

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.026.

高明惠, 李成, 赵虎. 江苏省生态系统服务供需格局与影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 315-324.

GAO Minghui, LI Cheng, ZHAO Hu. Spatiotemporal Pattern of Supply-Demand of Ecosystem Services and Influencing Factors in Jiangsu Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 315-324.

江苏省生态系统服务供需格局与影响因素

高明惠, 李成, 赵虎

(中国矿业大学 建筑与设计学院, 江苏 徐州 221000)

摘要: [目的] 探析江苏省生态系统服务的供需格局变化特征及其综合影响因素, 为区域内生态保护政策的制定和可持续管理提供科学依据和理论支撑。[方法] 基于 2005—2020 年四期土地利用数据, 探究江苏省生态系统服务供给、需求及供需匹配比及其时空演变规律, 利用地理探测器从自然和社会经济因素方面探究江苏省生态系统服务供需关系的关键影响因素, 并进一步利用地理回归模型(GWR)揭示影响因子对供需作用关系的时空分异特征。[结果] 江苏省生态系统服务供需匹配分布整体呈现江苏中部地区高, 南北低的特征, 具有一定的不均衡性; 生态系统服务供需匹配关系高一高集聚区在空间上分布于苏中地区, 且随着时间数量呈减少趋势; 低—低集聚区分布于苏南发达县/区, 且数量呈增加趋势; 基于 GWR 分析表明, 人口密度、人类影响指数、城镇化率和经济密度四项影响因素对区域内生态系统服务供需变化均有显著的负向抑制作用, 年均气温呈现两极化趋势, 且均有明显的空间异质性。[结论] 江苏省生态系统服务供需格局在空间上差异显著, 研究期内生态系统服务供需失衡压力逐渐增大, 研究区内生态系统服务供需关系的核心影响因素为人口密度、人类影响指数、城镇化率和经济密度。

关键词: 生态系统服务供需; 空间自相关; 地理探测器; 地理加权回归; 江苏省

中图分类号: X196

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0315-10

Spatiotemporal Pattern of Supply-Demand of Ecosystem Services and Influencing Factors in Jiangsu Province

GAO Minghui, LI Cheng, ZHAO Hu

(School of Architecture and Design, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221000, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the change characteristics of supply and demand pattern of ecosystem services and its comprehensive influencing factors in Jiangsu Province, which can provide scientific basis and theoretical support for the formulation and sustainable management of ecological protection policies in this region. [Methods] Based on the land use data of the four periods from 2005 to 2020, the supply, demand and their matching ratio in Jiangsu Province was explored, and the key factors influencing the supply and demand of ecosystem services in Jiangsu Province were explored from the aspects of natural and socio-economic factors by using geographic probe. Furthermore, geographical regression model (GWR) was used to reveal the spatiotemporal differentiation of the relationship between supply and demand. [Results] That the matching ratio of ecosystem services supply-demand was higher in central Jiangsu Province and lower in northern and southern Jiangsu Province. The high-high clusters of the matching ratio of supply-demand distributed in central Jiangsu Province, and the number decreased over time. Low-low clusters were located in developed counties/districts in southern Jiangsu. The GWR analysis indicated that their effects on supply-demand relationship varied spatiotemporally. Population density, human impact

收稿日期: 2022-07-10

修回日期: 2022-07-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(42001241); 江苏省社会科学基金项目(20SHD010); 江苏高校哲学社会科学研究项目课题(2020SJA1006)

第一作者: 高明惠(1998—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事区域发展与国土空间开发保护研究。E-mail: gaominghui2021@foxmail.com

通信作者: 李成(1985—), 男, 安徽省淮南人, 博士, 副教授, 主要从事区域发展与国土空间开发保护研究。E-mail: cheng.li@cumt.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

index, urbanization rate and economic density had significant negative effect. While average annual temperature had both positive and negative effects on supply-demand relationship. [Conclusion] The spatial difference of ecosystem service supply and demand pattern in Jiangsu Province was significant, and the imbalance pressure of ecosystem service supply and demand increased gradually during the study period. The core influencing factors of ecosystem service supply and demand relationship in the study area were population density, human impact index, urbanization rate and economic density.

Keywords: ecosystem services supply and demand; spatial autocorrelation; geographic detector; geographically weighted regression; Jiangsu Province

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获得的产品或服务^[1]。生态系统服务供给是特定地区提供生态系统产品和服务的能力,生态系统服务需求是指人类社会消耗或期望获得的生态系统服务数量^[2]。生态系统服务的供需平衡是区域可持续发展理论的重要组成部分,也是阐明人类社会与自然环境相互作用的关键^[3]。随着社会经济的高速发展,人类不合理地开发利用、从事大规模的建设活动,生态环境遭到破坏,而人们对于良好人居环境以及生态系统服务的需求不断增加,从而导致供需失衡,地区生态安全和可持续发展受到严重威胁^[4]。探究生态系统服务供需匹配关系对于构建区域生态安全格局和提升人类福祉具有重要意义。近年来供需关系已成为国际生态系统服务研究的热点问题。早期生态系统服务供需研究侧重于生态系统供需概念的界定与研究框架的完善,且更重视生态系统服务供给^[5];近年来主要关注生态系统服务供需量化及空间化、供需平衡、供需分区发展、因地制宜地缓解区域供需不匹配的现象等^[6-7]。目前,生态系统服务供给和需求的评估方法主要有生态模型法^[8-9]、公众参与法^[10-11]、和价值评估法^[12]等方法。通过对生态系统服务供给和需求进行量化,可以更全面地了解土地利用变化对人类生态系统服务价值的影响,以及为决策者制定可持续的政策提供参考^[13]。

生态系统服务的时空演变主要受生物物理和社会等驱动因素的影响^[14]。千年生态系统评估将这些驱动因素分为直接驱动因素和间接驱动因素^[15]。了解这些驱动因素如何影响生态系统对于提高生态系统的供应能力至关重要,确定推动生态系统服务的各种社会经济和生态因素的重要性越来越受到关注^[16]。驱动因素可能对生态系统服务产生积极或消极影响^[17]。当前围绕生态系统服务供给及其驱动因素开展了大量卓有成效的研究,许多研究表明,土地利用的范围、组成和健康状况的变化对生态系统服务供给有很大影响^[18-19]。人为因素在生态系统服务变化中也起着关键作用,包括人口结构、经济发展、技术进步和政府

