

# 皖北粮食主产区生态系统服务权衡与协同作用强度及其驱动因素

胡和兵<sup>1,2</sup>, 申雪萌<sup>2</sup>, 黄智祥<sup>2</sup>, 张梦蕾<sup>2</sup>

(1.阜阳师范大学 淮河流域地理过程与环境演变研究中心,  
安徽 阜阳 236037; 2.阜阳师范大学 历史文化与旅游学院, 安徽 阜阳 236037)

**摘要:** [目的] 探究粮食主产区不同生态系统服务之间权衡/协同关系的作用强度及其驱动因素, 为区域生态系统服务管理提供理论支撑与决策依据。[方法] 以皖北粮食主产区为研究对象, 在测定 2000—2023 年产水量、碳储存、土壤保持、生境质量和粮食生产力 5 种生态系统服务的基础上, 运用 Morans'  $I$  度量各生态系统服务的空间自相关性, 构建动态权衡协同度 (DESTI) 模型量化 23 a 间 5 种生态系统服务变化量的权衡/协同关系作用强度和方向, 利用最优参数地理探测器 (OPGD) 探求自然与社会因子对其的驱动力。[结果] ①近 23 a 来, 皖北粮食主产区粮食生产力服务提升 91.97%, 其余各生态系统服务均有所下降。②5 种生态系统服务间权衡/协同作用强度和方向存在较强空间异质性, 呈现条带型、点状型、均质型和离散型 4 种空间格局, 且以条带型和点状型为主。③生态系统服务权衡/协同强度受自然因素 (土壤侵蚀力、NDVI) 的驱动作用明显, 自然与社会的交互作用也增强了权衡协同的空间差异。[结论] 皖北粮食主产区生态系统服务权衡协同作用强度存在显著的空间异质性, 自然因素为主要驱动因素, 且自然与社会的交互作用增强了其空间差异。

**关键词:** 生态系统服务; 权衡与协同; 地理探测器; 粮食主产区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0383-14

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 胡和兵, 申雪萌, 黄智祥, 等. 皖北粮食主产区生态系统服务权衡与协同作用强度及其驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 383-396. Hu Hebing, Shen Xuemeng, Huang Zhixiang, et al. Trade-offs and synergy intensity among ecosystem services and driving factors in main grain-producing areas of Northern Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 383-396. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.038; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.038.

## Trade-offs and synergy intensity among ecosystem services and driving factors in main grain-producing areas of Northern Anhui Province

Hu Hebing<sup>1,2</sup>, Shen Xuemeng<sup>2</sup>, Huang Zhixiang<sup>2</sup>, Zhang Menglei<sup>2</sup>

(1. Research Center for Geographic Processes and Environmental

Evolution in the Huaihe River Basin, Fuyang Normal University, Fuyang, Anhui 236037, China;

2. School of History Culture and Tourism, Fuyang Normal University, Fuyang, Anhui 236037, China)

**Abstract:** [Objective] The strength and driving factors of trade-offs and synergies among different ecosystem services in major grain-producing areas were explored, in order to provide theoretical support and a decision-making basis for the management of regional ecosystem services. [Methods] Taking Northern Anhui Province as the research object, this study measured the five ecosystem services of water production, carbon storage, soil conservation, habitat quality, and grain productivity from 2000 to 2023, and used Moran's  $I$  to measure the spatial autocorrelation of each element. The dynamic ecosystem synergistic trade-off index was used to quantify the strength of the trade-off/synergistic relationships between the changes in each ecosystem

收稿日期: 2024-11-08

修回日期: 2024-12-23

采用日期: 2024-12-23

资助项目: 安徽省高校省级自然科学研究重点项目“平天湖流域入湖河流水质对景观格局的尺度依赖性研究”(KJ2018A0580); 阜阳市社科规划项目 (FSK2023032); 阜阳师范大学博士科研启动项目 (2022KYQD0015); 阜阳师范大学硕士研究生创新研究计划项目 (23210611)。

第一作者: 胡和兵 (1973—), 男 (汉族), 安徽省桐城市人, 博士, 教授, 主要从事生态系统服务及景观生态方面的研究。Email: huhebing@163.com。

通信作者: 申雪萌 (2000—), 男 (汉族), 河南省安阳市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务。Email: 15515079945@163.com。

service over a 23-year period, and an optimal parameters-based geographic detector was used to identify the driving forces of natural and social factors. [Results] ① Over the past 23 years, the internal grain productivity service in Northern Anhui Province's grain-producing area has increased by 91.97%, whereas other ecosystem services have decreased. ② The characteristics of the trade-off/synergistic relationships between ecosystem services are spatially heterogeneous; they are divided into four categories: strip-shaped, point-shaped, homogeneous, and scattered. The main supporting services have significantly influenced the spatial distribution of trade-off/synergistic relationships between different ecosystem services. ③ The intensity of the ecosystem service trade-off/synergy is driven by natural factors (soil erosion power, NDVI). The interaction between natural and social factors also enhances spatial differences in trade-off synergy. [Conclusion] There is significant spatial heterogeneity in the synergistic effects of ecosystem service trade-offs in the main grain-producing areas of Northern Anhui Province. Natural factors are the chief driving factors, and the interaction between nature and society enhances spatial differences.

**Keywords: ecosystem services; trade-offs and synergies; geographic detectors; major food-producing areas**

生态系统服务(ecosystem services, ESs)是人类直接或间接从生态系统中获取的各种收益,与人类社会息息相关。生态系统服务同时受到自然与人为的影响,其相互之间存在着此消彼长的权衡和同增同减的协同关系<sup>[1]</sup>。在强调高质量发展的生态经济背景下,更好地识别权衡/协同关系及其背后驱动因素,有利于更好地把控自然资源管理与生态规划编制,以促进区域的可持续发展,对推动形成绿色、低碳、循环的经济发展模式和实现经济与生态的和谐共生有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前,已有多种方法用于识别生态系统服务权衡/协同关系。Spearman 和 Pearson 相关系数法是较早使用的方法<sup>[3]</sup>。为改变相关系数法无法直观反映生态系统服务空间分布的不足,有学者采用双变量空间自相关、叠置分析法等空间映射方法分别比较各个生态系统服务间高值与低值的聚合区域以呈现权衡/协同关系<sup>[4-5]</sup>;Zhang Ziyi 等采用差异比较法以二值结果表达了生态系统服务间权衡/协同关系的空间细节,并且支持局部回归计算以解决之前研究中空间化后生态系统服务间关系无法与潜在影响因素直接回归分析的问题<sup>[6]</sup>。而 Xue Chenli 等<sup>[7]</sup>和朱丹丹等<sup>[8]</sup>则引入动态权衡协同度(DESTI)指标进一步定量表征具有空间连续结果的生态系统服务间权衡/协同识别与作用强度。但已有的动态权衡协同度指标,还未能真正实现协同权衡关系方向识别与强度测算的同步进行。为此,本研究对原有动态权衡协同度指标进行了重构。除了提高对生态系统服务权衡/协同关系的认识外,探究其内部作用机制能够进一步为区域生态规划提供可靠的依据,生态系统服务权衡/协同关系的驱动因子日益引起人们重视<sup>[9]</sup>。许多学者基于冗余分析、多元线性回归、地理加权回归、随机森林模型和地理探测器等方法,开展了广泛研究<sup>[10-12]</sup>。地理探测器因能够识别区域内不同类型因子的驱动

作用及各因子之间的交互作用<sup>[13]</sup>,逐渐成为识别生态系统服务空间分异影响因素及作用机制的重要研究方法。传统的地理探测器仅以人的经验判断来选择变量离散方式,具有较强的主观性。而最优参数地理探测器模型,能够识别空间数据离散化分类方法和空间尺度参数的最佳组合,可为准确揭示因变量和自变量之间的关联提供科学依据<sup>[14]</sup>。

皖北粮食主产区是中国黄淮海平原重要的组成部分,该区域土地肥沃、粮食产量较高,为人类社会提供了丰富的生态系统服务。在追求产量增长与经济效益的双重驱动下,长期高强度的农业生产活动以及不合理的耕种方式等使得皖北粮食主产区内部的功能、结构、空间分布发生了显著的变化,生态系统服务功能日益受到威胁<sup>[15]</sup>。针对粮食主产区的生态系统服务,已有的研究主要集中在不同尺度下粮食主产区生态系统服务的权衡协同关系、空间聚集性特征、空间格局与驱动因素以及供求关系等方面<sup>[16-18]</sup>,但对于粮食主产区生态系统服务权衡/协同作用强度及其驱动因素的研究报道较少。

