

DOI: 10.20103/j.stxb.202310132212

顾纪祥, 苗雨青, 孙方虎, 洪炜林, 余健, 武传胜, 高志杰, 肖溢清, 葛晓玮. 安徽省农田生态系统温室气体排放分析及情景模拟. 生态学报, 2024, 44(17): 7520-7535.

Gu J X, Miao Y Q, Sun F H, Hong W L, Yu J, Wu C S, Gao Z J, Xiao Y Q, Ge X W. Analysis and scenario simulation of greenhouse gas emissions from farmland ecosystems in Anhui Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7520-7535.

安徽省农田生态系统温室气体排放分析及情景模拟

顾纪祥¹, 苗雨青^{1,2,3,*}, 孙方虎¹, 洪炜林¹, 余健^{1,2}, 武传胜³, 高志杰¹, 肖溢清¹, 葛晓玮¹

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002

2 江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 芜湖 241002

3 环境激素与生殖发育安徽省重点实验室, 阜阳 236037

摘要: 科学认知农田生态系统温室气体排放状况是开展农业减排降碳的重要前提, 对于推动农业可持续发展、促进农田高质量建设具有重要意义。以安徽省为例, 利用联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 排放系数法评估农田生态系统温室气体排放水平, 运用对数平均迪式指数分解 (LMDI) 方法解析农田生态系统温室气体排放驱动机制, 最后基于 STIRPAT 模型并结合情景分析方法对未来农田生态系统温室气体排放进行模拟预测。结果表明: (1) 安徽省农田生态系统温室气体排放总量整体呈增加趋势, 水稻种植 CH₄ 排放的贡献最大, 占比达 55.27%, 空间分布上呈现为皖中地区排放量较高、皖北和皖南地区相对较低。(2) 安徽省农田生态系统单位播种面积排放强度呈增加趋势, 单位农业产值排放强度呈下降趋势, 两种排放强度均呈“北低南高”分布特征, 即淮河以北地区排放强度及变化幅度相对较低, 淮河以南地区表现为相反规律。(3) 农业经济水平与安徽省农田生态系统温室气体排放呈现出正效应, 是影响排放量增加的主要因素; 农业生产效率、农业生产结构、农业人口规模均呈现出负效应, 其中农业生产效率与农业人口规模因素对农田生态系统温室气体排放的抑制作用较强。(4) 基准情景、低碳情景、绿色发展情景与可持续发展情景下农田生态系统温室气体排放呈先上升达到峰值后逐渐降低的变化趋势, 其中基准情景在 2028 年达峰, 其余三种情景在 2025 年实现达峰目标。粗放发展情景下农田生态系统温室气体排放在未来呈不断增加的发展趋势, 未能实现达峰目标但增速逐渐放缓, 农业发展表现出较强的减排潜力。安徽省应加强控制水稻种植 CH₄ 排放, 综合考量区域差异, 多措并举、因地制宜地制定农业减排政策。

关键词: 农田生态系统; 温室气体排放; 时空变化; 影响因素; 情景模拟; 安徽省

Analysis and scenario simulation of greenhouse gas emissions from farmland ecosystems in Anhui Province

GU Jixiang¹, MIAO Yuqing^{1,2,3,*}, SUN Fanghu¹, HONG Weilin¹, YU Jian^{1,2}, WU Chuansheng³, GAO Zhijie¹, XIAO Yiqing¹, GE Xiaowei¹

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China

2 Anhui Provincial Key Laboratory of Earth Surface Processes and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin, Wuhu 241002, China

3 Anhui Province Key Laboratory of Environmental Hormone and Reproduction, Fuyang 236037, China

Abstract: Scientific understanding of greenhouse gas emissions from farmland ecosystems is an essential prerequisite for implementing agricultural emission reduction and carbon reduction measures, and is of significant importance for promoting sustainable agricultural development and facilitating high-quality construction of farmlands. Taking Anhui Province as an

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目 (2108085MD126); 国家自然科学基金项目 (41601083); 环境激素与生殖发育安徽省重点实验室开放课题 (FSKFKT012); 大学生创新创业训练计划项目 (S202410370002)

收稿日期: 2023-10-13; 网络出版日期: 2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: miaoyqjh@ahnu.edu.cn

example, this study employs the IPCC emission factor method to assess the level of greenhouse gas emissions from farmland ecosystems. The Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method is used to analyze the driving mechanisms behind these emissions. Finally, based on the STIRPAT model and combined with scenario analysis methods, future emissions from farmland ecosystems are simulated and predicted. The results show that: 1) The total greenhouse gas emissions from the farmland ecosystem in Anhui Province are of an overall increasing trend, with CH₄ emissions from rice paddies contributing the most, accounting for 55.27% of the total. The spatial distribution shows higher emissions in central Anhui and lower emissions in northern and southern Anhui. 2) In Anhui Province, the intensity of emissions per unit sowing area is increasing, while the intensity of emissions per unit of agricultural output value is decreasing. Both types of emission intensity exhibit a “low in the north and high in the south” distribution pattern, meaning that areas in north of the Huai River have relatively lower emission intensity and variation, while areas in south of the Huai River exhibit the opposite trend. 3) The level of agricultural economy has a positive effect on the greenhouse gas emissions from the farmland ecosystem in Anhui Province, being the main factor contributing to the increase in emissions; agricultural production efficiency, agricultural production structure, and agricultural population size all show negative effects, with agricultural production efficiency and population size having a stronger inhibitory effect on emissions. 4) Under baseline, low-carbon, green development, and sustainable development scenarios, the greenhouse gas emissions from farmland ecosystems show an initial increase to a peak followed by a gradual decrease, with the baseline scenario peaking in 2028 and the other three scenarios achieving their peak targets by 2025. Under the extensive development scenario, the greenhouse gas emissions from farmland ecosystems are projected to increase continuously in the future, failing to achieve the peak target but with a gradually slowing rate of increase, indicating significantly potential for emission reduction in agricultural development. Anhui Province should strengthen control over CH₄ emissions from rice cultivation, take into account regional differences, and formulate agricultural emission reduction policies that are multi-faceted and tailored to local conditions.

Key Words: farmland ecosystems; greenhouse gases emissions; spatial-temporal variations; influencing factors; scenario simulation; Anhui Province

控制温室气体排放,稳定全球气温增幅是实现人类社会可持续发展的重要一环^[1]。在构建人类命运共同体的理念背景下,积极参与应对气候变化全球治理,高质量推进“双碳”目标实现,对于协调经济发展和生态环境保护关系^[2],助推低碳经济转型^[3],保障国家生态文明建设具有重要意义。工业革命以来,人类活动对生态系统的干扰程度不断增加,大气 CO₂ 浓度从 1750 年约 277 μmol/mol 增加到 2022 年的 417.9 μmol/mol^[4],引发的气候变化及其影响已成为国际社会普遍关注的重大问题。陆地生态系统是地球系统多圈层耦合的重要组成部分,对全球和区域气候具有重要影响^[5],而农田生态系统作为陆地生态系统的组成部分,是温室气体排放的重要来源,贡献了全球范围内约 14% 的人为温室气体排放与 58% 的非人为 CO₂ 排放^[6]。在中国,农业生产活动是除能源消耗和工业生产过程外最大的人类温室气体排放源^[7]。中国农业源温室气体排放约占全国排放总量的 17%,农业活动排放的 CH₄ 和 NO₂ 分别占全国排放总量的 50% 和 92%^[8]。“十四五”时期,我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向的关键时期,开展农田生态系统温室气体排放研究,厘清其未来发展演变态势,将为科学制定农业减排策略、推动农业可持续发展提供重要参考。

未来生态系统最大气候变化减缓潜力的发挥依赖于对国土空间和生态系统的有效管理^[1]，“双碳”目标的提出对农田及其他生态系统的管理战略与研究提出了更高要求和新的焦点。就现有研究来看,因农业资源禀赋、农业经济发展阶段差异,不同区域农田生态系统温室气体排放总量与类型存在较大差异。学者们主要利用生命周期评估法(LCA 模型)^[9-10]、联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)排放系数法^[11]、脱氮分解模型(DNDC 模型)^[12]等方法对农田生态系统温室气体展开评估;也有学者将农田生态系统温室气体排放与农业经济成果的比值作为排放强度与效率的衡量指标^[13-14],进一步揭示了农业源温室气体排放特征。就研究尺度而言,农田生态系统温室气体排放评估涉及国际^[15]、区域^[16]、省份^[17]、县际^[18]等多个层面,研究成果较好反映了不同区域农田生态系统的温室气体排放状况。在影响因素分析方面,学者们通过 Kaya 恒等式与

LMDI 法^[19-20]、IPAT 或 STIRPAT 模型^[21-22]、地理探测器^[23]、地理加权回归^[24]等研究方法,深入探讨了农业产业结构、农村人口规模、农业技术水平、居民富裕度等多种社会经济要素对温室气体排放的影响,以驱动因素贡献性的量化反映不同区域农田生态系统温室气体的排放差异。针对未来趋势的分析与研究,目前学者们多通过设定农业数据指标以建模的方式来预测农业碳排放未来变化。王树芬等采用可拓展的随机性环境影响评估模型,针对山西省农业社会经济因素设置三种变化情景进行预测,提出适合山西省发展的农业减排策略^[25]。高晨曦等建立 RBF 核 ϵ -SVR 农业碳排放预测模型,明确了河南省农业已实现碳达峰目标,并为未来全省实现农业碳中和指明了政策方向^[22]。陈睿涛等通过对甘肃省农业温室气体排放量及排放强度进行 R/S 分析,以灰色预测模型得出未来农业碳排放量及强度值将继续呈现出下降的变化趋势^[26]。这些研究对于国家宏观掌握未来农业碳排放趋势具有积极作用,为后续研究提供了可借鉴的成果。但对于农田生态系统来说,已有研究中大多仅考虑影响因素分解方法或未来趋势预测,研究相对割裂,对未来达峰路径的情景模拟也有待深入研究。

