

网络出版时间:2026-04-28

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260427.1442.002

2014—2023 年江苏省小麦生产体系碳氮足迹年际变化特征及构成分析

李 慧,杜文婧,芦 迈,杨清清,张凌俣,赵文娜,代新俊

(忻州师范学院生命科学系,山西忻州 034000)

摘 要:为给江苏省制定小麦生产过程中碳氮减排措施提供依据,基于生命周期评价法,构建江苏省小麦生产体系碳氮核算边界,分析了 2014—2023 年江苏省小麦生产体系资源投入特征和碳氮足迹演变趋势。结果表明,2014—2023 年间江苏省小麦生产体系单位面积和单位产量成本呈上升趋势。农资投入成本主要来源于肥料(33.38%~40.06%)和机械(30.21%~35.72%)。小麦单位面积碳足迹和单位产量碳足迹分别为 $2.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.46 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,单位面积氮足迹和单位产量氮足迹分别为 $103.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $18.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随时间的推进,碳足迹总体呈增长趋势,年均增幅为 2.23%,活性氮排放量变化幅度较小。在碳足迹构成中,施肥和机械(灌溉和柴油)环节是小麦碳足迹的主要来源,对碳排放的贡献率分别为 63.70%和 22.38%, NH_3 挥发是小麦活性氮排放的主要路径。单位产量碳氮足迹均与小麦单产呈显著负相关。综合来看,减少小麦施肥和机械作业环节碳排放、增加秸秆碳固定是降低小麦生产碳氮足迹的重要途径,可以推广有机肥替代化肥、水肥一体化、秸秆还田及运用轻便型农业机械等方式提高肥料利用率和机械生产效率,降低小麦生产碳氮排放,实现绿色低碳可持续发展。

关键词:小麦生产体系;生命周期评价法;碳氮足迹;年际演变特征;秸秆还田

中图分类号:S512.1;S315

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)06-0828-10

Analysis of the Interannual Variation Characteristics and Composition of Carbon and Nitrogen Footprints of Wheat Production System in Jiangsu Province from 2014 to 2023

LI Hui, DU Wenjing, LU Mai, YANG Qingqing, ZHANG Lingyu, ZHAO Wenna, DAI Xinjun

(Department of Life Sciences, Xinzhou Normal University, Xinzhou, Shanxi 034000, China)

Abstract: To provide a basis for formulating carbon and nitrogen reduction measures for wheat production in Jiangsu Province, a carbon and nitrogen accounting boundary for Jiangsu's wheat production system was constructed, analyzing the resource input characteristics and carbon and nitrogen footprint trends from 2014 to 2023, based on the life cycle assessment method. The results indicate that over the decade, the cost per unit area and per unit yield in Jiangsu's wheat production system showed an upward trend. Agricultural input costs were primarily attributed to fertilizers(33.38%—40.06%) and machinery(30.21%—35.72%). The per unit area carbon footprint and per unit yield carbon footprint of wheat were $2.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $0.46 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$, respectively, while the per unit area nitrogen footprint and per unit yield nitrogen footprint were $103.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $18.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The carbon footprint generally exhibited an increasing trend over time, with an annual growth rate of 2.23%, while active nitrogen emissions showed little variation. In the carbon footprint composition, fertilization and machinery(irrigation and diesel) were the primary sources of wheat carbon emissions, con-

收稿日期:2025-12-16

修回日期:2026-01-27

基金项目:山西省基础研究计划项目(202103021223370、202403021222331);山西省高等学校科技创新项目(2024L328);忻州师范学院 1331 工程院级研究项目(2021KY13)

第一作者 E-mail:18735423170@163.com(李 慧)

通讯作者 E-mail:18335072301@163.com(代新俊)

tributing 63.70% and 22.38% to total emissions, respectively. Ammonia(NH_3) volatilization was the main pathway for active nitrogen emissions in wheat production. The per unit yield carbon and nitrogen footprints were significantly negatively correlated with wheat yield. Overall, reducing carbon emissions in wheat fertilization and mechanical operations, along with increasing straw carbon sequestration, are key strategies for lowering wheat production carbon and nitrogen footprints. Measures such as promoting organic fertilizer substitution for chemical fertilizers, integrated water and fertilizer management, straw return, and the use of lightweight agricultural machinery can enhance fertilizer efficiency and mechanical productivity, thereby reducing carbon and nitrogen emissions in wheat production and achieving green, low-carbon, and sustainable development.

