

张传红¹ 韩露¹ 谢佳男² 靳浩¹ 刘翠英³ 樊建凌¹

江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究

摘要

江苏作为农业大省和粮食主产区,全面核算其主要农作物生产碳足迹时序动态变化与构成,可为江苏省主要农作物生产体系全过程环境管理及农业绿色发展提供决策依据。本文采用生命周期评价法(LCA)核算江苏省1990—2019年水稻、小麦、玉米、大豆和油菜5种作物生产过程各环节碳排放强度,研究分析不同作物生产碳足迹时序动态变化、构成及影响因素。结果表明,近30年江苏省主要作物生产单位产量碳足迹呈下降趋势,单位面积碳足迹呈上升趋势。不同作物单位产量碳足迹(单位:kg(CO₂-eq)·kg⁻¹)大小分别表现为油菜(1.74)>水稻(1.36)>小麦(0.99)>玉米(0.81)>大豆(0.64)。在作物碳足迹构成中,稻田CH₄排放(54.43%)和化肥投入(20.65%)是水稻生产碳足迹主要来源,其他组分贡献较低。对小麦、玉米、大豆和油菜而言,不同农资投入碳足迹贡献较为突出的组分均为化肥投入和土壤N₂O排放,其他组分贡献比重较小。随机森林分析表明,种子、氮肥及农机投入的变化是不同作物碳足迹年际变化的主要驱动因素。因此,对不同作物生产需求采取针对性的减排措施,从农资投入、过程管理等多方面进行调节,以促进农业绿色高效发展。

关键词

碳足迹;时序变化;主要农作物;生命周期评价;构成分析

中图分类号 X820.3

文献标志码 A

收稿日期 2021-12-15

资助项目 江苏省“六大人才高峰”项目(JNH-B-061);南京信息工程大学引进人才启动经费(2018r038)

作者简介

张传红,女,硕士生,研究方向为环境污染控制机理与技术.20191212029@nuist.edu.cn

樊建凌(通信作者),男,博士,教授,研究方向为环境土壤学.jlfan@nuist.edu.cn

0 引言

为应对全球气候变化,国务院常务会议于2009年11月25日确定了到2020年全国单位国内生产总值CO₂排放量要比2005年下降40%~45%的目标。到2019年,中国碳排放强度较2005年降低48.1%,非化石能源占一次能源消费比重达15.3%,提前一年完成我国对外承诺的2020年目标,成为世界上减排力度最大、减排贡献最多的国家,碳减排成效显著。2020年9月22日,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话,指出“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO₂排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。这一重要宣示为我国应对气候变化、绿色低碳发展提供了方向指引、擘画了宏伟蓝图,也标志着我国对绿色发展提出了新的、更高的要求。在实现碳达峰碳中和的征程中,农业的作用举足轻重。IPCC第五次评估报告表明农业温室气体排放占全球温室气体排放总量的24%^[1],农业甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放量分别占全球人为CH₄和N₂O排放量的52%和84%^[2]。与传统碳排放行业有所不同,农业本身具有碳源和碳汇双重属性,在未来减排工作中大有可为^[3]。

目前,农业发展面临着自然资源约束趋紧与气候变暖双重挑战,低碳农业是未来发展的必然趋势。碳足迹作为一种以全面直观视角评估人类活动对环境产生影响的方法在多个行业具有广泛应用,其中生命周期评价法(LCA)和投入产出法是计算碳足迹的常用方法^[4]。国内外学者从不同角度对农业生产碳排放和碳足迹问题开展了相关研究。Sanz-Cobena等^[5]比较分析了不同管理措施下农业温室气体排放潜力,结果表明节水灌溉配合氮肥优化施用可减少50%的N₂O排放,有机肥替代化肥不仅可以减少20%的N₂O排放,还可以提高作物产量。近年来,国内学者对农业碳足迹的研究日渐增多。Cheng等^[6]运用国家统计数据评估了我国1993—2007年间农作物生长的碳足迹,发现14年时间里我国农作物生产碳排放量高达119.5 Mt,作物单位面积碳足迹为0.78±0.08 t(CO₂-eq)·hm⁻²,单位产量碳足迹为0.11±0.01 t(CO₂-eq)·kg⁻¹。Yan等^[7]以东部代表地区为研究对象,通过农户问卷调查方式核算了我国主要粮食作物的碳足迹,水稻、小麦及玉米三大粮食作物单位面积碳足迹分别为6.0±0.1、3.0±0.2和2.3±0.1 t(CO₂-eq)·hm⁻²;单位产量碳足迹分别为0.8±0.02、0.66±0.03

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新技术重点实验室/大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

2 南京信息工程大学 雷丁学院,南京,210044

3 南京信息工程大学 应用气象学院,南京,210044

和 $0.33 \pm 0.02 \text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{kg}^{-1}$. 然而, 关于长时序的农业碳足迹动态变化及其构成评估的研究还很少.

本文采用生命周期评价(LCA)方法构建农作物生产碳足迹评估模型, 以农业经济水平位列全国第三的江苏省为研究区域^[8], 选择省内种植面积和产量贡献最大的水稻、小麦、玉米、大豆和油菜5种作物开展研究. 基于LCA构建的碳足迹评价模型对江苏省1990—2019年5种作物全生命周期过程中碳排放情况进行分析. 研究目的主要有: 1) 利用LCA法全面核算江苏水稻、小麦、玉米、大豆和油菜5种作物生产的碳足迹及其构成, 精确识别作物生产过程中各环节碳排放情况, 以寻求减少江苏农业生产资源消耗及产生环境影响的重要举措; 2) 利用LCA方法计算江苏省1990—2019年碳足迹时序动态变化, 针对国家出台的强农惠农和节能减排措施, 结合不同农业政策以及管理措施的减排潜力, 旨在为江苏省主要作物生产体系全过程环境管理及农业绿色发展提供决策依据.

1 研究区域概况

江苏省地处我国大陆东部沿海地区 ($30^{\circ}45' \sim 35^{\circ}08' \text{N}$, $116^{\circ}21' \sim 121^{\circ}56' \text{E}$), 全省占地面积 10.72 万 km^2 . 1990—2019年全省年均降水量为 $1036.7 (736.6 \sim 1398.5) \text{ mm}$, 属于暖温带向亚热带的过渡性气候. 江苏主要包括低山丘陵土壤、平原旱耕土壤和水田土壤三大类土壤资源共计 9224.1 km^2 ^[9], 其中潮土面积最大, 占总土壤面积的 40.72% , 水稻土次之, 占总土壤面积的 36.03% . 潮土表层土壤有机质平均质量分数为 $10(5 \sim 15) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮平均质量分数为 $1(0.6 \sim 5) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 水稻土表层土壤有机质平均质量分数为 $18(15.2 \sim 28.4) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮质量分数为 $0.8(0.8 \sim 1.65) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

全省耕地面积由1990年的 $6836.79 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 降低至2019年的 $4205.40 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ^[10]. 1990年江苏全省粮食总产量为 3230.8 万 t (占全国 7.24%), 2019年全省粮食总产达到 3706.2 万 t (占全国 5.58%); 全省农用化肥施用量由1990年的 221.8 万 t 增加到2019年的 286.2 万 t ; 2019年全省主要作物综合机械化率达 86% , 农业机械总动力由1990年的 2005 万 kW 上升到2019年的 5114 万 kW ^[10].

