

DOI: 10.20103/j.stxb.202304130759

刘颂,张浩鹏,裴新生,王颖.长时间序列生态系统服务权衡与协同驱动因素——以芜湖市生态系统服务功能极重要区为例.生态学报,2024,44(5):1780-1790.

Liu S, Zhang H P, Pei X S, Wang Y. Drivers of ecosystem service trade-off and synergy in long-term sequence: a case study of the extremely important ecosystem service function area in Wuhu City. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 1780-1790.

长时间序列生态系统服务权衡与协同驱动因素 ——以芜湖市生态系统服务功能极重要区为例

刘 颂^{1,*}, 张浩鹏¹, 裴新生², 王 颖²

¹ 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092

² 上海同济城市规划设计研究院有限公司, 上海 200092

摘要:人类对生态系统的管理和干预促使生态系统服务权衡向协同转化,有助于生态系统服务综合效益提升。但当前缺乏对长时间序列分析背景下生态系统服务权衡协同驱动因素及其非线性影响的理解与把握。以芜湖市“生态系统服务功能极重要区”为研究案例,考虑生境质量、碳固定和土壤保持三种关键生态系统服务,基于多源数据,运用逐像元趋势叠加分析法评估1990—2020年间研究区生态系统服务变化趋势及其权衡协同空间分布规律,采用随机森林模型探索该区域生态系统服务权衡协同形成的关键驱动因素及其非线性影响效应。研究结果表明:(1)31年间芜湖市域生境质量显著下降区域面积约为提升面积的两倍,存在进一步衰退的风险。同时,城市扩张导致市郊边缘地带碳固定、土壤保持显著下降。(2)研究区生态系统服务供给能力受权衡协同影响显著,受影响区域总面积占比达64.48%。受权衡影响区域与协同影响区域存在显著空间差异。(3)土地利用强度是管理生态系统服务权衡向协同转化的主导因素。土地利用强度对权衡协同的影响表现出非线性特征并且存在影响阈值。当强度等级介于弱与中且偏向弱强度时对不同服务协同增益具有积极作用。

关键词:长时间序列;生态系统服务权衡与协同;驱动因素;随机森林

Drivers of ecosystem service trade-off and synergy in long-term sequence: a case study of the extremely important ecosystem service function area in Wuhu City

LIU Song^{1,*}, ZHANG Haopeng¹, PEI Xinsheng², WANG Ying²

¹ College of Architecture and Urban planning, Tongji University, Shanghai 200092, China

² Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute, Shanghai 200092, China

Abstract: By artificially regulating key drivers, trade-off and synergy relationships of ecosystem services can transform into each other. Under the background of continuously promoting the construction of ecological civilization in China, scientific regulation of ecosystem services trade-off and synergy in “the areas with extremely important ecosystem service functions” is of great significance for maintaining regional ecological security and promoting the sustainable supply of ecosystem services. Recognizing the long-time patterns of change in ecosystem service trade-off and synergy and their drivers is important for the scientific regulation of ecosystem services. However, there is lack of understanding of the drivers of ecosystem service trade-off and synergy and their non-linear impacts based on long-time sequence analysis. In this paper, we took “the areas with extremely important ecosystem service functions” in Wuhu City as a case study, considering three key ecosystem services, including habitat quality, carbon sequestration, and soil conservation, using multi-source data and pixel-by-pixel trend

基金项目:国家自然科学基金项目(52178050);上海同济城市规划设计研究院有限公司暨长三角城市群智能规划协同创新中心科研课题项目(KY-2022-YB-A04)

收稿日期:2023-04-13; **网络出版日期:**2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusong5@tongji.edu.cn

superposition analysis method to evaluate the change trend of ecosystem services and the spatial distribution of trade-offs in the region from 1990 to 2020. This paper also used the random forest model to explore the key drivers of ecosystem service trade-off synergy and its nonlinear impact effect. The results showed that: (1) In the past 31 years, the area where the habitat quality in Wuhu City had significantly declined was about twice the area that has increased, and there was a risk of further decline. At the same time, urban expansion led to a significant decline in carbon sequestration and soil conservation in the suburban fringes. (2) The supply capacity of ecosystem services in the study area was significantly affected by the trade-off and synergy, and the affected area accounted for 64.48% of the total area. Significantly spatial differences existed between trade-off affected areas and synergistically affected areas. The area affected by synergy was higher than the area affected by trade-off, and the area affected by synergy was concentrated in hilly areas with low negative impacts of human activities and good vegetation and hydrothermal conditions. (3) Land use intensity played a dominant role in transformation of the managed ecosystem service trade-offs to synergies. The impact of land use intensity on trade-off and synergy did not change linearly with the increase of land use intensity value, but showed nonlinear characteristics and had an impact threshold. When the intensity level was between weak and medium and tended to be weak, it had a positive effect on ecosystem services synergy.

Key Words: long-time sequence; ecosystem service trade-off and synergy; drivers; random forests

生态系统管理注重多种生态系统服务(ES)协同提升,以实现整体效益的最大化^[1]。但 ES 间不可避免的关联影响 ES 综合效益发挥。ES 权衡与协同(下文简称权衡协同)用以描述多种 ES 间的相互关联性。权衡指某些类型 ES 的供应提高而使其它类型 ES 降低的状况,协同指多种 ES 同时增高的情形^[2-3]。权衡协同产生于自然与社会驱动因素相互作用的复杂过程,其研判与特定空间规划管理要求紧密相关^[4]。研究表明,人类对权衡协同的关键驱动因素的管理和干预可以使权衡协同关系相互转化^[5-6]。因而,定量识别并调控权衡协同关键驱动因素及其影响效应,以弱化 ES 权衡并促进其协同增益,对 ES 有效管理至关重要。

