

包红旭, 高玉臻, 董先博, 等. 基于生命周期评价的水稻种植过程碳中和分析——以辽宁省为例[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(6): 651-662.

BAO Hongxu, GAO Yuzhen, DONG Xianbo, et al. Carbon neutrality analysis of rice planting process based on life cycle assessment: a case study of Liaoning province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(6): 651-662.

基于生命周期评价的水稻种植过程碳中和分析 ——以辽宁省为例

包红旭, 高玉臻, 董先博, 刘昊, 曾圣作, 苏东悦

(辽宁大学 环境学院, 沈阳 110036)

摘要: 为探讨水稻种植过程中碳收支变化趋势, 以辽宁省为研究对象, 收集辽宁省 2012-2021 年数据, 通过生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)研究辽宁省水稻种植过程碳中和情况。结果表明: 种植过程中水稻 CH₄ 排放在碳排放组成中占比最大, 2012 年达最大值 5.69 Mt CO₂-eq, 占比为 53.26%。辽宁省水稻种植过程单位面积碳排放的年变化曲线呈开口向下的抛物线形状, 单位产量碳排放、单位面积碳损失和单位产量碳损失虽有波浪状起伏, 整体上随年份呈现减少趋势。辽宁省水稻种植碳中和水平推进过程具有较好的渐进性, 2012-2021 年碳损失随年份的推进整体逐渐减少, 有较好的趋势实现水稻种植过程的绿色低碳。今后应当运用固碳和节能的低碳减排技术, 推广先进的绿色低碳高产种植方式, 助力农业“碳达峰和碳中和”目标的进程。

关键词: 生命周期评价; 水稻; 碳排放; 碳收支

中图分类号: TU982.29

文章编号: 1000-1700(2024)06-0651-12

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Carbon Neutrality Analysis of Rice Planting Process Based on Life Cycle Assessment: A Case Study of Liaoning Province

BAO Hongxu, GAO Yuzhen, DONG Xianbo, LIU Hao, ZENG Shengzuo, SU Dongyue

(School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: To investigate the changing trend of carbon budget during rice cultivation in Liaoning Province, the study collected data from 2012 to 2021 and used the life cycle assessment (life cycle assessment, LCA) method. The results indicated that methane (CH₄) emissions from rice cultivation comprise the largest portion of the carbon emissions. The maximum value of CH₄ emissions was recorded in 2012 at 5.69 Mt CO₂-eq, contributing 53.26% of the total carbon emissions. The annual carbon emission change curve per unit area takes the shape of a downward-opening parabola during rice cultivation in Liaoning Province. While carbon emission per unit of production, carbon loss per unit area, and carbon loss per unit of production experience wave-like variations, on the whole year, it shows a decreasing trend with time. The process of advancing the carbon neutrality level of rice cultivation in Liaoning Province demonstrates a gradual decrease in carbon loss from 2012 to 2021, with a positive trend towards achieving environmentally friendly and low-carbon rice cultivation. To further aid the agricultural "peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality" target process, it should implement low-carbon cultivation technology to effectively sequester carbon, conserve energy and promote advanced,

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: 辽宁省科学技术厅应用基础研究计划项目(2023JH2/101300010); 辽宁省 2022 年度研究生教育教学改革研究项目(LNYJG2022017); 2022 年度沈阳市科学技术计划自然科学基金专项项目(22-315-6-14)

第一作者: 包红旭(1976-), 男, 博士, 教授, 从事生物质废弃物多尺度资源化处理理论及技术、生态修复工程研究, E-mail: baohongxu@lnu.edu.cn

environmentally conscious and high-yielding cultivation methods.

Key words: life cycle assessment; rice; carbon emission; carbon budget

目前,二氧化碳排放量日益增加带来的全球变暖,对人类生存和发展产生了明显的制约,人们对碳排放的关注越来越密切,如何实现温室气体减排已经成为亟待解决的全球性难题^[1]。秦大河等^[2]指出,全球气候变暖有一半以上是人类的生产生活造成的。因此,有规则地减少碳排放是缓解气候变暖的重要途径^[3],也是实现低碳绿色发展的必经之路^[4]。农业生产过程是全球温室气体排放的重要来源,当前其排放量约占全球温室气体排放量的13.5%,而且经统计这个比重仍然在不断提升^[5-6],如果不及时采取遏制措施,实施低碳绿色农业政策,预计到2030年,农业生产过程中甲烷和氧化亚氮的排放量将分别增加60%和35%~60%^[7],减少农业生产过程中温室气体排放对控制全球气候的不断恶化具有重要作用。

作为温室气体排放大国,中国当前面临国际减排的压力与日俱增2020年9月22日,习近平在第七十五届联合国大会上宣布,中国将全力争取在2030年之前达到二氧化碳排放的最高峰值,并致力于在2060年之前实现碳中和的目标^[8]。考虑我国的实际国情,如期实现“双碳”目标仍面临诸多挑战,我国“十四五”规划明确提出要推动绿色低碳发展,构建生态文明体系,并做出“双碳1+N”的重大决策^[9]。

中国是世界上最大的水稻生产国,全国每年稻田 CH_4 和 N_2O 排放量分别约为7.41 Tg和32 Gg(即 7.41×10^6 t和 3.2×10^4 t),占农业源温室气体排放的22%^[10-11]。“双碳”目标背景下,对水稻种植过程中碳盈余量的分析逐渐增加,主要体现在核算水稻种植过程中的碳排放量和碳固定量,从而分析两者的差值。曹黎明等^[12]基于生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)研究了上海市水稻生产各种碳排放源的相对贡献,全面评估水稻生产周期的碳足迹,对减少水稻生产碳排放具有重要意义。邱子健等^[13]通过估算江苏省2000-2019年农业碳排放,从而探讨江苏省农业碳排放时序特征及未来碳排放趋势,为低碳政策的合理安排提供科学依据。陈中督等^[14]用生命周期评价法定量分析了长江中下游流域稻麦轮作系统碳足迹及其构成,为实现我国低碳绿色农业提供理论支撑与科学依据;LI等^[15]采用生命周期评价与DNDC模型相结合的方法,分析了2007-2018年中国县域水稻生产的碳足迹,推动了对低碳绿色农业实践的追求。农业系统既是重要的温室气体排放源,又是一个巨大的碳汇系统^[16]。调控稻田土壤固碳减排,对于保障我国粮食安全以及实现“碳中和”目标具有重要意义^[17]。