2 材料与方法

2.1 数据来源

近30年江苏农作物播种面积年均值为 $7756 \times$

10^3 hm^2 , 其中水稻、小麦、玉米、大豆和油菜5种作物总播种面积年均值为 $5543 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 占农作物总播种面积的 71% , 因此本文以水稻、小麦、玉米、大豆和油菜5种作物为研究对象探究其碳足迹时序动态变化及构成. 作物农资投入数据主要包括化肥、种子、农药、燃料、农机具、灌溉耗电单位面积投入量, 其中江苏省化肥、种子单位面积用量来自《全国农产品成本收益资料汇编》^[11], 农药、燃料和单位面积灌溉耗电量通过《全国农产品成本资料收益汇编》^[11]和《中国物价年鉴》^[12]间接计算而来, 作物单产由《中国统计年鉴》^[10]播种面积和产量计算而来. 农机具相关参数引自农机通网站 (<https://nongjitong.com/>). 水稻、小麦、玉米、大豆和油菜5种作物农资投入排放因子数据主要来源于Ecoinvent数据库^[13]及相关参考文献(表1).

2.2 LCA分析

本文在Crop.LCA模型^[15]的基础上构建江苏省主要作物生产碳足迹模型, 分别以 1 kg 作物产量和 1 hm^2 作物播种面积为功能单位. 系统边界的界定从农作物的播种到收割完成全过程, 通过量化不同农资(化肥、种子、农药、燃料、农机具等)投入、农事操作(耕作、播种、施肥、灌溉、收获等)活动温室气体排放情况, 以寻求减少农业生产资源消耗及产生环境影响的重要举措. 研究内容的系统边界如图1所示.

2.3 碳足迹计算

农业生产过程中温室气体核算边界包括直接排放和间接排放. 直接排放包括耕地、播种、施肥等农事作业过程中燃料消耗、灌溉耗电等温室气体排放, 施用氮肥引起的农田 N_2O 排放和稻田甲烷排放. 间接排放包括农资投入品(化肥、种子、农药等)农资生产、运输过程造成的温室气体排放, 电力资源的获取引起的温室气体排放. 本研究采用Crop.LCA模型中碳足迹计算公式, 其中土壤 N_2O 排放和稻田 CH_4 排放所需排放因子采用《省级温室气体清单编制指南》^[16]中江苏所在区域的推荐值, 模型中具体计算公式如下:

1) 农资投入温室气体排放:

$$F_{C, \text{input}} = \sum (D_i \times EF_i) \quad (1)$$

式(1)中: D_i 是第 i 种农资产品的投入量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 或 $\text{kWh} \cdot \text{hm}^{-2}$; EF_i 是第 i 种农资产品的排放因子, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\text{kg} \cdot \text{GJ}^{-1}$; $F_{C, \text{input}}$ 是农作物生产过程中农资投入碳排放总和, 单位为 $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{hm}^{-2}$.

表 1 农资投入碳排放因子

Table 1 Greenhouse gas emission factors for agricultural inputs

kg·kg⁻¹

| 农资投入 | 数据来源 | 排放因子 | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|---------|
| | | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CO | NH ₃ | NO ₂ | SO ₂ | VOC | PM |
| 水稻种子 | Ecoinvent 3.8 | 1.70E-2 | 1.07E-2 | 3.05E-4 | 0.00E+0 | 2.64E-3 | 4.28E-4 | 3.64E-4 | 5.13E-5 | 3.77E-5 |
| 小麦种子 | Ecoinvent 3.8 | 9.88E-3 | 1.08E-3 | 1.72E-5 | 1.73E-2 | 1.95E-3 | 1.89E-4 | 3.72E-4 | 5.21E-5 | 3.82E-5 |
| 玉米种子 | Ecoinvent 3.8 | 4.42E-2 | 1.06E-3 | 4.75E-4 | 1.68E-2 | 4.35E-3 | 9.97E-5 | 3.67E-4 | 5.17E-5 | 3.79E-5 |
| 大豆种子 | Ecoinvent 3.8 | 4.58E+0 | 1.06E-3 | 7.14E-4 | 1.68E-2 | 7.09E-5 | 1.50E-4 | 3.67E-4 | 5.17E-5 | 3.79E-5 |
| 油菜种子 | Ecoinvent 3.8 | 1.43E-2 | 1.52E-3 | 1.16E-3 | 2.81E-2 | 2.92E-3 | 2.44E-4 | 4.89E-4 | 6.16E-5 | 4.49E-5 |
| 氮肥(尿素) | Ecoinvent 3.8 | 3.80E-2 | 6.83E-3 | 1.16E-3 | 1.90E-3 | 1.67E-4 | 4.30E-4 | 6.35E-4 | 5.44E-4 | 1.67E-3 |
| 磷肥(P ₂ O ₅) | Ecoinvent 3.8 | 1.10E-1 | 1.47E-2 | 1.13E-4 | 4.24E-2 | 1.02E-4 | 2.80E-3 | 8.14E-2 | 4.08E-4 | 6.45E-3 |
| 钾肥(K ₂ O) | Ecoinvent 3.8 | 7.53E-2 | 9.40E-4 | 3.05E-4 | 1.89E-3 | 0.00E+0 | 7.58E-4 | 2.40E-4 | 4.11E-5 | 3.20E-5 |
| 除草剂 | Ecoinvent 3.8 | 3.06E-1 | 2.50E-2 | 1.44E-4 | 4.14E-1 | 1.74E-4 | 1.67E-2 | 9.38E-3 | 6.47E-4 | 6.00E-4 |
| 杀菌剂 | Ecoinvent 3.6 | 1.68E-1 | 1.81E-2 | 1.02E-4 | 2.49E-1 | 2.52E-4 | 6.71E-3 | 6.24E-3 | 4.64E-4 | 4.01E-4 |
| 杀虫剂 | Ecoinvent 3.6 | 4.93E-1 | 7.19E-5 | 2.99E-4 | 8.21E-5 | 0.00E+0 | 6.55E-3 | 3.60E-2 | 1.24E-3 | 1.21E-3 |
| 柴油 | Ecoinvent 3.8 | 6.79E+0 | 7.08E-4 | 2.35E-4 | 2.37E-3 | 1.45E-5 | 8.20E-3 | 3.73E-2 | 7.09E-3 | 5.97E-4 |
| 汽油 | Ecoinvent 3.8 | 1.39E+0 | 3.94E-2 | 3.55E-5 | 0.00E+0 | 0.00E+0 | 7.16E-2 | 2.60E-4 | 1.45E-2 | 5.39E-2 |
| 原煤 | 文献[14] | 2.03E+1 | 3.94E-2 | 6.15E-5 | 3.76E-2 | 0.00E+0 | 3.69E-2 | 4.10E-2 | 1.03E-1 | 1.65E-3 |
| 天然气 | Ecoinvent 3.7.1 | 2.81E-6 | 1.77E-4 | 3.62E-5 | 1.89E-4 | 0.00E+0 | 2.17E-3 | 6.00E-5 | 8.17E-7 | 3.00E-6 |
| 燃料油 | Ecoinvent 3.7.1 | 9.27E-2 | 9.06E-4 | 2.43E-4 | 2.21E-3 | 0.00E+0 | 8.27E-3 | 3.95E-2 | 1.89E-2 | 5.20E-4 |
| 机械生产 | Ecoinvent 3.7.1 | 1.36E-1 | 5.63E-6 | 5.23E-6 | 2.56E-4 | 8.72E-7 | 1.70E-3 | 4.40E-5 | 9.35E-5 | 2.14E-4 |
| 机械运输 | Ecoinvent 3.7.1 | 2.76E-1 | 4.21E-4 | 2.74E-3 | 2.56E-4 | 8.72E-7 | 1.15E-3 | 1.96E-4 | 4.70E-5 | 4.00E-5 |
| 钢铁 | Ecoinvent 3.7.1 | 6.27E-2 | 5.45E-3 | 4.06E-5 | 1.68E-3 | 0.00E+0 | 2.12E-5 | 2.69E-3 | 2.91E-4 | 4.47E-5 |
| 橡胶 | Ecoinvent 3.7.1 | 3.02E+0 | 4.32E-3 | 1.63E-5 | 6.85E-4 | 0.00E+0 | 3.59E-3 | 4.44E-3 | 6.06E-3 | 4.83E-4 |
| 汽油卡车 | Ecoinvent 3.7.1 | 1.36E-1 | 5.63E-6 | 5.23E-6 | 2.56E-4 | 8.60E-7 | 1.70E-3 | 4.40E-5 | 9.35E-5 | 2.14E-4 |
| 柴油卡车 | Ecoinvent 3.7.1 | 1.40E-4 | 3.40E-9 | 5.00E-9 | 2.01E-7 | 0.00E+0 | 9.97E-7 | 3.08E-8 | 6.90E-8 | 1.92E-8 |
| 铁路运输 | Ecoinvent 3.7.1 | 2.09E-2 | 8.66E-7 | 6.66E-7 | 1.05E-4 | 1.33E-7 | 3.66E-4 | 3.99E-6 | 3.37E-5 | 2.64E-5 |
| 轮船运输 | Ecoinvent 3.7.1 | 5.05E-3 | 7.94E-8 | 2.57E-7 | 4.16E-6 | 6.47E-7 | 1.05E-4 | 7.01E-5 | 3.89E-6 | 3.00E-6 |

