

江苏省种植业碳排放的测算及达峰分析

范振浩¹, 邢巍巍², 卜元卿^{3,4}, 刘娟¹

(1.浙江农林大学环境与资源学院,碳中和学院,杭州 311300;2.大连市生态环境事务服务中心,
辽宁 大连 116000;3.生态环境部南京环境科学研究所固体废物污染防治研究中心,
南京 210042;4.南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京 210044)

摘要: 在实现“碳达峰、碳中和”的目标背景下,明确农业温室气体排放现状,模拟预测峰值,为促进江苏省农业低碳减排提供科学依据。基于农业物资投入和农田土壤利用 2 类碳源,采用 IPCC 碳排放系数法和清单法综合测算江苏省 1990—2020 年间种植业碳排放量,运用 Tapio 脱钩模型对农业碳排放量与农业经济增长的脱钩关系进行分析,并根据灰色预测模型 GM(1,1)对 2021—2060 年碳排放量进行预测。结果表明:(1)2020 年江苏省种植业碳排放为 1 999.53 万 t,1990—2020 年间呈现先增加后降低再增加然后趋于平稳的趋势;种植业碳排放主要来源于农田土壤利用,农田土壤利用碳排放占比为 77.73%~86.95%,农资投入碳排放占比为 13.05%~22.27%;(2)化肥是农资投入碳排放源中最主要的排放源,其占比为 69.15%~79.20%,其次是农药和农膜,农机、灌溉、翻耕占比均较低;(3)水稻是农田土壤利用排放源中最主要的排放源,其占农田土壤利用碳排放的 79.76%~87.23%,其次是小麦和蔬菜,大豆、玉米、棉花占比均较低;(4)脱钩关系以弱脱钩和强脱钩为主,表明随着种植业生产总值的提高,农业种植碳排放呈缓慢增长或递减的趋势;(5)分别以 1990—2020(近 30 年)和 1999—2020(近 20 年)年农业种植碳排放量数据为样本,预测 2021—2060 年江苏省农业种植碳排放呈持续增长趋势,2060 年仍未达峰;以 2010—2020(近 10 年)年农业种植碳排放量数据为样本预测,2021—2060 年江苏省农业种植碳排放呈持续降低趋势,种植业碳排放已于 2020 年达到峰值,表明近年来江苏省在低碳绿色农业发展已初见成效。

关键词: 农业碳排放;农资投入;农田土壤利用;Tapio 脱钩模型;峰值预测

中图分类号:F323

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)05-0078-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.05.010

Calculation and Peak Analysis of Carbon Emissions from Agricultural Planting in Jiangsu Province

FAN Zhenhao¹, XING Weiwei², BU Yuanqing^{3,4}, LIU Juan¹

(1.College of Environment and Resources, College of Carbon Neutrality, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300; 2.Dalian Eco-environmental Affairs Service Center, Dalian, Liaoning 116000;
3.Research Center of Solid Waste Pollution and Prevention, Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042; 4.Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: In the context of achieving the goal of “carbon peaking and carbon neutrality”, we should clarify the current situation of agricultural greenhouse gas emissions, simulate and predict the peak value, and provide a scientific basis for promoting low-carbon emission reduction of agriculture in Jiangsu Province. Based on the two types of carbon sources of agricultural material input and farmland soil utilization, the IPCC carbon emission coefficient method and inventory method were used to comprehensively calculate the carbon emissions of the planting industry in Jiangsu Province from 1990 to 2020. The Tapio decoupling model was used to analyze the decoupling relationship between agricultural carbon emissions and agricultural economic growth, and the carbon emissions from 2021 to 2060 were predicted based on the grey prediction

收稿日期:2023-03-28

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1801105,2017YFD0800705);生态环境部事业费项目

第一作者:范振浩(1998—),男,硕士研究生,主要从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail: zafu_fzh@163.com

通信作者:卜元卿(1977—),女,研究员,博士生导师,主要从事农用化学品环境安全性与污染防治研究。E-mail: byq@nies.org

刘娟(1978—),女,副教授,硕士生导师,主要从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail: liujuan@zafu.edu.cn

model GM (1,1). The results showed that: (1) The carbon emissions from agricultural planting in Jiangsu Province reached 1 999.53 tons in 2020. From 1990 to 2020, it first increased, then decreased, then increased, and then tended to be stable. Carbon emissions from agricultural planting mainly came from farmland soil use, accounting for 77.73%~86.95% of carbon emissions, and 13.05%~22.27% of carbon emissions from agricultural inputs. (2) Chemical fertilizer was the most important source of carbon emissions from agricultural inputs, accounting for 69.15%~79.20%, followed by pesticides and agricultural film, and agricultural machinery, irrigation and tillage had relatively low proportion. (3) Rice was the main emission source of farmland soil use, accounting for 79.76%~87.23% of farmland soil use carbon emissions, followed by wheat and vegetables, while soybean, corn and cotton accounted for a relatively low proportion. (4) The decoupling relationship was dominated by weak decoupling and strong decoupling, indicating a slow growth or decreasing trend of the carbon emissions from agricultural planting with the increasing of gross domestic product of the planting industry. (5) Taking the carbon emissions data of agricultural planting from 1990 to 2020 (nearly 30 years) and 1999 to 2020 (nearly 20 years) as samples, it was predicted that the carbon emissions of agricultural planting in Jiangsu Province will continue to increase from 2021 to 2060, and will not reach the peak in 2060. Based on the carbon emissions data of agricultural planting from 2010 to 2020, the carbon emissions of agricultural planting in Jiangsu Province will continue to decrease from 2021 to 2060, and has reached its peak in 2020, indicating that the development of low-carbon green agriculture in Jiangsu Province has achieved initial results in recent years.

