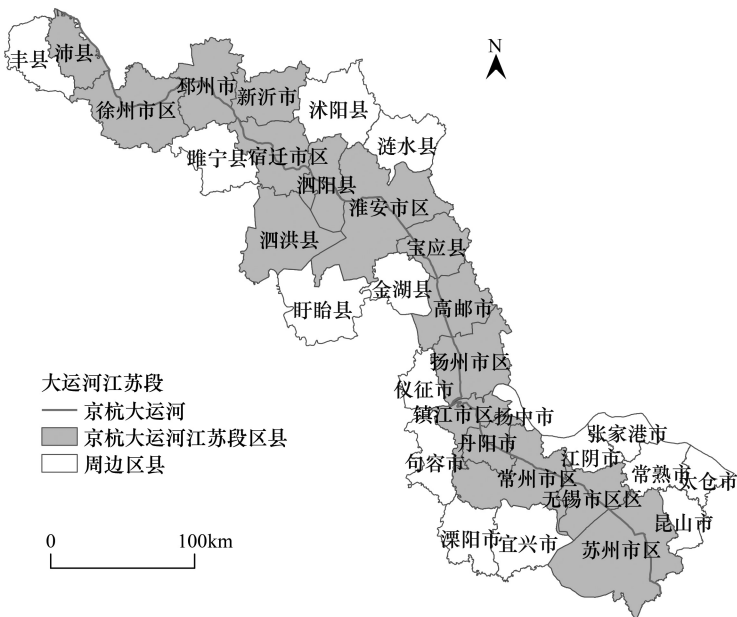


图 1 研究区区位图

Fig.1 Location map of the study area

率为 1km。

2 研究方法

2.1 生态系统服务评估方法

(1) 水源涵养服务

本文以产水量来衡量水源涵养服务。InVEST 模型可以基于气候数据、土地利用数据等多种来源计算每个网格单元的产水量,因此采用 InVEST 模型的 Water Yield 模块评估大运河江苏段产水量,公式如下^[39]:

$$R_{wx} = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right) \times P(x) \tag{1}$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \tag{2}$$

$$PET(x) = K_c(l_x) \times ET_0(x) \tag{3}$$

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \tag{4}$$

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{SoilDepth}, \text{RootDepth}) \times \text{PAWC} \tag{5}$$

式中, R_{wx} 表示栅格 x 处的年平均产水量, $P(x)$ 为栅格 x 上的年平均降水量, $AET(x)$ 为栅格 x 处的实际蒸散量; $PET(x)$ 为栅格 x 处潜在蒸散量, ω 表示自然气候土壤性质的非物理参数; $ET_0(x)$ 表示栅格 x 的参考作物蒸散, $K_c(l_x)$ 代表栅格 x 中特定土地利用/覆被类型的植物蒸散系数; $AWC(x)$ 代表栅格 x 处土壤有效含水量, Z 为经验常数,又称季节常数; $PAWC$ 为植物可利用水含量。

(2) 粮食供给服务

粮食供给服务是当地居民生活的物质基础,也是生态系统重要的供给服务。将粮食的总产量按照栅格 NDVI 值与耕地总 NDVI 值的比值来分,确定各栅格的粮食供给能力,具体公式如下^[40]:

$$S_{fx} = \frac{NDVI_x}{NDVI_{sum}} \times S_{sum} \tag{6}$$

式中, S_{fx} 为栅格 x 的粮食产量, S_{sum} 为粮食总产量, NDVI_x 为栅格 x 的 NDVI 值, NDVI_{sum} 为研究区耕地的 NDVI 值之和。

(3) 碳固存服务

利用区域总碳储量来衡量碳固存服务,具体采用 InVEST 模型对碳储量供给进行评估,主要根据土地利用分类现状,通过地上碳储量、地下根系碳储量、土壤碳储量和死亡有机物碳储量这 4 个碳库来评估区域总碳储量,公式如下^[39]:

$$S_c = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (7)$$

式中, S_c 为区域总碳储量, C_{above} 为地上碳储量, C_{below} 为地下根系碳储量, C_{soil} 为土壤碳储量, C_{dead} 为死亡有机物碳储量。

(4) 土壤保持服务

利用 InVEST 模型的土壤保持 (SDR) 模块对土壤保持进行评估,并使用修正的土壤流失通用方程对区域土壤保持量与侵蚀量进行评估。具体计算公式如下^[39]:

$$\text{SEDRET}_x = \text{RKLS}_x - \text{USLE}_x \quad (8)$$

$$\text{USLE}_x = R \times K \times LS \times C \times P \quad (9)$$

式中, SEDRET_x 为栅格 x 的土壤保持量, RKLS_x 为栅格 x 的土壤潜在侵蚀量, USLE_x 为栅格 x 的土壤实际侵蚀量; R 为降雨侵蚀因子, K 为土壤侵蚀因子, LS 为坡长-坡度因子, P 为水土保持因子, C 为植被覆盖因子, 汇流累积量阈值根据区域实际情况取 1000。

(5) 生境质量服务

利用 InVEST 模型 Habit Quality 模块对生境质量进行评估,并将建设用地、耕地、未利用地设置为威胁源,威胁因子影响范围、权重数据以及生境类型对威胁因子的敏感性为经验数据,详见参考文献^[39],计算公式如下:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{ryx} \beta_x S_{jr} \quad (10)$$

$$Q_{xj} = H_j \times \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right] \quad (11)$$

式中, D_{xj} 为生境退化度, R 为胁迫因子, r 为威胁因子, y 为威胁因子 r 的栅格数; Y_r 为 r 的一组栅格, w_r 为权重, r_y 为栅格 y 的威胁强度, i_{ryx} 为 r_y 生境栅格 x 间的干扰水平, β_x 为栅格 x 的可达性水平, S_{jr} 为 j 类型对 r 的敏感性; Q_{xj} 为 j 类土地中 x 栅格的生境质量指数, H_j 为 j 类土地的生境适宜度, D_{xj}^z 为土地类型 j 中栅格 x 的干扰水平, z 为归一化常量,通常取 2.5; k 为半饱和和常数。

(6) 生态系统服务综合水平

借助 ArcGIS 的分区统计方法提取 16 个县区 5 种生态系统服务的实物量,在对 5 种生态系统服务归一化处理后,采用熵权法测算生态系统服务综合水平 (表 1)。

表 1 生态系统服务综合水平的评价指标体系

Table 1 Index system of comprehensive level of ecosystem service

系统层 System layer	指标层 Indicator layer	指标性质 Indicator attribute	权重 Weights
生态系统服务综合水平 Comprehensive level of ecosystem services	水源涵养服务 (X1)	+	0.158
	碳固存服务 (X2)	+	0.194
	粮食供给服务 (X3)	+	0.242
	生境质量服务 (X4)	+	0.175
	土壤保持服务 (X5)	+	0.231

