

DOI: 10.20103/j.stxb.202412022956

陶洁怡, 章锦河, 董平, 陆玉麒, 戈大专. 耕地生态系统服务权衡/协同关系及驱动因素阈值效应——以长三角地区为例. 生态学报, 2025, 45(16):

Tao J Y, Zhang J H, Dong P, Lu Y Q, Ge D Z. Cropland ecosystem service trade-offs/synergies and threshold effects: a case study of the Yangtze River Delta region. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16):

耕地生态系统服务权衡/协同关系及驱动因素阈值效应

——以长三角地区为例

陶洁怡^{1,2}, 章锦河^{1,2,3,*}, 董平^{4,5}, 陆玉麒^{4,5}, 戈大专^{4,5}

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 黄山国家公园生态系统教育部野外科学观测研究站, 黄山 245899

3 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

4 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

5 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要:耕地生态系统服务权衡特征及驱动因素识别是实施耕地资源科学管治决策的重要基础。构建耕地生态系统服务的评估框架, 运用 InVEST 模型、Spearman 相关分析、均方根误差、GBDT 等方法, 分析长三角地区 2000—2020 年耕地生态系统服务的权衡/协同关系、主导驱动因素及阈值特征。结果表明: (1) 长三角地区耕地粮食生产和文化娱乐服务提升, 产水服务和固碳释氧服务表现为先下降后上升, 土壤保持量呈下降趋势。空间上, 产水、固碳释氧和土壤保持整体呈“西南高东北低”格局, 粮食生产与之相反, 文化娱乐服务高值分布转变为“大集聚、小分散”格局。(2) 长三角地区耕地生态系统服务总体表现为权衡减弱、协同增强, 不同时期权衡/协同关系会出现强度的变化甚至发生关系逆转。服务间的权衡关系在不同地理区域存在显著差异, 高权衡区域随着时间演变逐渐减少。(3) 2000—2020 年耕地资源禀赋对权衡强度的贡献率下降, 社会经济因素贡献率显著提升, 光照条件、农业政策和城镇化水平是影响耕地生态系统服务权衡强度的关键因素。当光照时长范围为 1800—2000h, 耕地复种指数超过 1.6 或城镇化率提升至 80%, 各项生态系统服务的权衡作用减弱。考虑驱动因素的阈值范围, 将有助于耕地生态系统服务的协同发展, 为区域粮食安全保障、生态安全维护和社会经济发展提供科学参考。

关键词:耕地生态系统服务; 权衡协同; 驱动因素; 阈值效应; 长三角地区

Cropland ecosystem service trade-offs/synergies and threshold effects: a case study of the Yangtze River Delta region

TAO Jieyi^{1,2}, ZHANG Jinhe^{1,2,3,*}, DONG Ping^{4,5}, LU Yuqi^{4,5}, GE Dazhuan^{4,5}

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Huangshan National Park Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Education, Huangshan 245899, China

3 Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016, China

4 College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

5 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: The identification of ecosystem service trade-off characteristics and drivers of cropland is an important basis for

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42271251)

收稿日期: 2024-12-02; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjinhe@nju.edu.cn

implementing scientific governance decisions for cropland resources. This paper constructed an assessment framework for cropland ecosystem services and analyzed the trade-off/synergy relationship, dominant drivers, and their threshold characteristics in the Yangtze River Delta region (YRD) from 2000 to 2020. The InVEST model, Spearman's correlation analysis, root-mean-square error, and GBDT methods were used. The results showed that: (1) From 2000 to 2020, grain production in the YRD continued to improve, with core areas distributed in the central and northern plains. Water yield service and carbon sequestration and oxygen release both showed a decreasing and then increasing trend. Their spatial distributions were characterized as "high in the south and low in the north, high in the east and low in the west". The amount of soil retention continued to decline, with high values concentrated in the forest ecological barrier area in the southwestern part of the country. Cultural and recreational service showed a continuous growth, and the distribution of high values changed to a pattern of "large concentration and small dispersion", and the ecosystem services of cropland showed the direction of development of leisure and living. (2) The trade-off/synergy relationship of cropland ecosystem services in the YRD exhibited significant spatial and temporal heterogeneity. Temporally, it was generally characterized by the weakening of trade-off and the strengthening of synergy, and the trade-off/synergy relationship changed in intensity or even reverse in different periods. Cropland in the YRD brings ecological risks while improving agricultural efficiency. With the transformation of cropland use and the development of agricultural modernization, cropland shows a trend of comprehensive optimization of food production, ecological value, culture and recreation. Spatially, due to different natural conditions and economic levels, the production capacity of cropland and the level of factor input vary widely at the spatial level, so that the overall trade-offs between ecosystem services are manifested in two distribution patterns: high in the north and south, low in the middle, or high in the south and low in the north. The overall improvement in the technology and capital inputs of cropland production has contributed to a further narrowing of the intensity of trade-offs across the region, and the characteristics of cropland development in different regions have gradually come to the fore. (3) The contribution of cropland resource endowment to the trade-off intensity declined in 2000—2020, and the contribution of socio-economic factors increased substantially, with light conditions, agricultural policies and urbanization level being the key factors affecting the trade-off intensity of cropland ecosystem services, showing a non-linear change characteristic of the existence of a threshold effect. With the passage of time, the threshold range of light duration generally remained unchanged at 1800—2000h, and the thresholds of cropland replanting index and urbanization rate showed an increasing trend, in which the cropping intensity increased from 1.3—1.6 to the range of more than 1.6, and the urbanization rate from 40%—60%. The trade-offs among ecosystem services overall weakened when the threshold was raised to near 80%. In order to promote synergistic development among cropland ecosystem services, it was necessary to control the driving factors within a certain threshold range.

Key Words: cropland ecosystem services; trade-off and synergy; driving factors; threshold effects; Yangtze River Delta region

耕地是人类通过对自然系统的治理,并通过每年的物质投入,实现粮食生产或食物产出的核心资源。作为人与自然相互作用的重要载体,耕地还承载着生态平衡、社会发展等多重功能,在维持水源涵养、固碳释氧、娱乐休闲等生态系统调节、文化服务方面的正效应日益显化^[1]。随着城镇化、工业化的发展,耕地生态系统在长期高投入、高产出的生产模式下,也产生诸如水土流失、温室气体排放、土壤生物多样性降低等一系列生态负效应,耕地生态系统已呈现新的变化格局^[2-3]。由于耕地资源的有限以及政府、农户等多方利益相关者诉求冲突不同,耕地生态系统服务的生态过程倾向于形成竞争或共赢的资源关系,导致服务间产生权衡与协同^[4]。准确识别耕地各项生态系统服务之间的权衡/协同关系,有助于制定更科学的耕地管理决策,实现耕地生态系统服务效益最大化。

权衡/协同的变化是评估多种社会、经济因素共同作用下耕地生态系统效益的重要指示器^[5],目前对耕

地生态系统功能权衡协同的研究主要围绕以下方面展开:一是服务间权衡/协同关系的时空特征识别。在空间尺度选择上,较多研究关注国家、省/市域、县乡等多种尺度,研究方法涉及相关分析、因子分析、空间自相关等^[6-8]相关性方法,以及生态系统权衡协同度模型、耦合协调模型、力学平衡模型等^[9-11]基于模型的方法。然而这些量化方式在获取耕地生态系统服务的空间关联模式方面往往存在一定的局限性,难以全面捕捉其复杂的空间分布特征与动态变化规律。二是权衡/协同的驱动因素解析。研究通常采用传统回归法、融合空间信息的地理加权回归法等方法揭示自然要素、人为活动等因素的作用强度、空间异质性^[12-14]。但值得注意的是,基于线性相关假设的回归方法所得结果在实际情况的反映上存在偏差。现实中驱动因子多以非线性形式影响着生态系统服务,在获得区域耕地生态系统权衡关系信息基础上,利益相关者更加关注生态系统服务处于何种状态时获益程度最大。鉴于此,有必要进一步对耕地生态系统服务权衡/协同驱动因素的非线性关系研究,帮助明晰耕地发展态势,为区域耕地可持续发展提供科学支撑。

阈值作为生态系统服务非线性变化的一项重要特征,可用于预测驱动因素对生态系统发展产生影响的不同阶段^[15],为实现耕地生态系统服务的“多赢”提供管理和决策依据^[16]。当前多数研究关注不同生态系统服务类型之间、以及区域各项生态系统服务与驱动因子的阈值效应^[17-18],对于服务之间权衡/协同关系与影响因素存在的关键阈值研究仍有待深入^[19]。机器学习方法是揭示驱动因素非线性作用和阈值特征的有效方式,本文引入梯度提升决策树(Gradient Boosting Decision Trees, GBDT)机器学习方法,探究耕地生态系统服务权衡或协同变化影响因素的非线性效应和阈值问题,进而服务于耕地生态系统的优化管理。