Keywords: agricultural carbon emissions; agricultural materials input; farmland soil utilization; Tapio decoupling model; peak prediction

全球变暖持续受到社会的普遍关注,碳排放是气候变化的主要因素,从减少碳排放入手来应对气候变化问题已然成为各国政府的焦点。农业碳排放作为全球温室气体排放中的第二大来源,贡献约 14% 的人为温室气体排放量和 58% 的非人为 CO₂ 排放^[1-2]。在倡导低碳经济的背景下,发展低碳农业也是农业可持续发展的必由之路。农业领域碳排放的减少可以促进农业的可持续发展,更好实现整体的碳减排目标。在 2020 年召开的第 75 届联合国大会上,我国宣布力争在 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和。我国温室气体碳排放中农业碳排放占比 17%,且农业碳排放年均增速为 5%^[3-4],农业减排增汇是国家实现“双碳”战略目标的重要举措^[5]。

农业碳源主要包含农物资投入、水稻种植、畜禽养殖和土壤碳库破坏 4 个方面^[6-7]。农资投入和水稻种植占农业碳排放量的 52.33%,水稻种植占农业碳排放的比重为 25.95%,在水稻种植主导型的省区内占比可达 53.01%^[8]。随着农业碳排放的测算方法不断完善,不少学者基于较为整体的视角对中国农业碳排放进行测算,涵盖种植业和畜牧业。农业碳排放往往受经济发展状况影响,农业碳排放省际差异明显,同时农业碳排放也有一个动态演变的过程。农业碳排放测算结果可用于对农业碳排放的现状特征及作用机理分析、农业碳排放效率测度与碳减排潜

力剖析、经济发展与农业碳排放相互关系探讨等^[9]。目前对农业碳排放的研究主要集中在碳排放测算^[10]、时空演变^[11]、脱钩效应^[12]和碳减排策略^[13]等方面。脱钩概念的提出是为了探讨环境破坏与经济发展之间的关系,张丽琼等^[14]对 1997—2018 年中国 31 个省区农业碳排放量进行测算发现,中国农业碳排放与农业经济发展之间多处于弱脱钩和强脱钩状态;Tapio 构建的脱钩模型被广泛应用于碳排放^[15]、经济发展^[9]等相关关系的研究之中;吴昊玥等^[16]运用 Tapio 耦合指数对中国省域 2000—2019 年耕地利用净碳汇与农业生产的时空协调程度进行判断,并提出碳减排的建议。

种植业是我国东南地区主要的农业碳排放源,通过对中国省域农业源非 CO₂ 温室气体碳排放的测算发现,我国东南地区种植业对农业源非 CO₂ 温室气体的贡献率超过 50%,其中种植业平均贡献率高于 60% 的有上海市、江苏省、浙江省、福建省、江西省、湖南省和广东省,江苏省的种植业平均贡献率位于全国首位,为 70.85%^[17]。2020 年江苏省农作物总播种面积为 7.48×10^6 hm²,农业生产总值达 4.10×10^3 亿元。本文以江苏省种植业碳排放为研究对象,基于相关的统计数据,测算全省在 1990—2020 年间农业的碳排放总量、碳排放强度及其变化特征,分析农业种植碳排放的时空格局和演变特征,并运用 Tapio 脱钩模型对全省农业碳排放和经济发展关系进行研究并

提出建议,以期为促进低碳农业的发展、实现“双碳”目标提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文所用数据均来源于 1990—2020 年的《中国农村统计年鉴》^[18]和《江苏统计年鉴》^[19]。在对农业物资投入碳排放的测算过程中,化肥测算以农业化肥折纯量为准;农药和农膜测算以当年实际施用量为准;农机测算以当年机播面积和农用机械总动力为准;灌溉测算以当年有效灌溉面积为准;翻耕测算以当年实际农作物播种面积为准。在农田土壤利用碳排放测算中,水稻、小麦、大豆、玉米、棉花、蔬菜测算以当年实际农作物种植面积数据为准。需要说明的是本文的农业碳排放特指种植业碳排放,农业产值是指农作物种植业的产值。

表 1 农业物资投入碳排放源计算公式和排放系数

碳排放源	公式	碳源投入量	碳排放系数	参考文献
化肥	$C_f = G_f \times A$	G_f 为化肥折纯量 (kg)	$A = 0.90$	West 等 ^[21]
农药	$C_p = G_p \times B$	G_p 为农药使用量 (kg)	$B = 4.93$	智静等 ^[22]
农膜	$C_m = G_m \times D$	G_m 为农膜施用量 (kg)	$D = 5.18$	王宝义等 ^[23]
农机	$C_e = (A_a \times E) + (W_e \times F)$	A_a 为农作物播种面积 (hm^2)	$E = 16.47$	赵荣钦等 ^[24]
		W_e 为农业机械总动力 (kW)	$F = 0.18$	赵荣钦等 ^[24]
灌溉	$C_i = A_i \times G$	A_i 为有效灌溉面积 (hm^2)	$G = 20.48$	李波等 ^[10]
翻耕	$C_t = A_t \times H$	A_t 为农作种植面积 (hm^2)	$H = 3.13$	伍芬琳等 ^[25]

