

江西省农业温室气体排放趋势及减排潜力

刘宇新¹, 张龙飞², 刘玉环², 于博³, 熊江花¹, 罗涛⁴,
辛宜聪¹, 崔宪², 张琦², 王允圃², 黄振侠^{1*}

(1. 江西省农业生态与资源保护站, 江西 南昌 330046; 2. 南昌大学生物质转化教育部工程研究中心, 江西 南昌 330047; 3. 南京农业大学公共管理学院, 江苏 南京 210095; 4. 农业农村部成都沼气科学研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 掌握农业温室气体的排放规律对我国实现“碳达峰、碳中和”的战略目标具有重要作用。基于江西省 2011~2020 年农业数据资料, 阐明了江西省农业温室气体(甲烷、氧化亚氮)的二氧化碳排放当量在种植业、养殖业和能源消耗领域的排放水平和时空演变规律; 并用 STIRPAT 模型在情景模式下模拟分析了江西省在 2030 年和 2060 年的减排潜力。结果表明: 2011~2020 年江西省农业温室气体排放总量为 3686.91~3967.56 万 t, 呈先升高后下降的趋势; 空间上呈现西高东低、南高北低的分布特征。种植业、养殖业和能源消耗年均产生的二氧化碳排放当量占比分别约为 71.5%、26.9% 和 1.6%; 种植业中稻田甲烷和农用地氧化亚氮的二氧化碳排放当量的占比分别为 72.77% 和 27.23%; 养殖业中动物肠道甲烷、动物粪便甲烷和动物粪便氧化亚氮的二氧化碳排放当量的占比分别为 31.53%、43.90% 和 24.57%。在基准发展模式 and 低碳发展模式下的预测结果表明, 2030 年江西省农业温室气体排放降幅将达到国家要求, 分别为 12.66% 和 14.91%。因此, 在满足江西省农业生产目标的基础上, 江西省农业的减排固碳应聚焦种植业和养殖业, 特别是控制农业甲烷排放源。在我国“双碳”目标的战略背景下, 可以为未来推进江西省农业减排固碳工作的实施提供建议。

关键词: 江西省; 温室气体; 碳排放; 减排固碳; 时空演化; 情景预测

中图分类号: S216.4; X705; X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2024)01-0047-13

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.20230810

Trends and Emission Reduction Potential of Agricultural Greenhouse Gas Emissions in Jiangxi Province / LIU Yuxin¹, ZHANG Longfei², LIU Yuhuan², YU Bo³, XIONG Jianghua¹, LUO Tao⁴, XIN Yicong¹, CUI Xian², ZHANG Qi², WANG Yunpu², HUANG Zhenxia^{1*} / (1. Jiangxi Provincial Agricultural Ecology and Resources Protection Station, Nanchang 330046, China; 2. Engineering Research Center for Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 3. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 4. Biogas Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China)

Abstract: The mastering the emission law of agricultural greenhouse gases plays an important role in China's strategic goal of "carbon peaking and carbon neutrality". Based on the agricultural data of Jiangxi Province from 2011~2020, this study elucidated the emission level and spatio-temporal evolution of carbon dioxide equivalent of agricultural greenhouse gases (methane and nitrous oxide) in planting, aquaculture and energy consumption in Jiangxi Province. The emission reduction potential of Jiangxi Province in 2030 and 2060 is simulated and analyzed by STIRPAT model under multiple scenarios. The results showed that the total agricultural greenhouse gas emissions in Jiangxi Province from 2011~2020 were 3686.91~3967.56 million tons, showing a trend of first increasing and then decreasing. Spatially, it showed the distribution characteristics of high west and low east, high south and low north. The average annual carbon dioxide emissions equivalent of planting industry, aquaculture industry and energy consumption accounted for about 71.5%, 26.9% and 1.6% respec-

收稿日期: 2023-06-26 修回日期: 2023-07-14

项目来源: 面向可持续发展的中国农业生态系统创新性转型(GCP CPR 065/GFF); 2021 年度江西省农牧渔业科研指导性课题-农作物秸秆还田生态效应监测与评价(赣农厅办函[2021]36号)。

作者简介: 刘宇新(1991-),男,汉,江西南城人,农艺师,主要从事农业减排固碳与农业资源环境保护研究与技术推广等工作, E-mail: 15170014031@163.com

通信作者: 黄振侠, E-mail: jxnyb@126.com

tively, and the carbon dioxide equivalent of paddy methane and agricultural nitrous oxide in planting industry accounted for 72.77% and 27.23% respectively. The carbon dioxide equivalent emissions of animal intestinal methane, animal feces methane and animal feces nitrous oxide accounted for 31.53%, 43.90% and 24.57%, respectively. The forecast results under the baseline development model and the low-carbon development model showed that the reduction of agricultural greenhouse gas emissions in Jiangxi Province in 2030 will meet the national requirements, 12.66% and 14.91% respectively. It is hoped that this study could provide ideas, measures and policy suggestions for promoting agricultural emission reduction and carbon sequestration in Jiangxi Province in the future under the background of China's "dual carbon" strategic goal.

Key words: Jiangxi Province; greenhouse gas; carbon emissions; emission reduction and carbon sequestration; space-time evolution; scenario prediction

农业生产、温室气体排放和气候变化密切相关, 农业是最易遭受气候变化影响的产业, 同时也是温室气体排放的重要来源之一^[1]。从全球看, 农业温室气体排放量仅次于电热生产, 人为温室气体排放量和非人为二氧化碳(CO₂)排放量分别占全球温室气体排放总量的14%和58%^[2]。我国农业碳排放量以年均5%的速率增长, 占全国温室气体排放总量的17%^[3], 其中在甲烷(CH₄)等非CO₂温室气体排放中, 农业的排放量占比高达48%^[4]。农业既是温室气体的主要排放源, 又有着巨大的碳汇潜力, 如农田碳汇等^[5-6]。因此, 阐明农业温室气体排放趋势及规律, 因地制宜地制定推进农业减排固碳的相关政策和方针, 将为我国实现2030年“碳达峰”, 2060年“碳中和”的目标以及推动农业绿色低碳转型和应对气候变化具有重要意义。

近些年江西省已形成种植业、养殖业为主导产业的农业模式, 是我国粮食主产区之一^[7]。但随着对农业结构的调整, 农业机械设备的引入, 农药和化肥等药品投入量的增加, 除了导致江西省农业生态环境污染源多元化外, 还使CO₂、CH₄等温室气体大量排放^[8,9]。且目前关于对江西省农业碳排放的评估体系尚未完善, 主要集中在农资投入领域, 并未考虑种植业和养殖业等指标。此外, 农业农村领域还

面临着“家底不清、思路不明、研究不透”等困难和问题, 因此为制定符合实际、实用管用的减排固碳方案, 亟需开展全省农业温室气体排放趋势及减排潜力的研究^[10]。

本研究基于“十二五”和“十三五”规划时期(2011~2020年)江西省种植业、养殖业、农机能源消耗等有关数据资料, 构建江西省农业温室气体排放测算体系并对近十年种植业、养殖业和农机能源消耗产生的温室气体进行汇总整理, 分析江西省农业碳排放时间和空间上的演变趋势及规律, 并在多情景下模拟2030年、2060年江西省农业温室气体排放趋势。希望在结合江西省农业生产发展目标的基础上, 以期提出未来推进江西省农业减排固碳工作的思路举措和建议。

