

邱子健, 靳红梅, 高南, 等. 江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 658–669.

QIU Z J, JIN H M, GAO N, et al. Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 658–669.

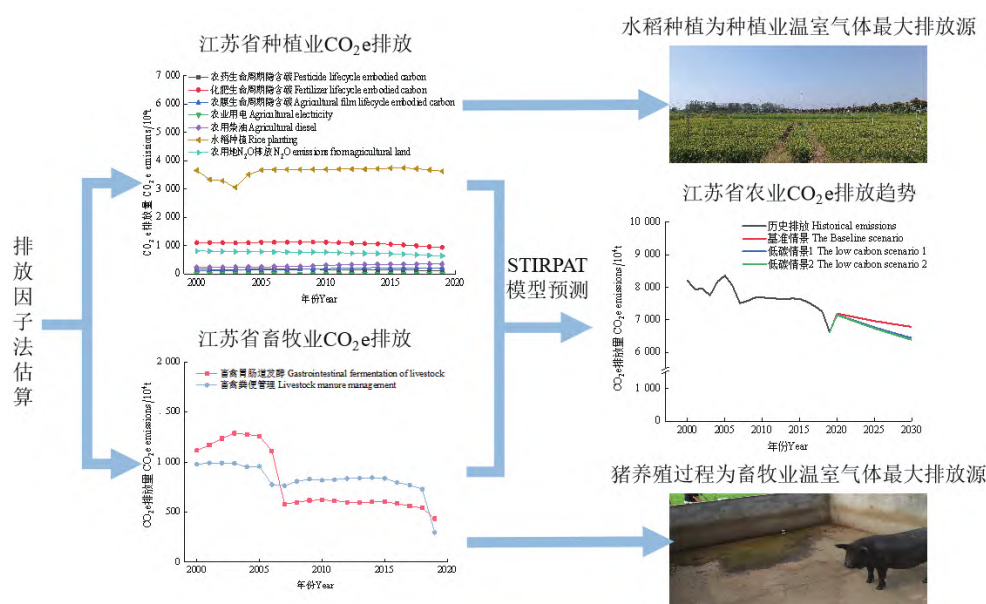


开放科学 OSID

# 江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测

邱子健<sup>1</sup>, 靳红梅<sup>2,3</sup>, 高南<sup>4</sup>, 徐轩<sup>2,3</sup>, 朱津宏<sup>1</sup>, 李庆<sup>1</sup>, 王子清<sup>1</sup>, 徐拥军<sup>5</sup>, 申卫收<sup>1\*</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院/江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室/江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095; 4. 南京工业大学生物与制药工程学院, 南京 211816; 5. 江苏现代低碳技术研究院, 南京 210003)



**摘要:**为探讨江苏省农业碳排放时序特征及未来碳排放趋势,利用排放因子法对江苏省2000—2019年农业碳排放进行估算,并运用STIRPAT模型对2020—2030年全省农业碳排放趋势进行预测。结果表明:江苏省2000—2019年的CO<sub>2</sub>e排放当量(CO<sub>2</sub>e)整体呈现降低—升高—降低的趋势,并在2005年达峰,估算为8 361.77万t,其中种植业、畜牧业则分别在2010年、2003年达峰,种植业排放量远高于畜牧业。农业CO<sub>2</sub>e排放强度呈先升高后降低的趋势,2003年后排放强度逐年递减,到2019年已降至1.31 t·万元<sup>-1</sup>;在各碳源中,水稻种植是全省农业碳排放的最大排放源,而在主要畜禽中,猪养殖过程中造成的碳排放远高于其他畜禽;预计2020—2030年,伴随城镇化发展、农业人均GDP提高和农业碳排放强度的进一步降低,全省农业CO<sub>2</sub>e排放量仍将呈下降趋势,在减碳的同时可以兼顾农业经济高效发展。研究表明,江苏省农业已实现碳达峰,未来农业碳排放的持续降低将有利于加速全省碳中和目标的实现。

**关键词:**江苏省;农业碳排放;种植业;畜牧业;碳达峰;碳中和

**中图分类号:**F327;X322 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2022)03-0658-12 **doi:**10.11654/jaes.2021-0647

收稿日期:2021-06-06 录用日期:2021-10-19

作者简介:邱子健(1996—),男,浙江宁波人,硕士研究生,从事环境与土壤微生物研究。E-mail:1919208781@qq.com

\*通信作者:申卫收 E-mail:wsshen@nuist.edu.cn

基金项目:江苏省发展和改革委员会碳达峰策略和路径前期研究;国家自然科学基金面上项目(41771291)

**Project supported:** Preliminary Study on Strategies and Paths of Carbon Emission Peak for Jiangsu Development and Reform Commission; The National Natural Science Foundation of China(41771291)

## Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China

QIU Zijian<sup>1</sup>, JIN Hongmei<sup>2,3</sup>, GAO Nan<sup>4</sup>, XU Xuan<sup>2,3</sup>, ZHU Jinhong<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, WANG Ziqing<sup>1</sup>, XU Yongjun<sup>5</sup>, SHEN Weishou<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology / Key Laboratory of High Technology Research on Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control in Jiangsu Province / Jiangsu Atmospheric Environment and Equipment Technology Collaborative Innovation Center, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 4. School of Biological and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China; 5. Jiangsu Institute of Modern Low Carbon Technology, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In order to explore the temporal characteristics of agricultural carbon and future carbon emission trends in Jiangsu Province, the emission factor method was used to estimate the agricultural carbon emissions of Jiangsu Province from 2000 to 2019. The STochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT) model was used to predict the trends of agricultural carbon emission in the province from 2020 to 2030. The results indicated that the CO<sub>2</sub>e emissions of Jiangsu Province from 2000 to 2019 showed a trend of decreasing-increasing-decreasing, and reached a peak in 2005, which is estimated to be 83 617 700 tons, of which the planting industry and animal husbandry were in 2010 and 2003, respectively. In 2005, the planting industry's emissions were much higher than that of the animal husbandry industry. The intensity of agricultural CO<sub>2</sub>e emission firstly increased and then decreased. After 2003, the intensity of emissions decreased year after year, and by 2019 it had reduced to 131 t · million yuan<sup>-1</sup>. Among the various carbon sources, rice cultivation was the largest source of agricultural carbon emissions in the province, and among the major livestock and poultry, the carbon emissions caused by pig breeding were much higher than for other livestock and poultry. From 2020 to 2030, with the development of urbanization, the increase of agricultural per capita gross domestic product (GDP) and the further reduction of agricultural carbon emission intensity, the province's agricultural CO<sub>2</sub>e emissions will still show a downward trend. Low-carbon emission reduction and efficient agricultural economic development will also contribute toward this. Studies have shown that agriculture in Jiangsu Province has taken the lead in achieving carbon peaks, and the continued reduction of agricultural carbon emissions in the future will help accelerate the realization of the province's carbon neutral goals.

