



千岛湖流域生态系统服务时空变化及权衡协同关系研究

朱志洪 王晖 汪继斌 李爱博 黄润霞 周本智 王懿祥

Spatial-temporal Changes and Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services in the Thousand-island Lake Basin

Zhu Zhihong, Wang Hui, Wang Jibin, Li Aibo, Huang Runxia, Zhou Benzhi, Wang Yixiang

引用本文:

朱志洪, 王晖, 汪继斌, 李爱博, 黄润霞, 周本智, 王懿祥. 千岛湖流域生态系统服务时空变化及权衡协同关系研究[J]. [西南林业大学学报](#), 2024, 44(3):99–109. doi: 10.11929/j.swfu.202303030

Zhu Zhihong, Wang Hui, Wang Jibin, Li Aibo, Huang Runxia, Zhou Benzhi, Wang Yixiang. Spatial-temporal Changes and Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services in the Thousand-island Lake Basin[J]. [Journal of Southwest Forestry University\(Natural Science\)](#), 2024, 44(3):99–109. doi: 10.11929/j.swfu.202303030

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202303030>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[遵义市生态系统服务价值与土地生态安全协调度分析](#)

Coordination Degree Between Ecosystem Services Value and Land Ecological Security Level in Zunyi
[西南林业大学学报](#). 2017, 37(5): 141–146 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.05.021>

[云南景迈布朗族古茶园生态系统群落结构研究](#)

Species Composition and Community Structure of the Blang Ancient Tea Garden Ecosystem, Yunnan
[西南林业大学学报](#). 2017, 37(3): 59–65 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.03.010>

[辽东山区落叶松人工林生态系统碳通量及对气候变化的响应](#)

Carbon Flux and Climate Change Response of *Larix olgensis* Plantation Ecosystem in Eastern Liaoning Mountainous Area
[西南林业大学学报](#). 2020, 40(6): 40–47 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004035>

[洞庭湖区绿地生态关键区综合识别及特征分析](#)

Integrated Recognition and Feature Analysis of the Key Areas of Green Space Ecology in Dongting Lake Region
[西南林业大学学报](#). 2020, 40(6): 48–57 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004051>

[1998—2009年洞里萨湖流域湿地时空变化特征研究](#)

The Spatial-temporal Changes of Wetland in the Tonle Sap Lake Basin from 1988 to 2009
[西南林业大学学报](#). 2019, 39(6): 130–136 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201812051>

[陕西靖边天保工程森林生态系统服务功能价值评估](#)

Assessment on Forest Ecosystem Services Function Value of Natural Forest Protection Project in Jingbian County of Shaanxi Province
[西南林业大学学报](#). 2017, 37(4): 58–66 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.04.010>

DOI: 10.11929/j.swfu.202303030

引文格式: 朱志洪, 王晖, 汪继斌, 等. 千岛湖流域生态系统服务时空变化及权衡协同关系研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2024, 44(3): 99-109.

千岛湖流域生态系统服务时空变化及权衡协同关系研究

朱志洪^{1,2} 王晖³ 汪继斌⁴ 李爱博² 黄润霞² 周本智² 王懿祥¹

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业和草原局浙江钱江源森林生态系统定位观测研究站, 浙江 杭州 311400; 3. 淳安县千岛湖林场, 浙江 杭州 311700; 4. 淳安县林业局, 浙江 杭州 311700)

摘要: 基于 1995—2019 年 6 期多源数据和生态系统服务评估模型, 对千岛湖流域产水量、土壤保持、碳储量以及生境质量服务进行评价, 并采用热点分析和相关分析来探究 4 项生态系统服务功能之间的权衡协同关系。结果表明: 1995—2019 年千岛湖流域产水量和土壤保持量呈现先减少后增加再减少的变化趋势, 碳储量和生境质量缓慢增加; 除产水服务外, 其他 3 项服务的高值区整体上具有一定的重叠性, 产水服务高值区主要集中在流域西部和中部湖泊沿岸区域。综合来看, 非热点区面积占比最高, IV 类热点区面积占比最低, 多重生态系统服务供给区主要分布在中高地形梯度区, 非热点区和单一服务供给分布在低梯度区; 在千岛湖流域, 协同关系是生态系统服务间的主导关系, 其中产水量和碳储量为权衡关系, 产水量和生境质量以及产水量和土壤保持之间的权衡协同关系在不同年份表现不同, 土地利用类型、植被覆盖度以及高程是生态系统服务权衡关系的主要影响因子。千岛湖流域生态系统服务空间分布具有明显的异质性, 其权衡协同关系存在差异。研究结果可为流域生态规划和社会经济发展提供科学依据。

关键词: 生态系统; 权衡协同; 千岛湖流域; 热点分析

中图分类号: Q146

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2024)03-0099-11

Spatial-temporal Changes and Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services in the Thousand-island Lake Basin

Zhu Zhihong^{1,2}, Wang Hui³, Wang Jibin⁴, Li Aibo², Huang Runxia², Zhou Benzhi², Wang Yixiang¹

(1. School of Environmental and Resources Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou Zhejiang 311300, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry/ Qianjiangyuan Forest Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou Zhejiang 311400, China; 3. Thousand-island Lake Forest Farm, Hangzhou Zhejiang 311700, China; 4. Forest Bureau of Chun'an County, Hangzhou Zhejiang 311700, China)

Abstract: Based on 6 periods of multi-source data and ecosystem service evaluation model from 1995 to 2019, we evaluated the ecosystem of water yield, soil conservation, carbon storage and habitat quality in the Thousand-island Lake Basin, and then studied the trade-off and the trade-off and synergy between ecosystem service functions are explored by combining hot spot analysis and correlation analysis. The results show that the water yield and soil conservation in the Thousand-island Lake Basin has the same change trend characteristics, which is a trend of first decreasing, then increasing, and then decreasing. Carbon storage and habitat quality have in-