2.2 生态系统服务权衡/协同关系分析方法

基于京杭大运河江苏段生态系统服务分布特征,采用 ArcGIS 软件的创建随机点功能对研究区进行采样,并将 5 种生态系统服务的值赋给采样点,利用 spearman 相关系数法揭示生态系统服务之间的权衡/协同关系,并基于 R 语言平台 Hmisc 程序包进行分析。具体计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (ES_{1i} - \overline{ES_1})(ES_{2i} - \overline{ES_2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ES_{1i} - \overline{ES_1})^2 \sum_{i=1}^n (ES_{2i} - \overline{ES_2})^2}} = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{n(n^2 - 1)} \tag{12}$$

式中, ES_1 、 ES_2 分别代表两种生态系统服务, r 为两种生态系统服务之间的相关系数, d_i 代表两种生态系统服务的秩次差, n 代表样本数 22753。当 $0 < r \leq 1$ 时,说明两种生态系统服务呈协同关系,即一种生态系统服务会随着另一种生态系统服务增长而增长。当 $-1 \leq r < 0$ 时,说明两种生态系统服务呈权衡关系,即一种生态系统服务会随着另一种生态系统服务增长而减少。

2.3 经济发展水平及其空间特征分析方法

(1) 经济发展水平的评价方法

秉持指标选取可获性、科学性、系统性、代表性等原则,参考相关研究^[41-42],主要从经济规模、经济结构、经济活力三个方面构建能够综合反映经济发展水平的评价指标体系^[43-44](表 2)。在经济规模指标选取方面,人均 GDP、城乡居民人均储蓄存款及城乡结构可以从供给端、需求端及城乡结构反映一个国家或地区的总体经济规模。在经济结构指标选取方面,从第三产业增加值占 GDP 比重、非农产业就业人口比重体现经济产业结构;区域人均消费支出与全省平均消费水平比体现消费结构;区域人均 GDP 与全省人均 GDP 之比体现经济发展区域结构。在经济活力指标选取方面,人均社会消费品零售可以反映企业营业收入和利润总额增长;GDP 增长率可以反映经济总量的增长速度,直接反映经济活力;人均社会固定资产投资额可以反映社会需求增长量,从而反映经济增长活力。采用熵权法计算得到经济发展水平。

表 2 经济发展水平的评价指标体系
Table 2 Index system of economic development level

系统层 System layer	一级指标 Sub-system	二级指标 Specific indicator	指标性质 Indicator attribute	单位 Unit	权重 Weights
经济发展水平 Economic development level	经济规模	人均 GDP(X6)	+	元	0.109
		城乡居民人均储蓄存款(X7)	+	元	0.113
		人均地方财政收入(X8)	+	%	0.104
	经济结构	城乡居民可支配收入比(X9)	-	%	0.053
		第三产业增加值占 GDP 比重(X10)	+	%	0.067
		非农产业就业人口比重(X11)	+	%	0.095
		区域人均消费支出与全省平均消费水平比(X12)	+	%	0.073
		区域人均 GDP 与全省人均 GDP 之比(X13)	+	%	0.108
	经济活力	人均社会消费品零售(X14)	+	元/人	0.095
		GDP 增长率(%)(X15)	+	%	0.080
		人均社会固定资产投资额(X16)	+	元/人	0.103

(2) 经济发展水平空间特征的分析方法

用局部莫兰指数(Local Moran's I)反映京杭大运河江苏段区县经济发展水平空间相关性的总体趋势,计算公式为:

$$I_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y})^2} \sum_{i \neq j}^n W_{ij} (y_j - \bar{y}) \tag{13}$$

式中, I_i 为局部 Moran's I , n 是空间单元的个数, y_i 和 y_j 分别表示变量 y 在空间单元 i 和空间单元 j 中的观测值, $\bar{y}$ 是 y 的均值, ω_{ij} 是空间权重矩阵。局部 Moran's I 指数的取值范围不局限于 $[-1, 1]$ 。

2.4 生态系统服务与经济发展的耦合协调关系分析方法

耦合协调度是一个用来衡量系统之间协调发展程度和整体均衡性的概念, 主要关注系统之间的相互作用和依赖关系, 以及这些关系如何影响系统的性能和稳定性^[31]。为得到各区域生态系统服务与经济发展的耦合协调关系, 采用以下公式评估耦合协调度:

$$C = 2 \sqrt{\frac{f(a) \times f(\beta)}{[f(a) + f(\beta)]^2}} \quad (14)$$

$$T = af(\alpha) + bf(\beta) \quad (15)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (16)$$

式中, C 表示子系统耦合度, 取值范围为 $[0, 1]$, $f(a)$ 为生态系统服务综合水平, $f(\beta)$ 为经济发展水平。 T 表示系统综合发展指数, 其中 a 、 b 分别代表其贡献度。 本文将生态系统服务和经济发展水平视为同等重要的子系统, 因此 a 和 b 的取值相同, 均为 0.5。 D 为耦合协调度。 为了更有效地评估生态系统服务与经济发展的耦合协调关系, 在前人研究的基础^[45]上, 建立耦合协调度等级划分标准及类型(表 3)。

表 3 耦合协调度等级划分标准及类型

Table 3 The coupling coordination types and characteristic of ES and economic factors

区间 Interval	耦合类型(C) Coupling type	耦合协调类型(D) Coupling coordination degree type	子系统特征 Subsystem characteristic	协调类型 Coordination type
[0.0—0.2]	磨合阶段	初级协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	经济发展滞后型
			$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	生态系统服务滞后型
			$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展型
(0.2—0.4]	初级耦合	中级协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	经济发展滞后型
			$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	生态系统服务滞后型
			$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展型
(0.4—0.6]	中度耦合	良好协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	经济发展滞后型
			$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	生态系统服务滞后型
			$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展型
(0.6—0.8]	良好耦合	高级协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	经济发展滞后型
			$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	生态系统服务滞后型
			$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展型
(0.8—1.0]	高度耦合	完美协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	经济发展滞后型
			$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	生态系统服务滞后型
			$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展型

$f(\alpha)$: 生态系统服务综合水平 Comprehensive level of ecosystem services; $f(\beta)$: 经济发展水平 Economic development level

2.5 生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献/障碍因素诊断

识别生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献因素和障碍因素是进一步提升生态系统服务与经济发展耦合协调关系的重要前提。 本文利用贡献度模型与障碍度模型分别测试系统层与指标层的指标对生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献度与障碍度, 并根据测算结果排序以识别京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展耦合协调关系的关键贡献因素和障碍因素。

(1) 贡献度模型

$$C_{ij} = \frac{I_j \times X_{ij}}{\sum_{j=1}^{16} (I_j \times X'_{ij})} \quad (17)$$

$$X_{ij} = 1 - Z_{ij} \quad (18)$$

式中, C_{ij} 是第 i 个区县第 j 个指标对生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献度, I_j 为因子贡献度即指标的权重, Z_{ij} 为第 i 个区县第 j 个指标与目标之间的差距, 即正向单项指标与 1 差值或负向指标与 0 的差值。

(2) 障碍度模型

$$O_{ij} = \frac{I_j \times Z_{ij}}{\sum_{j=1}^{16} (I_j \times Z_{ij})} \quad (19)$$

式中, O_{ij} 是第 i 个区县第 j 个指标对生态系统服务与经济发展耦合协调关系的障碍度, I_j 为因子贡献度即指标的权重, Z_{ij} 为第 i 个区县第 j 个指标与目标之间的差距, 即正向单项指标与 1 差值或负向指标与 0 的差值。