**Keywords:** Jiangsu Province; agricultural carbon emissions; planting industry; animal husbandry; carbon emission peak; carbon neutral

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)等温室气体排放加速了全球气候变化进程,造成极端天气事件频发。因此,控制温室气体排放、发展低碳经济已成为国际共识。农业是国民经济的基础部门,其碳排放主要在种植、养殖、加工等过程中直接或间接产生。其中,种植业碳排放主要集中在化肥、农药、农膜、灌溉以及机械动力方面<sup>[1-2]</sup>,而畜牧业则主要包括反刍动物肠道发酵和动物粪便管理缺氧产生的甲烷(CH<sub>4</sub>)排放以及畜禽粪便收集、贮存和堆肥等过程中产生的氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放<sup>[3]</sup>,其在全球范围产生的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O约占农业非CO<sub>2</sub>温室气体排放量的80%<sup>[4]</sup>。联合国粮农组织(FAO)数据显示<sup>[5]</sup>,2017年我国农业产生67 846.91万t CO<sub>2</sub>当量(CO<sub>2</sub>e)的温室气体排放,其中CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O分别排放1 443.50万、121.08万t,分别占全国排放总量的23.19%和69.38%。当前我国农业碳排放量年均增长约为1.67%,而碳排放强度则已呈下降趋势<sup>[6-7]</sup>。

为有效遏制气候变暖,农业碳排放及减排策略已备受全球关注。国内目前的研究主要侧重于农业碳排放核算、影响因素及减排机制方面<sup>[8-11]</sup>。当前,碳排

放估算方法主要包括排放因子法、质量平衡法、实测值法和模型法<sup>[12-13]</sup>。排放因子法是依照碳排放清单,对各排放源以活动水平和排放因子的乘积估算其碳排放量的方法,主要参考联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《2006年国家温室气体清单编制指南报告》等获取排放因子<sup>[14-15]</sup>。质量平衡法可根据生产生活的新化学物质和设备进行计算,优势在于可反映实际碳排放量,但中间考虑过程多、数据获取困难,误差较大<sup>[16]</sup>。实测法通过排放源的现场实测基础数据计算碳排放量,因中间环节少,结果较准确,但数据获取较难、投入较大,其估算精度多取决于采样频率、样点密度等因素<sup>[13,17]</sup>。模型法主要通过数学模型等进行估算,例如国内构建的DNDC模型就可用于估算农田痕量温室气体的排放量<sup>[18]</sup>,但运行模型所需数据种类较多。本文选择排放因子法估算碳排放,该方法目前已成为国际主流方法,数据获取较易,可较准确地反映农业各排放源碳排放情况。当前,可用于预测碳排放的模型如环境库兹涅茨曲线、灰色预测模型、投入产出模型等各有优势,但部分模型存在自身

缺陷或建模较复杂,因而较少用于预测碳排放<sup>[19]</sup>。本文采用了基于IPAT模型的STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on PAT)模型预测农业碳排放趋势,该模型可以充分考虑社会、经济和技术方面的碳排放驱动因素<sup>[20]</sup>,适用于不同情景的分析预测。

江苏省是农业大省,地理位置与气候条件优越。国家统计局数据显示<sup>[21]</sup>,2019年江苏省耕地面积约占全国的3.39%,粮食总产量、畜禽肉类总产量分别占全国总量的5.58%、3.54%,而总产值则占全国的6.20%,位列全国第四位。目前,国内有关江苏省农业碳排放的估算主要集中在种植业,对畜牧业仍未予以足够重视,因此对全省农业碳排放尚缺少全面、系统的评估。本研究通过排放因子法估算2000—2019年江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放量,分析其时序特征,并利用STIRPAT模型对2020—2030年的农业CO<sub>2</sub>e排放量进行预测,旨在为江苏省农业碳减排提供量化参考,为低碳政策的合理安排提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 农业碳排放估算方法

借鉴IPCC发布的《2006年国家温室气体清单指南》,运用排放因子法估算农业碳排放。本文中种植业主要包括以下碳源:(1)化肥、农药、农膜生命周期隐含碳:生产和运输过程中直接或间接导致的碳排放,不涵盖田间使用过程中由能源消费导致的碳排放<sup>[22]</sup>;(2)农业用电,即农村用电导致的碳排放;(3)农用柴油,即农业机械在使用过程中消耗农用柴油导致的碳排放;(4)水稻种植,即稻田CH<sub>4</sub>排放;(5)农用地N<sub>2</sub>O排放,包括由氮肥施用引起的N<sub>2</sub>O直接排放,以及由大气氮沉降、氮淋溶径流损失分别引起的N<sub>2</sub>O间接排放。畜牧业则主要考虑以下温室气体排放源:(1)动物肠道发酵,即在正常的代谢过程中,寄生在动物消化道内的微生物发酵消化道内饲料时从动物口、鼻和直肠排出体外的CH<sub>4</sub>排放;(2)动物粪便管理,即在畜禽粪便施入到土壤之前动物粪便贮存和处理所产生的CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放。估算模型如下:

$$I = \sum I_i = \sum AD_i \cdot EF_i \quad (1)$$

式中: $I$ 为农业的CO<sub>2</sub>e排放总量,万t; $I_i$ 为第 $i$ 类温室气体排放源的CO<sub>2</sub>e排放量,万t; $AD_i$ 为第 $i$ 类温室气体排放源的活动水平; $EF_i$ 为第 $i$ 类温室气体排放源的CO<sub>2</sub>e排放系数。

江苏省种植业温室气体排放源的排放系数主要

来自IPCC等机构公布的推荐值或经进一步调整计算的结果,畜牧业温室气体排放源的排放系数主要参考《省级温室气体清单编制指南》的推荐值。主要排放源的温室气体排放系数见表1。

### 1.2 农业碳排放强度估算方法

基于1.1农业碳排放量的估算进一步计算排放强度,公式如下:

$$EI = I/S \quad (2)$$

式中: $EI$ 为农业CO<sub>2</sub>e排放强度,t·万元<sup>-1</sup>; $I$ 为农业CO<sub>2</sub>e排放总量,t; $S$ 为农业总产值(本文中即种植业和畜牧业之和),万元。

### 1.3 农业碳排放趋势预测模型

EHRLICH等<sup>[23]</sup>指出,所有环境影响因素可分解为人口规模、富裕度和技术3类,提出了IPAT模型,即 $I = PAT$ 。在此基础上,本文参考相关构建方法<sup>[24]</sup>,采用基于IPAT模型改进的STIRPAT模型<sup>[25]</sup>对碳排放进行了预测。STIRPAT模型可以克服IPAT模型等在假设检验方面的局限,定量研究人文指标对碳排放的影响程度<sup>[26]</sup>。其基本模型为:

$$I = aP^bA^cT^de \quad (3)$$

由于式(3)标准STIRPAT模型是非线性多元方程,不便于计算,故将式(3)中等式两边经对数化处理变成求和模式:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln e \quad (4)$$

式中: $a$ 为常数; $I$ 为农业CO<sub>2</sub>e排放总量,万t; $P$ 为农村人口,万人; $A$ 为农业人均GDP,万元·万人<sup>-1</sup>; $T$ 为农业CO<sub>2</sub>e排放强度,t·万元<sup>-1</sup>; $e$ 为误差, $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别为农村人口、农业人均GDP、农业CO<sub>2</sub>e排放强度的弹性指数。

### 1.4 数据来源

本文中2000—2019年各年份化肥、农药、农膜用量、农用柴油用量、农村用电量、水稻种植面积、牲畜年底存栏量、农作物播种面积、农村人口和农业产值等数据主要来自历年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》和《江苏省统计年鉴》。其中,化肥施用量采用折纯量,农药、农膜、农用柴油采用实际使用量。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业碳排放时序特征

#### 2.1.1 种植业碳排放时序特征

2000—2019年间,江苏省种植业CO<sub>2</sub>e排放量总体呈“降低—升高—降低”的变化趋势(图1),并在2010年达峰,为6 245.63万t。2000—2003年,因水稻种植