权衡协同短期特征难以反映 ES 连续动态变化下的相互作用关系全景^[7],并易导致对其驱动因素的误判^[8]。对此,基于长时间序列 ES 权衡协同规律探索,将有助于提升驱动因素分析的可靠性^[9]。Aryal 等^[2]和 Ndong^[5]等通过系统性综述表明,当前缺乏基于长时间序列(>30 年)权衡协同驱动因素研究。此外,既有权衡协同驱动因素相关研究多聚焦影响因素线性驱动作用,缺乏对其非线性影响特征的分析^[10],而采用机器学习方法揭示非线性驱动作用是当前研究的热点。其中,随机森林模型因具备揭示驱动因素非线性作用、有效处理驱动因素多元共线性、具有较好解释性等方面的优势,正被愈来愈多应用于 ES 相关研究中^[11-12]。

“生态系统服务功能极重要区(下文简称极重要区)”是区域范围内保持并提高多种关键 ES 供应能力的最重要区域^[13]。保持该区域的 ES 综合效益最大化对维系区域生态安全及可持续供给关键 ES 意义重大^[14-15]。当前,极重要区相关研究多聚焦空间分区成果的拓展应用,如基于极重要区分析构建生态安全格局^[16]、优化生态用地保护格局^[17]、引导城镇建设用地空间分区优化^[18]等,而对如何促进区域多种 ES 协同增益讨论不足。

综上所述,本研究科学问题是:长时间序列 ES 变化趋势的背景下,影响权衡协同的主导驱动力及其非线性影响效应是什么?本研究以安徽省芜湖市极重要区为例,依据芜湖市自然本底与经济社会发展对 ES 的需求,以及上位规划的要求,选择生境质量、碳固定和土壤保持作为这一区域 ES 评估类型,并综合多源数据与模型,识别并评估该区 31 年间(1990—2020 年)权衡协同空间分布规律,运用随机森林模型探索权衡协同关键驱动因素及其非线性影响效应,以期为促进极重要区多种 ES 有效管理提供思路。

1 研究区概况

芜湖市(117°58′—118°43′E,30°38′—31°31′N)地处安徽省东南部,位于皖南山系至江淮平原过渡地区。

地势西南高东北低,间有洼地及少数丘陵,整体形态呈双翼状。地貌类型包括丘陵、平原和洼地。区域属于亚热带湿润性季风气候,光照充足,四季分明,水热条件良好。全年平均气温 15—16℃,平均降雨量约为 1200mm。芜湖市辖镜湖区、弋江区、鸠江区、湾沚区、繁昌区、无为市和南陵县七个县(市、区),人口为 373.1 万人,市域面积 6003.92km²(图 1)。

芜湖市是安徽省域副中心城市,也是长三角地区重要节点城市。自 20 世纪 90 年代以来,芜湖市经济进入快速发展阶段,同时 ES 供给伴随生态环境改变发生了显著变化。作为安徽省生态保护空间格局的关键节点,芜湖市如何有效管理生态系统,促进多种关键 ES 可持续供应,是当前亟需解决的问题。

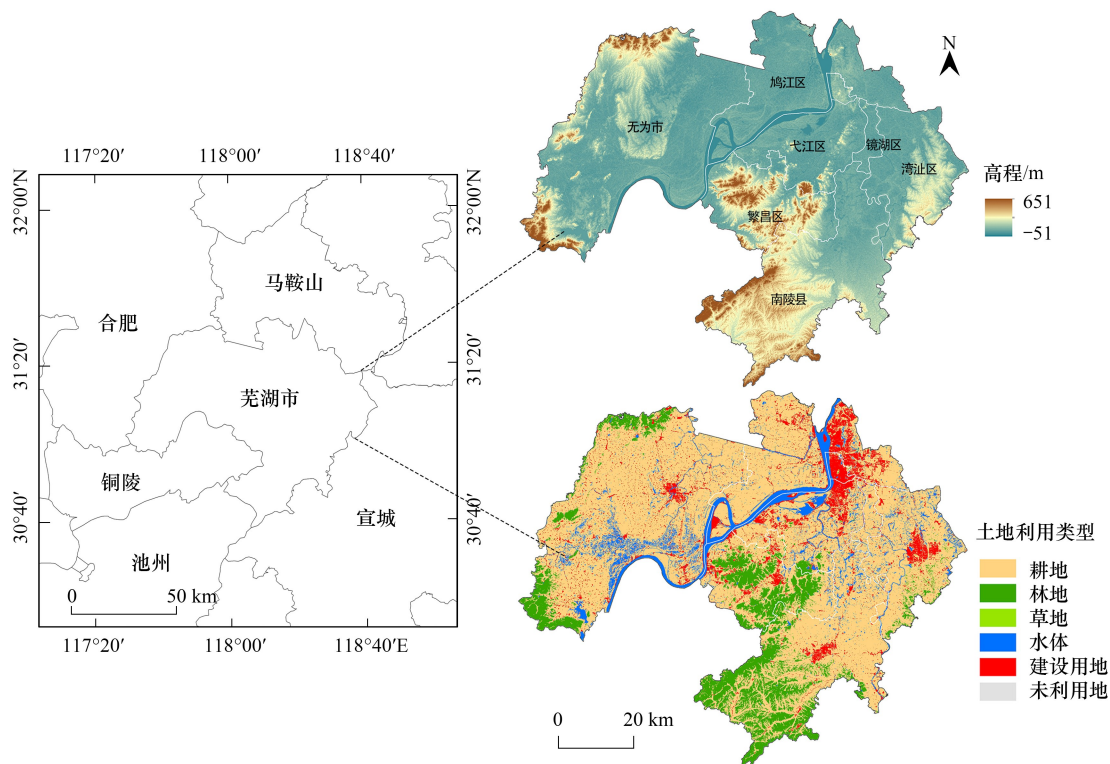


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 ES 评估数据来源与方法

本文所使用的数据如表 1 所示。

依据芜湖市地域特征以及《全国生态功能区划》和《芜湖市国土空间总体规划(2020—2035 年)》的要求选取生态系统服务,其评估方法见表 2。

2.2 权衡协同分析方法

首先,研究综合运用《生态保护红线划定指南》和《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南》推荐的方法(下文简称指南法)识别了芜湖市极重要区。并基于逐像元趋势分析结果的空间叠置法判断三类 ES 权衡协同,该方法不仅可解析研究时段像元尺度 ES 变化趋势特征^[24],还可以直观展示综合多种 ES 的权衡协同空间分异特征,有助于管理决策空间有效落位^[25]。