政策在内的人为因素是影响生态系统服务的关键因素^[20]。但针对生态系统服务供需关系及其影响因素的研究较为薄弱,并多以相关性分析、普通多元线性回归等方法揭示关键影响因素,缺乏各因素对供需关系影响时空差异性的定量研究,难以深入揭示供需关系在多因子综合作用下的演变机理。因此,本研究在探究生态系统服务供需间匹配关系基础上,采用地理探测器与地理加权回归方法,深入探究自然和社会经济因素对供需关系的影响及其时空异质性,从而能够更准确地制定干预措施和政策。

江苏省作为中国东部沿海的经济人口大省。不仅是国家东部经济强省,也是推动长三角区域一体化发展的重点功能区。但社会经济快速发展的同时江苏省也面临区域水污染、生态本底遭到破坏等问题,直接影响着生态安全与可持续发展。本研究以江苏省为研究区,从县域尺度出发识别 2005—2020 年江苏省供给与需求基本情况,分析其时空演变特征,并利用地理探测器辨识影响生态系统服务供需格局的关键影响因子,基于 GWR(地理加权回归)模型分析关键影响因子对供需作用关系的空间异质性特征,以期为促进生态系统服务供需匹配与区域可持续发展提供理论支撑和决策依据。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

江苏省(116°21′—121°56′E, 30°45′—35°08′N)位于中国东部沿海地区,地处长江三角洲,东临黄海,地形以平原为主,气候为东亚季风气候区,省内水网密布,湖泊众多。全省总面积 10.72 万 km²。本文以江苏省县级区划为基本单元作为研究区,包括 13 个区市及 95 个县级行政单位。江苏省作为我国经济最发达的省份之一,近年来全省经济也取得飞速发展,2021 年江苏省经济总量达 11.64 万亿元,位居全国第二。社会经济的高速发展显著改变了生态系统结构,进而影响生态系统服务供给能力。同时,居民对生态系统服务的需求与日俱增,生态系统服务供需关系愈

发紧张,已成为制约可持续发展的主要因素,对居民福祉产生了一定的负面影响。

1.2 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,时段为 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年。标准当量因子生态系统服务价值核算数据来自《江苏省统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。数字高程模型(DEM),来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。气温和降水数据来源于中国气象局地逐年平均气温及降水量,通过 ArcGIS 10.2 插值提取。社会经济数据包括 2005—2020 年江苏省城乡居民人口、地区生产总值、城镇居民可支配收入、城镇化率等,来源于江苏省社会经济数据来源于《中国县域统计年鉴》以及江苏省各区县的统计年鉴。其中,社会因素中的人类影响指数是指一定区域内土地利用及景观构成总体受人类干扰的强度,参考已有研究利用 HAI 指数^[21]来计算出江苏省各县、区人类活动影响。

2 研究方法

2.1 生态系统服务供需核算

2.1.1 生态系统服务供给估算 本研究参考付光辉^[22]等前人研究修正的江苏地区的生态系统服务价值当量因子表,进一步计算以江苏省水稻、玉米和小麦 3 种粮食作物的平均产量和全国平均收购价为基本数据,经加权修正得到单位面积生态服务供给,即一个当量供给系数为 2 116.90。计算公式为:

$$E_a = \frac{1}{7} \frac{\sum (m_i \times p_i \times q_i)}{M}$$

式中: E_a 为单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值(元/hm²); i 为农作物种类; p_i 为*i*种农作物某年的全国平均价格(元/t); q_i 为*i*种农作物单位面积产量(t/hm²); m_i 为*i*种农作物种植面积(hm²); M 为所有农作物的种植面积(hm²),计算得出研究区的单位面积生态系统服务供给系数(见表 1),因建设用地的生态系统服务供给接近 0,故暂未列出。

表 1 长江经济带生态系统单位面积生态服务供给系数 元/(hm²·a)

价值分类	一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地
市场价值	供给服务	食物生产	2116.90	423.38	635.07	211.69	381.04
		原材料	211.69	2815.47	105.84	21.17	63.51
		气体调节	1058.45	7409.14	1693.52	381.04	1016.11
非市场价值	调节服务	气候调节	1884.04	5715.62	1905.21	4360.81	1143.12
		水源涵养	1270.14	6774.07	1693.52	35627.36	1016.11
		废物处理	3471.71	2773.13	2773.13	32706.05	1672.35
	支持服务	土壤形成	3090.67	8255.90	4127.95	381.04	359.87
		生物多样	1503.00	4593.66	2455.60	4487.82	1375.98
	文化	娱乐文化	21.17	1397.15	84.68	8065.37	42.34
总计			14627.75	40157.52	15474.51	86242.35	7070.43

江苏省生态系统服务总价值量计算公式如下:

$$ESV = \sum (S_{in} \times E_a \times Q_{ij})$$

式中:ESV 是生态系统服务总价值量; S_{in} 是研究区第*i*种用地类型在第*n*年的面积; E_a 为 1 个标准当量生态系统服务价值; Q_{ij} 是第*i*种土地利用类型的第*j*项生态服务功能的供给系数。

