

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.026.

盛舒童, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 山东沿海生态系统服务协同与权衡的空间格局及驱动力[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 384-392.

SHENG Shutong, LIU Yanfang, LIU Yaolin, et al. Spatial Pattern and Driving Forces of the Synergy and Trade-off of Ecosystem Services in the Coastal Areas of Shandong[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 384-392.

山东沿海生态系统服务协同与权衡的空间格局及驱动力

盛舒童¹, 刘艳芳^{1,2}, 刘耀林^{1,2,3}, 陆砚池¹

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079; 3. 武汉大学 地理空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079)

摘 要:提升区域生态保护效能,可为区域生态治理科学决策提供政策依据,以山东省沿海地区为研究区,使用InVEST模型和CASA模型测度产水服务、土壤保持、植被固碳和生物多样性的时空演变,借助差异比较法探究生态系统服务协同权衡的时空分异机制,进一步利用多尺度地理加权回归(MGWR)剖析了自然因素和人类活动因素对协同权衡的影响。结果表明:(1)2018年研究区产水服务、生物多样性的均值为605.27 mm/a,0.28,2010—2018年总量递增速率分别为0.21 mm/a,0.23;土壤保持、植被固碳的均值为0.000 73 t/(hm²·a),537.56 gC/(m²·a),2010—2018年总量递减速率分别为0.62 t/(hm²·a),2.1 gC/(m²·a)。(2)2010—2018年,生态系统服务的协同权衡具有显著的空间异质性,产水服务分别与土壤保持、生物多样性表现为强权衡弱协同;植被固碳分别与产水服务、土壤保持、生物多样性表现为强协同弱权衡。(3)产水服务、土壤保持、植被固碳三者存在显著相关性,受坡度、高程、日照时数等自然因素的影响大于人类活动因素的影响,其正负性和强度具有空间异质性。其余因子的解释力度较小且不固定,各项因素动态且综合影响协同权衡的变化。总之,研究区内4种生态系统服务之间协同与权衡具有显著的空间异质性,且影响因素的正负性和强度也具有空间异质性,研究结果可为山东省沿海地区生态治理提供参考。

关键词:生态系统服务;协同权衡;多尺度地理加权回归;山东沿海地区

中图分类号:X171;K901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0384-09

Spatial Pattern and Driving Forces of the Synergy and Trade-off of Ecosystem Services in the Coastal Areas of Shandong

SHENG Shutong¹, LIU Yanfang^{1,2}, LIU Yaolin^{1,2,3}, LU Yanchi¹

(1. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Collaborative Innovation Center of Geospatial Information Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of regional ecological protection and provide policy basis for scientific decision-making on regional ecological governance, we used the coastal area of Shandong Province as the research area, used the InVEST model and the CASA model to measure the temporal and spatial evolution of water production services, soil conservation, vegetation carbon sequestration, and biodiversity, and used the difference comparison method to explore the temporal and spatial differentiation mechanism of ecosystem service synergy trade-offs, and further used multi-scale geographic weighted regression (MGWR) to analyze the influence of natural factors and human activity factors on synergy trade-offs. The results showed that: (1) in 2018, the average values of water production services and biodiversity in the study area were 605.27 mm/a and 0.28, and the total increasing rates from 2010 to 2018 were 0.21 mm/a and 0.23, respectively; soil

收稿日期:2021-11-28

修回日期:2021-12-14-

资助项目:国家自然科学基金“多尺度聚类知识挖掘与应用”(41771432)

第一作者:盛舒童(1998—),女,江苏南通人,硕士,研究方向为土地利用生态安全。E-mail:sturbosheng@whu.edu.cn

通信作者:刘艳芳(1959—),女,湖北武汉人,博士,教授,主要从事区域规划和经济地理研究及地理信息应用工程研究。E-mail:yfliu610@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

conservation and vegetation carbon sequestration were $0.000\ 73\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $537.56\ \text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and the total deceleration rates from 2010 to 2018 were $0.62\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $2.1\ \text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, respectively; (2) during the study period, the synergy of ecosystem services had significant spatial heterogeneity; water production services and soil conservation and biodiversity showed strong trade-offs and weak synergy; vegetation carbon sequestration was associated with water production services and soil conservation; biodiversity showed strong synergy and weak trade-offs; (3) there was a correlation among water production services, soil conservation, and vegetation carbon sequestration, which was more affected by natural factors such as slope, elevation, and sunshine hours than human activities, of which positive and negative characteristics and intensity were spatially heterogeneous; the interpretation of the other factors was relatively small and not fixed, and each factor was dynamic and comprehensively affected the changes in the synergy trade-off. In conclusion, the synergy and trade-off of the four ecosystem services in the study area had significant spatial heterogeneity, and the positive and negative factors and intensity of the influencing factors were also spatially heterogeneous, and the results can provide a reference for ecological governance in coastal areas of Shandong Province.

Keywords: ecosystem services; synergistic trade-offs; multi-scale geographic weighted regression; Shandong coastal areas

生态系统服务指的是生态系统所形成、维持的人类赖以生存的自然环境条件^[1]和人类从中获取的直接及间接利益^[2]。生态系统服务包括供给、支持、调节和文化服务 4 种类型^[3]。人类具有社会性,共同利用自然资源维持生存与发展的过程也是充分利用生态系统服务功能的过程^[4]。在城市化高速发展的背景下,人类可持续发展遭遇挑战,生态系统服务功能相互权衡,放大了消费者利益之间的冲突,增大了社会-生态系统管理和科学决策目标之间的冲突^[5]。因此,秉承生态文明战略,思考如何进行生态系统修复治理进而提升人类福祉达到社会-生态共赢的局面引起了生态学、地理学、管理学等多个交叉学科的重视。比如大量学者从全球、全国、省市、区县等尺度测度、量化并评估不同土地利用类型及不同生态系统的生态系统服务^[6-7],为政策制定构建数据基础。长时间序列,多空间尺度的评估生态系统服务功能,推动了我国全面认识生态系统服务功能空间格局及演化特征的进程。