Keywords: Wheat production system; Life cycle assesement; Carbon and nitrogen footprint; Interannual evolution characteristics; Straw incorporation

工业革命以来,人类活动直接或间接导致大气中温室气体含量显著增加,气候变化成为全球性问题,减少温室气体排放成为各国急需应对的环境挑战^[1]。值得注意的是,农业生产活动是温室气体的主要来源之一,全球温室气体排放总量的 10% 以上来自农业生产活动。中国温室气体排放量居世界首位,巨大的人口基数使中国在温室气体减排方面面临巨大压力^[2]。农业生产是中国温室气体排放的第三大来源,仅次于工业生产活动和能源活动,农业生产排放的温室气体总量超过 8 亿 t CO_2 当量^[3]。因此,在双碳背景下,对作物播种、施肥、灌溉和收获等各环节进行碳氮排放的优化管理不仅是确保中国农业可持续发展、实现农业减排目标的重要措施,也对保障中国粮食安全具有重要意义。

为合理制定农业生产降碳减排措施,必须要先确定农业生产中不同环节的温室气体排放量,碳足迹和氮足迹是用来定量评估作物从播种到收获各个环节碳氮排放的指标^[4-5]。生命周期评价法(life cycle assessment,简称 LCA)被广泛应用于评估生产活动或产品在整个生命周期内的环境负荷^[6]。采用 LCA 法研究表明,中国三大粮食作物小麦、玉米和水稻的单位产量碳足迹分别为 0.5、0.4、1.06 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水稻的单位产量碳足迹高于小麦和玉米^[7]。基于 LCA 法对 2005—2015 年中国小麦生产过程中单位面积碳足迹的核算结果约为 4 t $\cdot \text{hm}^{-2}$ ^[8]。李春喜等^[9]将河南省划分为豫中、豫南、豫西和豫北 4 个生态区,对冬小麦—夏玉米农田碳足迹构成分析认为,碳足迹主要来源是化肥投入和灌溉电力。张传红等^[10]分析得出,1990—2019 年江苏省小麦单位产量碳足迹在 0.8~1.2 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 0.99 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随

着肥料管理水平和机械化程度的提高,碳足迹可能发生变化,侯相成等^[11]基于 LCA 法对 2019 年东北地区玉米种植体系产生的活性氮及温室气体排放量研究提出,降低农业生产碳氮排放的主要途径之一是提高农业机械化生产效率。肖广敏等^[12]基于 2018 年河北省小麦生产中农资投入及产量数据分析发现,减少碳排放最直接的方法是减少灌溉用水量及化肥用量。张海霞等^[13]研究结果显示,2010—2019 年邯郸市冬小麦生产的氮足迹整体呈下降趋势。

本研究基于生命周期评价法,以江苏省小麦生产体系为研究对象,构建小麦种植系统碳氮足迹核算边界,分析 2014—2023 年江苏省小麦生产的产量演变、碳氮足迹来源组成及年际变化特征,并计算各项农资投入的成本及其碳足迹贡献率,以期对江苏省小麦生产体系碳氮排放减控以及中国其他省份实现“双碳”目标提供参考。

1 材料与方法

1.1 系统边界

本研究选取江苏省小麦生产体系为分析对象,该体系碳氮足迹核算边界设定为小麦从播种至收获整个生命周期(图 1)。小麦碳足迹计算内容主要包括各种农资投入品(种子、化肥、农药施用、机械燃油和灌溉耗电)原材料开采生产和运输、小麦生育期管理(耕作、播种、施肥、农药、灌溉和收获)和秸秆处理过程中的碳排放及固定。小麦氮足迹计算内容主要包括各种农资投入品生产运输和施用化肥造成的直接间接活性氮排放量(包括田间 N_2O 排放、田间 NH_3 挥发、 NO_3^- 淋失和 NH_4^+ 淋失过程)。