2.1.2 生态系统服务需求估算 生态系统服务需求指生态系统提供的产品和服务的消费,本研究选取生态系统服务需求指数表示研究区的生态系统服务需求,在借鉴王静^[6]研究基础上,以建设用地比例、人口密度和地均 GDP 等 3 个方面计算生态系统服务需求。计算公式如下:

$$L_i = C_i \times \lg(P_i) \times \lg(Gdp_i)$$

式中: L_i 表示第*i*个行政单元的生态系统服务需求; C_i 表示第*i*个行政单元的建设用地比例(%); p_i 表示

第*i*个行政单元的人口密度,(人/km²); Gdp_i 表示第*i*个行政单元的地均 GDP(万元/km²)。

2.2 生态系统服务供需比率

生态系统服务供需比率 ESDR (ecological supply-demand ratio)可以反映生态系统服务供给与需求的匹配关系,包括供不应求、供过于求和供需平衡 3 种关系^[23]。计算公式如下:

$$ESDR = \frac{E - L}{(E_{\max} + D_{\max})/2}$$

式中:ESDR 为生态系统服务供需比率; E 为标准化后的生态系统服务供给指数; L 为标准化后的生态系统服务需求指数。 E_{\max} 和 D_{\max} 分别是供给、需求指数的最大值。供需比 ESDR>0 表示供大于求,ESDR<0 表示供不应求,ESDR=0 表示供需平衡状态。

2.3 空间自相关分析

空间自相关是检验某种属性值空间集聚的测度

方法^[24],利用莫兰指数检验全局空间自相关和局部空间自相关。取值范围为 $[-1,1]$,莫兰指数大于0说明存在空间正相关,数值越大则空间集聚程度越强,小于0说明存在空间负相关,越小则空间离散程度越强,等于0则说明不具有空间相关性。本文借助Geoda软件来分析江苏省生态系统服务供需匹配度全局和局部的空间自相关性。

2.4 地理探测器

地理探测器由王劲峰^[25]等提出的一种空间异质性定量探测理论与方法,在复杂地理因素驱动作用机理研究上展现了较大优势^[26]。公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_i^k N_i \sigma_i^2$$

式中: N 为区域样本总数; σ 为子供需比的方差; q 为供需比分异的影响因子解释力, q 的取值范围为 $[0,1]$, q 越大,表示研究区内生态系统服务供需关系的空间异质性越强,反之,则表示空间分布的随机性越强。

2.5 地理加权回归

地理加权回归是将空间权重矩阵应用于线性回归模型中,模型系数能较好解释地理要素的空间非均质性,更好地解决空间非平稳性的问题。其计算公式为:

$$y_i = \beta_0 u_i + \sum_{j=1}^k \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i$$

式中: y_i 为第 i 个样本点的因变量值; (u_i, v_i) 是第 i

个样本点的空间地理位置坐标; $\beta_j(u_i, v_i)$ 为第 i 个样本点上的第 j 个回归参数; x_{ij} 为第 i 个样本点第 j 个自变量的值; ϵ_i 为随机误差项。

3 结果与分析

3.1 江苏省生态系统服务供需空间特征

3.1.1 生态系统服务供给空间特征 2005—2020年,江苏省各单项生态系统服务功能与生态系统服务供给量总体呈下降趋势(表2),总量减少了132.45亿元,与2005年相比,下降了5.54%。由图1可知,2005—2020年江苏省生态系统服务供给空间分布存在分异性,总供给较高是苏中和苏南地区,主要分布在盐城市、淮安市、苏州市等,生态系统服务总供给多年平均最高值为苏州市吴中区、宿迁市的泗洪县,平均值为159.13亿元和86.12亿元,其生态系统服务高值区的地区多受洪泽湖和太湖水系的影响,水源涵养价值高,植被丰富,生态功能较完善,故供给量较高。总供给较低的地区为苏北地区和江苏中下部地区,生态系统服务总供给多年平均最低值为南京市的鼓楼区 and 常州市的钟楼区,平均值为159.13亿元和86.12亿元,0.13亿元和0.23亿元,低值区多为主要为各市域的市辖区,因建设用地大量分布,林地水域面积较少,从而使得该区域生态系统服务供给较低。

表2 2005—2020 江苏省生态系统服务供给量

一级类型	二级类型	生态服务价值/亿元				变化率/%
		2005年	2010年	2015年	2020年	
供给服务	食物生产	149.965	140.142	138.315	136.766	-8.801
	原材料	24.367	22.677	22.360	22.169	-9.020
调节服务	气体调节	104.533	97.647	96.303	97.068	-7.141
	气候调节	212.812	203.082	199.641	197.671	-7.115
	水源涵养	624.082	626.242	606.182	600.864	-3.720
支持服务	废物处理	716.626	712.438	692.375	685.874	-4.291
	土壤形成	248.850	231.673	228.933	226.522	-8.972
	生物多样性	185.343	178.139	174.454	170.747	-7.875
文化服务	娱乐文化	122.295	124.084	119.752	118.744	-2.904
总计		2388.872	2336.124	2278.315	2256.425	-5.544

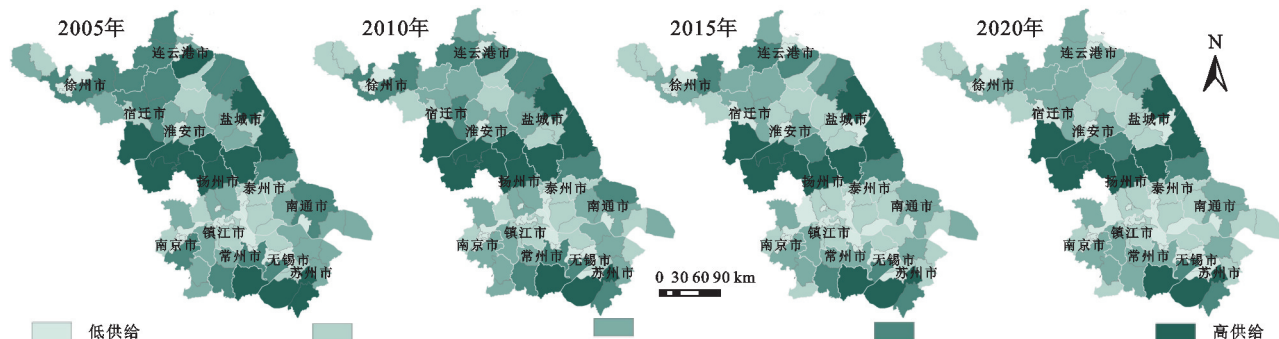


图1 2005—2020 年江苏省生态系统服务供给空间分布

3.1.2 生态系统服务需求空间特征 由图 2 可知,江苏省 2005—2020 年的生态系统服务需求指数按阶段性增加。其中苏南地区需求增长较为明显。在空间分布上江苏省同样存在明显空间异质性,其整体需求指数的空间分布呈现“点—轴”形态扩散,江苏省的需求指数由各市辖区从高向低辐射。需求指数较低的地区为盐城市、淮安市等苏州中部地区,具体表现为:高需求值主要分布在经济和社会高速发展的苏

