

粮食主产区种植业经济发展与碳排放耦合协调及时空演化

朱艾青¹, 杨承宇¹, 王智熠²

(1. 中国农业大学烟台研究院, 山东 烟台 264670; 2. 中国农业大学人文与发展学院, 北京 100080)

摘要:为探究我国种植业经济发展与碳排放耦合变化情况, 实现种植业绿色高质量发展, 基于2006-2023年我国粮食主产区13省面板数据, 构建种植业经济与碳排放双系统评价体系, 综合运用熵值法、修正耦合协调度模型及空间自相关分析, 探究种植业经济发展与碳排放耦合协调及时空演化。结果显示, 粮食主产区耦合协调度整体呈逐渐上升趋势(年均增幅0.5%~2.5%), 且政策关联性较强。2006-2010年增速较缓, 发展中心在粮食增产; 2011-2019年稳步增长, 尤其2015年后受政策影响增速明显加快; 2020年“双碳”目标提出后, 粮食主产区耦合协调度进入高质量发展阶段, 河北、四川等多省份突破0.7进入中级协调阶段, 到2023年多数省份进入勉强协调或初级协调阶段。全局莫兰指数显示, 2006-2010年呈弱正相关, 2011-2013年转为负相关, 2014年后负相关性趋弱, 区域差异逐步缩小, 但部分东北地区、南方地区耦合协调度仍较低, 需通过低碳技术适配、种植结构优化及跨区域协作推动协同发展。

关键词:绿色农业; 农业经济; 耦合协调度模型; 莫兰指数

中图分类号: F323

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)04-0102-10

Coupling Coordination and Spatiotemporal Evolution of Economic Development and Carbon Emissions in the Cultivation Sector of Major Grain-Producing Areas

ZHU Aiqing¹, YANG Chengyu¹, WANG Zhiyi²

(1. Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670; 2. College of Humanities and Development Studies, China Agricultural University, Beijing 100080, China)

Abstract: To explore the coupling relationship between economic development of China's cultivation sector and carbon emissions, and promote green and high-quality development of the cultivation industry, this study constructed a dual-system evaluation framework for cultivation economy and carbon emissions based on panel data of 13 provinces in China's major grain-producing areas from 2006 to 2023. The entropy method, modified coupling coordination degree model, and spatial autocorrelation analysis were comprehensively applied to investigate the coupling coordination and spatiotemporal evolution of cultivation economic development and carbon emissions. Results showed that the overall coupling coordination degree in major grain-producing areas exhibited a gradual upward trend (average annual growth rate: 0.5%~2.5%), with strong policy relevance. From 2006 to 2010, the growth rate was slow, with the development focus on increasing grain production. From 2011 to 2019, steady growth was observed, and the growth rate accelerated significantly after 2015 due to policy impacts. After the proposal of the "dual carbon" target in 2020, the coupling coordination degree entered a high-quality development stage: several provinces including Hebei and Sichuan exceeded 0.7, reaching the intermediate coordination stage; by 2023, most provinces had achieved barely coordinated or primary coordination stages. The global Moran's I indicated a weak positive correlation during 2006-2010, which turned negative in 2011-2013. After 2014, the negative correlation weakened, and regional differences gradually narrowed. However, the coupling coordination degree remained low in some northeast-

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 烟台市教育局校地融合项目(2022XDRHXMQT24); 中国农业大学烟台研究院引导性课题(Z202304)

作者简介: 朱艾青(2004-), 女, 在读本科, 研究方向: 农业经济、循环经济。

ern and southern regions. It is necessary to promote coordinated development through adoption of low-carbon technologies, optimization of planting structures, and cross-regional collaboration.

Key words: Green agriculture; Agricultural economy; Coupling coordination degree model; Moran index

全球气候变迁已成为当今世界面临的严峻难题之一。过度的温室气体排放将引发全球气温攀升、海平面上升、极端气候事件频繁出现等问题,对人类的生存与发展构成严重威胁。中国作为全球应对气候变化行动的重要践行者,积极呼应国际社会的呼吁,提出“碳达峰”“碳中和”目标。

种植业作为农业的重要组成部分,对国家粮食安全具有决定性影响。然而,种植业在生产过程中也会产生大量的温室气体,如二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)^[1],对全球气候变化有着重要影响。在全球气候变化与粮食安全双重压力下,如何实现种植业的绿色高质量发展成为可持续发展领域的重要议题。目前已有研究主要集中在探究种植业绿色发展路径方面,如胡晓燕等^[2]针对种植业生态补偿展开研究并提出加强种植业生态补偿机制的顶层设计、拓宽种植业生态补偿范围等建议,希望能够推进农业绿色可持续发展和实现农民增收;仇焕广等^[3]通过典型案例分析,提炼了不同区域有效推动农业绿色转型经验,提出推动绿色生产技术的研发与推广,完善绿色农业补贴政策与生态补偿机制建议。

探寻种植业发展路径的相关研究已取得一定成果,但目前关于如何实现种植业经济发展与碳减排耦合协调发展的研究较少,基于此,本研究通过构建种植业经济增长和碳排放双系统耦合协调度模型,系统评估2006–2023年我国粮食主产区在这两方面的耦合协调发展水平,并进行空间相关分析,探索耦合协调度的空间变化规律,以期为粮食主产区种植业的绿色高质量协调发展提供理论支持与依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域概况

2003年,财政部明确在全国划分13个粮食主产区,指自然条件优越、粮食生产集中、商品率高、对国家粮食安全贡献大的集中产区,由河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、江苏、安徽、江西、湖北、湖南与四川13个省(区)组成。粮食主产区是我国粮食生产关键地带,在保障国家粮食安全方面意义重大。2023年我国粮食总产量达69 540.99万t,粮食主产区产量则为54 171万t,占全国粮食产量的77.9%。但高粮食产量意味着粮食主产区种植业碳排放强度也高。推动粮食主产区种植业经济增长与碳减排高效协同发展,是维持种植业经济持续健康发展的必然需要。

