

王晓燕, 聂磊, 胡淑恒, 等. 巢湖流域生态系统服务时空演变及其社会-生态驱动因子研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 1-19. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.001

WANG Xiaoyan, NIE Lei, HU Shuheng, et al. Research on spatiotemporal evolution of ecosystem services and their socio-ecological driving factors in Chaohu Lake Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 1-19. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.001

巢湖流域生态系统服务时空演变 及其社会-生态驱动因子研究

王晓燕¹, 聂磊², 胡淑恒¹, 许子牧¹, 吴丹舟^{1,2}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省工程咨询研究院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 【目的】在快速城市化和区域经济增长背景下, 研究生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)的时空演变及其驱动机制对区域的可持续发展至关重要。巢湖流域作为长江中下游的重要区域, 其生态系统服务具有显著价值。【方法】利用 InVEST 模型和空间自相关分析方法, 分析 2000 年、2010 年和 2020 年五类关键 ESs(碳储存、产水量、生境质量、土壤保持、水质净化)的时空变化格局, 通过自组织映射(Self-Organizing Map, SOM)方法将 ESs 簇划分为森林碳汇簇、水资源簇、综合生态簇和低服务簇, 并结合地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)探究社会-生态驱动因子的影响。【结果】结果表明, 碳储存和土壤保持功能在林地和草地显著增强, 水质净化功能在工业区周边提升明显。2000 年碳储存与生境质量协同指数在北部林地地为 0.87, 而 2020 年城市区域产水量与水质净化协同指数为 0.77。驱动因子由自然因子(NDVI 贡献为 98.12%)逐渐转向社会因子, 2020 年 GDP 和 POP 对水质净化和生境质量的贡献分别达 10.42%和 45.45%。【结论】城市化显著影响巢湖流域 ESs 的时空格局, 应结合驱动因子特征优化生态环境规划与保护策略, 平衡 ESs 的权衡与协同, 实现巢湖流域的可持续发展。

关键词: 生态系统服务(ESs); 社会-生态驱动因子; 权衡-协同关系; 空间格局; 巢湖流域

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.001

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0001-19



Research on spatiotemporal evolution of ecosystem services and their socio-ecological driving factors in Chaohu Lake Basin

WANG Xiaoyan¹, NIE Lei², HU Shuheng¹, XU Zimu¹, WU Danzhou^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

2. Anhui Engineering Consulting Institute, Hefei 230001, Anhui, China)

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2025-03-04; 录用日期: 2025-03-06; 网络出版日期: 2025-04-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32170183); 安徽省发展和改革委员会资助项目(W2023JSFW0526)

作者简介: 王晓燕(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态产品价值实现理论与实践路径相关研究。E-mail: 2495476677@qq.com

通信作者: 胡淑恒(1975—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水污染治理、生态环境修复和环境规划与管理相关研究。E-mail: hushuheng@hfut.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract [Objective] In the context of rapid urbanization and regional economic growth, studying the spatiotemporal evolution of ecosystem services (ESs) and their driving mechanisms is vital for regional sustainable development. The Chaohu Lake Basin, as an important area in the middle and lower reaches of the Yangtze River, has significant value in its ecosystem services. [Methods] Using the InVEST model and spatial autocorrelation analysis, the spatiotemporal variation patterns of five key ESs—carbon storage, water yield, habitat quality, soil conservation, and water purification—in 2000, 2010, and 2020 were analyzed. The self-organizing map (SOM) method was used to classify the ESs into four clusters: forest carbon sink cluster, water resource cluster, integrated ecology cluster, and low service cluster. The effect of socio-ecological driving factors was explored using geographically weighted regression (GWR). [Results] The result showed that carbon storage and soil conservation functions significantly increased in forests and grasslands, while water purification function notably improved around industrial areas. In 2000, the synergy index of carbon storage and habitat quality in northern forests was 0.87, whereas in 2020, the synergy index of water yield and water purification in urban areas was 0.77. Driving factors gradually shifted from natural factors (with normalized difference vegetation index (NDVI) contributing 98.12%) to social factors, with GDP and population (POP) contributing 10.42% and 45.45% to water purification and habitat quality, respectively, in 2020. [Conclusion] Urbanization significantly influences the spatiotemporal patterns of ESs in the Chaohu Lake Basin. It is essential to optimize ecological environment planning and conservation strategies based on the characteristics of driving factors, balance the trade-offs and synergies of ESs, and achieve sustainable development in the Chaohu Lake Basin.

Keywords: ecosystem services (ESs); socio-ecological driving factors; trade-off and synergy relationship; spatial pattern; Chaohu Lake Basin

0 引言

生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)在维持生态安全、促进区域可持续发展方面具有重要作用。城市化和工业化加速了土地利用变化,导致生态系统服务的供需失衡,影响生态系统的稳定性和人类福祉。近年来,全球和区域尺度的研究表明,碳储存(Carbon Storage, CS)、产水量(Water Yield, WY)、生境质量(Habitat Quality, HQ)、土壤保持(Soil Conservation, SC)、水质净化(Water Purification, WP)等关键ESs受到自然和社会因子的双重驱动,并呈现复杂的时空变化特征。巢湖流域作为长江中下游重要的生态功能区,其ESs在快速城市化过程中发生显著变化,亟需对其时空动态特征及驱动力机制进行深入研究,以支撑区域生态环境管理和可持续发展战略。

近年来,生态系统服务研究取得显著进展,研究内容涵盖生态服务供给、空间格局变化、权衡与协同关系及驱动机制分析^[1]。张徐等^[2]基于InVEST模型梳理了ESs评估中的热点模块(如生境质量、产水量、水土保持),突出该模型在空间化与动态化分析中的优势。张凌格等^[3]聚焦内陆河流域,通过梳理ESs的评估方法、影响机制及管理应用,提出了流域生态服务优化的管理框架。这些研究以模型化为主导,结合地理信息系统、遥感数据与统计分析方法,探索了不同区域生态系统服务的动态演变特征。郭宗亮等^[4]指出,当前研究逐渐向多尺度综合分析方向

发展,尤其在权衡与协同关系的量化分析及复杂驱动因素探索方面展现出重要趋势。国外在生态系统服务综合评估方面的研究也印证了这一结论。SANNIGRAHI等^[5]基于多尺度分析方法,研究了印度不同区域农业扩张对净生态系统服务价值的影响,揭示了土地利用变化对多种生态系统服务的时空异质性影响及其权衡关系,尤其在高强度农业区表现出显著的供给与调节服务冲突特征。SIMEON等^[6]研究了埃塞俄比亚Maze国家公园关键生态系统服务之间的权衡与协同关系,揭示了农业扩张对水资源供给、原材料供应和气候调节服务的权衡关系,强调了景观破碎化对生态系统服务供需关系的影响。这些研究表明,整合生态系统服务评估与土地利用规划是优化生态空间布局的有效手段。

在不同尺度上,生态系统服务研究展现出广泛应用与实践意义。在区域尺度,王赛超等^[7]基于InVEST模型量化了生境质量与碳储量等关键服务功能,结合生态保护红线划定与城市扩展限制,提出优化生态空间布局的科学建议。HARDAKER等^[8]研究了威尔士山区不同林地覆盖策略,发现共享土地模式(如农林混作)可提升碳储存和洪水风险缓解等生态系统服务,而完全林地化策略更有利于公共调节服务,但对粮食生产存在一定权衡。在流域尺度,丁菊等^[9]以权衡与协同关系为切入点,探索土地利用类型与人类活动强度对服务供需关系的影响,揭示了干旱半干旱地区农业扩展对水资源与土壤保持服务权衡

的显著影响。KOK 等^[10]研究了荷兰莱茵河流域不同河流管理策略下的生态系统服务权衡关系,发现单一功能化管理方案的生态系统服务供应能力较低,而更具综合性和多功能化的管理策略能够有效增强生态系统服务供给,同时在调节、供给和文化服务方面呈现较高的协同效应。然而,现有研究在多尺度综合分析中未深入考虑生态系统服务之间的权衡-协同关系的尺度效应,以及生态系统结构变动对生态系统服务影响的内在机制。

巢湖流域作为长江中下游地区的重要组成部分,其生态系统服务受快速城市化与人类活动的显著影响,呈现出复杂的时空动态变化特征。流域内水资源供给、土壤保持和碳储存等关键 ESs 的时空格局及其权衡与协同关系,不仅影响区域生态安全与可持续发展,还对优化生态保护政策与制定区域发展模式具有重要指导意义。当前,关于巢湖流域 ESs 空间格局变化方面的研究多局限于单一模型,未能全面揭示生态系统服务之间的动态权衡-协同机制,对不同功能区(如城市、农业、林地等)内的生态系统服务簇演变

特征关注较少,使得生态系统服务的空间异质性尚未被充分揭示,这给巢湖流域的生态保护和高质量发展带来了一定的阻碍。因此,本研究以巢湖流域为对象,结合 InVEST 模型与自组织映射(Self-Organizing Map, SOM)方法分析 2000—2020 年巢湖流域 ESs 时空变化特征,并划分生态系统服务簇,利用 GWR 模型揭示巢湖流域内不同区域 ESs 的权衡-协同关系。基于社会-生态驱动因子的空间异质性参数,定量分析各因子对 ESs 变化的独立贡献及交互贡献,以期为快速城市化背景下的巢湖流域生态服务管理提供建议和对策。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

巢湖流域位于安徽省中部,面积约 13 000 km²,地处 117°16'E—117°51'E, 30°56'N—31°25'N 之间,研究区概况如图 1 所示。巢湖流域在长江下游地区具有重要的生态、经济和社会功能^[11],涵盖湿地、森林、农田和城镇等多种生态系统,2000—2020 年巢