生态系统服务之间相互作用的关系分为协同与权衡两类,呈现多重非线性关系^[8]。协同是指两种或多种生态系统服务同增或同减的状态,权衡是指一种生态系统服务的增加使另一种生态系统服务减少的状态^[9]。为了确定研究时段及研究区域内生态系统服务协同与权衡的状态,基于 InVEST 等模型的定量化空间测度已经在国内外地区得到了很好的应用^[10]。大量学者用双变量相关、逐像元偏相关、空间自相关等空间相关分析法、生态系统服务簇等方法解释生态系统服务之间的相关性^[11-13],再进一步利用权

衡协同度法、差异比较法、叠置分析法、冷热点分析法等方法测定生态系统服务的协同与权衡^[14-15]。协同权衡的定量化和空间化测度直观揭示了生态系统服务功能之间的相互关系,为管理者科学管理及调控做出决策参考。

可持续管理和生态之间的联系是生态系统服务的本质^[16],通过增加生态系统服务协同的概率、减少权衡的概率,实现生态系统服务之间相互促进、增强效应,提升生态系统的抗风险性和稳固性。有研究表明保护生态系统并实现可持续发展最有效的方式是政府宏观调控,比如通过控制土地征收价格、差异化的可持续经营战略、制定土地集约利用政策等^[17]。事实上,在自然因素的变化和人类社会活动的干预中,生态系统向好或向恶发展,生态系统服务协同与权衡呈现空间异质性^[18]。在影响因子的选择上,学者多从降水、温度、坡度、高程、水网密度、到最近的湿地和森林的距离、农业用地和湿地的百分比等自然因素^[19]解释生态系统服务协同与权衡,也有考虑城镇建设用地密度、农村居民点密度等人类活动因素^[20]。同一个因子对生态系统服务协同与权衡的影响程度具有时空差异性,比如在黄土高原退耕还林区,坡度在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 地区生态系统服务显著冲突,坡度小于 15° 地区生态系统服务相互作用动态变化,坡度大于 25° 地区表现为协同^[13]。比如降水有利于干旱的生态系统中植物生产和 NPP 积累,然而在潮湿的生态系统中降水会减少辐射输入、增加养分浸出同时降低土壤氧气供应,降低了 NPP 累积^[21]。在尺度的选择上,学者多从城市、区县、生态功能区、流域、格网

等^[22]分析生态系统服务协同与权衡,部分研究进一步深入分析其形成机制。在相同的区域内,生态系统服务协同与权衡的形成机制在不同尺度上具有不一致性。比如有研究发现在京津冀地区,区县尺度相较于城市和格网是权衡关系最为显著的研究尺度^[23]。在干旱内陆河流域,县域尺度上食物-碳和水源-碳之间的协同程度高,而区域尺度上食物供给和土壤保持、水源涵养和土壤保持之间的权衡程度高^[24]。在影响因素的研究方法上,学者多采用地理探测器、线性回归、Logistic 回归等^[14,20]全局回归分析方法。

综上所述,目前生态系统服务协同权衡的研究已经取得了丰硕的成果,估算并模拟了生态系统服务价值,厘清了生态系统服务变化及其相互作用关系。但多数研究停留在分析不同时空尺度下生态系统服务之间的关系、冷热点分布、协同与权衡的空间格局,缺少解释驱动协同权衡空间异质性产生的原因,缺少挖掘推动格局产生的自然要素与人类社会活动要素的综合分析以及要素的空间异质性剖析。局部回归模型是假定回归参数与样本数据的地理位置相关,能够更好地解释生态系统服务协同与权衡的空间异质性和自相关性,可用来分析不同影响因素作用的尺度差异。因此,本文以山东省沿海地区为研究区域,时间跨度为 2010—2018 年,以区域及栅格为尺度,首先利用 InVEST 和 CASA 模型测度产水服务(供给)、土壤保持(支持)、植被固碳(调节)、生物多样性(文化)4 类生态系统服务,再利用差异比较法和相关性分析解释生态系统服务协同与权衡的时空分异机制。最后,利用随机采样法和多尺度地理加权回归法(MGWR)剖析自然因素和人类活动因素对协同权衡的形成机制和影响尺度,为区域生态保护政策效能的提升及生态治理科学决策提供实证分析和理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区为山东省沿海地区(35°29′—38°07′N, 117°57′—122°40′E),该区域位于黄河下游、北临渤海,东部被黄海围绕,包括山东省 7 个海滨地级市(青岛、东营、烟台、潍坊、威海、日照、滨州),54 个县(市、区),面积约为 70 027.03 km²。山东省沿海地区海岸线狭长,良湾众多,大陆岸线长 3 345 km,占全国海岸线 1/6,岛岸线总长 737 km,是全国唯一拥有 3 个亿吨大港(青岛、日照和烟台)的省份^[25]。该区域包含完整的陆地和海域生态系统,具有丰富的水体、湿地、滩涂资源,对城市热环境也具有重要的调节作用。研究区平均高程 484.99 m,平均坡度 5°,缓丘起伏,以平原丘陵低

山为主。属暖温带季风气候,2018 年均降水量为 792.43 mm,年均气温为 13.77℃,夏季降水集中。

1.2 数据来源

本研究使用的数据包括:(1) 2000 年和 2018 年土地利用数据集空间分辨率 30 m、归一化植被指数空间分辨率 1 km 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);(2) 数字高程模型(DEM)数据空间分辨率 30 m,来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);(3) 土壤属性数据来源于世界土壤数据库(HWSD),土壤分类系统为 FAO-90;(4) 2010 年和 2018 年的气象数据集,包括海拔、气温、降雨量、日照时数等来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),利用 Kriging 插值法获取栅格图层;(5) 夜间灯光遥感数据集(NPP-VIIRS-like NTL Data)分辨率 500 m,来源于数字中国研究院等跨传感器校正的数据^[26];(6) 人口密度数据集空间分辨率接近 1 km,来源于 LandScan 全球人口动态数据(<http://www.satpalda.com/>)。本研究所使用的所有非空间数据都进行了空间化处理^[27],地理坐标系统一使用 CGCS2000 国家大地坐标系,投影坐标系统一使用 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_39,重采样输出栅格分辨率为 30 m×30 m。