收稿日期: 2023-03-12; 修回日期: 2023-05-19

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2019ZD001) 资助。

第 1 作者: 朱志洪 (1998—), 女, 硕士研究生。研究方向: 流域生态系统服务。Email: zhuzhihong0514@163.com。

通信作者: 王懿祥 (1974—), 男, 博士, 教授。研究方向: 森林固碳增汇经营和森林生态学。Email: 391037046@qq.com。

creased. In addition to water yield services, the high value region of the other 3 services have certain overlap on the whole, the high value region of water yield services are mainly concentrated in the western and Central Lake coastal areas of the basin. In general, the area of non hot spots accounts for the highest proportion, and the area of category IV hot spots accounts for the lowest proportion. The multi ecosystem service supply areas are mainly distributed in the medium and high gradient areas, and the non hot spots and single service supply areas are distributed in the low gradient areas. In the Thousand-island Lake Basin, synergy is the dominant relationship between ecosystem services, in which water production and carbon storage are trade-offs, and the trade-off synergies between habitat quality and soil conservation are different in different years. Land use type, vegetation coverage, and elevation are the main influencing factors for the trade-off between ecosystem services. The spatial distribution of ecosystem services in the Thousand-island Lake Basin is obviously heterogeneous, and there are differences in the trade-off synergy. The research results can provide important data support for watershed ecological planning and socio-economic development.

Key words: ecosystem; trade-offs and synergies; Thousand-island Lake Basin; hot spot analysis

生态系统服务是指人类能够从生态系统中获取的各种直接或间接的利益^[1], 分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 4 种类型^[2]。作为连接自然和社会生态系统的桥梁, 生态系统服务的稳定健康供应是人类福祉和可持续发展的重要保障^[3]。然而, 目前全球的生态系统健康状况总体上正在以前所未有的速度恶化, 想要实现对自然的保护和恢复, 需要变革性的改变^[4]。生态系统服务与生态系统的结构和功能息息相关^[5], 气候变化和人类活动对生态系统服务的提供具有重要影响^[6]。我国幅员辽阔、人口众多, 不同区域的地形地貌特征, 社会经济发展状况、气候变化等因素各不相同, 加之过去 30 a 的快速城市化和工业化的长期持续影响, 各地的生态系统服务功能都发生了不同程度的变化, 深入了解特定区域多种生态系统服务功能的时空变化及其相互关系, 有利于遏制生态环境恶化和实现生态系统可持续发展。

生态系统服务是当前“自然-社会”耦合系统研究中最为活跃的综合领域之一^[6]。其结构、过程和功能会受到自然环境差异以及人类活动的影响, 使得各项生态系统服务之间形成了某种复杂的非线性关系^[7], 表现为生态系统服务的权衡与协同。当区域的生态治理过于强调其中一种生态系统服务时, 必然会对其他生态系统服务造成影响, 因此, 明确各项生态系统服务之间的权衡协同关系, 对于区域生态绿色可持续发展有着重要意义^[8]。在目前的生态系统服务权衡协同关系研

究中, 最常见的是在时空尺度的权衡协同研究。生态系统服务本身具有时空效应, 在不同时间段、不同空间尺度的权衡协同分析, 可确定区域可持续发展的平衡点^[9]。如卫彦宏等^[10]探究了不同气候带与农业区的农田生态系统的食物供给与土壤保持的权衡强度及其驱动机制; 张自正等^[11]探究了清江流域各项生态系统服务之间的权衡协同关系, 发现生态系统服务间的相互作用因素的驱动是权衡强度的决定因素; Karimi 等^[12]评估了景观连通性对英国城市景观生态系统服务权衡协同效应的影响。目前大部分研究主要集中在生态环境较为脆弱的大尺度区域如喀斯特地区^[13-14]、干旱半干旱地区^[15-16]以及人类活动较为频繁的区域^[17]。并取得了一定的成果。但由于不同区域地理环境、气候条件以及社会经济差异性的差异性, 目前针对南方丘陵山地带和经济发达地区的中小尺度长时间段生态系统服务动态研究相对较少, 仍需进一步补充与完善。

千岛湖流域位于浙皖两省交界处, 森林和水资源丰富, 生物多样性较高, 是杭州市和嘉兴市的主要水源供给地, 属于集国家级生态文明建设“示范区”和国际深绿色发展“引领区”于一体的特殊功能区。近年来, 在气候变化和城市化发展下, 流域水土流失、环境污染、生物多样性减少等问题愈发严重, 严重影响流域的生态平衡。如何协调流域的生态环境保护和社会经济发展成为千岛湖流域建设生态功能区的一大挑战。目前对千岛湖流域相关的研究有水质安全^[18]、生物多

样性^[19]等方面的研究,对流域生态系统服务功能系统性、整体性研究尚未开展,而生态系统服务功能的有效发挥及其对于区域生态环境的影响很大程度上取决于生态系统服务功能的时空动态,以及不同功能之间的权衡协调关系。本研究基于RUSLE模型和InVEST模型,综合考虑流域的水源供给能力、水土保持能力、生物多样性以及碳储存能力,分析千岛湖流域典型生态系统服务时空动态变化,探究不同生态系统服务间的权衡协同关系,对于流域生态环境保护和地区生态经济可持续发展具有重要意义。

1 研究区概况

千岛湖流域位于浙江省西北部,地处118°33'~119°34'E,29°18'~30°03'N,为钱塘江的上游。流域范围包括淳安县县域以及建德市的新安江街道,四面多山,由低山、丘陵、谷地和湖泊组成,南北长约95 km,东西长约98 km,总面积约为4526 km²。属典型亚热带季风气候,气候湿润,雨量充沛,年平均气温17.2℃,年平均降雨量1515.1 mm,平均日照时数1850.3 h。流

域内植被茂盛,以常绿阔叶林为主,植被覆盖度较高,马尾松(*Pinus massoniana*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)等林木在流域广泛分布,林地是流域面积占比最高的地类,2019年流域林地面积占比为85.84%。土壤以红壤、黄壤、岩性土和水稻土为主。流域内的新安江水库是20世纪50年代为建新安江水电站而形成的大型水库,湖区面积573 km²,相应库容178.40亿m³,是长三角地区最重要的战略饮用水源地之一。自2019年起,千岛湖开始为杭州市等地1000多万人供水。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