南地区。需求指数位列前三的地区为南京、无锡、常州的城市的市辖区,其生态系统服务需求指数分别鼓楼区 21.65,梁溪区 18.35,钟楼区 15.50,以上地区的区域经济社会发展水平高、人口密集,生态系统服务需求高。低需求值主要分布在苏中地区,其中盐城市大丰区和南通市如东县需求值最低,为 0.34,0.43,土地的开发程度明显不足,社会经济各项指标均远低于平均值。

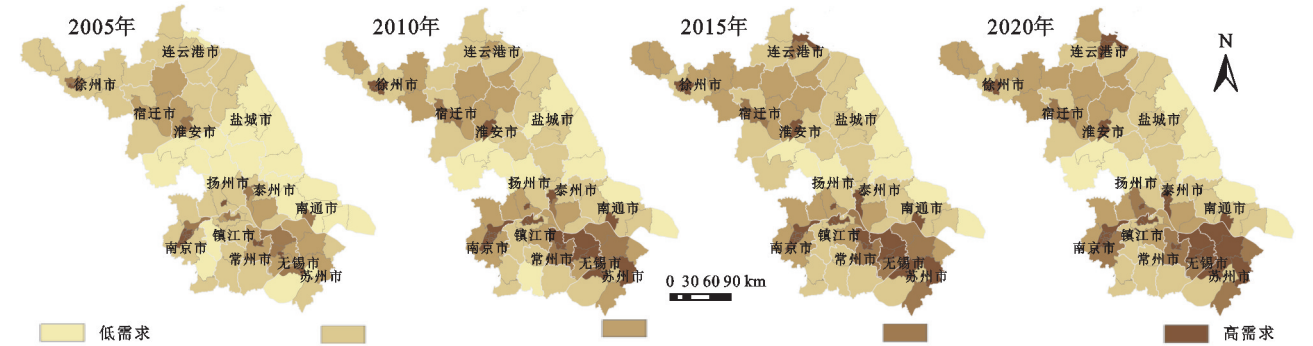


图 2 2005—2020 年江苏省生态系统服务需求空间分布

3.2 江苏省生态系统服务供需关系时空格局

如图 3 所示,2005—2020 年江苏省生态系统服务供需指数分布整体呈现江苏中部地区高,南北低的趋势,具有一定的不均衡性。在 2005—2020 年,随着苏南地区的社会经济发展,包括南京、无锡、常州等市辖区供需赤字状况逐年向周边地区扩张,除泰州兴化、扬州高邮等 7 个县的生态系统服务供需匹配比增加,其余区县的供需匹配比均呈降低趋势。在空间分布上,供需盈余区主要分布在徐州、宿迁等苏北地区和泰州、镇江市等区域。江苏省南部地区南京市、镇江市、无锡市等多个市区的生态系统服务供需指数较低,部分区域处于负值,这些区域建设用地面积大,使得生态系统服务供给不能满足人类需求的增长,表现为生态系统服务赤字。江苏省中部地区水系较多,生

态环境较好的苏州、淮安、盐城等地,由于单位面积水域供给系数较高且人口分布相对较少,生态系统服务供需指数较高,表现为生态系统服务盈余,但随着时间的推移,生态系统服务供需指数也逐步降低。

在分析了江苏省生态系统服务供需时空变化的基础上,运用 Geoda 分析江苏省生态系统服务供需匹配空间自相关性。2005—2020 年的莫兰指数分别为 0.409,0.398,0.400,0.402。Z 值分别为 5.185,5.004,5.011,5.030。莫兰指数均为正数表明在研究期间生态系统服务供需匹配存在空间正相关,空间集聚较显著。2005—2010 年莫兰指数有所降低,反映出相邻县域的生态系统服务供需度集聚性减弱。2010—2020 年莫兰指数持续增长,反映出区域生态系统服务供需空间集聚性持续增强。

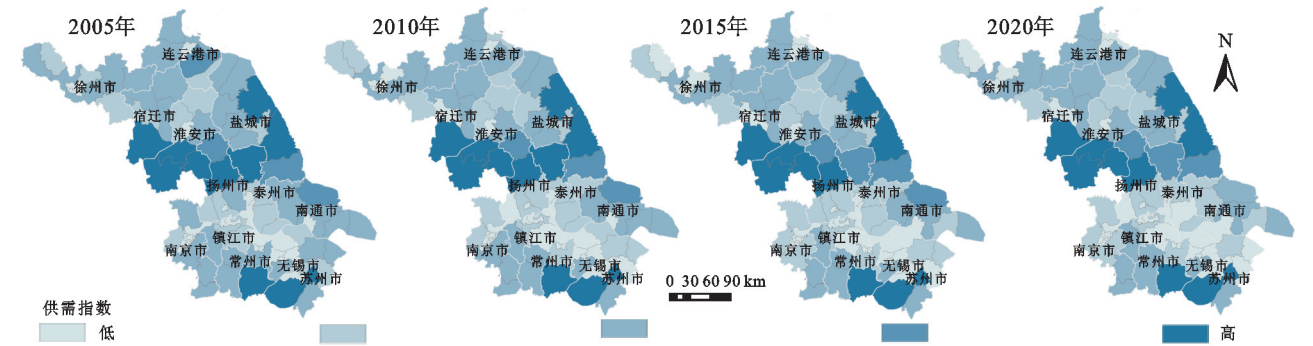


图 3 2005—2020 年江苏省生态系统服务供需匹配情况

由图 4 所示,江苏省 2005—2020 年生态系统服务供需比形成了高一高集聚、低—低集聚、低—高集聚和高—低集聚 4 种聚类分布。在时间维度上,在 2005—2020 年,高一高集聚区的数量呈现减少趋势,

