

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.04.044

郭美洁, 刘波涛, 郭紫璇, 等. 山东省种植业碳排放因素分解及脱钩效应研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4): 320—327

Guo Meijie, Liu Botao, Guo Zixuan, et al. Research on decomposition of carbon emission factors and decoupling effect of cultivation in Shandong Province [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4): 320—327

山东省种植业碳排放因素分解及脱钩效应研究^{*}

郭美洁¹, 刘波涛¹, 郭紫璇¹, 曲睿婷², 乔林², 王体朋¹

(1. 华北电力大学新能源学院, 北京市, 102206;

2. 国网辽宁省电力有限公司信息通信分公司, 沈阳市, 110006)

摘要: 种植业是农业碳排放重要来源之一, 为降低种植业碳排放量, 更好地推进种植业绿色低碳发展, 须明确其碳排放现状, 分析其影响因素。基于山东省 2006—2021 年种植业数据, 运用 IPCC 排放系数法测算其碳排放总量, 使用 LMDI 模型分解其影响因素, 并结合 Tapio 脱钩理论探究种植业碳排放与农业经济发展间的脱钩关系。结果表明: 研究期间山东省种植业碳排放量呈“M”型变化趋势, 农业物资投入碳排放占比超 50%, 集中于化肥、农膜使用产生; 种植业碳排放与农业经济发展间存在强脱钩、弱脱钩、弱负脱钩 3 种脱钩类型, 以强脱钩和弱脱钩为主, 种植业发展模式良好; 各因素中, 种植业生产效率、农业生产结构、产业结构、粮食生产技术水平以及农村人口规模对种植业碳排放呈抑制作用, 人均生活水平、人均农作物播种面积、种植结构呈促进作用, 其中提升种植业生产效率、稳定人均生活水平更利于种植业碳减排。

关键词: 山东省; 种植业; 碳排放; LMDI 因素分解; 脱钩效应

中图分类号: S23; X321 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 04-0320-08

Research on decomposition of carbon emission factors and decoupling effect of cultivation in Shandong Province

Guo Meijie¹, Liu Botao¹, Guo Zixuan¹, Qu Ruiting², Qiao Lin², Wang Tipeng¹

(1. College of New Energy, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China;

2. State Grid Liaoning Information and Communication Company, Shenyang, 110006, China)

Abstract: Plantation industry is one of the important sources of agricultural carbon emissions. In order to reduce the carbon emissions of plantation industry and promote the green and low-carbon development of the plantation industry, it is necessary to clarify the current status of its carbon emissions and analyze its influencing factors. Based on the basic data of cultivation industry in Shandong Province from 2006 to 2021, this paper calculated the total carbon emissions by using IPCC emission factor method, decomposed the influencing factors by using LMDI model, and studied the decoupling relationship between carbon emissions from cultivation industry and the agricultural economic development by combining with Tapio decoupling theory. The results showed that the carbon emissions from the plantation industry in Shandong Province showed an M-shaped trend during the study period, of which agricultural inputs accounted for more than 50% of the carbon emissions, focusing on the use of chemical fertilizers and agricultural films. There were three types of decoupling between carbon emissions from plantation industry and agricultural economic development such as strong decoupling, weak decoupling and weak negative decoupling, with strong decoupling and weak decoupling being the main ones. Among the factors, planting production efficiency, agricultural production structure, industrial structure, planting production technology level and rural population size inhibited planting carbon emissions, while per capita living standard, per capita area of crops sown and planting structure promoted, among them, improving planting production efficiency and stabilizing per capita living standard

收稿日期: 2024 年 5 月 17 日 修回日期: 2024 年 6 月 6 日

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(31971793); 国家电网有限公司总部管理科技项目(5108—202218280A—2—404—XG)

第一作者: 郭美洁, 女, 2000 年生, 山东威海人, 硕士研究生; 研究方向为可再生能源与清洁能源。E-mail: gmj465423@126.com

通讯作者: 王体朋, 男, 1982 年生, 河南邓州人, 博士, 教授; 研究方向为新能源开发与利用。E-mail: wangtp@ncepu.edu.cn

were more conducive to planting carbon emission reduction. The article hopes to provide a certain theoretical direction for the development of agriculture in Shandong Province through the analysis of plantation factors and the study of decoupling effect.

Keywords: Shandong Province; plantation; carbon emissions; LMDI factor decomposition; decoupling effect

0 引言

IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)第六次评估报告指出“人类活动导致的温室气体排放是造成气候变暖的主要驱动因素”^[1]。在 2020 年联合国大会上,习近平总书记表示中国将于 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和^[2]。据统计,农业活动所产生碳排放是全球温室气体排放的第二大来源,贡献率约为 14%^[3]。我国是传统农业大国,农业碳排放约占温室气体总碳排放量的 17%,其中种植业部分占比超 50%,对实现农业低碳发展影响较大^[4]。“十四五”规划明确提出增强农业领域减排固碳要求,控制农业碳排放水平。为使我国更好落实减排承诺,实现农业现代化、低碳化、绿色资源化发展具有重要意义。