实现耕地生态系统的复合利用和多重价值实现,攸关中华民族永续发展与“耕”脉传承。长三角地区是作为中国经济发展最具活力的地区,快速城镇化与工业化背景下,耕地生态系统服务也随之发生变化,可以作为探索耕地生态系统服务权衡/协同及其驱动因素阈值效应的理想区域。本文将以此为研究区,评估 2000—2020 年耕地粮食生产、产水、固碳释氧、土壤保持和休闲娱乐等生态系统服务,并揭示服务间权衡/协同关系的变化及其与主要驱动因素间的阈值特征,以期为城镇化背景下长三角地区乃至全国耕地生态系统的保护提供理论和决策支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究对象包括长三角三省一市,全区大部分属亚热带季风气候,北部区位于亚热带和暖温带季风气候过渡带;地形西南高、东北低,区域内河湖众多、水网密布。良好的气候条件加上优质的土壤资源,使长三角地区成为我国重要的粮食产区之一。然而快速的城镇化发展不可避免地破坏了区域耕地生态系统,出现耕地地力损耗、水土流失、粮食和水资源短缺、土壤污染等症状。如何实现长三角耕地生态系统农业产出高效、生态环境优质、居民福祉增加的可持续发展是区域面临的重大挑战。

1.2 数据来源与处理

本研究所使用的多源数据如表 1 所示:(1)多源遥感信息。土地利用/覆盖数据、植被净初级生产力(NPP)数据、归一化植被指数(NDVI)数据、人口空间分布数据、年降水量数据以及高程(DEM)数据;(2)网络地图服务。与农业旅游相关的地理兴趣点(POI)、历史道路交通状况等数据,对数据进行提取和标准化处理;(3)社会经济统计数据。通过统计年鉴、文献资料的查阅等方式获得粮食产量统计数据。土壤数据为 2010 年,其他数据均为 2000 年、2010 年和 2020 年 3 个时期。

2 研究方法

2.1 耕地生态系统服务评估

本研究借助 InVEST 模型和 ArcGIS 10.8,定量评估长三角地区 2000—2020 年的供给服务(粮食生产)、调节服务(产水、固碳释氧、土壤保持)和文化服务(文化娱乐),表示为耕地生态系统的产出。计算方法如表 2 所示。

表 1 数据来源及描述

Table 1 Data source and description

数据名称 Data name	来源 Source	描述 Description
土地利用/覆盖数据 Land use/cover	中国科学院资源与环境数据中心 (http://www.resdc.cn)	栅格, 30m×30m
DEM 数据 DEM data	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	栅格, 30m×30m
土壤数据 Soil data	世界土壤数据库 (http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans)	栅格, 1km×1km
归一化植被指数 (NDVI) Normalized difference vegetation index	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	栅格, 500m×500m
降水量 Precipitation	中国气象科学数据共享服务网 (http://data.cma.cn/)	栅格, 1km×1km
粮食产量统计数据 Grain production statistics	江苏、浙江、安徽、上海统计年鉴	表格
道路交通数据 Road traffic data	OpenstreetMap (https://www.openstreetmap.org/)	矢量
人口空间分布 Spatial distribution of the population	LandScan 高分辨率全球人口数据集 (https://landscan.ornl.gov/)	栅格, 1km×1km
农业相关兴趣点 Agricultural-related points of interest	高德地图 API (https://ditu.amap.com/)	矢量

表 2 耕地生态系统服务计算方法及含义

Table 2 Measurement and meaning of cropland ecosystem services

服务类型 Service type	计算模型 Computational model	计算公式 Formula
粮食生产 Grain production	根据农作物与 NDVI 间存在的显著线性关系采用 NDVI 分配法计算	$GP_i = GP_{\text{sum}} \times \frac{NDVI_i}{NDVI_{\text{sum}}}$ 式中, GP_i 为单位栅格 i 的粮食产量 (t); GP_{sum} 为研究区粮食总产量 (t); $NDVI_i$ 为单位栅格 i 的归一化植被指数; $NDVI_{\text{sum}}$ 为研究区耕地 NDVI 之和
产水服务 Water yield	InVEST 模型产水模块	$WY_i = \left(1 - \frac{AET_i}{P_i}\right) \times P_i$ 式中, WY_i 为年产水量 (mm); P_i 为年均降水量 (mm); AET_i 为年均蒸散发量 (mm)
固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen release	CASA 模型、市场价值法	$CO = W_C \times P_C + W_O \times P_O$ 利用 CASA 模型计算耕地生态系统 NPP 值, 根据光合作用方程式计算耕地作物 NPP 固定 CO_2 的质量及释放 O_2 的质量, 其中固碳的单价按照瑞典碳税法的 934.26 元/t, 释氧价值按照工业制氧法 400 元/t 计算 ^[20-21] 。式中, CO 表示耕地单位面积固碳与释氧的价值量总和 (元/hm ²), W_C 、 W_O 分别表示固碳量 (t) 和释氧量 (t), P_C 、 P_O 表示固碳和释氧的平均市场交易价格
土壤保持 Soil retention	RUSLE 模型 ^[22]	$SR_i = RKLS_i - USLE_i$ $RKLS_i = R_i \times K_i \times LS_i$ $USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i$ 式中, SR_i 为栅格单元 i 的土壤保持量 (t), $RKLS_i$ 、 $USLE_i$ 分别表示潜在土壤侵蚀量 (t)、实际土壤侵蚀量 (t), R 为降雨侵蚀力 [MJ mm/(hm ² h a)]; K_i 为土壤可蚀性; LS_i 为坡长-坡度因子; C_i 为植被覆盖因子; P_i 为管理因子
文化娱乐 Cultural recreation	通过网格划分从娱乐机遇、人口集聚度、道路密度三个维度, 采用娱乐得分法评估了耕地文化娱乐服务。将三维度的分数重分类为 0—10 分对栅格单元的得分进行加和	$CR_i = A_i \sum (Oppt_i + Pop_i + Road_i)$ 式中, CR_i 为栅格单元 i 的文化娱乐服务总得分, 分为 0—10 分; A_i 为栅格单元 i 的耕地生态系统面积; $Oppt_i$ 为娱乐机遇得分, 根据与农业旅游高度相关的“农家乐”、“生态采摘园”、“休闲农庄”兴趣点计算; Pop_i 为人口集聚度得分; $Road_i$ 为道路密度得分

不同数据具有不同的测量值和量级,为了使指标之间在后续研究中具有可比性,将所有指标进行归一化。

$$ES_j = \frac{ES_i - ES_{i,\min}}{ES_i - ES_{i,\max}}$$

式中, ES_i 、 $ES_{i,\min}$ 、 $ES_{i,\max}$ 分别表示第 i 项耕地生态系统服务指标的实际值、最大值、最小值; ES_j 为第 j 项耕地生态系统服务标准化处理后位于区间 $[0,1]$ 的值。

2.2 耕地生态系统服务权衡/协同关系量化

本研究通过 Spearman 相关系数(r) 表征县域尺度上的耕地生态系统服务权衡/协同关系的总体特征。当 $0 < r < 1$ 时属于协同关系,当 $-1 < r < 0$ 时属于权衡关系。公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

式中, r_s 表示相关系数; d_i^2 表示二列成对变量的等级差数; n 表示样本数量。

采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)对县域尺度的耕地生态系统服务权衡强度进行空间可视化,反映区域内不同耕地生态系统服务的平均变异程度^[23],其计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (ES_{st} - \overline{ES_{st}})^2}$$

式中: ES_{st} 、 $\overline{ES_{st}}$ 分别表示第 i 项生态系统服务指标的标准化值、 n 项生态系统服务标准化值的均值。

RMSE 在二维空间中被视为某成对服务的坐标到 1:1 线的垂直距离,距离越大表示权衡强度越高。若离散点位于 1:1 线上,则表明两项服务之间为零权衡;离散点距离 1:1 线的相对位置反映了给定条件下更有利的生态系统服务指标,如点 B、点 C 具有相同的权衡强度,点 B 对应指标 1 获益大,而点 C 对应指标 2 获益大;此外,同一方位的点 C 和点 D 中,点 C 对应的权衡强度高于点 D(图 1)。

2.3 耕地生态系统服务权衡/协同驱动因素识别

2.3.1 驱动因素选取

耕地生态系统作为一个人类和环境互作的系统,其生产投入既来源于自然环境的运动和演化,也来源于人类^[24]。自然环境主要是为耕地产出添附“光、热、水”等要素,人类活动包括劳动力、机械动力、农药化肥、科技、管理等。在考虑数据的客观性、科学性与可获得性后,本研究共选取 8 项指标评价长三角耕地生态系统服务权衡强度的影响因素(表 3)。

2.3.2 主导因子分析

梯度提升决策树(Gradient Boosting Decision Trees, GBDT)是由 Friedman 提出的一种集成学习方法,该方法利用提升(boosting)机制将多个预测结果一般的弱学习器组合起来进行迭代训练,最终获取成泛化能力更优的强学习器^[25]。相比于线性回归等传统模型,GBDT 算法不假设变量间具有线性关联,可以较好地预测变量间的非线性关系,并且有效解决多重共线性问题,无需对自变量间的冗余和潜在相关性进行估计;其次,该算法能够准确地捕捉自变量的相对重要性,通过阶段性学习数据对预测变量权重的调整来提高模型预测精度^[26]。近年来 GBDT 算法逐渐被应用于生态景观、土地利用变化^[27]等诸多方面,多被用于复杂地理现象的分析和过程的预测。