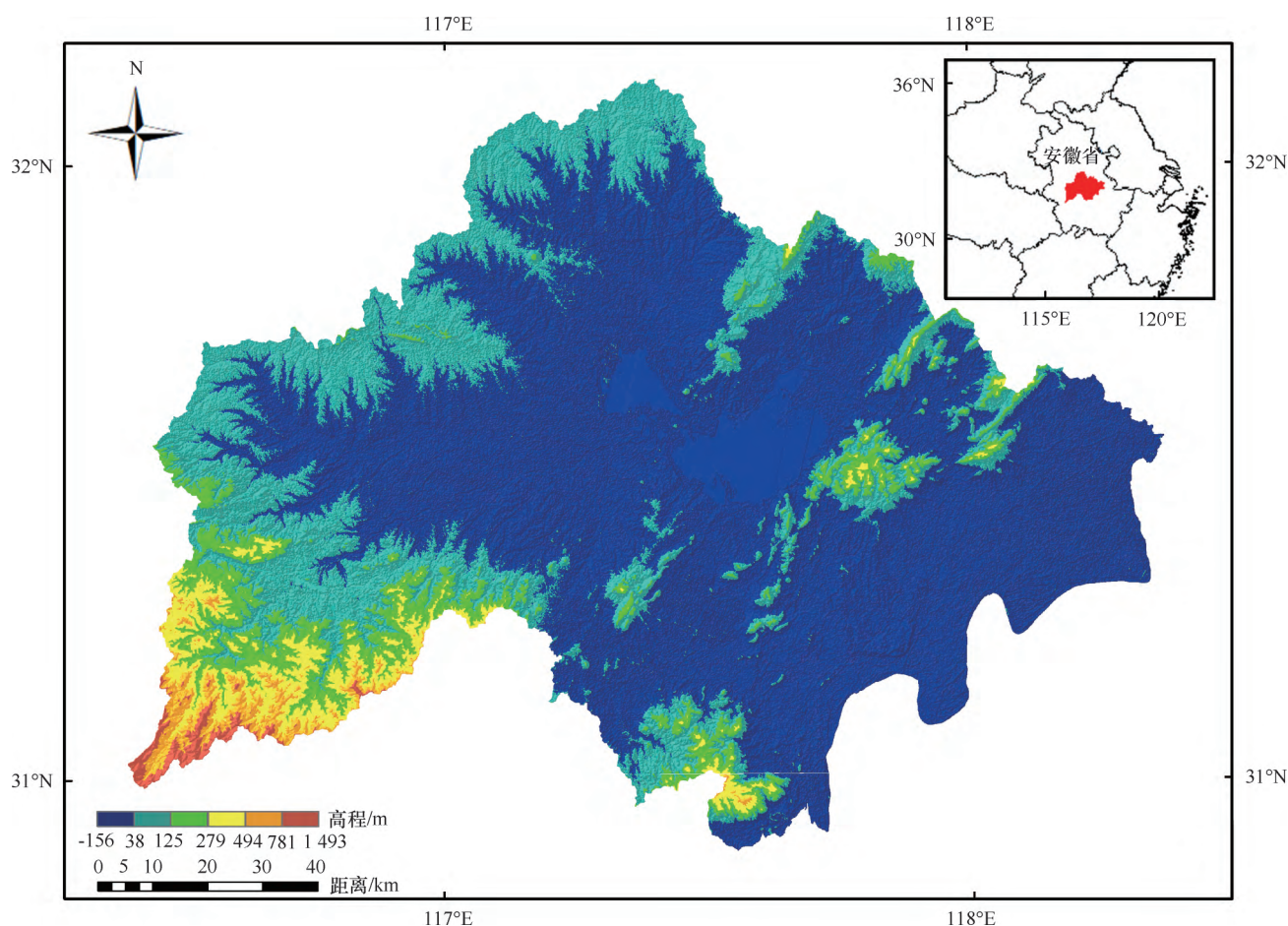


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

湖流域土地利用变化如图 2 所示。

1.2 数据来源及预处理

研究结合 2000 年、2010 年和 2020 年的月均和年均数据, 系统分析了巢湖流域 ESs 的时空变化, 数据来源如表 1 所列。土地利用数据来源于 GlobeLand30, 使用 ArcGIS 10.8 软件重分类为耕地、林地、草地、水域、未利用土地和城乡、居民、工矿用地六大类型^[12]。降雨量、潜在蒸散发和降雨侵蚀力数据来自国家地球系统科学数据中心, 通过插值法^[13]处理到研究区范围。NDVI 数据由 NASA 提供, 用于评估植被功能。DEM 数据来自地球科学数据系统, 用于计算高程等地形变量。社会经济数据包括人口密度和夜间灯光强度, 来源于世界人口数据集, 表

征社会活动特征。此外, 土壤和道路数据分别来自世界土壤数据库和中国科学院数据中心。所有数据统一投影为 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_39 坐标系, 为了保证数据的一致性, 采用最低分辨率匹配策略, 即所有数据均重采样^[14]至 1 km 分辨率进行计算。

1.3 研究方法

1.3.1 ESs 与 ESs 簇

采用 InVEST 模型与自组织映射方法, 旨在揭示巢湖流域生态系统服务的时空变化。InVEST 模型提供了多维度生态服务的量化评估, 并能够基于不同时间段展示流域内各类生态服务的空间分布与变化趋势。而 SOM 方法则通过无监督学习对生态服务进行聚类, 揭示不同服务类型在空间上的聚集效应, 进

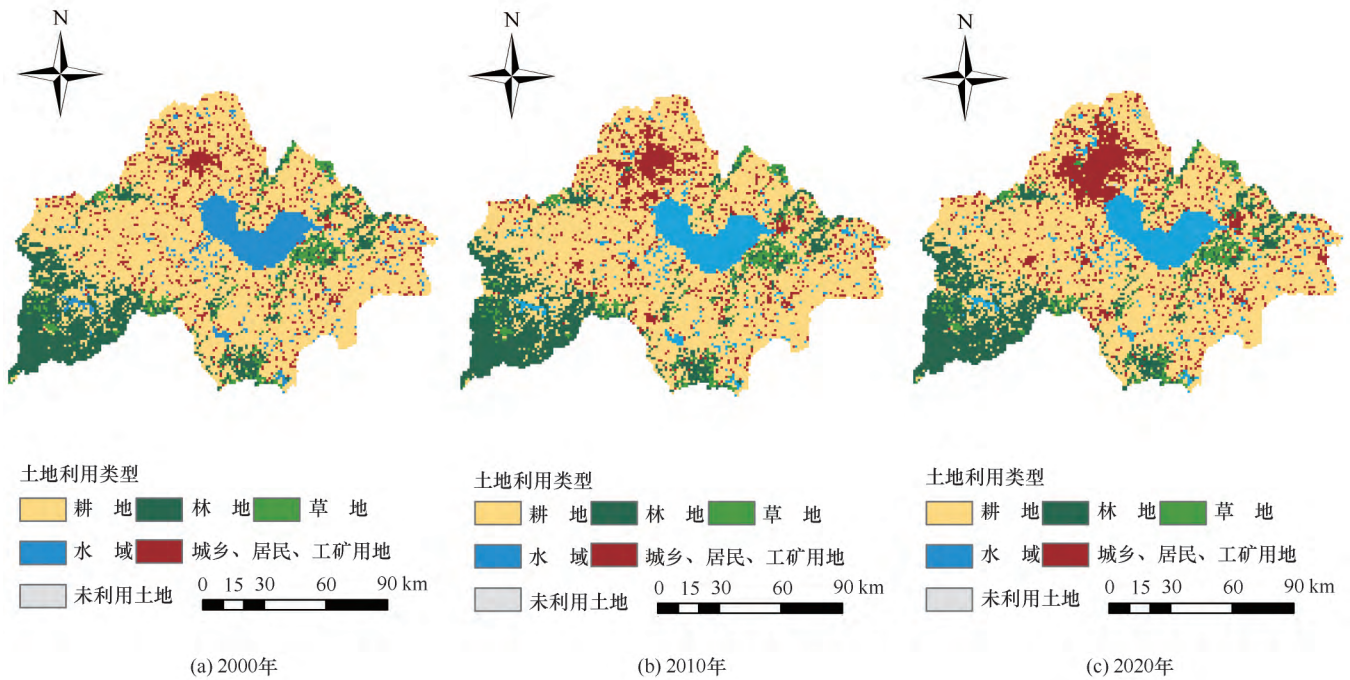


图 2 2000—2020 年巢湖流域土地利用变化

Fig. 2 Land use changes in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据	分辨率/m	数据源	访问链接
土地利用数据	30	GlobeLand30	http://www.globallandcover.co/
降雨量数据	1 000	国家地球系统科学数据中心	http://www.geodata.cn/
潜在蒸散发数据	1 000	国家地球系统科学数据中心	http://www.geodata.cn/
植物可用水分含量数据	1 000	世界土壤数据库	https://gaez.fao.org/pages/hwsd
道路数据	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心	http://www.resdc.cn
降雨侵蚀力数据	1 000	欧洲土壤数据中心	http://esdac.jrc.ec.europa.eu/
归一化植被指数 NDVI	30	美国国家航天局 NASA 官网	http://www.nasa.gov
年平均温度数据	1 000	国家地球系统科学数据中心	http://www.geodata.cn/
社会经济数据	1 000	世界人口数据集	http://www.worldpop.org/
DEM 数据	30	地球科学数据系统 (ESDS) 计划	https://www.earthdata.nasa.gov/esds

一步分析生态服务的协同与权衡关系。这一结合能够弥补单一方法的局限,尤其在分析复杂的社会-生态交互机制和时空演变时具有显著优势。

通过多年遥感监测和数据分析,研究发现巢湖流域内生态系统服务(ESs)发生了显著变化。本研究选取了五种关键的ESs——碳储量(CS)、产水量(WY)、生境质量(HQ)、土壤保持(SC)和水质净化(WP),以评估流域的生态系统状况,并揭示其复杂的时空变化关系。巢湖流域是典型的湖泊-湿地生态系统,具有较强的水资源调节和生物多样性维持功能,因此本研究重点关注了与水资源供应、土壤保持和生境质量密切相关的调节服务(如WY、WP、SC)。同时,巢湖流域面临严重的水污染、土壤侵蚀和碳排放问题,碳储存(CS)能够表征植被对碳汇功能的贡献,水质净化(WP)则反映流域污染削减能力,二者均对区域生态安全至关重要。尽管粮食生产等供给服务和旅游康养等文化服务在生态系统中同样重要,但这些服务难以通过InVEST模型进行高精度量化,且缺乏长时间序列的遥感数据支持,因此未纳入本研究范围。已有研究表明^[15],在快速城市化背景下,巢湖流域的生态系统服务变化主要集中在水资源调节、土壤保持和碳储存方面^[16],因此本研究选择上述五种服务,以更具针对性地探讨其时空演变及其驱动机制。

采用InVEST模型(3.14.1版本)的碳储存模块、年产水量模块、生境质量模块、泥沙输移比模块和营养输移比模块计算五种ESs。

(1) 碳储存模块。通过整合土地利用类型与碳库数据,评估栅格单元的地上、地下及土壤碳储存^[17]。其原理是基于土地覆盖与碳储库类型的匹配,量化不同生态系统对碳储存的贡献,从而评估其缓解气候变化的能力。计算公式如下

$$CS = A \times (C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}) \quad (1)$$

式中, A 为每种土地利用类型的面积(m^2); C_{above} 、 C_{below} 分别为地上、地下生物量(t/hm^2); C_{soil} 、 C_{dead} 分别为土壤、死亡有机质碳密度(t/hm^2)。

(2) 年产水量模块。基于水量平衡原理,假设栅格单元的年降雨总量减去蒸散发量即可表示该单元的产水量^[18],该公式通过考虑降水与蒸散发的比例关系,揭示了土地覆盖对区域水资源供应的贡献。计算公式如下

$$WY = \left(1 - \frac{AET}{P}\right) \quad (2)$$

式中, AET 为年平均蒸发量(mm); P 为年平均降水

量(mm)。

(3) 生境质量模块。以生态学中“退化-适应性平衡”为核心,综合评估土地利用变化和威胁因子对生态系统生境适宜性的影响^[19],该公式通过衡量威胁因子的累积效应及其对生境质量的退化程度,计算栅格的相对健康程度。计算公式如下

$$HQ = H \times \left(1 - \frac{D}{D + K}\right) \quad (3)$$

式中, H 为生境适宜性; D 为生境退化程度; K 为半饱和常数,设置依据InVEST模型用户指南推荐值,取0.5。

(4) 土壤保持模块。通过泥沙输移比模块评估,用以量化土地利用对土壤侵蚀和沉积过程的影响^[20],该公式结合通用土壤流失方程(USLE)和流域沉积比,模拟土壤流失及其保持的动态平衡过程。计算公式如下

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (4)$$

式中, R 为降雨侵蚀系数 $[MJ \cdot mm(hm^2 \cdot h \cdot a)^{-1}]$; K 为土壤可蚀性因子 $[t \cdot hm^2 \cdot h(MJ \cdot hm^2 \cdot mm)^{-1}]$; LS 为坡长梯度因子; C 为植被覆盖管理因子; P 为水土保持措施因子;阈值流量累积、Borselli K 参数、最大SDR值、Borselli IC_0 参数、最大 L 值设置依据InVEST模型用户指南默认值,分别取1 000、0.5、0.8、0.5和122。

(5) 水质净化模块。基于营养物负荷模型,模拟土地利用类型对水质净化的贡献。其核心原理是通过养分平衡公式,计算土地覆盖对氮、磷等污染物的吸收和滞留能力。计算公式如下

$$WP = L_{surf} \times NDR_{surf} + L_{subs} \times NDR_{subs} \quad (5)$$

式中, L_{surf} 、 L_{subs} 为地表、地下营养物负荷量(kg/hm^2); NDR_{surf} 、 NDR_{subs} 为地表、地下营养物传输率;营养物质径流代理栅格数据使用年降水量栅格数据代替;阈值流量累积、Borselli K 参数设置依据InVEST模型用户指南默认值,分别取1000和2。