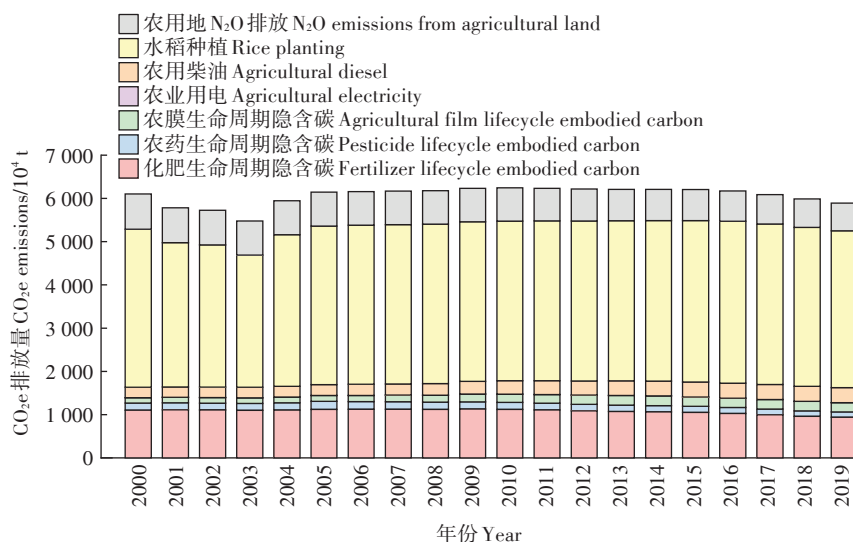
表1 农业温室气体排放源与排放系数

Table 1 Agricultural greenhouse gas emission sources and emission coefficients

部门 Department	排放源 Emission source	排放系数 Emission coefficient	系数来源 Coefficient source
种植业	化肥生命周期隐含碳	CO <sub>2</sub> : 3.284 0 kg·kg <sup>-1</sup>	美国橡树岭国家实验室(ORNL)
	农药生命周期隐含碳	CO <sub>2</sub> : 18.092 0 kg·kg <sup>-1</sup>	美国橡树岭国家实验室(ORNL)
	农膜生命周期隐含碳	CO <sub>2</sub> : 18.993 0 kg·kg <sup>-1</sup>	南京农业大学资源与生态环境研究所
	农业用电	CO <sub>2</sub> : 0.792 1 t·MWh <sup>-1</sup>	生态环境部
	农用柴油	CO <sub>2</sub> : 3.186 3 kg·kg <sup>-1</sup>	IPCC (2006)
	水稻种植	CH <sub>4</sub> : 215.500 0 kg·hm <sup>-2</sup>	《省级温室气体清单编制指南》
	农用地 N <sub>2</sub> O 排放	N <sub>2</sub> O: 氮肥施用 0.012 5 kg·kg <sup>-1</sup> 氮沉降 旱地 0.165 0 kg·hm <sup>-2</sup> 水田 0.064 0 kg·hm <sup>-2</sup> 淋溶/径流 0.075 0 kg·hm <sup>-2</sup>	IPCC (2006)
畜牧业	畜禽胃肠道发酵	CH <sub>4</sub> : 奶牛 88.100 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	《省级温室气体清单编制指南》
		非奶牛 52.900 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		绵羊 8.200 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		山羊 8.900 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		猪 1.000 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		家禽 忽略不计	
	畜禽粪便管理	CH <sub>4</sub> : 奶牛 8.330 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	《省级温室气体清单编制指南》
		非奶牛 3.310 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		绵羊 0.260 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		山羊 0.280 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		猪 5.080 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		家禽 0.020 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		N <sub>2</sub> O: 奶牛 2.065 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		非奶牛 0.846 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		绵羊 0.113 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		山羊 0.113 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		猪 0.175 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	
		家禽 0.007 0 kg·头 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	

注:化肥、农药、农膜生命周期隐含碳的排放系数已根据碳排放系数换算成CO<sub>2</sub>排放系数(CO<sub>2</sub>排放系数=碳排放系数/12×44)。下文CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O均按IPCC第五次评估报告中百年尺度CO<sub>2</sub>增温潜势的28、265倍换算成CO<sub>2</sub>e估算。

Note: Emission coefficients of fertilizer lifecycle embodied carbon, pesticide lifecycle embodied carbon and agricultural film lifecycle embodied carbon have been converted from C emission coefficient to CO<sub>2</sub> emission coefficient (CO<sub>2</sub> emission coefficient=C emission coefficient/12×44). The following CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O are calculated according to the CO<sub>2</sub> equivalent of 28 times and 265 times of the 100-year-scale CO<sub>2</sub> warming potential in the IPCC Fifth Assessment Report.

图1 2000—2019年江苏省种植业CO<sub>2</sub>e排放变化Figure 1 CO<sub>2</sub>e emission from plant-products industry in Jiangsu Province from 2000 to 2019

面积的减少,CO<sub>2</sub>e排放总量持续降低,由6 102.84万t降至5 477.26万t,减少10.25%,此后至2010年逐年升高,2010—2019年整体呈缓慢降低趋势,2019年已降至5 892.22万t,较2010年减少5.66%。

在全省种植业中,水稻种植的CO<sub>2</sub>e排放贡献最大,平均达59.49%,且近年占比有所提高。其次为化肥生命周期隐含碳和农用地N<sub>2</sub>O排放的贡献较大,平均贡献17.78%和12.37%,后者中以氮肥施用的直接排放居多。农用柴油、农膜生命周期隐含碳排放的占比近年略有增加,平均分别贡献4.87%和2.93%,而农药生命周期隐含碳占比与化肥生命周期隐含碳变化趋势相近,近年已呈逐年下降趋势,平均贡献2.57%。

### 2.1.2 畜牧业碳排放时序特征

2000—2019年,江苏省畜牧业CO<sub>2</sub>e排放量总体呈“升高-降低-回升-降低”的变化趋势(图2),并在2003年达峰,为2 274.20万t。2005年后排放量降幅明显,2007年已降至1 344.92万t,2014年后则呈逐年下降趋势,2019年因受猪瘟等影响,排放量降至

730.88万t。两类排放源中,动物粪便管理的平均贡献率略高,为52.01%。

全省动物肠道发酵CO<sub>2</sub>e排放量在2007年较上年大幅降低,此后有所回升,自2015年后逐年下降(图3)。2000—2019年,所有畜禽中,山羊胃肠道发酵贡献的排放量最多,平均占比为52.61%,自2007年起,占比大幅下降;绵羊贡献最少,平均占比1.22%;猪、奶牛和非奶牛则分别平均贡献18.18%、16.38%和11.60%的排放量。

全省动物粪便管理CO<sub>2</sub>e排放量在2005—2006年呈较明显的年际差异,在2007年持续下降后有所回升,自2014年后则逐年降低,其中2019年有大幅下降(图4)。2000—2019年,所有畜禽中,猪粪便管理是最重要的排放源,平均占比91.07%,其次是山羊、奶牛、非奶牛、家禽和绵羊,分别贡献3.97%、2.49%、1.40%、0.98%和0.10%。