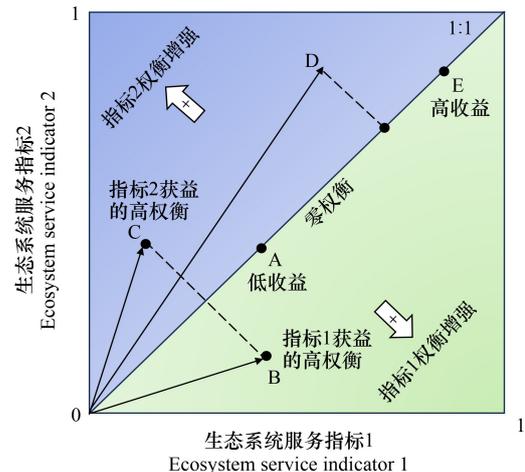


图 1 耕地生态系统服务权衡关系

Fig. 1 Trade-off relationship of cropland ecosystem services

A: 低收益的生态系统服务零权衡; B: 生态系统服务指标 1 获益的权衡; C: 生态系统服务指标 2 获益的权衡; D: 生态系统服务指标 2 获益的权衡, 权衡强度低于点 C; E: 高收益的生态系统服务零权衡

本研究以 2000 年、2010 年和 2020 年三个时期耕地生态系统服务的权衡强度作为因变量,各驱动因素作为自变量,利用 GBDT 算法指数刻画驱动因素的相对重要性,并对阈值效应进行识别。

表 3 耕地生态系统服务权衡强度的驱动因素选取

Table 3 Selection of drivers for the cropland ecosystem services trade-off intensity

准则 Criterion	维度 Dimension	指标 Indicator	描述 Description	单位 Unit	数据来源 Data source
耕地资源禀赋 Cropland resource endowment	光	光照条件	年日照时数	h	中国气象数据共享网(http://data.cma.cn)
	热	温度	年均温	℃	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	水	降水	年降水量	mm	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)
社会经济因子 Socio-economic factors	科技化	农药使用量与农 化肥施用量	农药使用量和化肥使用量之和	t	国家统计局
	工业化	工业增加值占 GDP 比重	工业增加值/地区生产总值	%	国家统计局
	机械化	农业机械总动力	农、林、牧、渔业的各种动力机械 的动力总和	kW	国家统计局
	城镇化	常住人口城镇化率	城镇人口/常住人口	%	国家统计局
	制度化	耕地复种指数	全年播种作物总面积/耕地总面 积,反映耕地资源集约化利用程 度的农业政策	%	联合国粮农组织

3 结果分析

3.1 耕地生态系统服务的时空变化

由图 2 和表 4 可知,2000—2020 年长三角地区单位粮食生产均值从 2000 年的 1.39 t/hm²增加到 2020 年的 2.37t/hm²,年均增长 3.57%,粮食生产正效应逐渐增强。空间上高值区分布在皖北、苏北与苏中等地势平坦地区,是中国重要的粮食生产基地。产水服务和固碳释氧均呈先下降后上升的趋势。其中产水服务平均值由 576.60mm 先降至 471.98mm 后升至 560.43mm,出现微弱下降,固碳释氧价值均值从 22600.06 元/hm²降至 21034.43 元/hm²后增长至 23397.60 元/hm²,空间分布上看,高值区集中分布于皖西—浙西—浙南、长江—太湖—钱塘江等流域、以及东部及南部沿海湿地,因区域降水充沛、植被覆盖率及郁闭度较高,生态基底条件好。2000—2020 年区域内水土流失负效应有所减弱,土壤保持量平均值从 277.45t/hm²下降 87.30t/hm²,下降幅度为 68.54%,高值区集中于西南部森林生态屏障区,区域由于地形起伏和较大的降雨量而存在较高的土壤侵蚀量,但高植被覆盖率又有效截留流失土壤,遏制了土壤侵蚀。文化娱乐服务均值由 2000 年的 11.54 持续增长至 2020 年的 13.72,增长率为 18.89%,高值分布转变为“大集聚、小分散”格局,包括周边乡村旅游、休闲农业发展良好的上海、南京、杭州、合肥等中心城市,显示休闲化、生活化是耕地生态系统的重要发展方向。

表 4 2000—2020 年长三角地区耕地生态系统服务年均值

Table 4 Descriptive statistics of cropland ecosystem services in the Yangtze River Delta region from 2000 to 2020

年份 Year	粮食生产/(t/hm ²) Grain production	产水服务/mm Water yield	固碳释氧/(元/hm ²) Carbon sequestration and oxygen release	土壤保持/(t/hm ²) Soil retention	文化娱乐 Culture and recreation
2000 年	1.39	576.60	22600.06	277.45	11.54
2010 年	1.93	471.98	21034.43	136.35	12.48
2020 年	2.37	560.43	23397.60	87.30	13.72

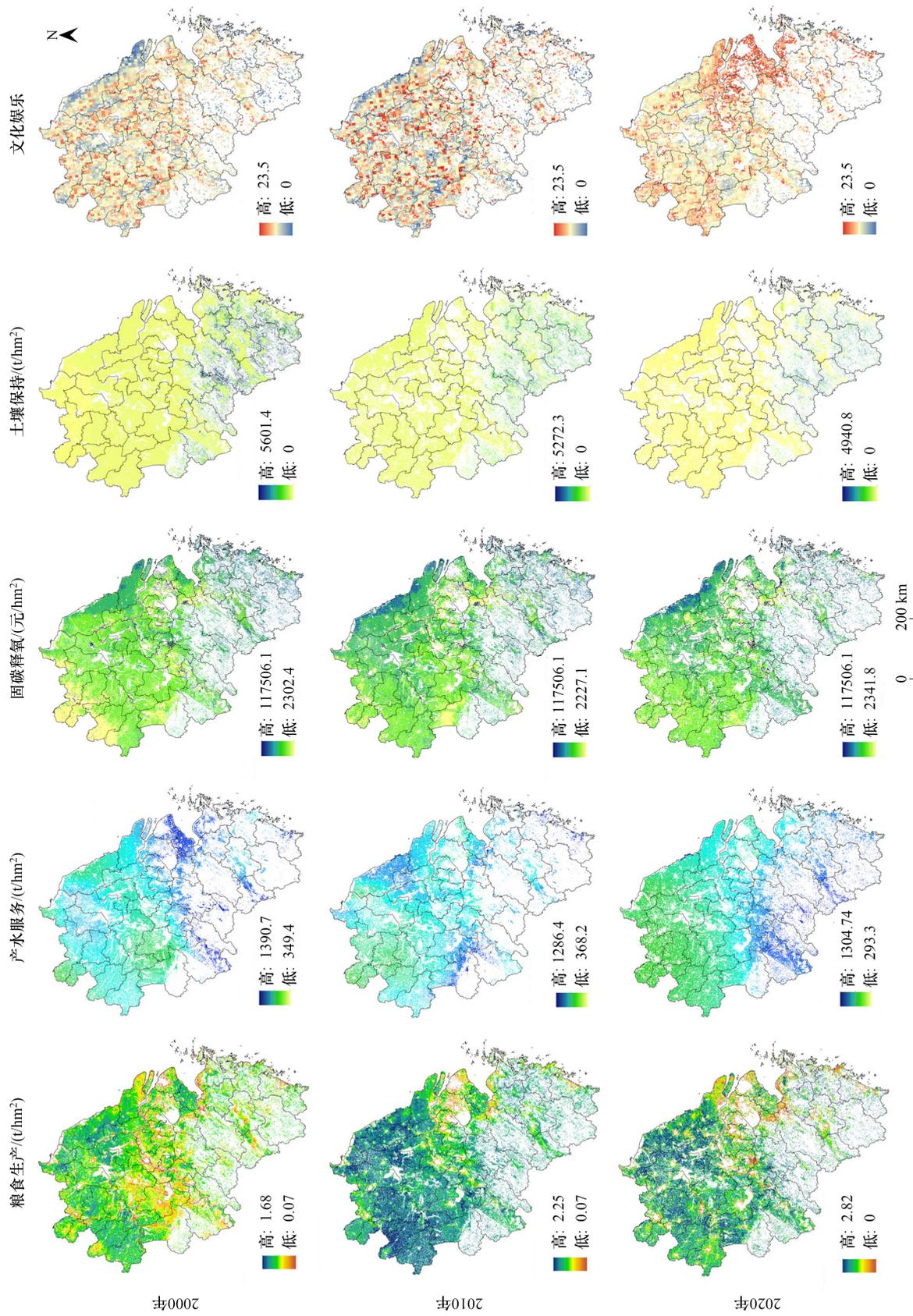


图2 长三角地区耕地生态系统服务时空变化
Fig. 2 Spatio-temporal changes of cropland ecosystem services in the Yangtze River Delta region

3.2 耕地生态系统服务权衡/协同关系

3.2.1 时间特征

2000—2020 年间长三角耕地生态系统服务之间总体表现为协同作用增强和权衡关系的减弱(图 3)。其中,粮食生产和调节服务之间关系表现为:与产水间呈现协同—权衡—协同的变化关系,相关性较弱;与固碳释氧具有显著的权衡关系($r = -0.311, p < 0.01$),负相关性随时间推移逐渐减弱;与土壤保持的协同关系较强($r = 0.105, p < 0.01$),并且显著协同关系不断增强。这表明长三角耕地在提高耕作效率的同时隐含着生态风险,产生土壤侵蚀、水源涵养和固碳能力下降等生态负效应,而后随着耕地利用转型及农业现代化发展,出现耕地生态正效应逐渐提升的趋势。