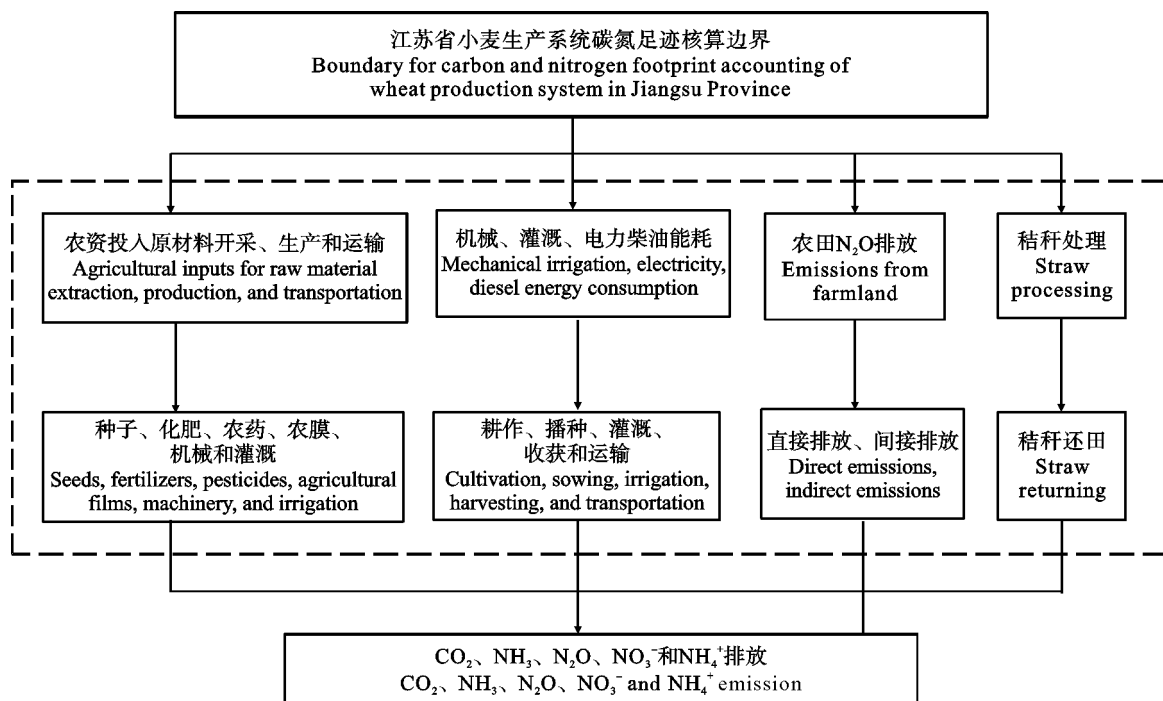


图1 江苏省小麦生产体系碳氮足迹核算边界

Fig. 1 Accounting boundary for carbon and nitrogen footprint of wheat production system in Jiangsu Province

1.2 数据来源

小麦播种面积及产量数据来源于2015—2024年《中国统计年鉴》和《江苏省统计年鉴》，种子用量、氮磷钾肥及复合肥用量数据来源于2015—2024年《全国农产品成本收益资料汇编》，农药用量、机械柴油用量和农田灌溉耗电量数据来源于《中国价格统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》。秸秆产量用小麦产量和草谷比进行计算^[14]。

1.3 碳足迹计算方法

江苏省小麦种植过程中产生的碳排放总量计算公式如下：

$$CE_{\text{TotalCO}_2} = E_{\text{inputCO}_2} + E_{\text{N}_2\text{O}} \times 298 \quad (1)$$

$$E_{\text{inputCO}_2} = \sum T_i \times EF_i \quad (2)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = \text{Fer}_N \times EF_{\text{NO}_3^-} \times 2.5\% + \text{Fer}_N \times EF_{\text{NH}_3} \times 1\% + \text{Fer}_N \times EF_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式中， CE_{TotalCO_2} 为小麦种植过程中碳排放总量（以 CO_2 -eq 计，单位为万 t，下同）； E_{inputCO_2} 为农资投入品（种子、化肥、农药、柴油和灌溉用电）产生的碳排放量； $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为农田 N_2O 排放量；298 为 100 年尺度上相对全球增温潜势（ N_2O 转化为 CO_2 ）。 T_i 和 EF_i 分别表示第 i 种农资投入量和碳排放系数； Fer_N 为氮肥投入量； $EF_{\text{NO}_3^-}$ 、 EF_{NH_3} 和 $EF_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别表示氮淋溶系数、氨挥发系数和 N_2O 排放系数；2.5% 和 1% 分别表示氮淋溶和氨