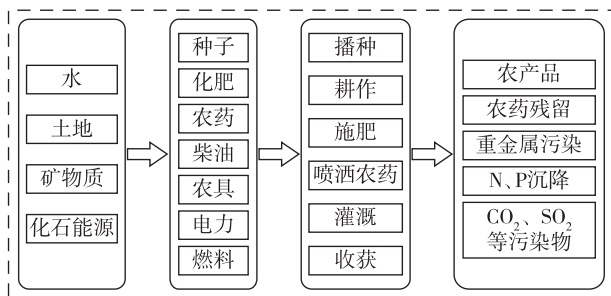


图 1 农作物生产碳足迹系统边界图

Fig. 1 The system boundary for the carbon footprint of crops production

2) 农用地 N₂O 直接排放和间接排放:a) 氮肥施用导致 N₂O 直接排放:

$$F_{DC,N_2O} = N_{input} \times F_1 \times 44/28, \quad (2)$$

式(2)中: F_{DC,N_2O} 为氮肥施用引起的 N₂O 排放量, 单位为 kg·hm⁻²; N_{input} 为农田氮肥施用量, 单位为 kg·hm⁻²; F_1 为氮肥施用引起的 N₂O 直接排放因子, 单

位为 kg(N₂O-N)·kg⁻¹(N); 44/28 是 N₂O-N 与 N₂O 分子相对质量之比。

b) 大气沉降与淋溶径流引起的 N₂O 间接排放:

$$F_{GC,N_2O} = N_{input} \times F_G \times F_2 \times 44/28, \quad (3)$$

$$F_{LC,N_2O} = N_{input} \times F_L \times F_3 \times 44/28, \quad (4)$$

式(3)中: F_{GC,N_2O} 为大气氮沉降引起的 N₂O 间接排放量, 单位为 kg·hm⁻²; F_{LC,N_2O} 为淋溶径流引起的 N₂O 间接排放, 单位为 kg·hm⁻²; F_G 为农用地氨和 NO_x 挥发率; F_L 为农用地氮素淋溶和径流率, 采用《省级温室气体清单编制指南》推荐值, 分别取值为 10% 和 20%; F_2 为氮沉降引起的 N₂O 间接排放因子; F_3 为淋溶径流引起的 N₂O 间接排放因子。

c) 农用地 N₂O 排放总量:

$$F_{C,N_2O} = (F_{DC,N_2O} + F_{GC,N_2O} + F_{LC,N_2O}) \times 298, \quad (5)$$

式(5)中: F_{C,N_2O} 为 N₂O 直接排放和间接排放引起的 CO₂ 排放当量, 单位为 kg(CO₂-eq)·hm⁻²; 298 是 N₂O 于 100 年时间尺度的全球变暖潜势值^[17]。

3) 稻田 CH_4 排放:

$$F_{C,\text{CH}_4} = F_{\text{CH}_4} \times 25, \quad (6)$$

式(6)中: F_{C,CH_4} 为稻田 CH_4 排放当量, 单位为 $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{hm}^{-2}$; F_{CH_4} 为 CH_4 排放因子, 单位为 $\text{kg}(\text{CH}_4) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 25 为 CH_4 于 100 年时间尺度中的全球变暖潜势值^[17].

4) 单位面积和单位作物产量碳足迹计算:

$$F_{C,t} = F_{C,\text{input}} + F_{C,\text{N}_2\text{O}} + F_{C,\text{CH}_4}, \quad (7)$$

$$F_{C,A} = \frac{F_{C,t}}{A}, \quad (8)$$

$$F_{C,Y} = \frac{F_{C,t}}{Y} \quad (9)$$

式(7)中: $F_{C,t}$ 、 $F_{C,\text{input}}$ 、 $F_{C,\text{N}_2\text{O}}$ 、 F_{C,CH_4} 分别是总的碳排放当量、农资投入碳排放当量、氮肥施用碳排放当量和稻田甲烷排放当量, 单位均为 $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{hm}^{-2}$. 式(8)中: $F_{C,A}$ 为单位面积的碳排放当量, 单位为 $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{hm}^{-2}$. 式(9)中: $F_{C,Y}$ 为单位产量碳排放当量, 单位为 $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{kg}^{-1}$. A 为农作物播种面积, 单位为 hm^2 ; Y 为农作物产量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

2.4 数据处理与分析

本文利用 R 软件^[18] 构建碳足迹模型并对数据进行处理与计算, 采用 Origin 2021 作图.