鉴于此,本文以皖北粮食主产区为研究区,选择产水量、碳储存、土壤保持、生境质量和粮食生产力 5 种生态系统服务,在探讨其 2000—2023 年不同生态系统服务时空变化以及生态系统服务间权衡/协同关系识别与作用强度测算的基础上,从自然和社会两方面分析生态系统服务权衡/协同作用强度的影响因素,旨在为制定科学的管理实践决策提供依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

皖北粮食主产区(116°—118° 10' E, 32° 30'—34° 38' N)位于安徽省北部(图 1),东接江苏,西连河

南,北临山东,总面积约为 42 802 km<sup>2</sup>,人口 2.94 × 10<sup>7</sup> 人,包括宿州市、淮北、淮南、蚌埠、阜阳、亳州 6 个省辖市,35 个县级地区。属暖温带半湿润季风气候,四季分明,气候温和,地势以平原为主。耕地是其优势土地利用类型,占总面积的 80.5%,其次是建设用

地,占 16.8%。目前全域范围内粮食生产面积、小麦、玉米、大豆等主要粮食品种播种面积等,均达全省 60%~70%,其中小麦面积约 20 000 km<sup>2</sup>,粮食总产超过 2.50 × 10<sup>10</sup> kg,占全省 70% 以上,是安徽省乃至全国的重要粮食主产区。

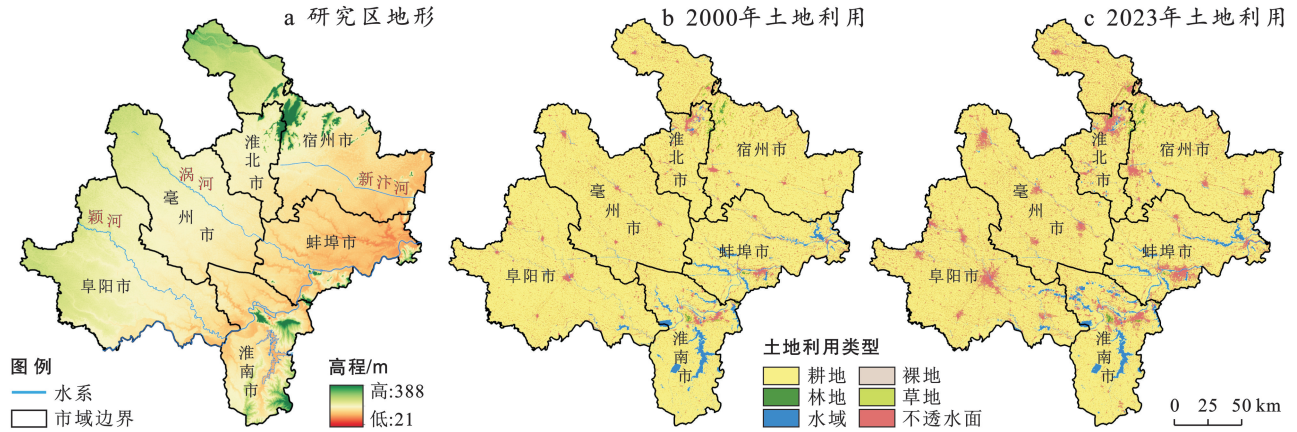


图 1 皖北粮食主产区地形与 2000、2023 年土地利用状况

Fig.1 Topography of main grain producing areas of Northern Anhui Province and land use conditions of 2000 and 2023

## 1.2 数据来源及处理

结合研究区的实际情况以及相关研究<sup>[19-20]</sup>,本研究选择了产水量、碳储存、水土保持、生境质量和粮食生产力 5 种生态系统服务进行评估,所需数据包括 2000,2005,2010,2015,2020,2023 年 6 期自然与社

会经济数据,具体数据信息及来源见表 1。

本文所有数据进行了统一化处理,地理坐标系统一采用 WGS1 984 大地坐标系,所有数据统一重采样至 30 m × 30 m 空间分辨率后通过掩膜提取,从而获得研究区边界数据。

表 1 数据来源介绍

Table 1 Introduction of data sources

数据类型	数据来源	分辨率
土地利用	ZENODO ( <a href="https://zenodo.org/records/12779975">https://zenodo.org/records/12779975</a> )	30 m
DEM	地理空间数据云 ( <a href="https://www.gscloud.cn">https://www.gscloud.cn</a> )	30 m
降水量	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn">https://data.tpdc.ac.cn</a> )	1 km
蒸散发	国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1 km
土壤	世界土壤数据库 ( <a href="https://gaez.fao.org">https://gaez.fao.org</a> )	—
NDVI	国家生态科学数据中心 ( <a href="http://www.nesdc.org.cn">http://www.nesdc.org.cn</a> )	30 m
NPP	地球资源数据云平台 ( <a href="http://www.gis5.g.com">http://www.gis5.g.com</a> )	500 m
人口密度	figshare 数据分享平台 ( <a href="https://figshare.com">https://figshare.com</a> )	100 m
GDP	资源环境科学数据平台 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )	1 km
夜间灯光	哈佛数据宇宙平台 ( <a href="https://dataverse.harvard.edu">https://dataverse.harvard.edu</a> )	1 km

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务评估

2.1.1 产水量 采用 InVEST 模型中 Annual Water Yield 模块模拟产水量。计算公式为:

$$Y(x) = \left[ 1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (1)$$

式中:Y(x)和 P(x)分别为栅格单元 x 的年产水量(mm)与年降水量(mm); AET(x)表示栅格单元 x 的年实际蒸散量(mm)。

2.1.2 碳储存 碳储存代表生态系统的固碳能力,包括地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳 4 种碳库的总和。本文采用 InVEST 模型中 Carbon Storage 模块量化研究区的碳储量。具体计算公式为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (2)$$

式中: C<sub>total</sub> 表示总碳储量(t/a); C<sub>above</sub>, C<sub>below</sub>, C<sub>soil</sub>, C<sub>dead</sub> 分别表示地上生物碳储量(t/a); 地下生物碳储量(t/a); 土壤碳储量(t/a)和死亡有机物碳储量(t/a)。

2.1.3 水土保持 本文采用 InVEST 模型中 Sediment Delivery Ratio 模块求得水土保持服务,该模块通过计

算实际土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量的差值估算研究区的水土保持量,计算公式为:

$$RKLS=R \times K \times L \times S \quad (3)$$

$$USLE=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (4)$$

$$SDR=RKLS-USLE \quad (5)$$

式中:SDR 为水土保持能力(t/a); RKLS 为潜在土壤侵蚀量(t/a); USLE 为实际土壤侵蚀量(t/a); R 为降水侵蚀力[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)],通过降雨侵蚀模数计算获得; K 为土壤可蚀性[t·hm<sup>2</sup>·h/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm)],采用 K 因子计算方法获得; L, S 为坡长和坡度因子,通过 DEM 数据模拟获得; C, P 值分别是植被覆盖管理因子和水土保持措施因子,分别通过参考文献[21]获得。

2.1.4 生境质量 采用 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块结合土地利用和生物多样性威胁因素计算出生境质量,计算公式为:

$$Q_{xj}=H_j \times \left[ 1 - \frac{D_{xj}^z}{(k^z + D_{xj}^z)} \right] \quad (6)$$

式中:Q<sub>xj</sub>为生境质量指数(无量纲); H<sub>j</sub>为土地利用类型 j 的生境适宜度; D<sub>xj</sub><sup>z</sup>为生境胁迫水平,威胁因子数据参考文献[22]; k 为半饱和系数,经过校准模型结果 k 取值 0.5; z 为归一化常量,根据 InVEST 手册中推荐取值 2.5。

2.1.5 粮食生产力 粮食生产力以皖北地区所辖耕地的 NDVI 所占比例为基础,对粮食总产量进行分配,以确定各栅格粮食的生产能力<sup>[23]</sup>,粮食总产量通过各地市统计年鉴获得。计算公式为:

$$G(x)=\frac{NDVI_x}{NDVI_{sum}} \times G_{sum} \quad (7)$$

式中:G(x)为栅格 x 的粮食供给总量(t); G<sub>sum</sub>为区域粮食总产量(t); NDVI<sub>x</sub>为耕地栅格 x 的 NDVI; NDVI<sub>sum</sub>为研究区耕地的 NDVI 总和。