1 研究区及数据收集

1.1 边界界定和系数确定

根据《农业温室气体清单编制规范》(DB36/T1094—2018)^[11]及相关文献^[9,12-14], 将江西省农业温室气体排放源界定为3个领域6个方面(见表1)。并利用全球增温潜势(GWP)将CO₂、CH₄和N₂O的排放量统一折算为CO₂排放当量(CO₂e)进行度量分析。如: 某类温室气体的CO₂当量(CO₂e)

表1 江西省农业温室气体排放源、排放系数及其来源

排放源		碳排放系数	参考文献
种植业	稻田 CH ₄	单季稻 215.5 kg · ha ⁻¹ , 双季早稻 211.4 kg · ha ⁻¹ , 双季晚稻 224.0 kg · ha ⁻¹ 。	[11]
	农用地 N ₂ O	农用地 N ₂ O 直接排放因子 0.0109, 大气氮沉降 0.01, 氮淋溶和径流损失 0.0075。	
养殖业	动物肠道发酵 CH ₄	奶牛 88.1 kg · 头 ⁻¹ 、水牛 70.5 kg · 头 ⁻¹ 、其他牛 52.9 kg · 头 ⁻¹ 、山羊 8.9 kg · 头 ⁻¹ 、猪 1 kg · 头 ⁻¹ 。	[13 - 14]
	动物粪便管理 CH ₄	奶牛 8.33 kg · 头 ⁻¹ 、水牛 5.55 kg · 头 ⁻¹ 、其他牛 3.31 kg · 头 ⁻¹ 、山羊 0.28 kg · 头 ⁻¹ 、猪 5.08 kg · 头 ⁻¹ 、家禽 0.02 kg · 只 ⁻¹ 。	
	动物粪便管理 N ₂ O	奶牛 2.06 kg · 头 ⁻¹ 、水牛 0.875 kg · 头 ⁻¹ 、其他牛 0.846 kg · 头 ⁻¹ 、山羊 0.113 kg · 头 ⁻¹ 、猪 0.175 kg · 头 ⁻¹ 、家禽 0.007 kg · 只 ⁻¹ 。	
农业机械	农机具直接产生的 CO ₂	根据农机的发动机效率和化石能源排放系数确定	

即等于相应气体的质量数乘以全球升温潜力系数,其中 CH_4 和氧化亚氮 (N_2O) 全球升温潜力系数 (GWP) 分别为 28 和 265^[2]。

1.2 基础数据资料来源

本研究对《江西省统计年鉴》、《中国农村统计

年鉴》、《中国县域统计年鉴》以及江西省各地市统计年鉴中涉及到“十二五”和“十三五”规划时期 (2011~2020年) 江西省种植业、养殖业、农机能源消耗等有关数据资料进行了整理。具体数据内容如表 2 所示。

表 2 2011~2020 年江西省农业温室气体核算数据表

序号	数据内容
1	全省行政村农村规模、农业人口、农业劳动人口、农业产值、农业产业结构等。
2	全省水稻(早中晚)、小麦、玉米、大豆、薯类、花生、油菜、棉花、烟草、芝麻,以及蔬菜、水果等作物种植面积等。
3	全省化肥直接用量。
4	全省农作物秸秆理论资源量、产生量、利用量(打捆焚烧、沼气、饲料、肥料、基料、工业原料)、利用率。
5	全省畜禽养殖量(猪、奶牛、肉牛、羊,以及鸡、鸭、鹅等)、出栏量、畜禽粪便和污水产生量、粪污利用量。
6	全省农业/渔业机械数量、总动力。
7	沼气工程规模、数量等。

2 江西省农业温室气体排放测算体系构建

2.1 种植业

稻田 CH_4 排放估算方法参见公式(1)

$$N_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^4 (EF_i \times AD_i \times 10^{-3}) \quad (1)$$

式中: N_{CH_4} 为稻田 CH_4 排放总量, t; EF_i 为排放因子 ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); AD_i 水稻种植面积, ha; i 表示稻田类型, 分别指单季稻、双季早稻、双季晚稻的稻田。

农用地 N_2O 直接和间接排放估算方法参见公式(2)和(3):

$$E_d = (N_1 + N_2 + N_3) \times EF_d \quad (2)$$

$$E_i = [(N_1 + N_2 + N_3) \times r_1 + N_4 \times r_2] \times EF_{i1} + (N_1 + N_2 + N_3) \times r_3 \times EF_{i2} \quad (3)$$

式中: E_d 为直接排放量, t; E_i 为间接排放量, t; N_1 为化肥氮输入, t; N_2 为粪肥氮输入, t; N_3 为秸秆还田氮输入, t; N_4 为禽粪便氮输入, t; EF_d 为农用地 N_2O 直接排放因子; r_1 为农用地氮输入氨和氮氧化物的挥发率, 推荐使用 10%; r_2 为畜禽粪便氨和氮氧化物的挥发率, 推荐使用 20%; r_3 为氮淋溶和径流损失的氮量占农用地总氮输入量的百分比, 推荐使用 20%; EF_{i1} 为大气氮沉降排放因子; EF_{i2} 为氮淋溶和径流损失排放因子。

2.2 养殖业

动物肠道发酵排放 CH_4 和畜禽粪便管理排放 CH_4 和 N_2O 的测算公式如(4)、(5)和(6):

$$E_{\text{CH}_4} = \sum (EF_{j1} \times AP_{j1} \times 10^{-3} + EF_{j2} \times AP_{j2} \times 10^{-3}) \quad (4)$$

式中: E_{CH_4} 为动物肠道发酵的 CH_4 排放量, t;

EF_{j1} 为农户散养第 j 种动物每年肠道发酵的 CH_4 排放因子, $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$; AP_{j1} 农户散养第 j 种动物的数量, $\text{头} \cdot \text{只}^{-1}$; EF_{j2} 为规模化饲养第 j 种动物每年肠道发酵的 CH_4 排放因子, $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$; AP_{j2} 为规模化饲养第 j 种动物的数量, $\text{头} \cdot \text{只}^{-1}$ 。

$$E_{\text{CH}_4} = \sum (EF_j \times AP_j \times 10^{-3}) \quad (5)$$

式中: E_{CH_4} 为动物粪便管理的 CH_4 排放量, t; EF_j 第 j 种动物粪便管理每年的 CH_4 排放因子, $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$; AP_j 为第 j 种动物的数量, $\text{头} \cdot \text{只}^{-1}$;

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = \sum (EF_j \times AP_j \times 10^{-3}) \quad (6)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为动物粪便管理的 N_2O 排放量, t; EF_j 第 j 种动物粪便管理每年的 N_2O 排放因子, $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$; AP_j 为第 j 种动物的数量, $\text{头} \cdot \text{只}^{-1}$; j 代表动物类型。