目前,发展低碳农业是各学者关注的焦点。农业碳排放源主要来自农业物资投入、农作物种植、畜牧养殖以及废弃物处理等方面^[5],其中农业物资投入和农作物种植约占农业碳排放总量的 52%^[6],从种植业角度来看,化肥、农药、农膜等农业物资投入造成大量农业碳排放^[7]。在农业碳排放测算方面,不少学者采用较为完善的 IPCC 排放系数法计算农业碳排放量^[8],保证测算结果的稳定性。农业碳排放测算结果能用于分析农业碳排放现状,并根据现状特征进行因素分解^[9]、达峰预测^[10]、碳减排潜力剖析^[11]、经济发展脱钩效应^[12]等研究。

山东省作为我国农业大省,是农作物生产核心区之一,其农业总产值、农产品加工业值等常年居全国首位^[13]。随着农业现代化水平进一步提高,化肥、农药等农业物资投入不断增加,农业碳减排任务日益艰巨。因此,掌握农业碳排放现状,探明山东省种植业碳排放量的主要来源,制定有效的种植业减排措施,对种植业碳达峰、促进山东省农业绿色低碳转型具有重要意义。本文以 2006—2021 年山东省种植业为研究对象,通过 IPCC 排放系数法合理测算种植业碳排放量,基于现状特征分析种植业碳排放影响因素,采用 Tapio 脱钩理论模型解析种植业碳排放与农业经济发展间的变化关系,为山东省实现农业减排目标提供理论依据。

1 研究方法

1.1 山东省种植业碳排放测算

目前,有关农业碳排放尚无统一测算方法,国内外研究学者多从化石燃料碳排放核算和农田利用碳排放

核算两种测算角度核算农业碳排放量,其中农田利用碳排放核算充分考虑到能源消耗产生的直接碳排放和中间产品消耗产生的间接碳排放,计算结果相对准确^[14]。由此从农田利用碳排放核算角度出发,并基于 IPCC 碳排放系数法来计算 2006—2021 年山东省种植业碳排放量。计算方法如式(1)所示。

$$C = \sum_i AC_i \times EF_i \quad i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中: C ——总碳排放量;
 AC_i ——第 i 种碳排放源的使用量;
 EF_i ——第 i 种碳排放源的碳排放系数。

将种植业碳排放源分为农业物资投入和农田土壤利用产生的碳排放,其中,农业物资投入碳排放为化肥使用、农药使用、农用薄膜利用、农用柴油使用(农机)以及农业灌溉(电力)所产生碳排放,农田土壤利用碳排放为 CH_4 和 N_2O 等温室气体所产生^[15]。种植业碳源及对应碳排放系数^[16]如表 1 所示。IPCC 第 5 次评估报告结果表明, CH_4 和 N_2O 的增温潜在在 100 年内转化为 CO_2 的系数分别为 28、265^[17]。

表 1 种植业碳排放源及碳排放系数
Tab. 1 Carbon emission sources and carbon emission coefficient

农业物资投入		农田土壤利用	
碳排放源	碳排放系数	碳排放源	碳排放系数
化肥	0.895 6 kgC/kg	水稻	210 kgCH ₄ /hm ² 、 0.24 kgN ₂ O/hm ²
农药	4.493 1 kgC/kg		
农膜	5.18 kgC/kg	冬小麦	2.05 kgN ₂ O/hm ²
农用柴油	0.592 7 kgC/kg	大豆	0.77 kgN ₂ O/hm ²
农业灌溉	266.48 kgC/hm ²	玉米	2.532 kgN ₂ O/hm ²
		棉花	0.480 4 kgN ₂ O/hm ²
		蔬菜	4.21 kgN ₂ O/hm ²

1.2 LMDI 因素分解

1989 年 Kaya 教授首次提出 Kaya 恒等式,并将其作为研究碳排放影响因素分解方法^[18]。Kaya 恒等式通过数学方法建立人类社会活动产生碳排放与经济、政策、人口等因素的联系^[19],LMDI(对数平均迪氏分解)模型是在 Kaya 扩展式的基础上,利用对数平均法对影响因素进行综合分析,因其因素可逆和残差项为 0 的优点被广泛应用。利用 LMDI 因素分解方法对 2006—2021 年山东省种植业碳排放因素分解,根据 Kaya 恒等式基本形式,并参考已有研究^[16, 20],模型如式(2)所示。

$$C = \frac{C}{GDP_P} \times \frac{GDP_P}{GDP_A} \times \frac{GDP_A}{GDP} \times \frac{GDP}{P_T} \times \frac{P_T}{L_M} \times$$

$$\frac{L_M}{L_P} \times \frac{L_P}{P_R} \times P_R \quad (2)$$

式中: GDP_P ——山东省种植业 GDP , 亿元;

GDP_A ——山东省农业 GDP , 亿元;

GDP ——山东省总 GDP , 亿元;

P_T ——山东省总人口, 万人;

L_M ——粮食播种面积, hm^2 ;

L_P ——农作物播种面积, hm^2 ;

P_R ——山东省农村总人口, 万人。

式(2)可进一步表示为

$$C = E \times I_A \times I_S \times P \times T_M \times I_M \times T_P \times P_R \quad (3)$$

其中, $E = \frac{C}{GDP_P}$; $I_A = \frac{GDP_P}{GDP_A}$; $I_S = \frac{GDP_A}{GDP}$; $P =$

$$\frac{GDP}{P_T}; T_M = \frac{P_T}{L_M}; I_M = \frac{L_M}{L_P}; T_P = \frac{L_P}{P_R}。$$

式中: E ——山东省种植业生产效率;