将不同年份的ESs数据同时导入R语言(4.4.1版本)中,并使用-kohonen-包^[21]进行自组织映射分析,将高维数据降维并聚类为具有相似特征的ESs簇。通过聚类分析识别不同类型的ESs组合特征,揭示巢湖流域内生态系统服务空间格局的差异,为区域生态保护与管理提供参考。根据ESs聚类特征,将4个簇命名为森林碳汇簇(B1簇)、水资源簇(B2簇)、综合生态簇(B3簇)和低服务簇(B4簇)。森林碳汇簇以CS和HQ为主,主要反映自然区域在碳汇和生态保护功能中的优势;水资源

簇以 WY 和 WP 为主, 主要分布在水资源相关生态功能突出的区域; 综合生态簇的生态服务水平中等, 各生态服务较为均衡, 尤其是 CS 和 SC 表现突出; 低服务簇的生态服务功能均处于较低水平, 多分布在工业化和城市化影响显著的区域, 体现了生态系统的退化特征。自组织映射^[22]的具体参数设置为: 网络拓扑结构采用 2×2 的矩阵, 训练时将 3 个年份的数据同时输入, 训练半径为 1, 学习率和迭代次数采用 SOM 模型的默认设置。为了优化聚类结果并减少碎片化, 进一步使用 K-means 算法对 SOM 结果进行优化, 设置聚类数为 4, 并使用 ARCGIS (10.8 版本) 中的融合工具合并具有相同属性的相邻点, 进一步减少簇的空间分散性, 使簇的空间分布更加紧凑。通过对比 2000—2020 年 ESs 簇的分布, 揭示其动态变化及空间范围的变化趋势, 为分析驱动因素和分区管理提供参考。

1.3.2 ESs 空间自相关性

全局空间自相关分析通过莫兰指数 (Moran's I) 来衡量 ESs 的整体空间分布模式。莫兰指数值范围为 $-1 \sim 1$, 正值表示空间正自相关, 即相似的 ESs 值趋向于聚集在一起; 负值则表示空间负自相关, 即不同的 ESs 值倾向于分散分布。莫兰指数^[23]的显著性检验用于评估空间相关性的显著性水平, 具体计算过程基于 ArcGIS (10.8 版本) 进行。通过计算 WY、CS、HQ、SC 和 WP 的莫兰指数, 评估各 ESs 在巢湖流域的整体空间格局。

在全局分析的基础上, 局部空间自相关分析进一步识别出 ESs 的热点、冷点及异常值区域, 揭示巢湖流域内不同区域的空间相关性差异。采用高低聚类分析^[24] (Getis-Ord G_i^*) 和聚类及异常值分析 (Anselin Local Moran's I), 具体分析步骤使用 ArcGIS (10.8 版本) 中提供的工具模块, 空间关系概念化选择边缘与角点邻接^[25] (共享边界、节点或重叠的面要素会影响目标面要素的计算), 并统一进行标准化处理。通过高低聚类分析^[26] 识别出 ESs 的显著聚集区域, 如 ESs 值较高的“热点”区域和 ESs 值较低的“冷点”区域。聚类和异常值分析进一步揭示了不同区域内的高-高聚类区、低-低聚类区以及异常值区 (高-低或低-高), 以分析这些空间格局的形成原因和 ESs 的差异性。

1.3.3 ESs 权衡-协同关系

使用 R 语言 (4.4.1 版本) 的 `-corrplot`-包^[27] 计算五种 ESs (WY、CS、HQ、SC 和 WP) 之间的权衡-协同指数 (Trade-off and Synergy Index, TSI), 以评估

ESs 全局尺度上的权衡和协同关系。通过定量分析, 识别出关键的权衡或协同关系, 为后续空间分析提供依据。在数据处理过程中, 确保数据的标准化和一致性, 并对异常值进行剔除, 以提高分析结果的稳健性和可解释性。然而, 尽管整体上表现为协同关系, 但在局部区域, 城市化、土地利用变化等因素可能会导致某些 ESs 之间出现权衡关系。基于此, 进一步利用地理加权回归 (Geographically Weighted Regression, GWR) 模型^[28] 分析这些关系的空间异质性, GWR 模型的构建与参数设定在 ArcGIS (10.8 版本) 环境中完成, 核类型选择固定带宽, 带宽优化依据 AICc 准则, 确保空间回归分析的精确性与可重复性。此外, 对回归系数进行了 T 检验^[29], 利用 T 值的显著性判断 ($|T| > 2$ 表示显著, $|T| \leq 2$ 表示不显著) 对结果进行了显著性分类, 不显著区域以灰色标注, 显著区域根据回归系数的大小和方向分别以红色 (权衡) 和蓝色 (协同) 表示。GWR 模型展示了巢湖流域 ESs 之间的局部关系及其随空间变化的动态特征, 揭示了不均衡的空间分布及潜在的区域差异。

1.3.4 ESs 社会-生态驱动因子

为了探讨社会-生态驱动因子对巢湖流域 ESs 的影响, 针对巢湖流域独特的湖泊-湿地系统与农业强化格局, 选取四大类共 8 个驱动因子^[30], 包括植被因素: 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、潜在蒸散发量 (Evapo Transpiration Potential, ETP); 气候因素: 年均温度 (Temperature, TMP)、年降水量 (Precipitation, PRE); 社会经济因素: 人口密度 (Population, POP)、国内生产总值 (Gross Domestic Product, GDP)、夜间灯光强度 (Nighttime Light, NTL); 地形因素: 高程 (Elevation, EL)。本研究将人口密度 (POP)、夜间灯光强度 (NTL) 和国内生产总值 (GDP) 作为表征城市化进程的核心驱动因子, 以反映城市化和人类活动的潜在影响。为进一步区分社会系统和生态系统对 ESs 的独立贡献, 驱动因子被划分为两大体系: 生态驱动因子 (NDVI、ETP、TMP、PRE、EL) 和社会驱动因子 (POP、GDP、NTL)。为确保所选驱动因子之间不存在多重共线性问题, 对自变量进行了方差膨胀因子 (VIF) 分析^[31], 结果如表 2 所列。根据 VIF 值的标准 (通常认为 $VIF > 10$ 表示存在严重共线性问题), 结果表明大多数驱动因子的 VIF 值较低, 说明变量间的多重共线性较弱, 不会对回归模型产生明显影响。

使用 R 语言 (4.4.1 版本) 及其相关包 (`corrplot`、

表2 驱动因子的多重共线性检验

Table 2 Multicollinearity test of driving factors

驱动因素	VIF 值(2000年)	VIF 值(2010年)	VIF 值(2020年)
NDVI	1.231	1.219	1.231
ETP	1.392	1.337	1.392
TMP	1.438	1.404	1.438
PRE	1.312	1.315	1.312
POP	4.464	3.364	4.464
GDP	4.311	5.200	4.311
NTL	1.650	5.200	1.650
ELE	1.520	1.419	1.520

Hmisc) 对数据进行处理和相关性分析。首先, 通过 `-readxl-` 包读取 ESs 数据, 并检查数据结构以确保数据的完整性。针对数据中的缺失值, 使用均值填补方法, 以确保分析结果的稳健性。为探讨 ESs 与社会-生态驱动因子之间的关系, 利用 Spearman 相关系数计算各驱动因子对 ESs 的相关性, 并通过 `-corrplot-` 包绘制相关性热图^[32]。热图采用圆圈法展示相关系数大小, 并结合不同颜色标注 *P* 值范围, 以直观呈现各变量之间的关系。进一步地, 为验证相关性的显著性, 计算了 Spearman 相关矩阵的 *P* 值及置信区间, 并通过可视化手段展示显著性检验结果。

为明确社会系统与生态系统对 ESs 的相对贡献, 通过回归模型计算生态因子决定系数 (R_1^2) 和社会因子决定系数 (R_2^2)。通过标准化回归系数, 进一步量化各因子的相对贡献。同时, 定义交互贡献 (*CR*), 以综合模型决定系数 (R_0^2) 中未被生态因子和社会因子单独解释的部分为衡量指标, 计算公式如下

$$CR = 1 - \frac{R_1^2 + R_2^2}{R_0^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中, R^2 为驱动因子对 ESs 变化的解释能力。

2 结果与分析

2.1 ESs 及 ESs 簇的时空格局演变分析

2000—2020 年巢湖流域 ESs 空间格局变化如图 3 所示, 2000 年巢湖流域 ESs 主要由自然生态系统主导。CS 和 HQ 的高值区集中在北部和西部的林地和草地, 这些区域生态条件较好, 生态服务功能较强。SC 也在这些区域表现出较高值。而 WY 和 WP 高值区集中于城市 and 工矿用地, 反映了这些区域对水资源的需求和水质净化的压力。2010 年, 随着城市化的加剧, 城市扩展对 ESs 的影响日益显著。CS 和 HQ 的高值区逐渐缩小, 尤其是在城市扩展区域, 自然生态系统的服务功能明显受损。与此同时, 城市区域的

WY 和 WP 的高值区进一步扩大, 显示了城市化对水资源需求的增加。2020 年, 城市化进程加剧, CS 和 HQ 的高值区进一步缩小, 特别是在城市和工业扩展区域, 生态服务功能受到进一步压缩。CS 和 HQ 的高值区在城市和工矿用地周边继续扩展, 显示了城市化带来的水资源需求和水质净化压力的增加。

合肥市作为巢湖流域的核心城市, 其周边的生态系统服务演变清晰地反映了城市化进程对区域生态服务的影响。合肥市周边区域在过去 20 a 中产水量和水质净化需求显著增加, 碳储存和土壤保持功能逐渐被挤压。反映出城市中心区扩展和工业发展对水资源服务的迫切需求。巢湖北部林地区域的生态服务高值区则主要表现在土壤保持和碳储存方面, 提供了较为稳定的生态系统服务。

通过自组织映射分析, 识别了 2000—2020 年巢湖流域的 ESs 簇, 并探讨其时空特征, 2000—2020 年巢湖流域 ESs 簇空间格局变化如图 4 所示。2000—2020 年间, 巢湖流域 ESs 簇的空间格局经历了显著变化, 反映出城市化和工业化对生态系统服务的深远影响。2000 年, 巢湖流域以自然生态系统为主导, B1 簇(森林碳汇簇) 主要分布在林地和草地区域, 体现了碳储量(CS) 和生境质量(HQ) 的突出功能, B2 簇(水资源簇) 则围绕巢湖水域呈点状分布, 反映了水资源服务的重要性, 而 B3 簇(综合生态簇) 覆盖部分耕地和过渡性生态区域, B4 簇(低服务簇) 则集中在受工业化和城市化影响较大的区域, 生态服务功能较低。随着 2010 年城市化进程加快, B1 簇的范围进一步向林地和草地集中, 显示出自然生态系统在土地利用变化中的收缩趋势; 与此同时, B2 簇围绕水域的点状分布范围扩大, 表明水资源服务的重要性随着人类活动的加剧而提高, 而 B3 簇在耕地和过渡区域的覆盖面积增加, 综合生态服务的作用进一步凸显, 但 B4 簇范围迅速扩展, 特别是在城市和工业集聚区, 反映了城镇化对生态系统服务功能的冲击。到 2020 年, 城市化和工业化的加速重塑了 ESs 簇的空间格局, B1 簇的范围进一步缩小, 集中于林地和部分自然保护区, 显示出自然区域服务功能的进一步收缩, 而 B2 簇的分布更加集中于水域和农业区, 凸显了农业和生态保护中水资源服务的重要性; 同时, B3 簇的分布范围缩小并更多集中于农业区, 服务的多样性有所下降, 而 B4 簇在城市和工业区的范围持续扩大, 进一步揭示了低服务区域扩张对生态系统功能的威胁。这些变化突出了巢湖流域在快速城市化和工业化背景下, 生态系统服务格局的动态演变以及