作为全国粮食主产省之一,辽宁省占有186.67万 hm^2 典型黑土地^[18],农业发达且农田广布,黑土资源有机质含量高,为保障国家粮食安全提供了有力支撑。有研究表明,辽宁省水稻常年种植面积占全省粮食作物种植面积的比重基本保持在15%,水稻总产量占全省粮食作物总产量比重基本保持在20%。农业农村部、国家发展改革委2022年印发《农业农村减排固碳实施方案》,提出降低农业生产过程中的温室气体排放量,强化农田土壤对二氧化碳的固定能力,提高我国农业生产对气候变化的适应能力^[19]。在“碳达峰和碳中和”目标背景下,本研究对辽宁省2012-2021年水稻种植生产系统的碳排放、碳固定进行核算,分别计算出相应的碳排放总量和碳固定总量,分析了时间演化特征,找出制约其低碳化发展的因素,并提出相关建议,具有重要意义^[20]。本研究既可为东北三省以及类似区域的污染治理与节能降碳工作提供决策参考,也可为农业“减污降碳”相关领域的研究者提供方法借鉴。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

本研究以辽宁省为研究对象,探讨辽宁省2012-2021年水稻种植过程中碳排放、碳固定的时间演化特征。辽宁省位于我国东北地区南部,东北方与吉林省接壤,西南方与河北省接壤,属于温带大陆性季风气候区,日照丰富,年均日照2 457 h,年均气温9.2℃,年均降水量892 mm,2021年辽宁省水稻播种面积 520.6×10^3 hm^2 ,是有名的“东北大米”的产区。此外,辽宁省黑土地面积广阔,土层深厚,有利于优质稻米生长,盛产早熟单季水稻,是我国重要的水稻生产基地。

1.2 数据来源

本研究以辽宁省早熟单季稻米为研究对象,收集水稻种植过程中从摇篮到大门的调查数据,包

括:稻田排放(水稻呼吸作用和光合作用)、农业资料投入(肥料、农药、柴油和灌溉)、秸秆焚烧等3个阶段,探究其种植过程中各部分的碳排放和碳固定构成。数据内容主要包括水稻播种面积、水稻产量、化肥用量、农机投入消耗的柴油量和农药使用量等,所涉及的数据,均来源于《辽宁省统计年鉴》(2012-2021)。

1.3 系统边界

本研究以辽宁省早熟单季稻米为例,基于从摇篮到大门的生命周期范畴,不考虑消费与加工等阶段,将系统边界设定为从种子的获取到秸秆焚烧等阶段。由图1可知,温室气体排放主要包括3个方面:(1)稻田排放。包括播种和生长期内CH₄排放等所产生的温室气体排放。(2)农业资料投入。包括肥料、农药、柴油投入和灌溉耗电等农资投入所产生的温室气体排放。(3)农业秸秆焚烧。指水稻成熟后秸秆焚烧所产生的温室气体排放。

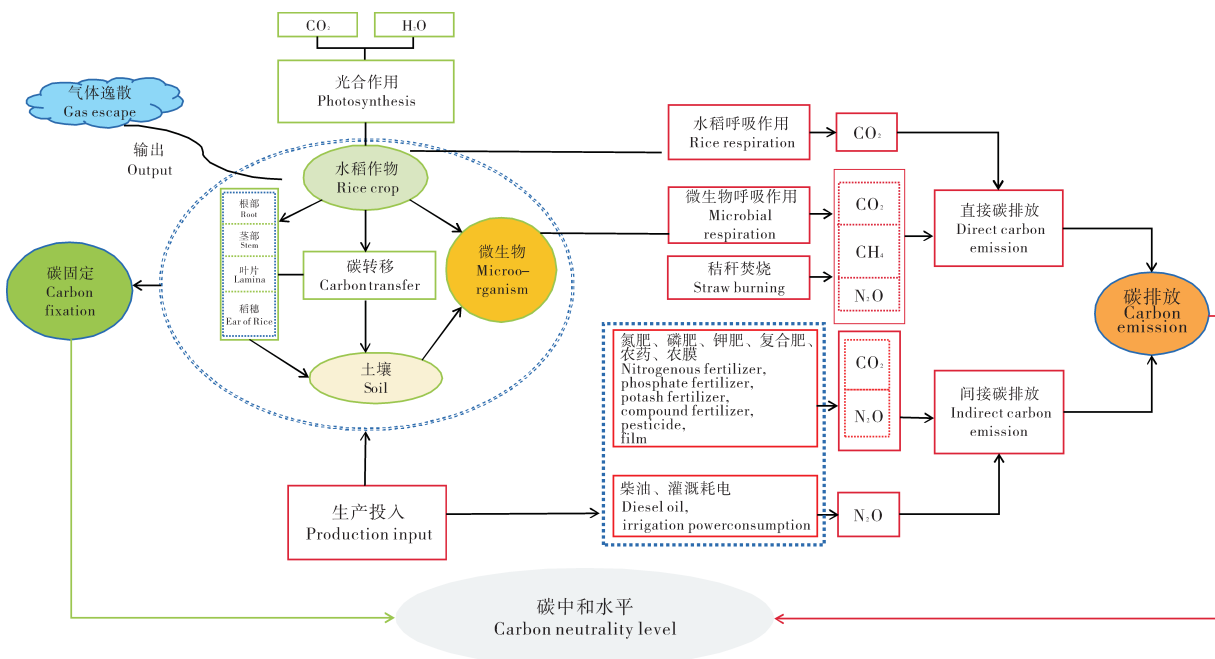


图1 水稻种植生态系统碳循环

Figure 1 Carbon cycle in rice planting ecosystem

1.4 研究方法

本研究参考生命周期评价法(LCA)的碳排放核算方法,对辽宁省水稻种植碳排放和碳固定进行研究,生命周期碳排放评价则是以过程分析为基础的评价法,可用于评估某一产品在生命周期或服务过程中所排放的CO₂,其评价过程和结果比较详细和准确^[21]。

根据数据的可获得性和连续性,选取2012-2021年为研究年限,研究的系统边界为水稻从播种到收获以及秸秆焚烧全过程造成的温室气体排放,以及全过程的温室气体固定量。此外,为方便核算,本研究统一使用水稻生产过程的二氧化碳排放量作为核算单位(以CO₂-eq计)。

1.4.1 水稻碳排放 水稻种植过程中排出的温室气体主要有直接排放和间接排放两种途径。

(1) 直接排放。水稻种植过程所排放的温室气体主要来源于秸秆的燃烧、稻田土壤中微生物的呼吸作用产生的N₂O、CH₄和CO₂,以及水稻的根、茎和叶片等部位的呼吸作用产生的CO₂。土壤微生物呼吸所释放的二氧化碳由于排放过程复杂、影响因素众多,排放量小^[22],研究假设微生物呼吸作用产生的温室气体量与土壤固碳量处于相互抵消状态^[23]。因此本研究核算对象为水稻秸秆焚烧产生的温室气体和水稻种植CH₄排放量。

秸秆焚烧产生的温室气体通过以下公式进行计算。

$$CE_1 = \sum_j^3 P \times j \times GWP_j \quad (1)$$

式中:CE₁为水稻秸秆露天焚烧产生的二氧化碳排放当量(Mt CO₂-eq);P为水稻秸秆的露天焚烧量(10⁴t);