2 研究方法

2.1 生态系统服务功能评估

2.1.1 产水服务模型(WY) 采用 InVEST 模型产水模块评估产水量,利用年均降水量、年平均潜在蒸散量、土壤有效含水量、土地利用覆盖、土壤最大根系埋藏深度等数据,估算每栅格单元降水量减去实际蒸发后的水量即每个栅格的水源供给量^[28]。

$$P_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \cdot P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - [1 + (\frac{PET_x}{P_x})^{\omega_x}]^{1/\omega_x} \quad (2)$$

$$W_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} + 1.25 \quad (3)$$

$$PET_x = K_c(l_x) \cdot ET_{0x} \quad (4)$$

$$AWC_x = \min(\text{Rest}, \text{layer}, \text{depth}, \text{root}, \text{depth}) \times PAWC \quad (5)$$

式中: Y_x 为栅格 x 的水源供给量(mm); AET_x 为栅格 x 的年实际蒸散量(mm); P_x 为栅格 x 的年降水量(mm); PET_x 为潜在蒸散量(mm); ET_{0x} 为栅格 x 的参考作物蒸散,通过作物蒸散量反映当地气候条件; $K_c(l_x)$ 为栅格 x 中特定土地利用类型的植物蒸散系数; ω_x 为自然气候-土壤性质的非物理参数;

AWC_x 为植物可利用含水量(mm),由植物利用水分含量(PAWC)以及土壤的最大根系埋藏深度和植物根系深度的最小值决定; z 为经验系数,代表区域降水分布及其他水文地质特征。

2.1.2 土壤保持服务模型(SC) 采用 InVEST 模型中的泥沙输移比例模型计算土壤保持量,该模型是基于改进的土壤侵蚀模型 USLE 建立的,将侵蚀减少量和泥沙保留量之和作为土壤保持量 $[t/(hm^2 \cdot a)]^{[29]}$ 。

$$USLE_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C \times P \quad (6)$$

$$RKLS_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (7)$$

$$E_x = USLE_x (1 - SDR_x) \quad (8)$$

$$SEDRET_x = RKLS_x - USLE_x + E_x \quad (9)$$

式中: R_x 为降雨侵蚀力因子; K_x 为土壤可蚀性因子; LS_x 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖与管理 $APRA_x$ 因子; P 为土壤保持措施因子; $USLE_x$ 为实际侵蚀量; $RKLS_x$ 为潜在侵蚀量; E_x 为泥沙保持量; SDR_x 为泥沙传输比; $SEDRET_x$ 为土壤保持量。

2.1.3 植被净初级生产力模型(NPP) 采用 CASA 模型计算植被净初级生产力,反映气候、环境以及人类活动对植被的综合利用 $[30]$ 。

$$NPP_x = APRA_x \times \epsilon_x \quad (10)$$

$$APRA_x = 0.5 SOL_x \times FPAR_x \quad (11)$$

$$\epsilon_x = \epsilon_{\max} \times T_{\epsilon 1} \times T_{\epsilon 2} \times W_{\epsilon} \quad (12)$$

$$FPRA = \min\left(\frac{SR - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95\right) \quad (13)$$

$$SR = \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \quad (14)$$

式中: NPP_x 为植被净初级生产力 $[g/(m^2 \cdot a)]$; $APRA_x$ 、 ϵ_x 为植被吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2) ,在理想条件下的植物的最大光使用效率 (g/MJ) ; SOL_x 为太阳辐射量 (MJ/m^2) ; $FPAR_x$ 为植被对光合有效辐射的吸收比率;常数 0.5 为植被利用的太阳辐射率; SR_{\min} 设置为 1.08; SR_{\max} 取决于植被,设置在 4.14~6.17。

2.1.4 生物多样性模型(HQ) 采用 InVEST 模型中生境质量的模块,作为表示生物多样性的指标 $[28,31]$ 。该模块将土地类型敏感度和人类活动为主的外界威胁强度结合起来,分析不同土地利用类型的生境质量对威胁源的影响程度及其响应程度的分布。

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2}\right) \quad (15)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境适应性; D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度; k 为半饱和常数。生境质量值在 0~1,值越高,栖息地质量就越高,退化程度越低,反之亦然。

2.2 协同与权衡的关系分析方法

2.2.1 差异分析法 通过比较 2010 年和 2018 年两种服务的变化量来判断不同地区两种服务的关系 $[14]$ 。如果两种服务的变化量的乘积为正值,则认为是协同的;如果两种服务的变化量的乘积为负值,则认为是权衡的。

$$A_{T_1} - A_{T_2} = \Delta A, B_{T_1} - B_{T_2} = \Delta B \quad (16)$$

$$\Delta A \times \Delta B \geq 0, \Delta A \times \Delta B < 0 \quad (17)$$

式中: A_{T_1}, A_{T_2} 为 T_1, T_2 时期服务 A 的值; B_{T_1}, B_{T_2} 为 T_1, T_2 时期服务 B 的值; $\Delta A, \Delta B$ 为服务 A, B 的变化量。