挥发转换为 N_2O 的系数^[15]。

小麦种植过程中产生的碳固定总量计算公式如下：

$$CF_{\text{SOC-TotalCO}_2} = C_{\text{SOC-Fer}_N} + C_{\text{SOC-straw}} \quad (4)$$

$$C_{\text{SOC-Fer}_N} = \text{Fer}_N \times E_{\text{Fer}_N} \quad (5)$$

$$C_{\text{SOC-straw}} = \text{Straw} \times E_{\text{Straw}} \quad (6)$$

式中， $CF_{\text{SOC-TotalCO}_2}$ 为小麦种植过程中碳固定总量（以 CO_2 -eq 计，单位为万 t，下同）； $C_{\text{SOC-Fer}_N}$ 为施用氮肥引起的碳固定量； $C_{\text{SOC-straw}}$ 为秸秆还田引起的碳固定量； E_{Fer_N} 和 E_{Straw} 分别表示施氮固碳系数及秸秆还田固碳系数；Straw 表示秸秆还田量。

$$\text{NCE}_{\text{TotalCO}_2} = CE_{\text{TotalCO}_2} - CF_{\text{SOC-TotalCO}_2} \quad (7)$$

$$\text{SCF} = \frac{\text{NCE}_{\text{TotalCO}_2}}{\text{SA}} \quad (8)$$

$$\text{YCF} = \frac{\text{NCE}_{\text{TotalCO}_2}}{Y} \quad (9)$$

式中， $\text{NCE}_{\text{TotalCO}_2}$ 为小麦种植过程中的净碳排放量，即碳足迹（以 CO_2 -eq 计，单位为万 t）；SA 为小麦播种面积（ hm^2 ），SCF 为单位面积碳足迹（ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）；Y 为小麦产量（t）；YCF 为单位产量碳足迹（ $\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$ ）。

1.4 氮足迹计算方法

江苏省小麦种植过程中产生的活性氮排放总

量计算公式如下:

$$\text{SNF} = \text{NF}_{\text{input}} + \text{NF}_{\text{N}_2\text{O}} + \text{NF}_{\text{NH}_3} + \text{NF}_{\text{NO}_3^-} + \text{NF}_{\text{NH}_4^+}$$
(10)

$$\text{YNF} = \frac{\text{SNF}}{Y}$$
(11)

式中,SNF 为小麦单位面积氮足迹(以 N—eq 计,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,下同); NF_{input} 、 $\text{NF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 NF_{NH_3} 、 $\text{NF}_{\text{NO}_3^-}$ 和 $\text{NF}_{\text{NH}_4^+}$ 分别表示小麦单位面积农资原材料生产、田间 N_2O 排放、田间 NH_3 挥发、 NO_3^- 淋失和 NH_4^+ 淋失过程产生的活性氮排放量; Y 为单位面积小麦产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),YNF 为单位产量氮足迹(以 N—eq 计,单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

$$\text{NF}_{\text{N}_2\text{O}} = (\text{NF}_{\text{ZN}_2\text{O}} + \text{NF}_{\text{QN}_2\text{O}} + \text{NF}_{\text{LN}_2\text{O}}) \times 0.476$$
(12)

$$\text{NF}_{\text{ZN}_2\text{O}} = N \times \text{EF}_{\text{ZN}_2\text{O}} \times \frac{44}{28}$$
(13)

$$\text{NF}_{\text{QN}_2\text{O}} = N \times \text{EF}_{\text{QN}_2\text{O}} \times \frac{44}{28} \times F_Q$$
(14)

$$\text{NF}_{\text{LN}_2\text{O}} = N \times \text{EF}_{\text{LN}_2\text{O}} \times \frac{44}{28} \times F_L$$
(15)

式中, $\text{NF}_{\text{ZN}_2\text{O}}$ 、 $\text{NF}_{\text{QN}_2\text{O}}$ 和 $\text{NF}_{\text{LN}_2\text{O}}$ 分别表示施肥造成田间 N_2O 直接排放、肥料以 NH_3 或 NO_x 等气体形式挥发造成 N_2O 间接排放以及肥料淋溶或径流损失造成的 N_2O 间接排放($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); N 为小麦种植过程中施用的纯氮量,包