$\&_j$ 为单位质量秸秆焚烧后第 j 种温室气体的排放因子,秸秆露天焚烧产生的温室气体主要有 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 ,对应排放因子分别为3.1, 1 460, $3.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24]; GWP_j 为在100年的时间框架内,各种温室气体的温室效应对应于相同效应的二氧化碳的质量,根据2021年IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)报告, N_2O 、 CO_2 和 CH_4 的相应 GWP_j 值分别为273, 1, 27.9^[25]。

$$P = Y \times C_k \times R_k \times F \tag{2}$$

式中: Y 为水稻作物产量(wt); C_k 为水稻的谷草比; R_k 为辽宁省水稻秸秆焚烧比例; F 为水稻秸秆燃烧效率。

$$CE_2 = \sum_i S_i \times D_i \times CH_4 \text{ 水稻} \times 27.9 \tag{3}$$

式中: CE_2 为水稻种植过程中年度二氧化碳排放当量(Mt CO_2 -eq); S_i 为水稻种植面积(hm^2); D_i 为水稻成长时间(d);辽宁省水稻种植以单季早稻为主^[26], CH_4 为水稻种植过程中年度 CH_4 排放量。

$$CH_4 \text{ 水稻} = EF_e \times SF_w \times SF_p \times SF_o \times SF_{s,r} \tag{4}$$

式中: EF_e 为不含有机添加物的持续性灌水稻田的基准排放因子,根据IPCC的研究成果,该值为 $1.30 \text{ kg } CH_4 / (hm^2 \cdot d)$ ^[27]; SF_w 、 SF_p 分别为种植期不同水分状况的换算系数和种植期前季前不同水分状况的换算系数^[28],王兴等^[26]通过研究,对不同稻作区进行不同的取值,其中辽宁省早熟单季稻稻作区($SF_w = 0.52$, $SF_p = 0.68$); SF_o 为不同有机物质的施用类型和数量变换的相关换算系数; $SF_{s,r}$ 为水稻种植过程中土壤类型以及水稻品种等的相关换算系数,但目前尚没有有效途径获取有关的权威数据,因此在该研究中 $SF_{s,r}$ 默认值为1。

$$SF_o = (1 + \sum_i RoA_i \times CFoA_i)^{0.59} \tag{5}$$

式中: RoA_i 为水稻种植过程中施用不同有机添加物的比例; $CFoA_i$ 为不同有机添加物的换算系数。

(2)间接排放。水稻种植过程间接排放产生的温室气体包括氮肥施用产生的 N_2O 和施用化肥(氮肥、磷肥、钾肥和复合肥)、农药、农膜以及柴油消耗和灌溉过程中产生的温室气体排放量。

$$CE_3 = F_N \times N \times 44/28 \times 273 \tag{6}$$

式中: CE_3 为水稻种植过程中施用氮肥产生的 N_2O 所折合的二氧化碳排放当量(Mt CO_2 -eq); F_N 为水稻种植过程中氮肥施用的折纯量(t); N 为水稻种植过程中氮肥施用引起稻田 N_2O 中N的排放系数,为 $1.53 \text{ kg } CO_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$$CE_4 = \sum_i T_i \times E_i \tag{7}$$

式中: CE_4 表示水稻种植过程中投入生产资料所产生的温室气体排放量(Mt CO_2 -eq); T_i 为水稻种植阶段氮肥、磷肥、钾肥、复合肥、农药、农膜以及柴油消耗和灌溉过程中产生的温室气体排放量; E_i 为指种植过程中各生产资料的碳排放系数(表1)。

表1 主要生产资料的碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficient of main means of production

碳源种类 Type of carbon source	排放系数/($\text{kg } CO_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$) Emission factor	标准源 Standard source
氮肥 Nitrogenous fertilizer	1.53	CLCD 0.7
磷肥 Phosphate fertilizer	1.63	CLCD 0.7
钾肥 Potash fertilizer	0.65	CLCD 0.7
复合肥 Compound fertilizer	1.77	CLCD 0.7
农药 Pesticide	12.44	CLCD 0.7
农膜 Agricultural film	22.72	CLCD 0.7
柴油 Diesel oil	0.89	CLCD 0.7
灌溉 Irrigation	977.09	文献[29] References

1.4.2 水稻碳固定 水稻碳固定的生态功能表现为以大气中存在的二氧化碳和水蒸气为原料,通过水稻的光合作用将其合成多种碳水化合物,从而储存在植株体当中,并以根茬、秸秆和枯枝落叶形式

经过碳转移传输至土壤中,虽然水稻根部、茎部、叶片和稻穗等部分活细胞均能进行光合作用,不过光合作用主要集中在根部和秸秆两部分,因此本研究围绕水稻的根部和秸秆部分进行固碳核算。

(1) 秸秆固碳量核算:

$$CS_1 = \left(\frac{Y}{HF} - Y \right) \times CF \times 44/12 \quad (8)$$

式中: CS_1 表示秸秆的固碳含量(Mt CO₂-eq); Y 为水稻作物年产量(万 t); HF 为水稻的收获系数; CF 为水稻秸秆生物量与含碳量的转化系数; 44/12 为 C 元素转化为 CO₂ 分子的比例。

(2) 根部固碳量核算:

$$CS_2 = \frac{Y}{HF} \times RSR \times CR \times 44/12 \quad (9)$$

式中: CS_2 为水稻根部的固碳含量(Mt CO₂-eq); RSR 为根冠比; CR 为水稻根部生物量与含碳量的转化系数。

1.4.3 单位产量碳排放

$$CE = CE_1 + CE_2 + CE_3 + CE_4 \quad (10)$$

$$CEY = \frac{CE}{Y} \quad (11)$$

式中: CE 为水稻作物种植过程中的年碳排放量(Mt CO₂-eq); CE_y 为单位产量碳排放(kg CO₂-eq·t⁻¹); Y 为水稻作物年产量(万 t)。

1.4.4 单位面积碳排放

$$CEA = \frac{CE}{A} \quad (12)$$

式中: CE 为水稻作物种植过程中的年碳排放(Mt CO₂-eq); CE_A 为单位面积碳排放(kg CO₂-eq·hm⁻²); A 为水稻作物年播种面积(10⁴·hm²)。

1.4.5 碳固定总量

$$CS = CS_1 + CS_2 \quad (13)$$

式中: CS 为水稻作物种植过程中的年碳固定量(Mt CO₂-eq)。

1.4.6 净碳收支水平

$$CN = CE - CS \quad (14)$$

式中: CN 为水稻净碳收支水平,通过核算水稻种植过程中碳固定量与碳排放量的差值得出,当 $CN > 0$ 时,表示水稻种植过程中碳固定量大于碳排放量,即为碳盈余,当 $CN = 0$ 时,表示水稻种植过程中碳固定量等于碳排放量,即为碳中和,当 $CN < 0$ 时,表示水稻种植过程中碳固定量小于碳排放量,即为碳损失。

1.4.7 单位面积碳损失

$$CNA = \frac{CN}{A} \quad (15)$$

式中: 当 $CN < 0$ 时, CN 为水稻作物种植过程中的年碳损失量(Mt CO₂-eq); CNA 为单位面积碳损失(kg CO₂-eq·hm⁻²); A 为水稻作物年播种面积(10⁴·hm²)。