3 结果与分析

3.1 江苏省主要农作物单位产量碳足迹变化

从作物单位产量碳足迹看(图2), 碳足迹由高到低分别表现为油菜>水稻>小麦>玉米>大豆, 每生产 1 kg 油菜、水稻、小麦、玉米和大豆年均碳足迹分别为 1.74 (1.4~2.11)、1.36 (1.07~1.56)、0.99 (0.8~1.2)、0.81 (0.63~1.01)、0.64 (0.52~0.88) $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{kg}^{-1}$. 油菜单位产量碳足迹明显高于其他几种作物, 主要是由于油菜作为经济作物其氮肥施用量较高但产量较低. 近 30 年来江苏油菜单位产量氮肥施用量强度高达 0.063 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而水稻、小麦、玉米和大豆的单位产量氮肥施用量强度分别为 0.023、0.044、0.031、0.019 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因此油菜单位产量碳足迹最高.

江苏 5 种作物单位产量碳足迹年际变化趋势较为相近. 1991 年因遇洪水全省作物受灾严重, 作物产量降低, 导致单位产量碳足迹有所升高. 1992—1997 年作物单产增高的同时, 化肥施用量也在逐年升高, 故其单位产量碳足迹趋于平稳. 1998 年小麦和油菜

单位产量碳足迹升高主要是由于其单产远低于前年份但氮肥施用量已达到最大值. 1999—2002 年单位产量碳足迹基本维持稳定, 2003 年高温、干旱天气频繁导致作物产量大幅降低, 5 种作物碳足迹呈现上升趋势. 2004—2005 年全省粮食生产实现恢复性增长, 农民收入增幅创 1997 年以来最高^[19]. 2006—2009 年因江苏省委省政府开始鼓励实施农民种粮惠农政策, 全省坚持“多予少取放活”的方针, 以稳定农业生产、减少受灾损失和增加农民收入为最终目标. 通过加大对全省粮食的扶持力度和提高粮食价格等途径使得农民种植作物积极性上升, 化肥种子农机等农业投入水平不断加大使我省作物生产克服自然灾害的不利影响, 作物生产条件、作物品种以及栽培技术日渐改善, 故其单位产量碳足迹趋于平缓. 2010—2014 年碳足迹呈缓慢下降趋势, 原因在于这期间我省深入推进粮食高产增效, 开展粮食绿色增产模式攻关行动, 作物单产稳中有增, 此外农业技术水平也得到了新的提升. 2015—2019 年几种作物碳足迹下降趋势较为明显, 主要原因是“十三五”期间全省化肥减量增效工作取得显著成效, 实现化肥使用总量和强度持续“双减”. 据统计, 2019 江苏省化肥施用总量降至 286.21 万 t, 较 2015 年的 320 万 t 削减 10.56%, 单位播种面积化肥施用量降至 25.64 kg/亩, 较 2015 年削减 6.92%, 全省化肥利用率由 2015 年的平均 35% 提高到 40.56%^[10].

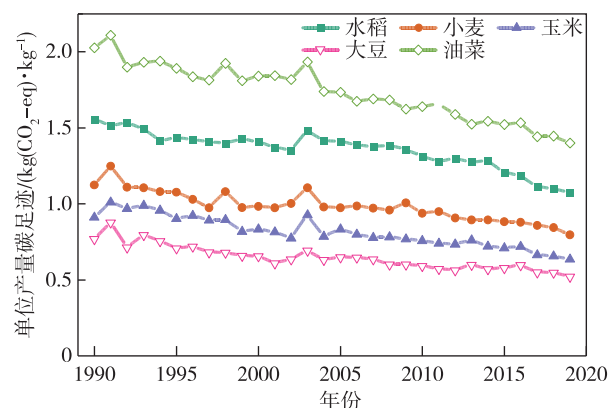


图2 1990—2019年江苏省5种作物生产单位产量碳足迹变化

Fig. 2 Variations of carbon footprints per unit yield of five crops production in Jiangsu during 1990–2019

3.2 江苏省主要农作物单位面积碳足迹变化

从作物单位面积碳足迹看(图3), 江苏主要作物单位面积碳足迹由高到低分别表现为水稻>小麦>

玉米>油菜>大豆,每1 hm²土地水稻、小麦、玉米、油菜和大豆单位面积年均碳足迹分别为11 149(9 958~11 726)、4 922(4 167~5 328)、4 506(3 944~4 767)、3 816(3 401~4 018)和2 579(2 203~2 806) kg(CO₂-eq)·hm⁻².与单位产量碳足迹不同,水稻单位面积碳足迹最高,大豆单位面积碳足迹最低,粮食作物单位面积碳足迹普遍高于经济作物.相比其他4种旱地作物,稻田CH₄排放是水稻单位面积碳足迹最大贡献者.水稻是5种作物施肥量最高的作物,单位面积施肥量平均为343.83 kg·hm⁻².相比水稻,大豆单位面积施肥量和施氮量仅为118.7 kg·hm⁻²和45.58 kg·hm⁻².此外在灌溉耗电方面,水稻单位面积灌溉耗电高于其他几种作物也是导致水稻碳足迹较高的重要因素.

1990—1998年几种作物单位面积碳足迹总体呈较明显的上升趋势,主要原因在于这几年为追求作物产量的提高,化肥农药等物资单位面积施用量在逐年升高.1998年单位播种面积化肥施用强度为413.61 kg·hm⁻²,单位播种面积化肥施用强度较1990年增长54.02%,同时1998年全省化肥施用总量为333.3万t(折纯,下同),较1990年增长50.28%.1998年农药单位播种面积施用强度为12.26 kg·hm⁻²,较1990年增长41.90%^[10],因此1990—1998年5种作物单位面积碳足迹上升趋势较明显.1999—2009年水稻和小麦单位面积碳足迹呈现平稳上升趋势,玉米、大豆和油菜单位面积碳足迹变化基本维持稳定.2010—2019年水稻单位面积碳足迹呈现平缓下降趋势,其他4种旱地作物单位面积碳足迹基本维持稳定,原因在于施肥量和农药用

量相比前面年份在不断减少,农机化水平在不断提高.据统计,2019年江苏单位播种面积化肥施用量为384.68 kg·hm⁻²,较2010年下降14.10%,2019年江苏单位播种面积农药施用量为9.83 kg·hm⁻²,较2010年下降16.92%,2019年江苏耕种收综合机械化水平为53.21%,较2010年上升14.93%^[10,20].