表 2 农田土壤利用碳排放源和碳排放系数

碳排放源	碳排放系数	参考文献
水稻	210.00 kg/ hm^2 (CH_4)	闵继胜等 ^[6]
	0.24 kg/ hm^2 (N_2O)	
小麦	2.05 kg/ hm^2 (N_2O)	苏维瀚等 ^[26]
大豆	0.77 kg/ hm^2 (N_2O)	刘杨等 ^[27]
玉米	2.53 kg/ hm^2 (N_2O)	黄国宏等 ^[28]
棉花	0.48 kg/ hm^2 (N_2O)	刘杨等 ^[27]
蔬菜	4.21 kg/ hm^2 (N_2O)	邱伟红等 ^[29]

1.3 碳排放强度

农业碳排放强度可以用于衡量农业的碳排放水平,为该地区农业碳排放量与农业生产总值的比值,即 $C_{it} = C_i / \text{GDP}_t$ 。式中: C_{it} 为 t 时期的单位农业种

1.2 农业碳排放测算

本文采用 IPCC 碳排放系数法来测算农业碳排放,根据现有的研究成果对种植业碳排放量进行测算,即 $C = \sum C_i = \sum T_i \times \delta_i$ 。式中: C 为农业碳排放总量; C_i 为各碳排放源排放量; T_i 为各碳排放源活动水平; δ_i 为各碳排放源碳排放系数。

种植业碳排放量主要分为农业物资投入产生的碳排放和农田土壤利用过程中 CH_4 和 N_2O 等温室气体产生的碳排放。农业物资投入产生的碳排放主要分为化肥、农药、农膜、农机、灌溉和翻耕(表 1)。农田土壤利用产生的碳排放主要分为水稻、小麦、大豆、玉米、棉花和蔬菜(表 2)。农业物资投入和农田土壤利用碳排放系数见表 1 和表 2。根据 IPCC 第五次评估报告结果, CH_4 和 N_2O 的增温潜势在 100 年尺度上分别为 CO_2 的 28,265 倍^[20]。

植业产值碳排放强度; C_{it} 为 t 时期种植业碳排放量; GDP_t 为 t 时期农业种植业的生产总值。

1.4 Tapio 脱钩模型

脱钩弹性为经济增长幅度与碳排放量变动程度的比值,可以用于反映碳排放量变化对于经济增长的敏感程度^[29]。借助 Tapio 脱钩指数构建碳排放和经济发展

之间的变动关系,构建模型为: $e = \frac{\Delta \text{CO}_2 / \text{CO}_2}{\Delta \text{GDP} / \text{GDP}}$ 。式中:

e 为弹性指数; $\Delta \text{CO}_2 / \text{CO}_2$ 为碳排放的变化率; $\Delta \text{GDP} / \text{GDP}$ 为 GDP 的变化率。根据脱钩弹性 e 的不同确定了 8 种脱钩状态(表 3),即为扩张负脱钩、强负脱钩、弱负脱钩、弱脱钩、强脱钩、衰退脱钩、增长连接和衰退连接^[30]。

表 3 Tapio 脱钩状态划分

脱钩状态		$\Delta \text{CO}_2 / \text{CO}_2$	$\Delta \text{GDP} / \text{GDP}$	脱钩弹性(e)	含义
负脱钩	扩张负脱钩	>0	>0	$e > 1.2$	农业经济增长,环境压力大幅增长
	强负脱钩	>0	<0	$e < 0$	农业经济衰退,环境压力增加
	弱负脱钩	<0	<0	$0 < e < 0.8$	农业经济衰退,环境压力缓慢衰退
脱钩	弱脱钩	>0	>0	$0 < e < 0.8$	农业经济增长,环境压力缓慢增长
	强脱钩	<0	>0	$e < 0$	农业经济增长,环境压力减少
	衰退脱钩	<0	<0	$e > 1.2$	农业经济衰退,环境压力大幅衰退
连接	增长连接	>0	>0	$0.8 < e < 1.2$	农业经济增长,环境压力中速增加
	衰退连接	<0	<0	$0.8 < e < 1.2$	农业经济衰退,环境压力大幅减少

1.5 农业碳排放量预测

灰色预测模型 GM(1,1)是以历史数据为样本,对具有时间序列的数据进行大小预测,得到 1 条具有指数增长规律的上升形状数列,基本原理是用原始数据组成原始序列(0),再通过累加生成法生成序列(1),该步骤可以弱化原始数据的随机性,使特征规律更为明显,对生成变换后的序列(1)建立一阶微分方程模型,即 GM(1,1)模型。该模型所需样本较少,对计算统计特征量要求不高,可以有效处理小样本预测问题^[27,31-33]。本文运用灰色预测模型 GM(1,1)对 2021—2060 年江苏省农业碳排放量情况进行模拟。模型处理步骤为:

(1)将碳排放量作为原始数列,计算原始数列 $x^{(0)}$ 的级比 $\lambda^{(0)}(t) = \frac{x^{(0)}(t-1)}{x^{(0)}(t)}$,其中 $t=1,2,3,\cdots,n$ 。若 $\lambda^{(0)}(t) \in (\frac{2}{e^{n+1}}), (\frac{2}{e^{n+1}})$ 则原始数列可建立灰色预测模型 GM(1,1)。

(2)建立碳排放量的微分方程 $\frac{d(x)^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = \mu$,其中 $x^{(1)}(t)$ 为累加数列,采用最小二乘法求解灰色参数 a 和 μ , $\begin{bmatrix} a \\ \mu \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T y_n$,其中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1)+x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3)] & 1 \\ \cdots & \cdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}$$
$$y_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \cdots, x^{(0)}(n)]^T$$

(3)将灰色参数代入时间函数可得 $x^{(1)} t = \left[x^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-a(t-1)} + \frac{\mu}{a}$,相应碳排放量预测值即为:

$$\Lambda_x^{(0)}(t+1) = \Lambda_x^{(1)}(t+1) - \Lambda_x^{(1)}(t)$$
$$t=1,2,3,\cdots,n-1$$

(4)采用残差检验、后验差检验、关联度检验等对模型精度进行检验,预测 2021—2060 年碳排放量。

2 结果与分析

2.1 农资投入碳排放源占比分析

由图 1 可知,1990—2020 年间,江苏省的农资投入碳排放源中化肥占比为 69.15%~79.20%,农药占比为 8.91%~15.69%,农膜占比为 0~16.06%,农机占比为 0.83%~3.00%,灌溉占比为 1.84%~3.24%,翻耕占比为 0.56%~1.03%。农资投入碳排放源主要为化肥、农药和农膜,化肥占比最高,其次是农药和农膜,农机、灌溉、翻耕占比均较小。

1990—2020 年间,化肥产生的碳排放占比从 79.20%降低到 69.15%,农药产生的碳排放占比从 15.69%降低到 8.91%,农膜产生的碳排放占比从 0 升高到 15.92%,农机产生的碳排放占比从 0.83%升高到 3.00%,灌溉产生的碳排放占比从 3.24%降低到 2.38%,翻耕产生的碳排放占比 1.03%降低到 0.64%。化肥和农药碳排放占比均呈逐年下降的趋势,化肥占比年均降低 0.34%,农药占比年均降低 0.23%;农膜、农机碳排放占比均呈逐年上升的趋势,农膜占比年均增长 0.53%,农机占比年均增长 0.07%;灌溉和翻耕的占比变化不明显,处于一个较为稳定的状态(图 1)。

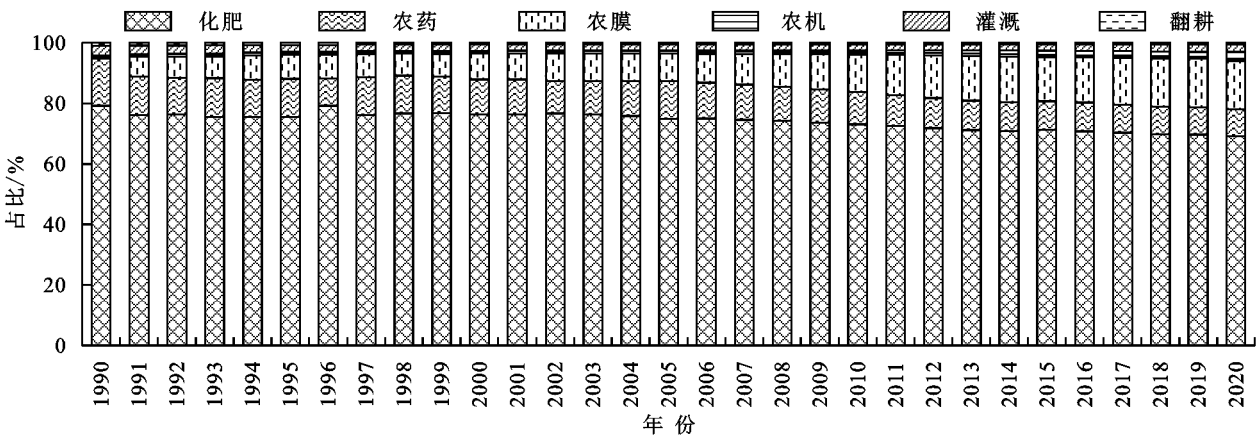


图 1 农资投入各部分碳排放源所占比重

2.2 农田土壤利用碳排放源占比分析

从图 2 可以看出,1990—2020 年间,江苏省农田土壤利用碳排放源中水稻占比为 79.76%~87.23%,小麦占比为 5.74%~8.01%,蔬菜占比为 2.39%~10.91%,玉米占比为 1.58%~2.21%,大豆占比为

0.23%~0.36%,棉花占比为 0.01%~0.51%。农田土壤利用碳排放中的水稻占比最高,其次是小麦和蔬菜,大豆、玉米、棉花占比均较小。蔬菜碳排放呈逐年上升的趋势,其余作物较为稳定。