所有畜禽中,猪养殖过程中的CO<sub>2</sub>e排放量远高于其他畜禽,平均占比54.60%,其次山羊占比

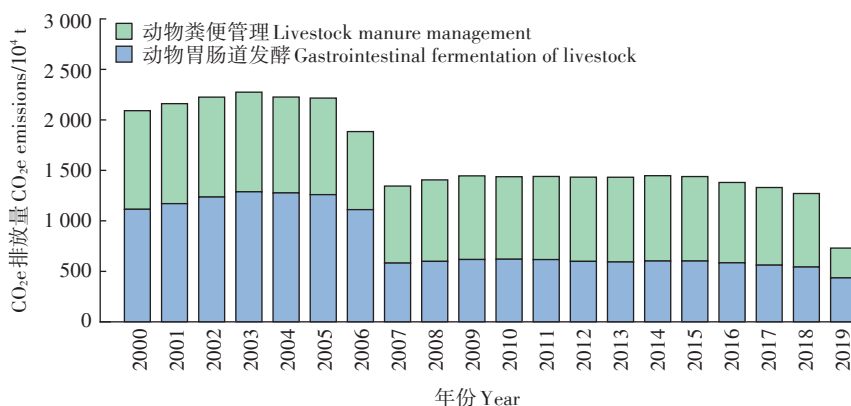


图2 2000—2019年江苏省畜牧业CO<sub>2</sub>e排放变化

Figure 2 CO<sub>2</sub>e emission from animal husbandry in Jiangsu Province from 2000 to 2019

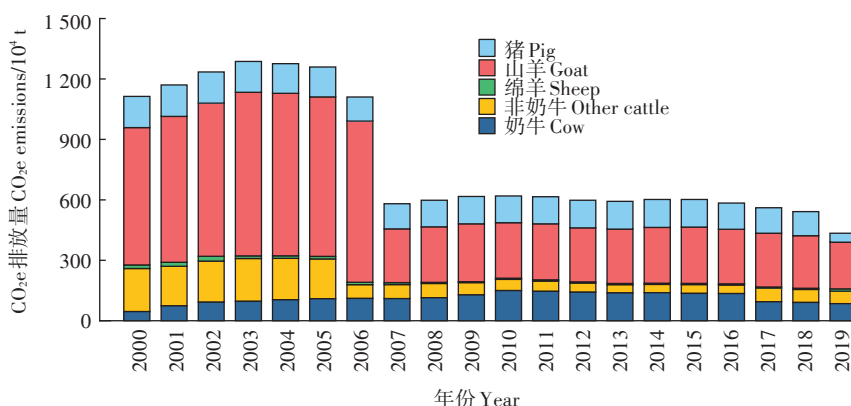


图3 2000—2019年江苏省畜牧业动物肠道发酵CO<sub>2</sub>e排放变化

Figure 3 CO<sub>2</sub>e emission from animal intestinal fermentation in Jiangsu Province from 2000 to 2019

29.28%,为第二大排放来源,奶牛、非奶牛、绵羊及家禽则分别占8.07%、6.90%、0.65%和0.50%。因此,合理控制猪养殖规模、加强猪粪减排处理尤为关键。

### 2.1.3 农业碳排放时序特征

2000—2019年江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放量总体呈现“降低-回升-降低”的变化趋势,根据增长率可知,当前全省农业整体已呈降低趋势,特别是在2007年(-6.58%)、2019年(-8.77%)有大幅减少,CO<sub>2</sub>e排放量于2005年达峰,为8 361.77万t,到2019年已降至6 623.10万t(图5)。

从时间变化上,农业CO<sub>2</sub>e排放强度相比农业CO<sub>2</sub>e排放量更能真实反映排放程度。伴随江苏省农业产业转型优化,2000—2019年间全省农业CO<sub>2</sub>e排放强度主要呈“降低-回升-降低”的趋势(图6)。2000—2003年间,CO<sub>2</sub>e排放强度呈先降低后升高的趋势,2003年达到峰值,为5.38 t·万元<sup>-1</sup>,此后逐年递减,2019年已降至1.31 t·万元<sup>-1</sup>。在2007年负增长率最高,相较上年排放强度降低了18.37%。

2000—2019年间,江苏省农业各排放源中,水稻种植(CH<sub>4</sub>)对农业碳排放总量贡献最大,平均贡献了47.04%的CO<sub>2</sub>e排放,其次是化肥生命周期隐含碳、动物粪便管理和动物肠道发酵,分别贡献了14.01%、10.73%和10.26%。此外,农用地N<sub>2</sub>O排放、农用柴油、农膜和农药生命周期隐含碳则分别贡献了9.73%、3.87%、2.34%和2.02%(表2)。在能源消费中,农业用电的碳排放量远低于其他排放源,贡献极低。总体来看,种植业碳排放量远高于畜牧业,分别平均占比79.01%、20.99%,其中畜牧业的比重整体呈现下降趋势,而种植业碳排放贡献率由2000年的74.48%提高至2019年的88.96%。农业资源投入中,农用柴油、农膜生命周期隐含碳排放的贡献率从2000年的2.95%、1.51%分别提高至2019年的5.24%、3.27%。畜禽肠道发酵对农业碳排放的贡献率于2007年出现明显降低,此后基本维持较低的比重,而动物粪便管理碳排在农业碳排放总量中的贡献率整体变化较小,仅在2019年呈现明显降低。

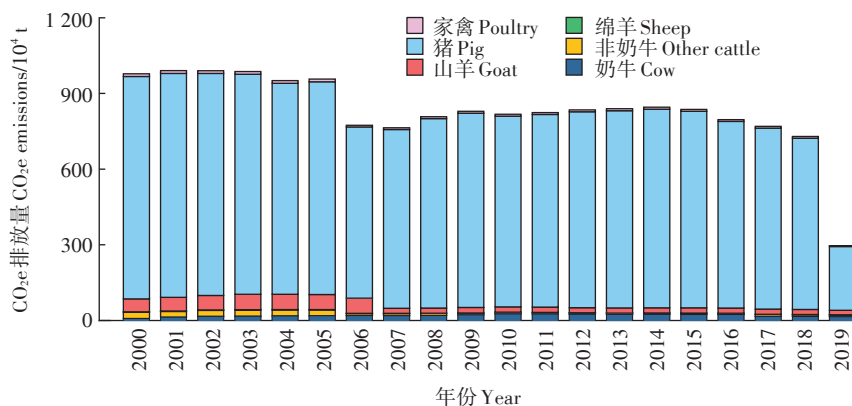


图4 2000—2019年江苏省畜牧业动物粪便管理CO<sub>2</sub>e排放变化

Figure 4 CO<sub>2</sub>e emission from animal manure management in Jiangsu Province from 2000 to 2019

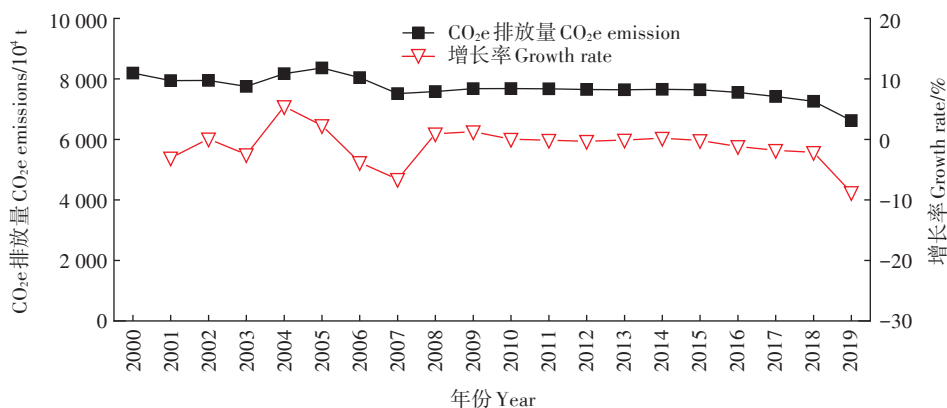


图5 2000—2019年江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放变化

Figure 5 Agricultural CO<sub>2</sub>e emissions in Jiangsu Province from 2000 to 2019