本研究采用逐像元一元线性回归趋势分析方法,模拟像元尺度 1990—2020 年连续 31 年三类 ES 年际变化趋势:

表 1 研究数据来源

Table 1 Data source of this research		
名称 Name	精度/m Resolution	来源及数据说明 Source
土地利用数据 Land use data	30	土地利用/覆盖数据来源于中国土地覆被数据集 (CLCD) 数据集 (https://zenodo.org/record/5210928#.YuXtgtBBw2y), 该数据空间分辨率为 30m。
土壤数据 Soil data	1000	土壤数据来源于世界土壤数据库的中国土壤数据集 (v1.2) (https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/3519536a-d1e7-4ba1-8481-6a0b56637baf/)。
气象数据 Meteorological data	27830	降水、气温等气象数据来源于谷歌地球引擎平台 (GEE) 的第五代欧洲中期天气预报中心大气再分析数据集 (ERA5)。
数字高程模型 Digital Elevation Model	30	数据来源于 GEE 平台的美国国家航空航天局数字高程模型 (NASADEM)。
归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index	30	以 GEE 平台 Landsat TM/ETM+遥感影像作为数据源, 通过 GEE Java Script API 接口调用 GEE 波段选择、波段合成、云掩膜、镶嵌等算法计算归一化植被指数。
基础地理信息 Basic geographic information	—	行政界线、河流等基础地理信息来源于芜湖市自然资源和规划局。

以上所有数据都基于 ArcGIS 软件, 转换为统一的投影坐标系 (WGS_1984_UTM_zone_50N), 并重采样为 30m 的空间分辨率

表 2 ES 评估方法

Table 2 Ecosystem Service Assessment Methods			
服务类型 Ecosystem service types	计算方法 Assessment method	计算公式 Calculation formula	变量说明 Variable specification
生境质量 Habitat quality (HQ)	InVEST 模型	$Q_{sj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z + k^z} \right) \right]$	D_{sj} 为生境胁迫水平; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜性; k 为半饱和常数, 为 D_{sj} 最大值的一半; z 为模型默认常数。生境胁迫水平计算参数参考相关文献 ^[19-20] , 并结合研究区实际情况赋值。
碳固定 Carbon sequestration (CS)	CASA 模型	$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t)$	t 表示时间, x 表示空间位, $NPP(x, t)$ 是 x 像元上的植被 t 年的净初级生产力 (gC/m^2); $APAR(x, t)$ 是 x 像元上植被在 t 年吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 是 x 像元上植被 t 年实际光能利用率 (gC/MJ)。以上参数参考相关文献计算得出 ^[21] 。
土壤保持 Soil conservation (SC)	RUSLE 模型	$SC = R \times K \times LS \times (1 - C - P)$	SC 为土壤保持量 (t/hm^2), R 为降雨侵蚀因素 ($MJ\ mm\ hm^{-2}\ h^{-1}\ a^{-1}$); K 为土壤可蚀性因素 ($hm^2\ hm^{-2}\ MJ^{-1}\ h^{-1}\ mm^{-1}$), LS 为坡长坡度因素 (无量纲); C 为植被覆盖因素 (无量纲), P 为水土保持措施因素 (无量纲)。以上参数参考相关文献计算得出 ^[22-23] 。

ES: 生态系统服务 Ecosystem Service; InVEST: 生态系统服务和权衡的综合评估 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs; CASA: 卡内基-阿梅斯-斯坦福方法 Carnegie-Ames-Stanford Approach; RUSLE: 修正的通用土壤流失方程 Revised Universal Soil Loss Equation

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times Y_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n Y_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)}$$

式中, Slope 为像元 Y_i 回归方程的斜率, 即 ES 变化趋势; i 为年变量; n 代表时间序列长度; Y_i 代表第 i 年的 ES 值。为了验证回归模型的有效性, 使用 t 检验对趋势进行显著性检验, 当 $P < 0.05$ 时, 认为趋势显著。

通过叠置趋势分析结果判断三类 ES 权衡协同, 具体步骤如下:

(1) 参考相关研究指标变化趋势分级方法^[26-27], 将 Slope 值划分为对应的 ES 变化趋势 (表 3)。

(2) ES 变化趋势空间叠置: 将三类 ES 变化趋势叠加, 其中趋势显著与非显著像元叠加为权衡协同非显著区。具体叠加分类规则如下:

$$\text{Code} = HQ \times 100 + CS \times 10 + SC \times 1$$

式中, HQ 、 CS 和 SC 分别表示各生态系统服务变化趋势的数字代码, Code 是 3 位数代码, 每一个代码序列都是 1 和 2 组合的像元值, 代表此像元三类 ES31 年间的综合变化状态。

表 3 ES 变化趋势分级

Table 3 Classification of ecosystem service change trend

显著性 Significance	斜率 Slope	变化趋势(数字代码) Trend of change (numeric code)
显著 Significant	0.01<Slope<最大值	增高(2)
	最小值<Slope<-0.01	降低(1)
不显著 Nonsignificant	—	非显著

-0.01<Slope<0.01 为趋势不变,因其与权衡协同划分无关,故不在此表中展示

(3)权衡协同分类标准:根据权衡与协同关系定义及三类 ES 综合变化状态制定权衡协同分类标准(表 4)。权衡指一种 ES 增高或降低而其它服务呈相反变化的状态。协同为三种服务一致增高的情况。

表 4 权衡协同划分标准

Table 4 Criteria of trade-off/synergy of ecosystem service

权衡协同类型 Relationship types	ES 变化趋势组合 Trend portfolio of ecosystem services changes	Code
权衡 Trade-off	1 增高 2 降低、2 增高 1 降低	221、121、211、122、121、112
协同 Synergy	3 增高	222

2.3 驱动因素分析方法

驱动因素选择方面,极重要区权衡协同结果反映了像元尺度 31 年间三种 ES 相互作用关系规律,相应的驱动因素也需要表达像元尺度长期变化情况。因而在数据可获得前提下,驱动因素需要符合以下筛选标准:(1)最小统计单元为像元(2)具有年际变化特征。参考相关研究成果^[28],本研究从气候及土地利用变化两个方面,选取温度、降水量、归一化植被指数和土地利用强度作为驱动因素分表征,其中土地利用强度计算方法参考相关文献^[29],并结合研究区实际情况赋值(表 5)。