安徽省是我国东部重要的粮食主产省,在全国农业布局中占据重要地位,是研究我国东部农田生态系统响应气候与环境变化的典型区域。目前,已有学者研究了安徽省农田生态系统碳源/汇的时空差异^[27],分析了皖江城市带农田碳排放的动态特征^[28],然而,安徽省农田生态系统温室气体排放驱动机制及未来发展仍尚不明确。鉴于此,本文以安徽省为例,在构建农田生态系统温室气体排放核算体系的基础上,研究 2000—2020 年农田生态系统温室气体排放与强度的时空演化特征,通过 LMDI 加法分解模型对农田生态系统温室气体排放驱动因素进行分解分析,最后利用 STIRPAT 模型预测不同情景下农田生态系统温室气体排放未来变化及达峰时间,以期能够增进对我国典型农业省份农田生态系统温室气体排放现状及未来演变趋势的宏观认知,为当地农业可持续发展及温室气体减排提供理论依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

安徽省(114°54'—119°37'E, 29°41'—34°38'N)位于我国华东地区,地处长江、淮河流域中下游,总面积 $14.01 \times 10^4 \text{ km}^2$,属亚热带湿润季风气候与暖温带半湿润季风气候的过渡地带。2000—2020 年,全省年平均气温为 15—16 °C,年平均降水量为 886—1685 mm。安徽省地势西南高东北低,地貌类型以平原、丘陵和低山为主,平均海拔 119.3 m,从北向南划分为淮北平原(I)、江淮丘陵(II)、皖西大别山区(III)、沿江平原(IV)和皖南山区(V)五大自然区域(图 1),总体呈现“三山一水六分田”的自然地理格局,生态区位尤为重要。安徽省土地利用类型以农田为主,是我国的重要的农业大省和农产品生产基地,农业在其经济体系中占有主要地位。2020 年全省耕地面积约 588.4 万 hm^2 ,粮食播种面积达 728.9 万 hm^2 ,其中,稻谷、小麦、玉米等主要粮食作物种植面积分别为 251.2 万 hm^2 、282.5 万 hm^2 、123.5 万 hm^2 ,全年粮食产量达 4019 万 t,为保障国家粮食供给及粮食安全发挥重要作用。

1.2 数据来源与处理

本文农田生态系统温室气体排放测算数据及社会

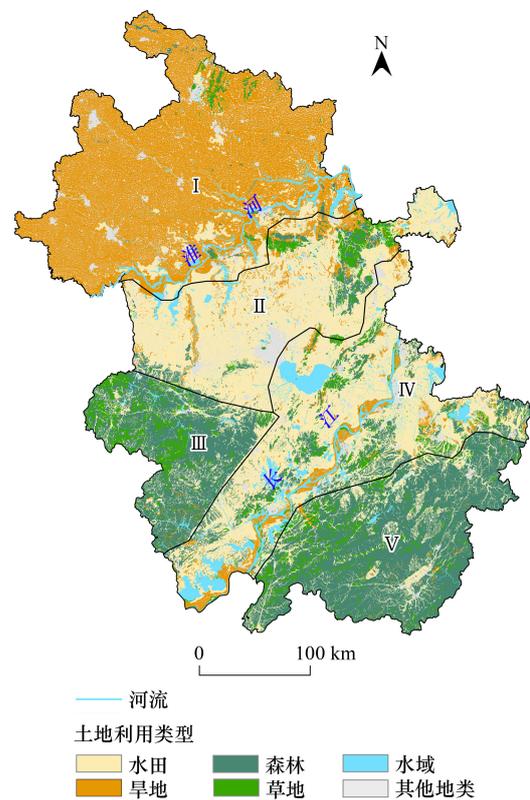


图 1 安徽省土地利用概况

Fig.1 Land use of Anhui Province

I: 淮北平原; II: 江淮丘陵; III: 皖西大别山区; IV: 沿江平原; V: 皖南山区

经济数据主要来源于 2001—2021 年《安徽省统计年鉴》和各地市统计年鉴,其中各地市不同类型水稻播种面积以及氮肥、复合肥使用量等缺失数据通过《中国农业年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国县域统计年鉴》补齐。化肥、农药、农膜、农用柴油等均为当年用量,其中化肥为折纯量;灌溉面积为有效灌溉面积。考虑到行政区划调整和数据可获得性,结合本文研究的需要,将研究期内巢湖市与合肥市测算数据合并处理。为剔除价格因素干扰,经济数据均采用 2000 年可比价格,将其他年份进行折算。

2 研究方法

2.1 农田生态系统温室气体排放核算模型

本研究分析农田生态系统温室气体排放主要包括 3 个部分^[17]:一是农业生产性投入产生的农田 CO₂ 排放;二是水稻种植引起的稻田 CH₄ 排放;三是农用地化肥、复合肥使用以及秸秆还田等氮素输入导致的农田 N₂O 排放。研究采用 IPCC 排放系数法核算农田生态系统温室气体排放量,排放因子主要参考 IPCC 的评估报告,国家发展与改革委员会《省级温室气体清单编制指南(试行)》以及国内外专家学者研究并公开发表的数据,核算模型如下:

$$E = \sum E_i = \sum EF_i \times a_i \times x \quad (1)$$

式中, E 表示农田生态系统温室气体排放总量(以 CO₂-eq 计); E_i 表示各来源农田生态系统温室气体排放量; EF_i 和 a_i 分别表示各来源农田生态系统温室气体排放系数和活动水平; x 为 CH₄ 和 N₂O 的全球变暖潜力值。根据 IPCC 国家温室气体清单指南,百年时间尺度上甲烷和氧化亚氮的全球变暖潜力值分别为 27.9 和 273。

(1) 农田 CO₂ 排放测算方法

农田生产过程中大量化肥、农药和生产工具的使用会带来大量的温室气体排放^[29]。本研究选取化肥、农药、农膜、农用柴油、农田翻耕、农业灌溉以及农业机械使用作为农业生产性投入产生 CO₂ 排放的主要途径,计算公式为:

$$E_{CO_2} = \sum EF_j \times T_j \times 44/12 \quad (2)$$

式中, E_{CO_2} 表示农田生态系统 CO₂ 排放当量; EF_j 表示各项农业生产性投入的温室气体排放系数,其取值及来源见表 1; T_j 表示各项农业生产性投入的数量;44/12 为转换系数,即 C 当量转换为 CO₂ 量。

表 1 农业生产活动中各项投入的温室气体排放系数

Table 1 Greenhouse gas emission coefficients of various inputs in agricultural production activities

排放源 Emission source	温室气体排放系数 Greenhouse gas emission coefficient	数据来源 Reference source
化肥 Chemical fertilizer	0.8956 kg(C)/kg	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
农药 Pesticide	4.9341 kg(C)/kg	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
农膜 Agricultural film	5.1800 kg(C)/kg	IREEA(南京农业大学农业资源与生态环境研究所)
农用柴油 Agricultural diesel	0.5927 kg(C)/kg	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)
农田翻耕 Farmland ploughing	3.1260 kg(C)/hm ²	伍芬琳等 ^[30]
农业灌溉 Agricultural irrigation	20.4760 kg(C)/hm ²	Dubey 等 ^[31]
农业机械 Farm machinery	16.4700 kg(C)/hm ² 0.1800 kg(C)/Kw	赵荣钦等 ^[32]

(2) 稻田 CH₄ 排放测算方法

稻田种植是农田生态系统 CH₄ 排放的主要来源,水稻生长过程中稻田因淹水厌氧发酵而会产生大量的甲烷排放,计算公式为:

$$E_{CH_4} = \sum EF_k \times AD_k \times 27.9 \quad (3)$$

式中, E_{CH_4} 表示农田生态系统 CH₄ 排放总量换算成的 CO₂ 当量; EF_k 表示第 k 类稻田的 CH₄ 排放系数,根据《安

徽省统计年鉴》对粮食结构的统计分类, k 分别指早稻、中稻(一季晚稻)、双季晚稻;参考闵继胜等^[33]对我国各省水稻生长周期内甲烷排放系数的研究,确定排放系数为:早稻 167.5 kg(CH₄)/hm²、中稻(一季晚稻) 512.4 kg(CH₄)/hm²、双季晚稻 276.0 kg(CH₄)/hm²; AD_k 表示该类型水稻的播种面积;27.9 为甲烷的全球变暖潜力值,即 CH₄ 当量转换为 CO₂ 量。