3.3 江苏省农作物生产碳足迹主要构成

江苏省农作物生产各项投入单位产量碳足迹构成如图4所示.5种主要作物单位产量碳足迹构成主要包括化肥投入、氮肥施用田间N₂O排放、稻田CH₄排放、农机具投入、灌溉耗电能耗、农药和种子投入7个组成部分.对水稻而言,稻田CH₄排放和化肥生产运输是主要碳排放贡献源,稻田CH₄排放贡献所占比重为54.43%(48.95%~57.59%),化肥投入贡献所占比重为20.65%(17.74~24.64%),土壤N₂O排放年均贡献比重为11.67%(9.99%~15.56%).其他组分年均碳足迹贡献比重均不足10%,如灌溉耗电年均贡献所占比重为4.41%(2.42%~5.94%)、农药投入年均贡献所占比重为3.68%(1.78%~5.30%)、机械使用年均贡献所占比重为3.28%(1.55%~5.07%)、种子投入年均贡献所占比重为1.86%(1.27%~3.24%).

对4种旱地作物而言,化肥投入和土壤N₂O排放是其单位产量碳足迹主要贡献源,不同作物化肥投入年均贡献所占比重分别为:小麦54.50%(47.52%~62.60%)、油菜49.15%(41.37%~56.90%)、玉米47.12%(42.68%~50.49%)和大豆44.29%(33.26%~48.96%).不同作物氮肥施用土壤N₂O排放年均贡献所占比重分别为:大豆26.92%(23.70%~38.17%)、小麦25.54%(21.62%~31.28%)、油菜25.42%(22.69%~30.28%)和玉米24.53%(21.38%~27.27%).除了化肥投入和土壤N₂O排放外其他组分贡献比重较小,小麦和玉米其他组分贡献所占比重表现为农机使用>农药投入>灌溉耗电>种子投入,大豆和油菜其他组分贡献所占比重表现为农药投入>农机使用>种子投入>灌溉耗电.

江苏省农作物生产各项投入单位面积碳足迹构成如图5所示,单位面积碳足迹构成与单位产量碳足迹构成组分相同.水稻碳足迹构成主要以稻田CH₄排放贡献最大,单位面积碳足迹贡献所占比重达54.22%(51.46%~60.59%),化肥投入为第二大贡献源所占比重为18.82%(18.38~19.71%),土壤N₂O排放年均贡献比重为11.86%(10.36%~

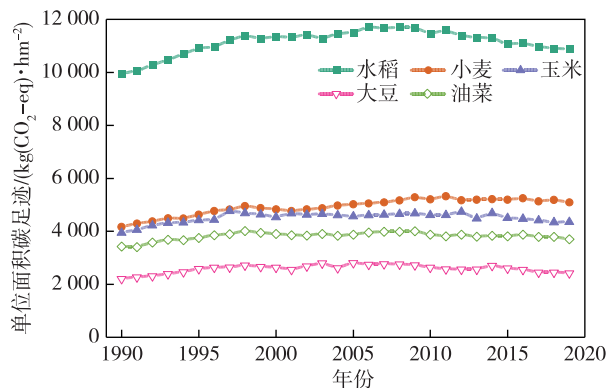


图3 1990—2019年江苏省5种作物生产单位面积碳足迹变化

Fig. 3 Variations of carbon footprints per unit area of five crops production in Jiangsu during 1990—2019

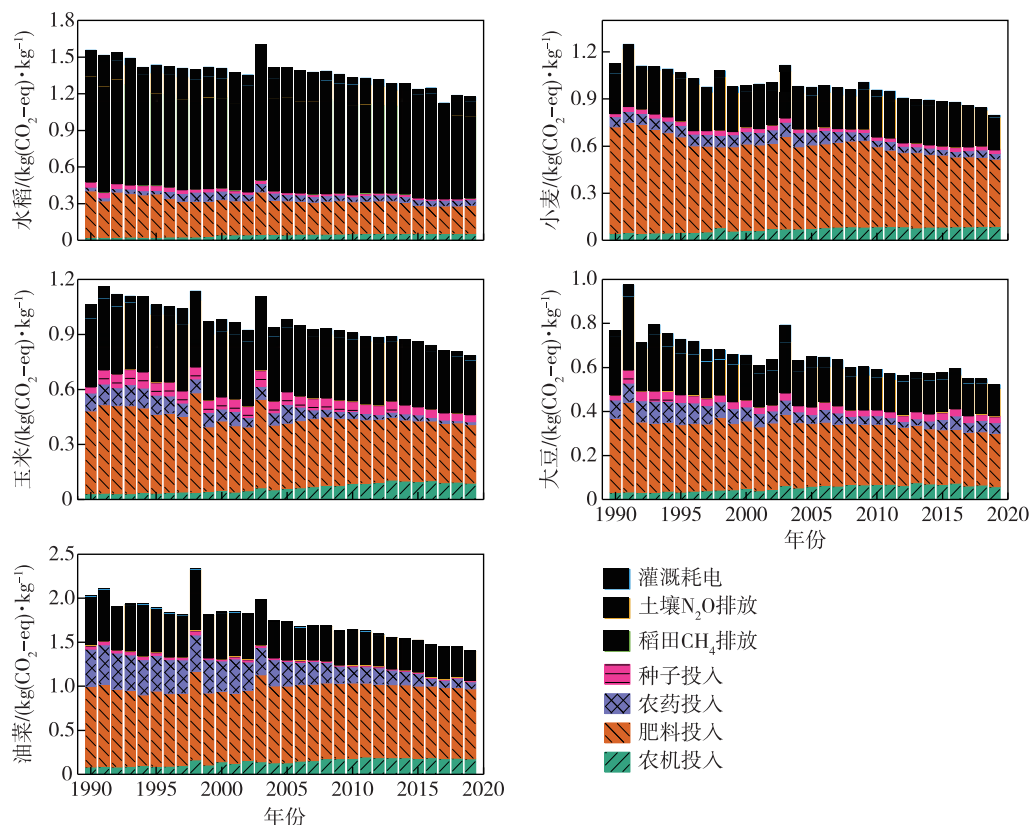


图4 1990—2019年江苏省5种作物生产单位产量碳足迹构成

Fig. 4 Composition of carbon footprint per unit yield of five crops production in Jiangsu during 1990–2019

13.6%)。其他组分年均贡献比重不足10%，如灌溉耗电年均贡献比重为8.21% (3.50%~10.48%)、农药投入年均贡献比重为2.63% (1.57%~3.18%)、机械使用年均贡献比重为2.59% (1.81%~3.36%)、种子投入年均贡献比重为1.67% (0.77%~3.16%)。

和单位产量碳足迹构成相同，化肥投入和土壤N₂O排放是4种旱地作物单位面积碳排放主要贡献源。4种作物化肥投入年均贡献比重如下：小麦41.74% (39.57%~43.44%)、玉米44.97% (43.10%~47.09%)、大豆28.05% (26.07%~30.11%)、油菜48.62% (46.67%~52.04%)。土壤N₂O排放年均贡献比重分别为小麦28.44% (24.60%~33.66%)、玉米26.73% (23.55%~30.46%)、大豆16.20% (14.56%~18.66%)和油菜27.84% (24.98%~33.03%)。除了化肥投入和土壤N₂O排放外其他组分贡献比重相对较低，玉米和油菜其他组分贡献比例表现为农药投入>农机使用>种子投入>灌溉耗电，小麦和大豆其他组分贡献比重分别表现为种子投入>农药投入>机械使用>灌溉耗电。