I_A ——山东省农业生产结构(种植业生产总值在农业生产总值中所占比重);

I_S ——山东省产业结构(农业生产总值在山东省总生产总值中所占比重);

P ——山东省人均生活水平(人均 GDP);

T_M ——山东省粮食生产技术水平, 作为人口和粮食播种面积的比值, 同一土地产出更多粮食可供养更多人口, 因此, 从产出角度阐述粮食生产技术水平^[20];

I_M ——山东省农业种植结构;

T_P ——山东省人均农作物播种面积, 表示单位农村人口可承担的农作物播种面积。

运用 LMDI 加法分解法进一步分解式(3), 用于量化各因素对山东省种植业碳排放的贡献度, 具体如式(4)~式(12)所示。

$$\begin{aligned} \Delta C &= C^t - C^0 = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times (\ln C^t - \ln C^0) \\ &= \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \left[\ln \left(\frac{C^t}{E^t} \times \frac{E^0}{C^0} \right) + \ln \left(\frac{C^t}{I_A^t} \times \frac{I_A^0}{C^0} \right) + \right. \\ &\quad \left. \ln \left(\frac{C^t}{I_S^t} \times \frac{I_S^0}{C^0} \right) + \ln \left(\frac{C^t}{P^t} \times \frac{P^0}{C^0} \right) + \ln \left(\frac{C^t}{T_M^t} \times \frac{T_M^0}{C^0} \right) + \right. \\ &\quad \left. \ln \left(\frac{C^t}{I_M^t} \times \frac{I_M^0}{C^0} \right) + \ln \left(\frac{C^t}{T_P^t} \times \frac{T_P^0}{C^0} \right) + \ln \left(\frac{C^t}{P_R^t} \times \frac{P_R^0}{C^0} \right) \right] \\ &= \Delta E + \Delta I_A + \Delta I_S + \Delta P + \Delta T_M + \Delta I_M + \Delta T_P + \Delta P_R \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta E = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{E^t}{E^0} \quad (5)$$

$$\Delta I_A = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{I_A^t}{I_A^0} \quad (6)$$

$$\Delta I_S = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{I_S^t}{I_S^0} \quad (7)$$

$$\Delta P = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{P^t}{P^0} \quad (8)$$

$$\Delta T_M = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{T_M^t}{T_M^0} \quad (9)$$

$$\Delta I_M = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{I_M^t}{I_M^0} \quad (10)$$

$$\Delta T_P = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{T_P^t}{T_P^0} \quad (11)$$

$$\Delta P_R = \sum \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{P_R^t}{P_R^0} \quad (12)$$

式中: t ——时期($t=1, 2, 3, \dots, n$), 0 表示研究初期;

ΔC ——种植业碳排放总贡献度, kt;

ΔE ——种植业生产效率;

ΔI_A ——农业生产结构;

ΔI_S ——产业结构;

ΔP ——人均生活水平;

ΔT_M ——粮食生产技术水平;

ΔI_M ——种植结构;

ΔT_P ——人均农作物播种面积;

ΔP_R ——农村人口规模对种植业碳排放从研究初期到 t 时期内变化量的贡献值, t。

研究时期(2006—2021 年)各因素的每年贡献值加总为相应因素的累计贡献值。

1.3 Tapio 脱钩理论

碳排放脱钩弹性指数为一定时间内基期和当前碳排放的变化率与 GDP 变化率的比值。基于 Tapio 脱钩模型理论^[21], 构建山东省种植业碳排放量与农业经济发展间的脱钩弹性计算如式(13)所示。

$$\epsilon_{C, GDP} = \frac{\Delta C / C}{\Delta GDP / GDP} \quad (13)$$

式中: $\epsilon_{C, GDP}$ ——山东省种植业碳排放脱钩弹性指数;

$\Delta C, \Delta GDP$ ——当前与基期种植业碳排放量、农业 GDP 的差值。

其中脱钩状态判别如表 2 所示。根据式(4)并结合式(13), 可将山东省种植业碳排放脱钩弹性指数模型分解为种植业生产效率、农业生产结构、产业结构、人均生活水平、粮食生产技术水平、种植结构、人均农作物播种面积、农村人口规模共 8 个影响因素的脱钩弹性指数之和, 如式(14)所示。

$$\begin{aligned} \epsilon_{C, GDP} &= \frac{\Delta E + \Delta I_A + \Delta I_S + \Delta P + \Delta T_M + \Delta I_M + \Delta T_P + \Delta P_R}{\frac{\Delta GDP}{GDP}} \\ &= \epsilon_{\Delta E} + \epsilon_{\Delta I_A} + \epsilon_{\Delta I_S} + \epsilon_{\Delta P} + \epsilon_{\Delta T_M} + \epsilon_{\Delta I_M} + \epsilon_{\Delta T_P} + \epsilon_{\Delta P_R} \end{aligned} \quad (14)$$

式中： $\epsilon_{\Delta E}$ ——种植业生产效率；
 $\epsilon_{\Delta I_A}$ ——农业生产结构；
 $\epsilon_{\Delta I_B}$ ——产业结构；
 $\epsilon_{\Delta P}$ ——人均生活水平；
 $\epsilon_{\Delta T_M}$ ——粮食生产技术水平；
 $\epsilon_{\Delta I_M}$ ——种植结构；
 $\epsilon_{\Delta T_P}$ ——人均农作物播种面积；
 $\epsilon_{\Delta P_R}$ ——农村人口规模与农业经济发展的脱钩弹性指数。