本研究以千岛湖流域为研究区域,收集6期环境数据集,时间分别为1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2019年。收集的数据集包括气象数据、土壤数据、植被数据、高程数据、土地利用类型数据以及其他基础地理信息数据(表1),所有数据均统一了空间分辨率和坐标系。

表1 数据来源及处理

Table 1 Data sources and pretreatment

| 数据类型 | 数据来源及处理方法 |
|----------|---|
| 气象数据 | 来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn),选取流域及其附近气象站点的逐日气象资料,包括降雨量、气温和风速等,通过ArcGIS普通克里格对气象数据进行空间插值获取研究区降雨数据和潜在蒸散数据,空间分辨率30 m |
| 土壤数据 | 来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)、国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)以及国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn),经过ArcGIS重采样得到分辨率为30 m的土壤数据 |
| 高程数据 | 来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)的GDEM数据产品,空间分辨率30 m,根据DEM数据提取研究区海拔、坡度、坡向等要素 |
| 植被数据 | 来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn),空间分辨率1 km,重采样为30 m |
| 土地利用数据 | 基于Landsat TM/OLI遥感影像,结合NDVI数据,MODIS土地利用数据通过随机森林算法分类获得,由项目提供 |
| 基础地理信息数据 | 来源于全国地理信息资源目录服务系统 |

2.2 生态系统服务指标的计算

2.2.1 产水量

流域产水量表征区域的水源供给能力,InVEST模型产水模块是基于水量平衡原理,综合考虑植被覆盖,土地利用,地形以及土壤质地等因素进行计算,主要公式如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) P_x \quad (1)$$

式中: Y_x 为栅格单元 x 的产水量 (mm); AET_x 是栅格单元 x 的实际蒸散量 (mm); P_x 是像元

x 上的降雨量 (mm)。

2.2.2 土壤保持

土壤保持由土壤潜在侵蚀量和土壤实际侵蚀量决定的,本研究采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)对流域土壤保持量进行计算。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot (1 - C \cdot P) \quad (2)$$

式中: A 为土壤保持量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot a)$],采用章文波等^[20]的半月降雨侵蚀力模型计算; K 为土壤可蚀性因子

[t·h/(MJ·mm)], 采用 EPIC 模型计算^[21], 并结合张科利等^[22] 研究结果进行校正; LS 为坡度坡长因子, 该因子采用 Wischmeier 等^[23]、Liu 等^[24] 以及 McCool 等^[25] 的方法进行计算; C 为植被覆盖管理因子, 采用蔡崇法等^[26] 研究计算得到; P 为土壤保持措施因子, 参考梁石正雄等^[27] 在钱塘江流域的研究。

2.2.3 碳储量

InVEST 模型的碳储量模块将生态系统服务碳储量分为地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机质碳储量 4 个部分^[28], 本研究基于该模块对流域碳储量进行计算, 公式如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (3)$$

式中: C_{total} 为总碳储量 (t/hm^2); C_{above} 为地上碳储量 (t/hm^2); C_{below} 为地下碳储量 (t/hm^2); C_{soil} 为土壤碳储量 (t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机质碳储量 (t/hm^2)。模块中使用的碳密度值参考相关研究^[29-33]。

2.2.4 生境质量

生境质量能够反映区域生物多样性的状况^[34], 研究采用 InVEST 模型生境质量模块对千岛湖流域生境质量进行评估, 公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \quad (4)$$

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 的生境适宜性; D_{xj} 为 j 类土地利用类型中栅格单元 x 的生境退化度; 参考相关研究对流域的威胁因子的权重和距离以及敏感性因子赋值^[34-37]; k 为半饱和常数, 取 D_{xj} 最大值的一半; z 为归一化常量, 通常取 2.5^[34]。

2.3 热点分析

2.3.1 热点分析

G_i^* 可以反映生态系统服务的冷热点空间分布格局, 通常采用 ArcGIS 10.2 软件中的 Getis-Ord G_i^* 工具分析千岛湖流域生态系统服务功能的供给差异^[38]。为进一步明确千岛湖流域生态系统服务的空间分布格局, 本研究基于 250 m 的格网尺度对千岛湖流域 4 种生态系统服务的年均值数据进行冷热点分析, 并将各项生态系统服务热点区进行叠加, 获取多重生态系统服务的综合热点区的空间分布状况, 按照叠加数量的不同依次定义为非热点区、I 类热点区、II 类热点区、III 类热点区、IV 类热点区。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\left[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2 \right] / (n-1)}} \quad (5)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2} \quad (7)$$

式中: n 为研究区网格数量; x_i 分别为网格 i 和 j 的生态系统服务; \bar{x} 为生态系统服务价值平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵。

2.3.2 地形位指数

地形位指数是综合考虑高度和坡度两个因素的综合地形因子, 可以全面反映某一点的地形状况^[39], 本研究通过公式计算千岛湖流域栅格单元地形位指数^[40], 采用自然断点法将地形位指数分为 10 级, 如表 2 所示, 并采用分区统计方法分析流域综合热点区在不同地形梯度上的分布状况, 公式如下:

$$T = \ln \left[\left(\frac{E}{E_0} + 1 \right) \times \left(\frac{S}{S_0} + 1 \right) \right] \quad (8)$$

式中: T 表示地形位指数; E 与 S 分别代表某栅格单元的海拔 (m) 和坡度 ($^\circ$); E_0 和 S_0 分别代表流域的平均海拔 (m) 和平均坡度 ($^\circ$)。

表 2 地形位指数分级标准

Table 2 Classification of terrain niche

| 梯度分级 | 地形位指数 | 梯度分级 | 地形位指数 |
|------|-------------|------|-------------|
| 1 | 0.03 ~ 0.43 | 6 | 1.42 ~ 1.62 |
| 2 | 0.43 ~ 0.70 | 7 | 1.62 ~ 1.82 |
| 3 | 0.70 ~ 0.97 | 8 | 1.82 ~ 2.02 |
| 4 | 0.97 ~ 1.21 | 9 | 2.02 ~ 2.26 |
| 5 | 1.21 ~ 1.42 | 10 | 2.26 ~ 2.91 |