3.4 主要作物碳足迹影响因素分析

基于随机森林模型分析了影响江苏1990—2019

年不同作物碳足迹年际变化的主要因素(图6)。选取化肥、氮肥、农药、种子、电力、农机、产量和面积8个投入因素进行分析。结果表明影响不同作物碳足迹年际变化的农资投入中主要为种子投入的变化，虽然种子的生产与运输在作物生产碳足迹构成中所占比重较小，但是其年际变化较为明显。除小麦外其他4种作物单位面积种子用量有明显下降趋势。水稻种子用量由1990年的35.10 kg·hm⁻²下降到2019年的9.60 kg·hm⁻²；玉米单位面积种子用量由1990年的45.00 kg·hm⁻²下降到2019年的27.98 kg·hm⁻²；大豆单位面积种子用量由1990年的57.06 kg·hm⁻²下降到2019年的40.50 kg·hm⁻²；油菜单位面积种子用量由1990年的7.35 kg·hm⁻²下降到2019年的2.40 kg·hm⁻² [11]。

其次，氮肥投入是影响作物碳足迹年际变化的重要因素。据统计1998年单位播种面积氮肥施用强度为244.10 kg·hm⁻²，较1990年增长33.87%。1998年全省氮肥施用总量为196.7万t，较1990年增长30.61%，随着氮肥用量的不断增加，其对作物生产碳足迹贡献也在不断提高。1999—2010年全省单位面积氮肥施用量增减幅度不明显，1999年单位播种

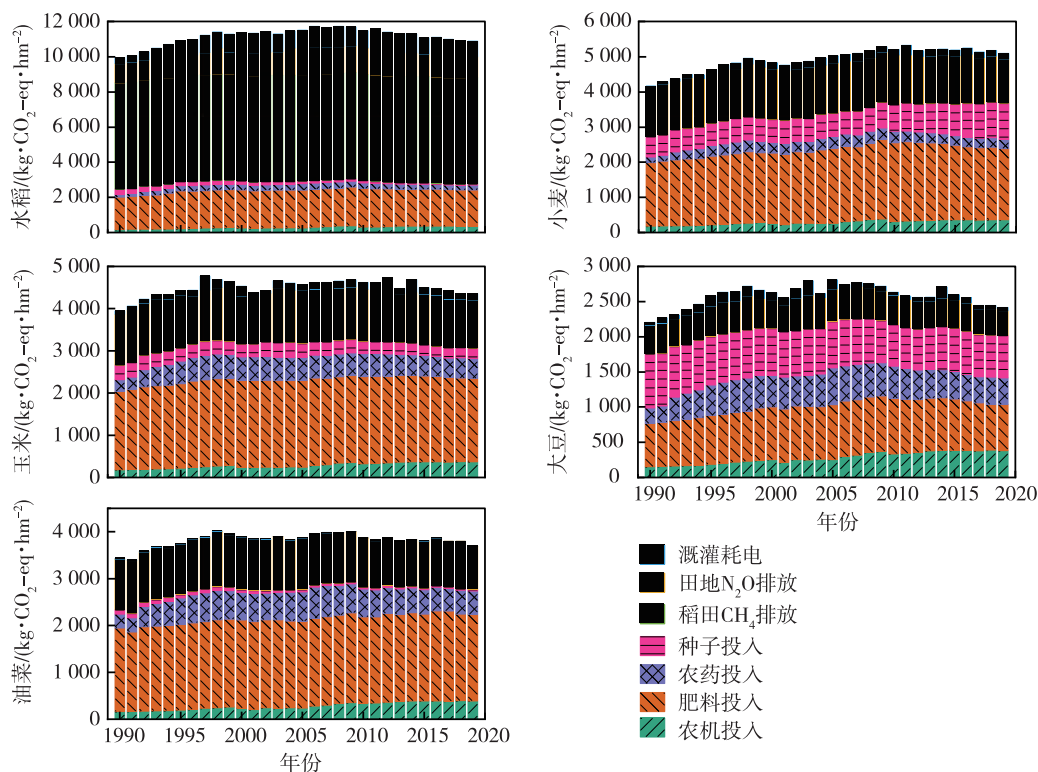


图5 1990—2019年江苏省5种作物生产单位面积碳足迹构成

Fig. 5 Composition of carbon footprint per unit area of five crops production in Jiangsu during 1990–2019

面积氮肥施用强度为 $238.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2010年单位播种面积氮肥施用强度为 $235.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2011—2019年全省氮肥单位面积施用量与氮肥施用总量呈现“双减态势”, 2019年单位播种面积氮肥施用强度为 $189.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较2011年单位播种面积氮肥施用强度削减 16.64%; 2019年氮肥施用总量为 141.1 万 t, 较2011年氮肥施用总量削减 32.8 万 t. 近年来全省积极开展综合施策工作^[21], 以精准施肥减量、优化肥料结构减量为目标, 积极推进深化测土配方施肥、优化调整肥料结构、改善施肥设施装备等工作, 坚决打赢农业面源污染攻坚战. 因此氮肥的减量施用是近年来江苏省主要作物单位产量碳足迹减少的重要因素.

另一个影响作物碳足迹年际变化的显著因素是农机投入. 江苏是我国最早提倡农机使用的地区, 尤其是1990年代以来, 随着农民收入水平的提高和乡镇企业的快速发展, 农业机械化水平发展速度加快^[22]. 据统计, 2019年农业机械总动力为 5 111.95 万 kW, 较1990年增加 3 107.18 万 kW; 2019年联合收割机拥有量为 180 345 台, 较1990年增加 177 934 台; 2019年农用水泵拥有量为 67.72 万台, 较1990年增加 28.09 万台^[20]. 1990年机耕、机播和机收面

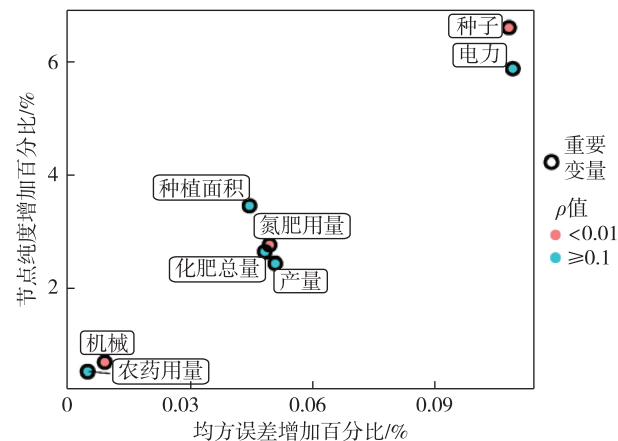


图6 1990—2019年江苏省5种作物生产碳足迹影响因素解析

Fig. 6 Analysis of influencing factors of carbon footprint of five crops production in Jiangsu during 1990–2019