2.3 农机能源消耗

农机能源消耗碳排放测算公式见(7)、(8)和(9):

$$E_m = (A_m \times B) + (W_m \times C) \quad (7)$$

$$E_i = A_i \times D \quad (8)$$

$$E_n = A_n \times F \quad (9)$$

式中: E_m 为农业机械耕作中的碳排放量, kg; A_m 为农作物的种植面积, hm^2 ; W_m 为农业机械总动力, kWh; B 、 C 为转化系数, $B = 16.47 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$, $C = 0.18 \text{ kgC} \cdot \text{kW}^{-1}$ ^[13]; E_i 为农业灌溉碳排放量, kg; A_i 为灌溉面积, hm^2 ; D 为转换系数, 采用 $D = 266.48 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 进行计算^[14]; E_n 为渔业碳排放量, kg; A_n 为渔业机械能源使用量, kWh; F 为排放

因子, IPCC 2006 建议 F 为 $74100 \text{ kg} \cdot \text{TJ}^{-1}$ ^[2]; 农机能源消耗总量: $E = (E_m + E_i + E_n) \times 10^{-3} (\text{t})$ 。

2.4 碳排放总量和减排固碳

温室气体排放总量见公式(10):

$$C_{total} = C_{种植} + C_{养殖} + E \quad (10)$$

式中: C_{total} 是计算后的农业总碳排放当量, t; $C_{种植}$ 是种植业的碳排放当量, t; $C_{养殖}$ 是养殖业的碳排放当量, t; E 为农机能源消耗碳排放当量, t。

基于江西省秸秆还田以根茬还田为主, 秸秆根茬还田排放因子(土壤碳汇核算系数)取值为 $142.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{CO}_2\text{e}$ ^[15], 故而江西省秸秆肥料化固碳计算以秸秆肥料化实际利用量同根茬还田排放因子相乘得到; 秸秆燃料化利用主要以发电直燃为主, 此部分采用秸秆捆烧的排放因子($990.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{CO}_2\text{e}$)进行计算^[15]; 沼气工程清洁能源供应替代化石能源所减少的 CO_2 排放采用抵扣煤炭(折合标准煤)的热量计算^[16], 考虑到江西省农业领域废弃物能源化的现状, 沼气工程输入端的数据收集难度较大, 本估算以输出端(沼气工程沼气产能)数据为基准。以禽畜粪便、秸秆等为沼气工程原料, 1 m^3 沼气燃烧提供的能量约等于 0.714 kg 标煤^[17], 根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》, 1 t 标准煤(tce)单位热量为 29307.6 MJ ^[18], 由《国家统计局标准煤折算方法》, 折合 1 t 标准煤的温室气体排放为 2.493 tCO_2 ^[19]。

2.5 STIRPAT 回归预测模型

基于 IPAT 模型改进的 STIRPAT 模型, 本研究对农业温室气体排放按照基准发展和低碳发展(基准发展: 即沿用 2020 年以前的发展模式; 低碳发展:

即发展绿色低碳循环农业、增加农田碳汇和可再生能源供应, 以及实施化肥农药减量替代, 控制地膜使用量, 加强农作物秸秆综合利用和畜禽粪污资源化利用, 建立健全农业碳汇补偿机制等措施)两种情景进行预测^[20-21]。根据江西省农业发展情况和国务院“十四五”发展规划分别设置 2020~2030 年与 2030~2060 年的情景模式, 其中: 基准情景是根据江西省 2011~2019 年农业 CO_2e 排放规律, 结合全省农业社会经济发展状况, 综合农村农业人口、人均农业 GDP、产业结构和农业 CO_2e 排放强度的年均增长率进行设定; 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^[21-22], 不同情景模式下各参数增长率设定如表 3 所示。STIRPAT 模型可以克服 IPAT 模型等在假设检验方面的局限, 定量研究社会经济指标对农业温室气体排放的影响程度^[23]。其基本模型为:

$$I_{\theta} = \alpha P_{\theta}^b A_{\theta}^c T_{\theta}^d e_{\theta} \quad (11)$$

消除量纲和共线性问题, 两边对数化处理:

$$\ln I_{\theta} = \alpha + b \ln P_{\theta} + c \ln A_{\theta} + d \ln T_{\theta} + e_{\theta} \quad (12)$$

式中: a 为常数; I 为农业 CO_2e 排放总量, 万 t; P 为农村农业人口, 万人; A 为农业人均 GDP, 万元 \cdot 万人 $^{-1}$; T 为农业 CO_2e 排放强度, t \cdot 万元 $^{-1}$; e 为误差; b, c, d, f 分别为农村人口、农业人均 GDP、农业 CO_2e 排放强度产业结构的弹性指数。并借鉴 York^[24] 等和冉锦成^[12] 等研究将产业结构变量纳入改进的模型, 变形为:

$$\ln I_{\theta} = \alpha + b \ln P_{\theta} + c \ln A_{\theta} + f \ln T_{\theta} + g \ln S_{\theta} + e_{\theta} \quad (13)$$

式中: S 为产业结构(农业值占总产值的比重)。

表 3 不同情景模式下各参数增长率设定

(%)

发展模式	年份	增长率设定		
		农业人口	人均农业 GDP	农业温室气体排放强度
基准情景	2020~2030	-2.55	6.00	-2.5
	2030~2060	-2.25	5.50	-3.0
低碳情景	2020~2030	-2.55	5.85	-3.0
	2030~2060	-2.65	5.45	-3.2

3 结果与讨论

3.1 江西省农业温室气体排放测算结果

3.1.1 种植业源

种植业源温室气体排放包括两个方面: 1) 稻田 CH_4 排放; 2) 农用地直接和间接 N_2O 排放(见表 4

和 5)。其中表 4 显示江西省 2011~2020 年稻田 CH_4 排放量(1984.54~2048.15 万 t) 整体呈增长的趋势, 总体增幅在 3% 左右, 并在 2017 年达到峰值, 这可能与稻田产业结构调整有关。有调研表明, 2017~2020 年间, 青壮年多为外出务工, 导致双季稻种植量减少, 中稻种植面积增多, 外加粮食市场价

格波动等原因,种粮效益降低,而瓜果蔬菜等经济作物逐渐突出,进而引起稻田中 CH_4 排放量呈上升趋势^[9]。江西省农用地 N_2O 排放量(715.08 ~ 787.28 万 t)在2014年达到峰值(见表5),同样呈先上升后

下降的趋势,年际间变幅不大。年均排放量在100万 t 以上的地区分别为赣州市、吉安市和宜春市,其中赣州市排放量最多,达150万 t 左右;景德镇市、萍乡市、新余市和鹰潭市年均排放量均小于40万 t。

表4 江西省2011~2020年各地市稻田 CH_4 排放量(CO_2e)

(万 t)