1.4.8 单位产量碳损失

$$CN_y = \frac{CN}{Y} \quad (16)$$

式中: CN_y 为单位产量碳损失(kg CO₂-eq·t⁻¹); Y 为水稻作物年产量(万 t)。

2 结果与分析

2.1 水稻生产过程碳排放与碳固定分析

2012–2021 年辽宁省水稻种植过程碳排放(以 CO₂-eq 计),大致呈现 3 种变化趋势(表 2, 图 2)。第 1 阶段是缓慢下降期(2012–2013 年),水稻种植过程碳排放总量由 2012 年的 945.74 万 t 减少到 2013 年的 942.66 万 t,减少幅度为 0.33%,水稻播种面积的减少、同时各项农资投入随之减少是这一时期稻田碳排放减少的重要原因。第 2 阶段是急剧下降期(2013–2014 年),水稻种植过程碳排放总量由 2013 年的 942.66 万 t 减少到 2014 年的 839.98 万 t,减少幅度为 11.89%,主要原因有:一方面水稻播种面积减少,减

少量达 8.58 万 hm^2 ; 另一方面 2013 年中共中央、国务院印发《关于全面深化农村改革加快推进农业现代化的若干意见》, 得益于国家宏观政策对水稻生产的投入以及机械化水平的提高, 辽宁省水稻种植业农资投入结构得到优化^[30]。第 3 阶段是波动期(2014–2021 年), 水稻种植过程碳排放总量由 2014 年的 929.49 万 t 减少到 2021 年的 896.49 万 t, 年均减少幅度为 0.51%, 这一阶段虽然水稻播种面积增加 2.85 万 hm^2 , 但是由于我国开始注重资源的合理开发和生态文明建设, 加上 2015 年农业农村部出台控制化肥、农药使用的行动方案, 化肥和农药的投入逐渐减少, 农业生产开始向绿色化发展, 农业碳排放量逐渐降低。

表2 2012–2021年辽宁省水稻生产过程碳排放量

Table 2 Carbon emissions from rice production processes in Liaoning Province from 2012 to 2021

项目 Item	年份 Year									
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
水稻生长/(Mt CO ₂ -eq) Rice growth	5.69	5.53	4.76	4.66	4.74	4.89	4.85	5.04	5.17	5.07
氮肥/(Mt CO ₂ -eq) Nitrogenous fertilizer	1.67	1.68	1.57	1.49	1.38	1.31	1.26	1.19	1.1	1.02
磷肥/(Mt CO ₂ -eq) Phosphate fertilizer	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
钾肥/(Mt CO ₂ -eq) Potash fertilizer	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
复合肥/(Mt CO ₂ -eq) Compound fertilizer	0.37	0.37	0.32	0.32	0.35	0.37	0.37	0.39	0.40	0.41
农膜/(Mt CO ₂ -eq) Agricultural film	0.87	0.91	0.91	0.86	0.84	0.77	0.7	0.67	0.68	0.67
柴油/(Mt CO ₂ -eq) Diesel oil	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
灌溉/(Mt CO ₂ -eq) Irrigate	0.27	0.22	0.19	0.18	0.19	0.21	0.2	0.21	0.21	0.21
焚烧/(Mt CO ₂ -eq) Burning	1.53	1.50	1.31	1.34	1.36	1.4	1.39	1.45	1.49	1.41
总计/(Mt CO ₂ -eq) Total	10.68	10.47	9.29	9.05	9.07	9.17	8.97	9.13	9.23	8.96
单位面积碳排放/ (kg CO ₂ -eq·hm ⁻²) Carbon emissions per unit area	17 834.40	18 118.41	18 887.32	19 292.70	19 034.84	18 609.12	18 363.96	18 008.76	17 741.35	17 219.20
单位产量碳排放/ (kg CO ₂ -eq·t ⁻¹) Carbon emissions per unit production	2 324.30	2 320.52	2 351.40	2 247.86	2 209.62	2 172.31	2 145.39	2 100.27	2 067.65	2 111.25

植株的固碳量受到生物量、含水率、含碳率、种植密度等多种因素的影响, 土壤固碳量受到微生物和气候条件等自然因素及土地利用方式、农田管理措施等人为因素的影响^[31], 2012–2021 年辽宁省水稻种植过程碳固定(以 CO₂-eq 计), 大致呈现 4 种变化趋势(表 3, 图 2), 且整体上与碳排放变化趋势相近。第 1 阶段是缓慢下降期(2012–2013 年), 水稻种植过程碳固定总量由 2012 年的 643.45 万 t 减少到 2013 年的 631.71 万 t。第 2 阶段是急剧下降期(2013–2014 年), 水稻种植过程碳固定总量由 2013 年的 631.71 万 t 减少到 2014 年的 553.41 万 t, 减少幅度为 12.40%, 由于秸秆产量与水稻固碳量直接相关, 因此水稻播种面积的减少是本阶段碳固定总量减少

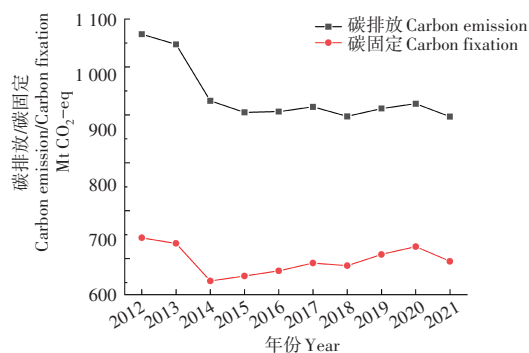


图2 2012–2021年辽宁省水稻生产过程碳排放和碳固定变化趋势

Figure 2 Trends in carbon emission and carbon fixation during rice production in Liaoning Province from 2012 to 2021

表3 2012–2021年辽宁省水稻生产过程碳固定量

年份 Year	秸秆固碳量/(Mt CO ₂ -eq) Carbon sequestration of straw	根系固碳量/(Mt CO ₂ -eq) Root carbon sequestration	总固碳量/(Mt CO ₂ -eq) Total carbon sequestration
2012	5.52	0.92	6.43
2013	5.41	0.90	6.32
2014	4.74	0.79	5.53
2015	4.83	0.81	5.64
2016	4.92	0.82	5.75
2017	5.06	0.84	5.91
2018	5.02	0.84	5.85
2019	5.22	0.87	6.09
2020	5.36	0.90	6.25
2021	5.10	0.85	5.94

直接和主要原因。第3阶段是缓慢上升期(2014–2020年),年均增加量为2.16%,水稻播种面积的增加是这一时期碳固定总量变化的主要原因。第4阶段是缓慢下降期(2020–2021年),这一阶段水稻播种面积稍微增加,不过由于个别地区受到寒潮降雪等极端天气影响,使得土地含水量饱和、秋收延迟,导致水稻收割进度非常缓慢,因此水稻产量相比2020年有所减少,相应碳固定总量有所减少。