积分别为 5 448.73、1 569.61 和 797.9 万亩, 而到了2019年全省主要农作物综合机械化率达 86%^[19]. 1990—2019年江苏省单位产量和单位面积碳足迹构成中农机投入碳足迹贡献比例逐年升高, 因此农具的使用是江苏省主要农作物碳足迹年际变化的重要影响因素. 因此全省应加快提高低碳环保农机的

研发速度与技术,提高农机作业效率,降低农机使用碳排放。

4 讨论与结论

目前基于“双碳目标”的提出,碳足迹评估已成为众多学者关注的热点和前沿领域.控制农业温室气体排放,在应对全球气候变化、快速实现绿色低碳农业方面占据重要地位.本文基于江苏省 1990—2019 年省级农业数据,利用 LCA 法对主要作物单位产量、单位面积碳足迹动态变化与构成以及主要农资投入影响因素进行分析。

综合其他学者研究成果,可以发现江苏单位产量和单位面积碳足迹总体偏高.如陈中督等^[23]对长江中下游地区 2004—2015 年七省的冬油菜碳足迹时空动态变化进行研究,发现七个省份单位面积碳足迹总体呈下降趋势,不同省份间碳足迹存在明显差异,碳足迹最高的省份是江苏,最低的省份是安徽和江西,江苏比安徽和江西单位面积碳足迹高 $1\,564.9\text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq})\cdot\text{hm}^{-2}$. Xu 等^[24]采用 LCA 法对我国水稻、小麦、玉米粮食作物碳足迹进行了研究,发现水稻、小麦和玉米单位产量碳足迹分别为 1.06 ± 0.03 、 0.50 ± 0.04 和 $0.40\pm 0.03\text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq})\cdot\text{kg}^{-1}$, 3 种作物单位面积碳足迹分别为 $7\,285\pm 78$ 、 $2\,800\pm 222$ 和 $2\,707\pm 151\text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq})\cdot\text{hm}^{-2}$, 低于本研究中江苏水稻、小麦和玉米单位面积和单位产量碳足迹.许萍萍等^[25]基于估算模型核算了江苏 2001—2016 年农田生态系统碳排放总量、碳吸收量和碳足迹,结果显示自 2001—2016 年,碳排放总量增加 3.4%,单位面积碳吸收量总体呈上升趋势.赵宇^[26]基于江苏 2000—2015 年面板数据采用农业碳排放估算方式,通过多元回归模型探究江苏碳排放影响因素,结果表明江苏农业生产碳排放量呈三段式变化,2000—2003 年先增后降、2004—2010 不断增长、2011—2015 年缓慢下降,此外还发现能源消耗、农业人均 GDP 等是影响本省农业碳排放的主要因素。

本研究中除稻田 CH_4 排放碳足迹贡献最大外,其他几种作物生产碳足迹贡献占比最大的均为化肥投入,包括化肥生产和氮肥施用.对水稻而言,稻田 CH_4 排放和化肥投入在水稻全生命周期过程中贡献最突出.稻田 CH_4 排放单位产量年均贡献比重为 54.43% (48.95%~57.59%)、单位面积年均贡献比重为 54.22% (51.46%~60.59%);化肥投入单位产量年均贡献比重为 20.65% (17.74%~24.64%)、单

位面积年均贡献比重为 18.82% (18.38%~19.71%).本结果与陈中督等^[1]对长三角地区稻麦轮作系统碳足迹评估时发现稻田甲烷排放对水稻碳足迹贡献结果(65%)相近.闫明^[27]研究发现氮肥施用对水稻生产碳足迹贡献比重达到 31%~34%.相比稻田 CH_4 排放和化肥投入,灌溉耗电、农机、农药和种子投入碳足迹贡献比重较小.对小麦、玉米、大豆和油菜 4 种旱地作物而言,化肥生产与氮肥施用土壤 N_2O 排放碳足迹贡献最大,贡献比重多数在 50% 以上,由此可见肥料投入的温室气体减排潜力是江苏主要作物生产碳足迹能否降低的关键.早在 2007 年我国氮肥施用量已占全球氮肥消费总量的 30%,化肥减量施用成为国家“十二五”、“十三五”和“十四五”重要工作任务,目前减肥减药、提质增效是全国各地区重点关注和解决的问题. Wu 等^[28]基于 LCA 法评估了我国 1998—2016 年间 7 种化肥和 9 种作物温室气体排放总量、单位面积和单位产量碳排放量,结果表明 1998—2016 年碳排放总量增加了 35%,在所有化肥投入中,尿素温室气体排放量最大,约占温室气体排放总量的 60%.陈舜等^[29]指出我国化肥生产碳排放因子是欧美国家的 2 倍,氮肥生产碳排放因子是欧美国家碳排放因子的 3 倍,因此优化氮素管理、施用高效氮肥是减少农业生产碳排放、实现农业增收增效的重要途径。

农业作为重要的温室气体排放源,在保证作物产量与安全的前提下应从减排和增汇两个方向出发,助力国家碳达峰、碳中和目标.针对稻田 CH_4 排放、化肥投入、灌溉耗电、农机使用等活动阶段的碳排放,可以采取水分管理、秸秆碳化、减肥减药、优化氮素管理(测土配方施肥、氮肥深施、避免不必要的排灌等)、施用高效氮肥(控释肥、硝化抑制剂、脲酶抑制剂等)等途径减少碳排放. Li 等^[30]研究表明加强水肥的高效管控、节水灌溉配合改性氮肥不仅可以显著降低稻田 CH_4 和土壤 N_2O 排放,同时还使水稻产量提高了 6%~35%.除了一系列减排技术外,近年来国家也出台了相关增汇技术,主要有秸秆还田(直接还田、过腹还田或炭化还田)、保护性耕作(免耕、秸秆还田及种植覆盖作物)、有机物料高效回田等. Qin 等^[31]通过长期回田利用研究,发现生物炭施用可刺激 II 型湿地甲烷氧化菌的丰度和活性、降低土壤容重、提高土壤 pH 值、有利于土壤水分聚集,而中高量生物质炭使稻田温室气体排放当量减排 29%,水稻产量提升 4.6%.我国农业生产本身具有

基数大且增长快的特点,“高碳”属性较为明显^[32]。本文全面核算了江苏省主要作物生产的碳足迹动态及其构成,旨在为江苏省主要作物生产体系全过程环境管理及农业绿色发展提供决策依据。