## 2.2 生态系统服务权衡/协同强度及驱动因素分析

### 2.2.1 生态系统服务权衡/协同识别与作用强度测算

权衡/协同度(ETSD)用于识别各生态系统服务间相互作用的方向<sup>[6]</sup>。若 ESTD 为正值,说明该两项生态系统服务的变化趋势同向呈协同关系;若 ETSD 为负值,说明该两项生态系统服务的变化趋势异向呈权衡关系。在此基础上,构建动态权衡协同度(DESTI)模型,在权衡/协同度(ETSD)的基础上同时识别各生态系统服务间的权衡/协同方向及作用强度,可更清晰地表达空间上的作用关系。作用值在-1 到 1 之间;若 DESTL 越趋近于 1,则说明生态系统服务间协同关系越强;反之,则说明权衡关系越强。权衡/协同度(ETSD)和动态权衡协同度(DESTI)的计算公式分

别为:

$$DESTI=\frac{ESTD}{|ESTD|} \times |1 - |ES_{i,a} - ES_{i,b}| - |ES_{j,a} - ES_{j,b}|| \quad (8)$$

$$ESTD=\frac{ES_{i,a} - ES_{i,b}}{ES_{j,a} - ES_{j,b}} \quad (9)$$

式中:ESTD 为权衡/协同度;DESTI 为权衡/协同强度值; ES<sub>i,a</sub>, ES<sub>j,a</sub> 分别代表 a 时期生态系统服务 i 和 j 的值; ES<sub>i,b</sub>, ES<sub>j,b</sub> 分别代表 b 时期生态系统服务 i 和 j 的值。

2.2.2 最优参数地理探测器 最优参数地理探测器是识别地理要素空间分异影响因素及作用机制的重要研究方法,其包括因子探测、交互探测、风险探测以及生态探测 4 个部分,通过筛选出最优的离散方式和尺度,识别区域内不同类型因子的驱动作用及各因子之间的交互作用<sup>[14]</sup>。q 值范围为[0,1],q 值越大代表驱动因子对生态系统服务间作用强度的解释力越大。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统服务时空变化特征分析

2000—2023 年,皖北粮食主产区区内除粮食生产力服务显著提升外,各生态系统服务都呈现下降趋势;空间分布上受土地利用类型的影响,低值区以建设用地和水域为主,高值区以耕地为主(图 2)。通过对各生态系统服务进行分区统计得到图 3,可以看出,粮食生产力服务在 23 a 间持续增长,且涨幅较大,其年均值由 303.521 t/a 增至 582.137 t/a,同比增长 91.79%;水土保持服务、碳储存服务、生境质量服务年均值变化幅度较小,增减幅度均在 5% 左右;产水量服务年际变化幅度较大,2005,2020 年年均值分别为 767.487 和 773.879 mm/a,而 2010 年年均值仅有 568.699 mm/a,变化幅度最高达 26.51%。产水量服务的高值地区分布在研究区西部的阜阳市和南部的淮南市,并以淮南市的寿县最为突出,23 a 间寿县的产水能力有明显提升;低值区主要分布在东部的宿州市和中部的淮北市,空间上呈从西南向东北递减的趋势。碳储存服务在时间上的变化量较小,其低值地区主要分布在研究区东南侧,以蚌埠市与淮南市为主;高值区域主要分布在西北水域面积较少地区。水土保持服务的高值地区面积较少,在北部宿州市和南部淮南市海拔较高地区有少量分布;低值地区以平整地区为主,时间上未存在明显变化。23 a 间,生境质量服务的低值地区面积明显增大,主要分布在各行政区内部;其高值地区以东南部的蚌埠市为主,北部宿

州市有少量高值地区分布,整体呈现西高东低的空间态势。从 2000—2023 年,各地区粮食生产力服务的变

化量较大,各地市生产能力均有显著提升;该服务低值地区较少,主要分布在北部和南部海拔较高地区。

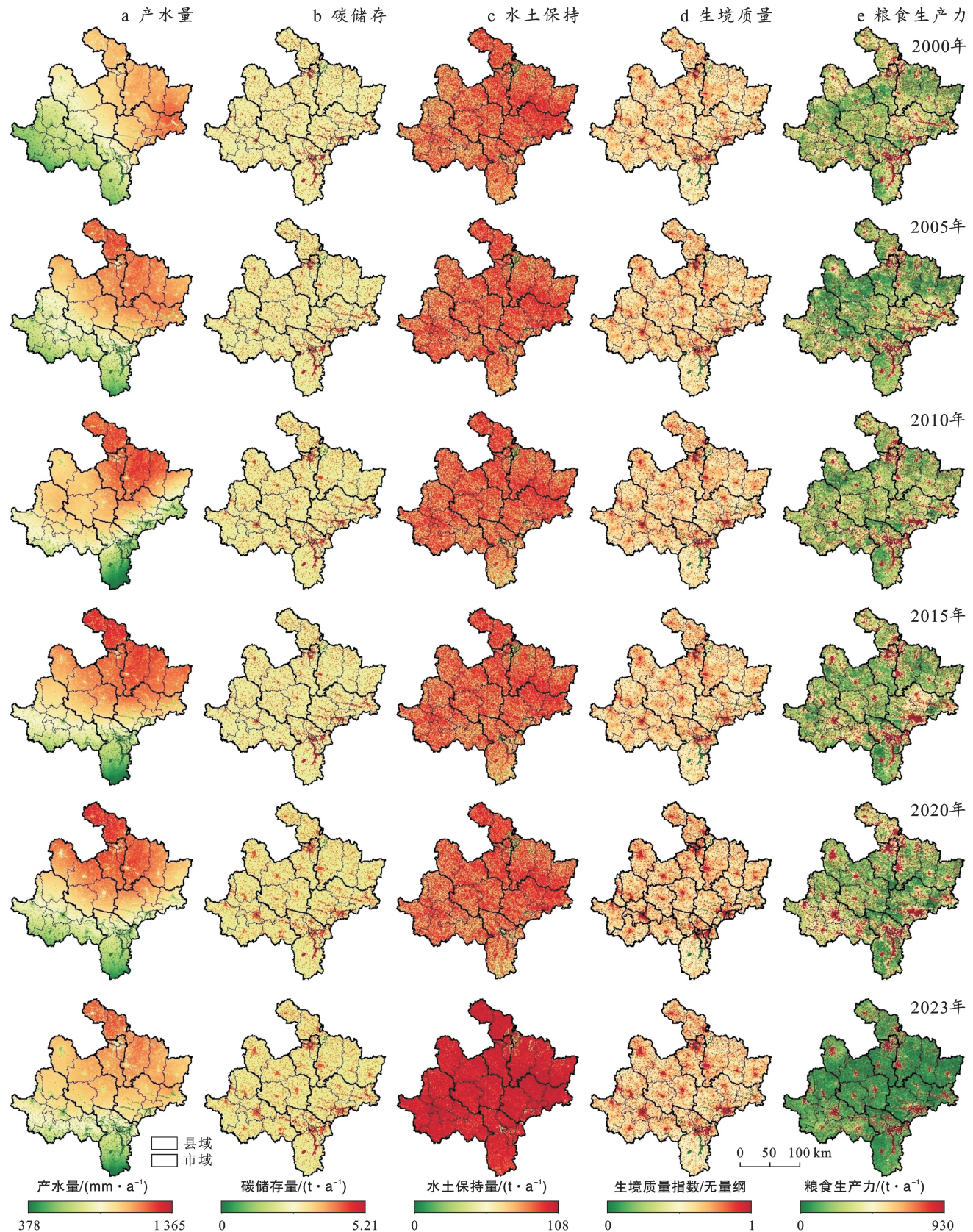


图 2 2000—2023 年皖北粮食主产区生态系统服务空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in main grain producing areas of Northern Anhui Province from 2000 to 2023