2.2.2 多尺度地理加权回归模型 多尺度地理加权回归(MGWR)方法允许每个变量不同的空间平滑水平,并利用每个自变量不同的带宽衡量每个自变量空间过程作用的空间尺度,相较于多元线性回归模型(OLS)和地理加权回归模型(GWR)更加真实地贴合空间过程 $[32]$ 。本文选择的因变量是生态系统服务协同权衡的变化量,自变量是影响协同权衡的潜在因子的变化量,包括人类活动影响因素的变化量和自然因素的变化量。

$$y_i = \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \quad (18)$$

式中: b_{wj} 为第 j 个变量回归系数使用的带宽; u_i, v_i 为样本 i 的地理区位坐标; $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$ 为自变量的回归系数; ϵ_i 为随机误差。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务的时空演变

由图 1 可知,产水服务与土壤保持由东南向西北递减,植被固碳由内陆向沿海递减,生物多样性由沿海向内陆递减,存在显著的空间异质性。产水服务的高值区集中在东南部,因为该区域降水量大,海拔低,入海口水系净流量大,水源涵养水平高;土壤保持服务以低值区为主,占比超 90%,因为山东省沿海地区地势平坦,潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量都不大,根据土壤流失方程得到的土壤保持量相对较低;植被固碳服务的高值区围绕在山东沿海海拔高值区周围,该区域是林地和草地的集中地,因为温度条件有利,降水率较高,林地和草地茂密,植被覆盖度高提升了固碳水平;生物多样性的低值区零散分布在海岸带地区,集中在环渤海及南部海岸带,因为黄河三角洲高效生态经济区、环胶州湾海疆景观风貌带的建立加大了对该区域林地和水域的保护,人类活动干预相对少。2010—2018 年产水服务及生物多样性有所增加,土壤保持及植被固碳有所下降。产水服务总

量递增速率为 0.21 mm/a, 超过 94% 的区域呈递增趋势, 黄河三角洲西部、胶州湾地区增速最大; 生物多样性服务总量递增速率为 0.23, 但是超过 70% 的区域呈递减趋势, 空间差异性较大。土壤保持服务总量

递减速率为 0.62 t/(hm² · a), 超过 90% 的区域呈递减趋势, 由东南部向西北部递减; 植被固碳服务总量递减速率为 2.1 Cg/(m² · a), 超过 80% 的区域呈递减趋势, 只有莱州湾地区有增加的趋势。

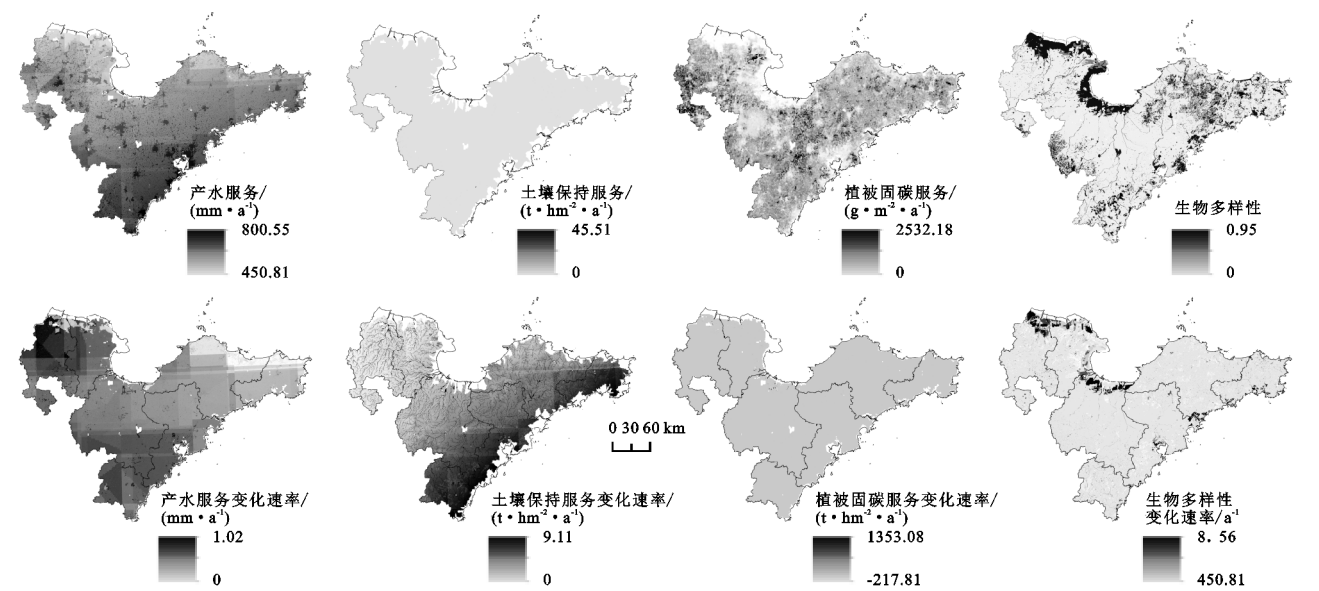


图 1 2018 年山东沿海地区生态系统服务空间分布及变化速率

3.2 生态系统服务协同与权衡的关系分析

3.2.1 协同与权衡的相关性分析 本文利用 ArcGIS 对 2010 年、2018 年的四项生态系统服务进行随机点提取, 每个点间距为 4 km, 重新采样得到 820 个点, 以便于相关性分析和多尺度地理加权回归分析。由于已知数据是非线性且不具正态分布特征, 因此采用 SPSS 软件进行 Spearman 相关性分析(表 1)。当生态系统服务之间的相关性检验通过了 0.05 水平的显著性检验时, 认为具有显著相关性。研究表明 2018 年相较于 2010 年 6 对服务的相关性显著程度提升, 正相关系数随之增加, 负相关系数随之减小, 其中产水服务、植被固碳及土壤保持 3 项服务两两之间均有显著的相关性。