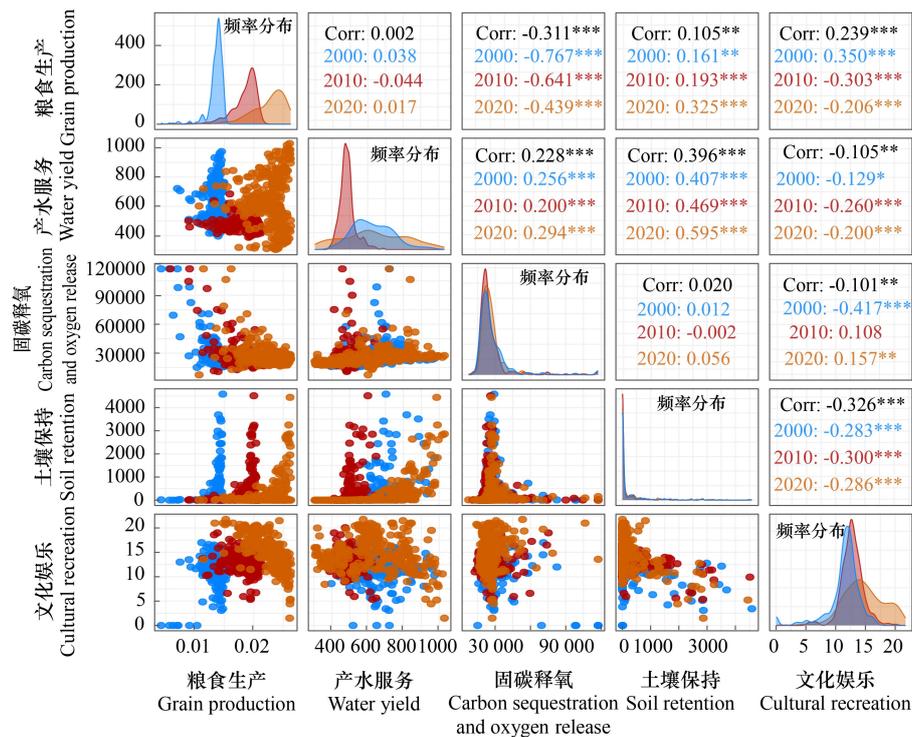


图 3 长三角地区耕地生态系统服务相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of cropland ecosystem services in the Yangtze River Delta region

***、**、* 分别表示在 0.01、0.05、0.1 水平上显著相关

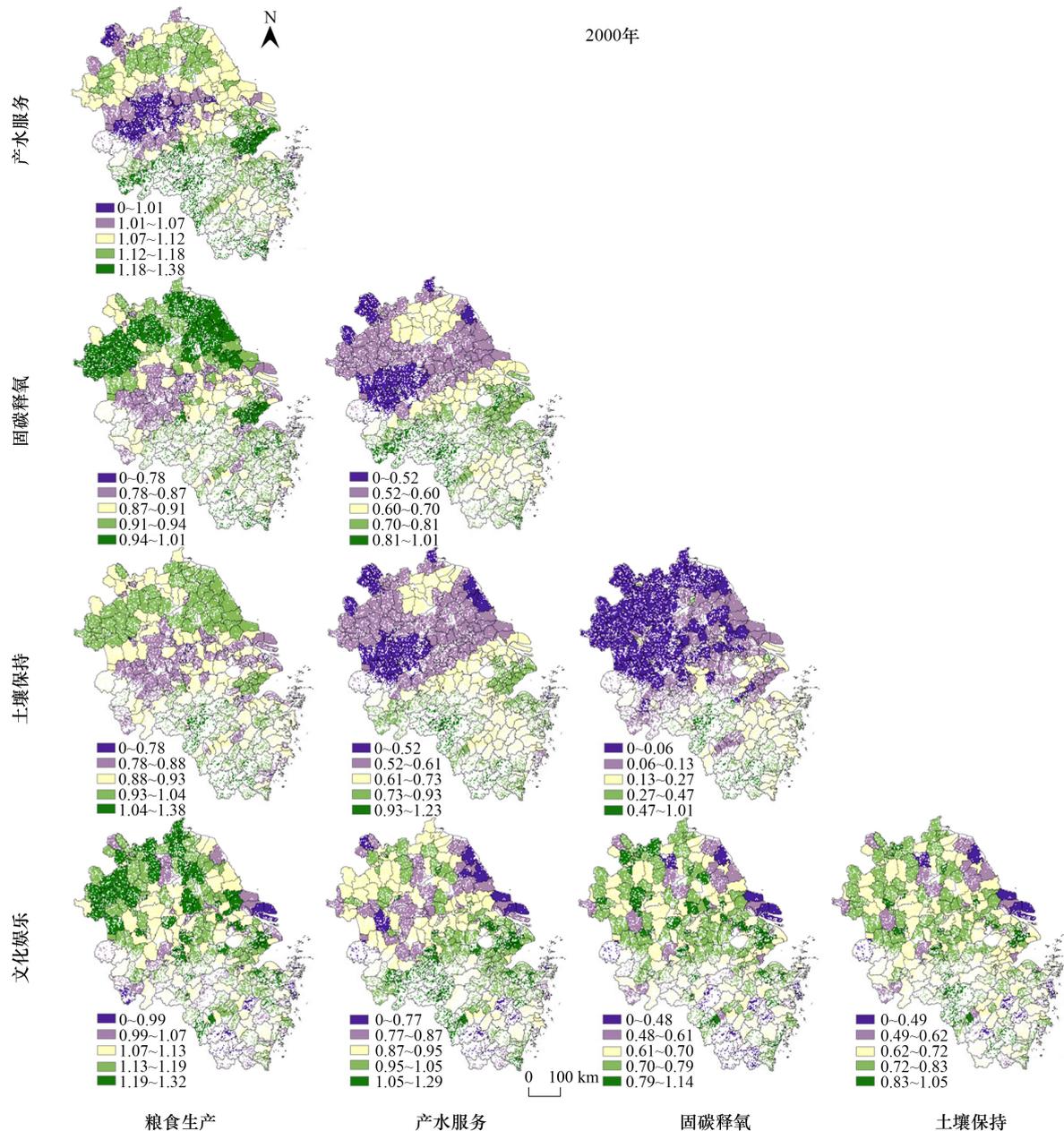
就调节服务之间:产水和土壤保持之间协同性最强($r = 0.396, p < 0.01$),且强度持续增强;产水和固碳释氧的协同显著($r = 0.228, p < 0.01$),时间上表现为强度的先减弱后增强趋势;固碳释氧和土壤保持之间呈协同—权衡—协同的转变,两者之间相关性不显著。可见产水的增强会加剧耕地土壤侵蚀的负效应,导致土壤保持量上升,同时过量的水资源可能会削弱农作物固碳释氧能力,因此出现 2010 年服务间协同强度减弱或是权衡的逆转。后续农田水利设施等相关建设投入的增加促进了耕地水土保持等生态功能,调节服务之间总体呈现协同。

此外,文化娱乐与粮食生产表现为显著协同关系($r = 0.350, p < 0.01$),从时间上看,出现协同向权衡的转变,2020 年较 2010 年权衡强度下降。文化娱乐与调节服务以权衡关系为主($r < -0.1, p < 0.05$),与土壤保持是关系最强的一组($r = -0.326, p < 0.01$),权衡随时间推移有所减弱,与产水的权衡强度先增强后减弱,与固碳释氧之间则出现由显著权衡—弱协同—显著协同关系的逆转。表明随着经济水平提升和耕地要素投入水平增强,长三角地区耕地文化服务出现大幅提升而供给和调节服务的负效应逐渐弱化的趋势。

3.2.2 空间特征

2000—2020 年长三角县域耕地生态系统服务之间的关系在不同时期和不同地理区域存在显著差异(图 4)。2000 年粮食生产和调节服务之间的空间关系较为一致,均表现为中部低南北高的权衡强度分布,其中北部耕地丰富,加之肥力、地形等优势,粮食供给能力较优,南部耕地则表现为产水、固碳释氧、土壤保持等生态价值较高。随着整个区域耕地生产技术、资金投入的提升,两两服务之间的高权衡区域逐渐减少,粮食产出和生态价值产出得到全面发展。2020 年整个区域权衡强度进一步缩小,而南北差异再次显现,例如粮食生产与调节服务的权衡高值区集中在长三角北部平原和西南部山区,表明区域的耕地特色逐渐显现。调节服务之间,除固碳释氧与土壤保持呈现南高北低的权衡分布外,其他服务的权衡强度总体呈南北高中间低分布。由于区域降水、积温热量等影响的相对稳定性,使 20 年间耕地调节服务间权衡强度的空间布局变化较小。

就耕地文化娱乐与其他服务而言,2000 年权衡强度高值区和低值区交错布局,低值主要发生在皖西、浙西南等山地丘陵区以及东部沿海湿地,文化娱乐服务较差。此后区域间的权衡高值区明显缩小,城镇化、社会经济发展中积累的资金、管理、技术等为耕地文化服务提供物质支持,促使整个区域朝着均衡化发展。