2.2 农业碳排放趋势预测

2.2.1 偏相关分析

本文采用STIRPAT模型预测江苏省碳排放趋势,先将2000—2019年全省农业CO<sub>2</sub>e排放量(I)、农

村人口(P)、农业人均GDP(A)、农业CO<sub>2</sub>e排放强度(T)按时间序列数据进行偏相关分析,P、A、T与I偏相关系数分别为0.749、-0.751、0.724。显著性(双侧)检验概率均在1%以下,说明剔除其他变量影响后,农

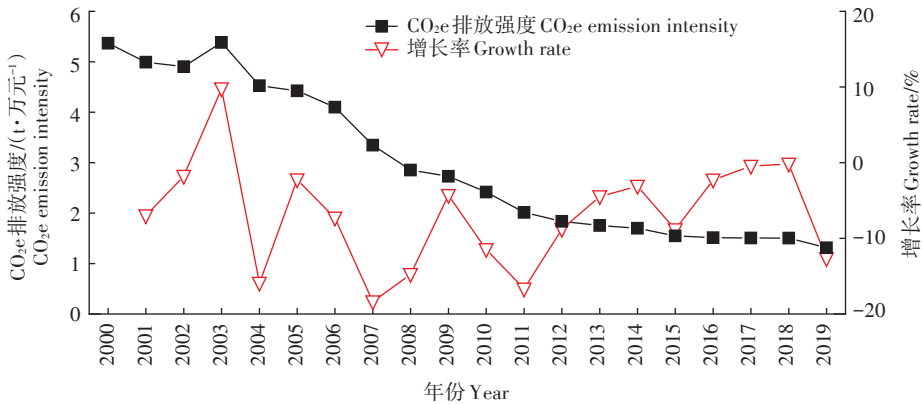


图6 2000—2019年江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放强度变化

Figure 6 Agricultural CO<sub>2</sub>e emission intensity in Jiangsu Province from 2000 to 2019

表2 2000—2019年江苏省农业碳排放源排放结构变化(%)

Table 2 The structural change of agricultural carbon emission sources in Jiangsu Province from 2000 to 2019(%)

年份 Year	种植业 Planting industry						畜牧业 Animal husbandry	
	化肥生命周期隐含碳 Fertilizer lifecycle embodied carbon	农药生命周期隐含碳 Pesticide lifecycle embodied carbon	农膜生命周期隐含碳 Agricultural film lifecycle embodied carbon	农用柴油 Agricultural diesel	水稻种植 Rice planting	农用地N <sub>2</sub> O排放 N <sub>2</sub> O emissions from agricultural land	动物肠道发酵 Animal intestinal fermentation	动物粪便管理 Animal manure management
2000	13.44	2.02	1.51	2.95	44.62	9.93	13.59	11.93
2001	13.97	2.09	1.58	3.01	41.99	10.15	14.73	12.47
2002	13.94	1.96	1.64	3.04	41.37	10.06	15.53	12.46
2003	14.18	2.05	1.71	3.14	39.41	10.18	16.61	12.73
2004	13.53	2.04	1.64	3.02	42.90	9.63	15.61	11.63
2005	13.38	2.24	1.64	3.00	43.84	9.40	15.06	11.44
2006	13.96	2.22	1.77	3.22	45.72	9.68	13.81	9.62
2007	14.95	2.33	2.03	3.42	49.05	10.32	7.73	10.17
2008	14.76	2.24	2.14	3.52	48.63	10.17	7.89	10.65
2009	14.71	2.17	2.33	3.81	48.05	10.10	8.03	10.80
2010	14.58	2.12	2.48	4.04	48.05	10.02	8.06	10.64
2011	14.43	2.04	2.63	4.15	48.18	9.80	8.02	10.74
2012	14.21	1.98	2.79	4.29	48.35	9.65	7.82	10.92
2013	14.05	1.92	2.90	4.45	48.42	9.51	7.75	10.98
2014	13.88	1.88	2.97	4.47	48.47	9.42	7.86	11.04
2015	13.75	1.85	2.81	4.53	48.85	9.38	7.88	10.95
2016	13.59	1.82	2.86	4.59	49.56	9.31	7.73	10.54
2017	13.45	1.79	2.95	4.68	50.05	9.15	7.56	10.38
2018	13.23	1.73	3.04	4.80	50.62	9.07	7.46	10.05
2019	14.19	1.84	3.27	5.24	54.73	9.69	6.56	4.48
平均值	14.01	2.02	2.34	3.87	47.04	9.73	10.26	10.73

注:农业用电产生的碳排放量占农业碳排放总量比例极低,因此忽略不计。  
Note: The proportion of carbon emissions from agricultural electricity in total agricultural carbon emissions is very low, so it is ignored.

村人口、农业CO<sub>2</sub>e排放强度分别与农业CO<sub>2</sub>e排放量间呈显著正相关,而农业人均GDP与农业CO<sub>2</sub>e排放量间呈显著负相关。

### 2.2.2 模型构建

将原始时间序列数据做自然对数处理后,运用SPSS 19.0进行标准化处理以消除量纲影响(表3),分别以ZI、ZP、ZA、ZT表示处理后的变量。进一步降维处理ZP、ZA、ZT时间序列数据,提取2个主成分,分别以F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>表示,可解释原变量的99.947%(表4),而Sig.值均远小于0.01,表明拟合效果好。根据表5,F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>与原变量间的关系为:

$$F_1 = -3.617ZP - 1.445ZA + 2.883ZT \quad (5)$$

$$F_2 = 4.276ZP + 1.029ZA - 2.538ZT \quad (6)$$

由上式构建F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>时间序列数据,将ZI作为被解释变量,F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>作为解释变量,采用两阶最小二乘法进行回归分析。方差分析结果的F值为11.617,同时t检验的Sig.值小于0.01,表明模型拟合较好(表6)。根据模型回归系数(表7)可得综合变量与因变量ZI的方程如式(7)所示,剔除Sig.值为1常数项,将式(5)、式(6)代入式(7)可得式(8)。

$$ZI = 0.452 F_1 + 0.611 F_2 \quad (7)$$

$$ZI = 0.977 8ZP - 0.024 4ZA - 0.247 6ZT \quad (8)$$

根据标准化公式及表3标准化描述量,可将式(8)(n=20)转换为:

$$\ln I = 6.989 0 + 0.247 4 \ln P - 0.001 8 \ln A - 0.024 2 \ln T + e \quad (9)$$

表3 标准化处理描述统计量

Table 3 Statistics described by the normalization

参数 Parameter	样本数 Sample number	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation
ZI	20	8.80	9.03	8.947 5	0.049 62
ZP	20	7.77	8.36	8.080 0	0.196 15
ZA	20	8.18	9.96	9.103 5	0.664 22
ZT	20	0.27	1.68	0.972 5	0.508 17