2.2 水稻生产过程碳排放生产要素分析

由图3可知,2012–2021年辽宁省水稻生产过程碳排放结构组分占比。由表2和图3可知,研究周期内水稻生长碳排放、化肥施用和秸秆焚烧在辽宁省水稻种植的碳排放占比较高,在2021年时分别占总碳排放的56.53%、16.26%和15.75%,其中2012–2015年稻田碳排放占总碳排放比例逐年下降,在2014年碳排放量占比达到近年最小,为51.22%,此时碳排量为4.76 Mt CO₂-eq,在2016–2021年稻田碳排放占比逐渐增加,2021年碳排放量为4.54 Mt CO₂-eq。比较明显的是氮肥、磷肥、钾肥和农药施用产生的碳排放占比虽偶尔增加,但整体呈减少趋势,这是由于国家出台的一系列绿色农业政策贯彻落实

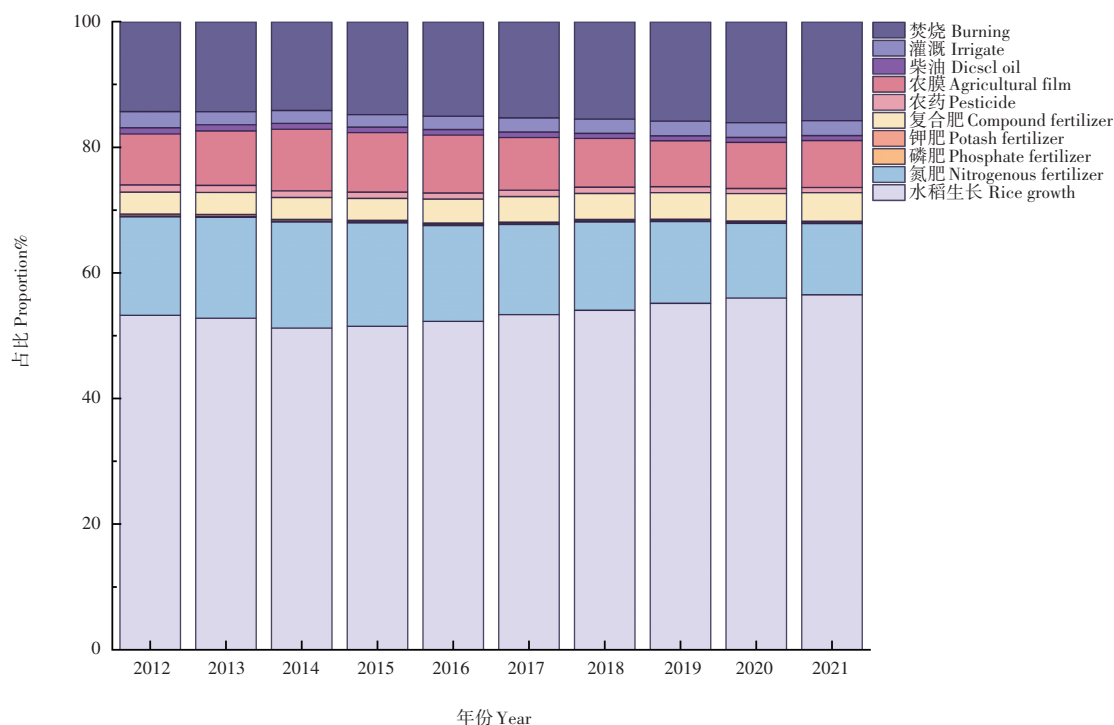


图3 2012–2021年辽宁省水稻生产过程碳排放结构组分占比

Figure 3 Proportion of carbon emission structure components in rice production process in Liaoning Province from 2012 to 2021

到地方,辽宁省农业从依靠化肥、农药投入来提高农业产量的传统发展模式转向减量使用,这一转变使水稻种植农业生产资料碳排放减少,同时从侧面反映出辽宁省传统水稻种植业对化肥、农药等依赖性较强,因此需要进一步贯彻国家政策,推进生态农业的建设,提高农业能源使用效率。

2.3 水稻生产过程单位碳排放年际变化

由图4和图5可知,2012–2021年辽宁省水稻种植过程中的单位面积碳排放先增加后减少,整体变化趋势呈开口向下的不规则抛物线形状,于2015年达到最大值19 292.70 kg CO₂-eq·hm⁻²,然后逐渐减少,2021年的单位面积碳排放量是研究周期内最小值,为17 219.20 kg CO₂-eq·hm⁻²,相比2015年单位面积排放值减少幅度为10.75%,说明2021年种植1 hm²水稻的二氧化碳排放量只有2015年的89.25%。由图5可知,2012–2021年辽宁省水稻种植过程中的单位产量碳排放与年份呈显著性相关($R^2=0.9654, p<0.01$),2012–2014年单位产量碳排放整体以增加为主,于2014年增到研究周期内的最大值2 351.40 kg CO₂-eq·t⁻¹,2015年后单位产量碳排放开始减少,在2020年达到研究周期内最小值,2 067.65 kg CO₂-eq·t⁻¹,然后于2021年略有增加,年均减少幅度为1.02%,说明每年收获1 kg水稻的二氧化碳排放量相比2012年均递减1.02%。

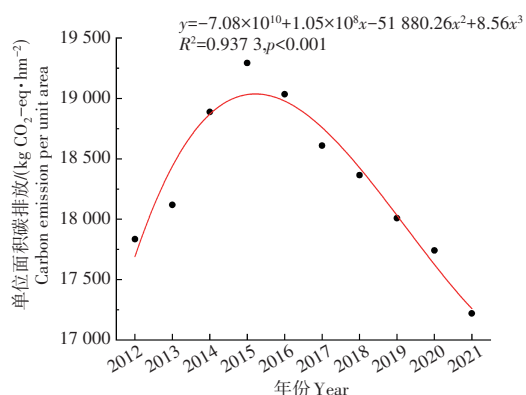


图4 2012–2021年辽宁省水稻生产过程单位面积碳排放年际变化

Figure 4 Inter annual changes in carbon emission per unit area of rice production process in Liaoning Province from 2012 to 2021

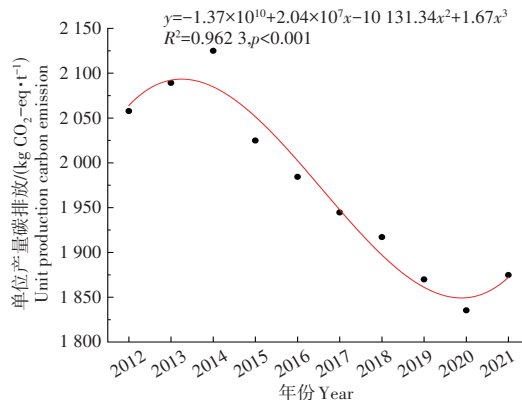


图5 2012–2021年辽宁省水稻生产过程单位产量碳排放年际变化

Figure 5 Inter annual changes in carbon emission per unit yield of rice production process in Liaoning Province from 2012 to 2021