表 1 生态系统服务相关关系

服务类型	ρ 值		Sig. 双侧检验		相关程度
	2010 年	2018 年	2010 年	2018 年	
产水服务—土壤保持	0.069	0.209	0.048	0.000	显著相关
产水服务—植被固碳	0.174	0.289	0.000	0.000	显著相关
产水服务—生物多样性	0.077	0.006	0.028	0.856	不相关
土壤保持—植被固碳	0.233	0.277	0.000	0.000	显著相关
土壤保持—生物多样性	-0.020	-0.080	0.559	0.023	不相关
植被固碳—生物多样性	-0.079	-0.155	0.023	0.023	弱相关(负)

3.2.2 协同与权衡的空间格局分析 根据协同与权衡关系的占比, 由图 2 可知, 该研究区两两服务的关系被分为两类。第一类, 以权衡关系为主。其中产水服务与土壤保持权衡关系占比达到 95.88%, 协同关

系仅发生在半岛东部海区的威海岛群, 占比较小仅 4.12%。由于大部分产水服务高值区在研究区南部, 分布在胶州湾、日照南部两大海洋渔业集中发展区, 植被覆盖低, 林地破碎, 植被固土能力差, 进而加剧了土壤侵蚀。产水服务与生物多样性权衡关系占比达到 69.90%, 以片状大面积分布, 协同关系发生在海岸带、大沽河生态廊道、胶莱河生态廊道、潍河生态廊道、弥河生态廊道等生态保护区域。由于产水服务高值区林地、草地、水域占比少, 人为因素干扰多, 一定程度上减少了生物多样性, 两者发生权衡。第二类, 以协同关系为主。产水服务与植被固碳服务、土壤保持与植被固碳服务、生物多样性与植被固碳服务协同关系占比分别达到 71.78%, 75.15%, 64.61%, 发生在以草地、林地、水域为主的土地利用类型区, 权衡关系占比较低, 均主要发生在以建设用地、未利用地为主的土地利用类型区。表明生态用地占比较多的地区两类服务之间协同性高, 而建设用地占比较多的地区两类服务之间协同性低, 用地类型的不同直接影响了生态系统服务功能。土壤保持与生物多样性协同关系占比为 68.92%, 31.08% 的区域为权衡关系, 除胶莱河、大沽河、潍河生态廊道, 其余地区均表现出协同。土壤保持的低值区几乎占据了山东省整个沿海地区, 生态廊道交界处属于生态环境系统的过渡带, 生物多样性高, 因而土壤保持与生物多样性在行政边界地带及生态廊道地区发生权衡的概率大, 其余地区发生协同的概率大。

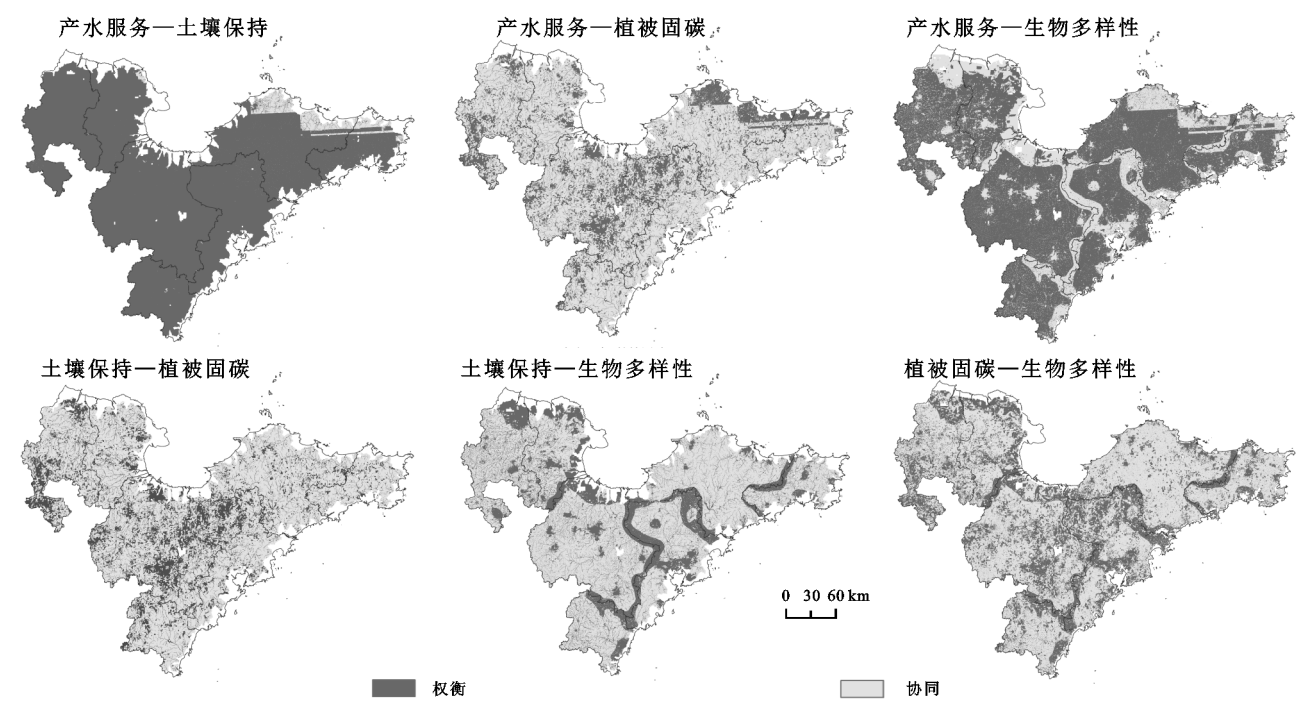


图 2 2010—2018 年生态系统服务协同与权衡空间格局

3.3 生态系统服务协同与权衡的影响因素分析

本研究综合前人研究成果^[14-15,19-20]及数据的可获取性,利用 MGWR 分析自然因素(降水量、温度、日照时数、高程、坡度、植被覆盖度)及人类活动因素(建设用地占比、人类活动强度、人口密度)对 6 对生态系统服务功能间的协同权衡关系的响应。由图 3 可知,残差值在-2.5~2.5 的区域几乎占据了整个研