1990—2020 年间,水稻产生的碳排放占比从 87.23%

降低到 80.04%，年均降低 0.23%；小麦产生的碳排放占比从 1990 年的 7.79% 降低到 2004 年的 5.74%，之后持续升高到 2020 年的 7.77%；蔬菜产生的碳排放占比从 1990 年的 2.39% 升高到 2020 年的 9.85%，年均升高

0.25%；大豆产生的碳排放占比从 1990 年的 0.30% 降低到 2020 年的 0.24%；玉米产生的碳排放占比从 1990 年的 1.85% 升高到 2020 年的 2.09%；棉花产生的碳排放占比从 1990 年的 0.44% 降低到 2020 年的 0.01%。

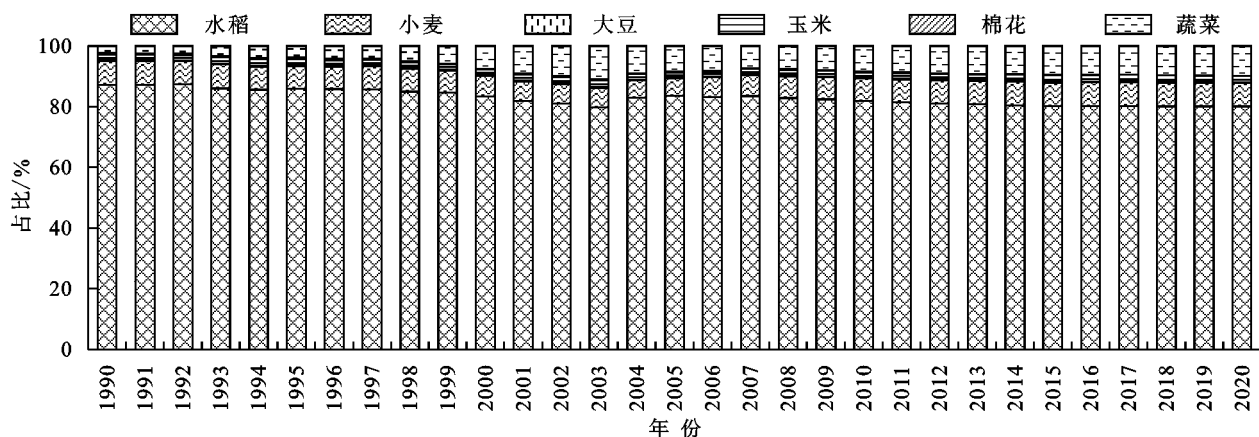


图2 农田土壤利用各作物碳排放源所占比重

2.3 种植业碳排放时序特征分析

从图3可以看出，1990—2020年间，农业种植业碳排放主要来自农田土壤利用，其碳排放占比为77.73%~86.95%；农资投入碳排放占比为13.05%~22.27%，这与李阳等^[17]的研究结果相符。根据李阳等^[17]对江苏省1980—2018年间农业总碳排放量的测算结果，江苏省农业总碳排放量为2 212.94~3 622.67万t，其中种植业平均贡献率为70.85%。农业种植碳排放年均变化增长率为0.13%，农资投入碳排放年均增幅为1.25%，农田土壤利用碳排放年均变化幅度为-0.07%。1999年农业种植碳排放最高，为2 074.23万t，其中农资投入391.21万t，农田利用1 683.02万t。2003年农业碳排放最低，为1 764.95万t，其中农资投入393.10万t，农田利用1 371.85万t。2020年农业种植源、农田土壤利用和农资投入碳排放量分别为1 999.53万，1 635.74万，363.80万t。

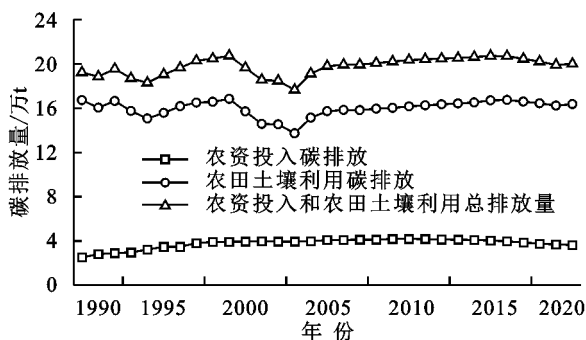


图3 种植业碳排放量的变化趋势

从江苏省种植业碳排放量年际变化来看，1990—2020年江苏省农业种植业碳排放量变化总体可以分为2个阶段：第1阶段是1990—2006年，农业碳排放量先增加，后降低，再增加。第1阶段的出现是由于化肥施用量的大量增加和蔬菜面积的增加使得农业碳排放形成1个上升趋势。之后化肥施用量趋于平

稳，蔬菜种植面积持续增加，水稻种植面积持续减少，蔬菜的碳排放量小于水稻，农业碳排放形成1个下降趋势。随着蔬菜面积减少，水稻种植面积增加，种植业碳排放形成1个上升趋势。第2阶段是2007—2020年，这个阶段种植业的各排放源趋于稳定，碳排放量变化幅度较小。