表4 主成分分析解释的总方差

Table 4 Principal component analysis of the total explained variance

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract sum of square loading			旋转平方和载入 Rotation sum of square loading		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积贡献率 Accumulative contribution rate/%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积贡献率 Accumulative contribution rate/%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积贡献率 Accumulative contribution rate/%
1	2.978	99.266	99.266	2.978	99.266	99.266	1.569	52.312	52.312
2	0.020	0.681	99.947	0.020	0.681	99.947	1.429	47.635	99.947
3	0.002	0.053	100.000						

表5 主成分分析得分系数曲线

Table 5 Principal component analysis of sub-coefficient matrix

参数 Parameter	得分系数 Score coefficient	
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
ZP	-3.617	4.276
ZA	-1.445	1.029
ZT	2.883	-2.538

表6 方差分析结果

Table 6 The results of the ANOVA

来源 Source	平方和 Sum of square	df	均方 Mean square	F	Sig.
回归	10.972	2	5.486	11.617	0.001
残差	8.028	17	0.472		
总计	19.000	19			

表7 模型系数

Table 7 Model coefficients

参数 Parameter	未标准化系数 Unnormalized coefficient		标准化系数 Beta	t 检验 t test	Sig.
	非标准化系数 B	标准误差 Standard error			
常数项	0.000	0.154		0.000	1.000
F <sub>1</sub>	0.452	0.158	0.452	2.865	0.011
F <sub>2</sub>	0.611	0.158	0.611	3.875	0.001

据此可知,江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放量的驱动因子模型为:

$$I = e^{6.989 0} P^{0.247 4} A^{-0.001 8} T^{-0.024 2} \quad (10)$$

将模型拟合得到的结果与估算值比较(图7),忽略其中部分年份实际生产活动中偶然因素影响,拟合值与估算值变化趋势总体近似,可以较好地反映未来碳排放趋势。而由式(10)可知,P、A、T对碳排放的弹性系数分别为0.247 4、-0.001 8和-0.024 2,表明在三者共同影响下,农村人口是江苏省碳排放主要的驱动因素,与CO<sub>2</sub>e排放量呈现较强的正相关性。因此,加快城镇化进程,提高能源、资源利用率和集约化水平,促进农业经济高质量发展,是农业实现减碳的重要途径。



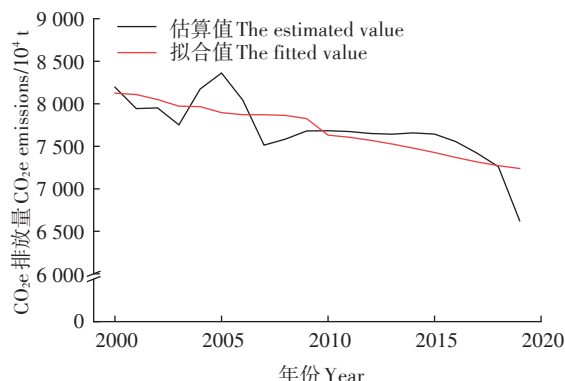


图7 2000—2019年模型拟合江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放量  
Figure 7 2000—2019 model fitting of agricultural CO<sub>2</sub>e emissions in Jiangsu Province

### 2.2.3 2020—2030年农业碳排放预测

根据当前江苏省农业发展情况,设置3种2020—2030年的情景模式(表8)。基准情景是根据江苏省2000—2019年农业CO<sub>2</sub>e排放情况,结合全省未来社会发展状况,将农村人口、人均农业GDP、农业CO<sub>2</sub>e排放强度的年均增长率进行设定得到的结果;两种低碳情景是在基准情景设定基础上对各影响因素做出的进一步调整,以期能够全面分析可能出现的情况。

根据设置的基准情景和低碳情景模式,运用STIRPAT模型对江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放进行拟合,得出3种情景下农业CO<sub>2</sub>e排放趋势(图8)。结果表明:基准情景中,江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放量呈持续下降趋势,在2030年,CO<sub>2</sub>e排放量预测为6 784.80万t,较2000年减少17.20%,但因受猪瘟等影响2019年出现非常态的大幅降低,该情景下2030年的排放量仍比2019年高2.44%;低碳情景1中,全省农业CO<sub>2</sub>e排放呈现出较基准情景更明显的下降趋势,该情景下维持了与基准情景的人均农业GDP增速水平,CO<sub>2</sub>e排放量预测到2030年为6 440.40万t,分别较2000年和2019年减少21.40%和2.76%,而相比基准情景下2030年农业碳排放量,低碳情景1农业碳排放量下降了344.40万t,降幅为5.08%;低碳情景2中,人均农业GDP增速较前两种情景降低,而农村人口、农业CO<sub>2</sub>e排放强度的降低速率则均有提高,预计到2030年,CO<sub>2</sub>e排放量为6 387.17万t,分别较2000年和2019年减少22.05%和3.56%,而相比基准情景和低碳情景1的2030年农业碳排放量,低碳情景2农业碳排放量分别下降了397.63万、53.23万t,降幅分别为5.86%、0.83%。由此表明,在低碳情景发展模式下,全省农业碳减排的潜力巨大,且在实现农业减碳的同时,也能兼顾农业经济的发展。

表8 不同情景模式下各参数增长率设定

Table 8 Parameter growth rate setting under different scenarios

情景 Scenario	年份 Year	增长率设定 Growth rate setting/%		
		农村人口 Rural population	人均农业GDP Agricultural GDP per capita	农业碳排放强度 Agricultural carbon emission intensity
基准情景 Baseline scenario	2020—2025	-3.00	5.50	-4.84
	2026—2030	-2.50	4.50	-4.50
低碳情景1 Low carbon scenario 1	2020—2025	-5.00	5.50	-6.50
	2026—2030	-4.50	4.50	-6.00
低碳情景2 Low carbon scenario 2	2020—2025	-5.50	4.00	-8.50
	2026—2030	-5.00	3.00	-8.00

注:人均农业GDP增长率依据《江苏省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中居民人均可支配收入年均增长率5.5%左右的目标设定;农业碳排放强度增长率设定参照国家“十四五”规划中的规定,到2025年单位生产总值CO<sub>2</sub>排放累计降低18%,年均下降4.84%。

Note: The growth rate of per capita agricultural GDP is based on the average annual average disposable income of residents in the "Fourteenth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of Jiangsu Province and the Outline of the 2035 Long-Term Goals". The target of a growth rate of about 5.5% is set; the growth rate of agricultural carbon emission intensity is set in accordance with the national "14th Five-Year Plan". By 2025, CO<sub>2</sub> emissions per unit of GDP will be reduced by 18%, an average annual drop of 4.84%.