参考文献

References

- [1] 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:基于生命周期评价[J].中国农业资源与区划,2019,40(12):81-90
CHEN Zhongdu, LI Fengbo, FENG Jinfei, et al. Study on carbon footprint for rice-wheat rotation system in the lower reaches of Yangtze River; based on the life cycle assessment [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(12):81-90
- [2] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences, 2008, 363(1492):789-813
- [3] 金书秦,韩冬梅,林煜,等.碳达峰目标下开展农业碳交易的前景分析和政策建议[J].农村金融研究,2021(6):3-8
JIN Shuqin, HAN Dongmei, LIN Yu, et al. Prospect and policy recommendations for agricultural carbon trading under the carbon peak target [J]. Rural Finance Research, 2021(6):3-8
- [4] 刘宇峰,原志华,郭玲霞,等.中国农作物生产碳足迹及其空间分布特征[J].应用生态学报,2017,28(8):2577-2587
LIU Yufeng, YUAN Zhihua, GUO Lingxia, et al. Carbon footprint of crop production in China from 1993 to 2013 and its spatial distribution [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8):2577-2587
- [5] Sanz-Cobena A, Lassaletta L, Aguilera E, et al. Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: a review [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 238:5-24
- [6] Cheng K, Pan G X, Smith P, et al. Carbon footprint of China's crop production: an estimation using agro-statistics data over 1993 - 2007 [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4):231-237
- [7] Yan M, Cheng K, Luo T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China: based on farm survey data [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104:130-138
- [8] 郑微微,沈贵银.江苏省主要农作物化肥利用效率评价[J].江苏农业科学,2020,48(9):41-46
ZHENG Weiwei, SHEN Guiyin. Evaluation of chemical utilization efficiency of main crops in Jiangsu province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(9):41-46
- [9] 江苏省土壤普查鉴定委员会.江苏土壤志[M].南京:江苏人民出版社,1965
- [10] 国家统计局.中国统计年鉴 [M].北京:中国统计出版社,1991—2020
- [11] 国家发展和改革委员会价格司.全国农产品成本收益资料汇编 [M].北京:中国统计出版社,1991—2019
- [12] 中国物价年鉴编委会.中国物价年鉴 [M].北京:人民出版社,1991—2013
- [13] Wernet G, Bauer C, Steubing B, et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(9):1218-1230
- [14] Yao Y, Chang Y, Huang R Z, et al. Environmental implications of the methanol economy in China: well-to-wheel comparison of energy and environmental emissions for different methanol fuel production pathways [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172:1381-1390
- [15] Goglio P, Smith W N, Worth D E, et al. Development of Crop.LCA, an adaptable screening life cycle assessment tool for agricultural systems: a Canadian scenario assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172:3770-3780
- [16] 国家发展和改革委员会.省级温室气体清单编制指南(试行)[R].2011
- [17] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [R]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007
- [18] Core R, Rdct R, Team R, et al. A language and environment for statistical computing [J]. Computing, 2015, 1:12-21
- [19] 农业农村部.中国农业年鉴 [M].北京:中国农业出版社,1991—2019
- [20] 江苏省统计局.江苏统计年鉴 [M].北京:中国统计出版社,1991—2020
- [21] 江苏省农业农村厅.江苏省化肥减量增效行动实施方案(2018—2022年) [R].2018
- [22] 易金根,沈广树.江苏省农业机械化现状及发展对策 [J].南京农业大学学报,1998,21(3):116-120
YI Jingen, SHEN Guangshu. Present situation and measures for development of agricultural mechanization in Jiangsu province [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1998, 21(3):116-120
- [23] 陈中督,徐春春,纪龙,等.2004—2015年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J].中国生态农业学报,2019,27(7):1105-1114
CHEN Zhongdu, XU Chunchun, JI Long, et al. Spatial and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004 - 2015 [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7):1105-1114
- [24] Xu X M, Lan Y. Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 146:218-227
- [25] 许萍萍,赵言文,陈颢明,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 Pingping, ZHAO Yanwen, CHEN Haoming, et al. Dynamic change 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
- [26] 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 Yu. Influencing factors and trend prediction on dy-

- namic change of agricultural carbon emissions in Jiangsu province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2018,39(5):97-102
- [27] 闫明.农业生产碳足迹及氮肥去向的计量研究[D].南京:南京农业大学,2015
- YAN Ming.Quantitative evaluation of carbon footprint and fertilizer nitrogen fate in agricultural production[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2015
- [28] Wu H J,MacDonald G K,Galloway J N,et al.The influence of crop and chemical fertilizer combinations on greenhouse gas emissions;a partial life-cycle assessment of fertilizer production and use in China[J].Resources, Conservation and Recycling,2021,168:105303
- [29] 陈舜,逯非,王效科.中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J].生态学报,2015,35(19):6371-6383
- CHEN Shun,LU Fei,WANG Xiaoke.Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J].Acta Ecologica Sinica, 2015,35(19):6371-6383
- [30] Li J L,Li Y E,Wan Y F,et al.Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield[J]. Geoderma,2018,315:1-10
- [31] Qin X B,Li Y E,Wang H,et al.Long-term effect of bio-char application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system;a four-year case study in South China[J].Science of the Total Environment,2016, 569/570:1390-1401
- [32] 米松华.我国低碳现代农业发展研究:基于碳足迹核算和适用性低碳技术应用的视角[D].杭州:浙江大学,2013
- MI Songhua. Study on China' low carbon modern agriculture development: from views of carbon footprint calculation and applicable mitigation technology application[D].Hangzhou:Zhejiang University,2013

Carbon footprint dynamics and composition assessment of major crops production in Jiangsu province

ZHANG Chuanhong¹ HAN Lu¹ XIE Jianan² JIN Hao¹ LIU Cuiying³ FAN Jianling¹

¹ School of Environmental Science and Engineering/Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control/Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

² Reading Academy,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

³ School of Applied Meteorology,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

Abstract Jiangsu is a major agricultural province and grain producing area.The comprehensive accounting of the temporal dynamics and composition of carbon footprint of major crops could provide decision-making basis for environmental management and green development of the agricultural sector in Jiangsu province.In this paper,Life Cycle Assessment (LCA) was used to calculate the carbon emission intensity of rice,wheat,maize,soybean and rapeseed production processes in Jiangsu province during 1990-2019,and the temporal dynamics,composition and influencing factors of carbon footprints of these crops were analyzed.The results showed that the carbon footprint per unit yield of major crops in Jiangsu province decreased but the carbon footprint per unit area increased in recent 30 years.The carbon footprint per unit yield for different crops showed as rapeseed ($1.74 \text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{kg}^{-1}$) > rice ($1.36 \text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{kg}^{-1}$) > wheat ($0.99 \text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{kg}^{-1}$) > maize ($0.81 \text{ kg}(\text{CO}_2\text{-eq}) \cdot \text{kg}^{-1}$) > soybean ($0.64 \text{ kg} \text{ CO}_2\text{-eq} \text{ kg}^{-1}$).For the composition of carbon footprint, CH_4 emission (54.43%) and chemical fertilizer input (20.65%) were the two major sources for rice production,while chemical fertilizer input and soil N_2O emission are the most important sources for wheat,maize,soybean and rapeseed production.Random forest analysis showed that the variation of seed,nitrogen fertilizer and agricultural machinery input were the main driving factors for the interannual change of carbon footprints for different crops.Therefore,it is necessary to take targeted emission reduction strategies for different crop production and adjust agricultural inputs and process management in order to promote the green and efficient development of agriculture.

Key words carbon footprint;temporal variation;major crops;life cycle assessment (LCA);composition analysis