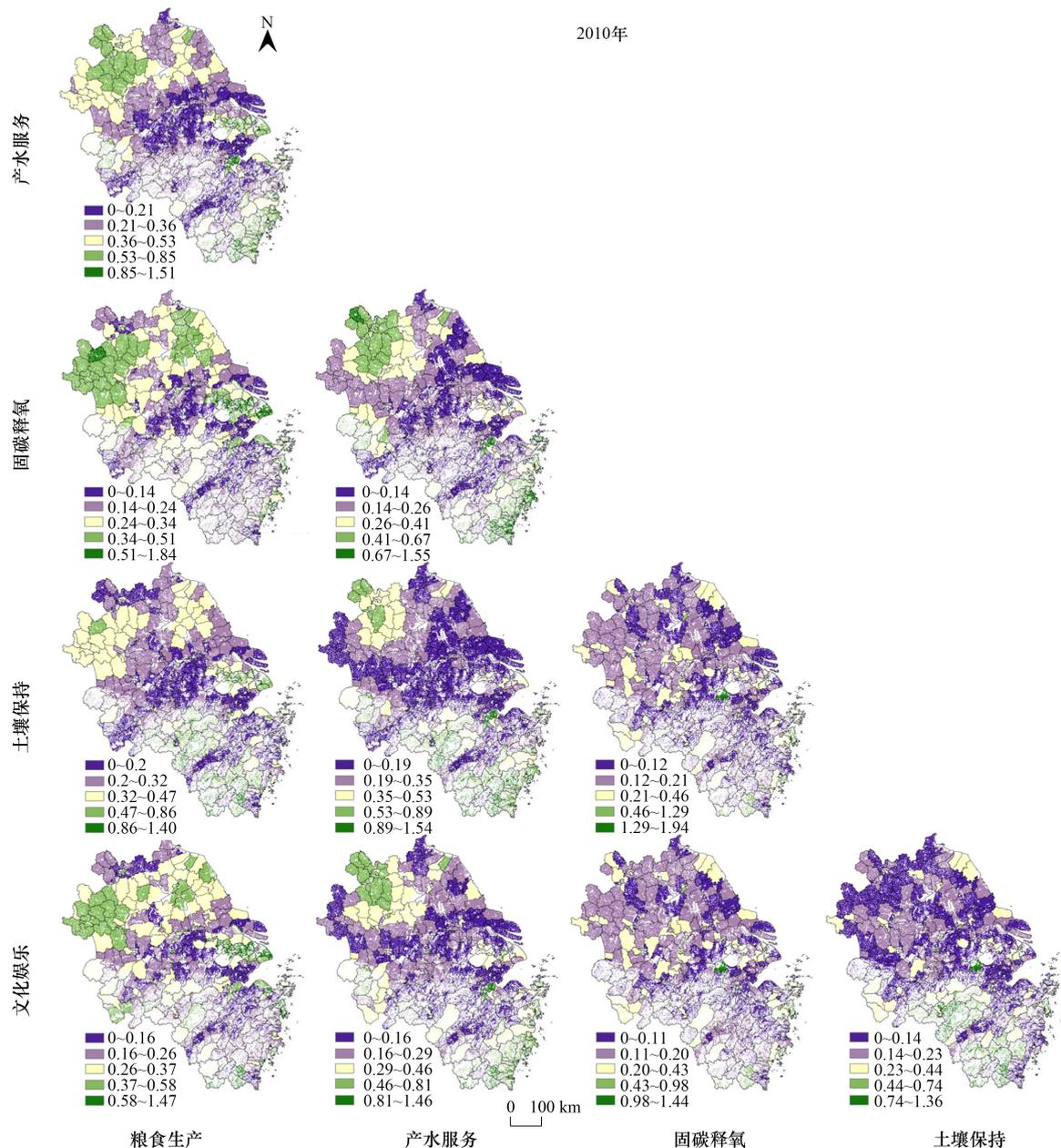


图4 长三角耕地生态系统服务权衡关系的时空分布

Fig.4 Spatio-temporal patterns of cropland ecosystem service trade-offs in the Yangtze River Delta region

2020 年权衡强度空间分布不均匀,如长三角东部太湖—钱塘江流域人口城镇化、产业结构等社会经济要素带来的耕地利用转型,文化娱乐服务水平快速发展,西部和南部森林生态区则由于良好的生态本底,生态价值突出,因此文化娱乐服务和其他服务之间均存在明显的权衡高值。

3.3 耕地生态系统服务权衡驱动因子分析

3.3.1 指标贡献率分析

运用 GBDT 算法对长三角地区耕地生态系统服务权衡的主导因素进行识别(图 5)。结果显示,20 年间耕地资源禀赋的贡献率对调节服务间权衡的作用效果明显,总体呈现下降的趋势,由 2000 年 35.54%—55.41% 的总贡献率范围下降到 2020 年的 19.95%—53.78%。分维度来看,降水对各项服务组合间权衡的平均贡献率呈现下降趋势。光照和温度条件表现为先减弱后增强,贡献率分别由 2000 年 16.40%、11.79% 减小到 2010 的

11.73%、9.15%,后上升至2020年的12.04%、12.24%。20年间光照条件的平均贡献率在资源禀赋条件中最高,为13.39%。相反地,社会经济因子贡献率存在大幅度提升,总贡献率范围由2000年的44.59%—64.4%提高至2020年的46.22%—80.05%,对粮食生产、文化与娱乐与调节服务间权衡的作用显著。其中制度化的平均贡献率先减弱(由2000年的16.37%降至2010年的10.46%)后增强(2020年为19.01%),其他维度均表现为平均贡献率先增强后减弱的变化趋势。制度化维度下的耕地复种指数贡献率最高,为15.28%,城镇化的平均贡献率次之,为13.65%。

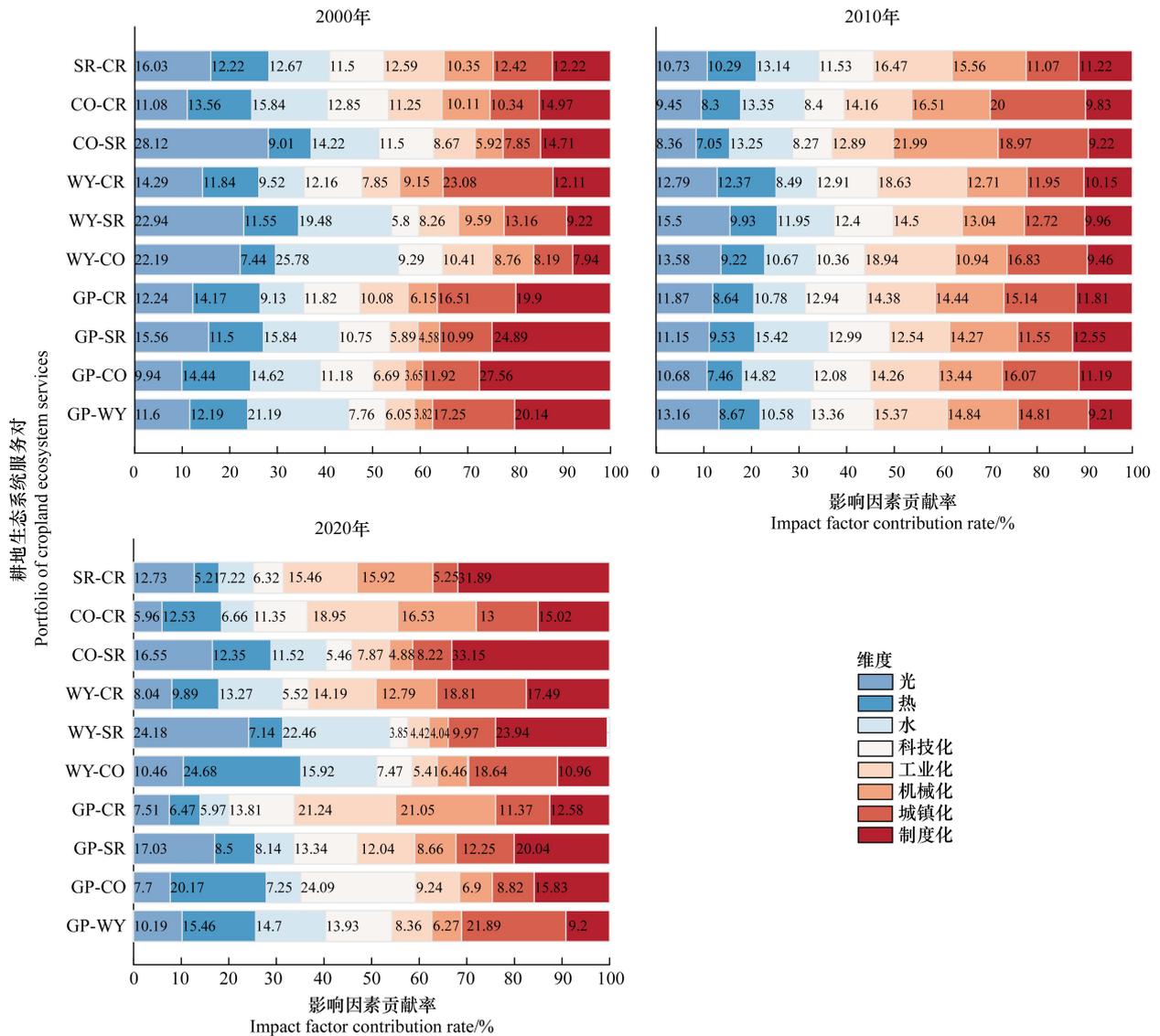


图5 长三角耕地生态系统服务权衡强度的影响因素贡献率

Fig.5 Contributions of influential factors to the trade-off intensity of cropland ecosystem services in the Yangtze River Delta region