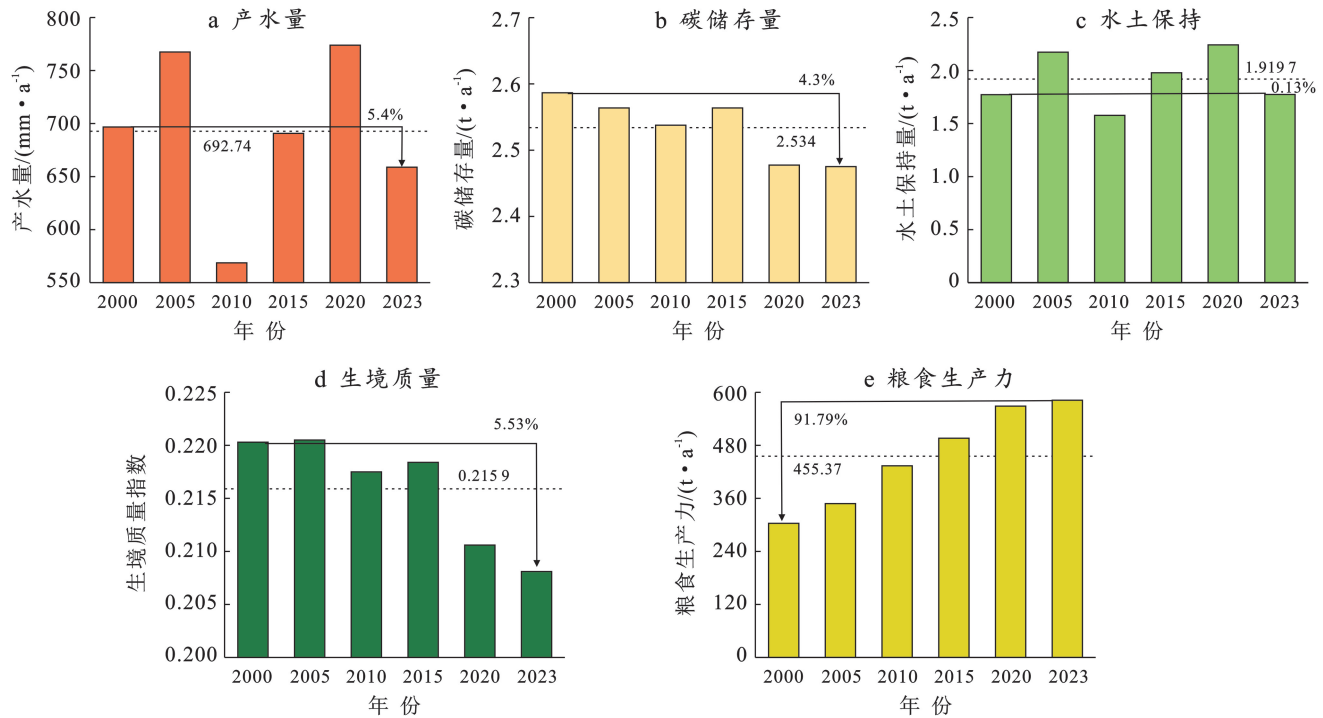


图 3 2000—2023 年皖北粮食主产区 5 项生态系统服务年均值

Fig.3 Annual average values of five ecosystem services in main grain producing areas of Northern Anhui Province from 2000 to 2023

### 3.2 生态系统服务权衡/协同强度分析

3.2.1 双变量全局空间自相关检验 莫兰指数 (Moran's  $I$ ) 用于度量整个研究区内要素的空间自相关性,其取值于  $[-1, 1]$  之间,可知其趋于聚集或离散。当 Moran's  $I$  大于或小于 0 时,表示数据在空间

上趋于集聚;当 Moran's  $I$  等于 0 时,表示数据在空间上离散。通过 GeoDa 软件对各生态系统服务两两进行空间自相关得知(表 2),研究区内各生态系统服务间 Moran's  $I$  均呈空间正相关,空间集聚态势显著。

表 2 生态系统服务间权衡/协同关系的 Moran's  $I$

Table 2 Moran's  $I$  for trade-off and synergistic relationship among ecosystem services

生态系统服务关系类型	Moran's $I$	$p$ 值	$Z$ 值	分布类型
产水量—碳储存(WY-CS)	0.030 4	0.001	5.514 6	聚集
产水量—水土保持(WY-SDR)	0.056 9	0.001	10.193 6	聚集
产水量—生境质量(WY-HQ)	0.016 4	0.001	2.936 4	聚集
产水量—粮食生产力(WY-FS)	0.029 6	0.001	5.958 8	聚集
碳储存—水土保持(CS-SDR)	0.024 9	0.001	4.268 1	聚集
碳储存—生境质量(CS-HQ)	0.033 8	0.001	5.143 5	聚集
碳储存—粮食生产力(CS-FS)	0.271 8	0.001	45.234 9	聚集
水土保持—生境质量(SDR-HQ)	0.024 5	0.001	4.199 4	聚集
水土保持—粮食生产力(SDR-FS)	0.025 3	0.001	4.820 4	聚集
生境质量—粮食生产力(HQ-FS)	0.103 1	0.001	19.208 1	聚集

3.2.2 权衡/协同作用强度的空间特征 对皖北粮食主产区 2000—2023 年 5 种生态系统服务进行权衡/协同关系及其强度分析,得到权衡/协同作用强度的空间分布图(图 4),并对其进行重分类得到对应的强度分级面积统计图(图 5)。由图 4 可知,皖北粮食主产区权衡/协同作用强度的空间分布图呈现 4 类主要特征:①条带型:WY-CS, WY-SDR, WY-HQ 和 WY-FS 的空间分布特征较为相似,由西向东呈条带状分布。其中 WY-CS, WY-SDR 西部为协同区域,

中东部为权衡区域,权衡区域与协同区域分别占研究区 70% 和 30%;WY-HQ 强权衡和强协同区域所占比例基本相同,均约为 50%;WY-FS 以中权衡和中协同为主要特征,面积占比为 25% 和 39%。②点状型:CS-FS, SDR-FS 和 HQ-FS 的空间分布特征较为相似,行政区内部的城市建成区多呈现协同特征,城市建成区外部以权衡为主。其中 CS-FS 和 SDR-FS 分别以强权衡与中权衡为主要分布特征,分别占研究区的 61% 和 65%;HQ-FS 的强权衡和强协同分别占

研究区的 37%和 21%。③均质型:CS-SDR 整体呈现协同态势,城市建成区内部呈现弱协同特征,所占比例约为 6%。④离散型:CS-HQ 和 SDR-HQ 为不规

则分布,CS-HQ 的强权衡和强协同比例分别为 34%和 60%,SDR-HQ 的中权衡和中协同比例分别为 34%和 65%。

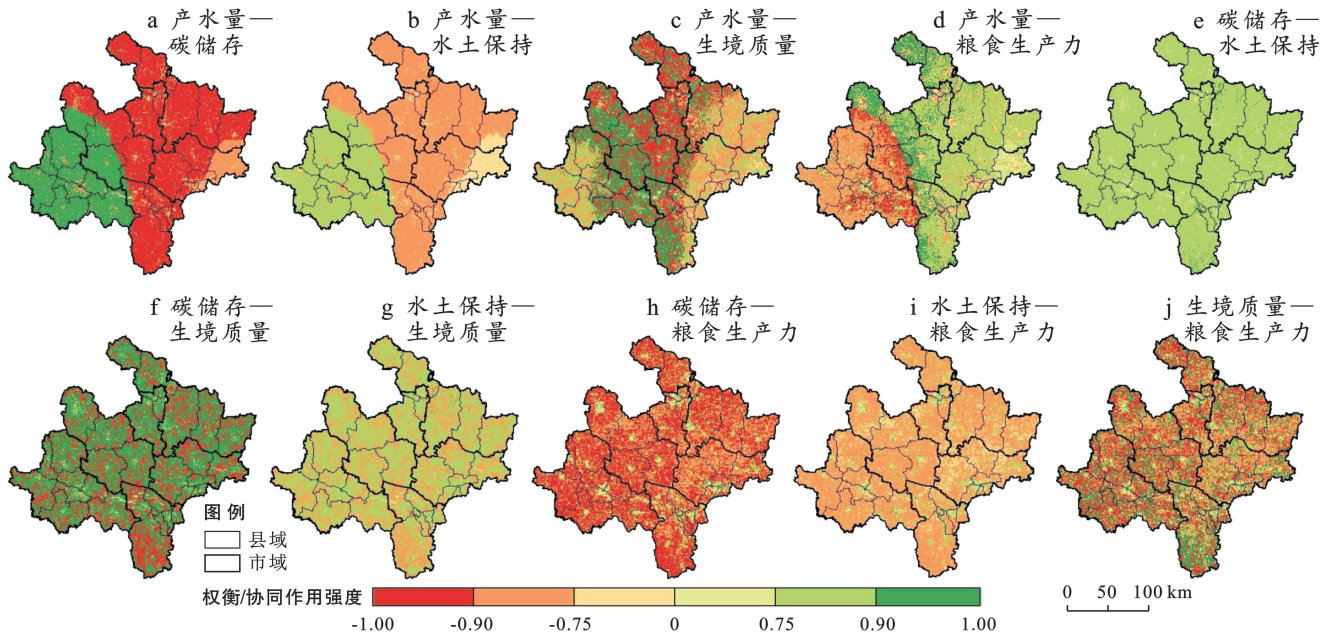


图 4 2000—2023 年皖北粮食主产区生态系统服务权衡/协同作用强度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of trade-offs and synergies intensity among ecosystem services in main grain producing areas of Northern Anhui Province from 2000 to 2023