2.4 种植业碳排放强度分析

从图4可以看出，1990—2020年间，以农业产值为单位的碳排放强度有1个明显的下降趋势（图4）。单位农业产值碳排放强度在1990—1995年有1个迅速降低的过程，年均下降18.31%，1995年较1990年降幅达63.62%；在1995—2012年碳排放强度保持继续降低的趋势，降低的幅度减小，年均下降5.82%；在2012—2020年碳排放强度持续降低，降低的幅度更小，年均下降4.36%。随着经济社会发展，农业所需劳动力成本也相应提高，农产品价格随之上升，在农业碳排放量变化较小的情况下，农业产值持续增加使得单位农业产值的碳排放强度持续下降。之后，随着农业的发展，农资、农机、农技得到推广，农产品产量和价格趋于稳定，碳排放强度变化幅度不断变小。

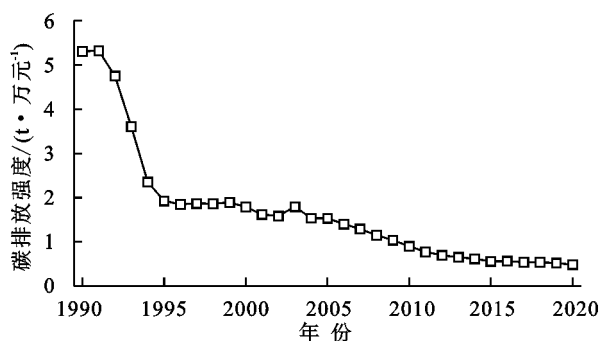


图4 碳排放强度的变化趋势

2.5 农业碳排放与农业经济增长的脱钩特征分析

由表4可知，江苏省1990—2020年农业碳排放

的脱钩状态主要以强脱钩、增长连接和弱脱钩为主。农业经济总体上保持稳步上升的趋势,农业种植碳排放量增长较为缓慢,并多次出现农业碳排放量降低的情况。脱钩状态的情况可以分为 3 个阶段:

第 1 阶段是 1990—2002 年,为经济快速增长期。该阶段农业经济发展保持稳定增长态势,年均增长 10.22%,同时总体上农业碳排放呈减少趋势,年均降低 0.33%。此阶段的脱钩状态多为强脱钩。随着经济的快速发展,农业的生产总值也随之提高,农业发展还处于比较缓慢的过程,农业生产的技术资料没有得到推广,使得经济增长速度快于农业碳排放的增加。2002 年国家提出“多予、少取、放活”为指导思想的农业政策。

第 2 阶段是 2003—2015 年,为平稳期。该阶段的农业经济总体来看处于稳步发展的时期,年均增长 11.63%,同期农业碳排放也稳步增长,年增幅为 1.35%。此阶段的脱钩状态多为弱脱钩。国家于 2006 年取消传

统农业税,出台一系列政策提高农民种粮积极性。此阶段国家大力推广农业新技术,兴修农田水利,推进农业的机械化。农民得到高质量的农业培训,提高农业生产的积极性。国家倡导化肥和农药的减量使用,促进农业的可持续发展。在经济稳步发展的同时促使农业蓬勃发展。

第 3 个阶段是 2016—2020 年,为波动期。该阶段农业经济发展持续稳定发展,年增幅为 2.87%,与前 2 个阶段的增幅相比,说明农业的发展达到一个快要饱和的程度。农业碳排放先减少再增加。这个阶段弱负脱钩、强脱钩、衰退脱钩、弱脱钩状态都有出现。2014 年的中央一号文件提出“发展生态友好型农业”^[34],2015 年开始限制化肥、农药施用量的增长。国家深入贯彻绿色低碳农业,保护耕地资源,进一步削减资源消耗型农业产业,属于农业转型升级的关键时刻,农业碳排放出现波动反弹。

表 4 农业物资投入和农田土壤利用的总排放量与农业经济增长的脱钩特征

年份	农业总产值/ 亿元	农业物资投入和农田土壤 利用的总排放量/万 t	$\Delta\text{CO}_2/\text{CO}_2$	$\Delta\text{GDP}/\text{GDP}$	脱钩弹性(ϵ)	脱钩状态
1990	362.46	1923.223	—	—	—	—
1991	354.42	1885.204	-0.020	-0.022	0.891	衰退连接
1992	411.33	1954.766	0.037	0.161	0.230	弱脱钩
1993	518.55	1870.621	-0.043	0.261	-0.165	强脱钩
1994	777.94	1828.916	-0.022	0.500	-0.045	强脱钩
1995	986.15	1903.732	0.041	0.268	0.153	弱脱钩
1996	1062.39	1965.302	0.032	0.077	0.418	弱脱钩
1997	1085.26	2028.958	0.032	0.022	1.505	扩张负脱钩
1998	1096.88	2047.342	0.009	0.011	0.846	增长连接
1999	1095.13	2074.226	0.013	-0.002	-8.230	增长连接
2000	1096.02	1964.246	-0.053	0.001	-65.242	强脱钩
2001	1142.66	1854.434	-0.056	0.043	-1.314	强脱钩
2002	1165.49	1848.191	-0.003	0.020	-0.168	强脱钩
2003	981.25	1764.952	-0.045	-0.158	0.285	弱负脱钩
2004	1242.41	1912.140	0.083	0.266	0.313	弱脱钩
2005	1291.06	1979.714	0.035	0.039	0.902	增长连接
2006	1416.91	1993.317	0.007	0.097	0.070	弱脱钩
2007	1540.39	1993.251	-0	0.087	-0	强脱钩
2008	1741.99	2007.058	0.007	0.131	0.053	弱脱钩
2009	1940.10	2021.896	0.007	0.114	0.065	弱脱钩
2010	2256.99	2034.446	0.006	0.163	0.038	弱脱钩
2011	2622.67	2040.967	0.003	0.162	0.020	弱脱钩
2012	2942.11	2047.969	0.003	0.122	0.028	弱脱钩
2013	3137.14	2052.979	0.002	0.066	0.037	弱脱钩
2014	3325.67	2061.913	0.004	0.060	0.072	弱脱钩
2015	3675.87	2072.453	0.005	0.105	0.049	弱脱钩
2016	3663.42	2069.532	-0.001	-0.003	0.416	弱负脱钩
2017	3764.73	2046.170	-0.011	0.028	-0.408	强脱钩
2018	3735.02	2020.567	-0.013	-0.008	1.586	衰退脱钩
2019	3828.60	1990.925	-0.015	0.025	-0.586	强脱钩
2020	4102.16	1999.533	0.004	0.071	0.061	弱脱钩