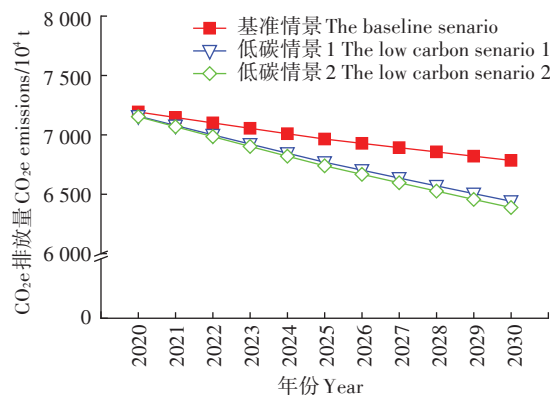


图8 不同情景模式下2020—2030年江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放预测

Figure 8 Prediction of agricultural CO<sub>2</sub>e emissions in Jiangsu Province from 2020 to 2030 under different scenarios

## 3 讨论

### 3.1 江苏省农业碳排放变化趋势与现状

本文以江苏省农业碳排放作为研究对象,较为系统地全省种植业与畜牧业部门的碳排放数据进行整合,从而对全省农业碳排放做出较客观的评估。本文发现当前江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放量和CO<sub>2</sub>e排放强度总体已呈现降低的变化趋势,其中排放量已于2005年达峰。目前,国内其他学者的研究结果也已证实江

苏省近年农业碳排放趋于减少,例如何艳秋等<sup>[27]</sup>的研究表明,江苏省已由中等排放向中低等排放等级转变。本文估算发现,2000—2019年间,全省农业CO<sub>2</sub>e排放量分别在2007年、2019年出现明显降低。根据碳排放出现大幅降低前后年份的相关统计报道,推测其与牲畜疫病如猪瘟等影响有关。受疫情影响,2007年江苏省主要牲畜山羊和2019年生猪年末存栏量出现明显减少,进而造成市场需求萎缩,直接导致了畜牧业碳排放量大幅降低,最终使农业碳排放量整体下降。

本文发现对江苏省农业碳排放贡献最大的排放源为水稻种植,其次是化肥生命周期隐含碳、动物粪便管理和动物肠道发酵。而已有的研究却表明,在我国种植业中,化肥施用是最主要的碳排放源,其碳排放量高低对农业碳排放的地区差异贡献最大<sup>[28]</sup>。事实上,化肥仅在生命周期特别是田间施用后贡献大量温室气体排放,而水稻种植过程尤其是伴随灌溉淹水造成的厌氧环境导致的CH<sub>4</sub>排放大多被国内以往的研究所低估或是忽略,这一类非CO<sub>2</sub>温室气体排放也应当被充分考虑在农业碳排放的估算当中。随着规模化水平提高,畜禽养殖场粪便管理方式的改变已成为导致畜牧业粪便管理过程温室气体排放增加的主要原因<sup>[29]</sup>,而这同样也是江苏省动物粪便管理温室气体排放近年来仍居高不下的一个可能的解释。本文重点关注了农业碳排放的时序特征,就空间分布而言,当前全省农业排放量空间集聚特征已越发明显,高排放量主要集中于苏北地区,排放强度则由全省普遍较高逐步变化为仅苏北、苏中部分地区较高<sup>[30]</sup>,高排放区域总体已逐渐减少。

### 3.2 江苏省农业实现碳减排的路径措施

本文模型预测江苏省2020—2030年农业碳排放量仍将实现稳步降低。在低碳情景中,全省农业碳排放量降低趋势更为明显,因此需要利用新技术、新生产方式加强对农业中种植业、畜牧业的主要温室气体排放源排放量的削减,从而有效控制农业温室气体的总体排放,实现减源增汇。黄冰冰等<sup>[31]</sup>指出,低碳种植技术的减碳效应取决于对应碳排放源占种植业碳排放的比重和其应用程度。因此,稻田优化灌溉、化肥减施增效均是控制并减少种植业乃至农业总体碳排放的重要举措之一。尽管化肥及农药在生产、施用等环节易造成环境负效应,但农户使用习惯仍需要很长时间转变,在缺乏优质、环保的替代品的前提下,发展精准农业可以在提高单产的同时减少化肥、农药用量,极大提高农业资源的利用效率和有效性。事实

上,除需重点推进化肥减施增效外,优化间歇灌溉、推广秸秆还田也可以更好地减少作物碳排放、增加碳汇<sup>[32]</sup>。MCCARL等<sup>[33]</sup>则认为可以通过直接减排、扩大陆地碳汇或是生产排放密集型产品的替代品来减少碳排放。总之,江苏省要发展低碳农业、实现经济高质量发展,必然伴随碳排放强度的持续降低,而排放强度与农业农户年龄、务农年限、年均农业收入比例、耕地面积、土地质量等因素关系密切<sup>[34]</sup>,因此,除研发和推广农业低碳技术外,还需加强农村建设、耕地保育和农民培训工作。

此外,畜牧业牲畜养殖规模的变化对江苏省农业碳排放可能具有重要影响。目前,一个普遍观点是适当减少需求侧畜牧产品的消费,可以有效减少非CO<sub>2</sub>温室气体的排放<sup>[35]</sup>。未来随着集约化、规模化养殖程度的提高,配套的畜禽粪便管理措施如不灵活改进,粪便管理过程仍会伴有大量温室气体的排放。与此同时,如不能积极采取饲料改良加工、动物育种和瘤胃微生物调节等措施,在维持反刍动物较大的养殖规模情况下,也会造成瘤胃发酵产生的CH<sub>4</sub>排放长期居高不下<sup>[36]</sup>。因此,需要注意的是,若养殖规模增加,未来全省农业碳排放量可能会在一段时期内呈升高趋势。除畜牧业相关碳排放存在增加的潜在可能性外,农业机械动力能源用量的持续增长也有可能增加未来农业碳排放总量,需要加强绿色能源的使用比重。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1)江苏省2000—2019年农业CO<sub>2</sub>e排放总量整体呈现降低—回升—降低的趋势,并且在2005年达峰,为8 361.77万t。全省农业CO<sub>2</sub>e排放强度呈现先升高后降低的趋势,2003年起已逐年降至2019年的1.31 t·万元<sup>-1</sup>,农业碳排放与经济增长已渐趋脱钩。

(2)江苏省种植业碳排放量比重明显高于畜牧业。主要种植业碳排放源中,水稻种植碳排放贡献最大,其次是化肥生命周期隐含碳、动物粪便管理和动物肠道发酵。主要畜禽碳排放源中,猪养殖过程中造成的碳排放远高于其他畜禽,而非能源消费造成的碳排放远高于能源消费,因此加快推广低碳技术尤为必要。

(3)2020—2030年,伴随城镇化发展、农业人均GDP提高以及农业碳排放强度的进一步降低,江苏省农业CO<sub>2</sub>e排放量仍将有持续下降的变化趋势,而在低碳情景下,全省农业CO<sub>2</sub>e排放量下降将更为明显,

并能实现农业经济与低碳减排兼顾的高效发展。

## 4.2 建议

根据本文研究结果,为在兼顾农业高产优质、养分高效利用和农业经济效益的前提下,实现江苏省农业固碳减排和绿色发展,从科学认识、技术方法和政策管理角度提出以下建议:

(1)开展农业领域“双碳”专题培训,促进全省农业企业、农户等牢固树立低碳发展理念,并深入了解自身生产活动中碳排放分布结构,从而更具针对性地采取相应的减碳策略。

(2)重点加强全省水稻种植、化肥生命周期隐含碳及畜禽养殖(特别是猪养殖过程)等当前主要温室气体排放源的减排力度,具体可通过科学调整水稻田灌溉模式、加速新型绿色肥料生产应用以替代传统化肥、推进饲料改良、改进畜舍设计、优化畜禽圈舍尾气、粪便管理以及强化农牧废弃物资源化利用(如有机无机配施、种养结合生产模式)等技术途径实现。

(3)针对近年全省农业来源于柴油的碳排放略呈升高的趋势,政府需加强农机购置补贴政策的引导和倾斜,提高高效节能的新型农机使用比例及太阳能、风能等在农机能源中的比重。此外,政府可在科学征收碳税的基础上,逐步扩大征税对象,倒逼农业产业转型,同时科学规划未来种植业种植结构和畜牧业养殖结构,对温室气体排放量高的作物种植和畜禽养殖的规模加以合理控制,以此加快实现全省农业碳中和目标并保障农业高质量发展。