括氮肥和复合肥,其中复合肥成分按照 N 、 P_2O_5 和 K_2O 各占 1/3 计算^[16]; $\text{EF}_{\text{ZN}_2\text{O}}$ 、 $\text{EF}_{\text{QN}_2\text{O}}$ 和 $\text{EF}_{\text{LN}_2\text{O}}$ 分别表示 N_2O 直接排放因子(取 0.01)、 NH_3 或 NO_x 等气体形式挥发造成 N_2O 间接排放因子(取 0.01)及肥料淋失造成的 N_2O 间接排放的排放因子(取 0.0075); F_Q 为肥料以 NH_3 或 NO_x 形式挥发的比例(取 0.1); F_L 为肥料淋溶或径流损失的比例(取 0.3)。

$$\text{NF}_{\text{NH}_3} = N \times \alpha \times \frac{17}{14} \times 0.833$$
(16)

$$\text{NF}_{\text{NO}_3^-} = N \times \beta \times \frac{62}{14} \times 0.238$$
(17)

$$\text{NF}_{\text{NH}_4^+} = N \times \gamma \times \frac{18}{14} \times 0.786$$
(18)

式中, α 、 β 和 γ 分别为小麦 NH_3 挥发系数(0.275)、 NO_3^- 淋失系数(0.606)和 NH_4^+ 淋失系数(0.190)^[17]; $\frac{17}{14}$ 、 $\frac{62}{14}$ 和 $\frac{18}{14}$ 分别表示 N 与 NH_3 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的相对分子质量之比^[18]; 0.833、0.238 和 0.786 分别表示 NH_3 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的富营养化系数。本研究使用的碳氮足迹排放系数见表 1。

1.5 数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理和绘制图表,利用 Origin 8.0 软件进行数据分析。

表 1 不同种类农资投入排放因子
Table 1 Emission factors of different types of agricultural inputs

碳排放/碳固定来源 Carbon emissions/ carbon fixed sources	单位 Unit	碳排放系数(以 CO_2 -eq 计) Carbon emission factor	氮排放系数(以 N-eq 计) Nitrogen emission coefficient	数据来源 Data source
种子 Seed	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.58	0.012 4	IPCC
氮肥 Nitrogen fertilizer	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.53	0.010 3	CLCD 0.8
磷肥 Phosphate fertilizer	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.63	0.005 69	CLCD 0.8
钾肥 Potassium fertilizer	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.65	0.000 633	CLCD 0.8
复合肥 Compound fertilizer	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.77	0.004 07	CLCD 0.8
农药 Pesticide	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	12.44	0.044 3	IPCC
柴油 Diesel	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.10	0.000 678	IPCC
灌溉用电 Irrigation electricity	$\text{kg} \cdot \text{KW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	1.23	0.000 958	CLCD 0.8
施用氮肥固碳 Applying nitrogen fertilizer to fix carbon		固碳模型 Carbon sequestration		文献 ^[19]
秸秆还田固碳 Returning straw to the field for carbon sequestration		固碳模型 Carbon sequestration		文献 ^[19]
N_2O 排放 N_2O emission		N_2O 排放和 NH_3 挥发损失模型 N_2O emission and NH_3 volatilization loss model		文献 ^[20]

2 结果与分析

2.1 小麦播种面积与产量

从统计结果(图2)看,2014—2023年,江苏省小麦播种面积、单产和总产年均值分别为 $231.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $5\,510.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1\,277.14 \times 10^4 \text{ t}$;小麦播种面积整体上呈增加趋势,单产和总产在2016年后逐渐增加并趋于稳定。

2.2 小麦生产成本

2014—2023年间,江苏省小麦生产单位面积成本均值为 $6\,546.54 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中机械费 $2\,169.93 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,农药费 $699.74 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,肥料费 $2\,362.08 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,种子费 $1\,314.80 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图3)。单位面积最低成本($5\,746.95 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)和最高成本($8\,143.05 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)分别出

现在2014年和2023年。江苏省小麦生产单位面积成本在2021年后呈现明显上升趋势,2023年单位面积成本较2021年增加了20.82%。农资投入成本主要为肥料(占比33.38%~40.06%)和机械(占比30.21%~35.72%),种子次之(占比18.11%~22.32%),农药最少(占比8.66%~12.33%)。江苏省小麦生产体系单位产量成本均值为 $1.19 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,机械、农药、肥料和种子折算到单位产量成本均值分别为 0.39 、 0.13 、 0.43 和 $0.24 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。10年间江苏省小麦体系单位产量成本呈波动上升趋势,最低和最高成本分别为 $1.07 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2014年)和 $1.42 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023年)。单位产量成本同样在2021年之后大幅提高,2023年的单位产量成本较2021年增加了19.65%。