GP:粮食生产 Grain production; WY:产水服务 Water yield; CO:固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen release; SR:土壤保持 Soil retention; SR:文化娱乐 Cultural recreation

在区域工业化与城镇化进程中,多方利益相关者通过对耕地设施、制度等的管理,改变自然系统运行对耕地的生产要素赋予的决定性作用。农业劳动力的大量非农转移、农业机械化的缓慢推进、化肥的不合理使用等也造成耕地“非粮化”、粮食生产供给不足、生态本底破坏等问题,以致于社会经济因子对服务间权衡的贡献率增加。在投入后期,技术、设施和社会进步促使粮食供给、生态价值和娱乐全面优化,正效应逐渐显

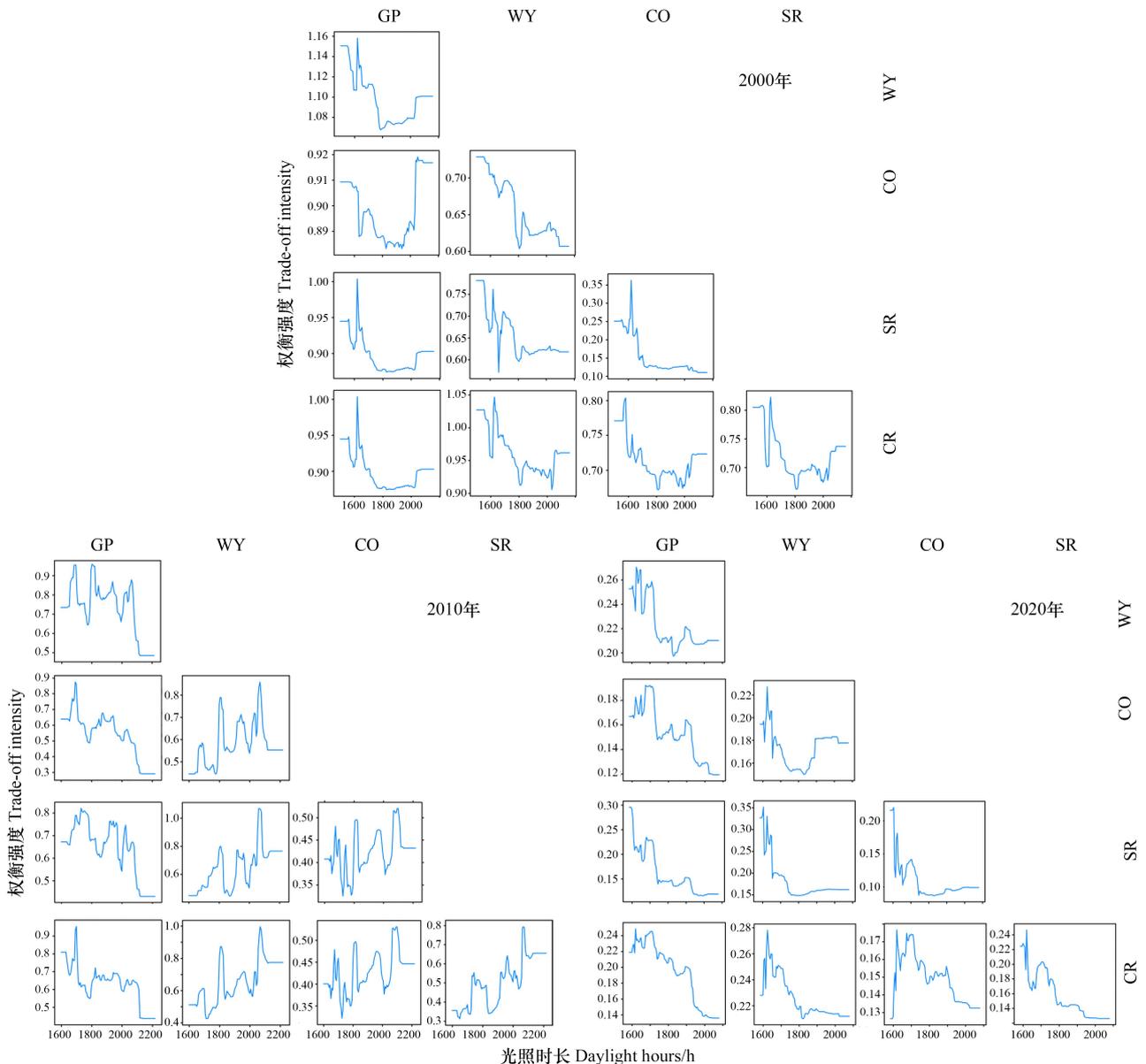
现,服务间的空间耦合协调进一步提升。

3.3.2 主导因子影响效应

基于指标贡献率分析结果,本研究将耕地复种指数、人口城镇化率和光照条件作为主导影响因素。三者的平均贡献率均高于 13%,表明耕作制度、城镇化水平、光照对于耕地生态系统服务的权衡强度变化具有较强的作用。在此基础上研究 2000—2020 年三项主导因子的影响力变化特征(图 6)。

2000 年光照条件对耕地生态系统服务间权衡效应总体表现为波动下降,当光照时长达到 1800h 左右时,服务间权衡强度在低值区平稳波动,时长达到 2000h 后权衡略有增强而后逐渐平稳。2010 年粮食生产与其他四类服务间的权衡随年日照时数的增加呈波动下降趋势,达到 2100h 后权衡逐渐趋于平稳;调节服务和文化服务之间的权衡强度呈波动上升趋势,1800—2000h 处于权衡的低值区。2020 年光照条件的作用曲线特征与 2000 年相似,整体呈现波动下降,而后保持平稳,最佳阈值范围为 1800—2000h。

对于制度化维度而言,2000 年粮食生产与各项服务之间整体呈波动上升态势,表明复种指数增强增大两两服务之间的权衡。三项调节服务和文化娱乐组合的权衡强度则表现为先升后降的趋势,最佳阈值范围约为 1.3—1.6。2010 年和 2020 年各项服务权衡低点总体上出现在复种指数超过 1.6 以后的位置,表明此时五类服

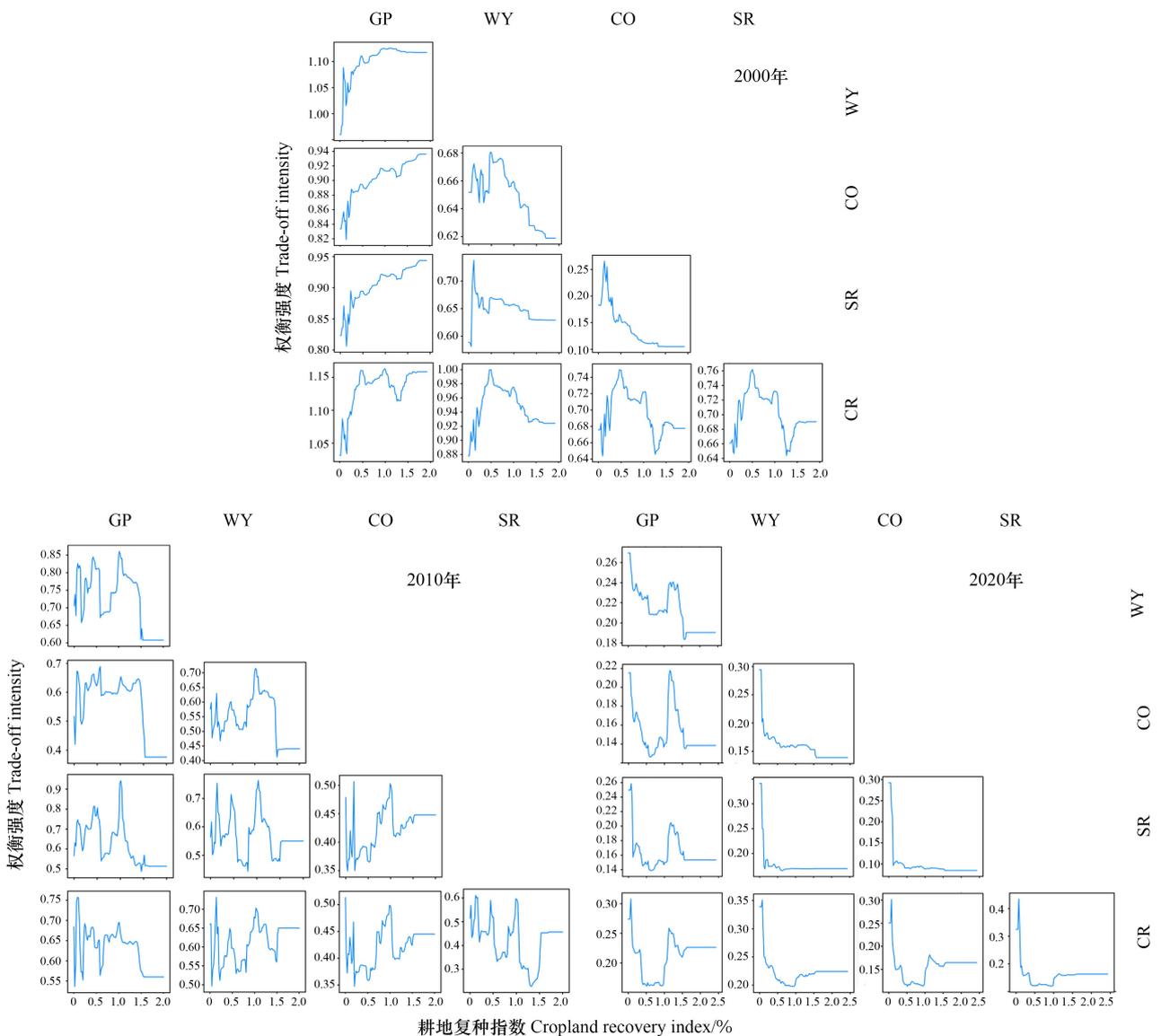


务协同增益的可能性较大,可持续集约化利用、精细耕作等科学手段维持着耕地复种指数的持续稳定增长,在确保耕地粮食安全的同时保障了其调节服务、文化服务的协调发展。

2000 年和 2010 年 40%—60%的城镇化率对应着耕地生态系统服务间权衡强度下降区间,随后在 80%的临界阈值处,各项耕地生态系统服务间的权衡总体上处于低水平平稳状态。2020 年的城镇化率非线性特征出现转变,当阈值范围达到小于 80%位置时,服务间权衡变化较小或呈现波动下降状态,而当阈值高于 80%后各项服务间权衡整体上出现明显增强。这可能是由于随着城镇化水平的提升,人们开始注重耕地结构化调整,部分服务重新恢复或者优于从前,服务间的协同增强。