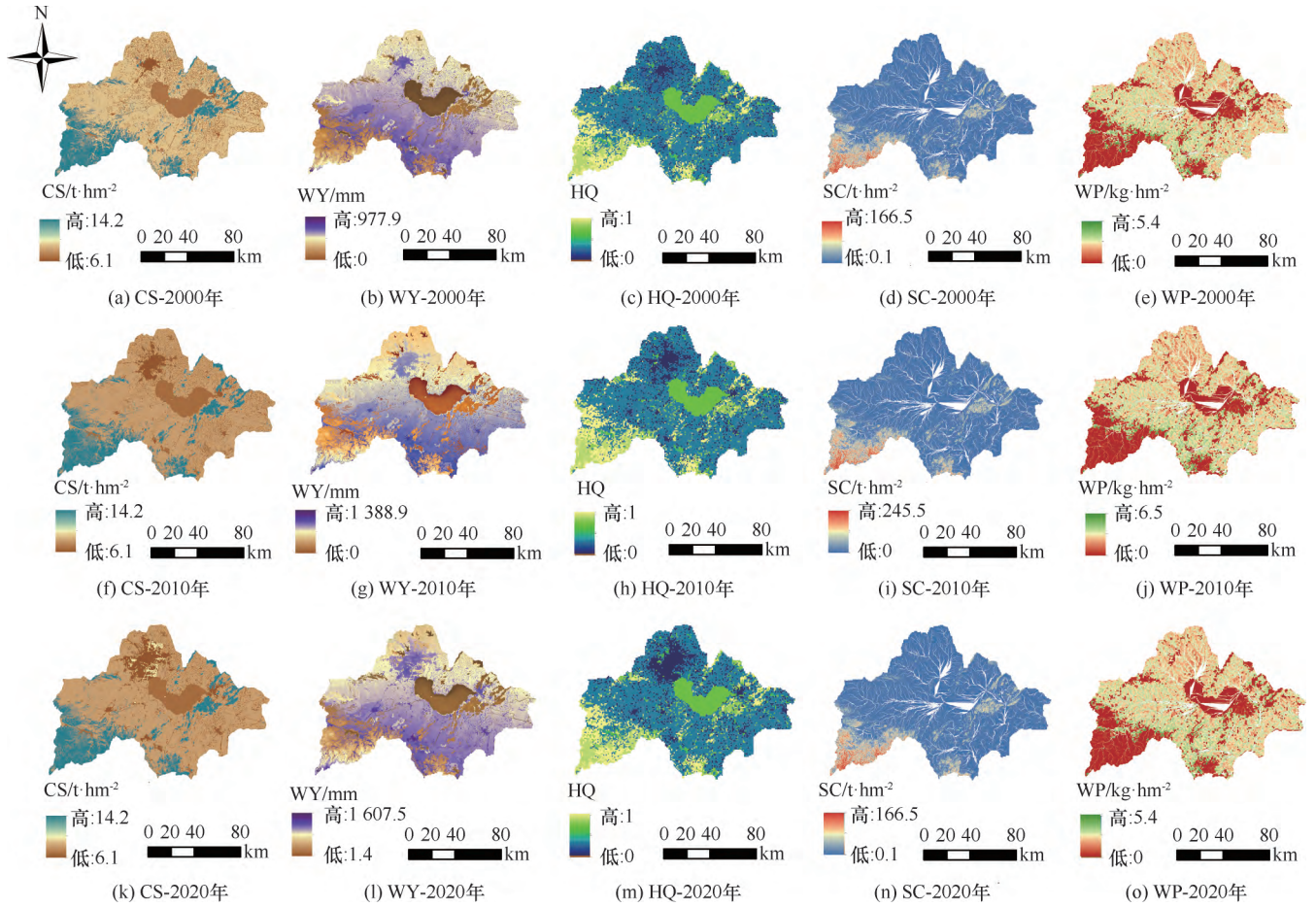


图 3 2000—2020 年巢湖流域 ESs 空间格局变化

Fig. 3 Spatial pattern variations of ESs in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

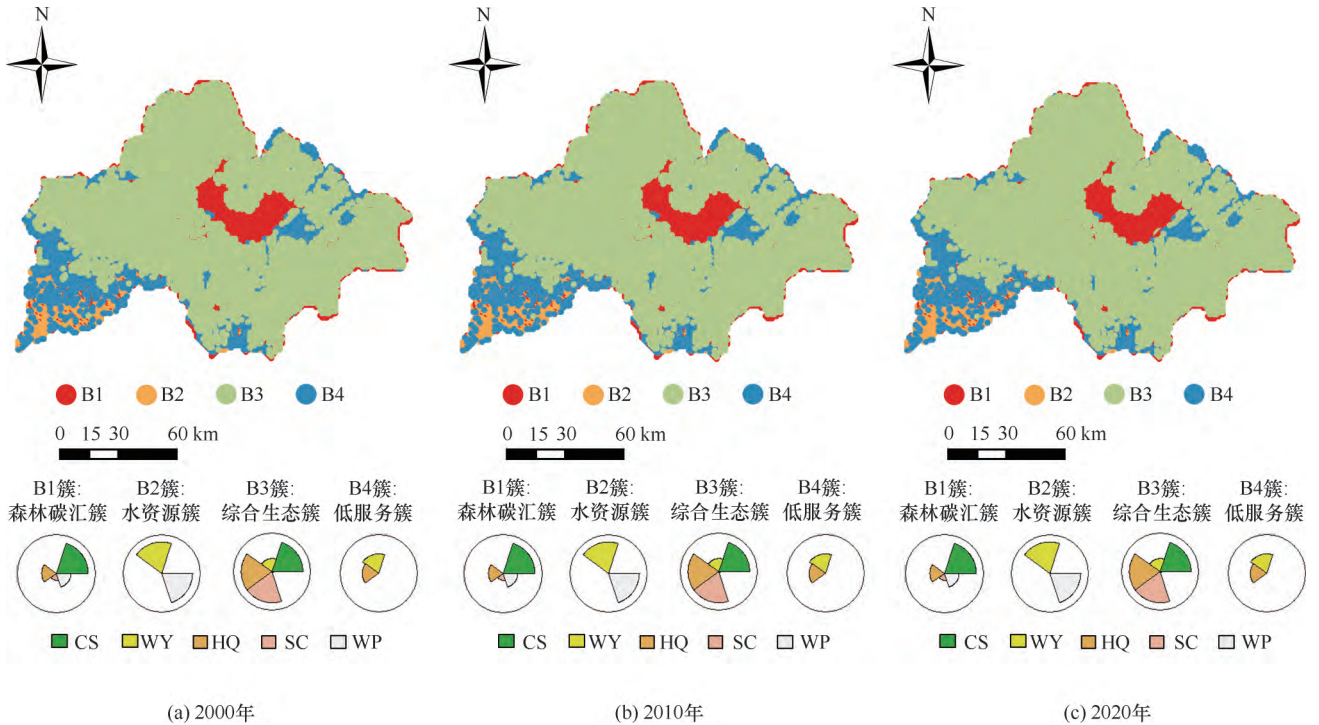


图 4 2000—2020 年巢湖流域 ESs 簇空间格局变化

Fig. 4 Spatial pattern variations of ESs clusters in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

人类活动对区域生态功能的深刻影响。

整体来看, 2000—2020 年巢湖流域 ESs 簇的空间格局变化反映了城市化、工业化对生态系统服务功能的深远影响。森林碳汇和水资源相关簇(B1 和 B2) 在城市扩展的压力下逐步缩小, 而低服务簇(B4) 的快速扩张对区域生态功能构成了重大挑战。这一结果为区域生态管理和土地利用规划提供了重要参考, 强调在城市化和工业化进程中加强自然生态系统保护与恢复的必要性。

2.2 ESs 空间自相关性分析

通过全局空间自相关性分析和高低聚类分析, 揭示了巢湖流域 ESs 在 2000—2020 年间的全局空间相关性(见表 3), 2000—2020 年巢湖流域 ESs 聚类与异常值分析如图 5 所示。结果显示, 巢湖流域的主要 ESs 在研究期间内均表现出较强的空间聚集效应。

WY 的莫兰指数从 2000 年的 0.121 626 上升到 2010 年的 0.416 413, 显示出城市和工业区域内 WY 的高-高聚集效应不断增强, 反映了城市化对水资源需求的显著影响。HQ 在整个研究期间保持稳定的空间聚集效应, 莫兰指数在 2010 年为 0.612 399, 高-高聚集区域主要集中在林地和草地, 而低-低聚集区域则位于城市和农业扩展区, 表明城市化对 HQ 的负面影响逐步增加。CS 的全局聚集效应在 2000 年较弱(莫兰指数为 0.023 080), 到 2010 年上升至 0.541 162, 显示出城市扩展引起的森林破碎化对 CS 格局的深远影响。此外, SC 和 WP 在研究期间均表现出显著的空间聚集效应, 反映了城市和工业扩展对水土保持和水质净化服务的需求增加。

为探究巢湖流域 ESs 与相邻区域的空间相关性及其局部特征差异, 采用局部莫兰指数, 结合聚类、异常值和冷热点分析进行了局部空间自相关分析, 2000—2020 年巢湖流域 ESs 热点分析如图 6 所示。WY 在城市扩展区域呈现显著高-高聚类效应, 且随时间在城市区域的聚集范围不断扩大, 反映了城市化带来的水资源需求上升。部分边缘区域出现低-高异常值, 表明这些区域受邻近高值区的城市扩展间接影响。HQ 的冷热点分析显示, 随着城市扩展, 冷点区域逐步增多, 反映城市化对 HQ 的负面影响; 在城市边缘的少量自然区域亦观察到高-低异常值, 显示生境质量因城市扩展受损。SC 和 WP 的冷热点分析揭示, SC 高值区集中在北部林地和草地区域, WP 热点则在城市和工业区周边, 反映了城市化对水土保持和水质净化服务的持续影响。

总体来看, 巢湖流域的 ESs 在研究期间内表现出显著的空间异质性和聚集效应。城市化进程和土地利用变化是驱动这些空间格局变化的关键因素, 特别是在水资源需求和水质净化服务方面, 城市扩展对 ESs 的空间分布产生了深远影响。

2.3 ESs 权衡-协同关系的时空演变分析

2000—2020 年巢湖流域 ESs 间的 TSI 如图 7 所示, 2000 年以协同关系为主, CS 与 HQ、SC 相关性较高, 反映出林地和草地等自然区域内生态服务的协同作用。然而, WY 与其他服务的权衡关系较明显, 特别是与 HQ 的 TSI 为 0.73, 表明水资源需求上升对其他生态服务产生了影响。到 2010 年, ESs 权衡关系加剧, CS 和 HQ 的协同关系增强, 但协同范围

表 3 2000—2020 年巢湖流域 ESs 全局空间自相关性分析和高低聚类分析

Table 3 Global spatial autocorrelation and high-low cluster analysis of ESs in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