地区	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
南昌市	216.08	216.33	214.80	214.13	209.13	206.73	204.99	203.62	189.80	198.65
九江市	134.05	134.53	134.76	135.00	135.00	134.42	135.54	132.67	131.00	132.73
景德镇市	51.11	50.32	50.78	51.00	51.17	52.04	52.71	52.91	53.88	50.41
萍乡市	41.07	41.39	41.48	41.53	40.76	39.49	39.42	38.32	37.46	37.54
新余市	56.15	56.34	55.93	55.89	56.35	56.22	56.49	56.93	58.70	58.22
鹰潭市	36.24	36.47	36.83	36.93	36.65	37.22	37.34	37.18	36.23	38.56
赣州市	284.65	284.05	284.28	283.82	283.31	284.13	285.75	283.69	282.21	274.37
宜春市	336.94	342.11	344.79	345.53	344.96	345.06	344.96	345.66	344.65	351.76
上饶市	332.88	333.53	338.39	339.38	340.12	340.00	339.80	336.56	332.42	308.93
吉安市	363.80	368.81	367.64	366.86	366.77	366.46	367.25	367.88	346.30	356.77
抚州市	131.56	132.65	132.83	132.50	132.55	136.75	147.54	147.50	144.88	240.22
汇总	1984.54	1996.54	2002.51	2002.57	1996.78	1998.53	2011.80	2002.91	1957.54	2048.15

表5 江西省2011~2020年各地市农用地 N_2O 排放量(CO_2e)

(万 t)

地区	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
南昌市	65.22	69.59	65.83	67.22	67.87	67.17	62.47	49.60	45.37	47.86
九江市	47.87	48.10	55.16	55.09	52.97	51.64	52.83	47.01	47.73	46.82
景德镇市	15.41	15.53	15.64	15.95	15.80	12.91	12.58	15.08	14.50	15.81
萍乡市	22.91	23.73	21.17	22.29	22.59	23.70	23.80	21.05	23.30	38.48
新余市	17.85	17.44	18.18	20.36	20.86	20.96	21.55	17.24	16.25	17.16
鹰潭市	19.16	20.01	20.57	21.09	20.79	20.46	17.78	22.09	22.35	24.31
赣州市	139.70	143.97	148.77	151.33	153.23	154.45	157.28	177.97	180.86	156.76
宜春市	115.93	121.32	126.84	128.40	130.39	128.80	125.57	173.89	159.11	146.58
上饶市	70.68	71.32	72.81	74.79	75.59	75.87	77.86	66.66	56.53	70.51
吉安市	129.15	134.72	137.58	142.06	145.33	147.27	150.92	108.30	109.07	114.28
抚州市	87.83	89.29	88.07	88.70	51.17	56.67	51.70	40.87	38.87	36.52
汇总	731.71	755.00	770.63	787.28	756.60	759.90	754.33	739.75	713.93	715.08

整体来看,江西省2011~2020年种植业源温室气体排放量(2671.48~2789.85万 t)大致呈先上升后下降趋势,2014年达到峰值,年际间变幅不大。从排放量看,吉安市、宜春市、上饶市和赣州市年均排放量均大于400万 t,属于高排放地区;萍乡市、鹰潭市、景德镇市和新余市年均排放量均小于80 t,属于低排放地区;从时间序列看,南昌市、九江市、上饶市和吉安市总体均呈下降趋势,而萍乡市、鹰潭市、

赣州市、宜春市、新余市和抚州市总体均呈上升趋势,且幅度均不大。

3.1.2 养殖业源

江西省养殖业温室气体排放包括3个方面:1) 动物肠道发酵 CH_4 排放;2) 动物粪便管理 CH_4 排放;3) 动物粪便管理 N_2O 排放(见表6~8)。江西省各地市动物肠道 CH_4 排放量在309.92~351.25万 t,整体波动不大,其中以吉安市、赣州市、宜春市

排放量最高,年均超过 60 万 t;景德镇市和新余市排放最少,均不到 10 万 t。粪便管理产生的 CH₄ 和 N₂O 排放量整体均呈现先上升后下降趋势,于 2014 年达到峰值,排放量范围分别为 364.03 ~ 501.55 万 t(CH₄) 和 244.85 ~ 271.56 万 t(N₂O)。在粪便管理

产生的 N₂O 中赣州市年均排放量为最高,达 50 万 t 左右;景德镇市、萍乡市、新余市、鹰潭市排放较低,均不到 10 万 t,这是因为赣州市和吉安市是江西省畜禽养殖业的主要组成部分^[25-26]。

表 6 江西省 2011 ~ 2020 年各地市动物肠道 CH₄ 排放量(CO₂e)

(万 t)

地区	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
南昌市	19.51	23.26	18.84	19.43	19.29	19.15	17.14	16.97	14.45	16.38
九江市	13.53	13.89	14.11	14.58	13.72	14.08	14.62	14.23	14.74	12.21
景德镇市	8.71	8.71	8.74	8.76	8.73	4.38	4.31	4.35	3.51	4.70
萍乡市	11.60	11.77	10.73	11.41	11.95	12.94	13.15	20.54	13.71	16.64
新余市	10.61	10.86	10.85	11.29	11.13	11.08	11.09	9.09	9.54	4.59
鹰潭市	8.92	8.99	8.97	8.89	8.71	8.44	8.45	8.19	6.75	7.10
赣州市	62.34	64.21	66.03	67.48	68.20	69.06	71.42	58.94	58.49	65.47
宜春市	59.27	62.72	64.99	66.22	68.43	70.59	70.39	59.93	57.95	63.70
上饶市	26.25	27.17	27.69	28.40	28.45	28.90	31.79	25.34	24.11	22.38
吉安市	79.40	83.07	84.78	88.11	91.00	93.51	97.20	75.28	75.97	77.46
抚州市	16.12	16.23	16.54	17.30	8.80	12.17	11.69	17.36	18.58	19.30
汇总	316.25	330.88	332.26	341.87	338.43	344.30	351.25	310.21	297.80	309.92

表 7 江西省 2011 ~ 2020 年各地市动物粪便 CH₄ 排放量(CO₂e)

(万 t)

地区	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
南昌市	49.44	52.42	48.68	49.98	49.04	46.22	43.40	44.39	35.10	24.85
九江市	29.48	30.49	32.00	32.88	31.70	32.60	33.50	29.87	26.89	20.63
景德镇市	6.11	6.12	6.14	6.06	5.88	5.85	5.51	5.32	3.35	4.34
萍乡市	21.17	21.72	16.15	18.23	18.17	19.58	21.65	30.25	19.45	17.03
新余市	11.90	12.97	13.37	14.01	13.70	13.22	15.88	15.09	13.07	8.76
鹰潭市	19.01	19.19	19.63	20.25	19.65	18.84	18.94	17.41	14.49	12.98
赣州市	86.72	92.33	96.62	100.44	99.37	96.91	98.95	98.53	91.86	98.29
宜春市	85.52	94.14	99.73	99.85	97.57	92.65	88.80	86.98	66.71	54.67
上饶市	41.51	43.29	44.37	45.47	44.44	42.85	47.38	43.14	34.03	33.13
吉安市	60.23	63.63	65.34	67.68	66.99	65.11	67.75	70.30	61.06	54.60
抚州市	43.89	44.40	45.38	46.68	14.84	21.74	20.38	41.35	40.02	34.75
汇总	454.96	480.70	487.41	501.55	461.35	455.58	462.13	482.63	406.03	364.03

表 8 江西省 2011 ~ 2020 年各地市动物粪便 N₂O 排放量(CO₂e)

(万 t)