表 2 脱钩状态判别分类
Tab. 2 Classification of decoupling states

脱钩状态	$\Delta C/C$	$\Delta GDP/GDP$	$\epsilon_{C, GDP}$
扩张负脱钩	>0	>0	$\epsilon_{C, GDP} > 1.2$
负脱钩	强负脱钩	>0	$\epsilon_{C, GDP} < 0$
	弱负脱钩	<0	$0 < \epsilon_{C, GDP} < 0.8$
脱钩	弱脱钩	>0	$0 < \epsilon_{C, GDP} < 0.8$
	强脱钩	<0	$\epsilon_{C, GDP} < 0$
	衰退脱钩	<0	$\epsilon_{C, GDP} > 1.2$
连结	增长连结	>0	$0.8 < \epsilon_{C, GDP} < 1.2$
	衰退连结	<0	$0.8 < \epsilon_{C, GDP} < 1.2$

1.4 数据来源及处理

基于数据的最大可获得性,选择 2006—2021 年山东省各年份数据为研究样本,其中化肥、农药、农膜、农用柴油等农业物资消耗数据来自于 2007—2022 年《山东统计年鉴》与国家统计局分省年度数据。所获数据农业物资投入部分化肥、农药、农膜以及农用柴油均为当年用量,灌溉面积为有效灌溉面积;农田土壤利用部分为各农作物当年实际播种面积。

2 结果与分析

2.1 山东省种植业碳排放分析

从碳排放总量来看,由图 1 所示,2006—2021 年山东省种植业碳排放量变化形势总体呈“M”型,呈现先上升后波动下降的趋势,分别在 2007 年和 2015 年达到碳排放量的两个峰值,为 16 308.3 kt 和 16 038.1 kt。2021 年碳排放量为最低值,为 14 545.8 kt。碳排放量变化趋势与农业发展政策息息相关。2005 年我国提出积极建立农民合作经济组织发展的信贷、财税和登记制度,强化农田水利、耕地生态建设,加大对种粮农民的补贴力度,增加农机具购置补贴^[22]。2006 年我国全面取消传统农业税,大大提高了农民种植积极性,但同时期农民绿色生态保护意识相对落后,导致农业物资收入和农田土壤利用方面碳排放量有所上升。2007 年后,随着农业政策发展与完善,我国将农业发展重点转向现代农业,并积极转变农业经济发展方式,碳排放总量有所下降。“十二五”时期全国

现代农业发展规划中提出“完善现代农业产业体系,大力发展现代农作物种植和新品种转化应用,稳定增加小麦、玉米等农作物播种面积,并加强先进农业机械研发推广”,此时碳排放总量呈上升趋势。同时期国家“鼓励使用生物农药、回收再利用农膜,推进农业节能减排”^[23],在政策指引下,农业物资投入方面化肥、农药、农膜、农用柴油的碳排放量所占比重分别降低 0.57%、0.34%、0.54%、0.72%,农业生态环境治理取得一定成效,由此,山东省种植业碳排放总量虽然增加但增速较为缓慢。2014 年,中央提出“发展生态友好型农业”,后推进化肥和农药使用量零增长行动,同步调整完善农业“三项补贴”政策,鼓励引导农民减少农药化肥使用量,控制农业面源污染,自 2015 年起碳排放总量逐年下降。

从碳排放强度来看,2006—2021 年山东省种植业碳排放强度基本呈逐年下降趋势,由 0.395 6 t/万元下降至 0.126 8 t/万元,整体下降 67.94%,年均下降幅度为 4.53%。碳排放强度为碳排放量与经济总产值的比值,在研究区间,山东省农业产值上升的同时种植业碳排放总量有所下降,山东省种植业呈现低碳发展状态,可持续协调发展成效显著,农业发展方式向高质量绿色发展方向转变。

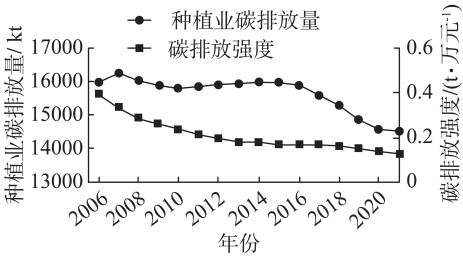


图 1 2006—2021 年山东省种植业碳排放量及碳排放强度

Fig. 1 Carbon emissions and carbon emission intensity of plantation in Shandong Province, 2006—2021

注:图中碳排放强度为山东省种植业碳排放量与山东省种植业生产总值的比值。

具体来看,2006—2021 年山东省种植业碳排放结构以农业物资投入碳排放为主,平均占比为 55.25%,农田土壤利用碳排放平均占比为 44.75%。农业物资投入碳排放中排名前 3 位的分别是农用化肥、农膜使用和灌溉,所占比重均值分别约为 25.21%、9.80%、8.34%,是农业物资投入碳排放的主要碳源。目前,随着山东省农业政策对化肥和农膜使用量的控制,它们所产生碳排放量比重降低。农田土壤利用碳排放主要来源于冬小麦、玉米和蔬菜。其中,蔬菜产生碳排放量占比较为稳定,平均变化幅度为-0.07%;冬小麦和玉米产生碳排放量比重均增加,与 2006 年相比,2021 年其数值分别增加 1.48%、4.40%,说明山东省遵循严格保护永久基本农田建设方针政策,注重粮食生产功