2.4 生态系统服务权衡/协同分析

从流域尺度通过 Spearman 相关分析来刻画生态系统服务的权衡协同关系。利用 ArcGIS 10.2 软件渔网工具按照 1 km 间隔布点, 然后利用“多值提取至点”工具获取多期生态系统服务值, 其中为消除不同生态系统服务量纲的影响, 对数据进行 Min-Max 标准化处理。最后采用 SPSS 24.0 软件进行相关性分析, 并进行 T 检验。若两种生态系统服务在通过 0.05 水平的显著性检验, 且其相关系数为负, 则认为两者间存在权衡关系, 反之, 则存在协同关系。

均方根误差 (RMSE) 可以通过测量 2 种或

多种生态系统服务之间的差异，来刻画生态系统服务之间相互影响的程度大小^[41]，可以进一步探究生态系统服务权衡关系的空间分布格局和强度，RMSE值越大，表明权衡强度越强，值越小，权衡强度越弱，具体公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2} \quad (9)$$

式中： ES_i 为第*i*种生态系统服务的标准值； \overline{ES} 为生态系统服务的期望。

2.5 地理探测器

地理探测器是探测空间分异特征及其主要驱动力的一种方法，其基本思想是如果自变量与因变量的空间分布特征具有相似性，那么自变量对因变量就有重要的影响^[42]。包含风险探测、因子探测、生态探测和交互探测4个模块，本研究通过因子探测模块分析千岛湖流域生态系统服务权衡强度主要影响因子，计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h^2 \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (10)$$

式中： q 表示影响因子对产水量的解释度，范围为 $[0,1]$ ，值越接近1说明该类因子对产水量空间分布影响越大； h 为分区数目， L 为影响因子的样本数量； N 和 N_h 分别是全区和层内单元数； σ 和 σ_h 为全区和层*h*的方差。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务时间变化特征

由表3可知，1995—2019年，千岛湖流域产水服务与土壤保持服务表现为相同的变化特征，产水量和土壤保持量分别由1995年的 62.78×10^8 t和 8.70×10^8 t减少到2005年的 29.54×10^8 t和 3.45×10^8 t，分别下降了 33.24×10^8 t和 5.25×10^8 t，降幅为52.9%和60.3%。2015年较2005年分别大幅度增加了166.35%和151.6%，2015—2019年呈下降趋势，降幅分别为28.2%和16.8%。碳储量1995—2019年呈现出波动增加趋势，由1995年的 53.48×10^6 t增加到2019年的 54.32×10^6 t。流域生境质量整体呈增加趋势，波动变化较小，各年份生境质量指数较高。

3.2 生态系统服务空间变化特征

从空间上看（图1），1995—2019年，流域的碳储量空间格局较为稳定，高值区主要分布在林地，低值区分布在湖泊及其周围建设用地群高

等级生境质量主要集中在林地和草地，中等级生境质量集中在湖泊和林地与耕地的交界处，低等级生境质量集中分布在西部和东部的耕地、建设用地，流域以高等级生境质量为主，但在人类活动干扰较为强烈区域，生境质量则明显下降。土壤保持高值区主要分布在流域西部和北部，该区域林地分布面积较广，植被覆盖度较高，有利于土壤保持；低值区主要分布在流域中心的湖泊及其周边的耕地、未利用地和建设用地；产水量呈现出西高东低的空间分布格局，高值区主要分布在流域西部及中部湖泊两岸人口密集区，低值区分布在流域东部湖区，该空间分布格局与降雨和土地利用覆盖度相关，1995—2019年，流域的碳储量和生境质量以不变为主，变动区域呈点状分布在流域整体范围内，土壤保持和产水量以减少为主，增加部分呈零星块状分布在流域四周。

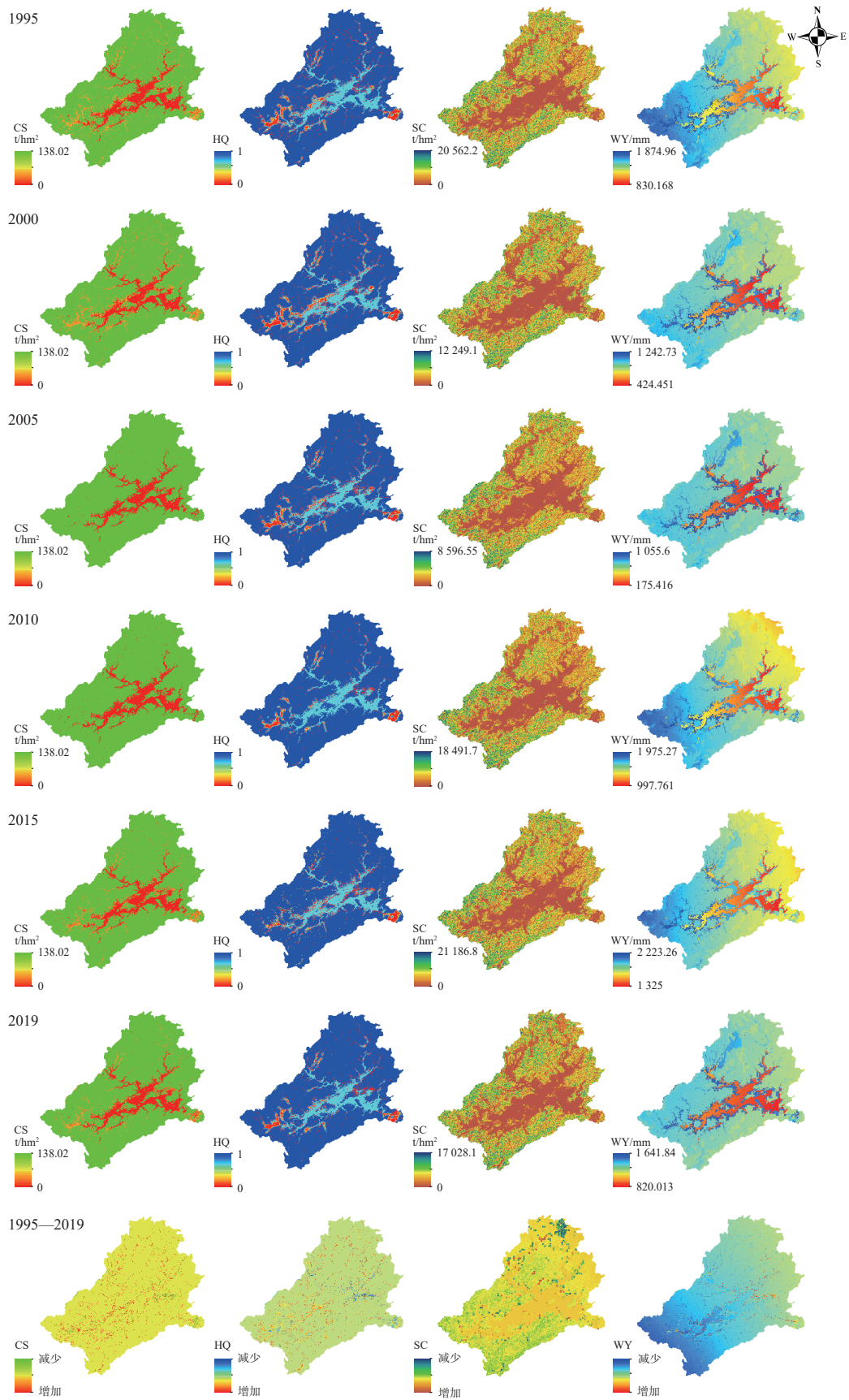
表3 1995—2019年千岛湖流域生态系统服务均值
Table 3 The annual average value of ecosystem services in the Thousand-island Lake Basin from 1995 to 2019