(3) 农用地 N₂O 排放核算

农用地 N₂O 排放包括农田有机氮肥、粪肥、秸秆还田等氮素输入导致的氧化亚氮直接排放,以及来源于大气氮沉降和氮淋溶径流引起的氧化亚氮间接排放^[34],计算公式如下:

$$E_{N_2O} = (N_2O_{直接} + N_2O_{沉降} + N_2O_{淋溶}) \times 273 \quad (4)$$

$$N_2O_{直接} = N_{总} \times EF_{直接} \quad (5)$$

$$N_2O_{沉降} = N_{总} \times EF_{沉降} \times 10\% \quad (6)$$

$$N_2O_{淋溶} = N_{总} \times EF_{淋溶} \times 20\% \quad (7)$$

式中, E_{N_2O} 表示农田生态系统 N₂O 排放总量换算成的 CO₂ 当量; $N_2O_{直接}$ 、 $N_2O_{沉降}$ 、 $N_2O_{淋溶}$ 分别表示农用地 N₂O 直接排放量、大气氮沉降产生的 N₂O 排放量以及氮淋溶径流产生的 N₂O 排放量; $N_{总}$ 表示农用地总输入氮量,包括投入的氮肥、复合肥以及秸秆还田的总氮量,其中复合肥含氮量按 1/3 折算^[35]; $EF_{直接}$ 、 $EF_{沉降}$ 、 $EF_{淋溶}$ 分别表示农用地 N₂O 直接排放系数、大气氮沉降引起的 N₂O 排放系数和氮淋溶径流引起的 N₂O 排放系数,如表 2 所示;根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》,农田氮沉降中氮的挥发率为 10%,氮淋溶和径流的损失氮量以农用地总氮输入量的 20% 来估算;273 为转换系数,即 N₂O 当量转换为 CO₂ 量。

表 2 农用地氧化亚氮排放系数

Table 2 Nitrous oxide emission factors for agricultural land

排放源 Emission source	排放系数/(kg N ₂ O-N/kg N) Emission coefficient	数据来源 Reference source
氧化亚氮直接排放(IV区) Direct emission of nitrous oxide(Area IV)	0.0109 (0.0026—0.022)	《省级温室气体清单编制指南(试行)》
氧化亚氮间接排放(大气氮沉降) Indirect emission of nitrous oxide(atmospheric nitrogen deposition)	0.01	
氧化亚氮间接排放(氮淋溶径流) Indirect emission of nitrous oxide(nitrogen leaching runoff)	0.0075	

IV 区包括浙江、上海、江苏、安徽、江西、湖南、湖北、四川、重庆,括号中数字为排放系数的推荐范围

其中,秸秆还田的氮量计算公式如式(8):

$$N_{秸秆} = \sum_{j=1}^n \left[\beta_j K_j \left(\frac{M_j}{L_j} - M_j \right) + R_j K_j \frac{M_j}{L_j} \right] \quad (8)$$

式中, $N_{秸秆}$ 表示农用地秸秆还田的氮输入量; M_j 、 L_j 、 R_j 分别表示各农作物的产量、经济系数、根冠比; β_j 、 K_j 分别表示各农作物的秸秆还田率和秸秆含氮率; j 表示农作物类别,参考安徽省统计局公布的农作物产量数据,本文主要研究包括水稻、小麦、玉米、大豆、薯类、花生、油菜籽、棉花、蔬菜类、瓜果共 10 类主要农作物。根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》,各参数取值见表 3。

2.2 农田生态系统温室气体排放强度分析方法

温室气体排放强度指标能够更加直观的反映地区的温室气体排放水平,使不同发展水平城市之间的温室气体排放研究具有可比性^[37]。本研究分析两类农田生态系统温室气体排放强度,分别为单位播种面积排放强度(CI_1)和单位农业产值排放强度(CI_2),计算公式如下:

$$CI_{1,j} = E_j / S_j \quad (9)$$

$$CI_{2,j} = E_j / G_j \quad (10)$$

式中, $CI_{1,j}$ 和 $CI_{2,j}$ 分别表示区域 j 的农田生态系统单位播种面积排放强度(t CO₂-eq/hm²) 和单位农业产值排放强度(t CO₂-eq/万元); E_j 表示区域 j 的农田生态系统温室气体排放量; S_j 和 G_j 分别为区域 j 的农作物总播种

面积和农业总产值。

表 3 主要农作物参数

Table 3 Parameters of the main crops

作物种类 Crop type	经济系数 Economic coefficient	根冠比 Root/shoot ratio	秸秆含氮率 Nitrogen content of straw	秸秆还田率 ^[36] Straw return rate
水稻 Rice	0.489	0.125	0.00753	0.5438
小麦 Wheat	0.434	0.166	0.00516	0.4975
玉米 Corn	0.438	0.17	0.0058	0.4366
大豆 Soybean	0.425	0.13	0.0181	0.5071
薯类 Potatoes	0.667	0.05	0.011	0.6656
花生 Peanut	0.556	0.2	0.0182	0.4372
油菜籽 Rape seed	0.271	0.15	0.00548	0.5491
棉花 Cotton	0.383	0.2	0.00548	0.4370
蔬菜类 Vegetables	0.83	0.25	0.008	0.6031
瓜果 Cucurbits	0.7	0.05	0.011	0.6031

2.3 农田生态系统温室气体排放影响因素分解模型

基于 LMDI 加法分解模型,以农业生产效率因素、农业产业结构因素、农业经济水平因素、农业人口规模因素构建农田生态系统温室气体排放驱动因素体系,具体分解式如下:

$$E = \frac{E}{AG} \times \frac{AG}{AGV} \times \frac{AGV}{P} \times P \quad (11)$$

在公式(11)的基础上,令: $F_1 = \frac{E}{AG}$ 、 $F_2 = \frac{AG}{AGV}$ 、 $F_3 = \frac{AGV}{P}$ 、 $F_4 = P$, 则:

$$\Delta E = E_t - E_0 = \sum_{w=1}^m \Delta F_w \quad (12)$$

$$\Delta F_w = \sum \frac{E_t - E_0}{\ln E_t - \ln E_0} \times (\ln F_w^t - \ln F_w^0) \quad (13)$$

式中, E 表示农田生态系统温室气体排放总量; AG 、 AGV 、 P 分别为农业总产值、农林牧渔业总产值和农村人口数量; F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别表示农业生产效率、农业生产结构、农业经济水平和农业人口规模。 t 表示时期 ($t=1, 2, 3, \dots, T$), 0 指基期; ΔF_w 表示各驱动因素 F_w 对农田生态系统温室气体排放的变化量的贡献值。

为衡量各因素对农田生态系统温室气体排放的影响程度,参考 LMDI 贡献度分析方法^[38],当驱动因素的贡献度越接近零,对温室气体排放的影响程度越小。

$$\text{con} = \frac{\Delta F}{\sum |\Delta F|} \quad (14)$$

式中, con 表示驱动因素的贡献度, ΔF 表示驱动因素的贡献值, $|\Delta F|$ 表示该驱动因素贡献值的绝对值。

2.4 农田生态系统温室气体排放情景预测模型

STIRPAT 可拓展的随机环境影响评估模型能够对人口、经济、技术与环境之间的关系进行评估并应用于温室气体排放未来预测^[39],其表达式为:

$$I = aP^b A^c T^d \varepsilon \quad (15)$$

式中, I 、 P 、 A 、 T 分别表示环境状况、人口因素、富裕程度和技术水平; a 为模型常数, b 、 c 、 d 分别为三个参数因子的弹性系数, ε 为随机误差项。为了消除异方差对于结果的影响,将模型两端同时作对数化处理得到以下线性模型:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln \varepsilon \quad (16)$$

为了提高 STIRPAT 模型的针对性以及预测的可靠性,根据 LMDI 因素分解和已有学者的研究^[40-41],结合

本文内容对上述模型进行参数因子设置及拓展。模型中,环境状况(I)具体为农田生态系统温室气体排放总量;人口因素(P)、富裕程度(A)、技术水平(T)分别由农村地区人口数、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力表示;引入农林牧渔业总产值(AG)、城镇化率(U)、水稻种植面积(AD)、人均粮食产量(L)对 STIRPAT 模型进行拓展,具体形式如式(17)所示:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + e \ln AG + f \ln U + g \ln AD + h \ln L + \ln \varepsilon \quad (17)$$

3 结果与分析

3.1 农田生态系统温室气体排放时空演变趋势分析

本研究统计分析了安徽省 2000—2020 年农田生态系统温室气体排放量及排放强度(图 2)。研究期内农田生态系统温室气体排放总量整体呈不断增加的趋势特征($R^2 = 0.88$),累计增长 29.84%。其中,2004 年排放总量达 4751 万 t,较 2003 年环比增速达 12.32%。这可能是由于 2003 年安徽省农业气象灾害频发^[42],农业生产规模缩小,排放总量相对较低,2004 年后安徽省积极贯彻利农举措,加之粮食价格及气候条件有利^[43],农作物种植面积扩大,从而产生较高的温室气体排放量。从农田生态系统温室气体排放强度来看,安徽省单位播种面积排放强度呈上升趋势,强度范围在 5.02—6.45 t CO₂-eq/hm²,变化特征与排放总量的变化趋近,这与农作物总播种面积年际变化较小有关。安徽省单位农业产值排放强度呈下降趋势,强度范围在 4.40—7.12 t CO₂-eq/万元。2003 年安徽省受自然灾害影响,农业产值出现较大损失,单位农业产值排放强度迅速提高,此后安徽省不断加强粮食生产安全保障,伴随着农业科技进步和结构调整,单位农业产值排放强度开始逐渐降低。