能区建设和管护,有效落实农业大省责任担当。

2.2 LMDI 因素分解分析

由表 3 可知,2006—2021 年山东省种植业碳排放量累计减少 1 511.3 kt。总体来看,种植业生产效率、农业生产结构、产业结构、人均粮食播种面积、农村总人口规模各因素对种植业碳排放呈负向影响,说明提高种植业生产效率能够有效减少种植业碳排放。具体来看,提升种植业生产效率是最主要的减排影响因素,与研究初期相比累计实现碳减排 16 192.6 kt,若其他因素保持不变,可实现年均碳减排 1 079.5 kt。“十二五”期间,国家持续调动《全国新增 1 000 亿斤粮食生产能力规划(2009—2020 年)》所确定的各粮食生产核心区的生产积极性,做好粮食生产基础安全保障,同步推广防灾减灾增产关键技术,大大提高农业生产效率,推动了农业经济发展。农业生产结构、产业结构、人均粮食播种面积以及农村人口规模对山东省种植业碳减排

起到一定作用,在其他因素保持不变的情况下,分别产生年均 113.6 kt、464.8 kt、95.9 kt、328.7 kt 碳减排。研究期内,山东省种植业生产总值在农业生产总值所占比重、农业总产值在省总产值所占比重分别下降 5.56%、7.60%,说明山东省在大力提高资源配置、优化农业产业结构调整等方面取得一定成效,而农业产业结构优化可促进碳减排。农村人口规模变化一定程度上反映城镇化进程与农业生产技术水平的变化,农村人口减少表明农业生产在农机和农业技术的帮助下需要相比之前更少的劳动力^[24],再加上绿色生态发展理念的不断渗透,农村劳动力整体素质水平上升,促进了农业碳减排。粮食生产技术水平在 2016 年前对种植业碳排放起负向作用,2016 年后起正向作用,这可能是“十三五”规划要求加强农业科技攻关,大力推进农业机械化水平并推广主要粮食作物机播和机收,农用柴油等农资需求量增加,促进农业碳排放。

表 3 2006—2021 年山东省种植业碳排放各因素贡献值

Tab. 3 Contribution value of each factor of carbon emission from plantation industry in Shandong Province, 2006—2021 kt

时间	种植业生产效率	农业生产结构	产业结构	人均生活水平	粮食生产技术水平	种植结构	人均农作物播种面积	农村人口规模	总效应
2006—2007	−1 785.1	−518.2	−365.0	2 819.1	174.4	−200.2	220.1	−93.8	251.2
2007—2008	−1 861.0	−982.5	−249.4	2 773.2	−342.7	204.0	397.9	−173.0	−233.5
2008—2009	−1 724.6	605.2	−352.5	1 288.6	−228.3	435.4	16.6	−133.7	−93.3
2009—2010	−2 087.2	394.9	−623.3	2 005.3	−133.9	674.3	−110.4	−232.7	−113.0
2010—2011	−607.5	−1 044.2	−553.5	2 115.3	−222.2	193.2	401.8	−245.6	37.2
2011—2012	−316.4	−679.9	−445.9	1 443.4	−206.5	160.3	428.8	−311.9	71.9
2012—2013	−1 969.2	504.5	−72.8	1 492.0	−459.5	123.2	819.6	−420.8	17.0
2013—2014	−754.4	44.0	−370.5	1 018.7	−429.8	274.6	613.8	−357.0	39.4
2014—2015	−366.4	−148.6	−846.6	1 271.2	−153.9	157.5	796.7	−705.8	04.2
2015—2016	889.1	−609.8	−1 337.7	802.1	−36.1	353.2	505.3	−649.9	−83.7
2016—2017	−343.7	−55.9	−991.5	1 009.1	209.8	126.3	319.3	−560.6	−287.1
2017—2018	−1 270.2	509.3	−439.9	802.0	161.2	−50.0	155.0	−198.3	−331.1
2018—2019	−1 207.5	309.3	−422.6	813.7	209.7	30.9	−80.1	−117.1	−463.6
2019—2020	−985.2	−27.8	306.2	378.9	141.5	03.9	320.4	−379.9	−242.1
2020—2021	−1 803.3	−4.2	−207.3	1 922.9	−121.9	49.5	429.4	−349.8	−84.7
累计贡献度	−16 192.6	−1 703.8	−6 972.3	21 955.5	−1 438.2	2536.0	5 234.1	−4 930.0	−1 511.3

人均生活水平、种植结构、人均农作物播种面积各因素对种植业碳排放呈正向影响。具体来看,提升人均生活水平是研究期间山东省种植业碳排放增加的最主要影响因素,其累计产生 21 955.5 kt 碳排放量,说明未来一段时期内,经济发展仍将主要影响山东省种植业碳排放。人均农作物播种面积和种植结构与研究初期相比,分别累计增加碳排放量 5 234.1 kt、2 536.0 kt,年均增加碳排放量 328.7 kt、95.9 kt。研究期间,人均农作物播种面积和粮食种植面积占农作物播种面积比重均有所增加,表现出山东省农业生产仍旧存在结构性矛