4 讨论

耕地生态系统与其他生态系统的核心区别在于其高投入和高产出。发展前期,城镇化和工业化的快速发展,化肥农药、机械、设施等的大量使用有效提高了耕地生态系统的粮食产量,对粮食安全的保障意义重大^[28]。然而农药化肥施用、水资源消耗等投入依赖容易造成边际效益递减、生态成本显化(如土壤侵蚀、水源污染)等投入产出效率的“剪刀差”,因而耕地生态系统服务之间出现譬如粮食生产和产水、固碳释氧之间的权衡、产水和固碳释氧的协同效应减弱等情形。与此同时,耕地文化娱乐服务水平的提升使居民需求不断得



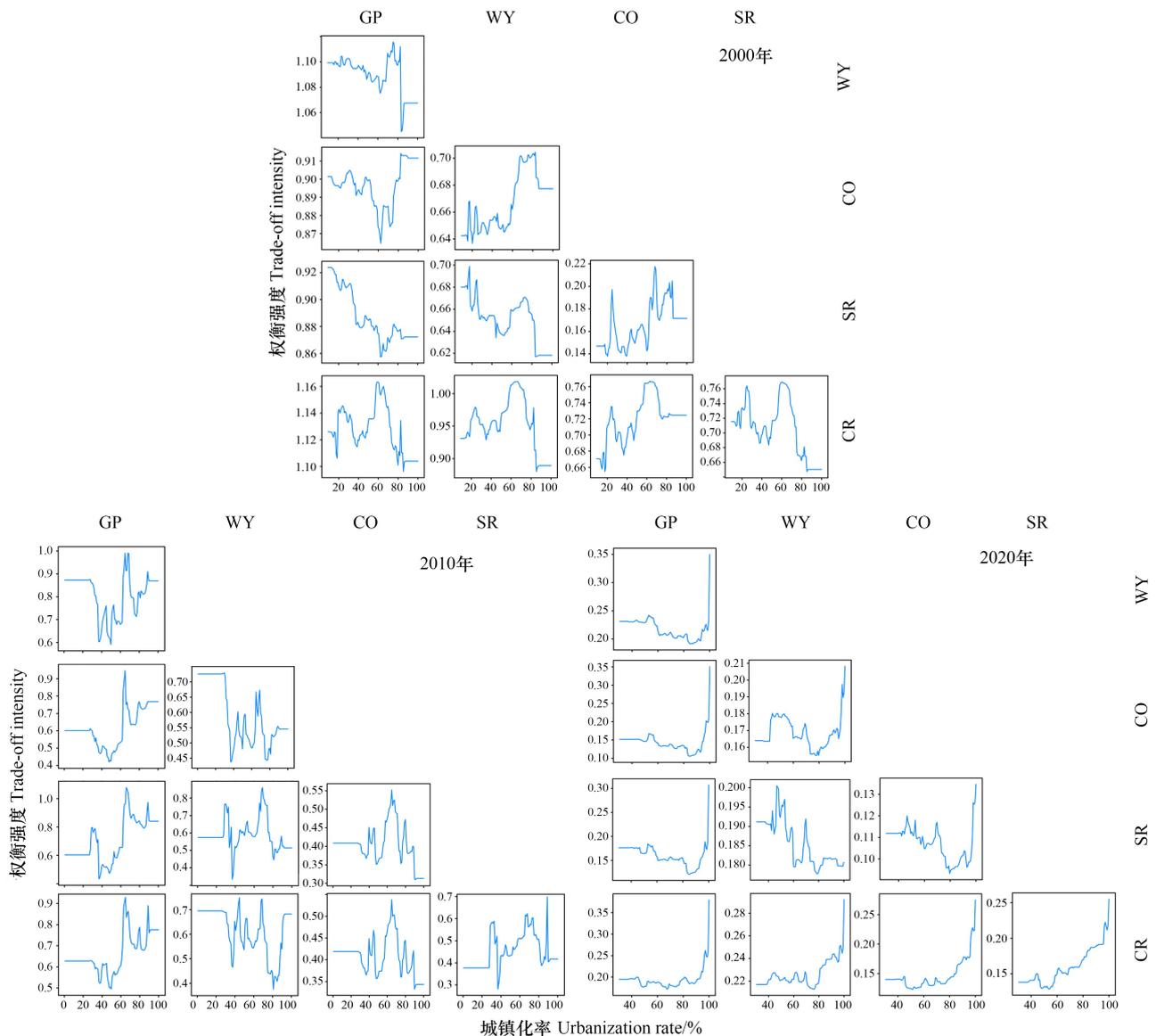


图6 长三角地区耕地生态系统服务权衡强度对关键驱动因素的响应

Fig.6 Response of cropland ecosystem service trade-off intensity to key drivers in Yangtze River Delt region

到满足,也可能会造成粮食作物的“挤出效应”,引发粮食产量下降、农民权益受损、生态环境破坏等问题^[29],导致文化娱乐与其他服务间的权衡。而后,随着城镇化和工业化进程的推进、化肥农药、种子的优化以及田间管理的加强等,耕地不仅在质量与产出上得到更为严格的把控,也呈现调节、文化等多种服务类型的多元均衡发展趋势,耕地生态系统服务之间总体表现出协同效应的增强。

空间上看,一方面,长三角地区耕地生态系统服务权衡强度随时间推移整体呈下降趋势,另一方面,自然条件和社会经济因素的地理差异导致耕地服务间权衡存在明显的区域差异。换言之,近年来长三角耕地生态系统服务间的相互作用逐渐形成“积极导向和特色化发展”,这也与 Zhang 等^[30]研究结果一致。未来长三角耕地生态系统的优化管理应继续以此为发展方向,通过精细化分区管理等方式增进服务间的正向协同。在苏北、皖北等粮食主产区坚决制止耕地“非粮化”,稳定生产优势,提升农户积极性和生产效率。永久基本农田以外可以在不破坏耕作层的前提下灵活开展多样化粮农生产^[31],例如皖南、浙南等丘陵区特色农产品生产。推动城市郊区耕地的现代化设施农业发展,提升农业效率与产值,并促进农业休闲观光、农耕文化体验等

产业的融合发展,如上海、苏南、浙北等地。以“三区三线”为核心思路,通过耕地弹性管控统筹粮食生产、生态功能维持、农业现代化等的关系^[32],实现耕地生态系统服务效益最大化。

近 20 年来,自然资源禀赋对长三角地区耕地生态系统服务权衡的影响占比趋于减小,社会经济因子发挥着愈加重要的作用。这一结果已在李春莹等^[33]的研究中得到验证。光照时长的阈值随时间推移变化较为平稳,当光照时长为 1800—2000h 时,长三角耕地生态系统服务间的权衡较小,这一阈值会因生态系统类别、服务类型和自然环境条件不同而有所变动^[34]。尽管无法改变自然光照条件,但可以通过调整种植密度、使用遮荫作物、人工补光等措施优化光照时长,促进长三角地区耕地生产、生态和文化等多功能的全面优化。近年来,耕地复种指数和城镇化率的最佳阈值有所提高。当耕作强度为 1.6 时,两两服务之间趋于协同,这与邱炳文等^[35]的研究不谋而合,该研究表明长三角耕地复种指数范围为 1.512—1.701,平均指数为 1.604。也进一步说明提高耕种强度以提高粮食常量、确保粮食安全的同时,应适当休耕以恢复地力,避免耕地养分消耗大。此外,本研究发现城镇化率在接近 80% 时,其对耕地生态系统服务权衡的促进作用降低,这也证明合理的城镇化对耕地多功能协同发展具有正效应,有助于形成耕地生态系统的良性循环。

然而本文仍存在一些不足之处。首先,研究尚未深入探究多个驱动因素之间的复杂交互作用和关键阈值,未来将揭示多种驱动因素对生态系统服务权衡的交互影响与其阈值,为长三角地区乃至全国的耕地生态系统管理提供更为系统全面的见解。另外,耕地资源对应着园地、林地等其他资源,尤其从保护角度而言对应着建设用地。后续我们将进一步分析建设用地涉及的生态系统服务在空间上维持和转换的权衡协同关系,通过不同地类比较挖掘耕地生态系统服务权衡特征,提升耕地保护的正效应。