究区域,表 2 表明所有影响因素对生态系统服务功能的协同权衡关系的解释具有稳定性。从拟合优度来看 MGWR 相较于 GWR 高,从 AICc 来看 MGWR 相较于 GWR 低,表明 MGWR 可以更好地解释自变量对因变量在空间上的响应,更好地拟合观测数据。采样点 p 值小于 0.1 认为通过显著性水平检验,共计 608 个点,占有所有采样点的 74.15%。

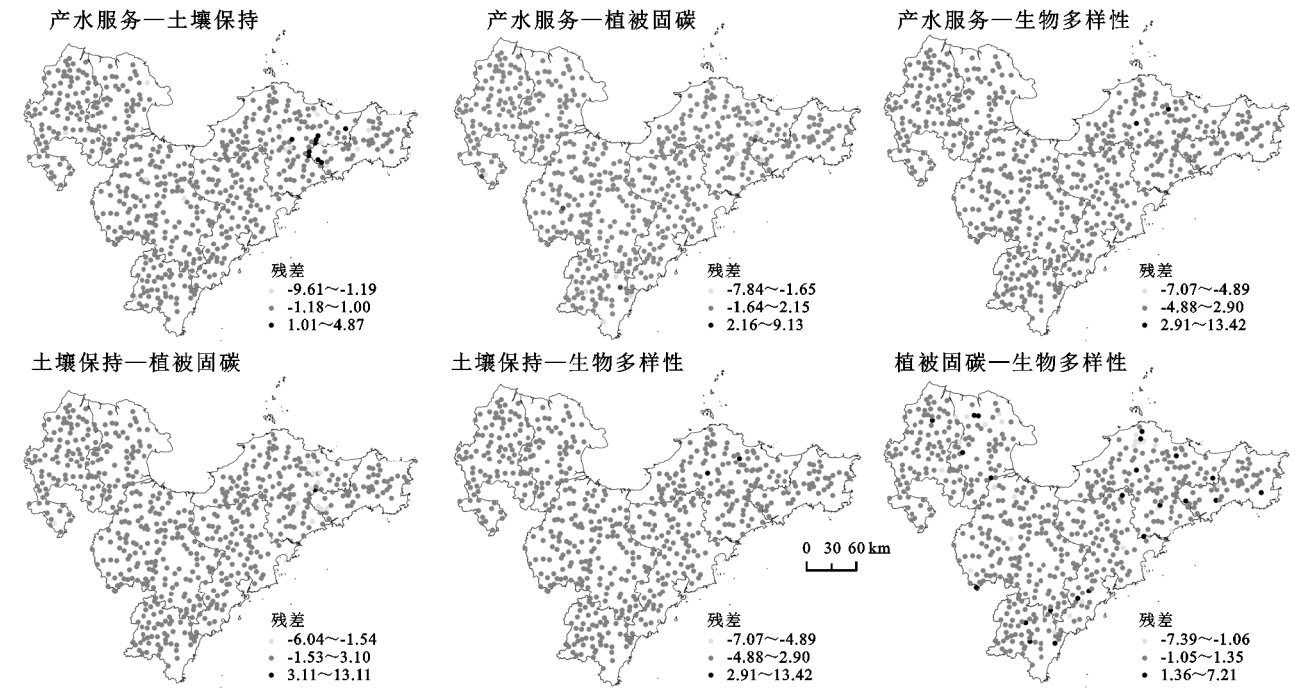


图 3 多尺度地理加权回归模型生态系统服务协同与权衡残差值检验

利用 MGWR 进行回归的试验再一次验证产水服务与土壤保持、产水服务与植被固碳、土壤保持与

植被固碳是具有相关性的,拟合优度 R^2 大于 0.45,这与 Spearsman 相关性系数通过显著性检验保持一

致。生态系统服务之间的相互作用受到自然因素(坡度、植被覆盖、高程、日照时数)的影响大于人类活动因素(建设用地占比)的影响,且自然因素作用的空间异质性较大,由图 4 可知。自然因素和人类活动因素综合且复杂地从正负两个方向影响着不同生态系统服务功能之间的协同与权衡。对于管理者和政策制定者来说,可以通过控制并监测主导因素来增加协同发生的概率,进而提升整体生态系统服务水平。

表 2 经典地理加权回归与多尺度地理加权回归模型指标

生态系统服务类型	R ²		AICc	
	GWR	MGWR	GWR	MGWR
产水服务—土壤保持	0.03	0.57	1727.78	1329.756
产水服务—植被固碳	0.05	0.50	1715.04	1397.900
产水服务—生物多样性	0.01	0.14	1741.17	1722.973
土壤保持—植被固碳	0.08	0.47	1699.10	1444.770
土壤保持—生物多样性	0.01	0.37	1744.68	1549.264
植被固碳—生物多样性	0.03	0.20	1728.32	1698.536