2.4 水稻生产过程单位碳损失年际变化

由图6可知,2012–2021年辽宁省水稻种植过程中的单位面积碳损失与年份呈显著性负相关($R^2=0.9764, p<0.01$);由图7可知,2012–2021年辽宁省水稻种植过程中的单位产量碳损失与年份呈显著性负相关($R^2=0.9654, p<0.01$)。水稻单位碳损失年际变化主要受碳固定的影响,单位产量碳损失与单位面积碳损失的年际变化趋势基本一致。2012–2020年,单位面积碳损失的年均减少幅度2.20%小于单位产量碳损失的年均减少幅度的2.56%,这是因为受国家政策影响,辽宁省水稻种植技术得到研发和推广,由于稻田温室气体排放通量主要受区域水稻单位产能的影响^[32],“十三五”期间水稻单产量远高于2012年水稻单产量,使得辽宁省省农田生态系统的碳固定功能逐渐增强。2020–2021年,单位碳损失年际变化升高,这是因为2021年鞍山等地区因降雨、气温偏低、大风等恶劣天气影响水稻定浆,后期叠加冰雹和暴风雨天气,部分稻田出现“倒伏”现象^[33],均对水稻单位面积产量造成一定影响,因此2021年辽宁省水稻单位面积产量减少4.9%,导致2021年辽宁水稻单位面积碳损失增加。

2.5 水稻生产过程碳损失年际变化

由图8可知,2012–2021年辽宁省水稻种植过程中的碳排放呈现逐年下降的变化趋势,虽波动起伏较大,但整体上呈现下降的趋势。由表4可知,碳排放变化与年份呈显著性负相关($y = -0.1521x + 10.24, R^2 = 0.5355, p < 0.05$),年均减少量为0.20 Mt CO₂-eq。2012–2021年辽宁省水稻种植过程中的碳固定整体上呈现先减少后增加的趋势,年均增加量为0.01 Mt CO₂-eq,由于碳固定量小于碳排放量,因

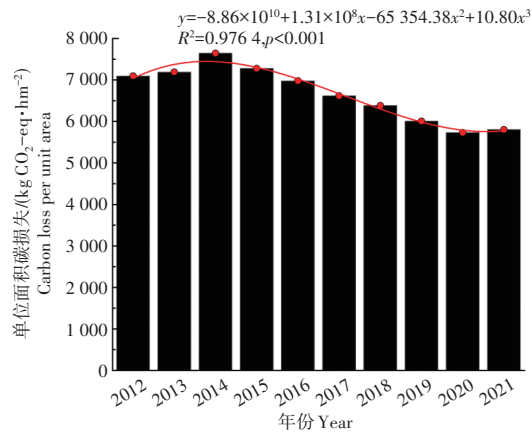


图6 2012–2021年辽宁省水稻生产过程单位面积碳损失年际变化

Figure 6 Inter annual changes in carbon loss per unit area of rice production process in Liaoning Province from 2012 to 2021

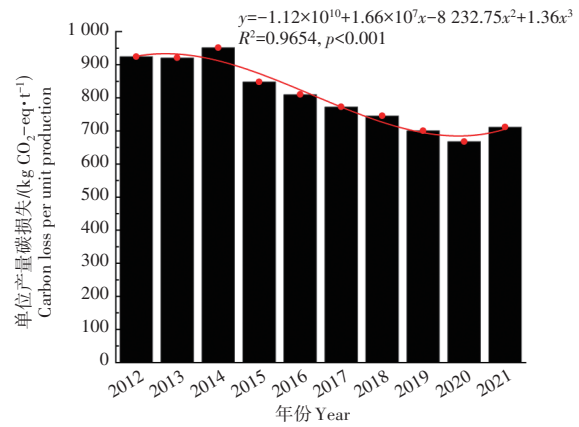


图7 2012–2021年辽宁省水稻生产过程单位产量碳损失年际变化

Figure 7 Inter annual changes in carbon loss per unit yield of rice production in Liaoning Province from 2012 to 2021

此2012–2021年辽宁省碳生态盈亏为负值,即为碳损失,2013年碳损失最大,表明此时农田生态系统碳排放超过生态承载力最多,生态问题最严重,依据任彩凤等^[34]的研究结果表明,农田生态系统呈现生态损失状态,说明处于不可持续发展的生态赤字阶段,需要及时调整耕种模式,推行绿色种植。此后碳固定变化方向与碳排放量变化方向虽然相同,但是碳固定年减少量0.01 Mt CO₂-eq小于碳排放年减少量0.19 Mt CO₂-eq,因此碳损失呈现减少趋势,年均减少幅度为3.20%,表明水稻种植过程中生态问题逐渐得到缓解,此时应进一步发展低碳、环保、绿色农业,助力辽宁省的农业与生态环境保护,实现经济效益与环境效益“双赢”。

2.6 水稻生产过程敏感性分析

本研究按照水稻种植过程中碳排放的强度从高到低选择5个变量,分别为水稻生长、氮肥施用、复合肥施用、农膜使用和秸秆焚烧5个过程,在保持其他变量一定时,使得研究变量以-10%、-8%、-6%、-4%、-2%、2%、4%、6%、8%、10%进行改变,如研究水稻生长这一变量时,控制化肥、农膜、农药、柴油、灌溉、焚烧碳排放强度一定,通过对比水稻生长变化前后碳排放的变化强度,来判断研究水稻生

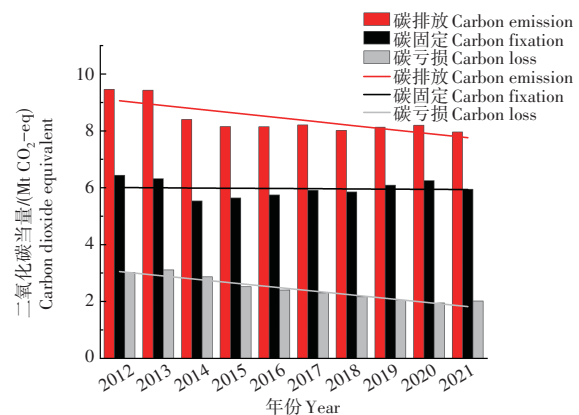


图8 2012–2021年辽宁省水稻生产过程净碳收支量年际变化

Figure 8 Inter annual variation of net carbon budget during rice production in Liaoning Province from 2012 to 2021

表4 2012–2021年辽宁省水稻生产过程碳中和年际变化曲线

Table 4 Carbon neutrality interannual variation curve of rice production process in Liaoning Province from 2012 to 2021

曲线名称 Curve name	曲线函数 Curve function	x	y/(Mt CO ₂ -eq)	R ²	显著性差异值 Significance difference value
碳排放 Carbon emission	y = -0.152 1x + 10.24	年份 Year	碳排放 Carbon emission	0.535 5	0.016
碳固定 Carbon fixation	y = -0.007 8x + 6.014 6	年份 Year	碳固定 Carbon fixation	0.006 4	0.827
碳损失 Carbon loss	y = -0.144 2x + 4.225 4	年份 Year	碳损失 Carbon loss	0.875 8	<0.01