| 年份 | 产水量/m ³ | 土壤保持/t | 碳储存/t | 生境质量 |
|------|---------------------|--------------------|---------------------|--------|
| 1995 | 62.78×10^8 | 8.7×10^8 | 53.48×10^6 | 0.9276 |
| 2000 | 39.07×10^8 | 5.3×10^8 | 54.10×10^6 | 0.9233 |
| 2005 | 29.54×10^8 | 3.45×10^8 | 54.24×10^6 | 0.9322 |
| 2010 | 66.38×10^8 | 7.22×10^8 | 54.65×10^6 | 0.9463 |
| 2015 | 78.68×10^8 | 8.68×10^8 | 54.17×10^6 | 0.9325 |
| 2019 | 56.47×10^8 | 7.22×10^8 | 54.32×10^6 | 0.9384 |

3.3 热点分析

3.3.1 综合生态系统服务热点分析

由图2可知，千岛湖流域同一空间生态系统服务热点重叠区域最高为4项，最低为0项，其中热点数量为4的区域面积占比最低，仅为6.07%，主要分布在流域的西部林地，热点数量为0的区域面积占比最高，为30.72%，主要分布在流域中部地区和东北部地区。热点数量为1的面积占比位居第2，为26.49%，主要分布在流域西部地区，以产水服务为主。提供2项生态系统服务的热点区域面积占总面积的21.14%，分布在流域东北部，生态系统服务类型以生境质量和碳储量服务为主。热点重叠数量为3的区域面积占比为15.58%，斑块状分布在流域东部、北部和南部区域，生态系统服务类型以生境质量、碳储量和土壤保持为主。



CS 表示碳储量；HQ 表示生境质量；SC 表示土壤保持；WY 表示产水量。

图 1 1995—2019 年千岛湖流域生态系统服务时空分布及变化

Fig. 1 Spatio-temporal distribution and changes of ecosystem services in the Thousand-island Lake Basin from 1995 to 2019

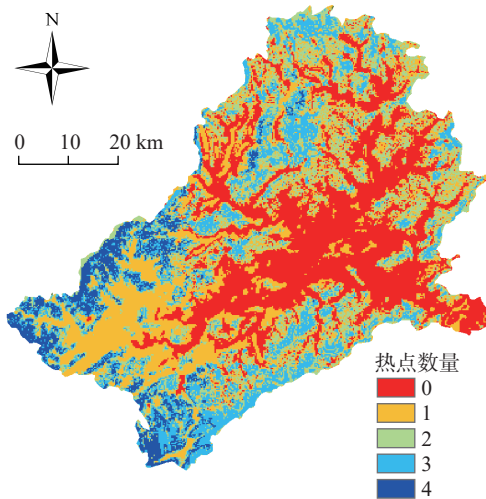


图2 千岛湖流域多重生态系统服务热点空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of multiple ecosystem service hotspots in the Thousand-island Lake Basin

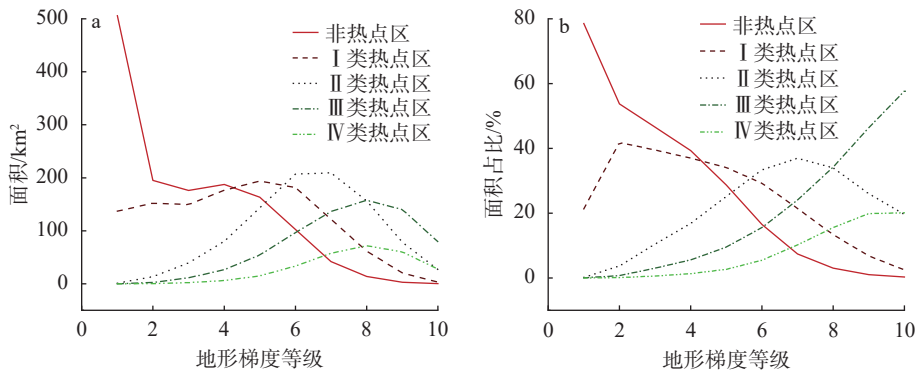


图3 千岛湖流域多重生态系统服务热点区在各地形梯度带上分布特点

Fig. 3 Distribution characteristics of multiple ecosystem service hotspots in the Thousand-island Lake Basin on each topographic gradient zone