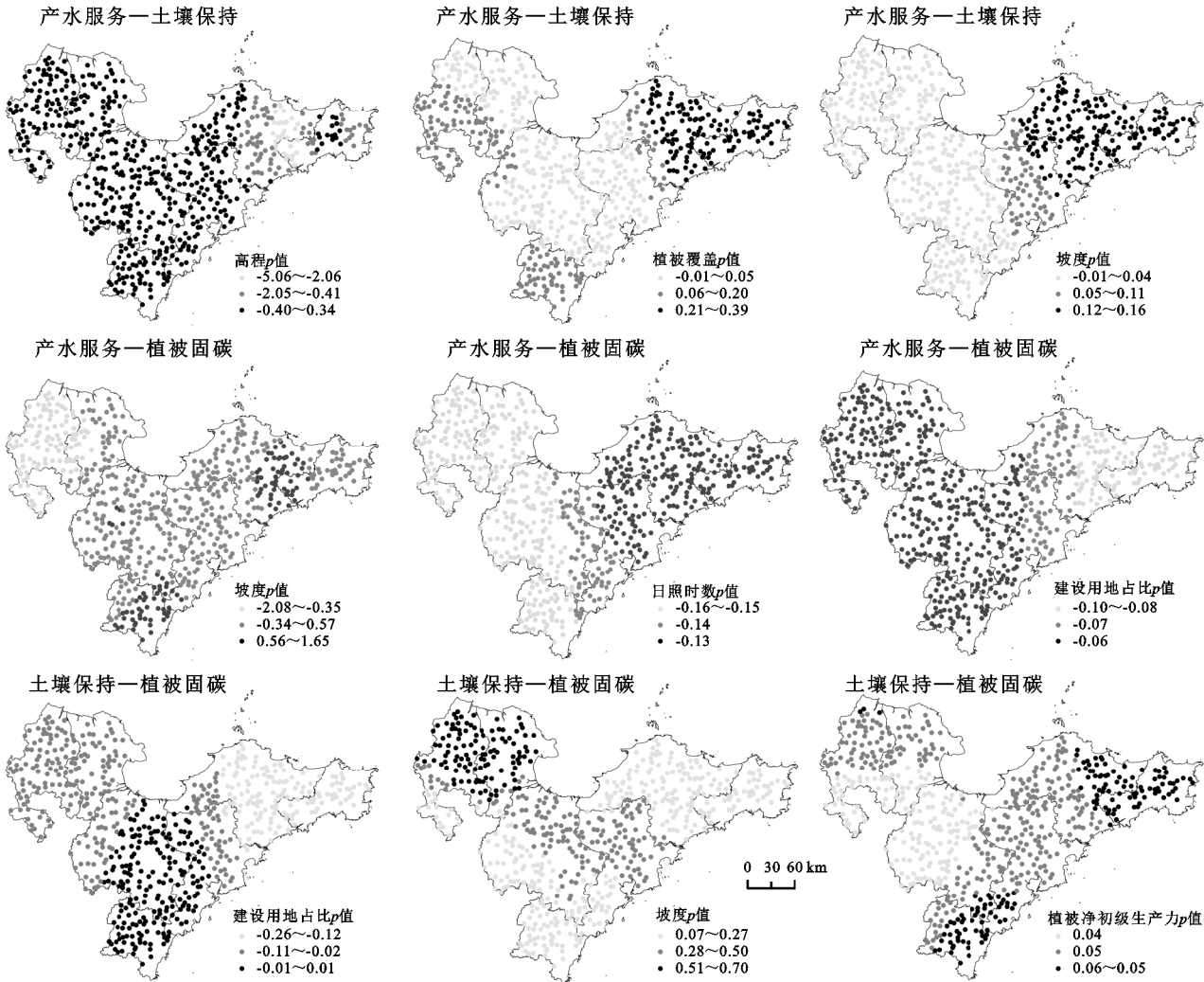


图 4 生态系统服务协同与权衡驱动力回归系数空间分布

具体来说,产水服务与土壤保持的协同权衡受到高程、植被覆盖、坡度的影响最大,平均回归系数分别为 0.22,0.102,0.047,带宽分别为 43,214,522,表明高程的作用尺度空间异质性较大。高程在东部的影响较西部小,植被覆盖的影响从中部向四周递增。研究区中部以平原为主,四周是以沂山、五莲山及昆崙山等山脉为核心的重点生态保护区,高程高、地形陡峭、净流量大,常发生水土流失^[33],使得产水服务与土壤保持大面积呈现不协同的状态。

产水服务与植被固碳的协同权衡受到坡度、日照

时数、建设用地占比的影响最大,平均回归系数分别为 0.245,−0.144,−0.071,带宽分别为 61,606,606,表明坡度的作用尺度空间异质性较大。坡度的影响由中部向四周递减,中部坡度较陡,降雨以地表径流的形式流动,基流小^[34],水的可利用性差。同时植被覆盖和农业扩张会在一定程度导致总蒸发量和用水量的增加,产水服务减少,因此在坡度影响最大的地区产水服务与植被固碳呈现权衡的状态。日照时数与建设用地占比对其产生负向影响,以胶州湾和莱州湾为主的城市群对两类服务的影响呈显著的负相关影响。

土壤保持与植被固碳的协同权衡受到建设用地占比、坡度、植被覆盖的影响最大,平均回归系数分别为 $-0.662, 0.503, 0.023$,带宽分别为 $435, 47, 522$,表明坡度的作用尺度空间异质性较大。坡度的影响由东南部向西北部递减,坡度较高的地区植被覆盖厚且固碳较高,抑制了土壤侵蚀作用,使得土壤保持与植被固碳呈现大面积协同状态^[35]。协同权衡为建设用地的显著负响应与城市化进程较快的南部沿海地区、西部内陆地区保持一致。但是该区域呈现的协同状态可能是由于各类服务的支持地类面积发生不同程度的减少,缩小了两类服务之间的差距,因而提高了协同关系的概率,并不意味着该地区生态质量的提升。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究的创新点是尺度上选择了区域及栅格尺度,随机采样了820个点,从微观尺度挖掘出的影响机制能够更好地细化生态系统服务的管理,便于管理者更好地认识生态系统服务之间相互作用。同时解释了驱动生态系统服务功能—格局—过程形成的主导性因子,剖析主导性因子的空间异质性和尺度效应,便于管理者将主导性因子作为调控优化土地利用配置的抓手。但是由于在测度生态系统服务的过程中,输入的因子与影响因素中的自然因子具有重合性,比如输入InVEST和CASA模型中的降水、高程等因子也是影响因素,因此一定程度导致自然因素相较于人类活动因素在生态系统服务协同权衡上的响应更为突出,显著性更强。同时,生态系统服务协同与权衡是多种生态系统服务共同作用的结果,其驱动力是复杂性和综合性并存,因此未来可以不断完善自然、社会、政策环境、不同利益者需求等多要素对生态系统服务协同权衡影响的互馈机制,厘清各个因素对协同权衡时空变化的响应,便于管理者进行土地利用科学调控及决策。