1.2 指标体系构建

本研究遵循系统性、科学性与数据可得性原则,构建包含种植业经济发展与碳排放的双系统耦合协调评价体系。指标选取考量粮食主产区生产特征,兼顾农业生产效益与碳排放的辩证关系,最终形成包含2个子系统、6个指标的层次评价体系(表1)。正向指标(+)表征对系统发展的促进作用,负向指标(-)表征抑制作用。

种植业经济发展系统选取种植业总产值、农作物播种总面积、单位面积产值、农业机械化程度4个指标。种植业总产值直接表征粮食主产区种植业经济活动总产出,体现粮食安全保障能力;农作物播种总面积反映生产要素投入规模,揭示耕地资源利用广度。单位面积产值衡量土地资源集约利用效率^[4],是农业发展核心指标;农业

表1 种植业经济-碳排放系统评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for the economic-carbon emission system of agriculture

子系统 Subsystem	指标 Indicator	计算公式 Mathematical formula	影响方向 Impact direction
种植业经济发展	种植业总产值/万元	-	+
	农作物播种总面积/万·hm ⁻²	-	+
	单位面积产值/万元·万hm ⁻²	种植业总产值/农作物播种总面积	+
	农业机械化程度/千瓦·万hm ⁻²	农业机械总动力/农作物播种总面积	+
碳排放	种植业碳排放总量/kg C	-	-
	单位面积碳排放量/kg C·万hm ⁻²	种植业碳排放总量/农作物播种总面积	-

机械化程度,是农业机械总动力与农作物播种总面积的比值表征,尽管机械使用可能增加化石能源消耗,但综合分析,机械使用带来的生产效率提升对粮食主产区粮食稳产的贡献更为显著,农业机械化有利于减少粮食主产区碳排放量,故设为正向指标^[5]。

碳排放系统包括种植业碳排放总量和单位面积碳排放量2个指标。种植业碳排放总量涵盖化肥施用、农药喷洒、农膜使用等主要碳源,综合反映农业生产活动的碳足迹;单位面积碳排放量通过碳排放总量与播种总面积比值获得,揭示单位产出的环境代价,规避区域规模差异。

1.3 种植业碳排放测算

种植业碳排放来源复杂,基于粮食主产区种植的实际状况,可以将种植业碳源划分为种植活

动产生的碳排放($E_{\text{种植活动}}$)与作物甲烷排放这2类^[6],由于水稻的碳排放系数较高且最具代表性,故在作物甲烷排放类仅聚焦于水稻($E_{\text{水稻}}$),具体碳源如下:粮食种植时,农药、农膜、化肥等生产要素投入所引发的直接或间接碳排放;机械化设备机油损耗及农业灌溉电力消耗等能源使用带来的碳排放;生产种植过程中,土地翻耕致使的碳流失;水稻生产环节产生的甲烷。运用IPCC法对种植业碳排放进行测算^[7],计算公式如下:

$$E = E_{\text{种植活动}} + E_{\text{水稻}} \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{\text{种植活动}} = \sum E_i = \sum T_i \times \delta_i \dots\dots\dots (2)$$

式中: E_i 为第*i*类种植活动产生的碳排放量, T_i 和 δ_i 分别为第*i*类种植活动碳源的投入量及其对应的碳排放系数,详细数据见表2。

$$E_{\text{水稻}} = \sum N_i \times \mu_i \dots\dots\dots (3)$$

表2 粮食种植活动各碳源碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficients of various carbon sources for grain cultivation activities

碳源 Carbon source	碳排放系数 Carbon emission factor	数据来源 Data source
农用化肥	0.895 6 kgC/kg	美国橡树岭国家实验室
农用塑料薄膜	5.180 0 kgC/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
农用柴油	0.592 7 kgC/kg	IPCC
农药	4.934 1 kgC/kg	美国橡树岭国家实验室
农业灌溉	266.48 kgC/hm ²	段华平等 ^[8]
土地翻耕	312.60 kgC/km ²	伍芬琳等 ^[9]

式中: N_i 和 μ_i 分别为第*i*类水稻种植面积及其对应的甲烷排放系数,参考碳足迹计算、分析相关文献^[10-12],基于王振宇等^[13]整理的各省域水稻种植甲烷排放系数表,排放系数计算兼顾各地区在

水稻种植种类及生长周期方面的气候、水热条件差异,综合各省份实际种植水稻情况,整理得到具体数值(表3)。

表3 粮食主产区各省(区)水稻种植的甲烷排放系数

Table 3 Methane emission coefficients for rice cultivation in major grain producing provinces (regions)

省(区) Province/Region	早稻/g·m ⁻² Early rice	中稻或一季晚稻/g·m ⁻² Middle rice or single-season late rice	双季稻/g·m ⁻² Double-season late rice
河北	0	15.33	0
内蒙古	0	8.93	0
辽宁	0	9.24	0
吉林	0	5.57	0
黑龙江	0	8.31	0
江苏	0	53.55	0
安徽	16.75	51.24	27.6
江西	15.47	65.42	45.8
山东	0	21.00	0

续表 3

Table 3 Continued

省(区)	早稻/g·m ⁻²	中稻或一季晚稻/g·m ⁻²	双季稻/g·m ⁻²
Province/Region	Early rice	Middle rice or single-season late rice	Double-season late rice
河南	0	17.85	0
湖北	17.51	58.17	39.0
湖南	14.71	56.28	34.1
四川	0	25.73	0