ESs	空间自相关分析				高低聚类分析				
	莫兰指数 <i>I</i>	<i>Z</i> 得分	<i>P</i> 值	分布模式	<i>G</i> 观测值	<i>G</i> 期望值	<i>Z</i> 得分	<i>P</i> 值	聚类区域
CS-2000	0.023 080	5.290 993	0.000 000	聚 类	0.000 038	0.000 032	0.947 122	0.343 577	随机分布
CS-2010	-0.541 162	-157.560 570	0.000 000	离 散	0.000 016	0.000 020	-1.755 590	0.079 158	低聚类
CS-2020	-0.507 231	-128.777 283	0.000 000	离 散	0.000 028	0.000 030	-0.700 648	0.483 523	随机分布
WY-2000	0.121 626	54.222 576	0.000 000	聚 类	0.000 010	0.000 009	46.440 004	0.000 000	高聚类
WY-2010	0.416 413	211.831 659	0.000 000	聚 类	0.000 008	0.000 007	65.316 153	0.000 000	高聚类
WY-2020	0.401 451	192.489 741	0.000 000	聚 类	0.000 009	0.000 008	60.234 164	0.000 000	高聚类
HQ-2000	0.618 540	100.811 198	0.000 000	聚 类	0.000 095	0.000 074	99.348 053	0.000 000	高聚类
HQ-2010	0.612 399	99.851 928	0.000 000	聚 类	0.000 097	0.000 074	98.750 734	0.000 000	高聚类
HQ-2020	0.619 173	101.280 104	0.000 000	聚 类	0.000 000	0.000 000	94.616 980	0.000 000	高聚类
SC-2000	0.769 861	308.502 004	0.000 000	聚 类	0.000 035	0.000 012	246.093 328	0.000 000	高聚类
SC-2010	0.775 517	327.945 587	0.000 000	聚 类	0.000 034	0.000 011	276.260 067	0.000 000	高聚类
SC-2020	0.746 008	306.689 130	0.000 000	聚 类	0.000 035	0.000 012	243.046 631	0.000 000	高聚类
WP-2000	0.608 142	1 002.248 793	0.000 000	聚 类	0.000 001	0.000 001	538.560 444	0.000 000	高聚类
WP-2010	0.623 296	1 028.248 263	0.000 000	聚 类	0.000 010	0.000 007	974.789 955	0.000 000	高聚类
WP-2020	0.618 681	1 020.592 572	0.000 000	聚 类	0.000 010	0.000 007	967.459 652	0.000 000	高聚类

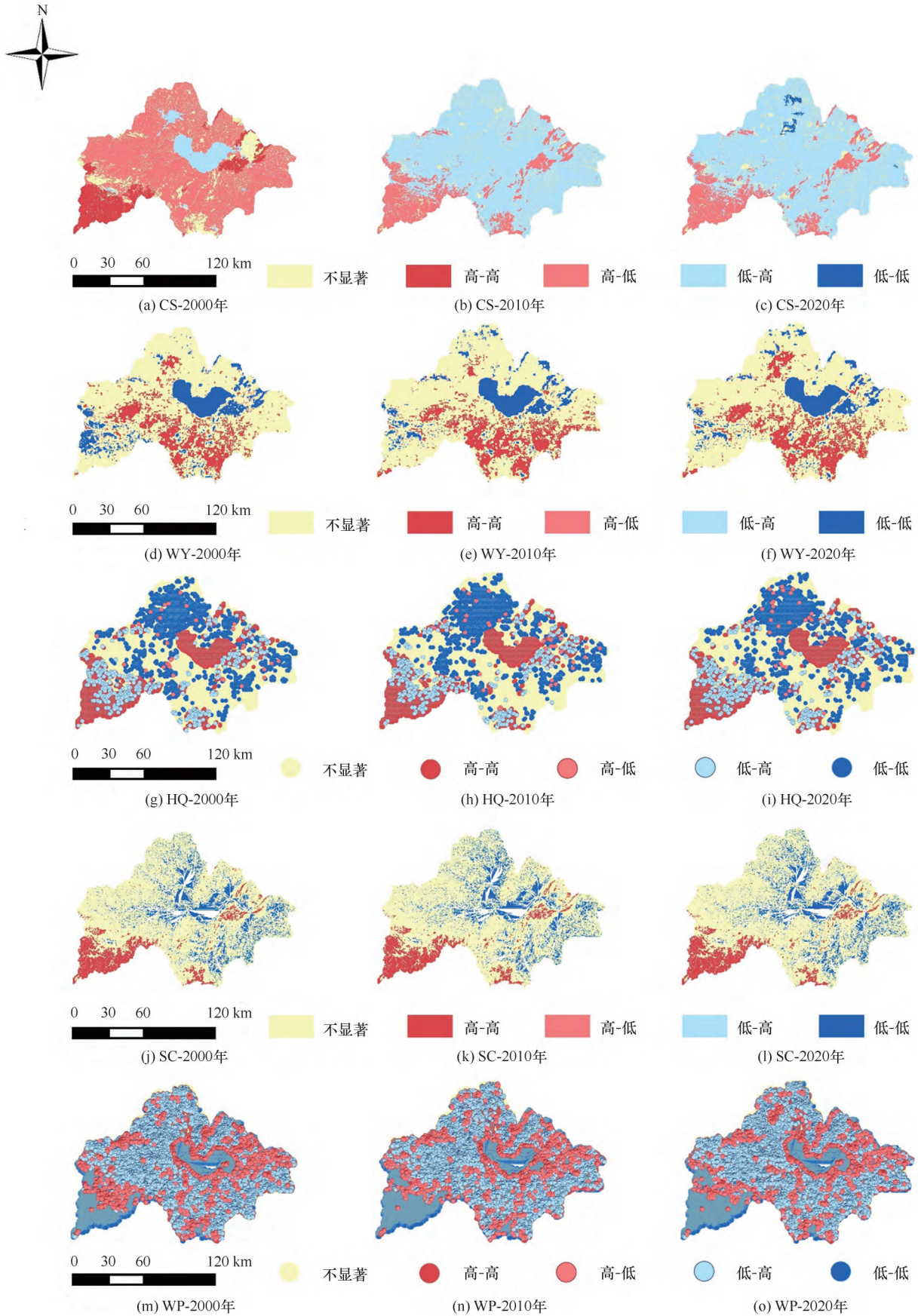
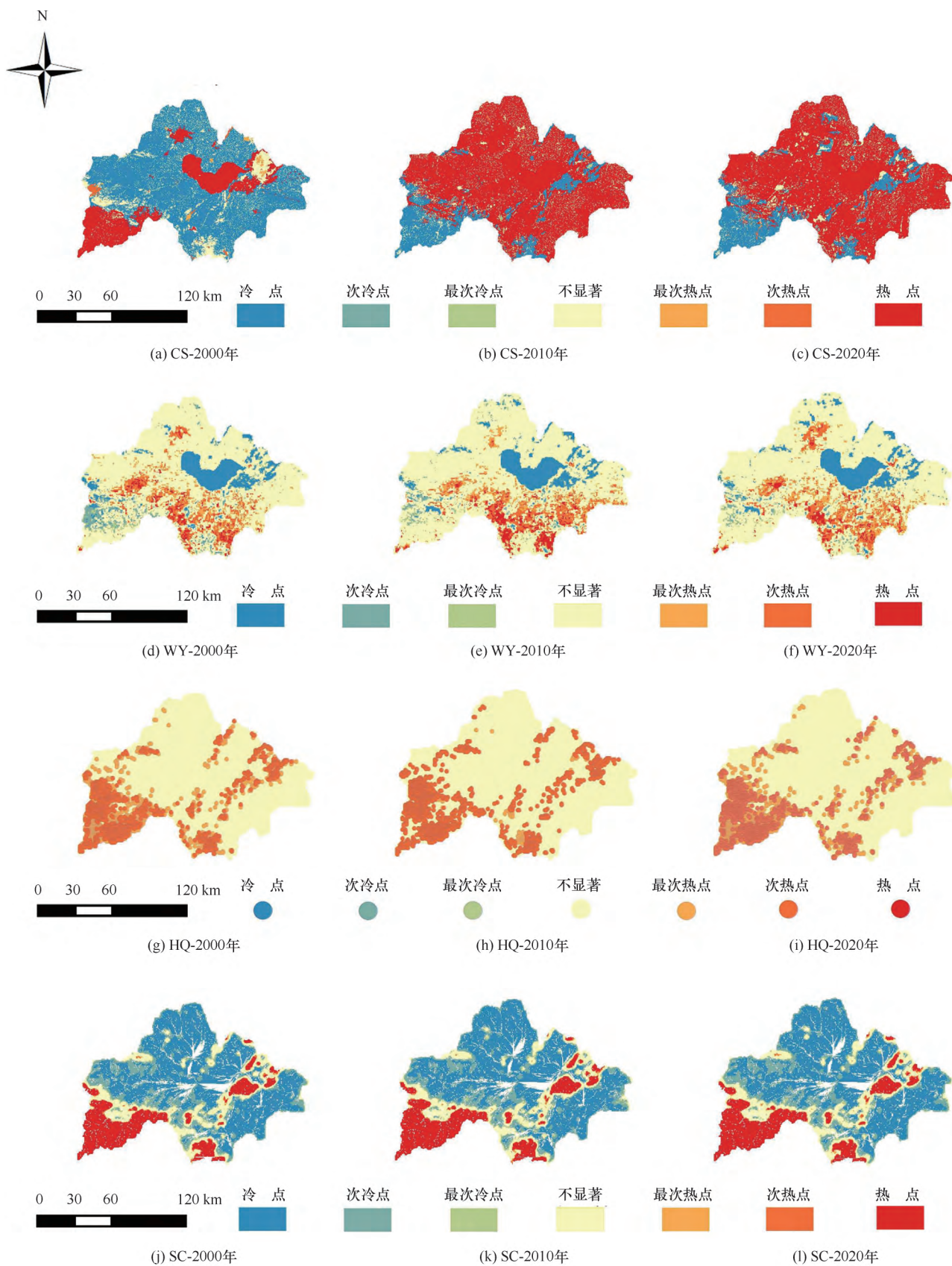


图5 2000—2020年巢湖流域ESs聚类与异常值分析

Fig. 5 Cluster and outlier analysis of ESs in Chaohu Lake Basin (2000—2020)



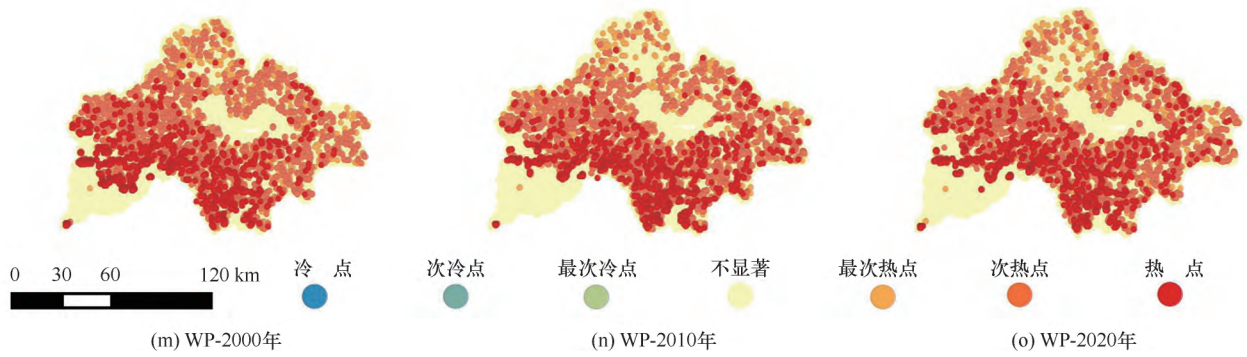


图 6 2000—2020 年巢湖流域 ESs 热点分析

Fig. 6 Hotspot analysis of ESs in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

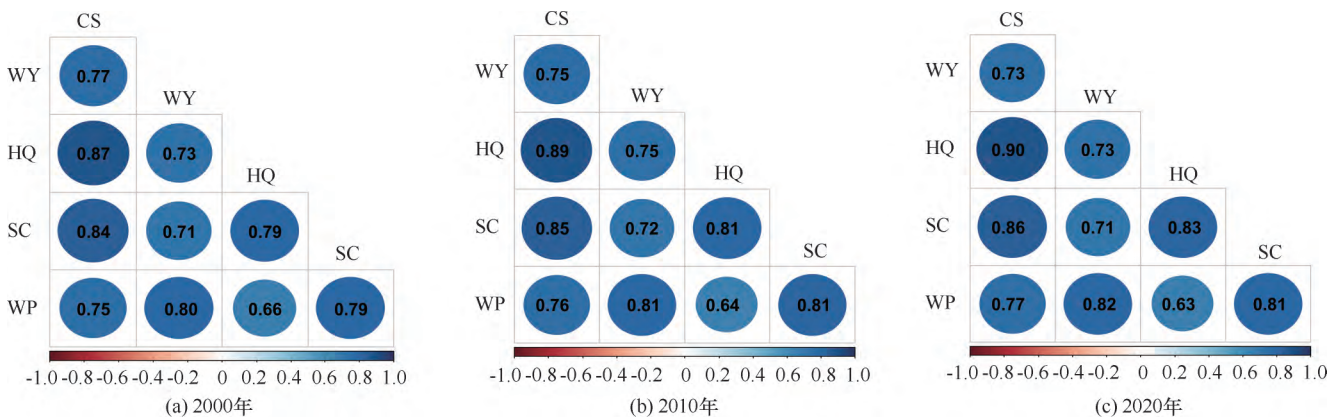


图 7 2000—2020 年巢湖流域 ESs 间的 TSI

Fig. 7 TSI between ESs in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

缩小, WY 与 HQ 的 TSI 降至 0.75, WP 与 HQ 的 TSI 为 0.64。到 2020 年, 格局趋于稳定, CS 与 HQ 的协同关系持续存在, 但范围进一步缩小, 显示城市化对生态服务平衡的影响加剧。