盾,产值增加主要依靠生产要素投入,种植业生产技术水平还需提高,农业碳减排工作任重道远。

2.3 Tapio 脱钩弹性分析

由表 4 可知,山东省种植业碳排放量在 2008—2010 年、2016—2021 年为负增长,在 2006—2007、2011—2015 年为正增长,农业 GDP 增长率除 2016 年外均为正值。山东省种植业碳排放与农业经济发展间存在弱脱钩、强脱钩、弱负脱钩 3 种特征类型,其中以弱脱钩和强脱钩为主。2006—2007 年,在农税减免补贴等政策加持下,农民生产积极性大大提高,农业物资投入

增加,农业生产总值增加,但人们节能减碳意识薄弱,种植业碳排放量有所上升。2008—2015 年整体发展状态良好,在种植业碳排放量降低的情况下农业经济产值可持续增长,且“十二五”规划期间虽然种植业碳排放量上升但增加缓慢,碳排放增加幅度小于经济增长的幅度。十七大以来,国家倡导发展可持续低碳农业,人们逐渐采用循环生态农业等发展模式,推动种植业高质量发展。2016—2017 年省内出现低温、冷冻、洪涝、干旱等极端天气,极大影响农业经济发展。总体上山东省种植业碳排放与农业经济发展之间呈现较显著脱钩状态,实施绿色种植更能促进农业经济稳步增长。

根据表 5 各因素与农业经济发展之间的脱钩弹性指数结果,人均生活水平因素与农业经济之间脱钩弹性指数为正值且数值范围在 0.8~1.0,多表现为增长连结与扩张负脱钩,脱钩程度最低;种植结构和人均农作物播种面积在研究期内脱钩弹性指数均值均为正值,但 $\epsilon_{\Delta T_p}$ 均值较大,脱钩弹性多表现为弱脱钩,脱钩程度较低。种植业生产效率的脱钩指数值基本为负值,2019—2020 年 $\epsilon_{\Delta E}$ 值最低为 -2.104 1,与农业经济之间呈现强脱钩状态,脱钩程度最高;产业结构和农村人口规模对农业经济脱钩弹性均表现为强脱钩,但

$\epsilon_{\Delta S}$ 和 $\epsilon_{\Delta P_R}$ 的均值均大于 $\epsilon_{\Delta E}$,故脱钩程度较高;农业生产结构和种植业生产技术的脱钩弹性指数值总体呈现趋于 0 的变化,脱钩程度高。

表 4 山东省种植业碳排放与经济发展脱钩弹性结果
Tab. 4 Elasticity results of decoupling carbon emissions from plantation and economic development in Shandong Province

时间	$\Delta C/C$	$\Delta GDP/GDP$	$\epsilon_{C,GDP}$	脱钩状态
2006—2007	0.015 4	0.171 0	0.090 1	弱脱钩
2007—2008	-0.014 5	0.174 9	-0.083 0	强脱钩
2008—2009	-0.005 8	0.066 1	-0.088 3	强脱钩
2009—2010	-0.007 1	0.104 3	-0.068 3	强脱钩
2010—2011	0.002 3	0.112 2	0.020 8	弱脱钩
2011—2012	0.004 5	0.069 3	0.065 0	弱脱钩
2012—2013	0.001 1	0.097 1	0.011 0	弱脱钩
2013—2014	0.002 5	0.047 9	0.051 3	弱脱钩
2014—2015	0.000 3	0.032 9	0.007 9	弱脱钩
2015—2016	-0.005 2	-0.022 4	0.233 9	弱负脱钩
2016—2017	-0.018 3	0.007 1	-2.568 1	强脱钩
2017—2018	-0.021 6	0.028 1	-0.767 6	强脱钩
2018—2019	-0.031 2	0.029 2	-1.068 1	强脱钩
2019—2020	-0.016 5	0.053 7	-0.308 4	强脱钩
2020—2021	-0.005 8	0.125 4	-0.046 5	强脱钩

表 5 山东省种植业碳排放各驱动因素脱钩弹性结果
Tab. 5 Results of decoupling elasticity of various drivers of plantation carbon emissions in Shandong Province

时间	种植业生产效率 $\epsilon_{\Delta E}$	农业生产结构 $\epsilon_{\Delta S}$	产业结构 $\epsilon_{\Delta I_S}$	人均生活水平 $\epsilon_{\Delta P}$	粮食生产技术水平 $\epsilon_{\Delta T_M}$	种植结构 $\epsilon_{\Delta M}$	人均农作物播种面积 $\epsilon_{\Delta T_p}$	农村人口规模 $\epsilon_{\Delta P_R}$
2006—2007	-0.640 1	-0.185 8	-0.130 9	1.010 9	0.062 5	-0.071 8	0.078 9	-0.033 6
2007—2008	-0.661 9	-0.349 4	-0.088 7	0.986 3	-0.121 9	0.072 5	0.141 5	-0.061 5
2008—2009	-1.632 3	0.572 8	-0.333 6	1.219 6	-0.216 1	0.412 1	0.015 7	-0.126 6
2009—2010	-1.261 7	0.238 7	-0.376 8	1.212 2	-0.081 0	0.407 6	-0.066 8	-0.140 7
2010—2011	-0.340 5	-0.585 3	-0.310 3	1.185 7	-0.124 6	0.108 3	0.225 2	-0.137 7
2011—2012	-0.285 7	-0.614 0	-0.402 6	1.303 4	-0.186 5	0.144 8	0.387 2	-0.281 6
2012—2013	-1.267 7	0.324 8	-0.046 9	0.960 6	-0.295 8	0.079 3	0.527 7	-0.270 9
2013—2014	-0.981 5	0.057 2	-0.482 1	1.325 5	-0.559 3	0.357 3	0.798 6	-0.464 5
2014—2015	-0.694 3	-0.281 5	-1.604 4	2.409 0	-0.291 6	0.298 4	1.509 8	-1.337 5
2015—2016	-2.483 4	1.703 2	3.736 7	-2.240 7	0.100 7	-0.986 5	-1.411 4	1.815 3
2016—2017	-3.074 0	-0.499 7	-8.869 1	9.026 4	1.877 0	1.129 6	2.856 5	-5.014 8
2017—2018	-2.945 4	1.180 9	-1.020 1	1.859 6	0.373 7	-0.116 0	0.359 3	-0.459 8
2018—2019	-2.781 7	0.712 6	-0.973 5	1.874 5	0.483 1	0.071 3	-0.184 6	-0.269 8
2019—2020	-1.255 1	-0.035 4	0.390 1	0.482 6	0.180 2	0.005 0	0.408 2	-0.484 0
2020—2021	-0.989 0	-0.002 3	-0.113 7	1.054 6	-0.066 9	0.027 2	0.235 5	-0.191 9