1.4 研究方法与模型

1.4.1 熵值法

采用熵值法确定各指标权重并计算综合得分,基于信息熵理论的客观赋权,通过数据本身的变异程度确定指标权重,可有效避免主观因素干扰。

(1)首先整理 2006-2023 年粮食主产区 6 个指标的数据,对各项指标数据进行标准化处理。

正向指标处理:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \dots\dots\dots (4)$$

负向指标处理:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \dots\dots\dots (5)$$

式中: i 为评价指标, $r=1,2,\dots,6$; j 为年份, $j=1,2,\dots,18$; x_{ij} 为原始评价指标数据; $\max(x_{ij})$ 为原始评价指标数据中数据最大值; $\min(x_{ij})$ 为原始评价指标数据中数据最小值; r_{ij} 为标准化处理后的数据。

(2)各评价指标的权重值计算公式如下:

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}} \dots\dots\dots (6)$$

$$e_i = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \dots\dots\dots (7)$$

式中: p_{ij} 为第 i 个评价指标在第 j 年的数据与所有计算年份的数据之和的比值; e_i 为第 i 个评价指标的信息熵; m 为一个评价指标所对应的所有数据量。

$$g_i = 1 - e_i \dots\dots\dots (8)$$

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \dots\dots\dots (9)$$

式中: g_i 为熵冗余; w_i 为第 i 个评价指标的权重; n 为系统评价指标的数量。

(3)子系统综合评价指数计算公式如下:

$$Y_{ij} = \sum_{i=1}^n w_i \times r_{ij} \dots\dots\dots (10)$$

式中: Y_{ij} 为子系统的综合评价指数,综合评价指数得分越高,说明该地区的种植业经济发展或碳排放控制方面效果越好,反之则说明该地区在种植业经济发展或碳排放控制方面的效果还有待提高。

1.4.2 耦合协调度模型

耦合协调度模型是用于量化评估 2 个或多个系统间相互作用及协调发展程度的分析工具,为探究种植业经济增长和碳排放相互关系,引入双系统耦合协调度模型,为加大 C 值区分度,参考王淑佳等^[14]提出的关于社会科学领域耦合协调度模型^[15]的修正,所用双系统耦合协调度模型计算公式如下:

$$C = \sqrt{[1 - (U_2 - U_1) \times \frac{U_1}{U_2}] \dots\dots\dots (11)}$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \dots\dots\dots (12)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \dots\dots\dots (13)$$

式中: U_1 为两个系统中得分较小的数值, U_2 为两个系统中得分较大的数值。本研究认为种植业经济发展和碳排放同等重要,故令 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

基于上述分析,参考目前已有研究,将种植业经济发展和碳排放两个系统的耦合协调程度分为以下 3 种类型(表 4)。

1.4.3 空间自相关分析

统计分析粮食主产区种植业经济增长和碳排放的耦合协调度,利用 ArcGis10.8.2 进行数据可视化分析,利用 GeoDa 软件,使用欧氏距离计算方法和反距离空间准则得到莫兰自相关指数(Moran's I),进行全局和局部空间自相关量化分析。Moran's I 值属于[-1,1],在 0 到 1 表示正相关,-1 到 0 表示负相关。局部莫兰指数(Local Moran's I, LMI)能够定量识别该属性在区域内的“热点区”和“冷点区”,进而分析区域的极化空间模式,全局莫兰指数(Global Moran's I, GMI)主要评估整个研究区域内某一属性的聚集程度^[16]。

莫兰指数计算公式:

表4 耦合协调度等级划分
Table 4 Classification of coupling coordination degree levels

耦合协调类型 Type of coupling coordination	协调度区间 Range of coordination degree	协调等级 Coordination level
失调	0.00~0.09	重度失调
	0.10~0.19	严重失调
	0.20~0.29	中度失调
	0.30~0.39	轻度失调
磨合	0.40~0.49	濒临失调
	0.50~0.59	勉强协调
协调	0.60~0.69	初级协调
	0.70~0.79	中级协调
	0.80~0.89	良好协调
	0.90~1.00	优质协调

$$I = \frac{n}{s_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (14)$$

式中: I 为全局莫兰指数值; $n(234)$ 为样本总量; x_i 和 x_j 为纵坐标 i 和横坐标 j 所对应的耦合协调度值; \bar{x} 为平均值; 空间相邻为1, 不相邻为0; w_{ij} 为各城市关系空间权重矩阵; s_0 为空间矩阵 w_{ij} 中所有元素之和^[17]。

1.5 数据来源

有效灌溉面积、农作物播种总面积、农业机械总动力、农用化肥使用折纯量、农膜使用量、农药使用量、农用柴油使用量、水稻播种面积等原始数据来自2007–2024年《中国农村统计年鉴》及国家统计局。

2 结果与分析

2.1 耦合协调度发展趋势

整体来看, 粮食主产区的种植业经济发展耦合协调度呈现上升趋势, 年均增幅约0.5%~2.5%, 反映出各省农业现代化与低碳转型的协同性逐步增强, 这一趋势主要由政策驱动和技术进步推动, 但也受自然条件与资源约束的阶段性影响。其中黑龙江、四川、山东等省份在研究时间内增长最为显著, 得益于省份自身种植资源优势 and 科技发展水平; 而河南、江西等省份在部分年份出现波动或阶段性下降。

从时间维度看, 本研究将粮食主产区种植业经济发展与碳排放耦合协调度的发展趋势根据相关政策提出的关键时点划分为3个阶段。

2006–2010年, 粗放型缓慢增长阶段。2006

年, 国家“十一五”规划提出建设社会主义新农村作为核心任务的发展目标, 此阶段的重心是大力发展农业、提高粮食产量, 粮食主产区各省份皆以粮食增产为主要目标, 在农业碳减排方面投入增长不多。故在2006–2010年, 粮食主产区各省份种植业经济发展指数稳步上升、增速明显, 但13个省份的碳排放指数变化存在明显波动, 有增有减。多数省份, 如山东、安徽等, 耦合协调度虽有波动, 但整体处于缓慢上升状态(图1)。