地区	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
南昌市	25.31	27.15	24.67	25.39	25.62	24.90	22.61	23.38	21.99	19.89
九江市	10.58	10.93	14.56	14.94	14.18	14.55	14.93	13.78	13.00	10.75
景德镇市	3.62	3.63	3.64	3.63	3.58	2.92	2.80	2.75	2.01	2.61
萍乡市	9.39	9.63	7.65	8.41	8.49	9.08	9.72	13.97	9.19	9.17
新余市	5.68	6.05	6.21	6.49	6.49	6.37	7.04	6.63	6.40	3.64

(续表8)

地区	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
鹰潭市	8.54	8.64	8.82	9.00	8.75	8.44	7.45	8.00	7.10	6.96
赣州市	51.09	53.46	55.29	57.15	57.36	58.44	59.59	55.47	56.61	64.38
宜春市	39.62	43.37	45.54	45.95	45.88	45.01	43.85	41.89	36.46	36.15
上饶市	21.38	22.33	23.01	23.62	23.72	23.82	25.13	21.63	20.16	17.64
吉安市	41.08	43.24	44.56	46.23	47.16	48.00	49.78	46.37	47.48	44.60
抚州市	28.56	29.24	29.89	30.75	8.32	11.55	11.62	27.64	27.72	29.72
汇总	244.85	257.67	263.85	271.56	249.54	253.08	254.52	261.51	248.11	245.51

江西省养殖业温室气体排放总量由2011年1016.05万t上升至2014年1114.98万t(达到峰值),后下降到2020年919.47万t,整体降幅达10.5%,可能与江西省实施绿色生态农业“十大行动”,以及禁养区规模养殖场拆迁有关^[27-29],这表明维持绿色生态的可持续发展农业环境有利于温室气体的减排。

3.1.3 农机能源消耗

表9为江西省农机能源消耗直接产生的CO₂,

表9 江西省2011~2020年各地市农机能源消耗碳排放量

(万t)

地区	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
南昌市	5.90	5.98	5.88	5.94	5.91	5.92	5.92	5.91	5.87	5.91
九江市	5.88	6.32	6.20	6.28	6.34	6.33	6.41	6.12	6.10	6.10
景德镇市	1.70	1.63	1.60	1.64	1.67	1.67	1.68	1.67	1.68	1.68
萍乡市	1.24	1.26	1.34	1.39	1.40	1.38	1.37	1.37	1.38	1.38
新余市	1.49	1.52	1.58	1.58	1.64	1.66	1.68	1.69	1.70	1.70
鹰潭市	1.53	1.56	1.73	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.59	1.60
赣州市	8.41	8.44	8.89	8.91	9.04	9.11	9.12	9.18	9.19	9.14
宜春市	9.29	9.09	9.60	9.61	9.73	9.79	9.83	9.85	9.89	9.89
上饶市	7.78	7.99	9.59	9.45	9.52	9.36	9.24	9.24	9.24	9.22
吉安市	9.40	9.64	9.33	9.39	9.46	9.55	9.54	9.52	9.49	9.53
抚州市	6.46	6.53	6.70	6.97	7.19	7.31	7.36	7.35	7.40	7.66
汇总	59.08	59.96	62.44	62.76	63.50	63.68	63.75	63.50	63.53	63.81

3.1.4 农业温室气体排放总量

江西省农业温室气体排放总量呈先上升后下降的趋势(见表10),2014年达到峰值,2020年为历史低值,降幅达6%。将各地市年均排放量,分为低排放区(<110万t)、中排放区(110~300万t)、较高排放区(300~500万t)和高排放区(>500万t)4

主要包括农业领域的耕作、灌溉作业和渔业机械能源消耗3部分。2011~2020年江西省农机能源消耗总碳排放量增幅8%,为63.81万t,各地市历年农机能源消耗CO₂排放波动不大,整体表现稳定;赣州市、宜春市、上饶市和吉安市碳排放较其他地区略高,年排放量大于9万t,这可能与赣州市等地区脐橙种植产业和养殖业等较为发达,其碳排放量主要与农业领域机械投入高有关^[9,30]。

个区间(图1同此分类),其中景德镇市、鹰潭市、新余市和萍乡市属于低排放区间,且历年波动较小;九江市和抚州市位于中排放区间;南昌市和上饶市位于较高排放区间;赣州市、吉安市和宜春市处于高排放区间,这可能因为与3个地区是江西省农业和养殖业的主要承担者有关^[31-33]。

表10 江西省2011~2020年各地市农业温室气体排放总量(CO₂e)

(万t)

地区	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
南昌市	381.47	394.74	378.70	382.09	376.86	370.09	356.54	343.85	312.58	313.54
九江市	241.39	244.25	256.79	258.78	253.91	253.62	257.82	243.67	239.48	229.24
景德镇市	86.64	85.93	86.55	87.03	86.82	79.77	79.57	82.07	78.92	79.52

(续表 10)

地区	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
萍乡市	107.37	109.49	98.51	103.26	103.34	106.15	109.10	125.50	104.47	120.22
新余市	103.67	105.17	106.12	109.61	110.15	109.50	113.73	106.66	105.65	94.06
鹰潭市	93.38	94.85	96.53	97.75	96.15	94.99	91.55	94.47	88.50	91.51
赣州市	632.90	646.46	659.87	669.13	670.51	672.11	682.12	683.79	679.22	668.42
宜春市	646.56	672.74	691.50	695.56	696.96	691.91	683.40	718.20	674.77	662.74
上饶市	500.47	505.63	515.86	521.11	521.84	520.81	531.20	502.57	476.48	461.81
吉安市	683.05	703.11	709.22	720.35	726.71	729.90	742.44	677.66	649.37	657.23
抚州市	314.43	318.33	319.40	322.89	222.88	246.19	250.28	282.05	277.46	368.16
汇总	3791.34	3880.71	3919.05	3967.56	3866.15	3875.03	3897.74	3860.49	3686.91	3746.46

江西省种植业、养殖业和能源消耗产生的温室气体年均排放占比分别约为 71.5%、26.9% 和 1.6%，比例结构较为稳定。种植业排放量远超养殖业和能源消耗排放量，是农业排放的“大头”，这与

郑博福^[9]等对江西省县域碳排放调研的结果较为一致，表明未来控制种植业的减排固碳工作是江西省农业减排固碳的关键点。

表 11 江西省 2011~2020 年农业碳排放总量及其占比(CO₂e)

(万 t)

年份	种植业	占比/%	养殖业	占比/%	农机消耗	占比/%	总量
2011	2716.25	71.64	1016.05	26.80	59.04	1.56	3791.34
2012	2751.54	70.90	1069.26	27.55	59.91	1.54	3880.71
2013	2773.14	70.76	1083.52	27.65	62.39	1.59	3919.05
2014	2789.85	70.32	1114.98	28.10	62.73	1.58	3967.56
2015	2753.38	71.22	1049.32	27.14	63.45	1.64	3866.15
2016	2758.42	71.18	1052.96	27.17	63.64	1.64	3875.03
2017	2766.13	70.97	1067.90	27.40	63.70	1.63	3897.74
2018	2742.67	71.04	1054.36	27.31	63.47	1.64	3860.49
2019	2671.48	72.46	951.95	25.82	63.48	1.72	3686.91
2020	2763.22	73.76	919.47	24.54	63.77	1.70	3746.46