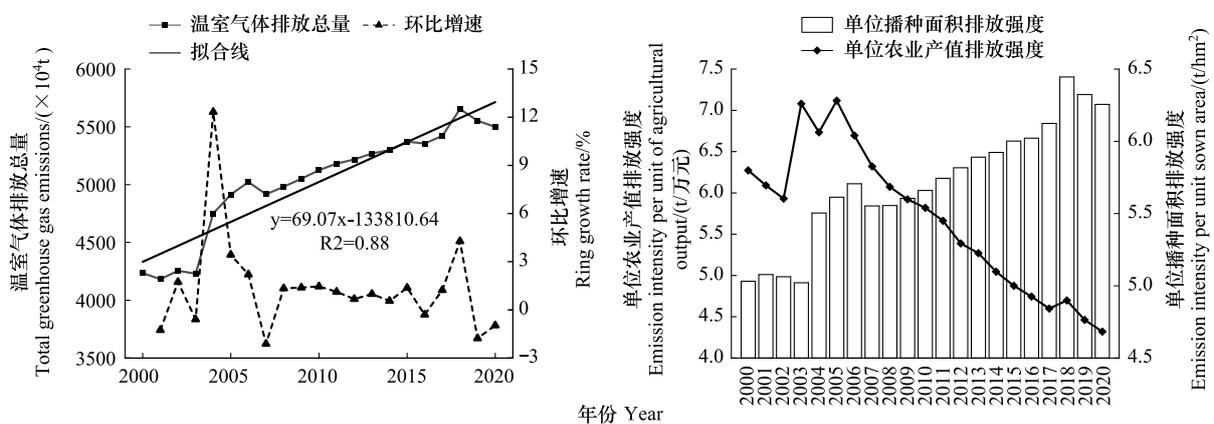


图 2 2000—2020 年安徽省农田生态系统温室气体排放量与排放强度

Fig. 2 Greenhouse gas emissions and emission intensity of farmland ecosystems in Anhui Province from 2000 to 2020

2000—2020 年安徽省农田生态系统温室气体排放结构如图 3 所示。引起农田生态系统温室气体排放量变化的最主要来源为稻田种植产生的 CH₄ 排放,平均占比为 55.27%,累计增长 39.58%。安徽省作为我国重要的水稻主产区,研究期内农田生态系统约一半以上的温室气体来源于稻田种植产生的 CH₄ 排放,近年来随着农业种植结构的调整,甲烷排放的增加趋势开始有所缓和。农业生产性投入是安徽省农田生态系统温室气体排放的第二大来源,平均占比 31.29%,整体呈先增后减的变化趋势。其中,2000—2014 年农业投入产生的 CO₂ 排放不断增加,2014 年以后通过不断调整农业投入结构,化肥、农药等使用量减少且生产效率提高,其产生的 CO₂ 排放开始逐渐下降。农用地氮素输入对安徽省农田生态系统温室气体排放总量的贡献较小,平均占比仅 13.43%,年际变化较为平稳。随着农业现代化发展,农用地测土配方施肥技术的普及,氮肥、复合肥投入量下降,其产生的 N₂O 排放近年开始不断降低。

本文采用均值离差法对农田生态系统温室气体排放情况进行分区,以 2010 年全省市域农田生态系统温

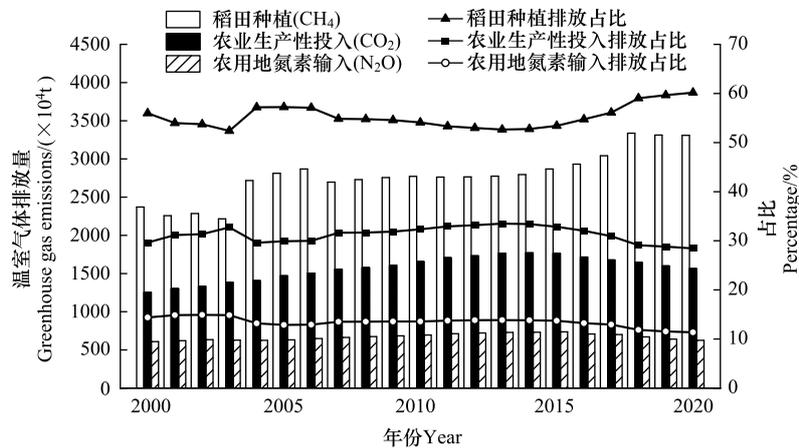


图 3 2000—2020 年安徽省农田生态系统温室气体排放结构

Fig.3 Greenhouse gas emission structure of farmland ecosystems in Anhui Province from 2000 to 2020

室气体排放量的均值、标准差为基准,按照“均值-标准差、均值、均值+标准差”划分为低排放区($<93.25 \times 10^4$ t)、中度排放区(93.25×10^4 — 330.82×10^4 t)、较高排放区(330.82×10^4 — 568.4×10^4 t)和高排放区($>568.4 \times 10^4$ t) 4类;同样,将温室气体排放强度划分为 I 级(<3.93 t CO₂-eq/hm², 3.18 t CO₂-eq/万元)、II 级(3.93—6.49 t CO₂-eq/hm², 3.18—5.61 t CO₂-eq/万元)、III 级(6.49—9.05 t CO₂-eq/hm², 5.61—8.04 t CO₂-eq/万元)和 IV 级(>9.05 t CO₂-eq/hm², 8.04 t CO₂-eq/万元)。

安徽省农田生态系统温室气体排放空间分布差异明显,空间格局与区域的气候和地形地貌有密切关系。研究期内主要年份高排放区均集中于皖中地区,皖北和皖南排放量相对较低(图 4)。皖中地区主要位于江淮波状平原,地势较平坦,且以亚热带季风气候为主,水稻种植面积广阔,排放量普遍较高。2020 年,六安、合肥、滁州及安庆农田生态系统温室气体排放量均大于 400 万 t,排放总和占全省排放总量的 46.5%。皖北地区受暖温带及淮河以南亚热带气候的影响,农作物种植类型多样,排放水平存在空间差异。其中,与淮河接壤的阜阳、淮南和蚌埠的农田生态系统排放量相对较高且呈上升趋势,2020 年均超过 340 万 t;亳州、淮北和宿州位于安徽最北端,多以旱地作物为主,排放量较小且变化幅度较为稳定。整体上皖北地区排放量仅次于皖中地区,2020 年排放总和占全省排放总量的 33.12%。皖南地区多林地、草地生态系统,研究期内农田生态系统以中低排放区为主,排放总量相对较低。2020 年皖南地区排放量均小于 300 万 t,其排放总和占全省总量的 20.38%。

根据安徽省农田生态系统温室气体排放强度的空间分布(图 5),主要年份两种农田生态系统温室气体排放强度及变化幅度均呈以淮河为界的“北低南高”分布特征。淮河以北地区排放强度较低且变化幅度较小,主要分布 I 级水平区;淮河以南大部分地区在 II 级以上,强度相对较高且变化幅度较大。这在一定程度上反映了淮北平原农业区生产效率较高,耕地质量与农业基础设施条件相对较好^[44],耕地资源保护性强。具体来看,安徽省单位播种面积排放强度呈增长趋势,全省平均增幅达 22.72%。其中,淮河以北的亳州、淮北、宿州、蚌埠单位播种面积排放强度增量均小于 0.26 t CO₂-eq/hm²,增幅在 11.5% 以下;淮河以南地区排放强度增量均超过 1.24 t CO₂-eq/hm²,增幅大于 14.5%。其中,芜湖市在 20 年间增幅最为明显,达 44.33%,这与芜湖市城市化快速发展,耕地的非农化转变有关^[45]。安徽省农田生态系统单位农业产值排放强度整体呈下降趋势,全省平均降幅达 40.54%。淮河以北的阜阳、淮北、亳州、宿州单位农业产值排放强度平均降低约 1.23 t CO₂-eq/万元,下降量较小;淮河以南的大部分地区排放强度下降量较大,其中,合肥和黄山单位农业产值排放强度降幅最大,分别达 52.19% 和 55.76%,说明其地区农业发展质量与农作物经济效益有较大提升。