从不同地形位梯度上各类热点区的面积占比情况来看 (图 3b), 非热点区的面积占比随着地形位梯度的增加而降低。I 类热点区和 II 类热点区的面积占比则分别在 2 级地形为梯度和 7 级地形位梯度上达到最高, 之后开始下降; III 类热点区和 IV 类热点区的面积占比则随着地形梯度的增加而逐渐升高。综合来看, 千岛湖流域的多重生态系统服务热点区域在中高地形位梯度占据着主导地位, 在地形梯度较低的区域, 生态系统服务供给较弱或者以某一单一生态系统服务类型为主。

3.4 生态系统服务权衡协同关系演变特征

由图 4 可知, 土壤保持、碳储量和生境质量 3 个生态系统服务之间的相关系数在不同年份均为正, 即两者为协同关系。产水量和碳储量在各年份相关系数均为负, 说明两者呈现较强的权衡关系。产水量和土壤保持在 2000 年、2005 年、2019 年表现为权衡关系, 在 1995 年、2010 年、2015

3.3.2 多重热点区的地形梯度效应

将多重热点区按照重叠数量从高到低依次命名为 IV 类热点区、III 类热点区、II 类热点区、I 类热点区和非热点区。从不同地形位梯度上各热点区的面积变化情况来看 (图 3a), 随着地形位梯度的增加非热点区的面积整体表现为减少的趋势。其他热点区的面积则随着地形位梯度的增加表现为先增加后减少的变化特征。I 类热点区的面积在 5 级地形位梯度上达到最高值, 之后随着梯度等级增加而下降; II 类热点区面积则在 7 级地形位梯度上达到最高; III 类热点区和 IV 类热点区的面积均在 8 级地形位梯度上达到最大值, 但在该等级梯度上 III 类热点区面积占比高于 IV 类热点区, 与 II 类热点区较为接近。

年为协同关系、产水量和生境质量在 2000 年表现为权衡关系, 其余年份相关系数为正, 表现为协同关系, 两对生态系统服务的相关系数相对更低, 说明它们之间的权衡协同关系相对较弱。

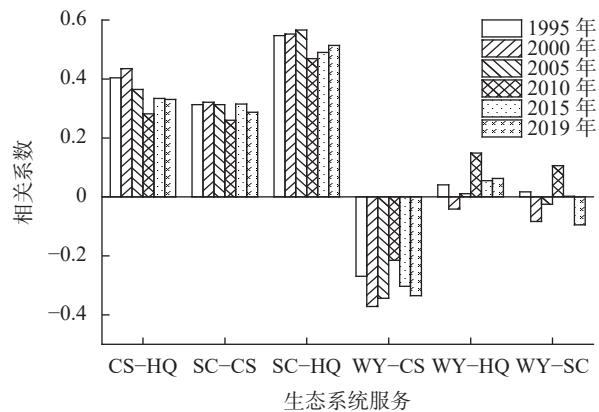


图4 千岛湖流域 1995—2019 年生态系统服务间相互关系
Fig. 4 Correlation coefficients between ecosystem services in the Thousand-island Lake Basin from 1995 to 2019

3.5 生态系统服务权衡强度影响因子分析

采用均方根误差对千岛湖流域6个年份的生态系统服务间的权衡强度进行计算,并利用地理探测器获取各个影响因子对于均方根误差的解释度,结果见表4。除产水量和土壤保持服务对之外,在其他生态系统服务对中,土地利用类型的解释度是所有影响因子中最高的。在产水量和土壤保持服务对中,降雨量的解释度最高,为0.2682,其次是坡度,为0.2670,坡向的解释度最低,仅有0.0044。植被覆盖度是除土地利用类

型之外,在碳储量和生境质量、产水量和碳储量的解释度第二高的影响因子,解释度分别为0.4411和0.4294,而在土壤保持和碳储量、土壤保持和生境质量中,坡度是解释度第二高的影响因子,解释度分别为0.2271和0.2153,降雨量在产水量和生境质量中的解释度仅次于土地利用类型,为0.2902。整体而言,土地利用类型、植被覆盖度、坡度以及降雨量是造成千岛湖流域各生态系统服务之间权衡强度空间分异的主要影响因子。

表4 生态系统服务权衡强度的单因子探测结果

Table 4 Single factor detection of the trade-off intensity among ecosystem services

| 生态系统服务组合 | 坡向 | 高程 | 坡度 | 潜在蒸散量 | 降雨量 | 植被覆盖度 | 土地利用类型 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CS-HQ | 0.0697 | 0.3846 | 0.3850 | 0.0442 | 0.0327 | 0.4411 | 0.9922 |
| SC-CS | 0.0126 | 0.0796 | 0.2271 | 0.0395 | 0.0349 | 0.0788 | 0.4330 |
| SC-HQ | 0.0107 | 0.0565 | 0.2153 | 0.0246 | 0.0270 | 0.0350 | 0.2877 |
| WY-CS | 0.1036 | 0.2439 | 0.2379 | 0.1014 | 0.1154 | 0.4294 | 0.9225 |
| WY-HQ | 0.0661 | 0.0923 | 0.1161 | 0.1665 | 0.2902 | 0.2259 | 0.6159 |
| WY-SC | 0.0044 | 0.2291 | 0.2670 | 0.1489 | 0.2682 | 0.1894 | 0.1890 |

4 结论与讨论

4.1 讨论

开展千岛湖流域生态系统服务功能长时间序列的评估可为其未来的环境保护和绿色可持续发展提供科学依据。研究发现,1995—2019年流域产水服务和土壤保持服务的时空变化特征较为一致,均表现为先减少后增加再减少的变化趋势,这种变化趋势与流域降雨量和土地利用类型相关^[43-44],主要原因在于产水量的实质是降雨量和实际蒸散量的差值,而土壤保持服务的降雨侵蚀力是采用降雨量计算,所以两种生态系统服务的年际变化特征相近。1995—2019年流域碳储量和生境质量呈现出波动增加趋势,主要与流域森林面积的增加有关,这与王茜等^[45]在秦岭地区的研究结果一致。生境质量和碳储量的变化主要受到流域土地利用覆盖变化的影响,建设用地、农田、林地和草地之间相互转化,导致两者的年际变化表现为波动变化特征。