3.2 农业减排固碳与净碳排放估算结果

基于江西省农业实际情况，本研究主要探讨了江西省农作物秸秆综合利用(包括秸秆还田肥料化、秸秆直燃能源化利用)和沼气工程清洁能源供

应替代化石能源两大领域的减排固碳情况^[34-35]。经计算，“十三五”期间(因“十二五”相关数据不全无法统计)江西省农业减排固碳和净碳排放核算结果见表 12。

表 12 江西省 2016~2020 年农业净碳排放核算(CO₂e)

(万 t)

分类	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
农业温室气体排放总量	3875.03	3897.74	3860.49	3686.91	3746.46
秸秆还田减排固碳	-208.77	-226.24	-293.29	-227.23	-234.29
秸秆直燃能源化利用	-267.63	-228.19	-102.97	-83.29	-89.86
沼气工程替代化石能源	-18.01	-18.88	-21.72	-24.53	-23.28
农业减排固碳量(三项小计)	-494.41	-473.31	-417.98	-335.05	-347.43
农业净排放量	3380.62	3462.11	3442.51	3351.86	3399.03

“十三五”期间，江西省农业减排固碳(包括秸秆还田、秸秆能源化和沼气工程清洁能源供应替代

化石能源)总量在 335.05~494.41 万 t(CO₂e)，减排固碳量占农业净排放的 10.00%~14.62%，占农

业温室气体总排放的 9.09% ~ 12.75% ,表明农业减排固碳对实现江西省“双碳”目标具有重要意义,但减排固碳的目标还需要进一步调控。

3.3 江西省农业温室气体排放时空演化特征

3.3.1 排放总量分布情况

本研究借助 ESDA(探索性空间分析)方法及可视化工具^[36],分析了 2011 ~ 2020 年江西省农业温

室气体排放总量的时空演化与空间分布特征(见图 1)。江西省农业温室气体排放整体呈现西高东低、南高北低的空间特征;向更低区间发生转变的地市有两个,分别是南昌市和上饶市。而抚州市从中排放区转变为较高排放区,这可能与抚州市草地、湿地和耕地面积在近十年约 8.25 万 hm^2 的面积转变为建设用地有关^[37-38]。

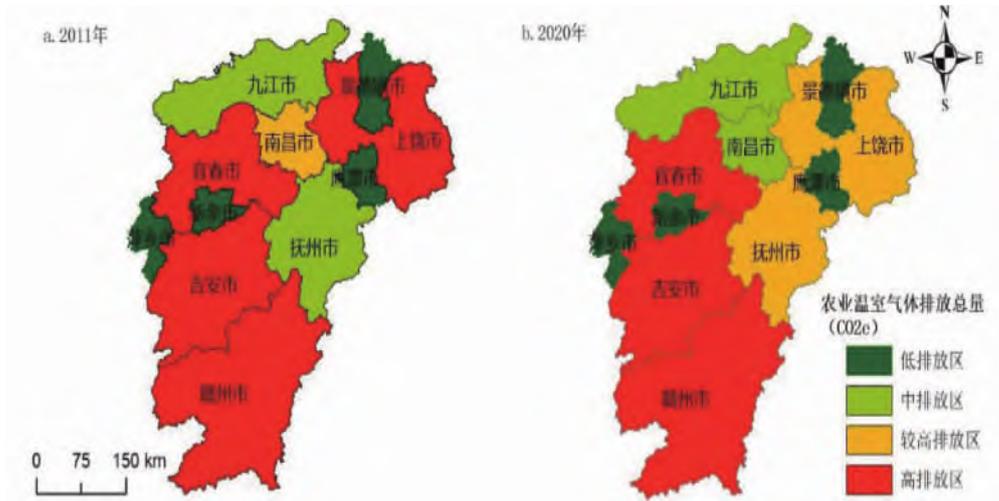


图 1 2011 ~ 2020 年江西省农业温室气体排放总量时空变化

3.3.2 不同排放源分布情况

以 2020 年为例,运用自然断点法将 11 个地市

农业温室气体排放量分类(见图 2),其中稻田 CH_4 排放较高的地区为上饶市、吉安市、宜春市和赣州

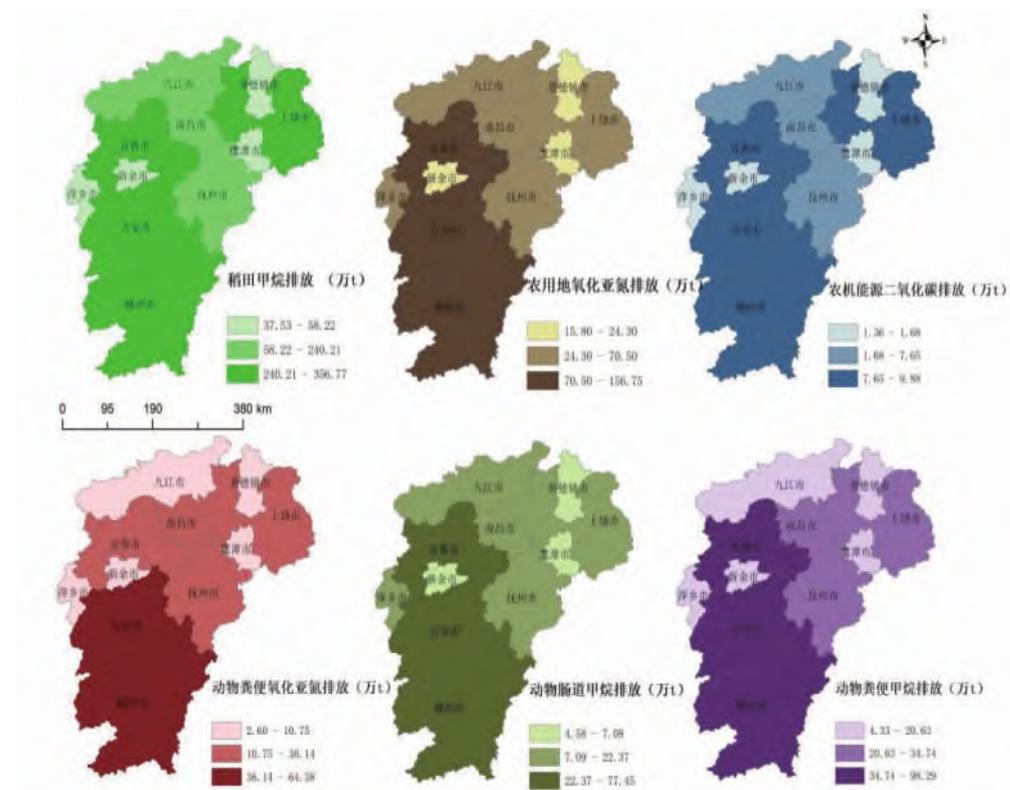


图 2 2020 年江西省各地市农业温室气体各排放源空间分布

市,这可能是因为这些地区水稻种植面积较大^[9];农用地 N₂O 排放量较高的地区是宜春市、吉安市和赣州市;动物肠道发酵 CH₄ 排放和动物粪便管理 CH₄ 排放较多的地区为赣州市、宜春市和吉安市,以上地区温室气体排放量主要受养殖业规模的影响,因此两项指标体现空间分布一致性^[25,31];动物粪便管理 N₂O 排放呈由南向北递减的空间分布规律,赣州市和吉安市为较高排放区域,这可能是由两个原因造成的,第一赣州市和吉安市是江西省主要的畜禽养殖基地^[33],与江西省北部城市相比,由于畜禽粪污的产量高导致 N₂O 的排放基数高于北部城市;第二,产生的畜禽粪污多采用厌氧发酵、好氧堆肥和粪污还田等方式进行资源化利用^[26,39],但有研究表明,畜禽粪污处理过程中同样会诱导 N₂O 产生,如好氧堆肥过程中的硝化反应和反硝化反应均会产生 N₂O^[40]。