3.2 农田生态系统温室气体排放驱动因素分解分析

基于 LMDI 模型定量分解了农业生产效率(F_1)、农业生产结构(F_2)、农业经济水平(F_3)、农业人口规模

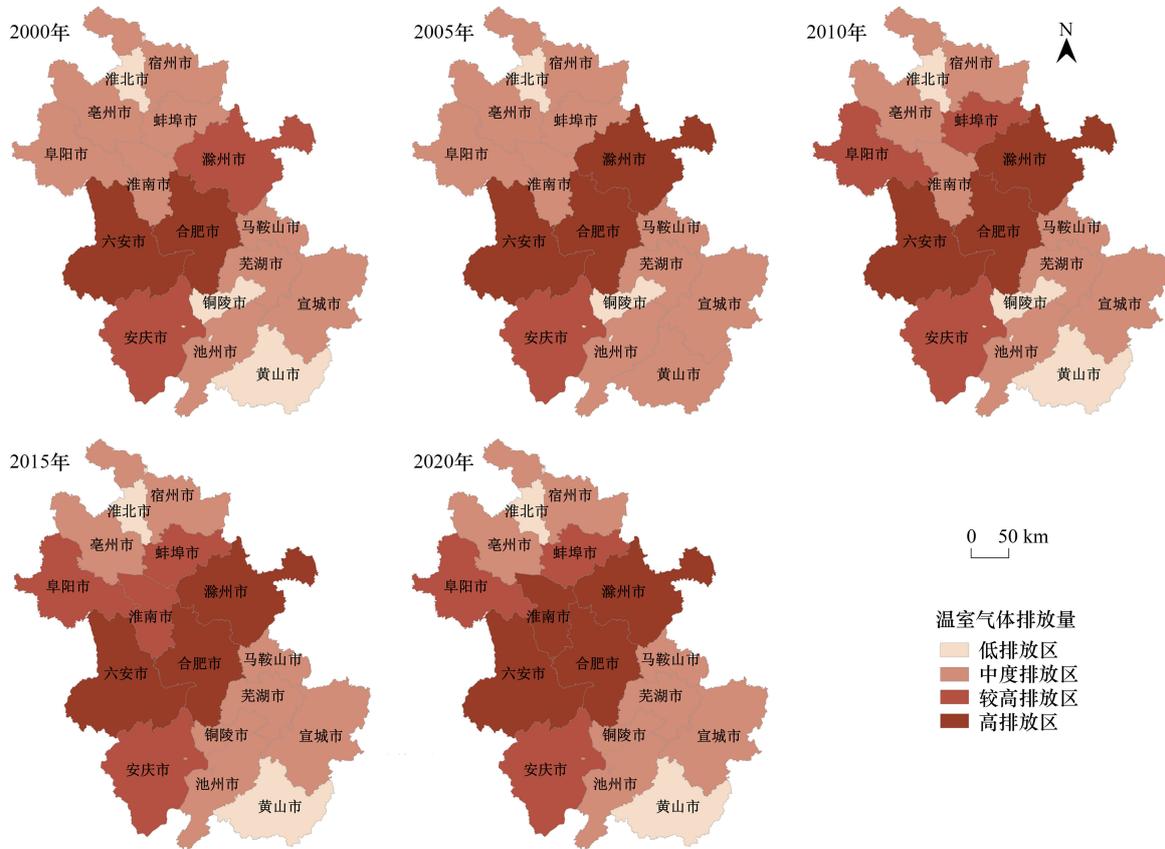


图 4 2000—2020 年安徽省农田生态系统温室气体排放量的空间格局

Fig.4 Spatial pattern of greenhouse gas emissions from farmland ecosystems in Anhui Province from 2000 to 2020

(F_4)对农田生态系统温室气体排放的驱动作用,各驱动因素的总效应使农田生态系统温室气体排放量累计增加约 1263.91 万 t,具体分解结果见表 4。

表 4 安徽省农田生态系统温室气体排放总量变化的影响因素分解结果

Table 4 Decomposition results of the impacting factors of total greenhouse gas emissions from agricultural ecosystems in Anhui Province

年份 Year	贡献值 Contribution value/万 t			
	ΔF_1	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_4
2000—2005	558.36	-365.08	963.75	-478.28
2005—2010	-1002.80	-78.31	2063.99	-772.32
2010—2015	-928.34	61.12	1672.11	-558.15
2015—2020	-663.64	-15.65	1790.31	-983.16
合计 Total	-2036.42	-397.92	6490.16	-2791.91

ΔF_1 — ΔF_4 依次为农业生产效率效应、农业生产结构效应、农业经济水平效应、农业人口规模效应

农业人口规模因素对安徽省农田生态系统温室气体排放的累计贡献值为-2791.91 万 t(表 4),研究期内农业人口规模因素均表现为负向驱动效应(图 6),累计贡献值占比达 23.83%,是抑制温室气体排放的最大影响因素。20 年来安徽省农业人口呈不断减少的趋势,由于农业机械化水平不断提高,对农业劳动力资源的需求降低,农业人口规模因素呈现出稳定的减排效应。2000—2020 年农业人口规模因素在对农田生态系统温室气体排放的年均贡献度为-17.71%(图 7),最高和最低贡献度分别为-4.40%(2003 年)和-38.27%(2020 年),负向效应整体呈增强趋势,未来需继续加强农业生产自动化水平,保障农业人口降低的碳减排效应。

农业生产效率因素对安徽省农田生态系统温室气体排放的累计贡献值为-2036.42 万 t,占比为 17.38%

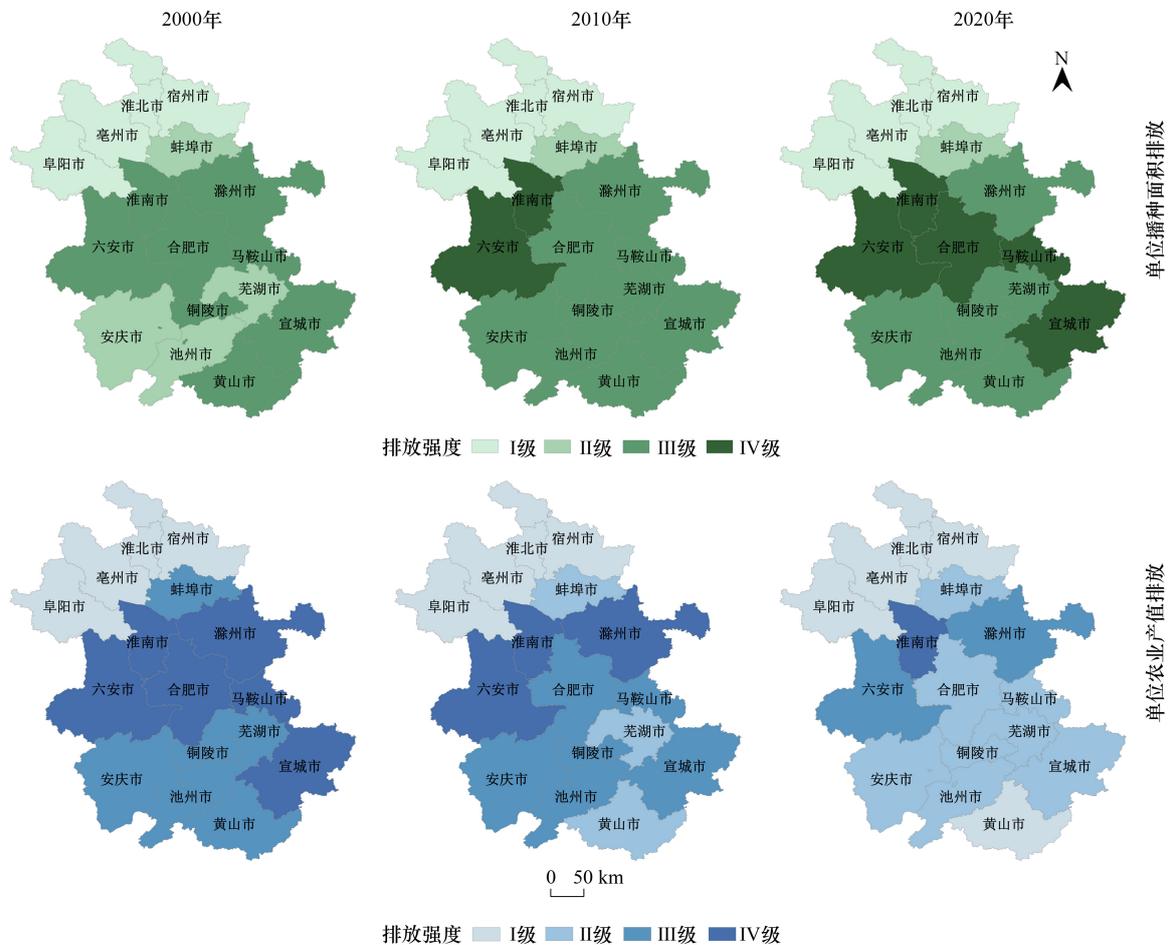


图 5 2000—2020 年安徽省农田生态系统单位播种面积与单位农业产值温室气体排放强度的空间格局

Fig.5 Spatial pattern of greenhouse gas emission intensity per unit sown area and per unit agricultural output value of farmland ecosystems in Anhui Province from 2000 to 2020

(表 4),抑制作用仅次于农业人口规模因素。2000—2005 年农业生产效率因素对农田生态系统温室气体排放主要为正向驱动作用,随着农业生产技术的发展,生产效率不断提高,影响效应逐渐趋于负向驱动(图 6)。研究期内,农业生产效率因素对农田生态系统温室气体排放变化的年均贡献度为 -17.15% ,最高和最低贡献度分别为 49.18% (2003 年)和 -42.24% (2020 年),驱动作用大致呈“强弱强”趋势(图 7),其中 2010 年驱动效应最小,贡献度仅为 -10.32% 。

农业生产结构因素对安徽省农田生态系统温室气体排放的抑制作用较小,累计贡献值为 -397.92 万 t,占比仅为 3.4% (表 4)。2000—2020 年农业生产结构因素对农田生态系统温室气体排放变化的正负效应均有出现,贡献值呈波动变化且逐渐趋于稳定(图 6),表明安徽省不断调整农业生产结构,通过农业结构优化减少了农业温室气体排放。研究期内,农业生产结构因素对农田生态系统温室气体排放变化的年均贡献度为 1.76% ,最高和最低贡献度分别为 33.7% (2004 年)和 -33.63% (2003 年),驱动作用整体呈下降趋势(图 7)。

农业经济水平因素对安徽省农田生态系统温室气体排放的累计贡献值为 6490.16 万 t,占比达 55.39% (表 4),是促进温室气体排放量不断增加的正向因素,年均贡献值达 324.5 万 t。20 年来农业经济水平始终表现出显著的正向驱动,说明农业经济增长是农业温室气体排放等环境问题的主要驱动力,农业经济的发展需要将环境成本纳入考量。研究期内农业经济水平因素对农田生态系统温室气体排放的贡献值大致呈先增后降的趋势(图 6),表明农业发展方式正逐渐由粗放型向绿色高质量型转变,经济发展与农田生态系统温室气