从不同生态系统服务的空间格局变化来看,碳储量和生境质量的高值区域分布较为接近,主要分布在流域高海拔林地区域,该区域森林覆盖率较高,气候适宜,受人类活动影响较小,因此碳储量和生境质量较高,这与曹梦琪等^[40]研究结

果一致。土壤保持的高值区分布在流域西部、南部和北部,是降雨量、地形以及土地利用类型综合作用的结果^[44],产水量主要受降雨量的影响^[46],因此其高值区集中在降雨较高的西部。将多重生态系统服务区与地形状况相结合进行分析,发现提供3种及3种以上生态系统服务热点区主要分布在高海拔高坡度区域,该区域人类活动较少,植被覆盖度高,是降雨的高值区,因此各项生态系统服务的热点分布区域主要集中在此。而非热点区以及提供1种热点区则主要分布在流域低海拔低坡度区域,该区域人类活动干扰较强,土地利用类型以水体和建设用地、耕地等为主。提供2种生态系统服务热点区则与低海拔低坡度林地区域有所重叠,说明土地利用类型是影响区域生态系统服务功能的重要影响因素之一。千岛湖流域的综合热点区研究结果与白龙江流域的研究结果较为一致^[39],但与部分研究结果不太一致^[47-48],主要原因在于不同研究区的自然环境状况、气候条件以及土地利用类型分布等本底条件的不同。

采用相关分析、均方根误差以及地理探测器探究了流域尺度生态系统服务的权衡协同关系及其主要影响因素。发现1995—2019年流域的土壤保持和产水量、产水量和生境质量既有权衡关系也有协同关系,相关系数在正负0.2以内,相

关程度相对较低。李理等^[49]研究发现地形及气候条件决定了流域产水量和土壤保持的供给强度,土壤保持和产水量分别受到降雨侵蚀力和降雨量的影响,在降雨充沛、植被覆盖度高的地区,具有较高的产水能力、土壤保持能力和生境质量。同时,在建设用地、农田等区域,产水量较高,但是由于植被覆盖度低,人类活动干扰强,导致土壤保持量减少和生境质量的降低,因此流域土壤保持和产水量、产水量和生境质量之间既有权衡关系也有协同关系,这与杨洁^[50]和钱红运等^[51]在黄河流域和南京江北区的的结果较为一致,但与部分学者研究结果不同^[11,52],可能原因在于区域的自然环境因素和社会经济发展之间的差异,因此,受到流域不同年份的气候条件以及地类结构变化影响,两对生态系统服务会发生协同和权衡之间关系的转变。千岛湖流域林地范围较广且面积逐年增大,随着流域植被覆盖度提高,其森林固碳能力也有所增加,植被蒸散量的增大使得产水量较低,同时,冠层截留降水的能力提高,减少了雨水对土壤的侵蚀,进而增强了流域土壤保持能力,因此碳储量和土壤保持表现为协同关系,与产水量主要为权衡关系,两对生态系统服务的协同权衡强度为0.2~0.4,与已有研究结果一致^[45,52]。生境质量的胁迫因子等参数的选择与流域的实际情况相关^[53],流域土地利用覆盖中以林地的面积占比最高,受人为干扰强度较低,良好的生态系统结构促进森林生长,进一步提高碳储量和土壤保持,因此生境质量与碳储量、生境质量与土壤保持有协同关系,与在长三角城市群和川西高原地区的相关研究结果一致^[54-55],且协同强度相对其他四对生态系统服务更高。由地理探测器的单因子探测结果可知,在千岛湖流域,土地利用类型对于生态系统服务间的权衡关系的解释度较高,可能原因在于,土地利用类型作为模型评估的基础输入量,其面积的变动会直接对多种生态系统服务造成影响,这与陈田田等^[56]在贵州省的研究结果较为一致。同时,降雨量、植被覆盖度以及高程等地理因素都会对生态系统服务的权衡关系造成影响,主要是因为降雨和高程会影响地表径流和土壤流失强度^[57],植被覆盖度直接关系到流域碳储量和生境质量大小,说明气候条件、自然状况以及植被修复在生态发展中的重要性。

研究区内生态系统服务功能的提升需要综合考虑其时空异质性和权衡协同关系。从研究结果

来看,针对流域西部的Ⅳ类热点区,以保护为主,坚持封山育林政策,减少人类活动影响,提高该区域生态系统服务功能。在流域的Ⅲ类热点区和Ⅱ类热点区,则主要考虑进行生态环境的修复工作,针对该区域的生态系统服务间的关系,通过改善土地利用结构,优化农业产业布局,推广多种种植方式,植树造林,提升该区域农地和林地质量。最后是以低海拔低坡度为主的Ⅰ类热点区和非热点区,该区域人类活动对生态系统服务有着至关重要的影响,建议通过制定合理的管理政策,约束人类活动,防止生态系统进一步地退化,并且通过提高植被覆盖,合理耕作改良土壤结构等手段,提升该区域的生态系统服务功能。

本研究在参考相关研究的基础上,结合千岛湖流域的实际情况,对流域的生态系统服务时空变化进行研究,选取了4项典型生态系统服务,未来需增加生态系统服务类型。如支持服务中的养分循环、文化服务中的美学价值等,尤其是与流域生态环境保护和可持续发展相关的生态系统服务类型。同时部分数据是基于全国尺度上进行提取,空间分辨率较低,因此,在以后的工作中,需尽量提高数据精度,在气候变化和经济发展大背景下,深入研究生态系统服务内部机制变化,为区域生态保护和可持续发展提供支撑。

4.2 结论

本研究基于多源数据和InVEST模型、RUSLE模型,评估了1995—2019年千岛湖流域生态系统时空变化,以及不同尺度生态系统服务的权衡协同关系,结果如下:

1) 1995—2019年千岛湖流域产水量和土壤保持量表现为相同的先减少后增加再减少的变化趋势,碳储量和生境质量表现为先增加再减少的变化趋势,空间上只产水量的年际变化较为显著,其余生态系统服务空间变化不大。