2.6 农业碳排放量预测及达峰分析

以近 30 年(1990—2020 年)、近 20 年(1999—2020)和近 10 年(2010—2020 年)的农业碳排放量数据作为样本,构建灰色预测模型 GM(1,1)预测 2021—2060 年农业碳排放量,考虑到年份数量较多,仅列出 2025 年、2030 年、2045 年和 2060 年的预测值(表 5)。以近 30 年(1990—2020 年)的数据为样本,预测江苏省农业碳排放量在 2020 年后仍有一个缓慢增长的趋势,2030 年较 2020 年增幅 5.55%,2060 年较 2020 年增幅 13.98%,农业碳排放量年均增加 6.99 万 t。以近 20 年(1999—2020)年农业碳排放量数据为样本,江苏省农业碳排放量在 2020 年后有一个增长的趋势,2030 年较 2020 年增幅 8.67%,2060 年较 2020 年增幅 24.11%,农业碳排放量年均增加 12.05 万 t。以近 10 年(2010—2020 年)农业碳排放量数据为样本,预测农业碳排放呈持续减少趋势,种植业碳排放已于 2020 年达峰,2030 年较 2020 年降幅 3.48%,2060 年较 2020 年降幅 14.31%,农业碳排放量年均减少 7.15 万 t,这与李阳等^[25]利用经济情景预测对我国农业源非 CO₂ GHG 排放量的预测结果一致。在高情景和中情景下,2018—2050 年我国农业源非 CO₂ GHG 排放量持续上升,到 2050 年仍未达峰;在低情景下,2018—2050 年的农业源非 CO₂ GHG 排放量持续下降,已于 2018 年达峰,峰值为 7.30 亿 t^[17]。

表 5 以近 30,20,10 年碳排放量数据为样本的
江苏省种植业碳排放量预测值 单位:万 t

年份	以近 30 年碳排放 量数据为样本	以近 20 年碳排放 量数据为样本	以近 10 年碳排放 量数据为样本
2025	2083.009	2125.293	1968.560
2030	2110.477	2172.889	1929.896
2045	2193.976	2322.170	1818.399
2060	2279.141	2481.706	1713.345

近 30 年碳排放量上下浮动,近 20 年碳排放量保持总体上升趋势,近 10 年碳排放量保持稳定且有下降趋势。种植业碳排放受多种因素影响,在各时间段内变化多样,一般来说,模型精度随样本年份数增多而降低,模型平均相对误差随样本年份数增多而加大。农业碳排放量是动态变化的,根据实际情况选择样本数据进行预测,高、中、低情景比较预测更利于制定减排措施。近 30 年碳排放量波动,在总体上保持增长;近 20 年碳排放量随着农业快速发展而增加;近 10 年碳排放量随着农业低碳可持续发展而降低。由此说明,近年来江苏省的环保绿色农业蓬勃发展,为农业的低碳减排作出贡献。江苏省农业碳排放的控制需要因地制宜,在农业经济发展的同时,推进绿色低碳农业的发展,力争在 2030 年实现“碳达峰”目标,在 2060 年前实现“碳中和”。

3 结 论

(1)2020 年江苏省种植业碳排放为 1 999.53 万 t。1990—2020 年间呈现先增加后降低再增加,然后趋于平稳的趋势。种植业碳排放主要来源于农田土壤利用,农田土壤利用碳排放占比为 77.73%~86.95%,农资投入碳排放占比为 13.05%~22.27%。

(2)化肥是农资投入碳排放源中最主要的排放源,是推进农资投入“低碳化”的关键方面。农业碳排放强度高的地区可以通过因地制宜制定化肥减量的方案。农技推广部门也可对应做好测土配方施肥的工作。此外,可施用生物有机肥和水溶性肥料来代替传统化肥。减少化肥过量使用的情况,保护土壤和水体环境,促进农业的可持续发展。

(3)水稻是农田土壤利用排放源中最主要的排放源,是推进农田土壤利用“低碳化”的关键方面。农业碳排放强度高的地区可以在保证粮食充足的前提下,通过种植其他的旱作作物来减少农田土壤的碳排放。此外,在水稻生育期内适当地进行排水措施也能降低土壤甲烷气体的排放。