巢湖流域 ESs 之间权衡与协同关系的空间分布情况如图 8 所示。不显著区域主要分布于流域东部和部分城市边缘区域, 这些区域可能由于数据稀疏或局部变化不显著而未显示明确的权衡或协同关系。2000 年时, CS 和 SC 在林地和草地中表现出较强的协同关系, 尤其在北部和西部区域协同作用显著, 表明这些区域在碳储存和水土保持方面发挥了重要生态功能。到 2010 年和 2020 年, WY 在城市扩展区域内逐渐呈现出更强的权衡关系, 特别是在城市和农业扩展的边缘区域, 水资源需求和其他生态服务之间的冲突加剧。此外, 在 2020 年, 图 7 中 WP 的权衡关系强度在城市区域明显增强, 反映了城市化过程中水质净化需求对水资源和其他服务的挤压作用, 这一趋势与巢湖流域加速工业化带来的环境压力相吻合。

2.4 ESs 社会-生态驱动因子分析

2000—2020 年巢湖流域 ESs 及其驱动因子相关性分析结果如图 9 所示。2000 年, 巢湖流域的 ESs 主要受到生态因子的影响。CS、HQ、SC 与 *NDVI* 之间的正相关关系较强, 表明 *NDVI* 在提升这些服务功能中起到了关键作用。此外, ETP 和 PRE 对 WY 和 WP 具有正向影响, 但相关性较弱。这反映了在 2000 年, 自然生态条件在很大程度上决定了 ESs 的空间分布和强度。2010 年, 随着巢湖流域城市化进程的加速, 社会因子对 ESs 的影响显著增强。GDP 和 NTL 的影响逐渐增强, 特别是对 WY 和 WP 的影响尤为突出, 相关性显著增加 (GDP 与 WP 的相关性提升)。这反映了经济活动的增加对水资源需求和水质改善产生了显著影响。同时, 自然因子如 TMP 和 PRE 依然对 ESs 保持重要影响, 但其作用相较于 2000 年有所减弱, 表明人类活动正在改变 ESs 的驱动机制。到 2020 年, 社会因子已成为影响巢湖流域 ESs 的重要驱动因素。GDP 和 NTL 与多个生态系统服务 (WY 和 WP) 之间的相关性进一步增强, 表明城市扩展和经

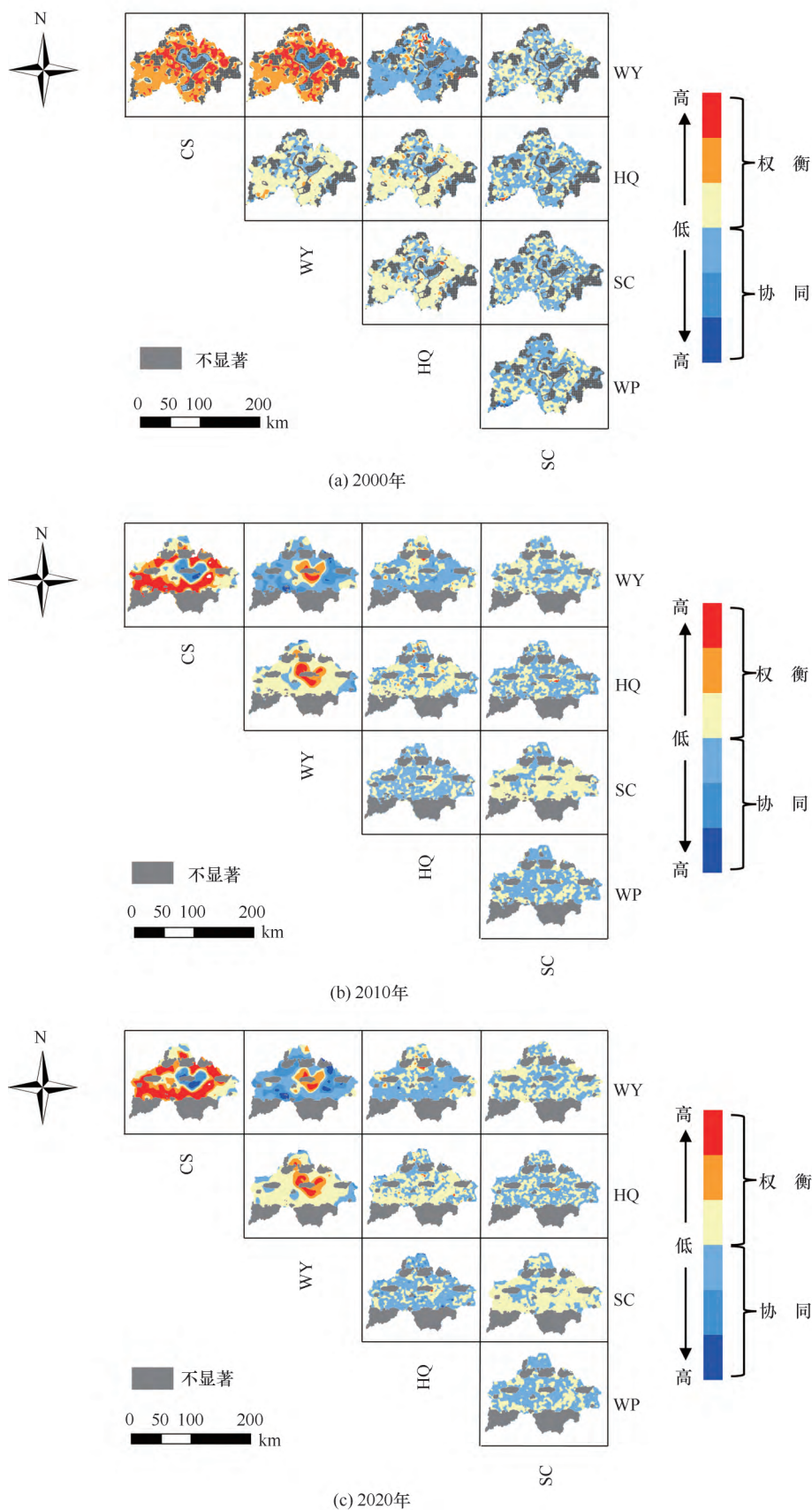


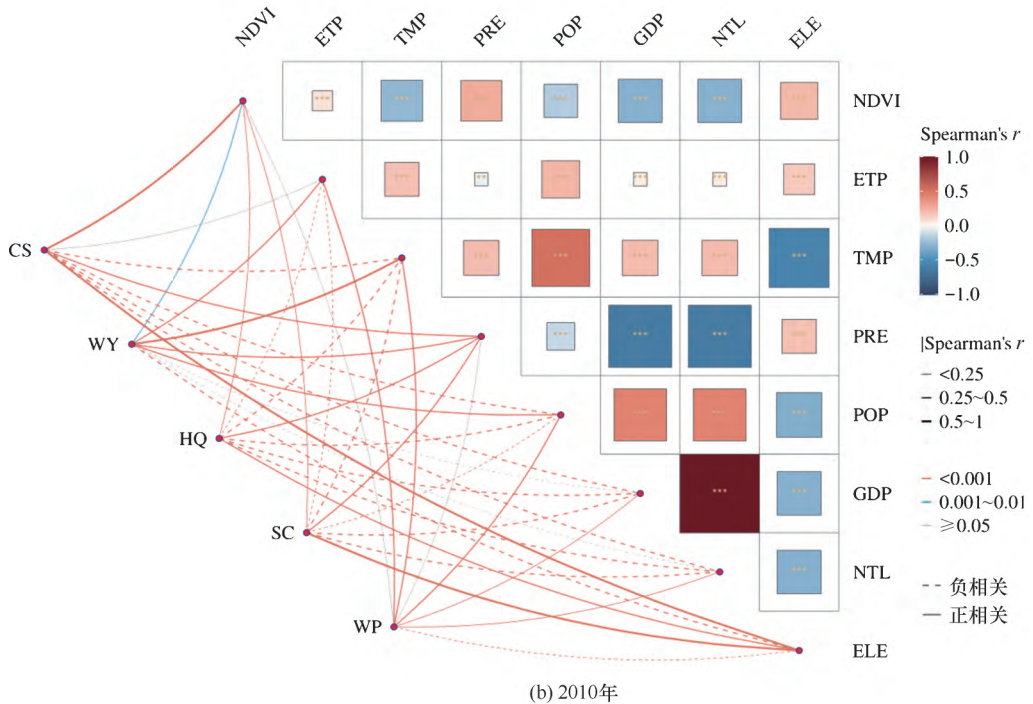
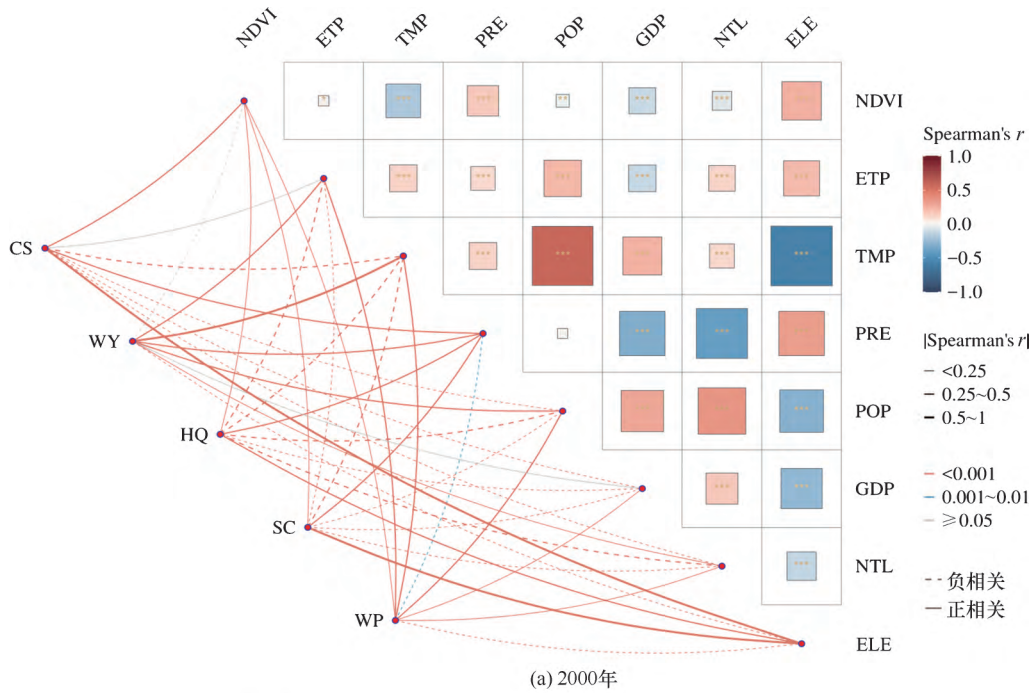
图 8 2000—2020 年巢湖流域 ESs 间权衡-协同关系空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of trade-off and synergy relationship between ESs in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