体排放之间正逐步实现脱钩。2000—2020 年农业经济水平对农田生态系统温室气体排放变化的年均贡献度为 45.09%,最高和最低贡献度分别为 57.25%(2002 年)和-12.78%(2003 年)。其中,2011 年前正向驱动作用逐渐增加,2012 年后贡献度开始降低,正向驱动开始减弱(图 7),亦体现出该地区有能力实现农业经济发展与温室气体排放脱钩。

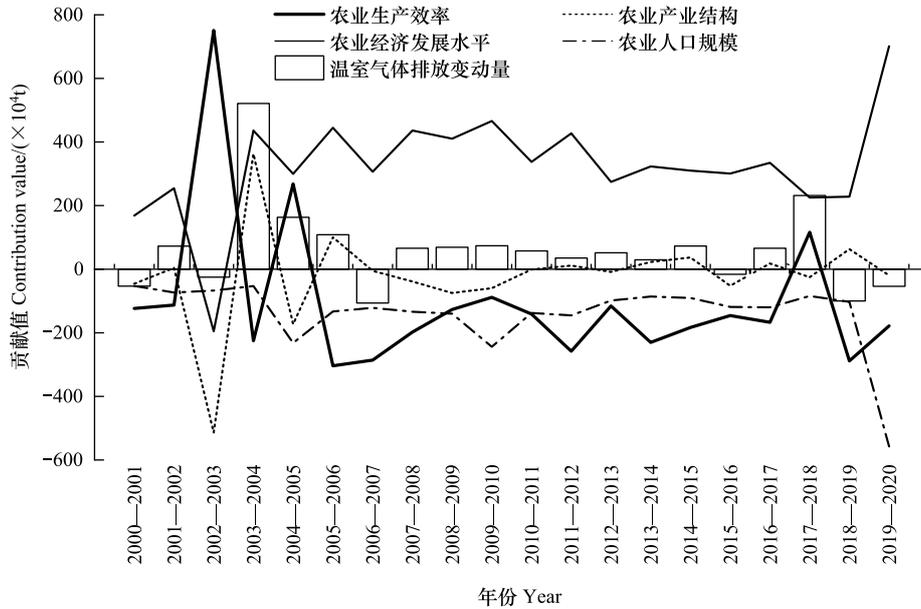


图 6 2000—2020 年安徽省农田生态系统各驱动因素贡献值变化

Fig.6 Changes in the contribution value of each driving factor to the farmland ecosystems in Anhui Province from 2000 to 2020

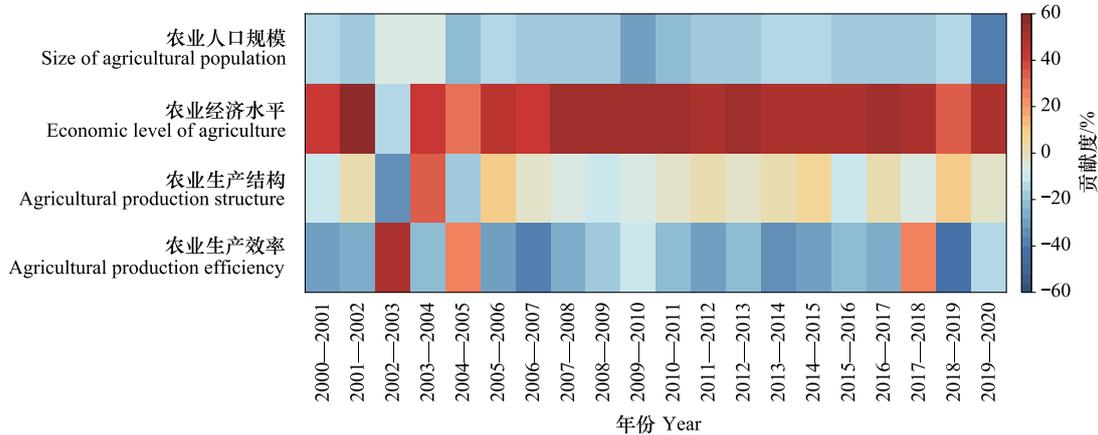


图 7 各因素对安徽省农田生态系统温室气体排放的贡献度

Fig.7 Contribution of various factors to greenhouse gas emissions from farmland ecosystems in Anhui Province

3.3 农田生态系统温室气体排放情景预测

3.3.1 STIRPAT 模型的确定

为进一步研究安徽省农田生态系统温室气体排放的未来变化,本文基于 STIRPAT 模型进行情景预测。首先采用 2000—2020 年安徽省历史数据对模型进行回归分析,并选择 R^2 与方差膨胀系数 VIF 作为评价标准。根据回归结果得到 STIRPAT 模型的大部分变量方差膨胀系数 VIF 大于 10,数据之间存在多重共线性问题(表 5)。因此选用岭回归方法对 STIRPAT 模型进行调整,在各自变量的岭回归系数趋于稳定时,惩罚项 K

取值为 0.02,此时对应的最大 R^2 为 0.993,岭回归结果如表 6 所示。

表 5 多元线性回归结果

Table 5 Multiple linear regression results

变量 Variable	非标准化系数 Unstandardized coefficients	标准化系数 Standardized coefficients	T 统计量 T-statistic	VIF 值 VIF value
lnP	0.240(0.087)	0.415	2.774 **	99.152
lnA	0.071(0.030)	0.563	2.357 **	253.542
lnT	0.100(0.071)	0.294	1.404	194.942
lnAG	-0.319(0.097)	-0.786	-3.278 ***	255.165
lnU	0.191(0.110)	0.458	1.730	310.916
lnAD	0.507(0.037)	0.467	13.702 ***	5.164
lnL	0.222(0.068)	0.465	3.253 ***	90.553
常数项 Constant	-1.252(0.951)	—	1.317	—

括号内为标准误差;***、**、* 分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平上显著;P:农村人口数 Rural population;A:农村居民人均可支配收入 Per capita disposable income of rural residents;T:农业机械化水平 Level of agricultural mechanization;AG:农业产值 Agricultural output value;U:城镇化率 Urbanization rate;AD:水稻种植面积 Rice cultivation area;L:人均粮食产量 Per capita grain output;VIF:方差膨胀因子 Variance inflation factor

表 6 岭回归分析结果(K=0.02)

Table 6 Ridge regression analysis results(K=0.02)

变量 Variable	非标准化系数 Unstandardized coefficients	标准化系数 Standardized coefficients	T 统计量 T-statistic	F 值 F-value
lnP	0.068(0.038)	0.117	1.796 *	270.737(Sig F =0.000)
lnA	0.001(0.007)	0.009	0.169	
lnT	0.164(0.019)	0.482	8.711 ***	
lnAG	-0.091(0.021)	-0.224	-4.268 ***	
lnU	0.104(0.020)	0.250	5.089 ***	
lnAD	0.473(0.038)	0.435	12.571 ***	
lnL	0.098(0.029)	0.205	3.366 ***	
常数项 Constant	2.533(0.549)	—	4.611 ***	

括号内为标准误差;***、**、* 分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平上显著

经岭回归分析后确定 STIRPAT 模型如下:

$$\ln I = 2.533 + 0.068 \ln P + 0.001 \ln A + 0.164 \ln T - 0.091 \ln AG + 0.104 \ln U + 0.473 \ln AD + 0.098 \ln L \quad (18)$$

将 2000—2020 年安徽省农田生态系统温室气体排放量真实值与 STIRPAT 模型计算的温室气体排放量预测值进行对比(图 8),整体拟合效果良好,相对误差在 $\pm 2.24\%$ 之间,可以用来预测该地区未来的农田生态系统温室气体排放量。

3.3.2 情景设定

本文采用情景分析方法预测 2021—2035 年农田生态系统温室气体排放量,对各因子分别设置中速、低速和高速发展 3 种变化率。其中,中速发展依据安徽省政策文件设定,高速和低速发展分别做高低调整。通过对各因子的不同变化率进行情景组合,共设置基准情景(BS)、绿色发展情景(GDS)、粗放发展情景(EDS)、低碳情景(LCS)和可持续发展(SDS) 5 类预测情景。其

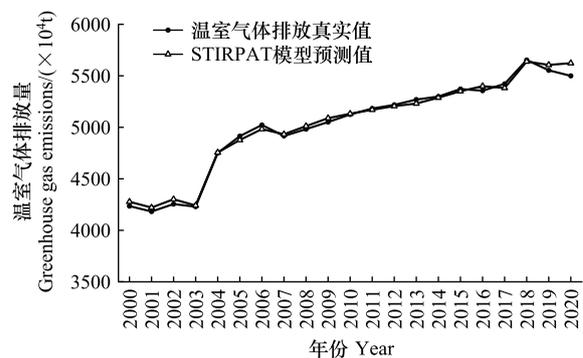


图 8 温室气体排放实际值与预测值对比

Fig.8 Comparison of actual and predicted values of greenhouse gas emissions

中基准情景、绿色发展情景和粗放发展情景参考高峰等^[46]的研究设置,所有影响因子均分别以中速、低速和高速发展变化;低碳情景和可持续发展情景依据各因子对安徽省农业减排与农业发展的影响差异设置,不同情景具有不同发展侧重点。具体情景设置见表 7。

表 7 不同情景组合下情景设置情况

Table 7 Scenario settings under different scenario combinations

情景 Scenarios	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>T</i>	<i>AG</i>	<i>U</i>	<i>AD</i>	<i>L</i>
基准情景 Baseline scenario (BS)	中	中	中	中	中	中	中
绿色发展情景 Green development scenario(GDS)	低	低	低	低	低	低	低
粗放发展情景 Extensive development scenario(EDS)	高	高	高	高	高	高	高
低碳情景 Low carbon scenario(LCS)	中	中	低	低	中	低	低
可持续发展情景 Sustainable development scenario(SDS)	中	高	中	高	中	中	高