表 5 土地利用强度赋值表

Table 5 The classification values of land use degree

土地利用类型 Land use types	林地、草地、水域、未利用地 Forestland, grassland, water area, Unused Land	耕地 Cultivated land	建设用地 Construction land
强度等级 Intensity level	弱	中	强
分级指数 Grading index	1	2	3

研究采用随机森林模型探索极重要区权衡协同驱动因素。随机森林模型由 Breiman 于 2001 年提出,是运用装袋法策略进行集成学习的典型代表。在本研究中,将极重要区权衡协同分类结果作为因变量,各驱动因素作为自变量,基于 R 语言 randomForest 包,采用随机森林分类模型分析各驱动因素对分类结果的相对重要性及影响效应,具体模型计算原理及公式见文献^[30]。

3 研究结果

3.1 ES 变化趋势空间分布格局

1990—2020 年间生境质量显著变化区域总面积为 944.03km²。其中,降低区域面积为 619.64km²,总面积占比约 10.32%。生境质量增高区域仅占总面积 5.40%,为 324.39km²。芜湖市域生境质量总体变化并不显著,但显著降低区域占比高于增高区,随着城市化快速推进和日益增强的人类活动干扰,芜湖市域生境质量存在进一步衰退的风险。生境质量供给趋势空间格局方面,降低区域主要分布于长江及沿岸地势较为平缓且人为活动密集的区域,如南陵县、无为市、繁昌区等七个市(县、区)行政中心及其周边地区。增高区域主要分布于南陵县南部及无为市与铜陵市交界的丘陵地区,该区域海拔位置较高,具有良好的自然本底和气候条件

(图 2)。

碳固定服务增高趋势区域面积为 3170.57km², 占总面积比例约 52.81%。其次是碳固定降低区域, 面积 689.24km², 占比约为 11.48%。31 年间芜湖市域生态系统碳固定显著增高与降低变化趋势明显, 趋势增高区约为降低区面积 5 倍且超过总面积一半, 表明芜湖市域植被和水热条件对植被净初级生产力(NPP)累积较为有利。碳固定趋势变化空间格局方面, 碳固定趋势降低区域主要分布于城市中心区向郊区蔓延的城市边缘地带, 以及沿江岸由林地耕地转为人工养殖塘的区域, 反映了人为干扰对 NPP 累积的负面影响。增高区域空间分布较为分散, 主要位于鸠江区北部、无为市西南和南陵县南部以林地及耕地为主要土地覆被类型的区域(图 3)。

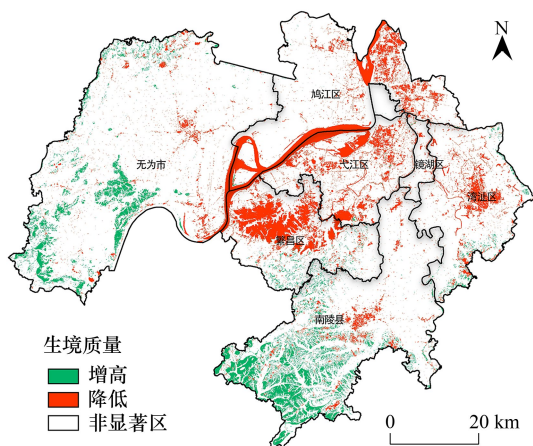


图 2 生境质量变化趋势空间分布格局

Fig.2 Spatial pattern of habitat quality change trends

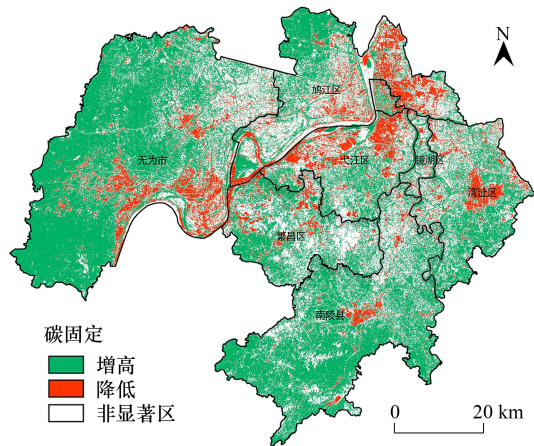


图 3 碳固定变化趋势空间分布格局

Fig.3 Spatial pattern of carbon sequestration change trends

土壤保持变化趋势区域面积占比与碳固定相似, 增高趋势面积为 3195.57km², 占总面积比例约 53.22%。其次是土壤保持降低区域, 面积 688.69km², 占总面积比例约 11.47%。1990—2020 年间芜湖市域生态系统土壤保持显著变化趋势明显, 增高趋势面积远高于降低趋势区域。除此, 增高与降低呈现差异化空间分布格局, 增高区域主要分布于植物覆被良好, 景观较为完整的无为市及南陵县丘陵林地地区, 而降低区域主要分布于城市及周边地区和地势较为平缓的农垦区(图 4)。

3.2 权衡与协同空间分布规律

基于指南法的极重要区识别结果如图 5 所示。极重要区面积为 757.06km², 市域总面积占比约 12.61%。其分布主要位于无为市西南与西北部、繁昌区中部及南陵县南部, 区域海拔较高, 以林地为主要用地类型, 人为干扰水平较低。作为生态保护红线划定的空间基础之一, 极重要区受权衡协同显著影响的区域面积为 488.17km², 达到该区面积的 64.48%(图 6), 其中三种服务存在权衡关系的区域面积占比为 9.16%, 协同区面积占比为 55.32%(表 6)。这表明权衡协同研究对该区域生态保护及未来 ES 综合可持续供应至关重要, 并且有必要对极重要区权衡协同空间分布特征及其背后驱动因素进一步分析, 为生态保护红线划定等生态系统管理政策的实施提供坚实基础。