长对种植过程中碳排放总量的影响程度。横坐标表示水稻生长、氮肥施用、复合肥施用、农膜使用和秸秆焚烧5个敏感性变量的百分比,纵坐标表示碳排放总量的变化百分比。由图10可知,水稻生长、氮肥施用、复合肥施用、农膜使用和秸秆焚烧增加10%时,碳排放总量分别增加5.65%、1.14%、0.48%、0.75%和1.58%,由此可以看出对碳排放总量影响最大的因素是水稻生长作用,其次是秸秆焚烧和氮肥施用。因此从总体上看,培育出“高产低排”水稻品种、更新种植技术和管理手段是控制碳排放总量的当务之急,其次再合理施用化肥和复合肥,多使用农家肥、生物肥等低碳肥料,并且推广秸秆的综合利用。

2.7 水稻种植碳排放影响关系分析

运用SPSS软件对碳排放及其影响因素进行多元线性回归分析,将碳排放(CE, Mt CO₂-eq)作为因变量,将播种面积(A_i)、水稻产量(K)、氮肥施用量(N_f)、磷肥施用量(P_{hf})、钾肥施用量(P_{of})、复合肥施用量(C_f)、农药施用量(P)、农用塑料薄膜使用量(A_f)、柴油使用量(D_o)、灌溉耗电量(I)和秸秆焚烧量(B)作为自变量,建立多元线性回归模型,将辽宁省的2012-2021年全部数据进行拟合,得到的标准系数回归模型为:

$$CE = 0.013A_i - 0.021K + 1.25N_f + 0.527P_{hf} + 1.103P_{of} + 0.013C_f + 0.174P + 1A_f + 0.47D_o + 0.012I + 1.41B \quad (R^2 = 0.783094) \quad (17)$$

可以看出,碳排放与播种面积、氮肥施用量、磷肥施用量、钾肥施用量、复合肥施用量、农药施用量、农用塑料薄膜使用量、柴油使用量、灌溉耗电量和秸秆焚烧量呈正相关,与水稻产量呈负相关。在影响碳排放的所有自变量中,秸秆焚烧量的系数值最大,说明秸秆焚烧对碳排放的影响最大。此外,水稻产量对碳排放为负向影响,即在其他自变量因素不变的条件下,水稻产量的增加会导致碳排放的减少,这是因为水稻产量的增加会引起碳固定功能的增强,从而增大碳固定量,并且其系数绝对值大于播种面积系数值,说明在一定条件下水稻产量的增加可以基本抵消播种面积增加产生的碳排放。

2.8 不确定性分析

由于运输、加工、销售等后端数据的缺失,本研究的系统边界为“从摇篮到大门”,未能基于“从摇篮到坟墓”视角考虑农业源温室气体排放。此外,本研究的不确定性还来源于温室气体排放因子的选取,IPCC(2021)对全球数据进行整合分析得出N₂O、CH₄的排放因子,但是区域间气候、作物和土壤类型等因素的差别将会导致排放因子的差异,因此,采用单一的排放因子将会给研究带来一定的不确定性。另外,数据的质量和部分数据的缺失是本研究最大的局限所在,在本研究数据来源《辽宁省统计年鉴2012-2021》中,未将各项农资投入量按农作物品种拆分,因此本研究通过按水稻播种面积占农作物总播种面积的比例进行拆分,从而核算水稻种植过程中各项农资投入量的碳排放,得出来的结果与实际排放有所偏差,但趋势基本一致。最后由于缺少秸秆焚烧量的相关数据,因此本研究中秸秆焚烧量的核算参考彭立群等^[24]提出的核算方法,根据不同作物秸秆露天焚烧比例,确定辽宁省水稻秸秆焚烧量。这些争议需要国内外学者进一步讨论和完善,从而为水稻种植过程中碳排放的核算和分析制定一套统一的评价体系,在未来建立更完善的估算模型。

3 讨论与结论

水稻种植过程中,水稻生长产生的CH₄占比最大,应通过优化育种技术,筛选出高产低排品种^[35],充分挖掘水稻增产增效潜力,确保提高水稻产量的同时,减少其二氧化碳排放量,从而降低单位产量碳排放强度。此外影响水稻种植过程中温室气体排放的因素有很多,如土壤性质、水分因素、施肥、耕

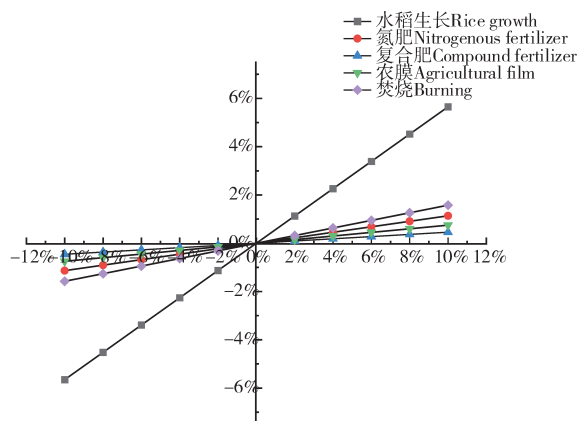


图10 2021年辽宁省水稻生产过程敏感性分析

Figure 10 Sensitivity analysis of rice production process in Liaoning Province in 2021

作、气候因素等^[14],在今后应在水稻品种改良的基础上,构建增产减排协同的稻作新技术^[36],通过更新水稻种植技术,使种植过程能耗结构得到优化,运用固碳和节能的技术,合理施用化肥和复合肥,推广使用农家肥、生物肥等低碳肥料,避免过量施肥导致的碳排放增加,精准控制农膜、农药等生产资料的使用量,并由技术革新引发生产资料的低量高用,推进先进的绿色低碳高产种植方式。

另外应当推广水稻种植与养殖结合的生态农业模式,通过稻田养鱼、稻田养鸭等“种植养殖”共生耦合“低碳”经济发展^[37],实施轮作制度、种植绿肥等方式改善土壤结构,保持农田土壤肥力,避免因土壤贫瘠导致的碳排放增加^[38]。提高农田生态系统碳固定功能,实现“种植养殖”资源绿色可持续发展,促进辽宁省经济社会绿色“低碳”高质量发展。

最后可以通过数字生态技术赋能水稻绿色种植。目前,我国已率先在主要粮食作物生产上示范推广了应对气候变化的生产新模式,即气候智慧型农业(climate smart agriculture, CSA)^[39],农业农村部自2014年起就与世界银行一道,在河南和安徽两省开展了包括秸秆还田技术在内的气候智慧型农业生产技术集成创新示范,总结出集“固碳技术、减排技术、适应技术和增效技术”于一体的气候智慧型农业技术体系^[40],为农业“固碳减排和稳粮增收”双赢目标索出了机制模式,因此,可以在辽宁省建立水稻数字生态种植示范基地,并逐渐在全省大规模推广,实现“固碳减排和稳粮增收”,确保粮食安全的同时,助力农业“双碳”目标。