2011–2019年, 政策引领与技术驱动下的稳定增长阶段。国家“十二五”规划首次将农业源纳入主要污染物总量减排控制范围, 故2011–2015年之间, 粮食主产区各省份开始进行种植业发展路径向绿色发展的转型, 耦合协调度整体发生短暂波动, 总体发展趋势呈上升状态(图2); 2015年后, 多个省份增速显著加快, 与国家“十三五”规划提出“绿色兴农”理念息息相关, 国家大力推广节水农业、保护性耕作和有机肥替代, 实施耕地轮作休耕制度, 提升耕地质量, 推广发展稻渔综合种养、立体生态养殖, 推动农业废弃物资源化利用, 同时新兴技术如智能化装备、大数据技术在农业领域应用取得重大进展, 故在此阶段, 粮食主产区的种植业经济发展与碳排放耦合协调度整体发展走势稳步上升。

2020–2023年, “双碳”目标引领下的高质量增长阶段。“双碳”政策提出后, 粮食主产区各省份开始在保障种植业经济增长、保障粮食安全的前提下, 探寻农业绿色转型与高质量发展路径。在2020年后, 包含河北、四川、湖南等在内的多个省份耦合协调度突破0.7, 达到中级协调(图3), 可以初

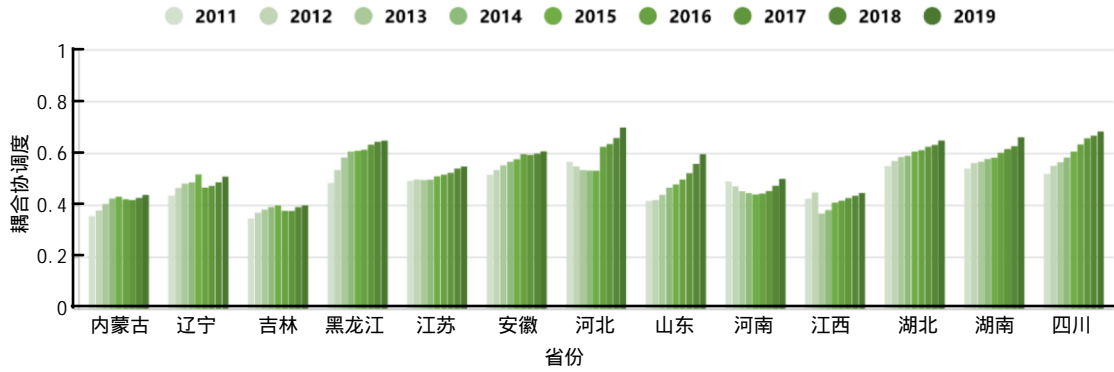


图1 各省份耦合协调度柱状图(2006-2010年)

Fig.1 Bar chart of coupling coordination degree of each province (2006-2010)

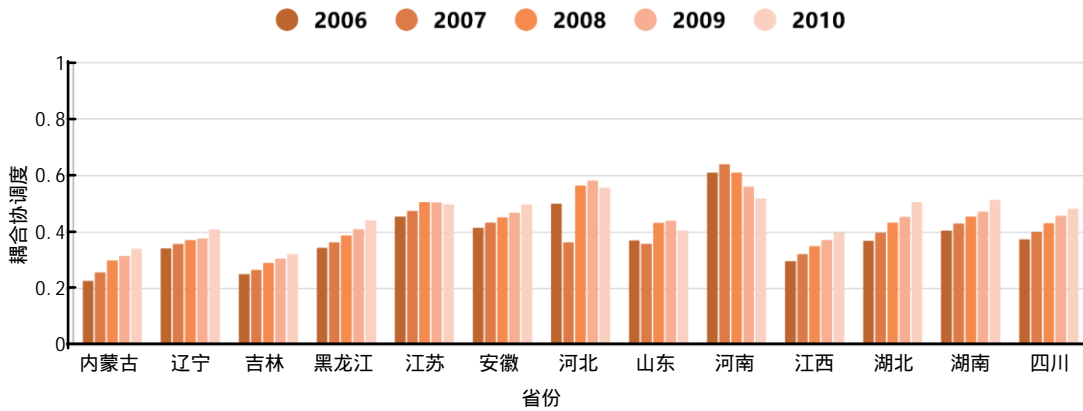


图2 各省份耦合协调度柱状图(2011-2019年)

Fig.2 Bar chart of coupling coordination degree of each province (2011-2019)

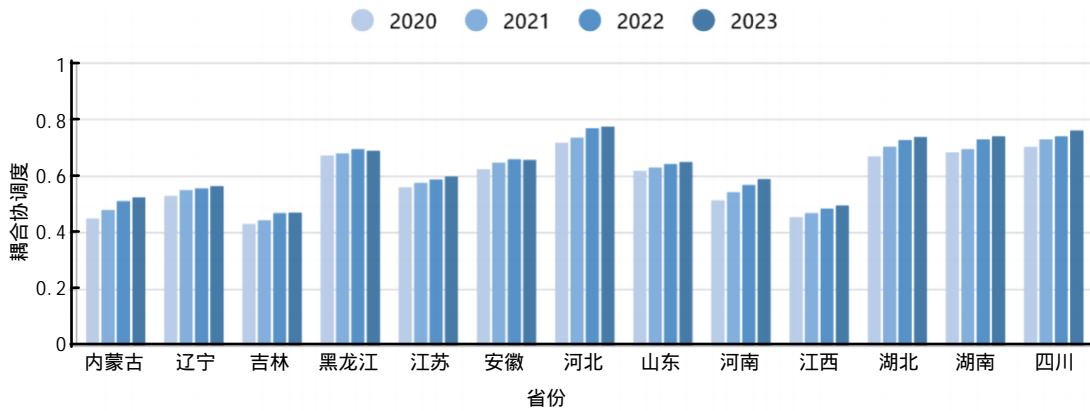


图3 各省份耦合协调度柱形图(2020-2023年)