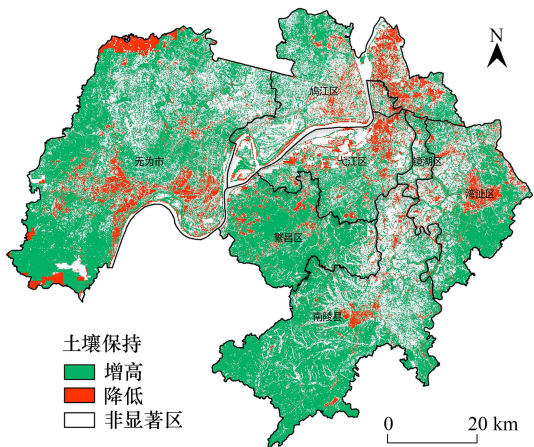


图 4 土壤保持变化趋势空间分布格局

Fig.4 Spatial pattern of soil conservation change trends

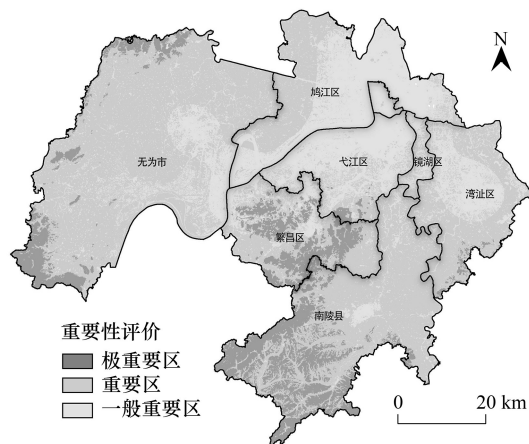


图 5 基于指南法的重要性评价成果

Fig.5 Importance evaluation results based on the guideline method

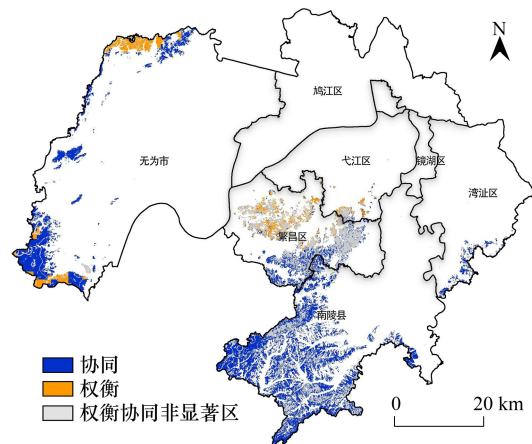


图 6 极重要区权衡协同空间分布

Fig.6 Spatial pattern of Trade-off and synergy area in Extremely important area

权衡区域主要分布于无为市和繁昌区。无为市极重要区权衡面积为 40.07km², 占比为 5.29%, 是芜湖市极重要区权衡面积最高的区县。其次是繁昌区, 极重要区权衡面积为 23.24km², 占比为 3.07%。权衡特征说明区域生态系统要素和结构驱动下的生态系统过程对特定类型 ES 供给的针对性和排他性, 使得三种服务间产生此消彼涨的状态, 例如繁昌区中部丘陵地区, 该区域生境质量降低, 但碳固定和土壤保持呈同时增高的状态(图 7)。协同区域集中分布于南陵县人类活动负面影响较低, 植被及水热条件良好的南部丘陵地区, 该县极重要区协同区面积为 249.97km², 占比为 33.02%。协同特征表明该区域的生态系统过程对三种 ES 同时具有提升作用, 需要重点保护。

表 6 芜湖市各区县极重要区权衡协同面积及比例

Table 6 Area and proportion of trade-off/synergy in extremely important districts and counties

区县名称 District and county name	极重要区面积/km ² Extremely important area	极重要区权衡面积/占比 Trade-off area and proportion in Extremely important area	极重要区协同面积/占比 Synergy area and proportion in Extremely important area
南陵县	365.91	1.43km ² /0.19%	249.97km ² /33.02%
无为市	179.93	40.07km ² /5.29%	114.42km ² /15.11%
繁昌区	179.76	23.24km ² /3.07%	39.78km ² /5.25%
湾沚区	15.59	0.91km ² /0.12%	12.33km ² /1.63%
弋江区	15.36	3.71km ² /0.49%	2.31km ² /0.31%
鸠江区	0.51	0.00/0.00%	0.00/0.00%
镜湖区	0.00	0.00/0.00%	0.00/0.00%
总计 Total	757.06	69.36km ² /9.16%	418.81km ² /55.32%

3.3 权衡与协同关键驱动因素及其影响效应

研究采用混淆矩阵测试模型精度。研究所构建的随机森林模型总体精度为 95.65%, kappa 系数为 83.45%, 均大于 80%, 模型分类准确度高, 因此可基于该模型对驱动因素的相对重要性进行测度。

利用平均精度下降(MDA)方法获取随机森林分类影响因素的重要性排序。该方法用以衡量把一个变量的取值变为随机数后, 随机森林模型预测准确性的降低程度, 该值越大表明该变量的重要性越大^[31]。MDA 值(无量纲)排序结果显示(图 8), 驱动因素重要性由高到低依次为分别为降水量、土地利用强度、温度和归一化植被指数。四类驱动因素 MDA 值存在明显差异, (1) 气候因素方面, 相比于温度, 降水是决定芜湖市极