3 结果分析

3.1 京杭大运河江苏段生态系统服务的变化特征

2001—2020 年京杭大运河江苏段生态系统服务的变化特征如图 2 所示。结果表明, 20 年间生态系统服务整体呈现下降趋势。土壤保持年际变化较小, 水源涵养不断增加, 碳固存、粮食供给以及生境质量不断减少。究其原因, 2001—2020 年研究区经济发展较快, 建设用地不断增加, 挤占耕地及生态用地, 受人类活动影响, 生态环境恶化, 生态系统功能下降, 生态系统服务供给量减少。此外, 生态系统服务存在明显的空间分异性。总体上看, 水源涵养从北向南不断增加, 粮食供给从北向南不断减少, 土壤保持和生境质量南北分布平均, 碳固存呈现西北向东南减少的格局。主要原因在于研究区内南北经济发展差异较大, 北段受人类活动干预较少, 经济较为落后, 生态环境质量较好, 耕地面积较大, 土壤保持、生境质量和粮食供给高于南段。

2001—2020 年, 京杭大运河江苏段生态系统服务权衡/协同关系的年际变化相对稳定(图 3)。具体而言, 土壤保持与生境质量一直为权衡关系, 相关系数稳定在 -0.29 到 -0.28, 即土壤保持增加的同时会导致生境质量减少。土壤保持与粮食供给保持着协同关系且系数呈现上升趋势。与此同时, 土壤保持与碳固存存在协同关系且系数稳定在 0.25—0.26 之间, 这表明此三种服务的保育和提升能够同步推进。土壤保持与水源涵养的关系在 2010 年发生转变, 从弱权衡关系变为协同关系, 且 2010 年后协同关系不断加强。生境质量与粮食供给保持着权衡关系且相关性从 -0.21 减弱到 -0.02。生境质量与碳固存关系在 2010 年发生转变, 由弱权衡关系转变为协同关系, 且 2010 年后协同关系逐步增强。生境质量与水源涵养的相关系数由 0.22 到 -0.44, 由协同关系转变为权衡关系, 关系变化的拐点发生在 2010 年左右, 且权衡关系在 2010—2020 年间不断加剧。粮食供给与碳固存服务在研究期间保持协同关系, 且相关系数在 0.55—0.65 之间。粮食供给、碳固存均与水源涵养由权衡关系转为协同关系, 2010—2020 年碳固存与水源涵养的协同关系强于粮食供给与水源涵养的协同关系。由此可见, 2010 年是生态系统服务由权衡关系转变为协同关系的关键节点。

3.2 京杭大运河江苏段经济发展水平的变化特征

2001—2020 年京杭大运河江苏段各县区经济发展水平及其一级指标的变化特征如图 4 所示。结果表明, 2001—2020 年京杭大运河江苏段各县区经济发展水平区域两极分化严重, 主要呈现“南高北低”的空间格局, 且越往南, 经济发展水平越高, 北部除去徐州市区以外各区县的经济发展水平均低于南方各区县的经济发展水平。从一级指标来看, 经济规模与经济结构占比较大, 成为决定经济发展水平的重要因素。2001—2020 年京杭大运河江苏段经济规模的发展低值主要集中在宿迁市区、泗阳县、泗洪县、淮安市区; 发展高值主要集中在苏南地区中的镇江市、常州市区以及无锡市区。2001—2020 年京杭大运河江苏段经济结构的发展低值主要集中于徐州市以及宿迁市中的区县; 发展高值主要集中在常州市区和无锡市区两地。2001—2020 年京杭大运河江苏段经济活力发展聚集较不稳定, 但也呈现发展值较低地区为苏北区域, 发展值较高地区为苏南区域。2001—2020 年无锡市区、苏州市区、常州市区及徐州市区等绝大多数区县的经济发展水平呈下降趋势, 镇江市、淮安市及丹阳市经济发展水平呈上升趋势, 无锡市区、苏州市区、常州市区、扬州市区及镇江市经济发展水平大于 0.5, 其余县区皆小于 0.5。2020 年无锡市区、扬州市区及镇江市经济发展水平分别

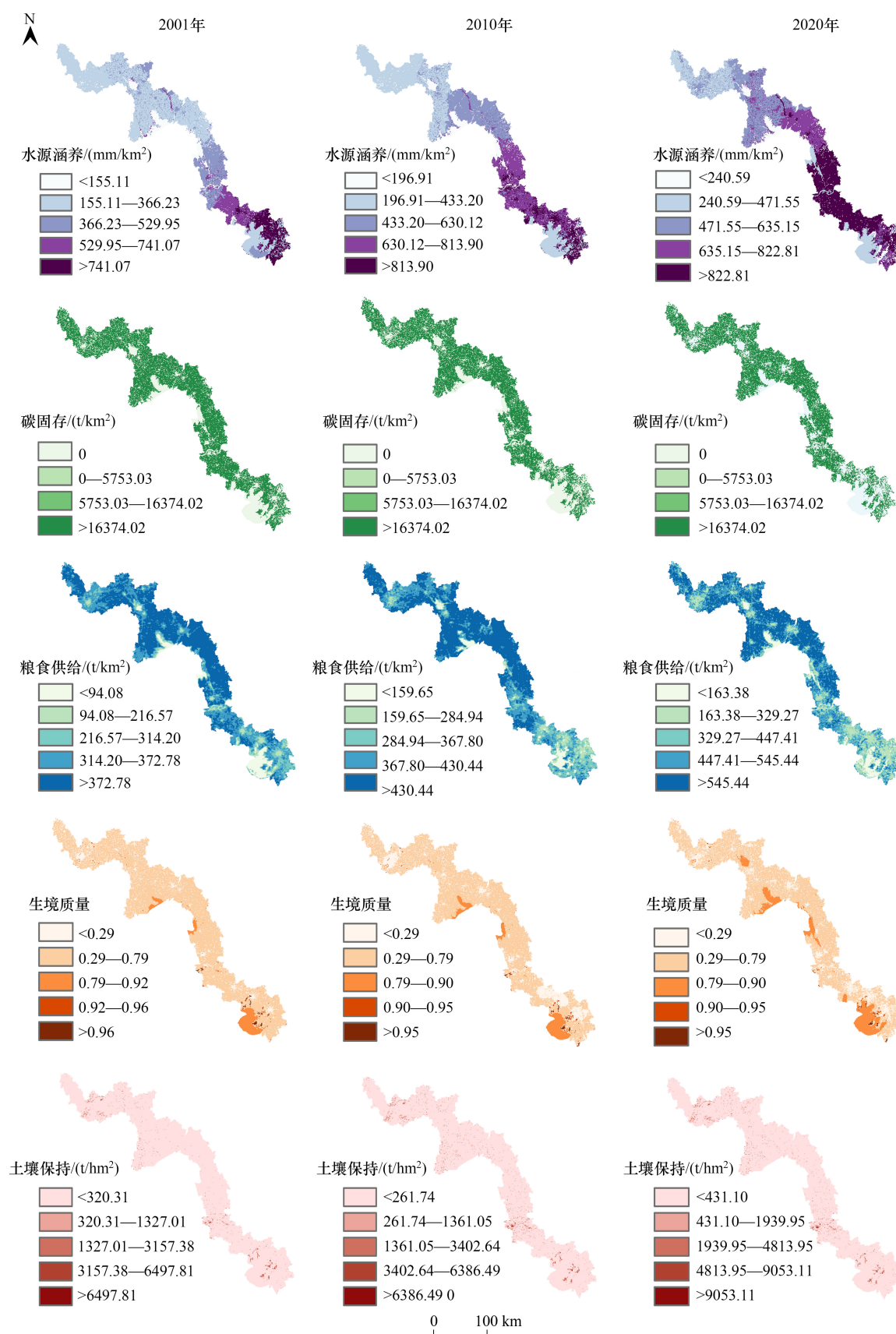


图2 2001—2020年京杭大运河江苏段生态系统服务的变化特征

Fig.2 Characteristics of ecosystem services in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal from 2001 to 2020