Fig.3 Bar chart of coupling coordination degree of each province (2020-2023)

步反映出“双碳”目标初期成效,体现出我国环保政策在种植业方面的效果。现代种植业的发展,呈现出经济发展与环境质量共同协调增长的形势。

2.2 耦合协调度空间演变

借助 ArcGis 10.8 软件实现各省份耦合协调度数据可视化,分析种植业经济发展与碳排放耦合协调度时空格局演变特征(图4),受篇幅限制,选取 2008 年、2013 年、2018 年、2022 年可视化图片进

行代表分析。

空间上看,粮食主产区耦合协调类型存在明显的空间异质性。研究期间,初期粮食主产区大部分属于失调和磨合等级,但随着技术和经济不断发展,中度失调和轻度失调失调的城市消失,濒临失调的城市明显减少,大部分省份上升到勉强协调、初级协调阶段,中部和南部省份耦合协调度增长显著,东北、内蒙古地区增速较慢。

整体来看,粮食主产区耦合协调度时空格局呈现明显上升趋势,各省份在保证粮食增产的同时,也在不断地调整碳排放问题,使得粮食主产区种植业经济发展和碳排放系统耦合度得到了提升^[18-19]。

2.3 基于空间自相关的耦合协调差异分析

对2006-2023年粮食主产区种植业经济发展与碳排放耦合协调度进行空间自相关分析,可见

全局莫兰指数(Moran's I)呈现阶段性演变特征(图5)。2006-2010年,Moran's I由0.094波动上升至2008年峰值0.164后回落至0.105,表明初期区域协调度存在弱正空间相关性,但受限于农业现代化政策推进不均衡,各省份资源与技术禀赋存在差异,空间聚集效应逐步弱化。2011-2013年,指数由正转负并急剧下降至-0.228,不同省份

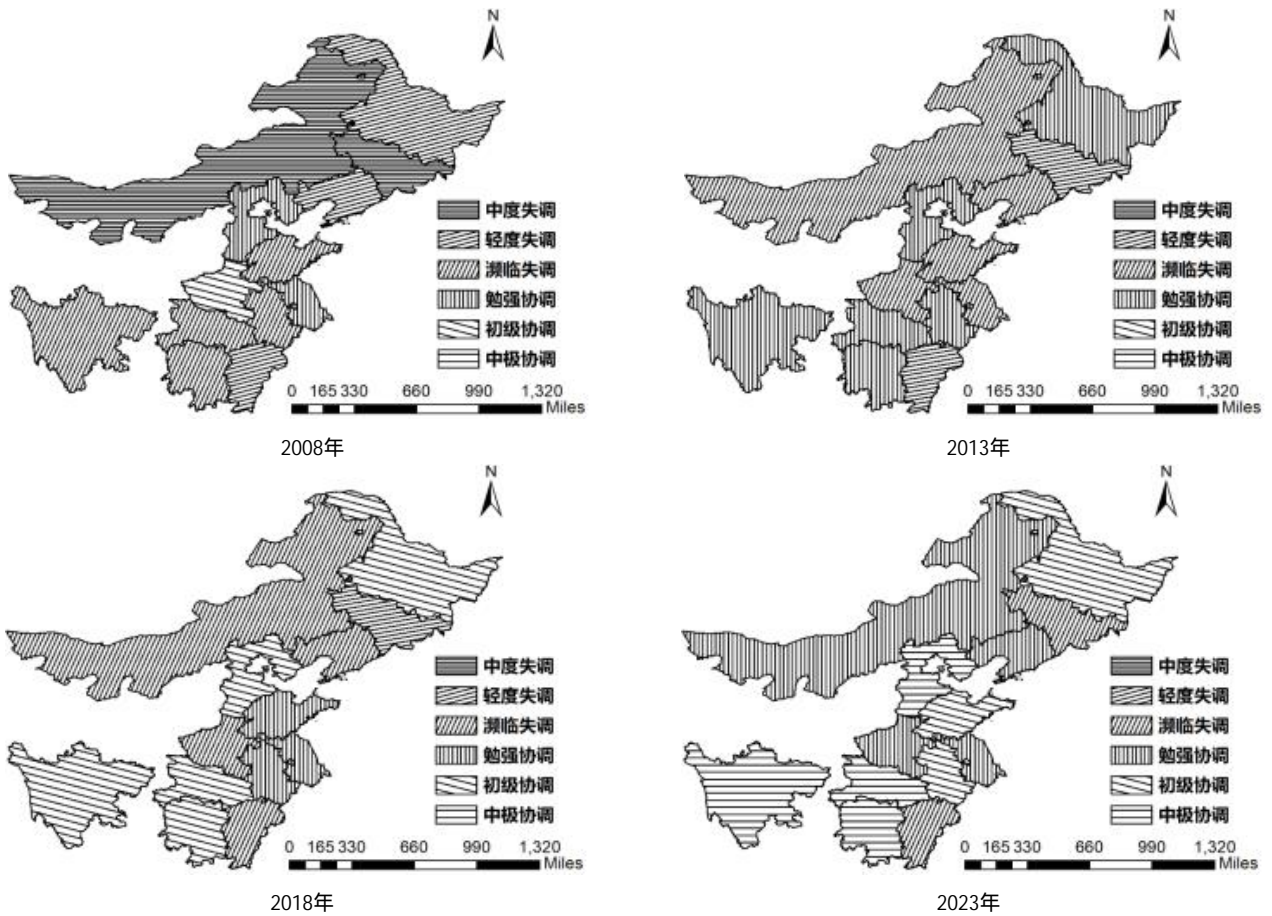


图4 粮食主产区耦合协调度空间演变图

Fig.4 Spatial evolution map of coupling coordination degree of major grain producing areas