低—低集聚区数量逐渐增加,表现出江苏省随着社会发展,区域生态资源的利用加剧,建设用地比例增加,区域生态系统服务供需压力逐渐增加。在空间维度上,高一高集聚区主要分布在江苏中部地

区,该区域多为生态环境较好、水系丰富、生态功能完善的生态功能区,人口密度相对较低。低—低集聚区多位于苏南经济发展迅速的市辖区,该区域人口与经济活动密集,人类需求量大,生态环境面临较大压力。

高一低集聚区主要位于苏南地区南京、镇江和苏州等大部分县区,在空间上多围绕苏南各市域的中心城区分布,表明苏南地区各城市内的供需匹配均衡发展还有待完善。

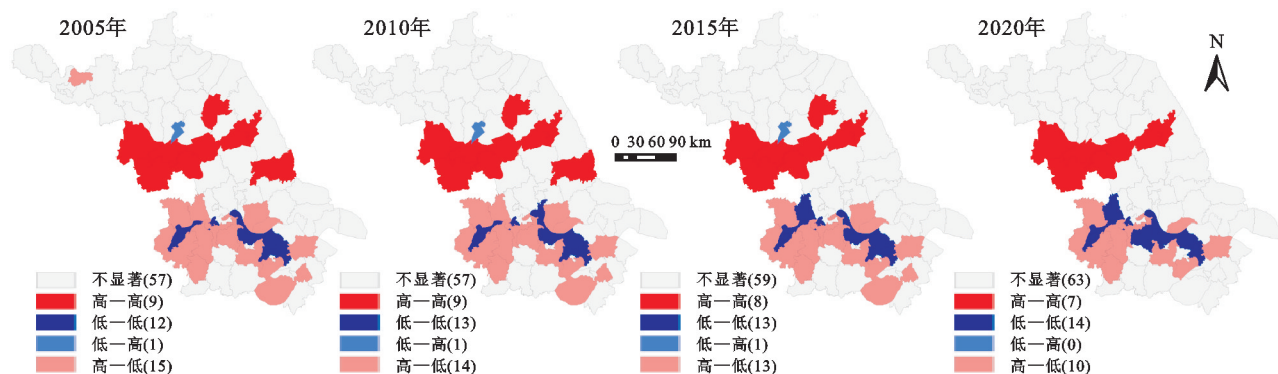


图 4 2005—2020 年生态系统服务价值的 LISA 聚类分布

3.3 江苏省生态系统服务供需关系影响因素

如表 3 所示,地理探测器的因子探测结果表明江苏省生态系统服务供需指数在时间上呈现出差异化特征。按照各个影响因素的 q 值的大小,将生态系统服务供需匹配产生影响作用的因素分为核心影响因素、次级影响因素和一般影响因素 3 个层级。核心影响因素包括的影响因子有人口密度>人类影响指数>

城镇化率>经济密度,上述因子的平均解释力高于 0.40,其中人口密度的解释力最高,平均 q 值为 0.648。次级影响因子包括坡度>年均气温>年平均降雨量,以上因子的解释力处于 0.20~0.40 之间,均为自然影响因素。一般影响因素包城镇可支配收入>人均 GDP>人均耕地面积>绿地比例>农村纯收入,上述因子的平均解释力均在 0.2 以下。

表 3 2005—2020 年江苏省自然、社会和经济因素影响因子解释力

影响因素	影响因子	2020 年	2015 年	2010 年	2005 年	平均值
自然因素	坡度	0.2535963	0.23889554	0.29800828	0.257219	0.26192978
	气温	0.21234288	0.15285692	0.35898955	0.315122	0.25982783
	降雨量	0.23563998	0.18619362	0.27043122	0.115202	0.20186670
	绿地比例	0.14246941	0.10889078	0.07774747	0.131226	0.11508341
社会因素	城镇化率	0.55653706	0.62608104	0.52352935	0.490253	0.54910011
	人口密度	0.62877273	0.69080869	0.66456684	0.608566	0.64817856
	人均耕地面积	0.13600398	0.07492624	0.1588628	0.121219	0.12275300
	人类影响指数	0.6179207	0.53204006	0.57177893	0.505716	0.55686392
经济因素	经济密度	0.47755796	0.49715253	0.37220751	0.25876	0.4014195
	人均 GDP	0.15701401	0.20943637	0.14445786	0.071875	0.1456958
	城镇可支配收入	0.18831218	0.15067217	0.17245761	0.109212	0.15516349
	农村纯收入	0.11467388	0.10594285	0.06419381	0.017112	0.07548063

总体来看(图 5),人口密度和人类影响指数是影响生态系统服务供需平衡的主要社会因子,经济密度是影响供需平衡的主要经济因子;坡度和年均气温是影响供需平衡的主要自然因子,社会经济因素对生态系统服务供需匹配的影响明显高于自然因素。在研究期间,除了坡度、年均气温影响因子的解释力 q 值呈下降趋势,其余影响因素的解释力均有不同程度的增加,其中经济密度的 q 值变化幅度最大,增加了 0.21。表明随着时间推移,经济密度对生态系统服务供需平衡的解释力显著增加。

本研究将筛选上述因子中影响力 $q > 0.2$ 的核心

和次级影响因子,并利用 GWR 模型进一步探究关键影响因子对供需匹配关系影响的时空差异。GWR 模型通过引入空间权重可对影响因子的作用关系进行较好解释,而 OLS 回归分析可能会产生较大误差。因此,本研究采用 OLS 和 GWR 模型进行综合对比分析。首先将上述因子进行 OLS 分析,如表 4 所示,为了使模型具有统计学意义,筛选出 7 个因素中通过多重方差膨胀系数(VIF)共线性检验($VIF < 7.5$)和 $p < 0.05$ 的显著性检验的影响因子——城镇化率、人口密度、经济密度、人类影响指数和年均气温 5 个因子。