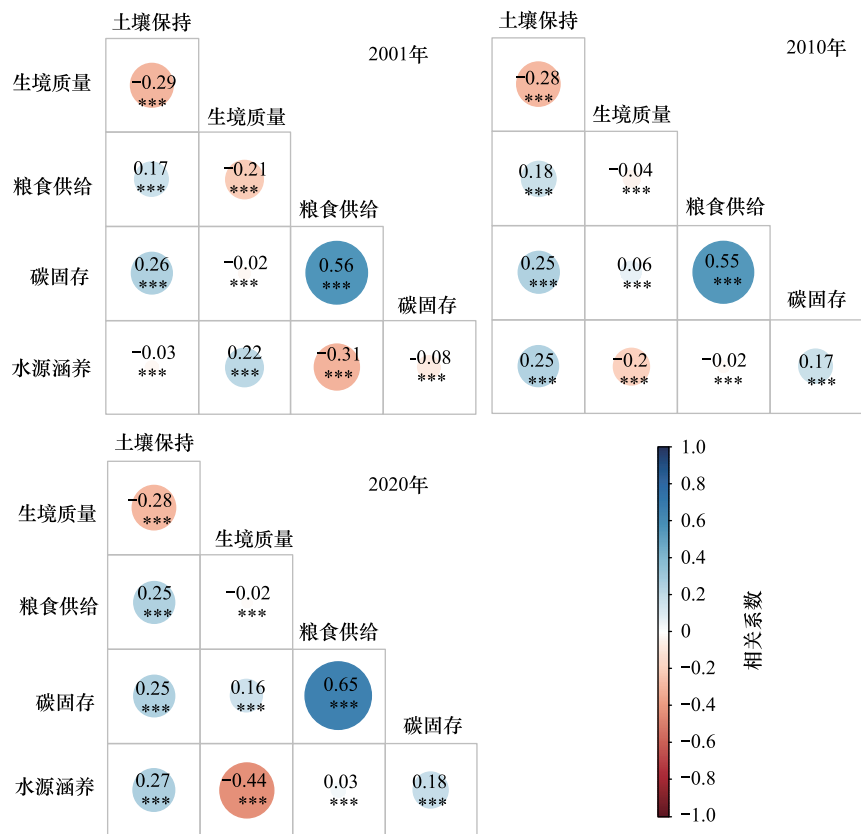


图 3 2001—2020 年京杭大运河江苏段生态系统服务权衡/协同关系

Fig.3 Trade-off/synergy relationship of ecosystem services in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal from 2001 to 2020

*、**、*** 分别表示回归系数在 10%、5%、1% 显著性水平上显著

为 0.69、0.72、0.67。邳州市、泗阳县及新沂市的经济发展水平排名最后,2020 年经济发展水平分别为 0.15、0.20、0.18。

3.3 京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展耦合协调关系的变化特征

20 年间生态系统服务与经济发展耦合协调关系类型如表 4 所示。2001—2020 年,常州市区、淮安市区、镇江市区以及泗洪县由良好协调转变为高级协调,宝应县、泗阳县由中级协调转变为良好协调,其余区县耦合协调类型均保持不变,并且苏州市区、常州市区、无锡市区以及镇江市区等位于京杭大运河江苏段南端区域的耦合协调类型为高级协调以上类型,沛县、新沂市以及邳州市等位于京杭大运河江苏段南端区域的耦合协调类型为大多为良好协调或中级协调,因此生态系统服务和经济发展耦合协调关系整体呈现逐步好转的趋势,且南段优于北段。苏州市区在 2001—2020 年间保持着完美协调,表明 20 年间苏州市区在经济发展同时注重保护生态环境,能够高水平践行“绿水青山就是金山银山”理念。2010—2020 年,徐州市区由同步发展型变为经济发展滞后型,这表明随着人与自然和谐发展以及经济高质量发展理念的提出,徐州市区放缓经济发展速度,高度重视生态系统保育,但尚未实现两者间的同步协调。无锡市区、常州市区一直处于生态系统服务滞后型,这表明其过于注重经济发展,忽视生态系统服务功能保育。新沂市、邳州市、宿迁市区及丹阳市处于良好协调状态。淮安市区、宝应县、镇江市区以及高邮市总体情况不断变好。淮安市区虽整体有所改善,但其经济发展依旧相对落后,在维持生态系统服务综合水平不减低的情况下其经济具有较大的发展潜力。镇江市区注重经济发展,需进一步关注区域生态系统与经济发展协调,及时调整发展方向。