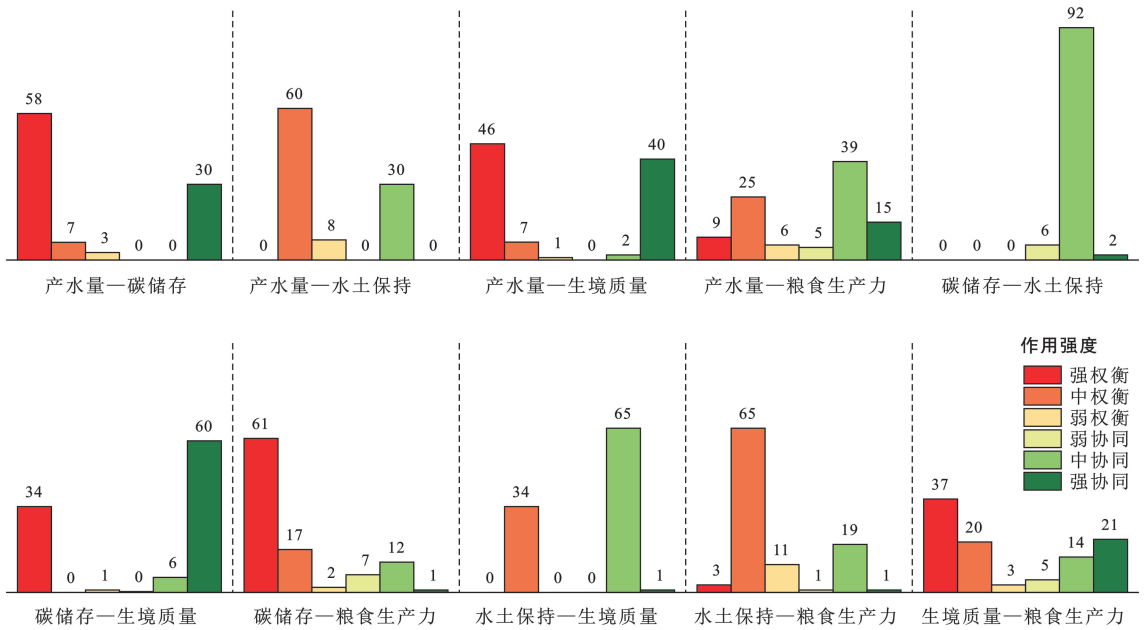


图 5 2000—2023 年皖北粮食主产区生态系统服务权衡/协同作用强度分级面积统计(单位:%)

Fig.5 Area statistics of trade-offs and synergies intensity levels among ecosystem services in main grain producing areas of Northern Anhui Province from 2000 to 2023 (unit:%)

### 3.3 生态系统服务权衡/协同作用强度的驱动因子

为进一步探索皖北粮食主产区的 5 种生态系统服务间权衡/协同作用强度空间分异的驱动因子,本研究根据研究区实际及前人研究成果<sup>[24-25]</sup>,综合选取了 DEM( $X_1$ )、降水量( $X_2$ )、蒸散发( $X_3$ )、土壤侵蚀力

( $X_4$ )、NPP( $X_5$ )和 NDVI( $X_6$ )6 个自然因子,以及路网密度( $X_7$ )、夜间灯光( $X_8$ )、GDP( $X_9$ )、人口密度( $X_{10}$ )、建设用地( $X_{11}$ )和农业用地( $X_{12}$ )6 个社会因子(图 6),运用最优参数地理探测器测度各驱动因子对生态系统服务间权衡/协同作用强度的影响程度。

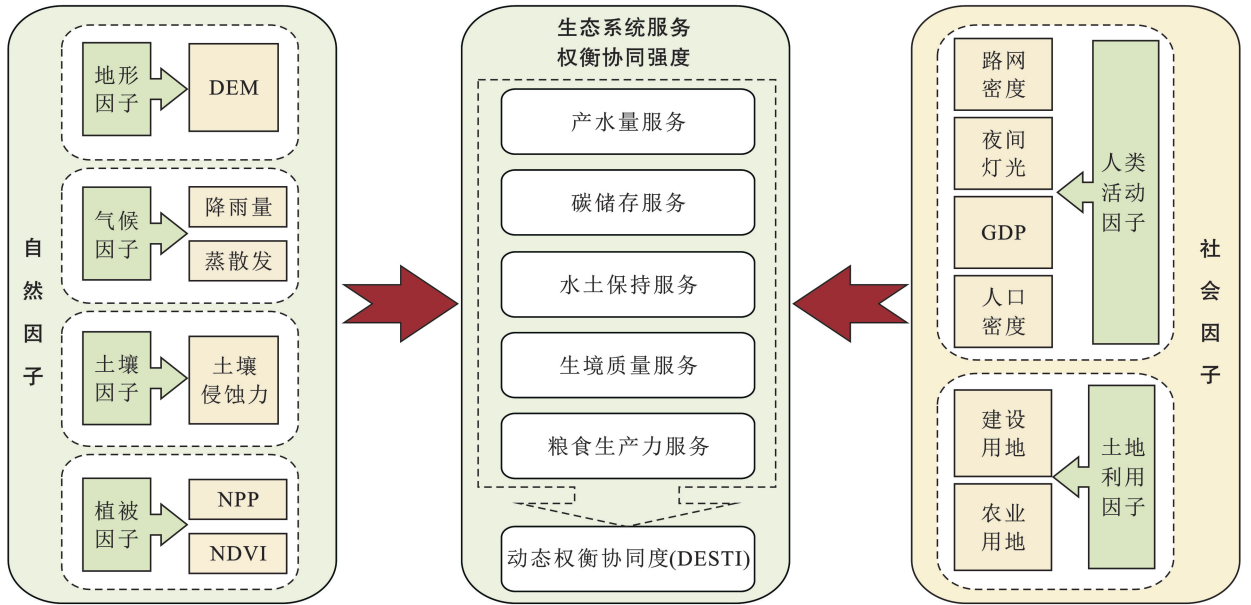


图 6 生态系统服务权衡/协同作用强度的驱动因子

Fig.6 Driver factors of trade-offs and synergies intensity among ecosystem services

3.3.1 主导因素探测 从地理探测器因子探测模块的结果来看(图 7),皖北粮食主产区生态系统服务间权衡/协同变化强度的空间分异受自然因子的影响大于社会因子。由图 7 可知,碳储存服务同粮食生产力、产水量、水土保持和生境质量服务( $Y_2, Y_5, Y_8, Y_9$ )的因子探测结果具有明显的相似性,自然因子的  $q$  值普遍高于社会因子的  $q$  值。其中,蒸散发量( $X_3$ )是塑造碳储存同产水量服务( $Y_5$ )间权衡/协同关系最重要的驱动因子, $q$  值为 0.919 0;而 NDVI( $X_6$ )是碳储存同粮食生产力、水土保持和生境质量服务( $Y_2, Y_8, Y_9$ )间权衡/协同关系解释力最强的因子, $q$  值分别为 0.581 5, 0.807 8, 0.698 8;社会因子中耕地面积( $X_{12}$ )的  $q$  值较高,分别为 0.457 6, 0.553 0, 0.582 0, 0.608 5, 具有较高的解释力。对于驱动粮食生产力同产水量、生境质量服务( $Y_1, Y_4$ )以及产水量同生境质量服务( $Y_7$ )间权衡/协同强度空间分异的主导因子为土壤侵蚀力( $X_4$ ),其  $q$  值分别为 0.109 0, 0.101 5, 0.102 3。对于粮食生产力同水土保持服务( $Y_3$ )来说,NDVI( $X_6$ )的解释力最强, $q$  值为 0.147 6。对产水量同水土保持服务( $Y_6$ )间权衡/协同空间分布的驱动因子而言,只有 DEM( $X_1$ )的解释力较高, $q$  统计量为 0.372 9。在塑造水土保持同生境质量服务( $Y_9$ )间权衡/协同变化强度空间分异中,自然因子土壤侵蚀力( $X_4$ )和社会因子( $X_{11}$ )的解释力较为显著, $q$  值分别为 0.108 5, 0.135 4。