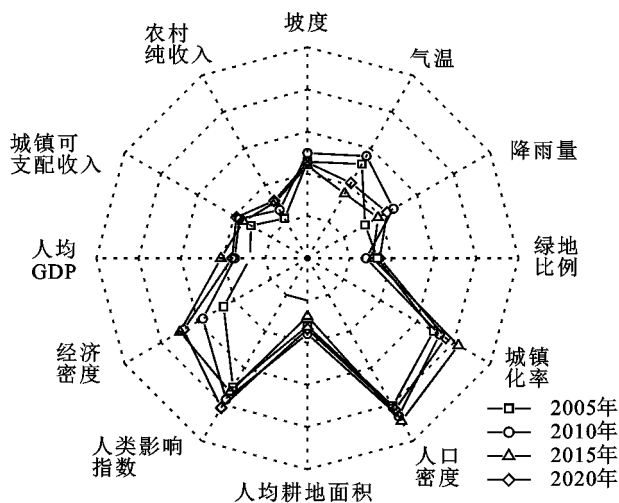


图 5 地理探测器探测因子分析雷达图

将筛选后的 5 个指标进行 GWR 模型回归,选取

表 4 基于 OLS 回归模型影响因子筛选结果表

变量	坡度	气温	降雨量	城镇化率	人口密度	人类影响指数	经济密度
标准误差	0.054	0.034	0.032	0.051	0.026	0.05	0.031
p 值	0.217	0.045	0.960	0.000	0.017	0.000	0.001
VIF	4.729	1.698	2.710	7.029	1.537	3.502	1.978

表 5 GWR 与 OLS 模型结果对比

模型	2005 年			2010 年			2015 年			2020 年		
	R^2	R^2 调整	AICc	R^2	R^2 调整	AICc	R^2	R^2 调整	AICc	R^2	R^2 调整	AICc
GWR	0.894	0.874	-289.12	0.926	0.911	-293.93	0.934	0.921	-298.13	0.937	0.926	-302.64
OLS	0.838	0.831	-268.15	0.892	0.885	-277.97	0.912	0.908	-289.99	0.915	0.912	-293.66

年均气温对生态系统服务供需匹配关系的影响具有空间异质性。在空间层面上,年均气温回归系数绝对值在空间上的分布呈南高北低的趋势,正负效应同时存在,原因是其苏南地区的气温高于苏北地区,故在空间上苏南地区供需匹配关系受气温变化幅度大,且苏中地区植被覆盖度比苏南地区高且人类活动影响比苏南地区低,而温度的提升对自然生态系统具有较大的负面影响,故苏中地区的负效应较为明显。其中,在空间上年均气温对生态系统服务供需匹配呈现负向限制作用的地区包括扬州、泰州、南通等城市,而常州、苏州、无锡等南部地区则对供需匹配起正向促进作用。而年均气温因子的时间分异特征并不明显,但整体上在研究期内回归系数绝对值大的区域数量呈增加趋势,表明年均气温对供需匹配度的影响程度在逐渐增强。

江苏省经济密度与生态系统服务供需匹配总体呈负相关关系,即经济密度越高,生态系统服务供需匹配指数越低,仅在 2005—2010 年连云港北部地区的回归系数表征为正相关,表明该阶段连云港地区经济发展水平相对本省较低,同时生态系统服务供需匹配指数也较低。由 GWR 回归分析表明,在时间层面

Fixed Gaussian 函数作为核函数,AICc 法作为验证最优带。

如表 5 所示,通过对比 OLS,GWR 模型的 AICc 值、 R^2 和 R^2 调整的大小,可以看出 GWR 模型的拟合优度要好于 OLS 模型,因此选择 GWR 模型来研究影响因素对生态系统服务供需匹配度的空间作用特征。四期数据的拟合优度 R^2 和调整 R^2 大于 0.85,说明构建的地理加权回归方程能解释 85% 以上的生态系统服务供需匹配度变化

如图 6 所示,各影响因子在空间上呈现非均质性特征,即不同影响因子对江苏省各县域的生态系统服务供需匹配度会产生不同程度的正向促进或逆向抑制的作用。因此可以通过不同影响因子每单位变化所致供需匹配度的变化来分析因子对生态系统服务供需匹配度的影响作用。

上,2005—2020 年评价单元的回归系数低值区逐渐增加,变化较大的区域位于南通市、无锡市、苏州市和连云港市等,表明以上地区经济密度对供需匹配度的影响程度在逐渐增强。在空间层面上,江苏省中北部地区回归系数的绝对值较高,而苏南地区的回归系数绝对值较低,表明在江苏中北部地区,单位面积土地上经济效益水平的波动导致的供需匹配度变化幅度较大。

人口密度和城镇化率对江苏省生态系统服务供需匹配关系整体影响为负相关,即自变量的增加会导致供需匹配比的降低,且随着时间的变化空间格局相对稳定。两个指标的在空间层面上表征相似,即江苏省包括盐城、淮安和宿迁在内的中北部地区回归系数的绝对值较高,表现为较明显的负向抑制作用。由于以上地区的人口密度和土地开发强度均位于江苏省后列,单位土地面积上的人口数量越少,开发强度越低,从而人类的对自然资源的索取量相对较少,故供需匹配比相对越高,反之随着城镇化率的提高,人口活动会改变原有的生态结构,降低生态服务供给,从而使生态系统服务供需匹配逐渐失衡。