3 结论与建议

3.1 结论

通过 IPCC 碳排放系数法测算 2006—2021 年山东省种植业碳排放总量,利用 LMDI 因素分解方法探究各因素对种植业碳排放的影响方向和大小,并依据

Tapio 模型理论分析种植业碳排放、各影响因素与农业经济发展的脱钩关系。

1) 研究期间山东省种植业碳排放呈“M”型变动趋势,种植业碳排放强度逐年下降。农业物资投入产生碳排放占比超 50%,其中化肥、农膜使用和农业灌溉是农业物资投入碳排放的主要碳源,灌溉所产生碳

排放量持续增长;农田土壤利用中冬小麦和玉米种植产生的碳排放为主要碳源。

2) 山东省种植业碳排放与农业经济间存在强脱钩、弱脱钩、弱负脱钩 3 种脱钩类型,以强脱钩和弱脱钩为主,其中 2008—2015 年种植业碳排放得到控制,农业经济持续增长,山东省呈现良好的农业模式,脱钩状态逐渐趋于理想型。

3) 种植业生产效率、农业生产结构、产业结构、粮食生产技术和农村人口规模等因素对种植业碳排放有抑制作用,提升种植业生产效率更能促进种植业碳减排;人均生活水平、种植结构以及人均农作物播种面积等因素呈现促进作用。

3.2 建议

1) 降低农业物资投入碳排放。继续开展化肥减量化行动,加快有机肥替代;推行农作物病虫害防治减少农药使用,同步推进高毒农药淘汰;推进农机电动化转型,使用氢燃料电池为动力的农机,提高能源利用率,减少农业物资投入产生碳排放。

2) 强化农业科技支撑,提升种植业生产效率和种植业生产技术水平。重点推进土壤修复、土壤质量改造、新型绿色农机具等关键技术研发和推广应用,提高种植技术来增加粮食等农作物生产力和固碳能力;综合运用智能化发展平台,完善农情数字化监测体系,促进碳减排。

3) 优化农业生产结构,调整内部产业结构。在稳定小麦等口粮生产量的同时提升玉米等农作物综合生产能力;发展区域优势种植业,如寿光蔬菜、栖霞苹果等;充分发挥海洋资源优势,积极发展碳汇渔业,实现农业全方面最优发展。

4) 完善农种政策和补贴机制,提升农村劳动力素质水平。城镇化进程加快导致农村有效劳动力减少,因此,更需要稳定和强化耕地保护补贴、农机购置补贴等,加大种植支持奖励力度,发展现代农业产业园,加强现代技术人才的培育,保障现代农业低碳发展。

参 考 文 献

- [1] Gutiérrez J M, Iones R G, Narisma G T, et al. Climate change 2021: The physical science basis [J]. Chemistry International, 2021, 43(4): 22—23.
- [2] Geng J, Zhou D, Bai J, et al. Quantification of the carbon emission of urban residential buildings: The case of the Greater Bay Area cities in China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, (7): 95.
- [3] 伍国勇, 孙小钧, 于福波, 等. 中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境,

2020, 30(5): 46—57.

Wu Guoyong, Sun Xiaojun, Yu Fubo, et al. Spatial correlation pattern and influencing factors of China's crop production carbon productivity [J]. China population, Resources and Environment, 2020, 30(5): 46—57.

- [4] 杨滨键. 山东省种植业低碳绩效评价与减排政策研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.

Yang Binjian. Study on low carbon performance evaluation and emission reduction policy of Shandong planting industry [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.

- [5] Johnson M F, Franzluebbers A J, Weyers S L, et al. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions [J]. Environmental Pollution, 2007, 150: 107—124.

- [6] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农村经济, 2022(3): 104—127.

Tian Yun, Yin Minhao. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects [J]. Chinese Rural Economy, 2022(3): 104—127.

- [7] 李波. 经济增长与农业碳排放关系的实证研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 220—224.

Li Bo. Empirical study on relationship between economic growth and agricultural carbon emissions [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(2): 220—224.

- [8] 王长波, 张力小, 栗广省. 中国农村能源消费的碳排放核算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 6—11.