3.3.2 双因子交互探测 交互作用结果如图 8 所示。可以看出,12 个驱动因子中,任意两个驱动因子的交

互作用均呈现非线性增强和双因子增强效应,表明双因子交互后会增强单因子对生态系统服务间权衡/协同关系作用强度空间分异的解释力。由图 8 可知,碳储存服务同产水量、水土保持和生境质量服务( $Y_5, Y_8, Y_9$ )的双因子交互探测结果同样具有相似性,自然因子( $X_1-X_6$ )与各因子之间的  $q$  值普遍较高。其中,影响碳储量服务同产水量服务权衡/协同关系最强的交互因子为  $X_1 \cap X_2$ ,  $q$  值高达 0.990 0;影响碳储存服务同水土保持和生境质量服务的交互因子分别是  $X_3 \cap X_8$  和  $X_2 \cap X_{11}$ ,  $q$  值分别为 0.887 0, 0.895 0。对于粮食生产力服务同各生态系统服务间关系进行双因子交互探测可以发现,高  $q$  值普遍出现在社会因子( $X_7-X_{12}$ )同各因子交互之间。其中粮食生产力服务同产水量服务( $Y_1$ )的高影响因子为  $X_2 \cap X_{12}$ ,  $q$  值达 0.990 0;对于粮食生产力服务同碳储存服务( $Y_2$ )而言, $X_7 \cap X_8$  解释力最强, $q$  值达 0.992 0;对粮食生产力同水土保持和生境质量服务( $Y_3, Y_4$ )来说, $X_5 \cap X_9$  和  $X_3 \cap X_{12}$  的交互  $q$  值最高,分别为 0.997 0, 0.911 0。对于产水量服务同水土保持和生境质量服务( $Y_6, Y_7$ )来说,蒸散发量( $X_3$ )与其他因子的交互作用的影响是造成空间分异的重要交互因子,其中  $X_3 \cap X_7$  是产水量服务同水土保持服务影响力最强的因子, $q$  值高达 0.999 0; $X_3 \cap X_4$  的  $q$  值为 0.840 0,对产水量服务同生境质量服务有着重要影响。对于水土保持服务同生境质量服务间双因子交互作用的解释力较低,主要集中于建设用地面积( $X_{11}$ )同各因子间的交互作用,其中最高值为  $X_2 \cap X_{11}$ ,  $q$  值为 0.161 3。

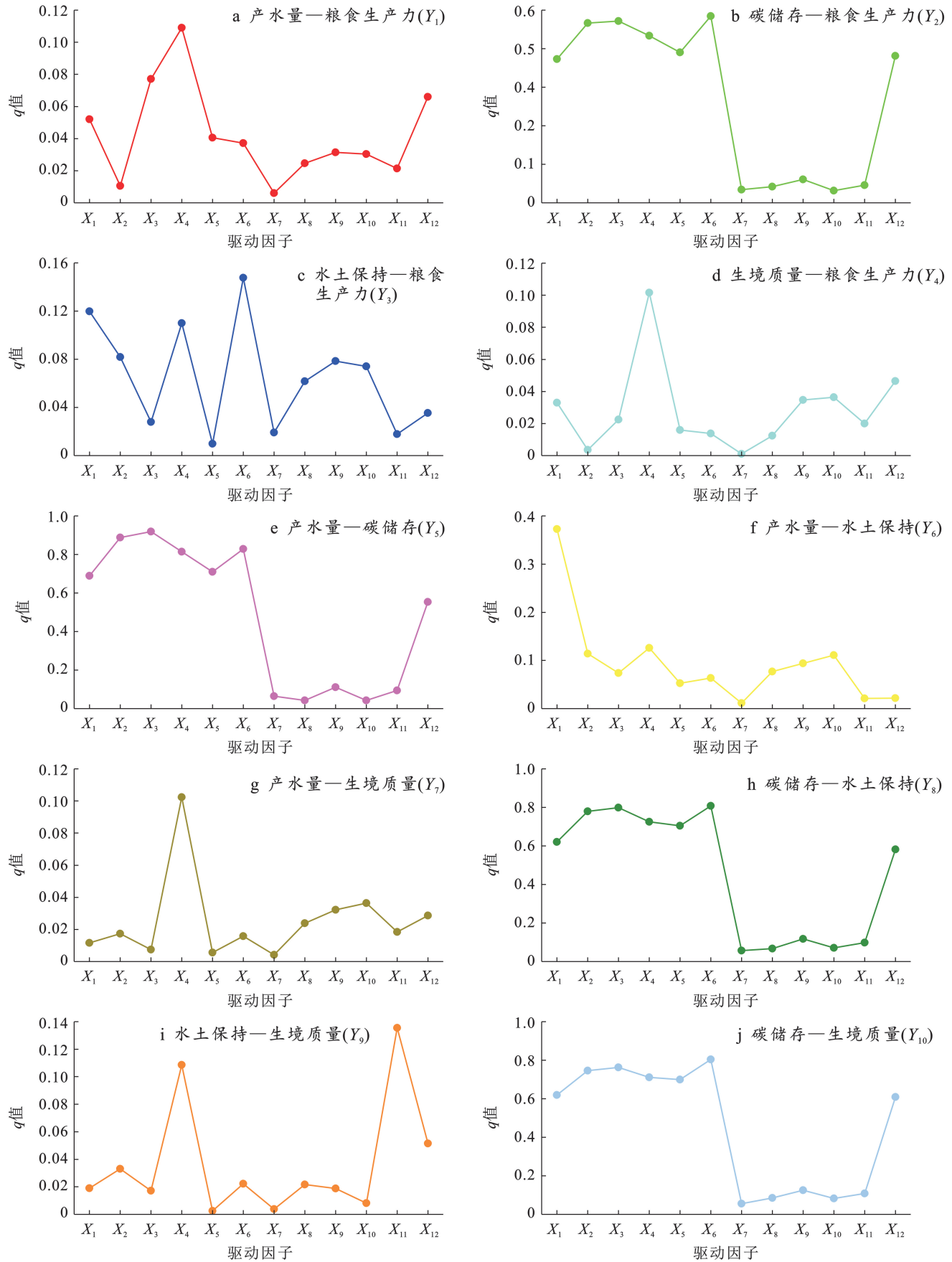
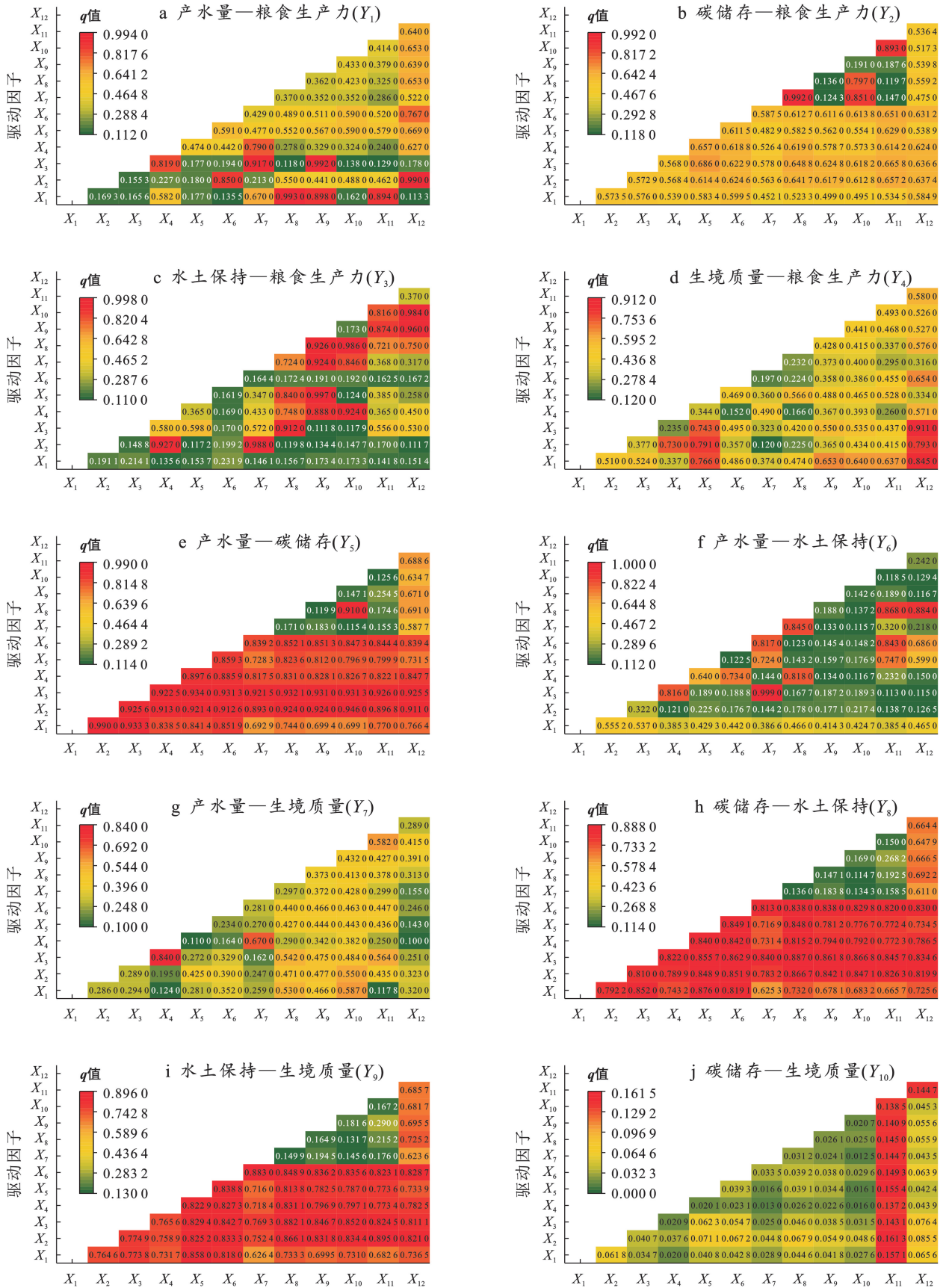