具体说明:(1)城镇化率(*U*)的变化速率设定参考《安徽省新型城镇化规划(2021—2035年)》和《安徽省城镇体系规划(2011—2030年)》,2025年全省常住人口城镇化率提高至65%,2030年将达到70%—73%,2035年预计达到73%以上。设定中等速率下,“十四五”时期城镇化率的变化率为2.2%，“十五五”和“十六五”期间分别为1.5%和0.85%;农村人口数(*P*)同城镇化率的增长率相反,未来农村人口数将继续保持下降趋势。

(2)农村居民人均可支配收入(*A*)的增长率大于0,且随着国家经济向高质量发展阶段转变而逐渐下降。“十三五”时期,安徽省农村居民人均可支配收入的年均增长率为8.96%,与全省居民人均可支配收入增长基本同步。“十四五规划”中提出全省居民收入预计年均增长7%左右。设定中等速率下“十四五、十五五、十六五”的变化率分别为7.5%、6.5%、5.5%。

(3)农业机械化(*T*)根据《安徽省“十四五”农业机械化发展规划》以及农业机械化发展远景目标,计划2025年农业机械总动力达到7200万kW,2035年农业生产基本实现机械化全覆盖,全省农业机械总动力预计达8000万kW左右。设定中等速率下“十四五、十五五、十六五”的变化率分别为1.15%、1.1%、1.05%。

(4)水稻种植面积(*AD*)的预测设定需要考虑成本收益、土地后备资源等因素的影响。目前长江中下游稻区的水稻生产面临下行压力,在当前种植业结构调整及国家水稻调减政策等背景下,预计未来一段时期水稻种植面积仍将继续减少^[47]。安徽省水稻种植面积在2007—2017年内变化平稳,平均种植面积为224.7万 hm^2 ,年均增长率为0.53%,2018年后水稻种植面积出现了第二个平稳期,平均种植面积为251.8万 hm^2 ,上下浮动不超过2.7万 hm^2 ,预计“十四五”时期水稻种植面积仍处于第二个平稳期内,继续保持低速增长的发展趋势。在耕地面积有限、水稻种植收益不高以及南方地区“水改旱”现象的逐渐增多下^[48],预计“十五五、十六五”时期水稻种植面积将稳中略降。综上,设定稳产背景下水稻种植面积整体均保持小于1%的低幅度波动,中等速率下三个时期的变化率分别为0.5%、-0.3%、-0.6%。

(5)农业产值(*AG*)和人均粮食产量(*L*)没有具体发展目标及依据,但其变化趋势相对稳定,因此建立自回归移动平均模型(ARIMA模型)进行预测。通过对数据差分运算,平稳后进行白噪声检测,确定其为平稳非白噪声序列后根据自相关和偏相关系数结合赤池信息量和贝叶斯信息量选定模型阶数,最后确定其具体数值。

3.3.3 情景预测

根据构建的STIRPAT模型对5种情景路径的模拟预测,获得2021—2035年安徽省农田生态系统温室气体排放预测量(图9)。根据预测结果,基准情景(BS)、低碳情景(LCS)、绿色发展情景(GDS)、可持续发展情景(SDS)下温室气体排放基本趋势为逐渐上升至峰值后降低,而粗放发展情景(EDS)呈不断上升的变化趋势,未出现温室气体排放峰值。具体来看,基准情景下安徽省农田生态系统温室气体排在2028年左右达到峰值5751万t,完成达峰时间目标但峰值较高,未来可加强农业技术革新以降低峰值水平。可持续发展情景、

低碳情景和绿色发展情景均在 2025 年达到温室气体排放峰值,分别为 5735 万 t、5678 万 t、5672 万 t,其中,绿色发展情景的峰值最低,达峰后下降速率最快,实现碳中和目标的潜力最高;低碳情景与绿色发展情景的变化较为接近,在减排型因素高效控制下较早完成达峰目标;可持续发展情景注重农业经济的高质量发展,在拥有更多发展动力的同时也较早实现国家的达峰目标。粗放发展情景下温室气体排放量在 2035 年前没有下降迹象,但增长率逐渐减小,若加快农业低碳技术的研发与应用,有望出现下降趋势,说明安徽省农田生态系统具有良好的减排潜力。

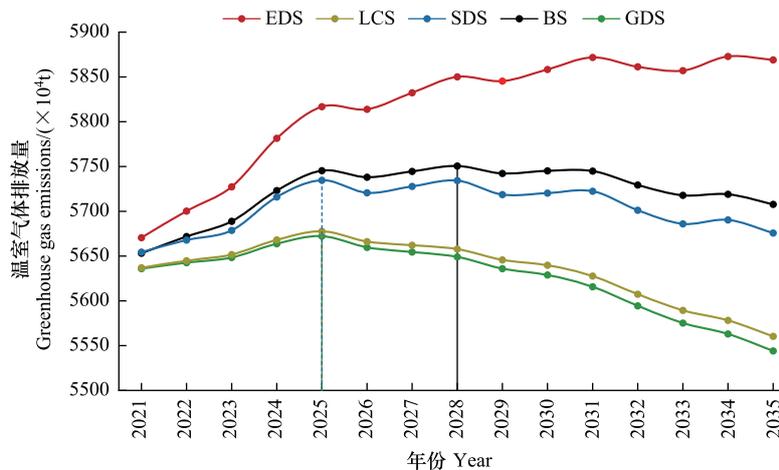


图9 不同情景下农田生态系统温室气体排放预测结果

Fig.9 Prediction results of greenhouse gas emissions from farmland ecosystems under different scenarios

EDS:粗放发展情景 Extensive development scenario; LCS:低碳情景 Low carbon scenario; SDS:可持续发展情景 Sustainable development scenario; BS:基准情景 Baseline scenario; GDS:绿色发展情景 Green development scenario

4 结论与展望

本文测算了 2000—2020 年安徽省农田生态系统温室气体排放总量及强度,基于此探讨了农田生态系统温室气体排放的时空演化特征,然后运用 LMDI 方法开展了温室气体排放驱动机制研究,最后基于 STIRPAT 模型并结合情景分析方法对未来农田生态系统温室气体排放进行了模拟预测。得到主要结论如下:

(1) 安徽省农田生态系统温室气体排放总量整体呈增加趋势,排放结构上表现为:水稻种植(2780 万 t, 55.27%)>农业生产性投入(1572 万 t, 31.29%)>农用地氮素输入(672 万 t, 13.43%),空间上呈现为皖中地区排放量较高、皖北和皖南排放量相对较低,高值排放区逐渐增加,区域间差异相对明显。安徽省单位播种面积排放强度呈增加趋势,单位农业产值排放强度呈下降趋势,两种排放强度均表现出以淮河为界的“北低南高”分布特征,淮河以北地区的排放强度及变化幅度较低,淮河以南排放强度相对较高且变化幅度较大。

(2) 农业生产效率、农业生产结构、农业人口规模是安徽省农田生态系统温室气体排放的负向因素,其中农业人口规模与农业生产效率因素的负向驱动作用较强,二者的负向贡献度均在升高;农业生产结构因素的驱动作用有限,贡献度逐渐减小且趋于稳定。农业经济水平是安徽省农田生态系统温室气体排放的正向因素,贡献值与贡献度处较高水平但逐渐呈下降趋势,农业经济发展与农田生态系统温室气体排放正逐步实现脱钩。

(3) 在预测未来变化的 5 种发展情景中,基准情景、低碳情景、绿色发展情景与可持续发展情景下农田生态系统温室气体排放的变化趋势表现为先上升达到峰值后降低,其中基准情景在 2028 年达峰,峰值水平 5751 万 t;可持续发展情景、低碳情景和绿色发展情景均在 2025 年左右实现达峰目标,峰值分别为 5735 万 t、5678 万 t、5672 万 t。粗放发展情景下农田生态系统温室气体排放在未来呈不断增加的发展趋势,未能实现达

峰目标,但排放量增速逐渐放缓,农业发展表现出较强的减排潜力。

基于本文的结论,20年来安徽省农田生态系统温室气体排放呈增长趋势,2020年排放量达5499万t,占全国农业系统排放总量^[7]的5.67%,其中CO₂、CH₄、N₂O的占比分别达7.08%、8.39%、1.76%。研究期内安徽省稻田种植产生的CH₄在农田生态系统温室气体排放中占比最高,是控制农田生态系统温室气体排放有效目标。未来,安徽省需加强农业稻田区的水肥管理,在保证粮食产量的前提下优化农田种植结构。此外,控制化肥、农药使用量,减少微塑料残留,促进生物质炭还田^[49]、生物可降解地膜^[50]等技术的研发和推广,亦是实现农田减排降碳的有效途径。针对农田生态系统温室气体排放存在的空间差异,安徽省应综合考虑不同区域的地理特征、农业资源禀赋及技术水平等方面的差异,科学规划不同区域的农业资源分配,针对性制定增汇减排目标和方案。例如,对于皖南山区应依托山地资源发展现代化精致农业,促进山地农业向绿色低碳化转变,对于皖北地区可充分发挥规模效益,提高化肥等农业投入利用率,通过增加农业低碳技术研发,提高农业生产效率来实现农业绿色发展,对于皖中地区,则应加强控制水稻生长过程的水肥管理,推广稻渔综合种养^[51]等具有降碳效益的绿色农业模式,以实现农业资源的充分利用与农业经济的可持续发展。未来,在保证农业经济与环境协调发展的同时,将生态文明建设融入农业发展的各方面和全过程,因地制宜地制定农业发展规划,实施多种对策共同推进,有助于安徽省农业实现碳达峰目标,促进农业高质量发展。