济发展对区域 ESs 的影响越来越显著。特别是 GDP 对 HQ 和 WP 的负面影响在热图中表现得尤为明显。此外, POP 对 WY 的影响也进一步增强, 显示出人口增长对水资源压力的加剧。相对而言, *NDVI* 和 ETP 等生态因子的作用进一步减弱, 表明自然生态条件在快速城市化背景下对 ESs 的支撑作用逐渐被人类活动所削弱。

通过 R^2 值量化生态因子和社会因子对 ESs 的贡献, 并定义交互部分贡献(CR_0)。2000—2020 年生态

因子和社会因子对巢湖流域 ESs 的贡献情况如表 4 所列。从表 4 中可以看出: CS 和 SC 的贡献主要由生态因子决定, 其生态因子贡献(R_1^2) 始终保持在 95% 以上, 表明这些生态系统服务在很大程度上依赖自然系统的自我调节能力。然而, HQ 和 WP 在 2020 年受到社会因子的驱动显著增强, 社会因子贡献(R_2^2) 分别达到 45.45% 和 10.42%, 反映了人类活动在这些服务中的作用日益重要。此外, 交互部分的贡献(CR_0) 结果显示, 在部分情况下, 社会因子和生态因子之间



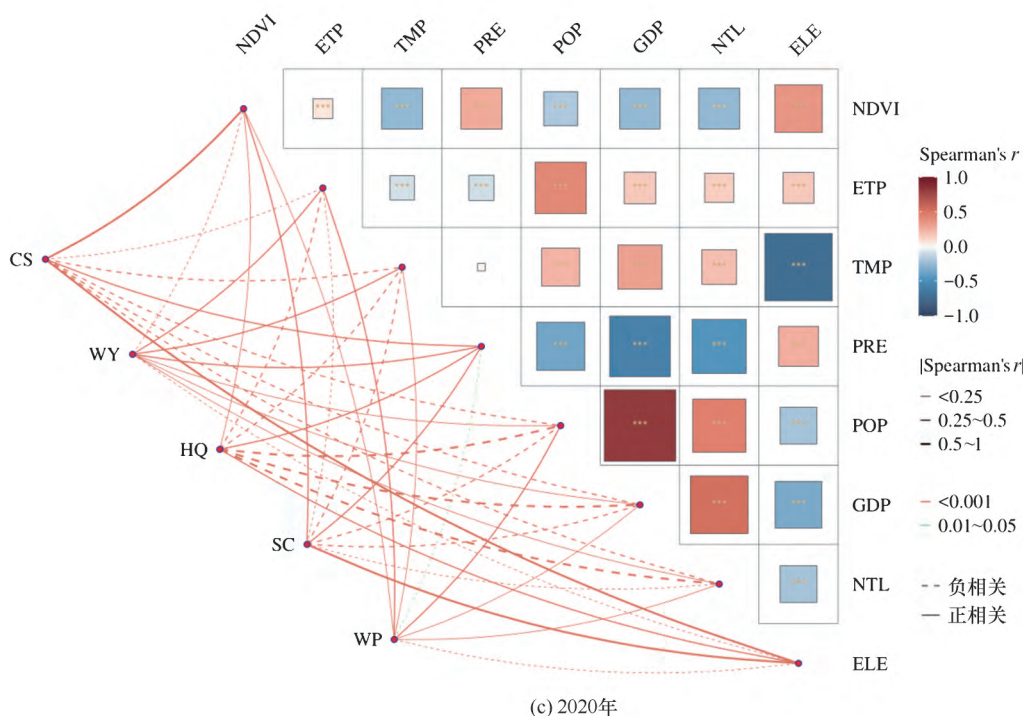


图9 2000—2020年巢湖流域ESs及其驱动因子相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of ESs and their driving factors in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

表4 2000—2020年生态因子和社会因子对巢湖流域ESs的贡献情况

Table 4 Contribution of ecological and social factors to ESs in Chaohu Lake Basin (2000—2020)

年份	生态系统服务	R_1^2	R_2^2	R_0^2	$CR_1 / \%$	$CR_2 / \%$	$CR_0 / \%$
2000	CS	0.42	0.03	0.43	98.12	8.00	-6.12
	WY	0.31	0.04	0.34	92.61	13.11	-5.72
	HQ	0.31	0.07	0.34	90.12	21.22	-11.34
	SC	0.57	0.02	0.57	100.00	2.68	-2.68
	WP	0.16	0.02	0.17	96.45	10.71	-7.16
2010	CS	0.43	0.05	0.44	98.30	11.80	-9.91
	WY	0.34	0.01	0.36	94.90	2.05	3.00
	HQ	0.27	0.06	0.30	88.60	20.60	-9.04
	SC	0.60	0.02	0.60	100.00	3.05	-3.05
	WP	0.15	0.00	0.15	97.80	2.41	-0.18
2020	CS	0.45	0.1	0.46	95.91	21.51	-17.42
	WY	0.35	0.02	0.38	91.41	6.34	2.25
	HQ	0.28	0.17	0.37	74.87	45.45	-20.32
	SC	0.59	0.05	0.59	99.83	7.95	-7.78
	WP	0.16	0.02	0.17	95.78	10.42	-6.20

存在竞争或互相干扰的关系。在HQ中, 2020年的 CR_0 达到-20.32%。从总体趋势来看, 2000年生态因子的驱动作用明显占优, 而社会因子的影响较弱; 到2020年, 社会因子的贡献显著增强, 尤其是在HQ和WP中, 人类活动已逐步成为重要驱动力。

通过分析三期数据, 明确了社会系统与生态系统对巢湖流域ESs的相对贡献: 生态因子对CS和SC的主导作用保持稳定, 而社会因子在HQ和WP中的作用显著增强。总体而言, 生态因子对巢湖流域ESs

的贡献仍然更大, 但随着城市化进程的推进, 社会因子的影响不可忽视。这表明未来在制定生态管理政策时, 既要保护自然生态系统的稳定性, 又要有效调控社会活动对ESs的影响, 从而实现两大体系的协同发展。

3 结果讨论

3.1 ESs的时空变化特征

近年来, 生态系统服务的研究方法不断创新和完

善,在量化权衡与协同关系以及揭示驱动机制方面取得了重要进展。传统研究多采用单一模型,如InVEST模型、ARIES模型和遥感统计方法,这些方法在生态服务空间化评估中具有优势,但在解析复杂社会-生态交互机制和动态权衡关系方面存在局限。例如,段鹏等^[33]在鄱阳湖流域应用InVEST模型评估生境质量与水土保持功能,指出其在空间分辨率和多元因素权衡分析方面的不足。

为弥补单一模型的局限性,近年来逐步引入多模型融合分析模式。丁菊等^[9]通过GWR和LISA聚类分析研究宁夏黄河流域土地利用与人类活动对ESs权衡关系的影响,发现农业扩展显著改变了水资源与土壤保持的动态平衡。黄贞斌等^[34]在武汉都市圈利用多情景模拟分析土地利用变化对生态服务价值的影响,揭示了快速城镇化对水资源服务的压力加剧。张凌格等^[3]结合多源数据与SOM方法,提出了内陆河流域生态服务功能优化的管理措施。

本研究采用InVEST模型结合SOM和交互贡献分析,以巢湖流域为案例,揭示了区域生态服务显著受社会经济因子驱动的特征,如碳储存和生境质量等服务功能的分布与武汉都市圈和宁夏黄河流域的研究结果一致。同时,在细化区域权衡关系和动态变化监测方面展现出更高的适用性。例如,在农业用地扩展区域,水资源供给需求的动态变化明显,反映了土地利用变化对水资源服务的逐步依赖。相比李涛等的研究,本研究结合GWR和SOM方法提高了空间异质性分析的精度;相比张凌格等的流域研究,更强调快速城镇化区域ESs动态权衡关系的分析,为巢湖流域复杂社会-生态系统提供了新视角。

3.2 ESs 簇的分布与权衡-协同关系

在区域生态系统服务研究中,分析ESs簇的分布及其权衡-协同关系对理解服务功能间的交互至关重要。传统研究多基于整体均值或单一变量分析,难以深入揭示服务功能间的动态交互机制。例如,冉凤维等^[35]对鄱阳湖流域ESs时空格局的研究虽揭示了总体分布特征,但在多功能权衡关系的量化方面存在不足,难以满足区域精细化管理需求。

近年来,SOM和TSI被广泛应用于生态系统服务研究,成为分析权衡与协同关系的重要工具。罗雅文等^[36]利用SOM对梁子湖流域生态服务功能进行分类,揭示了其空间异质性及服务间协同规律。蔡进等^[37]结合TSI对汾河流域水资源、土壤保持等6种ESs进行动态监测,提出了针对性管理方案。这表明SOM结合TSI在揭示ESs权衡与协同关系动态变化方

面具有显著优势,为精细化生态系统管理提供了科学依据。

基于此框架,本研究结合SOM与TSI,分析了巢湖流域ESs簇的分布及其权衡-协同关系。结果显示,2000—2020年间,巢湖流域ESs簇发生了显著动态变化。2000年,B1簇(森林碳汇簇)主要分布于北部和西部林地,碳储存与生境质量协同关系显著(TSI为0.82)。B2簇(水资源簇)集中于巢湖水域周边,反映农业与城市用水需求集中性。到2010年,随着城市化加速,B1簇范围缩小,B2簇范围扩大,水资源服务的适应性增强。至2020年,B4簇(低服务簇)在城市和工业区大范围扩展,与B1簇的负相关性增强(TSI为-0.61),表明生态服务权衡关系日趋复杂。

相比其他区域,巢湖流域的ESs权衡与协同关系具有独特性。低服务簇扩展速度快于梁子湖流域,这与地区城市化政策密切相关;水资源服务对工业扩展的适应性强于汾河流域,体现了政策对生态服务格局的重要影响。未来研究应结合多源数据和动态模拟技术,进一步提升对ESs动态变化及权衡机制的精细化理解,为生态管理与政策优化提供科学支持。

3.3 ESs 社会-生态驱动因子

生态系统服务受社会和自然因子的双重驱动,解析两者之间的复杂关系对区域生态管理和政策制定至关重要。然而,传统研究往往局限于单一维度,如李魁明等^[38]的研究揭示了自然因子对华北地区生态系统服务的主导作用,但未能全面量化社会与自然因子的综合影响。这种方法虽能揭示自然因子的基础作用,但在应对复杂的社会-生态交互机制时显得不足。

近年来,GWR和交互部分贡献分析为研究社会与自然因子的综合影响提供了新工具。王玉纯等^[39]通过GWR模型解析石羊河流域驱动因子的空间异质性,发现了区域间显著的差异性作用。任会源等^[40]在黄河流域利用交互部分贡献方法量化了社会与自然因子对水资源服务的相对贡献,揭示了二者的协同与竞争关系。这些方法能够有效量化驱动因子的相对作用,并揭示其不同空间和时间尺度上的交互机制,为复杂系统的研究提供了新视角。

本研究结合GWR和交互部分贡献分析,探讨了2000—2020年间巢湖流域社会-生态因子对生态系统服务的驱动机制。结果表明,自然因子对CS和SC的贡献保持主导地位,其 R^2 值稳定在0.42~0.59,占综合模型贡献的90%以上。而社会因子对WP和

WY 的影响逐步增强, 2020 年 GDP 和 NTL 对 WP 的贡献达 21.51%, 表明人类活动对水资源服务的干预显著加剧。

相比其他区域, 巢湖流域的驱动机制具有独特性。与石羊河流域相比, 巢湖流域社会因子的影响更显著, 这与工业化和城镇化密度较高有关。而与黄河流域^[41]相比, 自然因子在巢湖流域的贡献更加突出, 说明生态系统在快速城市化中仍具重要支撑功能。未来研究应进一步关注社会与自然因子的动态权衡关系, 探索其在不同情景下的协同优化路径, 为区域生态管理与政策制定提供科学依据。