3.4 江西省农业温室气体排放趋势预测

STIRPAT 回归预测与情景模拟预测结果分析如下:分别对比分析江西省农业总碳排放当量和净排放的系数关系与回归趋势,发现社会经济指标对农业总碳排放影响效果显著,且调整后的模型解释力较强,Adjusted-R² 为 0.9767。根据拟合回归诊断结果,温室气体排放量与影响因素处于线性关系,且满足正态分布,具备同方差性,符合回归模型预测的基本条件,可采用基准发展情景和低碳发展情景分析江西省农业温室气体 2030 年和 2060 年排放趋势。根据最小二乘法建立的模型回归结果整体显著性表

现良好,因此显著性检验均拒绝原假设且通过 1% 水平下的显著性样本检验。根据设置的基准情景和低碳情景模式,运用 STIRPAT 模型对江西省农业温室气体排放进行拟合,得出两种情景下农业温室气体排放趋势。

根据最小二乘法 (OLS) 建立数学模型:

$$\ln I\theta = -4.7298 + 0.9114 \ln P_{\theta} + 0.5723 \ln A_{\theta} + 0.2888 \ln T_{\theta} - 0.0849 \ln S_{\theta} + e_{\theta}$$

两边对数转换得到江西省农业温室气体排放量的驱动因子模型,根据表 3 中的情景参数设定,分别获得江西省 2019~2030 年农业温室气体排放量(见表 13)和 2019~2060 年农业温室气体排放量(见表 14)。

回归预测模型结果显示:在基准发展模式 and 低碳发展模式下,2030 年排放总量预计可分别减少 12.66% 和 14.91%,分别相当于减少了 466.94 万 t 和 549.6 万 t CO₂ 当量排放。同样,在基准发展模式下,2060 年排放总量预计可减少 23.21%,由 2019 年 3686.91 万 t 减少至 2831.21 万 t;而低碳发展模式下预计降幅可达 29.13%,排放总量减少至 2612.89 万 t,相当于减少 1074.01 万 t CO₂ 当量排放。

3.5 减排固碳的对策和建议

3.5.1 种植业

种植业减排固碳的重点是稻田种植:1) 以宜春市、上饶市和吉安市为水稻主产区,选育推广优质低碳水稻品种,降低水稻甲烷排放强度;2) 优化稻田

表 13 2030 年江西省农业温室气体排放模拟预测

地区	基准情景			低碳情景	
	2019 年	2030 年	幅度/%	2030 年	幅度/%
抚州市	277.46	258.19	-6.95	218.47	-21.26
赣州市	679.22	662.48	-2.47	652.87	-3.88
吉安市	649.37	394.81	-39.20	389.08	-40.08
景德镇市	78.92	119.36	51.24	117.62	49.05
九江市	239.48	283.71	18.47	279.60	16.75
南昌市	312.58	225.44	-27.88	222.17	-28.92
萍乡市	104.47	186.05	78.09	183.35	75.50
上饶市	476.48	450.07	-5.54	443.54	-6.91
新余市	105.65	141.07	33.53	139.02	31.59
宜春市	674.77	361.28	-46.46	356.03	-47.24
鹰潭市	88.50	137.52	55.38	135.52	53.13
汇总	3686.91	3219.97	-12.66	3137.28	-14.91

表 14 2060 年江西省农业温室气体排放模拟预测

地区	基准情景			低碳情景	
	2019 年	2030 年	幅度 / %	2030 年	幅度 / %
抚州市	277.46	252.85	-8.87	200.35	-18.92
赣州市	679.22	576.72	-15.09	539.63	-5.46
吉安市	649.37	343.70	-47.07	321.60	-3.40
景德镇市	78.92	103.90	31.66	97.22	-8.47
九江市	239.48	246.99	3.14	231.10	-6.63
南昌市	312.58	196.25	-37.21	183.63	-4.04
萍乡市	104.47	161.97	55.03	151.55	-9.97
上饶市	476.48	391.81	-17.77	366.61	-5.29
新余市	105.65	122.81	16.24	114.91	-7.48
宜春市	674.77	314.51	-53.39	294.28	-3.00
鹰潭市	88.50	119.72	35.27	112.02	-8.70
汇总	3686.91	2831.21	-23.21	2612.89	-29.13

水分管理,强化中期晒田和因地制宜的推广稻田节水灌溉技术; 3) 改进稻田施肥管理,推广有机肥腐熟还田等技术。

针对农用地 N_2O 减排固碳工作,可与全省化肥减量增效工作相结合、一体推进: 1) 加大测土配方施肥推广力度; 2) 推广作物利用率高的新型肥料; 3) 推广水肥一体化等高效施肥技术; 4) 增加有机肥投入替代部分化学肥料。

3.5.2 养殖业

以赣州市、吉安市和宜春市为养殖示范基地: 1) 选育推广高产低排放畜禽品种; 2) 推广全株青贮、低蛋白日粮等技术; 3) 改进畜禽饲养管理,实现精准饲喂,降低畜禽肠道甲烷排放强度; 4) 优化畜禽粪污处理工艺,提高处理水平,建立粪污资源化利用台账,降低畜禽粪污管理的 CH_4 和 N_2O 排放。

3.5.3 农机

农机能源消耗方面产生的碳排放相对较少,可以将粮食和重要农产品生产所需农机作为减排固碳的重心: 1) 加快老旧农机报废更新力度,推广先进适用的低碳节能装备,降低化石能源消耗和 C_2O 的直接排放; 2) 推广新能源技术,加快绿色、智能、复式、高效农机化技术装备普及应用。