2012–2021年内水稻种植过程碳排放总量整体呈现减少的趋势,年均减少量为0.19 Mt CO₂-eq,说明辽宁省水稻种植业碳减排态势良好。此阶段水稻种植过程碳固定总量整体上呈现减少趋势,减少幅度平缓,年均减少量为0.01Mt CO₂-eq。水稻种植过程中碳排放总量主要集中于水稻生长、化肥施用、稻田灌溉和秸秆焚烧。由于2012–2021年碳排放量的减少量高于碳固定量的减少量,因此在研究周期内碳损失量变化呈现较好迹象,碳损失整体呈减少趋势,并于2020年最大程度趋近于碳中和,今后应当推广先进的绿色低碳高产种植方式,助力农业“双碳”目标的进程。

参考文献:

- [1] 齐玉春,董云社.中国能源领域温室气体排放现状及减排对策研究[J].地理科学,2004,24(5):528–534.
- [2] 秦大河,THOMAS S.IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1–6.
- [3] 耿静,徐栋,吴御豪,等.海南岛生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应[J].生态学报,2022,42(12):4795–4806.
- [4] 刘文玲,杜琛仪,肖舒文.实践与供给:面向碳中和的需求侧解决方案[J].中国环境管理,2022,14(1):22–30.
- [5] 刘祖春,施松郢.我国农业碳交易市场发展问题探析[J].中国科技纵横,2015(24):7–9.
- [6] NELSON G.Agriculture and climate change:An agenda for negotiation in Copenhagen[J].Vision Focus,2009,28:579–620.
- [7] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008,24(10):269–273.
- [8] 卢纯.开启我国能源体系重大变革和清洁可再生能源创新发展新时代:深刻理解碳达峰、碳中和目标的历史意义[J].人民论坛·学术前沿,2021,222(14):28–41.
- [9] 季国军,纪洪亭,程琨,等.江苏稻田轮作模式碳、氮足迹分析[J].南京农业大学学报,2023,46(3):510–521.
- [10] ZOU J W,HUANG Y,QIN Y M,et al.Changes in fertilizer-induced direct N₂O emissions from paddy fields during rice-growing season in China between 1950s and 1990s[J].Global Change Biology,2009,15(1):229–242.
- [11] ZHU E Y,DENG J S,WANG H Q,et al.Identify the optimization strategy of nitrogen fertilization level based on trade-off analysis between rice production and greenhouse gas emission[J].Journal of Cleaner Production,2019,239:118060.
- [12] 曹黎明,李茂柏,王新其,等.基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹[J].生态学报,2014,34(2):491–499.
- [13] 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.
- [14] 陈中督,李凤博,冯金飞,等.长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹研究:于生命周期评价[J].中国农业资源与区划,2019,40(12):81–90.
- [15] LI S,LU H W,LI X D,et al.Toward low-carbon rice production in China:Historical changes,driving factors,and mitigation potential[J].Environmental Science & Technology,2024,58(13):5772–5783.
- [16] 何振嘉,贺伟,罗林涛,等.基于碳中和背景的耕地质量提升路径[J].排灌机械工程学报,2023,41(7):723–730.

- [17] 祝贞科,肖谋良,魏亮,等.稻田土壤固碳关键过程的生物地球化学机制及其碳中和对策[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):592-602.
- [18] 中国科学院.东北黑土地白皮书(2020)[EB/OL].(2021-07-09).[2023-08-20].http://www.std.cas.cn/gz_dtt_p/202107/W020210712377288257597.pdf.
- [19] 韩康宁,冷罗生.应对气候变化的碳排放环境风险司法治理[J].干旱区资源与环境,2023,37(8):1-12.
- [20] 楚天舒,赖世宣,杨增玲.黑龙江农垦种养业生产系统温室气体排放与土壤固碳的核算[J].中国农业大学学报,2021,26(4):143-156.
- [21] 苏丹,钱玺文,全魁,等.生命周期碳足迹评价助力钢铁企业降碳[J].低碳世界,2023,13(9):11-13.
- [22] IPCC.Climate Change 2021:The Scientific basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change[M].Cambridge:Cambridge University Press,2021.
- [23] 郭长青,王鑫,曹丹丹.“双碳”背景下水稻生态系统碳中和演化特征与对策研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(4):809-820.
- [24] 彭立群,张强,贺克斌.基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J].环境科学研究,2016,29(8):1109-1118.
- [25] Intergovernmental Panel on Climate Change.Climate Change 2021-The Physical Science Basis[M].Cambridge:Cambridge University Press,2023.
- [26] 王兴,赵鑫,王钰乔,等.中国水稻生产的碳足迹分析[J].资源科学,2017,39(4):713-722.
- [27] IPCC.IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[R].Kanagawa:The Institute for Global Environmental Strategies (IGES),2006.
- [28] 刘晓珂,黄红星,韩威威.水稻碳足迹评估方法研究及碳足迹计算器开发[J].江西农业学报,2018,30(11):105-109.
- [29] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(5):203-208.
- [30] 葛立群,孙贵荒,闫立萍.2013年辽宁省水稻产业发展现状[J].安徽农业科学,2015,43(10):348-350.
- [31] 景峰,曹晶晶,刘建国.秸秆还田下绿洲连作棉田土壤有机碳储量的积累动态[J].石河子大学学报(自然科学版),2016,34(3):295-300.
- [32] 李志慧,王艺霏,邓祥征.东北黑土地地区稻田甲烷排放时空演变及排放潜力分析[J].生态学报,2024,44(9):3814-3829.
- [33] 韩宇.今年辽宁玉米水稻价格啥走势?权威部门分析来了![N].辽宁日报,2021-11-05(05).
- [34] 任彩凤,程艳妹,郑欣,等.基于生态足迹模型的淮北市自然资本利用研究[J].生态科学,2019,38(6):106-114.
- [35] 唐志伟,张俊,邓艾兴,等.我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):582-591.
- [36] 张卫建,张艺,邓艾兴,等.我国水稻品种更新与稻作技术改进对碳排放的综合影响及趋势分析[J].中国稻米,2021,27(4):53-57.
- [37] 郑振宇,王文成,李赵嘉,等.典型生态农业模式:稻田种养研究综述[J].江苏农业科学,2019,47(4):11-16.
- [38] 钱震杰,金诚谦,刘政,等.无人农场中的智能控制技术应用现状与趋势(英文)[J].智能化农业装备学报(中英文),2023,4(3):1-13.
- [39] 张卫建,严圣吉,张俊,等.国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略[J].中国农业科学,2021,54(18):3892-3902.
- [40] 张玉鑫,于险峰,孙眉.让固碳减排和稳粮增收“和平相处”[N].农民日报,2021-07-23(006).

[责任编辑 李薇]