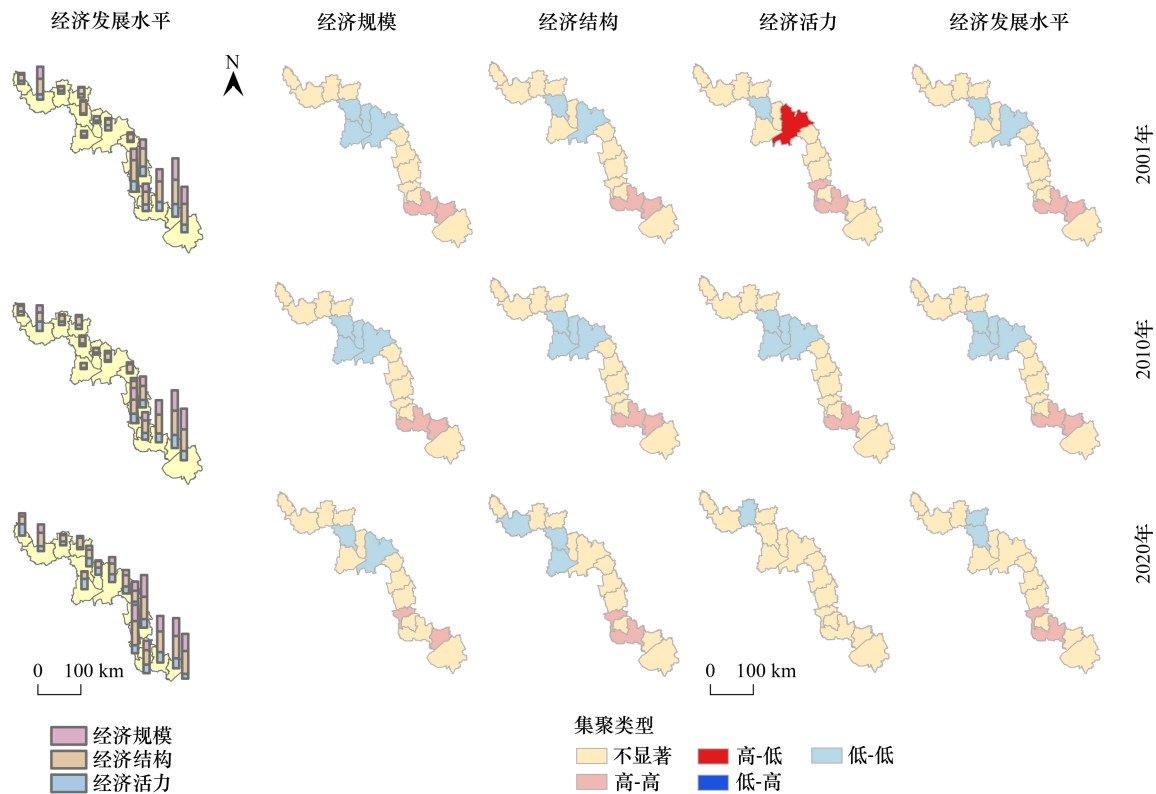


图 4 2001—2020 年京杭大运河江苏段经济发展水平变化特征与聚类图

Fig.4 The change and aggregation map of economic development level in Jiangsu section of Beijing-Hangzhou Grand Canal from 2001 to 2020

表 4 京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展耦合协调关系类型

Table 4 Types of coupling and coordination among cities in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

年份 Year	城市 City	耦合度 Coupling degree	耦合类型 Coupling type	耦合协调度 Coupling coordination degree	耦合协调类型 Coupling coordination degree type	协调类型 Coordination type
2000	无锡市区	0.853	高度耦合	0.698	高级协调	生态系统服务滞后型
	徐州市区	0.999	高度耦合	0.718	高级协调	同步发展型
	沛县	0.857	高度耦合	0.303	中级协调	生态系统服务滞后型
	新沂市	0.998	高度耦合	0.407	良好协调	同步发展型
	邳州市	0.887	高度耦合	0.430	良好协调	经济发展滞后型
	常州市区	0.905	高度耦合	0.627	良好协调	生态系统服务滞后型
	苏州市区	0.992	高度耦合	0.876	完美协调	经济发展滞后型
	淮安市区	0.867	高度耦合	0.563	良好协调	经济发展滞后型
	扬州市区	0.979	高度耦合	0.665	高级协调	生态系统服务滞后型
	宝应县	0.995	高度耦合	0.396	中级协调	同步发展型
	高邮市	0.963	高度耦合	0.462	良好协调	经济发展滞后型
	镇江市区	0.838	高度耦合	0.588	良好协调	生态系统服务滞后型
	丹阳市	0.765	良好耦合	0.436	良好协调	生态系统服务滞后型
	宿迁市区	0.989	高度耦合	0.499	良好协调	同步发展型
	泗阳县	0.993	高度耦合	0.339	中级协调	同步发展型
	泗洪县	0.767	良好耦合	0.464	良好协调	经济发展滞后型
2010	无锡市区	0.833	高度耦合	0.686	高级协调	生态系统服务滞后型

续表

年份 Year	城市 City	耦合度 Coupling degree	耦合类型 Coupling type	耦合协调度 Coupling coordination degree	耦合协调类型 Coupling coordination degree type	协调类型 Coordination type
2020	徐州市区	0.985	高度耦合	0.680	高级协调	经济发展滞后型
	沛县	0.859	高度耦合	0.311	中级协调	生态系统服务滞后型
	新沂市	0.996	高度耦合	0.441	良好协调	同步发展型
	邳州市	0.956	高度耦合	0.469	良好协调	经济发展滞后型
	常州市区	0.894	高度耦合	0.627	高级协调	生态系统服务滞后型
	苏州市区	0.998	高度耦合	0.910	完美协调	同步发展型
	淮安市区	0.813	高度耦合	0.566	良好协调	经济发展滞后型
	扬州市区	0.998	高度耦合	0.665	高级协调	同步发展型
	宝应县	0.994	高度耦合	0.430	良好协调	同步发展型
	高邮市	0.964	高度耦合	0.508	良好协调	经济发展滞后型
	镇江市区	0.943	高度耦合	0.615	高级协调	生态系统服务滞后型
	丹阳市	0.839	高度耦合	0.476	良好协调	生态系统服务滞后型
	宿迁市区	0.957	高度耦合	0.467	良好协调	经济发展滞后型
	泗阳县	0.982	高度耦合	0.351	中级协调	同步发展型
	泗洪县	0.702	良好耦合	0.471	良好协调	经济发展滞后型
	无锡市区	0.889	高度耦合	0.649	高级协调	生态系统服务滞后型
	徐州市区	0.971	高度耦合	0.686	高级协调	经济发展滞后型
	沛县	0.797	良好耦合	0.391	中级协调	生态系统服务滞后型
	新沂市	0.994	高度耦合	0.451	良好协调	同步发展型
	邳州市	0.918	高度耦合	0.485	良好协调	经济发展滞后型
	常州市区	0.893	高度耦合	0.629	高级协调	生态系统服务滞后型
	苏州市区	0.991	高度耦合	0.841	完美协调	经济发展滞后型
	淮安市区	0.951	高度耦合	0.688	高级协调	经济发展滞后型
	扬州市区	0.973	高度耦合	0.757	高级协调	生态系统服务滞后型
	宝应县	0.988	高度耦合	0.527	良好协调	同步发展型
	高邮市	0.997	高度耦合	0.615	高级协调	同步发展型
	镇江市区	0.912	高度耦合	0.657	高级协调	生态系统服务滞后型
	丹阳市	0.852	高度耦合	0.500	良好协调	生态系统服务滞后型
	宿迁市区	0.998	高度耦合	0.549	良好协调	同步发展型
	泗阳县	0.998	高度耦合	0.430	良好协调	同步发展型
	泗洪县	0.918	高度耦合	0.614	高级协调	经济发展滞后型

3.4 京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献/障碍因素识别

从系统层来看,2001—2020 年京杭大运河江苏段各区县生态系统服务综合水平与经济发展水平在生态系统服务与经济发展耦合协调关系中的平均贡献度分别为 0.27 和 0.74(图 5)。泗洪县及淮安市区的生态系统服务综合水平是生态系统服务与经济发展耦合协调关系的最大贡献者,其余区县的经济水平是生态系统服务与经济发展耦合协调关系的最大障碍者。2010—2020 年京杭大运河江苏段各区县生态系统服务综合水平与经济发展水平在生态系统服务和经济发展耦合协调关系的平均障碍度分别为 0.31 和 0.69。2010—2020 年,经济水平的障碍度均高于生态系统服务综合水平,社会系统中强烈的人类活动干扰与生态系统的脆弱性和不确定性共同影响着京杭大运河江苏段各区县生态系统服务与经济发展耦合协调发展,且社会系统中强烈的人类活动干扰对京杭大运河江苏段各区县生态系统服务与经济发展耦合协调关系影响更大。