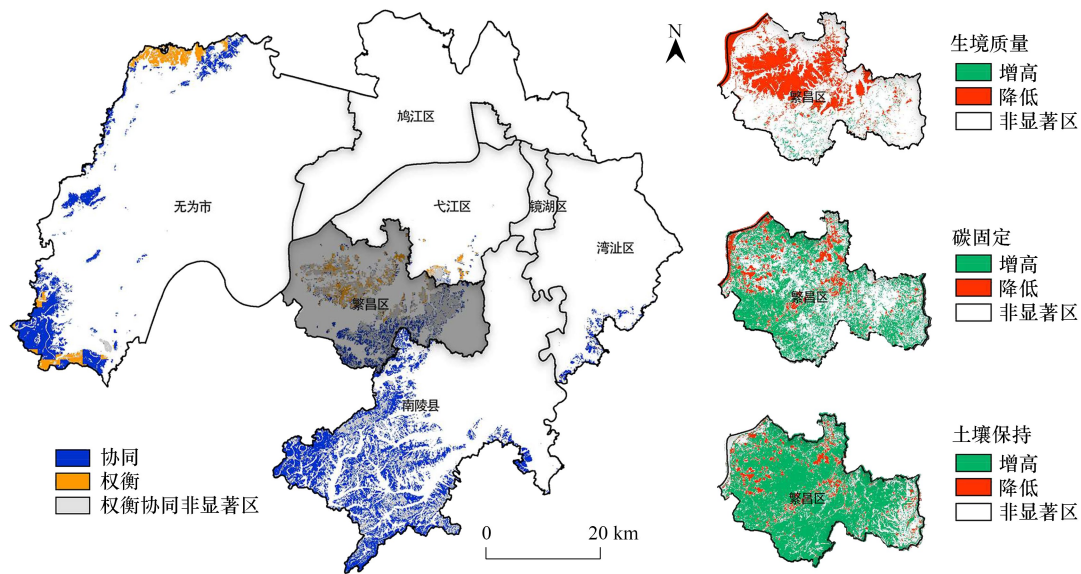


图 7 繁昌區生态系统服务变化趋势及其权衡协同

Fig.7 Change Trends and Trade-off/Synergy of Ecosystem Services in Fanchang District

重要区权衡协同区域分布的关键,这可能是降水比温度具有更高的空间异质性,因而对分类结果影响更大。(2)土地利用变化因素方面,土地利用强度重要性远高于归一化植被指数,表明在极重要区,三种服务能否协同增益取决于土地利用类型转化状态,而非植物覆被变化情况。这可能是由于该区域 31 年间土地利用类型大多在耕地和林地间转化,相比于耕地与林地分类强度指数变化差异,归一化植被指数变化程度较弱,对随机森林模型分类贡献有限。(3)此外,降水量和土地利用强度 MDA 值达 200 以上,远高于温度和归一化植被指数 MDA 值(两者都不足 100),因而降水量和土地利用强度可以被视作影响极重要区权衡协同转化的关键驱动因素。

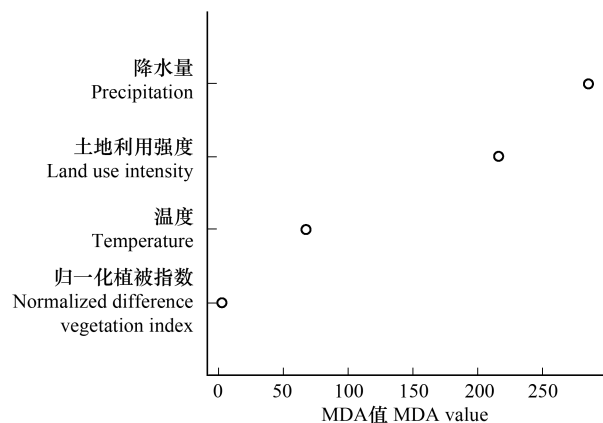


图 8 驱动因素相对重要性

Fig.8 Relative importance of drivers

MDA:平均精度下降 Mean decrease accuracy

“部分依赖图”(图 9)展示了关键驱动因素对权衡协同分类结果的偏效应,即对分类结果的影响程度。这里的偏效应指在随机森林算法中全面考虑了所有其他变量的影响后,计算出的一个自变量对因变量的影响。对于二分类变量,该影响以目标分类变量和非目标分类变量比值的 logit 转换为表征^[32],影响值越高表示分类为目标变量的数量越多。

图 9 中降水量和土地利用强度对权衡协同的出现存在复杂的非线性关系。尽管在 1400mm 降水量附近,极重要区分类为协同区域的像元数量出现下降,但从总体看,伴随降水量提升,分类为协同区域的像元数量增高而权衡像元数量下降,表明降水量提升对于三种服务协同增益具有促进作用。这可能由于降水量高值地区多分布于山地丘陵,远离城镇等威胁源,生境质量优且植被茂盛,固碳和阻滞侵蚀能力强,同时因高降雨量导致的土壤侵蚀风险可以被植被控制^[33]。