由于不同省区自然地理及农业经济发展具有差异,我国农业系统温室气体排放存在显著的空间异质性^[7],在此背景下探讨我国典型农业省份农业经济发展与农田生态系统温室气体排放之间的动态关系具有重要意义。相对现有研究,本文在研究区域、模型运用和拟合精度等方面实现了拓展和提高,研究结果丰富了我国农田生态系统温室气体排放的理论研究,可为决策者提供更具有针对性的数据支撑。值得注意的是,本文预测模型建模时设定的水稻种植面积相较于其他因子具有较强的不确定性及不稳定性,但考量该因素是对安徽省农作物权重以及农业温室气体排放结构的体现。在未来随着农田管理技术的发展和农作物多元数据库的完善,可以对农田生态系统温室气体排放做更精确的模拟与预测。本文测算农田生态系统温室气体排放量均以统计资料为主,且选取的各类排放系数主要参考其他研究,因此会对研究结果产生一定的误差。因而本文认为,提高碳核算数据的精度以及排放系数的修正能够成为未来科学评估碳排放的重要内容。此外,农田生态系统会受农作物种类、耕作方式、土壤类型等多种因素的共同作用,不同条件下排放水平差异较大。在今后的农田生态系统碳排放研究中,基于不同条件约束的温室气体排放有待学者深入探讨。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰,吕楠,吕一河. 加强生态系统管理 助力碳中和目标实现. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1529-1533.
- [2] 刘崇刚,孙伟,张落成. 长江三角洲碳排放与植被覆盖耦合协调时空格局及影响因素分析. 地理科学, 2023, 43(1): 142-151.
- [3] 周宏春. “双碳”战略为低碳经济带来广阔的发展前景. 新经济导刊, 2023(1): 49-55.
- [4] World Metrological Organization(WMO). WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 19: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2022. Geneva, 2023.
- [5] 周广胜,周梦子,周莉,汲玉河. 中国陆地生态系统增汇潜力研究展望. 科学通报, 2022, 67(31): 3625-3632.
- [6] 石岳峰,吴文良,孟凡乔,王大鹏,张志华. 农田固碳措施对温室气体减排影响的研究进展. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 43-48.
- [7] 范紫月,齐晓波,曾麟岚,吴锋. 中国农业系统近40年温室气体排放核算. 生态学报, 2022, 42(23): 9470-9482.
- [8] 夏四友,赵媛,许昕,文琦,宋永永,崔盼盼. 1997—2016年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素. 生态学报, 2019, 39(21): 7854-7865.
- [9] 陈中督,李凤博,冯金飞,周锡跃,徐春春,纪龙,方福平. 长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹研究——基于生命周期评价. 中国农业资源与区划, 2019, 40(12): 81-90.
- [10] Goglio P, Smith W N, Grant B B, Desjardins R L, Gao X, Hanis K, Tenuta M, Campbell C A, McConkey B G, Nemecek T, Burgess P J, Williams A G. A comparison of methods to quantify greenhouse gas emissions of cropping systems in LCA. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 4010-4017.
- [11] Tian Y, Zhang J B, He Y Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13: 1393-1403.
- [12] Smith W N, Grant B B, Desjardins R L, Worth D, Li C, Boles S H, Huffman E C. A tool to link agricultural activity data with the DNDC model to

- estimate GHG emission factors in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 301-309.
- [13] 王英, 杨娟, 王佳丽. 农田生态系统碳排放时空格局及趋势分析. *中国农业大学学报*, 2023, 28(1): 89-101.
- [14] 尹钰莹, 郝晋珉, 牛灵安, 陈丽. 河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究. *资源科学*, 2016, 38(5): 918-928.
- [15] 王劫, 朱朝枝. 农业部门碳排放效率的国际比较及影响因素研究——基于 32 个国家 1995—2011 年的数据研究. *生态经济*, 2018, 34(7): 25-32.
- [16] 林秀群, 葛颖. 中国西南地区农田生态系统碳源/汇时空差异研究. *江苏农业学报*, 2016, 32(5): 1088-1093.
- [17] 王莉, 刘莹莹, 张亚慧, 董素涵. 河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解. *环境科学学报*, 2022, 42(12): 410-422.
- [18] 孙小祥, 张华兵, 于英鹏. 江苏沿海地区农田生态系统碳源/汇时空变化及公平性研究. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(10): 56-64.
- [19] 史俊晖, 戴小文. 我国省域农业隐含碳排放及其驱动因素时空动态分析. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(8): 169-180.
- [20] Xiong C H, Yang D G, Huo J W. Spatial-temporal characteristics and LMDI-based impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in Hotan prefecture, China. *Sustainability*, 2016, 8(3): 262.
- [21] 杨思存, 霍琳, 王成宝, 温美娟. 基于 STIRPAT 模型的甘肃省农业碳排放特征分析. *干旱区地理*, 2023, 46(09): 1493-1502.
- [22] 高晨曦, 卢秋萍, 欧年青, 胡清萍, 林雪, 鲍玲鑫. “双碳”目标下河南省农业碳排放影响因素及预测研究. *中国生态农业学报: 中英文*, 2022, 30(11): 1842-1851.
- [23] 常青, 蔡为民, 谷秀兰, 吴云青, 张佰林. 河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 367-377.
- [24] 范大莎, 杨旭, 吴相利, 周嘉, 茹艺. 东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征及驱动因素研究. *环境科学学报*, 2017, 37(7): 2797-2804.
- [25] 王树芬, 高冠龙, 李伟, 刘思敏. 2000—2020 年山西省农业碳排放时空特征及趋势预测. *农业环境科学学报*, 2023, 42(8): 1882-1892.
- [26] 陈睿涛, 李薇, 燕振刚. 甘肃省农业碳排放区域差异、时空特征及趋势预测. *草业科学*, 2023, 40(1): 287-302.
- [27] 张精, 方培, 魏锦达, 林佳壕, 陈培彬, 朱朝枝. 基于碳足迹的安徽省农田生态系统碳源/汇时空差异. *福建农业学报*, 2021, 36(1): 78-90.
- [28] 谷家川, 查良松. 皖江城市带农田生态系统碳排放动态研究. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(1): 81-87.
- [29] 李明琦, 刘世梁, 武雪, 孙永秀, 侯笑云, 赵爽. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(24): 8822-8834.
- [30] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 陈卓. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [31] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in punjab, India, and Ohio, USA. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23(4): 332-350.
- [32] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 1-6, 11-11.
- [33] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21-27.
- [34] 李迎春, 林而达, 甄晓林. 农业温室气体清单方法研究最新进展. *地球科学进展*, 2007, 22(10): 1076-1080.
- [35] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制. *农业经济问题*, 2014, 35(7): 18-26, 110.
- [36] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [37] 王丹, 荆延德, 韩善梅, 高明秀. 基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析. *生态学报*, 2022, 42(23): 9604-9614.
- [38] 侯丽朋, 王琳, 钱瑶, 唐立娜. “双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析. *生态学报*, 2022, 42(23): 9663-9676.
- [39] 张帆, 宣鑫, 金贵, 吴锋. 农业源非二氧化碳温室气体排放及情景模拟. *地理学报*, 2023, 78(1): 35-53.
- [40] 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. *环境科学学报*, 2021, 41(12): 5174-5189.
- [41] 蔡景丽, 顾佳艳, 陈敏, 谢丽萍, 何国富. 2000—2020 年中国种植业碳排放驱动因素及预测分析. *环境科学与技术*, 2023, 46(2): 159-167.
- [42] 陈娟, 陈磊, 吕凯, 朱森, 任竹, 罗守进. 安徽省农业灾害情况及防灾减灾对策分析. *中国农学通报*, 2015, 31(8): 212-217.
- [43] 《安徽年鉴》编辑委员会. 安徽年鉴. 合肥: 安徽年鉴社, 2005.
- [44] 2019 年全国耕地质量等级情况公报, 中华人民共和国农业农村部公报, 2020-05-06(4) [2024-5-18]. http://www.moa.gov.cn/nygbh/2020/202004/index_1.htm.
- [45] 周翼虎, 程久苗, 费罗成, 徐玉婷. 芜湖市快速城市化过程中耕地变化研究. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(6): 57-62.
- [46] 高峰, 律可心, 乔智, 马丰魁, 姜群鸣. 青藏高原东缘生态过渡带碳中和评估与预测. *生态学报*, 2022, 42(23): 9442-9455.
- [47] 徐春春, 陆建飞. 长江中下游水稻生产波动特征及成因分析. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(12): 108-114.
- [48] 郑红明, 郑品卉. 浅析稻谷比价偏低对我国水稻产业的影响. *中国稻米*, 2023, 29(4): 32-37.
- [49] Dong D, Yang M, Wang C, Wang H L, Li Y, Luo J F, Wu W X. Responses of methane emissions and rice yield to applications of biochar and straw in a paddy field. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(8): 1450-1460.
- [50] 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩. 生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响. *环境科学*, 2022, 43(5): 2788-2801.
- [51] 管卫兵, 刘凯, 石伟, 宣富君, 王为东. 稻渔综合种养的科学范式. *生态学报*, 2020, 40(16): 5451-5464.