2) 流域各类热点区面积占比与其提供生态系统服务数量呈反比,非热点区和Ⅰ类热点区主要分布在低地形位梯度上,Ⅱ类及以上热点区主要分布在中高地地形位梯度上。

3) 流域上碳储量、生境质量和土壤保持量间以及碳储量和产水量间的权衡协同与时空关系相差不大,产水量和生境质量以及产水量和土壤保持量在不同年份的权衡协同关系则较为复杂,土地利用类型、植被覆盖度和高程是生态系统服务权衡变化的主要影响因子。

[参 考 文 献]

- [1] Costanza R, Farber S. Introduction to the special issue on the dynamics and value of ecosystem services: integrating economic and ecological perspectives [J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 367–373.
- [2] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441–446.
- [3] 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.
- [4] Diaz S, Settele J, Brondizio E S, et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change [J]. *Science*, 2019, 366(6471): 3100.
- [5] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, et al. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main concepts, methods and the road ahead [J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264–272.
- [6] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福祿, 等. 全球变化对生态系统服务的影响 [J]. *中国基础科学*, 2017, 19(6): 14–18.
- [7] 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.
- [8] Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, et al. Multi-scale analysis of trade-off/synergistic effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(5): 981–999.
- [9] 冯漪, 曹银贵, 李胜鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同研究: 发展历程与研究特征 [J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(1): 11–25.
- [10] 卫彦宏, 乔旭宁, 张仲伍, 等. 基于气候带与农业区划的农田生态系统服务权衡及驱动机制 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(20): 220–228.
- [11] 张自正, 张蕾, 孙桂英, 等. 清江流域生态系统服务权衡时空效应及驱动因素 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 1051–1062.
- [12] Karimi J D, Harris J A, Corstanje R. Using Bayesian Belief Networks to assess the influence of landscape connectivity on ecosystem service trade-offs and synergies in urban landscapes in the UK [J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(11): 3345–3363.
- [13] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 等. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3368–3380.
- [14] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区 [J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 736–756.
- [15] 王蓓, 赵军, 仲俊涛. 2005—2015年石羊河流域生态系统服务时空分异 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 474–485.
- [16] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化 [J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780–2796.
- [17] Li M, Zheng P, Pan W B. Spatial-temporal variation and tradeoffs/synergies analysis on multiple ecosystem services: a case study in Fujian [J]. *Sustainability*, 2022, 14(5): 3086.
- [18] 徐鹏飞, 程乾, 金平斌. 基于神经网络模型的千岛湖清洁水体叶绿素 a 遥感反演研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1670–1679.
- [19] 周浩楠, 赵郁豪, 曾嶝, 等. 千岛湖陆桥岛屿地表蚂蚁群落物种多样性空间格局及其影响因素 [J]. *生物多样性*, 2019, 27(10): 1101–1111.
- [20] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究 [J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 705–711.
- [21] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1990, 329(1255): 421–428.
- [22] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7–13.
- [23] Wischmeier W H, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [J]. *Agriculture Handbook*, 1978(537): 285–291.
- [24] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1759–1763.
- [25] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1387–1396.
- [26] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究 [J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19–24.
- [27] 梁石正雄, 方海燕. 2006—2015年钱塘江流域土壤侵蚀动态变化 [J]. *中国水土保持科学 (中英文)*, 2020, 18(6): 33–42.
- [28] 邵雅静. 气候变化和人类活动影响下的生态系统健康时空演变特征及分区管控: 以黄河流域为例 [D]. 西安: 长安大学, 2022.

- [29] 戴巍, 赵科理, 高智群, 等. 典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7528-7538.
- [30] 范立红, 朱建华, 李奇, 等. 三峡库区土地利用/覆被变化对碳储量的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(4): 53-60.
- [31] 谷家川, 查良松. 皖江城市带农作物碳储量动态变化研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(12): 1507-1513.
- [32] 王巍贺. 浙江省耕层土壤有机碳密度估算及空间分布研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [33] 谢双玉, 王亚玲, 黄涛, 等. 武汉市主城区土地利用/覆被变化及其对土壤有机碳储量的影响 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2014, 48(3): 442-447.
- [34] 王军, 严有龙, 王金满, 等. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究 [J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5837-5848.
- [35] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 等. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [36] 尚俊, 蔡海生, 龙月, 等. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1901-1915.
- [37] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系 [J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [38] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. *Geographical Analysis*, 2010, 24(3): 189-206.
- [39] 徐彩仙, 巩杰, 李焱, 等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4291-4301.
- [40] 曹梦琪, 蔡英楠, 张丽, 等. 卧龙自然保护区典型生态系统服务时空变化研究 [J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9341-9353.
- [41] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策 [J]. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [42] 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.
- [43] 胡砚霞, 于兴修, 廖雯, 等. 汉江流域产水量时空格局及影响因素研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 73-82.
- [44] 廖雯, 胡砚霞, 于兴修, 等. 丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能时空特征及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 288-294, 376.
- [45] 王茜, 穆琪, 罗漫雅, 等. 秦岭生态系统服务协同与权衡的时空异质性 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2057-2067.
- [46] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [47] Peng J, Hu X X, Qiu S J, et al. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 765-775.
- [48] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系 [J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [49] 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.
- [50] 杨洁. 黄河流域草地生态系统服务功能及其权衡协同关系研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [51] 钱红运, 陈爽. 特大城市新区土地利用变化对生态系统服务权衡-协同关系影响: 以南京江北新区为例 [J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(9): 1-10.
- [52] 王启名, 杨昆, 李立晓, 等. 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析 [J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4876-4891.
- [53] 王赫彬. 长白山区生态系统服务变化及权衡与协同关系研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2022.
- [54] 李成, 赵洁, 庄智程, 等. 长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素 [J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5708-5720.
- [55] Wei J X, Hu A, Gan X Y, et al. Spatial and temporal characteristics of ecosystem service trade-off and synergy relationships in the western Sichuan Plateau, China [J]. *Forests*, 2022, 13(11): 1845.
- [56] 陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析: 以贵州省为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(17): 6959-6972.
- [57] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, et al. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a rock-mantled slope in the Karst rocky desertification area [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124086.

(责任编辑 陆 驰)