5 结论

本研究评估了 2000—2020 年长三角地区 5 种关键的耕地生态系统服务,探讨了任意两种服务之间的权衡/协同关系,运用 GBDT 方法分析耕地生态系统服务之间权衡强度的驱动因素及影响效应,并对关键阈值进行识别。主要结论如下:

(1) 2000—2020 年长三角地区粮食生产持续提升,核心区分布在中部北部平原地区。产水服务和固碳释氧均呈先下降后上升的趋势,耕地正效应增强,空间上大致呈现“南高北低、东高西低”分布。土壤保持量持续下降,水土流失负效应减弱,高值区集中于西南部森林生态屏障区。文化娱乐服务表现为持续增长状态,高值分布转变为“大集聚、小分散”格局,耕地显现休闲化、生活化发展方向。

(2) 长三角地区耕地生态系统服务的权衡/协同关系存在明显的时空异质性特征。时间上总体表现为权衡减弱、协同增强,不同时期权衡/协同关系会出现强度的变化甚至发生关系逆转。长三角耕地在提高耕作效率的同时隐含着生态风险,随着耕地利用转型及农业现代化发展,耕地呈现粮食生产、生态价值、文化娱乐全面优化的趋势。空间上看,由于自然条件和经济水平不同,耕地生产能力和要素投入水平在地理空间层面差异较大,导致服务间权衡总体上表现为南北高中间低或南高北低两种分布格局。耕地生产技术、资金投入等的全面提升促使整个地区权衡强度进一步缩小,不同区域耕地发展特色逐渐凸显。

(3) 2000—2020 年耕地资源禀赋对权衡强度的贡献率下降,社会经济因素贡献率大幅度提升,光照条件、农业政策和城镇化水平是影响耕地生态系统服务权衡强度的关键因素,显示出非线性变化特征。随着时间推移,光照时长对服务间权衡影响的最佳阈值范围变化较小,总体保持在 1800—2000h,耕地复种指数和城镇化率阈值均呈现增长趋势。其中耕种强度由 1.3—1.6 增长至超过 1.6 的范围,城镇化率由 40%—60% 提升至 80% 附近的阈值时,各项生态系统服务间的权衡作用整体减弱。为促进耕地生态系统服务间的协同发展,有必要将驱动因素控制在一定的阈值范围内。

参考文献 (References):

- [1] 苏越, 蒋雪梅, 王成, 朱从谋, 李永钧, 王晓虎. 浙北平原区耕地生态系统服务供需匹配与分区管控研究——以桐乡市为例. 中国农业资源与区划, 2024; 1-15. (2024-11-11). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGNZ2024110800D&dbname=CJFD&dbcode>

=CJFQ.

- [2] 李长生, 严金明. 生态退耕背景下黄河流域耕地变化与农业生产和生态环境关系研究. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 1-8.
- [3] 杨志新. 北京郊区农田生态系统正负效应价值的综合评价研究[D];北京: 中国农业大学, 2006.
- [4] Liu Y, Wan C Y, Xu G L, Chen L T, Yang C. Exploring the relationship and influencing factors of cultivated land multifunction in China from the perspective of trade-off/synergy. *Ecological Indicators*, 2023, 149: 110171.
- [5] 左丽媛, 姜远, 高江波, 杜馥君, 张怡博. 生态保护红线区生态系统服务多维驱动力的定量分离. 地理学报, 2022, 77(9): 2174-2188.
- [6] 马国斌, 吴彬, 王鹏程, 陆汝成, 蒋恺. 耕地资源资产价值间权衡/协同关系研究——以广西壮族自治区为例. 自然资源学报, 2025, 40(5): 1344-1362.
- [7] 韦钧培, 杨云川, 谢鑫昌, 廖丽萍, 田忆, 周津羽. 基于服务簇的南宁市生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态与农村环境学报, 2022, 38(1): 21-31.
- [8] Maes J, Paracchini M L, Zulian G, Dunbar M B, Alkemade R. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe. *Biological Conservation*, 2012, 155: 1-12.
- [9] 刘小波, 王玉宽, 刘勤, 李政旸. 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. 生态学报, 2023, 43(22): 9416-9429.
- [10] 乔志宏, 李婷, 任宇, 罗颖, 杨亚东. 社会-生态网络视角下生态系统服务耦合关系及其驱动因素. 资源科学, 2024, 46(5): 1002-1017.
- [11] 康庆, 郭青霞, 丁一, 张扬. 山西省“三生”功能协同/权衡关系分析. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1195-1207.
- [12] 何刘洁, 郑博福, 万炜, 谢泽阳, 宋旭, 朱锦奇, 刘忠. 长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素. 环境科学, 2024, 45(6): 3318-3328.
- [13] 李怡, 方斌, 李裕瑞, 璩路路, 李冬杰. 城镇化进程中耕地多功能权衡/协同关系演变及其驱动机制. 农业工程学报, 2022, 38(8): 244-254.
- [14] 刘颂, 张浩鹏, 裴新生, 王颖. 长时间序列生态系统服务权衡与协同驱动因素——以芜湖市生态系统服务功能极重要区为例. 生态学报, 2024, 44(5): 1780-1790.
- [15] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- [16] 张建香, 汪亚峰, 张耀宗, 刘艳艳, 王东, 李旭升, 唐述林. 延河流域生态系统服务权衡/协同关系阈值效应. 生态学报, 2024, 44(23): 10573-10581.
- [17] 张紫怡, 仝照民, 张立亭, 刘耀林. 景观格局对生态系统服务的非线性影响和阈值调控——以福建省生态高效协同区为例. 生态学报, 2024, 44(21): 9535-9551.
- [18] 马小宾, 章锦河, 马天驰, 陶洁怡, 王培家, 郭丽佳, 杨良健. 国家公园生态系统健康测度模型构建及黄山实证研究. 生态学报, 2024, 44(13): 5746-5760.
- [19] 李婷, 李志文, 陈登帅, 李辉霞, 徐皓帆. 珠三角地区生态系统服务簇权衡/协同网络及非线性阈值效应. 热带地理, 2024, 44(12): 2278-2291.
- [20] 罗杯良. 川中丘陵地区近 55 年来农田生态系统植被碳储量动态研究——以四川省盐亭县为例. 自然资源学报, 2009, 24(2): 251-258.
- [21] 周自翔, 李晶, 冯雪铭. 基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价. 生态学报, 2013, 33(9): 2907-2918.
- [22] Angima S D, Stott D E, O'Neill M K, Ong C K, Weesies G A. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 97(1/2/3): 295-308.
- [23] 黄强, 陈田田, 王强, 冯玉全. 喀斯特山区生态系统服务权衡关系分异特征及生态安全格局识别——以贵州省为例. 地理科学, 2024, 44(6): 1080-1091.
- [24] 周贵鹏, 龙花楼, 戈大专, 徐林增, 李思捷. 耕地利用隐性形态三维测度及其地域类型研究——以黄淮海地区为例. 地理研究, 2024, 43(1): 180-199.
- [25] Friedman J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [26] 崔叙, 喻冰洁, 杨林川, 梁源, 张凌菲, 方翰. 城市轨道交通出行的时空特征及影响因素非线性机制——基于梯度提升决策树的成都实证. 经济地理, 2021, 41(7): 61-72.
- [27] 赵翔, 蔡博诚, 王静, 罗海风, 陈松林. 基于 GBRT 模型的湖南县域农村居民点整治潜力预测. 农业工程学报, 2023, 39(3): 198-207, 279.
- [28] 金一诺, 王枫. 珠三角耕地利用转型的时空演化特征及其影响因素分析. 水土保持研究, 2022, 29(4): 352-361.
- [29] Yang H, Zou R Y, Hu Y M, Wang L, Xie Y K, Tan Z X, Zhu Z Q, Zhu A X, Gong J Z, Mao X Y. Sustainable utilization of cultivated land resources based on “element coupling-function synergy” analytical framework: a case study of Guangdong, China. *Land Use Policy*, 2024, 146: 107316.
- [30] Wang S T, Bai X M, Zhang X L, Reis S, Chen D L, Xu J M, Gu B J. Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China. *Nature Food*, 2021, 2(3): 183-191.
- [31] 陈浮, 李宇航, 于昊辰, 华子宜, 马力, 蒋非非. “大食物观”统领国土空间开发和保护格局重塑. 中国土地科学, 2023, 37(4): 1-10.
- [32] 袁源, 王亚华, 徐萍. “非粮化”治理视角下的耕地用途管制: 应对逻辑与体系构建. 自然资源学报, 2024, 39(4): 942-959.
- [33] 李春莹, 李桂娥, 李杰, 焦洋阳. 长江三角洲城市群生态系统服务协同权衡的时空异质性. 中国环境科学, 2024, 44(2): 992-1006.
- [34] Zhang Z Y, Tong Z M, Zhang L T, Liu Y L. What are the dominant factors and optimal driving threshold for the synergy and tradeoff between ecosystem services, from a nonlinear coupling perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 422: 138609.
- [35] Qiu B W, Hu X, Yang P, Tang Z H, Wu W B, Li Z R. A robust approach for large-scale cropping intensity mapping in smallholder farms from vegetation, brownness indices and SAR time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 203: 328-344.