4.2 结论

(1) 2010—2018年,研究区内产水服务和生物多样性总量递增,递增速率分别为 $0.21 \text{ mm/a}, 0.23$ 。产水服务的高低与行政区降水量的高低有明显关联,生物多样性的低值区出现在黄河三角洲生态保护区、环胶州湾生态保护区等沿海岸带生态修复区。研究区内植被固碳和土壤保持总量递减,递减速率分别为 $0.62 \text{ t/(hm}^2 \cdot \text{a)}, 2.1 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 。植被固碳的高值区出现在以林地、草地、水域为主的生态土地利用类型区,土壤保

持以低值区为主,潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量不大,2018年土壤保持的均值为 $0.00073 \text{ t/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ 。

(2) 研究区内生态系统服务协同与权衡具有空间异质性,2010—2018年产水服务与土壤保持、产水服务与植被固碳、土壤保持与植被固碳间存在显著正相关,相关系数增大。MGWR的拟合优度分别为 $0.57, 0.50, 0.47$,相较于GWR能够更好地解释自然因素和人类活动因素对生态系统服务协同与权衡空间分异的影响。

(3) 高程、植被、坡度等自然因素相较于建设用地占比、人类活动强度等人类活动因素对生态系统服务协同与权衡的影响大,其中高程和坡度的回归系数均大于 0.2 ,建设用地占比的回归系数小于 -0.1 ,自然因素多为正向影响,人类活动因素多为负向影响。

(4) 产水服务与土壤保持以强权衡低协同为主,受到高程的影响最大,带宽最小为43小于采样点820,两者之间的协同与权衡在高程越低的地区响应越平稳。产水服务与植被固碳、土壤保持与植被固碳以强协同低权衡为主,受到坡度的影响最大,带宽最小分别为 $61, 47$,两者之间的协同与权衡在坡度越低的地区响应越平稳。

参考文献:

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*[M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] Costanza R, D Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment's. *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends* [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [4] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 人类活动对生态系统服务功能的影响[J]. *自然资源学报*, 2003,18(1):118-126.
- [5] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 等. 生态系统服务权衡研究进展[J]. *生态学报*, 2021,41(14):5517-5532.
- [6] Thomas S, Gaby D, Olivier G, et al. Environmental impact assessment and monetary ecosystem service valuation of an ecosystem under different future environmental change and management scenarios: a case study of a Scots pine forest[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016,173:79-94.
- [7] 苗培培, 赵祖军, 赵筱青, 等. 云南典型石漠化区生态系统服务权衡与协同研究[J]. *水土保持研究*, 2021,28(4):366-374.
- [8] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. *Ecology Letters*, 2009,12(12):1394-1404.

- [9] Rodriguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services [J]. *Ecology and Society*, 2006, 11 (1). DOI: 10.5751/ES-01667-110128.
- [10] Hoyer R, Chang H J. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization[J]. *Applied Geography*, 2014, 53: 402-416.
- [11] 朱殿珍, 初磊, 马帅, 等. 青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 308-315.
- [12] 刘华超, 任春颖, 王宗明, 等. 大兴安岭生态功能区生态系统服务功能动态及权衡协同关系研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(5): 587-598.
- [13] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 等. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素: 以延安市为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [14] 张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 等. 生态系统服务协同权衡对影响因子的空间响应: 以福建省生态功能区为例[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2022, 47(1): 111-125.
- [15] 李理, 赵芳, 朱连奇, 等. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7568-7578.
- [16] Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development[J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24: 1037-1052.
- [17] Jin G, Chen K, Liao T, et al. Measuring ecosystem services based on government intentions for future land use in Hubei Province: implications for sustainable landscape management[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36: 2025-2042.
- [18] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [19] Zhang Z, Liu Y, Wang Y, et al. What factors affect the synergy and tradeoff between ecosystem services, and how, from a geospatial perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120454.
- [20] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力: 以江苏省太湖流域为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [21] Schuur E A G. Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation [J]. *Ecology*, 2003, 84(5): 1165-1170.
- [22] 马慧强, 杨俊, 李哲. 太原市城市复合生态系统调节服务时空格局演化及驱动机制研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(3): 463-472.
- [23] 张宇硕, 吴殿廷. 京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析[J]. *地域研究与开发*, 2019, 38(3): 141-147.
- [24] 潘竞虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 280-289.
- [25] 宫萌. 山东省围填海演进过程及其对自然岸线资源的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [26] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An Extended Time Series (2000—2018) of Global NPP-VII RS-Like Nighttime Light Data from a Cross-Sensor Calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889-906.
- [27] 金贵, 王占岐, 姚小薇, 等. 国土空间分区的概念与方法探讨[J]. *中国土地科学*, 2013, 27(5): 48-53.
- [28] Richard S, Rebecca C K, Spencer W, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide[M]. Stanford University: The Natural Capital Project, 2017.
- [29] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [30] Zhu W, Pan Y, He H, et al. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 457-463.
- [31] Reyers B. Incorporating anthropogenic threats into evaluations of regional biodiversity and prioritisation of conservation areas in the Limpopo Province, South Africa[J]. *Biological Conservation*, 2004, 118(4): 521-531.
- [32] Yu H, Fotheringham A S, Li Z, et al. Inference in multiscale geographically weighted regression[J]. *Geographical Analysis*, 2019, 52(1): 87-106.
- [33] Fang L L, Wang L C, Chen W X, et al. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127995.
- [34] Onainnia M, De Manuel B F, Madariaga L, et al. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289: 1-9.
- [35] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.