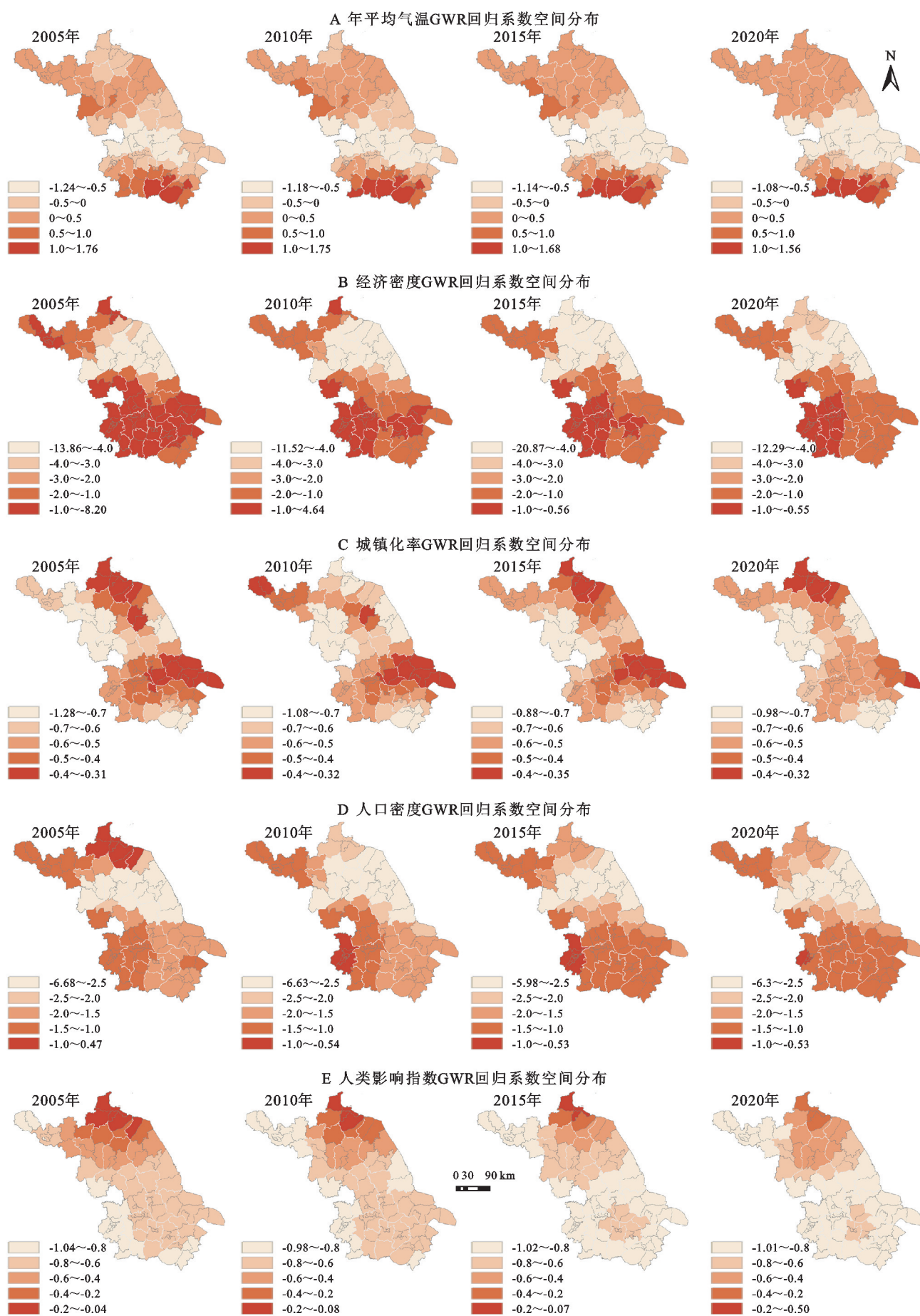


图6 影响因子地理加权回归系数空间分布

人类影响指数表示人类活动对景观组分的干扰作用的量化指标,人类影响指数在空间上呈现出明显的梯度效应,回归系数绝对值由南到北递减,与供需比的呈现负向抑制关系。其中,苏南地区的南京、苏州等地区回归系数绝对值较大,随着时间推移,苏南地区评价单元内人类影响指数负效应逐渐增强,延伸到苏中地区。表明苏中、苏南地区人类活动的干扰程度对生态系统服务供需匹配的影响程度相比苏北地区大,随时间的变化幅度强。苏南地区的社会经济发展水平高,人类活动对各个组分的利用程度相对较高,进而影响生态活动质量。即人类影响指数每升高一个单位,对苏南地区的生态系统服务供需匹配均衡度的降低作用更大。

4 讨论与结论

4.1 讨论

江苏省生态系统服务供需格局在空间上差异显著。从整体上来看,苏南苏北地区面临的供需失衡压力明显高于苏中地区,且苏南地区更为严重。生态系统服务盈余地区主要位于苏中地区,空间集聚上以高一高集聚为主。主要原因是该地区分布有大量的湖泊水系,植被覆盖率也相对较高,生态环境本底较好。总体应该应以保护的原则为主,对洪泽湖、高邮湖等湖泊优化其河湖生态空间,保持其水源涵养等生态系统调节服务,因地制宜,需要制定差异性规划,着力发展绿色高效无污染产业,在生态容量范围内提升经济效益。

生态系统服务赤字地区主要位于苏南苏北地区,研究阶段生态系统服务供需比呈下降趋势,空间上苏南地区城市市辖区在空间上多呈现低—低集聚。由地理回归模型结果分析得出,经济密度、人口密度和人类发展指数均与生态系统服务供需匹配呈负向抑制关系。其主要原因一方面在于随着城镇化水平和区域经济的发展,生态需求指数逐年上升;另一方面,人为活动干扰改变了多种用地结构,建设用地的扩张占用了大量生态用地,生态系统所能提供的调节和支持服务功能迅速退化。因此,在推动区域经济发展的同时,注重生态的保护与修复。着重考虑完善城市绿色基础设施,加强城市绿色工程技术的运用,加强切实有效的生态保护制度。从保护生态用地、完善生态用地建设等方面进行政策加持。从而促进生态系统的恢复与重建,实现生态系统服务的可持续供给,以实现生态系统服务供需平衡。