4 结论

本研究通过构建江西省农业温室气体排放测算体系,分别对“十二五”和“十三五”规划时期江西省

种植业、养殖业和农机能源消耗产生的温室气体进行汇总分析。结果表明,2011~2020 年江西省农业温室气体排放总量(3686.91~3967.56 万 t) 呈先升后降趋势; 空间上呈现西高东低、南高北低的分布特征。种植业、养殖业和能源消耗年均 CO_2 排放当量占比分别约为 71.5%、26.9% 和 1.6%; 其中 CH_4 (稻田、动物肠道发酵和粪便管理排放之和) 排放总量占比最大,年均占比约为 70% 左右。吉安市、宜春市和赣州市 CH_4 排放总量年均都在 500 万 t 以上,是未来江西省农业减排固碳的重点区域。而在种植业中稻田 CH_4 和农用地 N_2O 的 CO_2e 占比分别为 72.77% 和 27.23%; 养殖业中动物肠道 CH_4 、动物粪便 CH_4 和动物粪便 N_2O 的 CO_2e 占比分别为 31.53%、43.90% 和 24.57%。基于江西省农业温室气体的排放情况,应该将未来减排固碳的核心目标放在种植业和养殖业,如推广优质低排水稻品种,优化施肥技术和施肥配比; 选育高产低排放的畜禽品种,实现精准饲喂,优化畜禽粪污处理工艺,降低畜禽粪污管理的 CH_4 和 N_2O 排放。本研究通过情景模拟预测,到 2030 年,江西省农业温室气体排放降幅将达国家相关要求,为 14.91%,到 2060 年,可达 29.13%。因此,在我国“碳达峰、碳中和”的战略背景下,江西省农业温室气体减排固碳应聚焦在种植业和养殖业两大领域,同时充分挖掘生态农业碳汇和农村可再生能源开发利用的潜力,这对推动实现我国“碳达峰、碳中和”的目标具有重要意义。

参考文献:

- [1] GAMETT T. Climate change and agriculture: can market governance mechanisms reduce emissions from the food system fairly and effectively? [M]. London: International Institute for Environment Development 2012.
- [2] NETZ B, DAVIDSON O R, BOSCH P R, et al. Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policy-makers [J]. *Computational Geometry*, 2007, 18(2): 95 - 123.
- [3] 王兴, 薛建福, 王钰乔, 等. 我国西部地区种植业碳收支分析 [J]. *中国农业科技导报*, 2016(3): 104 - 111.
- [4] 郑聚锋, 潘根兴, 程琨, 等. 从《IPCC 2006 国家温室气体排放清单增补: 2013 湿地》谈湿地温室气体计量进展及问题 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(10): 1120 - 1125.
- [5] YUN T, ZHANG J B, 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.
- [6] 王兴, 马守田, 濮超, 等. 西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(s2): 231 - 234.
- [7] 王婷, 陈玲玲. 新形势下江西农业产业化问题研究 [J]. *价格月刊*, 2009(11): 44 - 48.
- [8] 张文东, 许仕, 庐俊. 江西省农业面源污染空间分布格局 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(16): 9056 - 9059.
- [9] 郑博福, 梁涵, 万炜, 等. 江西省县域农业碳排放时空格局及影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 70 - 80.
- [10] 李颖. 安徽省农业碳排放测算及其影响因素分析 [J]. *农村经济与科技*, 2017, 28(19): 41 - 43.
- [11] 江西省生态气象中心. 农业温室气体清单编制规范: Db36/T 1094—2018 [S]. 南昌: 江西省市场监督管理局, 2018.
- [12] 冉锦成, 苏洋, 胡金凤, 等. 新疆农业碳排放时空特征、峰值预测及影响因素研究 [J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(8): 16 - 24.
- [13] 李团胜, 李函娇, 杨才玉, 等. 西安地区农作物生产过程中碳排放估算 [J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2014, 33(3): 400 - 404.
- [14] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放与经济发
- 展的实证研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(12): 8 - 13.
- [15] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 218 - 224.
- [16] 杨艳丽, 李光全. 秸秆基生物天然气生产成本分析 [J]. *经济研究导刊*, 2020(26): 136 - 138.
- [17] 中国统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社: 2014.
- [18] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读 [J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 1 - 11.
- [19] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [20] 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.
- [21] 徐丽, 曲建升, 吴金甲, 等. 中国农牧业碳排放时空变化及预测 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(10): 1232 - 1241.
- [22] 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.
- [23] 黎孔清, 马豆豆, 李义猛. 基于 STIRPAT 模型的南京市农业碳排放驱动因素分析及趋势预测 [J]. *科技管理研究*, 2018, 38(8): 238 - 245.
- [24] YOPK R, ROSA E A, DIETZ T. Bridging environmental science with environmental policy: Plasticity of population, affluence, and technology [J]. *Social Science Quarterly*, 2002, 83(1): 18 - 34.
- [25] 王平. 赣州市畜牧业发展现状及分析 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- [26] 董闽鲜, 严景生, 周永生, 等. 吉安市提升畜牧业综合生产能力的举措 [J]. *江西畜牧兽医杂志*, 2013(1): 25 - 26.
- [27] 胡汉平. 推进绿色生态农业十大行动打造美丽中国"江西样板" [J]. *江西农业*, 2016(5): 10 - 12.
- [28] 刘凯, 夏建华, 洪彩艳. 推进"十大行动"建设生态江西 [J]. *江西农业*, 2017(24): 8 - 9.
- [29] 赵鑫. 瑞昌市: 召开九江市绿色生态农业十大行动工作推进会 [J]. *南方农机*, 2017, 48(19): 13 - 13.
- [30] 张婷, 蔡海生, 张学玲. 基于碳足迹的江西省农田生态系统碳源/汇时空差异 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014: 767 - 773.
- [31] 袁定波, 王红利, 廖兵, 等. 基于耕地消纳能力和水环境容量的畜禽粪便环境承载力分析——以宜春市为例 [J]. *江西农业学报*, 2022, 34(8): 156 - 162.
- [32] 廖强, 黄杨生, 曾健, 等. 赣州市农机专业合作社发

- 展现现状及对策研究——基于宁都县调研数据 [J]. 南方农机, 2022, 53(21): 15-17.
- [33] 黄文群, 王卫华, 周霞. "区域品牌+标准化"战略下吉安市绿色食品产业发展策略探讨 [J]. 南方农业, 2022, 16(15): 138-141.
- [34] ZHOU J B, JIANG M M, CHEN G Q. Estimation of methane and nitrous oxide emission from livestock and poultry in China during 1949 - 2003 [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(7): 3759-3767.
- [35] LU Y, CHADWICK D, NORSE D, et al. Sustainable intensification of China's agriculture: the key role of nutrient management and climate change mitigation and adaptation [J]. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 2015, 209: 1-163.
- [36] 崔旺来, 陈梦圆, 钟海玥. 基于探索性空间数据分析和地统计分析的湾区生态安全空间分异及差异化管理——以浙江大湾区为例 [J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 2074-2087.
- [37] 陶铃佳, 刘平辉, 朱传民. 江西省抚州市 1990—2020 年耕地资源时空变化特征研究 [J]. *天津农业科学*, 2022, 28(11): 72-80.
- [38] 万见怡, 刘平辉, 朱传民. 基于土地利用变化的抚州市生态系统服务价值变化研究 [J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(1): 31-38.
- [39] 罗义春, 董闽鲜, 赖贻奎, 等. 采用不同方式处理养猪场污水的效果观察 [J]. *江西畜牧兽医杂志*, 2016(1): 17-19.
- [40] 吴伟祥, 李丽劫, 吕豪豪, 等. 畜禽粪便好氧堆肥过程氧化亚氮排放机制 [J]. *应用生态学报*, 2012(06): 272-280.