土地利用强度对权衡协同的影响并非随土地利用强度数值提升线性变化,而呈现明显的阶段特征,强度

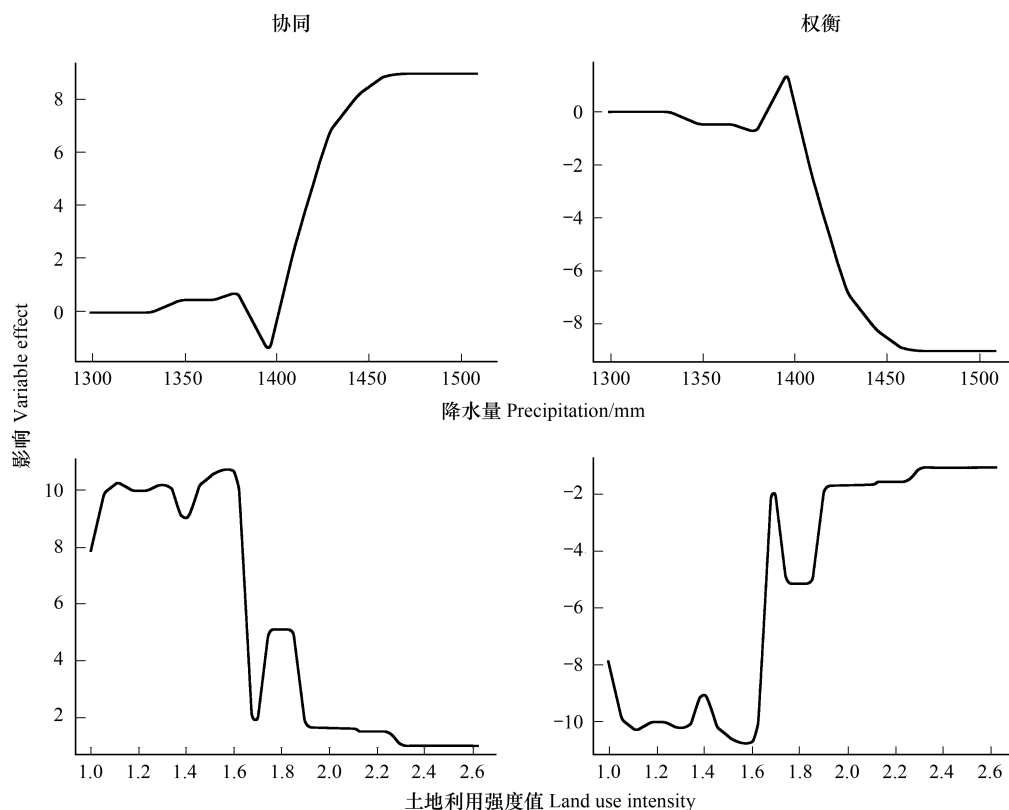


图9 关键驱动因素的部分依赖图

Fig.9 Partial dependence plots for key drivers

值在 1.0—1.6 之间(即强度等级介于弱与中且偏向弱强度)时有利于协同像元分类。当值约在 1.6 位置时,协同像元分类数量最高而权衡像元分类数量最低。而一旦强度数值超过 1.6 后,促进协同的正向影响快速减弱,经短暂提升后该正向影响在强度值大于 2 时逐渐稳步降至最低。相对应的,强度数值高于 1.6 后,分类为权衡的像元数量快速增多至最高。该结果表明,研究区权衡协同对土地利用强度变化的响应存在阈值,当强度等级介于弱与中且偏向弱强度时对三种服务协同增益具有积极作用。

4 讨论

4.1 土地利用强度对权衡协同管理的影响

削弱生态服务间权衡,促进其协同增益,对区域 ES 可持续高水平供给具有决定意义。气候和土地利用变化是驱动权衡协同转变的两个主要方面^[27]。由于很难在区域层面针对气候制定相应的管理策略,因而,通过调控土地利用变化以削弱权衡增进协同成为生态系统管理者和研究者的共识^[10]。本研究结果表明,土地利用强度对管理 ES 权衡协同转化具有主导决定力。这一结果与左丽媛等^[34]、Zheng 等^[35]研究结果一致。

土地利用变化通过改变生态系统组分和结构影响生态系统过程,再作用于服务供应及其相互作用关系^[36]。这种作用是复杂的,可能存在非线性变化和短期波动状态,静态或短期权衡协同分析结果难以为生态保护及管理提供可靠的决策支持。因而,从长时间序列角度把握权衡协同变化的全景特征是分析土地利用变化影响的关键。通过刻画 1990—2020 年间极重要区权衡协同规律和土地利用强度变化特征,本研究发现权衡协同对土地利用强度变化的响应是非线性的并且存在阈值。这与杨强强等^[29]认为的土地利用强度与 ES 价值协同增益呈线性负相关关系的结论存在差异,这可能是 ES 评估方法不同所导致。本研究采用 ES 物质质量评估法,后者采用价值量评估,而价值量评估法暗含了土地利用类型与 ES 供应间的线性关联,难以有效反

映服务间关系特征^[8]。

本研究中,像元的土地利用强度在 1.0—2.6 之间连续变化。当强度值为小数时表明 31 年间该像元土地利用强度在不同整数强度等级间波动,说明像元土地利用类型存在交替关系。具体的,在本研究区时段范围内以弱强度和中强度土地利用类型相互转化为主要特征,其中耕地和林地间转化是核心。这可能是受 2002 年后全国推行退耕还林,及 2017 年国务院《关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见》推出以来土地整治和拓补耕地政策的影响。

以土地利用强度等于 1.6 为阈值,ES 间协同向权衡关系转化表明,耕地与林地间的交替持续时间存在限度。具体的,在本研究中当林地持续时间大于等于 13 年,且耕地持续时间不超过 18 年时,像元三种 ES 保持协同关系,而当持续时间超越该限度,协同关系快速转变为权衡。这可能是由于极重要区所处丘陵地区耕地规模化生产活动弱于平原区域,且耕地以种植茶叶、山核桃等经济作物为主。此类农业生产内容和方式对导致生境质量、土壤保持和碳固定服务间权衡效应作用有限、且具有较长的时间滞后性。因而限定一定时期内的耕地林地转换关系,同时采取合理的耕作管理方式不会导致权衡,相反会对服务间协同产生积极作用。

根据最近一期(2020 年)芜湖市土地利用图统计显示,极重要区内耕地面积占比为 8.56%,林地面积为 91.12%,其他类型用地仅为 0.32%。在当前耕地保护的背景下,基于极重要区土地利用强度阈值特点,作者认为该区域生态系统管理应在保护林地生态系统同时立足丘陵地区耕地空间分散特征,避免耕地大规模连片开发。基于已有耕地宜农应农的前提下,实施耕地质量保护与提升行动,综合采取工程、生物、及轮作休耕等更加精细化的耕地管理措施促进生境质量、土壤保持及碳固定服务协同增益。

4.2 局限与展望

长时间序列权衡协同驱动因素分析,可以为空间规划管理策略提供更加可靠的依据。本研究基于长时间序列连续年期数据识别了影响权衡协同关系变化的关键驱动因子及其影响效应。但由于时间跨度长,研究数据可获得性不理想,只有四类驱动因素指标纳入本次研究,这可能限制了对其他潜在关键因素作用的理解。此外,在本研究中,运用逐像元分析方法表达了极重要区权衡协同时空间分布规律,并利用随机森林部分依赖图展示了土地利用强度对权衡协同转化的阈值范围,但这一分析成果还难以直接映射规划管理过程中的调控指标工具。针对上述不足,认为未来研究应将权衡协同驱动因素分析与空间规划实践紧密结合,筛选符合规划要求的可控指标作为备选潜在驱动因素,并基于地方性特征和规划实践导向进一步细化驱动因素作用机理,同时依托规划过程拓展多层次的数据获取渠道。

5 结论

本研究分析了 1990—2020 年间芜湖市“生态系统服务极重要区”的三种关键 ES 权衡协同时空分布规律及其内在驱动因素与影响作用。主要得到以下结论:

(1)长时间序列 ES 分析背景下,ES 变化趋势表现出明显的空间差异性。生境质量、土壤保持和碳固定服务增高趋势区多分布于海拔位置较高,具有良好自然本底和气候条件的区域。降低区主要分布于河岸两侧地势平缓的城市中心及边缘地区人为活动密集的区域。

(2)极重要区受权衡协同显著影响的面积数量大且空间分布广泛。有必要通过权衡协同驱动因素研究识别并管理促进权衡向协同转化的关键驱动力,以维系该区域多种 ES 可持续供给。

(3)权衡协同关系转化受气候和土地利用变化共同影响。降水量和土地利用强度是研究区权衡协同转化的关键驱动因素。其中,土地利用强度是管理 ES 权衡向协同转化的主导因素。土地利用强度对权衡协同的影响并非随土地利用强度数值提升线性变化,而是表现出非线性阶段特征并且存在影响阈值。

参考文献(References):

- [1] Zhao J, Li C. Investigating ecosystem service trade-offs/synergies and their influencing factors in the Yangtze River Delta region, China. *Land*, 2022, 11(1): 106.

- [2] Aryal K, Maraseni T, Apan A. How much do we know about trade-offs in ecosystem services? A systematic review of empirical research observations. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151229.
- [3] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [4] Zheng H, Wang L J, Wu T. Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes: a review of the approaches. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 82: 103-112.
- [5] Ndong G O, Therond O, Cousin I. Analysis of relationships between ecosystem services: A generic classification and review of the literature[J]. *Ecosystem services*, 2020, 43: 101120.
- [6] Wu S Y, Li S C. Ecosystem service relationships: formation and recommended approaches from a systematic review. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 1-11.
- [7] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [8] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [9] Yang Y, Li M W, Feng X M, Yan H M, Su M R, Wu M W. Spatiotemporal variation of essential ecosystem services and their trade-off/synergy along with rapid urbanization in the Lower Pearl River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108439.
- [10] Lyu R F, Zhao W P, Tian X L, Zhang J M. Non-linearity impacts of landscape pattern on ecosystem services and their trade-offs: a case study in the City Belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108608.
- [11] Manley K, Nyelele C, Egho B N. A review of machine learning and big data applications in addressing ecosystem service research gaps. *Ecosystem Services*, 2022, 57: 101478.
- [12] Zhang T J, Zhang S P, Cao Q, Wang H Y, Li Y L. The spatiotemporal dynamics of ecosystem services bundles and the social-economic-ecological drivers in the Yellow River Delta region. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108573.
- [13] 环境保护部, 国家发展和改革委员会. 生态保护红线划定指南(环办生态[2017]48). <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/W020170728397753220005.pdf>
- [14] 方一舒, 祖健, 艾东, 陈杰, 梁秋月. 面向国土空间规划的昆明市生态保护重要性评价. *中国农业大学学报*, 2021, 26(3): 152-163.
- [15] 朱立晨, 王豪伟, 唐立娜. 闽三角区域生态系统服务重要性评价及其空间分布. *生态学报*, 2018, 38(20): 7254-7268.
- [16] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(5): 1705-1715.
- [17] 李国煜, 林丽群, 罗栋荣, 王强. 福州市生态用地保护格局的优化途径. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 234-241.
- [18] 阮俊杰. 基于生态系统服务重要性的城镇优化管理——以福州沿海地区为例. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 186-190.
- [19] 聂名萱, 黄思华, 濮励杰, 朱明, 郗璐. 快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析——以苏锡常地区为例. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1088-1099.
- [20] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Liu J P, Hu H Z. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614.
- [21] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [22] Liu M, Bai X Y, Tan Q, Luo G J, Zhao C W, Wu L H, Hu Z Y, Ran C, Deng Y H. Monitoring impacts of ecological engineering on ecosystem services with geospatial techniques in Karst areas of SW China. *Geocarto International*, 2022, 37(17): 5091-5115.
- [23] 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(3): 821-838.
- [24] 陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价. *地理学报*, 2019, 74(3): 432-445.
- [25] Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, Li Y H. Multi-scale analysis of trade-off/synergistic effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(5): 981-999.
- [26] Vidal-Abarca M R, Suárez-Alonso M L, Santos-Martín F, Martín-López B, Benayas J, Montes C. Understanding complex links between fluvial ecosystems and social indicators in Spain: an ecosystem services approach. *Ecological Complexity*, 2014, 20: 1-10.
- [27] 石智宇, 赵清, 王雅婷, 张连蓬. 沂河流域植被覆盖时空演变及其与径流的关系研究. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 54-61.
- [28] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, Dittrich A, Hermans-Neumann K, Kaim A, Lienhoop N, Locher-Krause K, Priess J, Schröter-Schlaack C, Schwarz N, Seppelt R, Strauch M, Václavík T, Volk M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [29] 杨强强, 徐光来, 李爱娟, 刘永婷, 胡春生. 青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究. *生态学报*, 2021, 41(23): 9315-9327.
- [30] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [31] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用. *应用昆虫学报*, 2013, 50(4): 1190-1197.
- [32] 李欣海. 随机森林是特点鲜明的模型, 不是万能的模型. *应用昆虫学报*, 2019, 56(1): 170-179.
- [33] Wang H, Liu L B, Yin L, Shen J S, Li S C. Exploring the complex relationships and drivers of ecosystem services across different geomorphological types in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China (2000-2018). *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107116.
- [34] 左丽媛, 姜远, 高江波, 杜馥君, 张怡博. 生态保护红线区生态系统服务多维驱动力的定量分离. *地理学报*, 2022, 77(9): 2174-2188.
- [35] Zheng H N, Peng J, Qiu S J, Xu Z H, Zhou F, Xia P, Adalibieke W. Distinguishing the impacts of land use change in intensity and type on ecosystem services trade-offs. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115206.
- [36] Luo R, Yang S L, Wang Z Y, Zhang T M, Gao P Q. Impact and trade off analysis of land use change on spatial pattern of ecosystem services in Chishui River Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(14): 20234-20248.