## 参考文献:

- [1] TIAN Y, ZHANG J, HE Y Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(6): 1393-1403.
- [2] 许萍萍, 赵言文, 陈颖明, 等. 江苏省农田生态系统碳源/汇、碳足迹动态变化[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 238-243. XU P P, ZHAO Y W, CHEN H M, et al. Dynamic changes of carbon source/sink and carbon footprint of farmland ecosystem in Jiangsu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 238-243.
- [3] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 247-252. HU X D, WANG J M. Estimation of greenhouse gas emissions from livestock and poultry in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 247-252.
- [4] HAVLIK P, VALIN H, HERRERO M, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(10): 3709-3714.
- [5] FAO. FAOSTAT[DB/OL].[2021-06-01]. <http://www.fao.org/faostat/>zh/#data/EM.
- [6] HUANG X Q, XU X C, WANG Q Q, et al. Assessment of agricultural carbon emissions and their spatiotemporal changes in China, 1997—2016[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(17): 3105.
- [7] WANG G F, LIAO M, JIANG J. Research on agricultural carbon emissions and regional carbon emissions reduction strategies in China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2627.
- [8] LUO Y S, LONG X L, WU C, et al. Decoupling CO<sub>2</sub> emissions from economic growth in agricultural sector across 30 Chinese provinces from 1997 to 2014[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159: 220-228.
- [9] XIONG C H, CHEN S, XU L T. Driving factors analysis of agricultural carbon emissions based on extended STIRPAT model of Jiangsu Province, China[J]. *Growth and Change*, 2020, 51(3): 1401-1416.
- [10] 黄燕, 周买春, 陈瑛. 中国与巴西农业碳排放动态变化及影响因素分析[J]. *世界农业*, 2018(6): 116-121. HUANG Y, ZHOU M C, CHEN Y. Analysis of dynamic changes and influencing factors of agricultural carbon emissions in China and Brazil[J]. *World Agriculture*, 2018(6): 116-121.
- [11] 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. ZHAO Y. Analysis and trend prediction of factors affecting the dynamic changes of agricultural carbon emissions in Jiangsu Province[J]. *China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(5): 97-102.
- [12] LIU Y H, WANG L X, BAO S M, et al. Effects of different vegetation zones on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in coastal wetlands: A model case study[J]. *The Scientific World Journal*, 2014: 412183.
- [13] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. *热带地理*, 2014, 34(2): 248-258. LIU M D, MENG J J, LIU B H. Research progress of carbon emission accounting methods at home and abroad[J]. *Tropical Geography*, 2014, 34(2): 248-258.
- [14] ALIYU G, LUO J, DI H, et al. Nitrous oxide emissions from China's croplands based on regional and crop-specific emission factors deviate from IPCC 2006 estimates[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 547-558.
- [15] SOOK J E, HAK Y S, BACK C S, et al. Application of 2006 IPCC guideline to improve greenhouse gas emission estimation for livestock agriculture[J]. *Journal of Animal Environmental Science*, 2012, 18(2): 75-84.
- [16] ALINA F, KOSTINEK J, ECKL M, et al. Estimating CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and CO emissions from coal mining and industrial activities in the upper silesian coal basin using an aircraft-based mass balance approach[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(21): 12675-12695.
- [17] 刘学之, 孙鑫, 朱乾坤, 等. 中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J]. *生态经济*, 2017, 33(11): 21-27. LIU X Z, SUN X, ZHU Q K, et al. Research review of related measurement methods of carbon dioxide emissions in China[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(11): 21-27.
- [18] ZHANG Y, LI C S, ZHOU X J, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 151(1): 75-108.



- [19] 张军莉,刘丽萍. 国内区域碳排放预测模型应用综述[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(4): 15-21. ZHANG J L, LIU L P. Review of the application of domestic regional carbon emission prediction models[J]. *Guide Journal of Environmental Science*, 2019, 38(4): 15-21.
- [20] LIU D, XIAO B. Can China achieve its carbon emission peaking? A scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 647-657.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[DB/OL].[2021-06-01]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. National data[DB/OL].[2021-06-01]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>.
- [22] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emission, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232.
- [23] EHRLICH P R, HOLDREN J P. Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive[J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [24] 张乐勤,陈素平,王文琴,等. 安徽省近15年建设用地变化对碳排放效应测度及趋势预测——基于STIRPAT模型[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 950-958. ZHANG L Q, CHEN S P, WANG W Q, et al. Measurement and trend analysis of carbon emissions from construction land changes in Anhui in the recent 15 years: Based on STIRPAT model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3): 950-958.
- [25] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [26] 黎孔清,陈俭军,马豆豆. 基于STIRPAT和GM(1,1)模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 345-352. LI K Q, CHEN J J, MA D D. Growth mechanism and trend prediction of carbon emissions from farmland input in Hunan Province based on STIRPAT and GM(1,1) models[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(2): 345-352.
- [27] 何艳秋,陈柔,吴昊玥,等. 中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1269-1282. HE Y Q, CHEN R, WU H Y, et al. Research on the spatial pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1269-1282.
- [28] 胡婉玲,张金鑫,王红玲. 中国种植业碳排放时空分异研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(15): 92-95. HU W L, ZHANG J X, WANG H L. Research on the spatial and temporal variation of carbon emissions of China's planting industry[J]. *Statistics and Decision*, 2020, 36(15): 92-95.
- [29] 朱志平,董红敏,魏莎,等. 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 743-748. ZHU Z P, DONG H M, WEI S, et al. The impact of China's livestock manure management changes on greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Agro-Environmental Sciences*, 2020, 39(4): 743-748.
- [30] 陈慧,付光辉,刘友兆. 江苏省县域农业温室气体排放:时空差异与趋势演进[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 1084-1094. CHEN H, FU G H, LIU Y Z. Agricultural greenhouse gas emissions at county level in Jiangsu Province: Temporal and spatial differences and trend evolution[J]. *Resources Science*, 2018, 40(5): 1084-1094.
- [31] 黄冰冰,张小有,张继钦. 低碳种植技术的减碳效应和应用驱动因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1082-1090. HUANG B B, ZHANG X Y, ZHANG J Q. Carbon reduction effect and application driving factors of low-carbon planting technology[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(12): 1082-1090.
- [32] ZHANG D, SHEN J, ZHANG F, et al. Carbon footprint of grain production in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4126.
- [33] MCCARL B A, SCHNEIDER U A. Greenhouse gas mitigation in U. S. agriculture and forestry[J]. *Science*, 2001, 294(5551): 2481.
- [34] 王秀兰,孟焱鑫,单玉红,等. 农户农业生产的碳排放及其影响因素——以湖北省部分地区为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 160-167. WANG X L, MENG Y X, SHAN Y H, et al. Carbon emissions and influencing factors of farmers' agricultural production: Taking some areas of Hubei Province as an example[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 160-167.
- [35] FRANK S, HAVLIK P, STEHFEST E, et al. Agricultural non-CO<sub>2</sub> emission reduction potential in the context of the 1.5 °C target[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(1): 66-72.
- [36] 曾泽,张华琦,桂干北,等. 反刍动物甲烷排放的测量及其调控研究进展[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(5): 1-7. ZENG Z, ZHANG H Q, GUI G B, et al. Research progress on the measurement and regulation of methane emissions from ruminants[J]. *Chinese Journal of Livestock Ecology*, 2020, 41(5): 1-7.