Wang Changbo, Zhang Lixiao, Li Guangsheng. Carbon emission accounting from rural energy consumption in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S1): 6—11.

- [9] 吴昊玥, 黄瀚蛟, 何宇, 等. 中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(10): 1762—1773.

Wu Haoyue, Huang Hanjiao, He Yu, et al. Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29 (10): 1762—1773.

- [10] 范振浩, 邢巍巍, 卜元卿, 等. 江苏省种植业碳排放的测算及达峰分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 78—85.

Fan Zhenhao, Xing Weiwei, Bu Yuanqing, et al. Calculatin and peak analysis of carbon emissions from agricultural planting in Jiangsu Province [J]. Journal of Soil and Water Consevation, 2023, 37(5): 78—85.

- [11] 尹岩, 郝凤明, 郝龙飞, 等. 我国设施农业碳排放核算及碳减排路径[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3856—3864.

Yin Yan, Xi Fengming, Bing Longfei, et al. Accounting

- and reduction path of carbon emission from facility agriculture in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3856—3864.
- [12] 蒋添诚, 胡纯, 王巧稚, 等. 湖北省农业碳排放时空特征及脱钩研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(11): 1476—1480.
- [13] 刘杨, 代雪静, 杨晓钰, 等. 2000—2020年山东省种植业碳排放量及碳汇量时空差异分析[J]. 四川环境, 2023, 42(5): 317—326.
- Liu Yang, Dai Xuejing, Yang Xiaoyu, et al. Spatial and temporal characteristics of carbon emission and carbon sink of planting industry in Shandong Province from 2000 to 2020 [J]. Sichuan Environment, 2023, 42(5): 317—326.
- [14] 崔朋飞, 朱先奇, 李玮. 中国农业碳排放的动态演进与影响因素分析[J]. 世界农业, 2018(4): 127—134.
- [15] 米丽娟. 云南省农业碳排放驱动因素与脱钩效应研究[J]. 智慧农业导刊, 2023, 3(17): 45—48.
- Mi Lijuan. Research on driving factors and decoupling effects of agricultural carbon emission in Yunnan Province [J]. Journal of Intelligent Agriculture, 2023, 3(17): 45—48.
- [16] 刘杨, 刘鸿斌. 山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 558—569.
- Liu Yang, Liu Hongbin. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 558—569.
- [17] Talley, Trigg. Call for expert reviewers to the U. S. government review of the working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC), climate change 2013: The physical science basis [J]. State Department Documents / FIND, 2012, 77(187): 59238—59239.
- [18] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 867—871.
- [19] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国农业碳排放特征及影响因素研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(5): 56—62.
- Hu Wanling, Zhang Jinxiang, Wang Hongling. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emission in China [J]. Statistics & Decision, 2020, 36(5): 56—62.
- [20] 旷爱萍, 谢凯承. 大西南综合经济区农业碳排放特征及影响因素——基于LMDI分解和面板回归[J]. 桂林航天工业学院学报, 2023, 28(3): 414—426.
- [21] 刘书畅, 叶艳妹, 林耀奔. 基于脱钩理论与LMDI模型的农村居民点演化特征及驱动因素分解[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 272—280.
- Liu Shuchang, Ye Yanmei, Lin Yaoben. Evolution characteristics and decomposition of driving factors on rural residential land based on decoupling theory and LMDI model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12): 272—280.
- [22] 王先锋. 改革开放以来中国共产党的惠农政策研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012.
- [23] 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》[J]. 民主, 2011(7): 37.
- [24] 何梓瑜. 农村人口流动对农业产业化发展的影响分析——以贵州省为例[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(6): 48—51.
- [25] 评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 95—98.
- Ran Lingtan, Zhang Yongxiang, Ren Zhongyu, et al. Application of weighted priority order method in assessment of groundwater quality [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(3): 95—98.
- [27] 陈宁, 陈傲杰. 基于博弈变权—可拓云模型的城市道路应急能力综合评价研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(12): 44—53.
- [28] GB/T 39117—2020, 智能制造能力成熟度评估方法[S].
- [29] 李健旋. 中国制造业智能化程度评价及其影响因素研究[J]. 中国软科学, 2020(1): 154—163.
- Li Jianxuan. Research on evaluation benchmark and influencing factors for China's manufacturing intelligentization [J]. China Soft Science, 2020(1): 154—163.
- [30] GB/T 40659—2021, 智能制造机器视觉在线检测系统通用要求[S].
- [31] GB/T 40647—2021, 智能制造系统架构[S].
- (上接第311页)
- [23] Wu J, Xiong R, Chiclana F. Uninorm trust propagation and aggregation methods for group decision making in social network with four tuple information [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 96: 29—39.
- [24] 罗世华, 刘俊. 拓展区间 Fermatean 模糊前景理论综合评价方法[J/OL]. 中国管理科学, 1—12[2024-08-21]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0663>.
- Luo Shihua, Liu Jun. A comprehensive evaluation method based on extended interval-valued Fermatean fuzzy prospect theory [J/OL]. Chinese Journal of Management Science, 1—12 [2024-08-21]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0663>.
- [25] Zhou X, Wang L, Liao H, et al. A prospect theory-based group decision approach considering consensus for portfolio selection with hesitant fuzzy information [J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 168: 28—38.
- [26] 冉令坦, 张永祥, 任仲宇, 等. 加权序法在地下水水质