图 7 2000—2023 年皖北粮食主产区生态系统服务间权衡/协同分布驱动因子探测结果

Fig.7 Factor detection results of trade-offs and synergies intensity among ecosystem services in main grain producing areas of Northern Anhui from 2000 to 2023



## 4 讨论

### 4.1 皖北粮食主产区生态系统服务权衡/协同作用

本研究以皖北粮食主产区为研究区,通过计算产水量、碳储存、水土保持、生境质量和粮食生产力 5 项生态系统服务,结果显示生态系统服务间权衡/协同关系强度空间差异明显,并受各生态系统服务变化幅度和趋势影响,这一结论与 Chen Junchen 等<sup>[26]</sup>和张紫怡等<sup>[27]</sup>研究一致。碳储存服务与其他生态系统服务之间(WY-CS, CS-FS, CS-HQ)的关系主要表现为强权衡特性。在研究区域内,农作物是主要的植被覆盖类型,由于农作物相对较弱的固碳能力使得在碳汇方面的贡献较低<sup>[28]</sup>。此外,由于该区域长期对农作物进行耕种与施肥,极大地促进了土壤中微生物的活动,进而减少了土壤中有有机碳的积累,进一步降低了粮食主产区碳储存服务的功能<sup>[29]</sup>。在以耕地为主要特征的粮食主产区中,碳储存服务在与其他生态系统服务的关系中占据了主导地位,并随着碳储存服务的进一步下降,从而使得与其他服务间相关关系呈现显著的权衡效益<sup>[27]</sup>。对于研究区内产水量服务与各生态系统服务(WY-FS, WY-CS, WY-SDR, WY-HQ)而言,其空间特征上呈现条带状分布,这是受到当地降水量与蒸散发量的主要影响,对土地覆盖的依赖较小<sup>[30]</sup>,因此在权衡/协同的空间表达中保留着研究区产水量服务的空间分布特征。由图 2 产水量服务的空间分布图可知,亳州市西部、蚌埠市东北部和阜阳市整体的产水量服务在 23 a 间动态变化较大,因此在与各生态系统服务间权衡/协同关系中呈现明显的空间异质性。对于粮食生产力与各生态系统服务(CS-FS, SDR-FS, HQ-FS)而言,粮食主区内粮食生产力的提高很大程度上受当地农地整理的影响,大面积集约化的农业耕种可以有效提升粮食作物的产能,同时在宏观程度上造成产水量和水土保持服务能力的提升,但对于碳储存服务来说会造成有机碳库流失<sup>[31]</sup>,因而在城市建成区多呈现协同特征,而在城市建成区外部以权衡为主。因此,在针对粮食主区内粮食产能大幅度提升的同时,也要考虑生态系统服务间的权衡效应。

### 4.2 皖北粮食主产区生态系统服务权衡/协同关系驱动因素

研究表明,皖北粮食主产区生态系统服务权衡/协同关系受到自然与社会多种因素的影响,这与廖钟洪等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。自然环境是生态系统服务空间分异的基础,不同的自然因子会影响植被的生成和物种的发育,进而影响生态系统的稳定性。土壤侵

蚀力和 NDVI 是对农用地影响较大的因子,其与植被覆盖、土壤质地、有机质含量和渗透性等性质高度相关<sup>[33]</sup>,因此在以农用地为主的皖北粮食主产区中具有较高的影响力。城市建成区面积与耕地面积作为社会因子对生态系统服务也产生着重要影响,皖北粮食主产区耕地面积与建设用地面积约占总面积的 95%,因此土地利用性质的有效管理对皖北地区生态系统服务的治理与管控有重要作用。此外,交互作用后的因子解释力明显增强,表明研究区内生态系统服务间关系受多种因子的共同影响,并非单因子对其拥有决定性的影响。碳储存服务同各生态系统服务( $Y_2, Y_5, Y_8, Y_9$ )之间交互因子探测结果较为显著,自然因子同各因子之间的交互作用均较强。对于粮食主产区来讲,自然因子之间,气候的变化会影响植被的生长周期、空间分布及植被种类,气候变暖会导致植被的消亡,从而降低碳的吸收能力;植被的根部和凋零物也是土壤有机碳的重要来源,植被的生长状况直接影响着土壤碳的输入与储存;同时土壤的性质和条件也会影响植被的生长和碳的吸收<sup>[34]</sup>。自然因子与社会因子之间也存在着相互干预,在 23 a 中皖北粮食主产区城市建成区得到了显著的扩张,城市化的进程中的土地开发会改变土壤的性质和水文的循环,进而影响碳的排放和储存。因此,在生态管理中,需更加关注多因子的交互作用对于生态系统服务的影响结果,选取与地区自然资源、经济社会发展相匹配的土地资源利用模式。

## 5 结论

(1) 近 23 a 来,皖北粮食主产区的粮食生产力服务有显著提升,增长了 91.97%,而产水量服务、碳储存服务、水土保持服务和生境质量服务分别下降了 5.4%, 4.3%, 0.13% 和 5.53%。空间分布上受土地利用类型的影响,低值区以建设用地和水域为主,高值区以耕地为主。

(2) 空间上,5 种生态系统服务间权衡/协同关系方向及作用强度空间差异明显,呈现条带型、点状型、均质型和离散型 4 种空间格局,且以条带型和点状型为主。不同生态系统服务间权衡/协同关系的空间差异主要受不同主导服务变化幅度和趋势的影响。