4 结 论

(1) 2000—2020 年期间, 巢湖流域生态系统服务在快速城市化和工业化背景下发生显著时空变化。CS 和 HQ 高值区逐步向生态保护区集中, 而 WY 和 WP 高值区主要分布于城市和工业区域, 反映出自然区域生态功能受到挤压, 城市和工业区域对资源与生态服务的需求持续增加。

(2) 生态服务簇呈现显著空间变化, 森林碳汇簇(B1) 和水资源簇(B2) 范围缩小, 低服务簇(B4) 面积显著扩大, 并集中于城市和工业区域。权衡与协同关系显示, 城市化加剧了服务间的权衡强度与范围, 尤其是水质净化与其他服务的矛盾显著加剧, 区域生态服务的复杂性进一步提升。

(3) 社会-生态因子对生态服务的影响不断变化。GDP、POP 等社会因子对 WY 和 WP 的驱动作用明显增强, 而自然因子虽有所减弱, 但仍是 CS 和 HQ 的关键驱动因素。社会与生态因子的交互作用复杂, 部分情况下表现出竞争与干扰关系。

参考文献(References):

- [1] REMME R P, MEACHAM M, PELLOWE K E, et al. Aligning nature-based solutions with ecosystem services in the urban century [J]. *Ecosystem Services*, 2024, 66: 101610.
- [2] 张徐, 李云霞, 吕春娟, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展[J]. *生态科学*, 2022, 41(1): 237-242.
- ZHANG X, LI Y X, LYU C J, et al. Research progress on application of ecosystem service functions based on InVEST model [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 237-242.
- [3] 张凌格, 胡宁科. 内陆河流域生态系统服务研究进展[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 1-12.
- ZHANG L G, HU N K. Research review of ecosystem services in inland river basin [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(4): 1-12.
- [4] 郭宗亮, 刘亚楠, 张璐, 等. 生态系统服务研究进展与展望

- [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 928-936.
- GUO Z L, LIU Y N, ZHANG L, et al. Research progress and prospect of ecosystem services [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(3): 928-936.
- [5] SANNIGRAHI S, PILLA F, ZHANG Q, et al. Examining the effects of green revolution led agricultural expansion on net ecosystem service values in India using multiple valuation approaches [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111381.
- [6] SIMEON M, WANA D. Synergies and trade-offs among key ecosystem services in Maze National Park and its environs, southwestern Ethiopia [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2025, 57: e03398.
- [7] 王赛超, 赵子群, 薛万来, 等. 北京市生态系统服务评估与生态安全格局构建[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(9): 1-14.
- WANG Saichao, ZHAO Ziqun, XUE Wanlai, et al. Evaluation of ecosystem services and construction of ecological security pattern in Beijing [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(9): 1-14.
- [8] HARDAKER A, PAGELLA T, RAYMENT M. Ecosystem service and dis-service impacts of increasing tree cover on agricultural land by land-sparing and land-sharing in the Welsh uplands [J]. *Ecosystem Services*, 2021, 48: 101253.
- [9] 丁菊, 柳西波, 何凯. 宁夏黄河流域生态系统服务权衡协同及其与人类活动强度的关联性研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(7): 171-182.
- DING J, LIU X B, HE K. Trade off and synergy of ecosystem services and their correlation with human activity intensity in the Yellow River Basin of Ningxia [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(7): 171-182.
- [10] KOK S, LE CLEC' H S, PENNING W E, et al. Trade-offs in ecosystem services under various river management strategies of the Rhine Branches [J]. *Ecosystem Services*, 2025, 72: 101692.
- [11] 赵晓燕, 谈树成, 张素, 等. 基于遥感生态指数改进模型的沱江流域生态环境质量时空变化及驱动力研究[J]. *水土保持学报*, 2024, 5(17): 1-14.
- ZHAO Xiaoyan, TAN Shucheng, ZHANG Su, et al. Spatiotemporal changes and driving forces of eco-environmental quality in the Tuojiang River Basin based on an improved remote sensing ecological index model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 5(17): 1-14.
- [12] 曾凯豪, 唐健, 杨剩富. 土地利用功能权衡协同关系及其驱动因子研究: 以武汉市为例[J]. *中国土地科学*, 2024, 38(6): 66-77.
- ZENG K H, TANG J, YANG S F. Research on trade-offs and synergy relationship of land use functions and the driving factors: a case study in Wuhan [J]. *China Land Science*, 2024, 38(6): 66-77.
- [13] PORTELA A P, DURANCE I, VIEIRA C, et al. Response-effect trait overlap and correlation in riparian plant communities suggests sensitivity of ecosystem functioning and services to environmental change [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 860: 160549.

- [14] PUGARA A, PRADANA B, PRIAMBUDI B N. The impact of the land use changes through Batang spatial planning on the ecosystem services on climate management [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1082(1): 012022.
- [15] 李云生, 周广金, 梁涛, 等. 巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益[J]. 地理研究, 2009, 28(6): 1656-1664.
LI Y S, ZHOU G J, LIANG T, et al. Study of land use change on the gains and losses of ecosystem service function values of Chaohu Lake Basin [J]. Geographical Research, 2009, 28(6): 1656-1664.
- [16] 温宗国, 周静, 岳昆. 基于水环境的生态文明建设模式研究: 以合肥市、巢湖流域为例[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 113-119.
WEN Z G, ZHOU J, YUE K. Mode of ecological civilization construction based on water environment: case study of Hefei City and Chaohu Lake basin [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 113-119.
- [17] 赵先超, 田一豆, 张潇湘. 长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 215-225.
ZHAO X C, TIAN Y D, ZHANG X X. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in changzhutan urban agglomeration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 215-225.
- [18] 董光龙, 王珏, 王克强, 等. 基于土地利用偏好与位置重要性的农业土地利用冲突识别与调解[J]. 地理研究, 2024, 43(8): 1994-2009.
DONG G L, WANG J, WANG K Q, et al. Identification and mediation of agricultural land use conflicts based on land use preference and location importance [J]. Geographical Research, 2024, 43(8): 1994-2009.
- [19] CHEN T, FENG Z, ZHAO H F, et al. Identification of ecosystem service bundles and driving factors in Beijing and its surrounding areas [J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134687.
- [20] 王亚琼, 高曼莉, 罗劲松, 等. 2001—2021年巢湖流域植被覆盖时空变化及驱动分析[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(6): 58-68.
WANG Y Q, GAO M L, LUO J S, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and driving forces in Chaohu Lake basin from 2001 to 2021 [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(6): 58-68.
- [21] HAN R, FENG C, XU N, et al. Spatial heterogeneous relationship between ecosystem services and human disturbances: a case study in Chuandong, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 721: 137818.
- [22] 牟燕, 冯飞. 基于土地利用的北京市多情景模拟下生态服务价值影响评估[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(5): 14-24.
MOU Y, FENG F. Impact assessment of ecological service value under multi scenario simulation in Beijing based on land use [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5): 14-24.
- [23] XUE C L, CHEN X H, XUE L R, et al. Modeling the spatially heterogeneous relationships between tradeoffs and synergies among ecosystem services and potential drivers considering geographic scale in Bairin Left Banner, China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 855: 158834.
- [24] 赵锐, 任昕芸, 苏伟洲, 等. 价值核算体系融合物质流分析的沱江流域生态系统生产总值分配研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(3): 520-528.
ZHAO R, REN X Y, SU W Z, et al. Study on distribution of Tuojiang River Basin gross ecosystem product by value accounting system combined with material flow analysis [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2023, 38(3): 520-528.
- [25] KWATRA S, KUMAR A, SHARMA P. A critical review of studies related to construction and computation of Sustainable Development Indices [J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106061.
- [26] YANG W P, LI D. Spatio-temporal evolution of ecological environment quality in China from a concept of strong sustainability [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(19): 28769-28787.
- [27] 李琛, 吴映梅, 高彬嫫, 等. 高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测: 以环洱海地区为例[J]. 经济地理, 2022, 42(4): 220-229.
LI C, WU Y M, GAO B P, et al. Spatial differentiation and driving factors of rural settlement in plateau lake: A case study of the area around the Erhai [J]. Economic Geography, 2022, 42(4): 220-229.
- [28] 王永祥, 徐园园, 杨佳嘉, 等. 基于 Landsat 的重庆市生态环境质量动态监测及其时空格局演变分析[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6278-6292.
WANG Y X, XU Y Y, YANG J J, et al. Dynamic monitoring and spatio-temporal pattern evolution analysis of eco-environmental quality in Chongqing based on remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6278-6292.
- [29] 田云, 刘俊艳, 白爽, 等. 近 20 年黄河流域甘肃段植被覆盖度变化与驱动因素分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 365-372.
TIAN Y, LIU J Y, BAI S, et al. Fractional vegetation cover change and driving factors in Gansu section of Yellow River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 365-372.
- [30] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 276-286.
ZHANG L Y, LI X, FENG J H, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River Basin and its dual response to climate change and human activities during 2000—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 276-286.
- [31] 张波, 牟建新, 徐璐, 等. 基于 MODIS EVI 的陇南山地植被覆盖时空变化[J]. 中国农学通报, 2017, 33(26): 70-77.
ZHANG B, MU J X, XU L, et al. Spatial and temporal variation of vegetation coverage in mountain area of Longnan: based on MODIS EVI [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(26): 70-77.
- [32] 李永平, 赵晓燕, 谈树成, 等. 川南城市群植被覆盖度时空演变

- 及驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 399-409.
- LI Yongpin, ZHAO Xiaoyan, TAN Shucheng, et al. Spatiotemporal evolution and driving forces of vegetation coverage in southern Sichuan urban agglomeration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 399-409.
- [33] 段鹏, 陈文波, 杨欢, 等. 生境破碎化过程对流域生境质量的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(14): 6053-6066.
- DUAN P, CHEN W B, YANG H, et al. Influence and interactions of habitat fragmentation processes on habitat quality in watersheds [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6053-6066.
- [34] 黄贞斌, 李红波. 武汉城市圈土地利用及生态系统服务价值时空演变多情景模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(12): 2542-2557.
- HUANG Z B, LI H B. Multi-scenario simulation of temporal-spatial evolution of land uses and ecosystem services in Wuhan urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(12): 2542-2557.
- [35] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 995-1004.
- RAN F W, LUO Z J, WU J P, et al. Spatiotemporal patterns of the trade-off and synergy relationship among ecosystem services in Poyang Lake Region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 995-1004.
- [36] 罗雅文, 周燕, 禹佳宁, 等. 梁子湖流域生态系统服务簇时空演变及其驱动力[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9485-9503.
- LUO Y W, ZHOU Y, YU J N, et al. Spatio-temporal changes and driving factors of ecosystem service bundles: a case study of Liangzi Lake Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9485-9503.
- [37] 蔡进, 危小建, 江平, 等. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化: 以汾河流域为例[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2780-2792.
- CAI J, WEI X J, JIANG P, et al. Ecosystem service trade-off synergy strength and spatial pattern optimization based on Bayesian network: A case study of the Fenhe River Basin [J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2780-2792.
- [38] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰, 等. 京津冀地区生态系统服务价值时空变化及驱动因子分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1114-1122.
- LI K M, WANG X Y, YAO L L, et al. Spatio-temporal change and driving factor analysis of ecosystem service value in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1114-1122.
- [39] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 等. 生态系统服务综合关系空间分异及驱动因素: 以石羊河流域为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 274-284.
- WANG Y C, ZHAO J, FU J W, et al. Recognition of ecosystem services trade-offs and synergistic comprehensive relations: a case study of Shiyang River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 274-284.
- [40] 任会源. 黄河流域生态系统服务功能时空变化及影响因素研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- REN H Y. Study on the Spatiotemporal Changes and Influencing Factors of Ecosystem Service Functions in the Yellow River Basin [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [41] 朱春霞, 钟绍卓, 龙宇, 等. 黄河流域生态系统服务的时空演变及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2502-2513.
- ZHU C X, ZHONG S Z, LONG Y, et al. Spatiotemporal variation of ecosystem services and their drivers in the Yellow River Basin, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2502-2513.

(责任编辑 王璐)