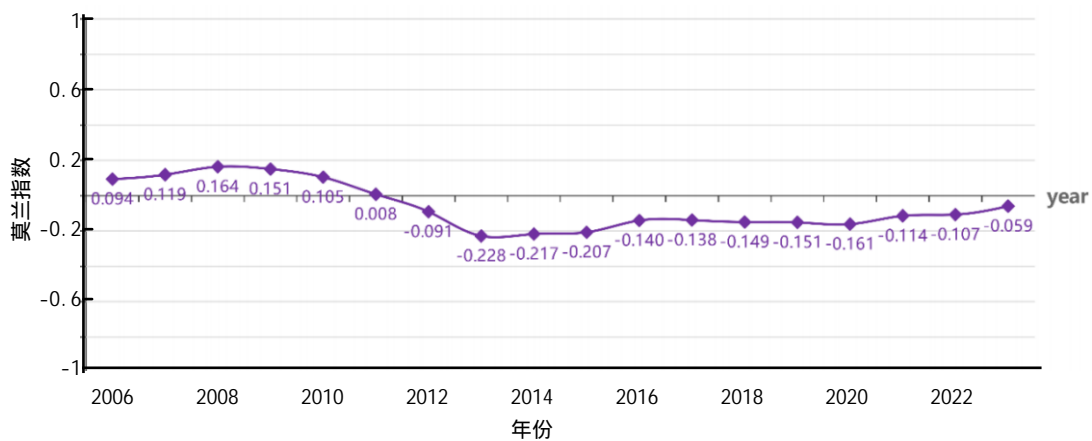


图5 全局莫兰指数随时间变化折线图

Fig.5 Line graph showing the variation of the global Moran index over time

之间开始呈现区域分化:技术领先省份(如山东、四川)通过种植结构的调整和技术突破实现协调度增长,而传统农区(如河南、江西)农业转型滞后,协调度上升速度缓慢,粮食主产区耦合协调度的空间差异扩大。2014-2023年, Moran's I 持续负值但绝对值逐步缓慢向0趋近,与国家减排政策的提出和“双碳”目标的驱动密切相关,农业低碳技术和发展模式(如机械精准施肥、秸秆还田、畜禽废弃物资源化利用等)在农业经济发展相似和地理位置相近的省份扩散、共享^[20],且在国家统一政策的引领下,各省份生态补偿机制逐步完善,区域差异渐渐缩小,粮食主产区耦合协调度的全局空间分布趋近随机格局。

绘制种植业经济发展与碳排放耦合协调下的空间聚集图(图6),可以看出粮食主产区种植业经济发展与碳排放耦合协调的空间聚集性存在空间异质性,中南部地区和东北地区聚集性高于其

他地区,但整体以耦合协调度不显著类型的城市为主。前期山东、河南、安徽、江苏、湖北5个农业大省呈现高-高聚集特征,江西受限于种植的单一结构和技术应用的滞后,耦合协调度明显低于周边省份,表现为低-高聚集类型。而后在政策的调整下,各省份逐渐协同发展,耦合协调度相差不大,经历了一段空间异质性降低的时期。研究期间中后期,黑龙江地区呈现为高-低聚集类型,黑龙江黑土地资源的优势显著,技术发展表现突出,耦合协调度高,而吉林、辽宁转型滞后,以传统耕作模式为主,耦合协调度的增长较为落后,反映了东北地区区域内种植业经济发展与碳排放耦合协调的不均衡发展,应通过区域间的合作与支持,建立经验分享平台,发挥地区比较优势^[21],提高低协调度省份的耦合协调度,从而实现整个区域的协同发展目标。