(4)种植业碳排放总量变化幅度变小,单位农业产值碳排放强度呈现持续减小的趋势。随着经济社会发展,农业所需劳动力成本也相应提高,农产品价格随之上升,在农业碳排放量变化较小的情况下,农业产值持续增加使得单位农业产值的碳排放强度持续下降。之后,随着农业的发展,农资、农机、农技得到推广,农产品产量和价格趋于稳定,碳排放强度变化幅度不断变小;粮食生产技术日益成熟,对农业资源的利用效率越来越高。

(5)根据(近 30 年和近 20 年)数据预测结果,目前江苏省在种植业碳排放量呈持续增长的趋势,到 2060 年仍未达峰;根据近 10 年数据的预测结果,种植业碳排放呈持续下降趋势,已于 2020 年达峰。表明近年来江苏省在低碳绿色农业发展已初见成效,需继续因地制宜实现农业减排。额外的农资投入和过多的农田土壤利用都会增加农业的碳排放。大力发展有机农产品、绿色农产品,采用低碳绿色的环保技术,提倡环境友好型农田土壤利用方式,提高农用物资的利用效率,为更好地实现“双碳”而努力。

参考文献:

- [1] 郎慧,肖诗顺,王艳.四川省农业碳排放与经济增长的脱钩效应分析[J].山东农业大学学报(社会科学版),2019,21(2):69-78.
- [2] 郝小雨.黑龙江省 30 年来农田生态系统碳源/汇强度及

- 碳足迹变化[J].黑龙江农业科学,2021(8):97-104.
- [3] 程琳琳.中国农业碳生产率时空分异:机理与实证[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [4] 孙英.山东省农业碳排放时空特征及其影响因素分析[D].兰州:西北师范大学,2018.
- [5] 马永喜,孙亚丽.碳减排约束下区域农业生产投入及其环境效应:基于价格内生局部均衡模型的模拟[J].湖南农业大学学报(社会科学版),2021,22(5):15-23.
- [6] 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.
- [7] 田云,吴海涛.产业结构视角下的中国粮食主产区农业碳排放公平性研究[J].农业技术经济,2020(1):45-55.
- [8] 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.
- [9] 郑炎辉,何艳虎,王金杰,等.基于脱钩理论的区域产业节水目标研究:以广东省为例[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):38-44.
- [10] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [11] 廖卫东,刘森.西部地区农业碳排放的时空演变及 EKC 假说检验:基于西部大开发 12 省份动态面板数据模型的经验分析[J].世界农业,2020(6):62-70.
- [12] Han H B, Zhong Z Q, Guo Y, et al. Coupling and decoupling effects of agricultural carbon emissions in China and their driving factors[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(25): 25280-25293.
- [13] 尹岩,郝凤明,郝龙飞,等.我国设施农业碳排放核算及减排路径[J].应用生态学报,2021,32(11):3856-3864.
- [14] 张丽琼,何婷婷.1997—2018 年中国农业碳排放的时空演进与脱钩效应:基于空间和分布动态法的实证研究[J].云南农业大学学报(社会科学版),2022,16(1):78-90.
- [15] 韩梦瑶,刘卫东,谢漪甜,等.中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J].资源科学,2021,43(4):710-721.
- [16] 吴昊玥,孟越,黄瀚蛟,等.中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征[J].水土保持学报,2022,36(5):360-368.
- [17] 李阳,陈敏鹏.中国省域农业源非 CO₂ 温室气体排放的影响因素分析与峰值预测[J].环境科学学报,2021,41(12):5174-5189.
- [18] 国家统计局农村社会经济统计司.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1991.
- [19] 江苏省统计局.江苏统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1991.
- [20] Stocker T. Climate change 2013, in the physical science basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: WMO/UNEP, 2014.
- [21] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 91(1/2/3): 217-232.
- [22] 智静,高吉喜.中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J].地理科学进展,2009,28(3):429-434.
- [23] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率测度及时空差异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(6):11-19.
- [24] 赵荣钦,刘英,丁明磊,等.河南省农田生态系统碳源/汇研究[J].河南农业科学,2010,39(7):40-44.
- [25] 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.
- [26] 苏维瀚,宋文质,张桦,等.华北典型冬麦区农田氧化亚氮通量[J].环境化学,1992,11(2):26-32.
- [27] 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,2022,30(4):558-569.
- [28] 黄国宏,陈冠雄,吴杰,等.东北典型旱作农田 N₂O 和 CH₄ 排放通量研究[J].应用生态学报,1995,6(4):383-386.
- [29] 邱炜红,刘金山,胡承孝,等.种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究[J].生态环境学报,2010,19(12):2982-2985.
- [30] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [31] 赵宇.江苏省农业碳排放动态变化影响因素分析及趋势预测[J].中国农业资源与区划,2018,39(5):97-102.
- [32] 旷爱萍,胡超.广西农业碳排放影响因素和趋势预测[J].西南林业大学学报,2020,4(2):5-13.
- [33] 何慧爽,付帮杰.我国粮食主产区农业碳排放测度与减排压力研究[J].生态经济,2019,35(11):99-104.
- [34] 新华社,中共中央国务院印发《关于全面深化改革加快推进农业现代化的若干意见》[J]. 中华人民共和国国务院公报,2014(3):5-12.