进一步针对 2020 年生态系统服务与经济发展耦合协调关系进行指标层的贡献/障碍因素分析(图 6),结果表明,对于无锡市区,X6 的贡献值最大,X13 的阻碍值最大;对于徐州市区,X5 的贡献值最大,X12 的阻碍

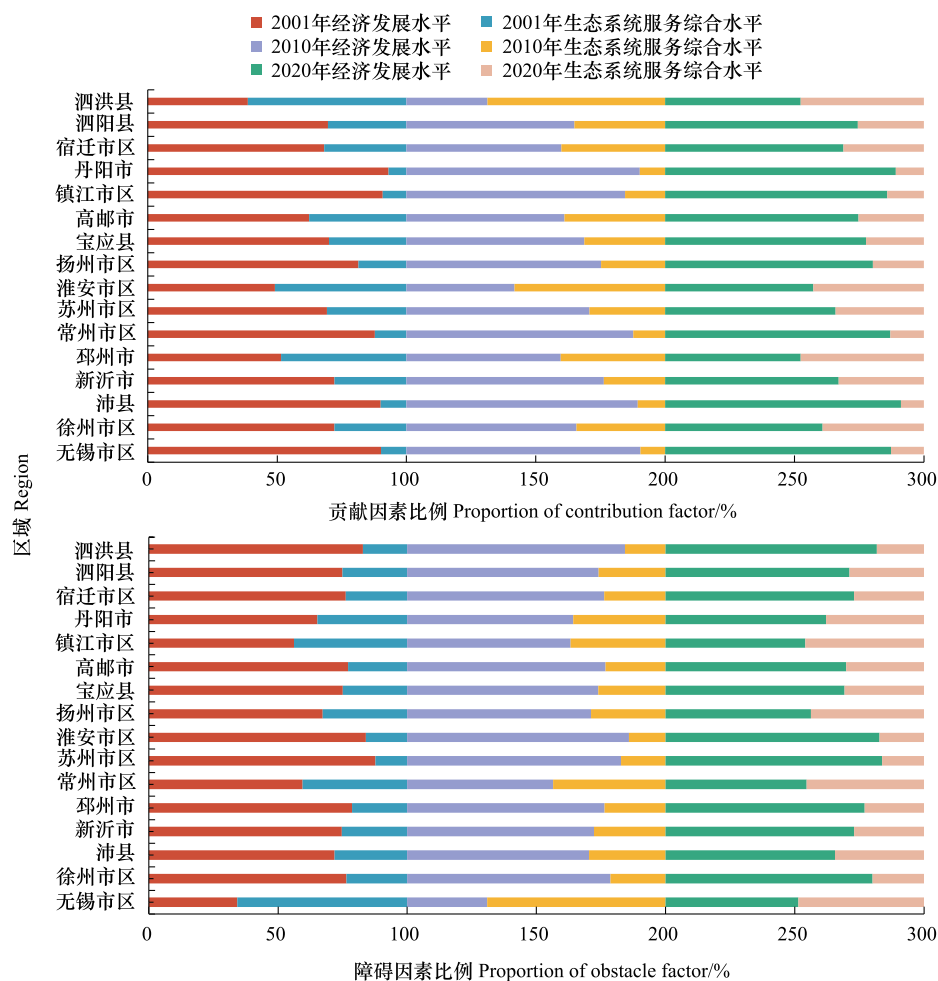


图5 2001—2020年京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展耦合协调关系系统层贡献/障碍因素

Fig.5 The contribution/obstacle factors of the system layer for the coupling and coordination relationship between the comprehensive level of ecosystem services and the level of economic development in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal from 2001 to 2020

值最大;对于沛县,X15的贡献值最大,X12的阻碍值最大;对于新沂市,X9的贡献值最大,X6的阻碍值最大;对于邳州市,X14的贡献值最大,X13的阻碍值最大;对于常州市区,X6的贡献值最大,X5的阻碍值最大;对于苏州市区,X12的贡献值最大,X15的阻碍值最大;对于淮安市区,X3的贡献值最大,X8的阻碍值最大;对于扬州市区,X8的贡献值最大,X15的阻碍值最大;对于宝应县,X15的贡献值最大,X8的阻碍值最大;对于高邮市,X15的贡献值最大,X5、X14的阻碍值最大;对于镇江市,X6、X13的贡献值最大,X3的阻碍值最大;对于丹阳市,X13的贡献值最大,X2、X3的阻碍值最大;对于宿迁市区,X14的贡献值最大,X12的阻碍值最大;对于泗阳县和泗洪县,X15的贡献值最大,X6、X13的阻碍值最大。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 2001—2020年生态系统服务总体下降,南北差异明显。其中,水源涵养服务从北向南不断增加,粮食供给服务从北向南不断减少,土壤保持服务和生境质量服务南北分布较为平均,碳固存服务呈现西北向东南减少的空间格局。

(2) 2001—2020年生态系统服务权衡/协同关系相对稳定,2010年是生态系统服务由权衡关系转变为协同关的关键节点。其中,土壤保持服务与粮食供给服务、碳固存保持协同关系,生境质量服务与粮食供给服