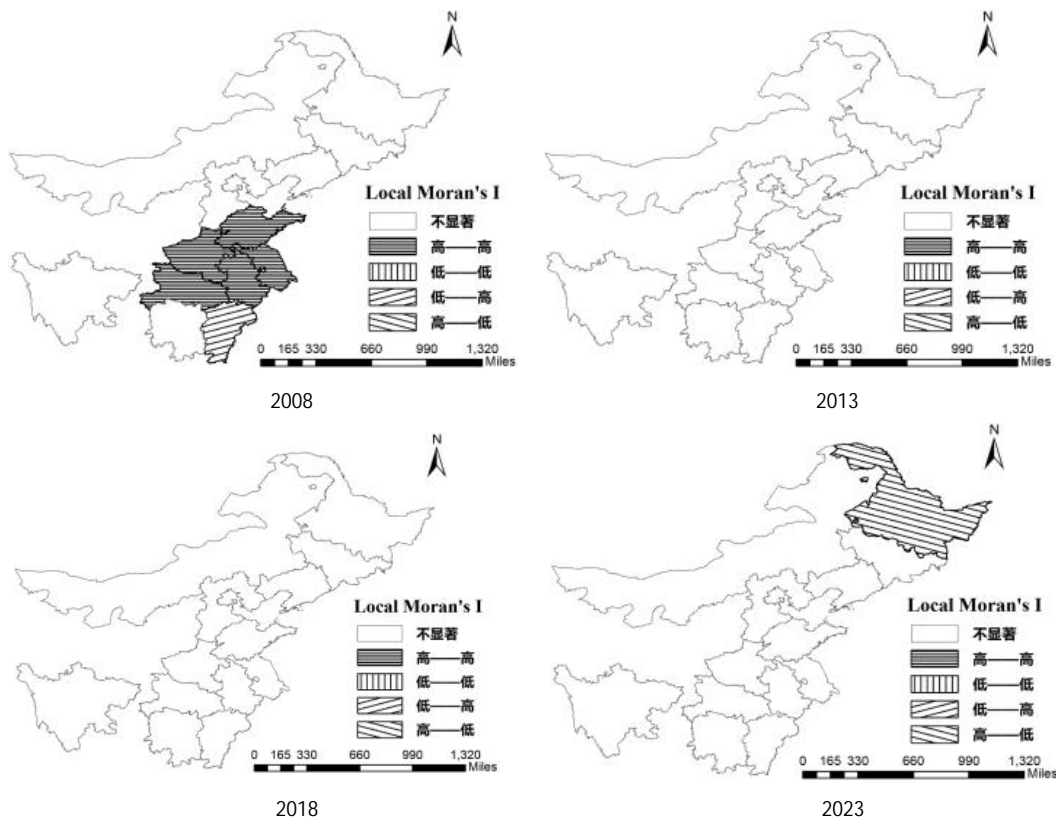


图6 部分年份局部莫兰指数空间聚集图

Fig.6 Spatial aggregation map of local Moran index for some years

3 结论与建议

3.1 结论

(1)2006-2023年,粮食主产区种植业经济与碳排放的耦合协调度呈现整体上升趋势,年均增幅为0.5%~2.5%,与政策关联性较强,同时反映出

农业现代化与低碳转型协同性逐步增强。其中,黑龙江、河北、四川、山东等省份增长显著,而河南、江西等地在研究期间内出现波动,增速相对较慢。分阶段而言,2006-2010年整体增速较缓,此时农业发展重心在粮食增产;2011-2019年全球稳步增长,尤其在2015年国家“十三五”规划明

确提出绿色农业的概念后,各省份耦合协调度受政策影响增速明显加快。

(2)空间格局上,耦合协调度存在显著区域分化。在东北地区,黑龙江因资源与技术优势表现突出,吉林、辽宁因传统耕作模式转型滞后发展较慢;中部粮食大省河南呈现“U形”波动,与种植结构的变动和缺少减排技术相关;山东等省份通过节水灌溉和“两型农业”政策实现高速增长;空间异质性表现为中南部多数省份协调度提升显著,部分东北地区和南方地区仍存在低值聚集。

(3)全局莫兰指数(Moran's I)显示耦合协调度空间关联阶段性变化:2006-2010年呈弱正相关,2011-2013年转为负相关(最低-0.228),2014年后负相关性趋弱,表明区域差异逐步缩小。局部空间自相关分析显示,目前黑龙江等高值区与周边低值区(吉林、辽宁)形成“高-低聚集”,仍需加强区域合作协同治理以改善不均衡^[22]。

3.2 建议

针对东北部分地区存在的低值聚集和部分南方省份发展不足现象,即处于濒临失调阶段的江西、吉林,处于勉强协调阶段的辽宁、内蒙古、河南、江苏,结合各省(区)提出以下建议。

(1)构建差异化低碳技术推广体系,强化减排能力。结合各区域资源禀赋、技术基础与产业特点,构建差异化低碳技术推广体系,分阶段推进减排能力建设。吉林、辽宁可依托黑土地优势,试点推行“深松+秸秆覆盖”免耕技术,河南可依托平原面积辽阔优势,推广水肥一体化与无人机变量施药组合技术,推动农机绿色升级;在机械化率较高的江苏、山东等地试点电力或生物燃料动力农机,共享技术资源并建立共享平台提升设备利用率。各省需协同建立技术协作体共享成熟方案,并通过碳汇交易试点与生态补偿机制形成跨区域减排合力。

(2)优化种植结构与区域布局,推动产业低碳转型。以技术适配与生态特征为核心,优化粮食主产区种植结构,进一步推动种植产业低碳转型。在传统连作区推广复合种植模式,如在河南、吉林、辽宁等平原地区推广大豆-玉米带状复合种植,利用大豆固氮特性减少氮肥需求,实现作物减排;在长江洪涝区江西扩大耐涝水稻品种与稻渔共生系统,控制甲烷排放,在内蒙古、东北盐碱地推广耐盐碱作物与微生物改良技术,利用现代生物技术扩大种植面积,提高土地使用效率,激活边际土地低碳生产潜力。

(3)深化区域协同治理机制,克服空间发展失衡难题。综合各省份地理位置和种植业发展情况组建“低碳联盟”,形成东北地区低碳联盟、西南地区低碳联盟,推动高协调区域向低值区输出节水灌溉等技术,共享碳排放交易配额。鼓励粮食主产区中耦合协调度高的省份,如四川、山东、河北等省份,积极分享低碳技术,促进技术扩散。

参考文献:

- [1] 夏龙龙, 颜晓元. 中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 665-672.
XIA L L, YAN X Y. Research progress and prospect of greenhouse gas emissions from the life-cycle production of food crops in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 665-672. (in Chinese)
- [2] 胡晓燕, 于婷, 刘月清. 种植业生态补偿的实践进展、关键问题与推进对策[J]. 经济纵横, 2023(12): 55-63.
HU X X, YU T, LIU Y Q. Eco-compensation for planting industry: Progress, problems, and measures[J]. Economic Review Journal, 2023(12): 55-63. (in Chinese)
- [3] 仇焕广, 黄青. 农业绿色转型与高质量协调发展的理论逻辑与实践[J]. 农业经济问题, 2025(2): 15-23.
QIU H G, HUANG Q. The green transformation of agriculture and high-quality development: Theoretical logic and practice[J]. Issues in Agricultural Economy, 2025(2): 15-23. (in Chinese)
- [4] 刘玉, 陈秧分, 高秉博, 等. 2003-2014年中国种植业产值增长及贡献因素分析[J]. 地理科学, 2018, 38(1): 143-150.
LIU Y, CHEN Y F, GAO B B, et al. Decomposition of the increment of planting value in China in 2003-2014[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(1): 143-150. (in Chinese)
- [5] 贾伊龙, 徐辉. 农业机械化、环境规制与农业碳排放的关系研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 208-215.
JIA Y L, XU H. Study of the relationship between agricultural mechanization, environmental regulation and agricultural carbon emissions[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 208-215. (in Chinese)
- [6] 赵洪亮, 陈思越, 谢立勇. 辽宁省种植业碳排放影响因素及预测分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(11): 1818-1828.
ZHAO H L, CHEN S Y, XIE L Y. Influencing factors and prediction analysis of carbon emissions from the planting industry in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(11): 1818-1828. (in Chinese)
- [7] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105.
TIAN Y, ZHANG J B, LI B. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2097-2105. (in Chinese)
- [8] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208.

- DUAN H P, ZHANG Y, ZHAO J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203–208. (in Chinese)
- [9] 伍芬琳,李琳,张海林,等.保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J].*生态学杂志*,2007,26(12):2035–2039.
WU F L, LI L, ZHANG H L, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035–2039. (in Chinese)
- [10] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].*中国人口·资源与环境*,2012,22(7):21–27.
MIN J S, HU H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21–27. (in Chinese)
- [11] 张俊飏,何可.“双碳”目标下的农业低碳发展研究:现状、误区与前瞻[J].*农业经济问题*,2022(9):35–46.
ZHANG J B, HE K. Current situation, misunderstandings and prospects of agricultural low-carbon development under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022(9): 35–46. (in Chinese)
- [12] 张扬,李涵,赵正豪.中国粮食作物种植变化对省际农业碳排放量的影响研究[J].*中国农业资源与区划*,2023,44(7):29–38.
ZHANG Y, LI H, ZHAO Z H. Research on effects of grain crop planting changes on agricultural carbon emissions between provinces in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(7): 29–38. (in Chinese)
- [13] 王振宇,周玉玺.中国粮食主产区碳排放效率与粮食增产协调发展研究[J].*地理与地理信息科学*,2024,40(4):102–108.
WANG Z Y, ZHOU Y X. Coordinated development of carbon emission efficiency and grain yield increase in China's major grain-producing areas[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2024, 40(4): 102–108. (in Chinese)
- [14] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].*自然资源学报*,2021,36(3):793–810.
WANG S J, KONG W, REN L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3): 793–810. (in Chinese)
- [15] 王建康,韩倩.中国城市经济-社会-环境耦合协调的时空格局[J].*经济地理*,2021,41(5):193–203.
WANG J K, HAN Q. Spatial-temporal pattern of the coupling coordination of urban economy-society-environment in China[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(5): 193–203. (in Chinese)
- [16] 陈斐,杜道生.空间统计分析GIS在区域经济分析中的应用[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2002,27(4):391–396.
CHEN F, DU D S. Application of the integration of spatial statistical analysis with GIS to the analysis of regional economy[J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4): 391–396. (in Chinese)
- [17] 王霞,张海霞,蔡昂祖,等.京津冀降碳-减污-扩绿系统耦合协调及时空演化[J].*环境工程技术学报*,2025,15(4):1127–1136.
WANG X, ZHANG H X, CAI A Z et al. Coupling coordination and spatiotemporal evolution of carbon reduction-pollution reduction-green expansion system in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(4): 1127–1136. (in Chinese)
- [18] 代碧波,陈晓菲.粮食主产区农业现代化与新型城镇化的耦合协调度测算[J].*统计与决策*,2020,36(9):104–108.
DAI B B, CHEN X F. Calculation of the coupling and coordination degree between agricultural modernization and new urbanization in major grain-producing areas[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(9): 104–108. (in Chinese)
- [19] 韩海彬,牛可萌,郝珍珍.中国“两型”农业全要素生产率增长的时空演变[J].*统计与决策*,2020,36(15):105–109.
HAN H B, NIU K M, HAO Z Z. The spatio-temporal evolution of the total factor productivity growth of China's "two-type" agriculture[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(15): 105–109. (in Chinese)
- [20] 何艳秋,成雪莹,王芳.技术扩散视角下农业碳排放区域溢出效应研究[J].*农业技术经济*,2022(4):132–144.
HE Y Q, CHENG X Y, WANG F. Study on the regional spillover effect of agricultural carbon emission based on the perspective of agricultural technology diffusion[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2022(4): 132–144. (in Chinese)
- [21] 尹碧波,邝萍,欧阳昕彤,等.中国减污降碳与扩绿增长耦合协调度的时空特征及其驱动因素[J].*经济地理*,2024,44(11):122–131.
YIN B B, KUANG P, OUYANG X T, et al. Spatio-temporal Characteristics and Driving Factors of the Coupling Coordination Degree Between the Pollution-Carbon Reduction, and the Green Expansion and Economic Growth in China[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(11): 122–131. (in Chinese)
- [22] 侯宇,王莹,石惠惠,等.粮食主产区低碳农业耦合协调分析-基于农业碳排放效率的视角[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2024,32(12):2022–2033.
HOU Y, WANG Y, SHI H H, et al. Coupling and coordination analysis of low-carbon agriculture in major grain-producing areas: From the perspective of agricultural carbon emission efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(12): 2022–2033. (in Chinese)

(责任编辑:王 昱)