(3) 自然因子是影响研究区生态系统服务及其关系作用的主要因素,其中土壤侵蚀力和 NDVI 影响力最强。社会因子中,耕地面积拥有较强的解释力。此外,各因子间交互作用对于生态系统服务间关系的影响更为显著。在未来的生态系统服务管理中,应兼顾自然与社会等多重因素对于权衡/协同效应的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 等. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7344-7355.  
Wang Xiaofeng, Ma Xue, Feng Xiaoming, et al. Spatial-temporal characteristics of trade-off and synergy of ecosystem services in key vulnerable ecological areas in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [2] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.  
Ye Xin, Zou Changxin, Liu Guohua, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [3] 李欣, 陈登帅, 张冰冰, 等. 快速城镇化地区生态系统服务时空演变及权衡协同分析: 以黄河下游地区为例[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5372-5384.  
Li Xin, Chen Dengshuai, Zhang Bingbing, et al. Spatio-temporal evolution and trade-off/synergy analysis of ecosystem services in regions of rapid urbanization: A case study of the lower Yellow River Region [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5372-5384.
- [4] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.  
Zheng Defeng, Hao Shuai, Lv Leting, et al. Spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships among multiple ecosystem services in Three-River-Source National Park [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 64-78.
- [5] 王飞儿, 郑思远, 杨泓蕊, 等. 基于生态系统服务的浙江省水生态环境分区分类管控[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 539-548.  
Wang Feier, Zheng Siyuan, Yang Hongrui, et al. Regionalization and classification of water eco-environment in Zhejiang Province based on ecosystem service [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 539-548.
- [6] Zhang Ziyi, Liu Yanfang, Wang Yiheng, 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: 120454.
- [7] Xue Chenli, Chen Xinghua, Xue Lirong, 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.
- [8] 朱丹丹, 安睿, 刘艳芳, 等. 湖北省生态系统服务协同权衡时空差异及归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(4): 799-809.  
Zhu Dandan, An Rui, Liu Yanfang, et al. Analysis of spatial-temporal difference in synergistic trade-offs of ecosystem services in Hubei Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(4): 799-809.
- [9] 梁华秋, 李松. 基于生态系统服务功能的汉江流域中下游生态分区演变特征及驱动能力研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 256-266.  
Liang Huaqiu, Li Song. Evolutionary characteristics and driving capacity of ecological zoning in middle and lower reaches of Hanjiang River basin based on ecosystem service functions [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4): 256-266.
- [10] 汪仕美, 靳甜甜, 燕玲玲, 等. 子午岭区生态系统服务权衡与协同变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3087-3096.  
Wang Shimei, Jin Tiantian, Yan Lingling, et al. Trade-off and synergy among ecosystem services and the influencing factors in the Ziwuling region, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11): 3087-3096.
- [11] 刘珺, 俞博云, 杨文府. 多尺度地理加权回归模型支持下的汾河流域生态系统服务关系演化机理研究[J]. 遥感学报, 2023, 27(7): 1667-1679.  
Liu Jun, Yu Boyun, Yang Wenfu. Evolution mechanism of ecosystem service relationship in the Fenhe River basin based on multiscale geographically weighted regression [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(7): 1667-1679.
- [12] 黄欣, 彭双云, 王哲, 等. 基于地理探测器的云南省生态系统产水服务的空间异质性及驱动因素[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2813-2821.  
Huang Xin, Peng Shuangyun, Wang Zhe, et al. Spatial heterogeneity and driving factors of ecosystem water yield service in Yunnan Province, China based on Geodetector [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10): 2813-2821.
- [13] 施智勇, 谢慧黎, 王圳峰, 等. 基于参数最优地理探测器的福州市生境质量时空格局与驱动力分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1921-1930.  
Shi Zhiyong, Xie Huili, Wang Zhenfeng, et al. Analysis of spatiotemporal heterogeneity of habitat quality and their driving factors based on optimal parameters-based geographic detector for Fuzhou City, China [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(5): 1921-1930.
- [14] Song Yongze, Wang, Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model

- enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [15] 李长松, 周玉玺. 中国粮食主产区农业水资源脆弱性与粮食安全时空耦合关系研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(6): 722-732.
- Li Changsong, Zhou Yuxi. Research on the spatio-temporal coupling relationship between agricultural water resources vulnerability and food security in China's main grain producing areas [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(6): 722-732.
- [16] Guan Qingchun, Hao Jinmin, Ren Guoping, et al. Ecological indexes for the analysis of the spatial-temporal characteristics of ecosystem service supply and demand: A case study of the major grain-producing regions in Quzhou, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105748.
- [17] Peng Hongjie, Zhang Xuesong, Ren Wei, et al. Spatial pattern and driving factors of cropland ecosystem services in a major grain-producing region: A production-living-ecology perspective [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111024.
- [18] 罗海平, 潘柳欣, 余兆鹏. 基于粮食安全贡献度的中国粮食主产区粮食供求格局演变[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(11): 2077-2087.
- Luo Haiping, Pan Liuxin, Yu Zhaopeng. Evolution of grain supply and demand pattern in major grain-producing areas in China based on contribution rate to food security [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(11): 2077-2087.
- [19] 范逸凡, 王珂, 黄璐. 乡村地区生态系统服务权衡与协同关系: 以湖州市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 6875-6887.
- Fan Yifan, Wang Ke, Huang Lu. Trade-offs and synergies of ecosystem services in rural areas: A case study of Huzhou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 6875-6887.
- [20] Duan Ping, Xu Yongwen, Guo Xi, et al. Study on multi-scale characteristics and influencing factors of trade-offs and synergies between ecosystem services in Jiangxi Province [J]. *Forests*, 2023, 14(3): 598.
- [21] 方露露, 许德华, 王伦澈, 等. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J]. *地理研究*, 2021, 40(3): 821-838.
- Fang Lulu, Xu Dehua, Wang Lunche, et al. The study of ecosystem services and the comparison of trade-off and synergy in Yangtze River basin and Yellow River basin [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(3): 821-838.
- [22] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀冀生境质量时空演变[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- Wu Jiansheng, Cao Qiwen, Shi Shuqin, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei area based on land use change [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [23] Li Yongge, Liu Wei, Feng Qi, et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi regions, Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158940.
- [24] Gao Jiangbo, Zuo Liyuan. Revealing ecosystem services relationships and their driving factors for five basins of Beijing [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(1): 111-129.
- [25] Zhang Yan, Liu Yanfang, Zhang Yang, et al. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637: 780-790.
- [26] Chen Junchen, Qi Qi, Wang Binyu, et al. Response of ecosystem services to landscape patterns under socio-economic-natural factor zoning: A case study of Hubei Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110417.
- [27] 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.
- Zhang Ziyi, Liu Yanfang, Zhang Yang, et al. Spatial non-stationary response of the ecosystem services synergy and tradeoff to influencing factors: A case study of ecological function area in Fujian Province [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 111-125.
- [28] 陈丽, 郝晋珉, 王峰, 等. 基于碳循环的黄淮海平原耕地固碳功能研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(6): 1039-1053.
- Chen Li, Hao Jinmin, Wang Feng, et al. Carbon sequestration function of cultivated land use system based on the carbon cycle for the Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1039-1053.
- [29] 徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤—微生物—作物系统影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 562-572.
- Xu Ying, Yu Zhenhua, Li Yansheng, et al. Research progresses on soil acidification and its effects on soil-microorganism-crop systems in agricultural soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(2): 562-572.

- [30] 刘小波,王玉宽,刘勤,等.基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报,2023,43(22):9416-9429.  
Liu Xiaobo, Wang Yukuan, Liu Qin, et al. Tradeoffs-synergies analysis of ecosystem services along urbanization gradient in Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(22):9416-9429.
- [31] 谭少军,邵景安.基于生态适宜性评价的西南丘陵区土地整治工程布局研究[J].地理研究,2018,37(4):659-677.  
Tan Shaojun, Shao Jing'an. Land consolidation project layout based on ecological suitability evaluation in hilly areas of Southwest China [J]. Geographical Research, 2018,37(4):659-677.
- [32] 廖钟洪,范业婷,王君楠,等.长三角耕地生态系统服务功能时空演变及其驱动机制[EJ/OL].环境科学,2024:1-19,(2024-08-20). <http://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405081>.
- Liao Zhongqi, Fan Yeting, Wang Junxiao, et al. Temporal and spatial evolution of cultivated land ecosystem service function in Yangtze River delta and its driving mechanism [EJ/OL]. China Industrial Economics, 2024,(2024-08-20). <http://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405081>.
- [33] Zhong Lina, Wang Jun, Zhang Xiao, et al. Effects of agricultural land consolidation on ecosystem services: Trade-offs and synergies [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,264:121412.
- [34] 蔡华,舒英格,王昌敏,等.喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征[J].环境科学,2023,44(12):6880-6893.  
Cai Hua, Shu Yingge, Wang Changmin, et al. Evolution characteristics of soil active organic carbon and carbon pool management index under vegetation restoration in karst area [J]. Environmental Science, 2023,44(12):6880-6893.

(上接第 336 页)

- [28] 王鹏程,张利国,卢玉兰,等.广西耕地“非粮化”时空演变及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2023,44(5):187-197.  
Wang Pengcheng, Zhang Liguang, Lu Yulan, et al. Study on the spatial-temporal evolution and influencing factors of non-grain cultivated land in Guangxi [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(5):187-197.
- [29] 周丽青,杨如军,詹长根.广西城市土地集约利用时空差异分析[J].水土保持研究,2017,24(2):272-277.  
Zhou Liqing, Yang Rujun, Zhan Changgen. Analysis of spatial-temporal disparity of urban land intensive utilization in Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(2):272-277.
- [30] 黄天能,许进龙.近 40 年来广西耕地非农化的时空演变特征、成因与对策[J].中国农业资源与区划,2023,44(10):40-51.  
Huang Tianneng, Xu Jinlong. The characteristics, causes and countermeasures of spatial-temporal evolution of Guangxi cultivated land deagriculturalization in the past 40 years [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(10):40-51.
- [31] 朱文娟,孙华.江苏省县域耕地利用生态效率时空动态性及驱动机制[J].长江流域资源与环境,2024,33(4):784-798.  
Zhu Wenjuan, Sun Hua. Spatio-temporal dynamics and driving mechanism of cultivated land use eco-efficiency at county scale in Jiangsu Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(4):784-798.