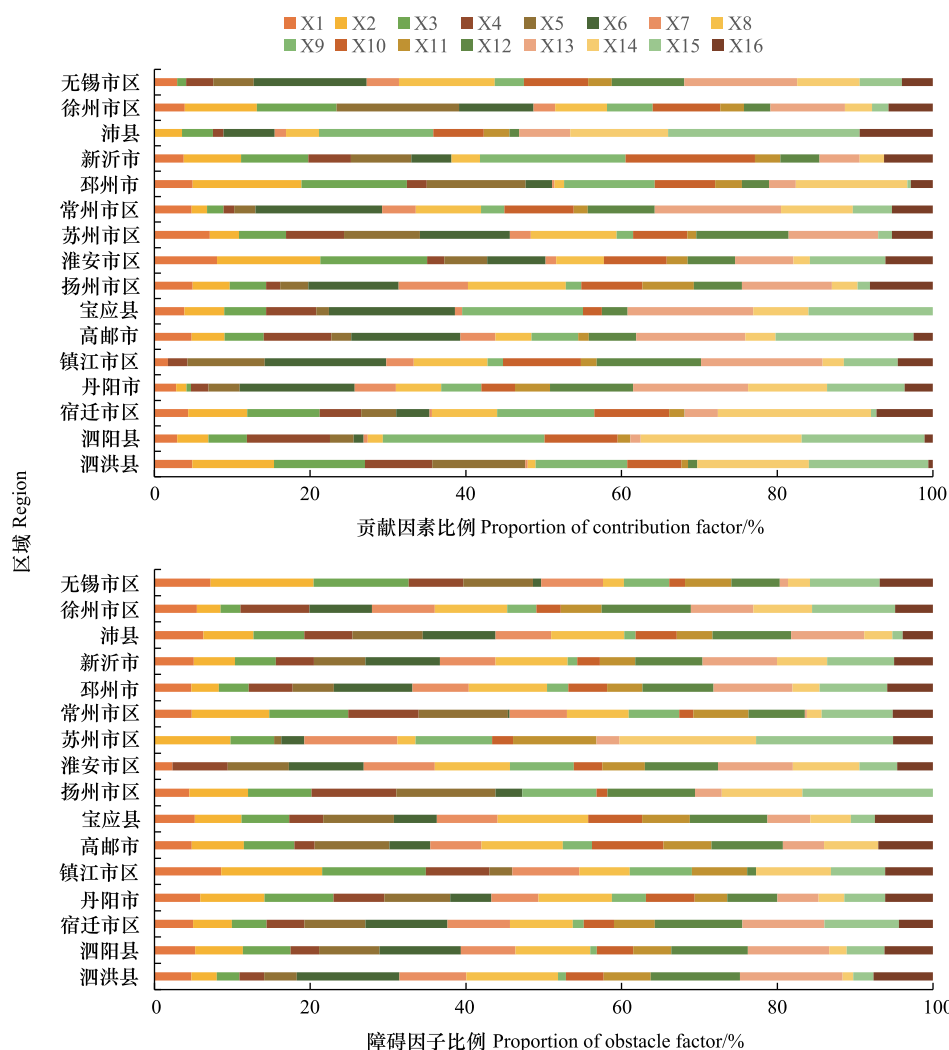


图 6 2020 年京杭大运河江苏段生态系统服务与经济发展耦合协调关系指标层贡献/障碍因素

Fig.6 The contribution/obstacle factors of the indicator layer for the coupling and coordination relationship between the comprehensive level of ecosystem services and the level of economic development in the Jiangsu section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal in 2020

X1:水源涵养服务;X2:碳固存服务;X3:粮食供给服务;X4:生境质量服务;X5:土壤保持服务;X6:人均 GDP;X7:城乡居民人均储蓄存款;X8:人均地方财政收入;X9:城乡居民人均可支配收入;X10:第三产业增加值占 GDP 比重;X11:非农产业就业人口比重;X12:区域人均消费支出与全省平均消费水平比;X13:区域人均 GDP 与全省人均 GDP 比;X14:人均社会消费品零售;X15:GDP 增长率;X16:人均社会固定资产投资额

务、土壤保持服务保持权衡关系,生境质量服务与水源涵养服务关系由协同关系转变为权衡关系,土壤保持服务与水源涵养服务之间由弱权衡关系变为协同关系,粮食供给服务与碳固存服务呈现协同关系,粮食供给服务、碳固存服务均与水源涵养服务由权衡关系转为协同关系,生境质量服务与碳固存服务关系在 2010 发生转变,由弱权衡关系转变为协同关系。

(3) 2001—2020 年经济发展水平和生态系统服务综合水平整体变化不大,由北向南逐渐增加,且两极分化较为严重。生态系统服务和经济发展耦合协调关系整体呈现逐步好转的趋势,且南段优于北段。

(4) 从系统层看,生态系统服务综合水平与经济发展水平在京杭大运河江苏段各区县生态系统服务与经济发展耦合协调关系中的平均贡献度分别为 0.27 和 0.74,平均障碍度分别为 0.31 和 0.69。从指标层看,各区县生态系统服务与经济发展耦合协调关系的最大贡献度和阻碍度因素各不相同。

4.2 建议

2001—2020 年京杭大运河江苏段各县区生态系统服务和经济发展水平呈现明显的空间分异特征,尽管生态系统服务权衡/协同关系相对稳定以及生态系统服务与经济发展耦合协调关系向好,但是生态系统服务与经济发展耦合协调关系仍未达到完美协调状态,人与自然和谐共生的实现程度还未达到最理想的水平。为此,为了推动和优化大运河文化保护传承利用与生态环境保护规划,打造新时代人与自然和谐共生的中国式现代化示范样板,提出以下建议:

(1) 鉴于生态系统服务总体下降且南北差异明显,应分区分类施策,因地制宜,推动京杭大运河江苏段生态系统服务的全面提升。针对水源涵养从北向南不断增加,一方面在北部水源涵养功能较为薄弱地区建设水源涵养林,最大限度提高区域内水源涵养功能;另一方面,在京杭大运河江苏段南部区县推动水资源集约节约产业,发展壮大节水产业新业态。针对粮食供给从北向南不断减少,在北部地区提高耕地质量,加快高标准农田建设,强化农业生产科技支撑,完善和加强耕地占补平衡制度,进一步提高粮食供给质量;在南部地区严守城市开发边界,注重农村建设用地和农用地规模与质量的提升,盘活农村建设用地存量,加强不合理用地空间腾退,严守各区县耕地红线。针对土壤保持和生境质量南北分布较为平均,各区县应秉承山水林田湖草生命共同体的理念,加强河湖湿地生态保护修复,推进大运河沿线国土空间综合整治和生态保护修复并因地制宜实施滨河防护林生态屏障工程,进一步改善区域内土壤保持和生境质量。针对碳固存由西北向东南减少,应高效利用土地,推进土地综合整治,控制建设用地的扩张强度,促进城市居住用地的集约利用,构建城市绿地系统,加强城市绿地、湿地公园和郊野公园与各类生态空间的联系,全面提升生态系统碳汇能力。

(2) 鉴于生态系统服务存在权衡/协同关系,一要针对粮食供给与水源涵养和生境质量存在权衡关系,应着眼于缓解生态系统服务间的权衡冲突,加快高标准农田建设,推进农田整治工作,提高农业资源利用效率和农业生产效率,合理配置农业空间和生态空间用地,科学布局水利灌溉工程,切实提高水资源节约利用水平,继续巩固提升农田防护林规模和质量,提高防风御寒能力,协同推动粮食安全、水资源安全和生态安全保障能力的提升。二要针对生境质量与土壤保持存在权衡关系,在生态系统综合管理过程中,要充分考虑地貌和植被覆盖等因素的影响,在低山和丘陵地带采取生物和工程措施协同土壤改良和植被修复,通过植树造林适度扩大林地规模,在保育生境质量的同事提升生态系统水土保持能力,逐步实现服务协同。三要针对生境质量与水源涵养关系由协同转变为权衡的情况,要在稳定植被覆盖规模的基础上,逐步调整和丰富植被类型,提高生态系统和生物多样性水平,增强生态系统的涵养水源功能,同时加大平原地区河湖和湿地等生态系统保护和修复力度,提升其储水保水及涵养水源能力,促进生态系统服务由局部协同走向全局协同,以科学保护和修复生态系统夯实人与自然和谐共生的物质基础。

(3) 鉴于生态系统服务和经济发展耦合协调关系的关键贡献和障碍因素各不相同,应着眼于各区县的贡献因素,不断夯实基础,持续优化,而对于障碍因子,应在社会经济发展过程中应重视对生态系统服务资源利用和处理,多方面控制人类活动对生态系统产生的负面影响。针对经济发展贡献度较大且生态系统服务贡献度与障碍度较小的区域(如无锡市区),应注重完善区域内的经济结构,并且在发展经济的同时要加大生态环境保护以及修复力度,提高生态系统服务综合水平对京杭大运河江苏段各区县生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献度。针对生态系统服务贡献度较大而经济发展贡献度与障碍度较小的区域(如淮安市区)中,要保障粮食供给对于区县生态系统服务与经济发展耦合协调关系的贡献度,并因地制宜制定契合具体治理领域和治理环节的政策,通过建立健全生态补偿机制和生态产品价值实现机制,推动山水林田湖草生态一体化保护补偿和生态产品价值一体化转化,促进生态系统服务能力优势向经济高质量发展优势的高效转变。