目前本研究仍具有一定的局限性,生态系统服务供需关系受到政策因素、经济因素和自然因素等多方

面共同影响。未来在影响因素分析中,可以增加相关政策因素,以更精准地分析各类影响因素的作用机制,为政策调控提供科学参考,以期合理地指导人类开展生产生活活动,为多目标的生态系统服务管理提供更坚实的研究基础。其次本文虽研究了生态系统服务供需匹配关系的时空分异特征,但是并未建立供需间的时空链接,在未来的研究中可以进一步探索区域间的供需流动路径与范围,重视生态系统服务流的应用研究,进一步探索生态系统与人类福祉的耦合关系,实现社会经济与生态环境的“双赢”,促进人类福祉的持续提升。

4.2 结论

江苏省生态系统服务供给量总体呈下降趋势,但变化率较低。在空间上大致表现为苏中供给量较高,南北较低的空间分布形态。生态系统服务需求指数增长较快,其中江苏省中部地区和苏南地区需求在研究时段增长尤为明显。在空间上高需求值主要分布在经济和社会高速发展的苏南地区,低需求值主要分布在江苏中部地区。

江苏省生态系统服务供需指数分布整体呈现苏中地区高,南北低的特征,具有一定的不均衡性。在空间上,供需盈余区主要分布在徐州宿迁等苏北地区和泰州、镇江市等区域。供需赤字区主要分布在江苏省南部地区南京市、镇江市、无锡市等多个地区。研究期内供需失衡整体县/区增加,苏南地区的供需赤字状况逐年严峻。

2005—2020年的莫兰指数分别为0.409,0.398,0.400,0.402。江苏省2005—2020年生态系统服务供需匹配关系高一高集聚区在空间上分布于苏中地区,其在时间上呈减少趋势;低—低集聚区分布于苏南发达县/区,其在时间上呈增加趋势。

江苏省生态系统服务供需关系的变化核心影响因素为人口密度、人类影响指数、城镇化率和经济密度,社会因素对生态系统服务的解释力最强,自然因素次之。基于GWR分析表明,人口密度、人类影响指数、城镇化率和经济密度均有显著的负向抑制作用,年均气温呈现两极化趋势,且均有明显的空间异质性。

参考文献:

- [1] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5): 607-613.
- [2] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 2012,21:17-29.
- [3] Wei H, Fan W, Wang X, et al. Integrating supply and

- social demand in ecosystem services assessment: A review[J]. *Ecosystem Services*, 2017,25:15-27.
- [4] Baral H, Keenan R J, Sharma S K, et al. Economic evaluation of ecosystem goods and services under different landscape management scenarios[J]. *Land Use Policy*, 2014,39:54-64.
- [5] Zhai T, Wang J, Jin Z, et al. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? [J]. *Ecological Indicators*, 2020,111:106068.
- [6] Wang J, Zhai T, Lin Y, et al. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,657:781-791.
- [7] Guan Q, Hao J, Ren G, et al. Ecological indexes for the analysis of the spatial-temporal characteristics of ecosystem service supply and demand: A case study of the major grain-producing regions in Quzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,108:105748.
- [8] Martínez-López J, Bagstad K J, Balbi S, et al. Towards globally customizable ecosystem service models[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,650:2325-2336.
- [9] Chen D, Li J, Yang X, et al. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: A case study in the YanHe watershed [J]. *Ecosystem Services*, 2020,43:101117.
- [10] Hanna D E L, Roux D J, Currie B, et al. Identifying pathways to reduce discrepancies between desired and provided ecosystem services[J]. *Ecosystem Services*, 2020,43:101119.
- [11] Anthony Dvaskas. Mapping ecosystem services supply chains for coastal Long Island communities: Implications for resilience planning[J]. *Ecosystem Services*, 2018,30:14-26.
- [12] Chaigneau T, Brown K, Coulthard S, et al. Money, use and experience: Identifying the mechanisms through which ecosystem services contribute to wellbeing in coastal Kenya and Mozambique[J]. *Ecosystem Services*, 2019,38:100957.
- [13] 易丹,肖善才,韩逸,等.生态系统服务供给和需求研究评述及框架体系构建[J].*应用生态学报*,2021,32(11):3942-3952. DOI:10.13287/j. 1001-9332.202111.011.
- [14] 摆万奇,赵士洞.土地利用变化驱动力系统分析[J].*资源科学*,2001,23(3):39-41.
- [15] Nelson G C, Bennett E, Berhe A A, et al. Anthropogenic drivers of ecosystem change: an overview [J]. *Ecology and Society*, 2006,11(2):29.
- [16] Dou H, Li X, Li S, et al. Mapping ecosystem services bundles for analyzing spatial trade-offs in inner Mongolia, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,256:120444.
- [17] Rla B, Kcc C, Jza B, et al. 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 [J]. *Applied Geography*, 2019,108:64-73.
- [18] Li Y, Zhan J, Liu Y, et al. Response of ecosystem services to land use and cover change: A case study in Chengdu City[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,132:291-300.
- [19] Bryan B A, Ye Y, Connor J D. Land-use change impacts on ecosystem services value: Incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics[J]. *Ecosystem Services*, 2018,32:144-157.
- [20] Pan Y, Xu Z, Wu J. Spatial differences of the supply of multiple ecosystem services and the environmental and land use factors affecting them [J]. *Ecosystem Services*, 2013,5:4-10.
- [21] 南笛,杨子寒,毕旭,等.生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析:以长江中游华阳河湖群地区为例[J].*中国环境科学*, 2018,38(9):3531-3541. DOI: 10.19674/j. cnki. issn1000-6923.2018.0382.
- [22] 付光辉,刘友兆,祖跃升,等.区域土地整理综合效益测算:以徐州市贾汪区为例[J].*资源科学*,2007,29(3):25-30.
- [23] 刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究:以兰州市为例[J].*地理学报*,2019,74(9):1921-1937.
- [24] Arthur Getis, Cliff, A. D. and Ord, J. K.1973:Spatial autocorrelation. London: Pion[J]. *Progress in Human Geography*, 1995,19(2):245-249.
- [25] 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.
- [26] 李进涛,刘彦随,杨园园,等.1985—2015年京津冀地区城市建设用地时空演变特征及驱动因素研究[J].*地理研究*,2018,37(1):37-52.