4.3 展望

由于生态-经济系统研究的复杂性和数据可得性的限制,本研究不可避免地存在局限性,需要在未来进一步完善。京杭大运河江苏段各县区生态系统服务和经济发展水平互动机制极为复杂,要素与系统之间存在众多的作用关系,如中介效应和时间滞后效应,需要进一步探索生态系统治理机制及其贡献/障碍因素,厘清利

益相关者之间的参与策略、博弈过程和影响因素,加深对生态-经济系统互动过程中利益相关主体的参与意识和行为激励的理解,了解其背后的体制机制,从而协同推进生态系统保护与经济高质量发展。

参考文献 (References):

- [1] Han R, Feng C C, Xu N Y, Guo L. Spatial heterogeneous relationship between ecosystem services and human disturbances: a case study in Chuandong, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137818.
- [2] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [3] Wu X, Liu S L, Zhao S, Hou X Y, Xu J W, Dong S K, Liu G H. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [4] 陈晓红, 周宏浩. 城市化与生态环境关系研究热点与前沿的图谱分析. *地理科学进展*, 2018, 37(9): 1171-1185.
- [5] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [6] Foresta. *Ecosystems and human wellbeing*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [7] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [8] Zhai T L, Wang J, Jin Z F, Qi Y, Fang Y, Liu J J. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106068.
- [9] Xu Q, Yang R, Zhuang D C, Lu Z L. Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta Region. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123849.
- [10] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [11] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. *地理研究*, 2021, 40(5): 821-838.
- [12] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [13] 王晓萌, 潘佩佩, 王晓旭, 刘苗苗, 赵倩石, 王雪然, 王新云. 基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(1): 80-88.
- [14] Howe C, Suich H, Vira B, Mace G M. Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: a meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 263-275.
- [15] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [16] 王子尧, 孟露, 李惊, 徐昉, 林箐. 低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究. *生态学报*, 2023, 43(9): 3571-3581.
- [17] 曲艺, 丁建丽, 包青岭, 王颖慧, 许梦珠. 多情景模拟下的新疆生态系统服务价值评估. *环境科学与技术*, 2023, 46(4): 195-204.
- [18] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 孙嵩松, 赵林峰, 梁迅, 曾莉. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响研究. *生态学报*, 2023, 43(11): 1-15.
- [19] 易阿岚, 孙清, 王钧. 基于 SD 模型的上海市湿地生态系统服务变化过程与情景研究. *生态学报*, 2020, 40(16): 5513-5524.
- [20] 孔凡斌, 曹露丹, 徐彩瑶. 县域碳收支核算与碳综合补偿类型分区——以钱塘江流域为例. *经济地理*, 2023, 43(3): 150-161.
- [21] 吴春生, 张鹏, 戴尔阜, 尹君. 基于生态系统服务的生态补偿政策制定探讨. *生态学报*, 2023, 43(24): 10032-10041.
- [22] 韩俊宇, 余美琪. 全域全要素统筹背景下生态安全格局识别与优化建议: 以衢州市常山县为例. *地理研究*, 2021, 40(4): 1078-1095.
- [23] 付扬军, 师学义. 基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区——以山西汾河上游为例. *自然资源学报*, 2023, 38(5): 1225-1239.
- [24] 乔斌, 曹晓云, 孙玮婕, 高雅月, 陈奇, 于红妍, 王喆, 王乃昂, 程弘毅, 王义鹏, 李甫, 周秉荣. 基于生态系统服务价值和景观生态风险的生态分区识别与优化策略——以祁连山国家公园青海片区为例. *生态学报*, 2023, 43(3): 986-1004.
- [25] 于德永, 郝蕊芳. 生态系统服务研究进展与展望. *地球科学进展*, 2020, 35(8): 804-815.
- [26] 赵琪琪, 李晶, 刘婧雅, 秦克玉, 田涛. 基于 SolVES 模型的关中-天水经济区生态系统文化服务评估. *生态学报*, 2018, 38(10): 3673-3681.
- [27] 刘美娟, 仲俊涛, 王蓓, 米文宝. 基于 InVEST 模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析. *地理科学*, 2023, 43(3): 411-422.
- [28] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. *生态学报*, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [29] 荔童, 梁小英, 张杰, 耿雨, 耿甜伟, 石金鑫. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析——以陕北黄土高原为例. *生态学报*, 2023, 43(16): 6758-6771.
- [30] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving

- factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Applied Geography*, 2019, 108: 64-73.
- [31] 邓钰栋, 王丹, 许涵. 双尺度下广东韶关市生态系统服务及其权衡/协同关系及社会生态驱动因素. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3073-3084.
- [32] 钟绍卓, 孙浩源. 不同情景下祁连山国家级自然保护区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 358-369.
- [33] 刘海龙, 王改艳, 张鹏航, 王争磊, 张丽萍. 汾河流域新型城镇化与生态韧性耦合协调时空演变及协调影响力研究. *自然资源学报*, 2024, 39(3): 640-667.
- [34] 周成, 冯学钢, 唐睿. 区域经济—生态环境—旅游产业耦合协调发展分析与预测——以长江经济带沿线各省市为例. *经济地理*, 2016, 36(3): 186-193.
- [35] 李健, 汪传胜, 吴桂松, 倪俊, 梁超, 李程飞, 李梦颖. 京杭大运河镇江段近岸土壤重金属含量与空间分布特征. *地质学刊*, 2021, 45(2): 219-224.
- [36] 孟丹, 刘玲童, 宫辉力, 李小娟, 蒋博武. 京杭大运河沿线地区城市化与生态环境耦合协调关系研究. *自然资源遥感*, 2021, 33(4): 162-172.
- [37] 葛亮, 高扬, 陆春锋, 王君櫛, 吴滢滢, 周生路. 京杭大运河江苏段沿线土地生态空间差异及响应. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 330-337.
- [38] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [39] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, Guerry A, Tallis H, Ricketts T. InVEST 3.7.0 user's guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy and World Wildlife Fund, 2018.
- [40] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [41] 丛海彬, 邹德玲, 吴福象. 中国社会经济综合发展水平时空格局演化及驱动因素. *经济地理*, 2015, 35(7): 21-29, 50.
- [42] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析. *地理学报*, 2009, 64(4): 387-398.
- [43] 史亚琪, 朱晓东, 孙翔, 李扬帆, 魏婷. 区域经济-环境复合生态系统协调发展动态评价——以连云港为例. *生态学报*, 2010, 30(15): 4119-4128.
- [44] 王伟新, 许蒋鸿, 王晓萱, 嵇乐君, 祁春节. 长江经济带现代农业-区域经济-生态环境耦合关系的时空分异. *农业现代化研究*, 2020, 41(1): 64-74.
- [45] 孔凡斌, 杨文才, 徐彩瑶. 环杭州湾城市群生态环境与社会经济耦合协调关系及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(6): 2287-2297.