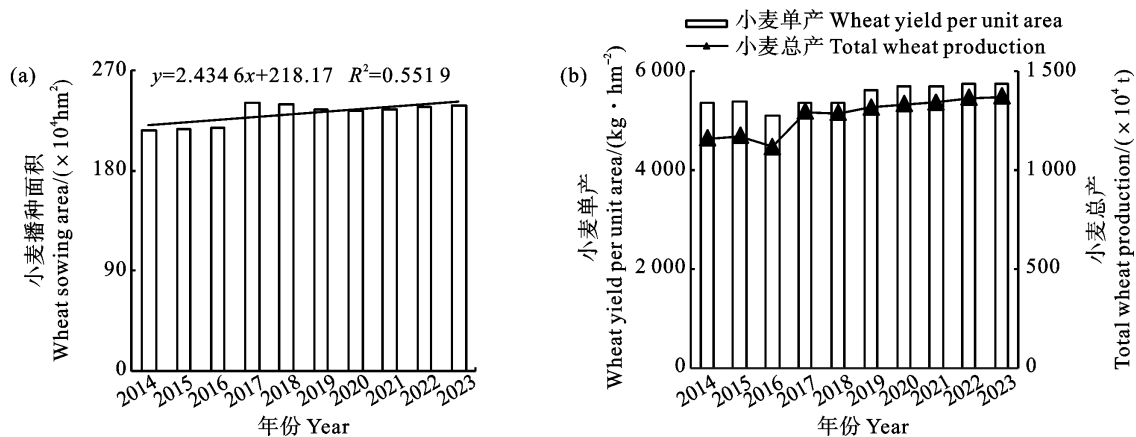


图2 2014—2023年江苏省小麦播种面积、单位面积产量和总产量

Fig. 2 Wheat sowing area, unit area yield, and total yield in Jiangsu Province from 2014 to 2023

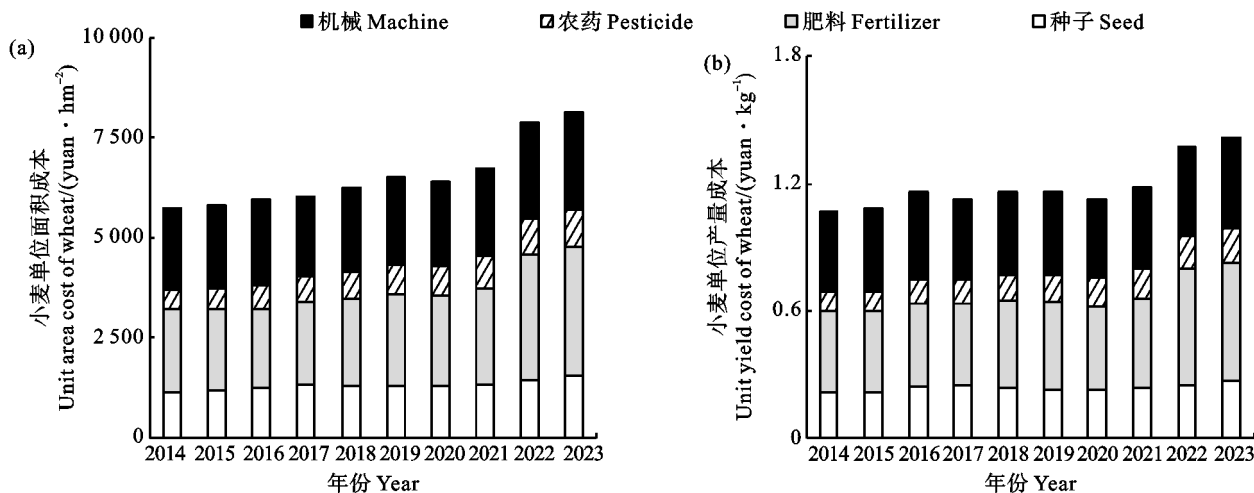


图3 2014—2023年江苏省小麦生产体系单位面积成本和单位产量成本

Fig. 3 Unit area cost and unit yield cost of wheat production system in Jiangsu Province from 2014 to 2023

2.3 小麦碳氮足迹

2014—2023 年江苏省小麦生产体系单位面积碳足迹整体呈增加趋势,变化范围为 $2.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2014 年)~ $2.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2023 年),增幅为 11.80%,均值为 $2.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4a)。单位产量碳足迹变化幅度较小,10 年间均值为 $0.46 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,最小值和最大值分别出现在 2014 年和

2016 年(图 4b)。单位面积氮足迹变化范围为 $100.42 \sim 106.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均值为 $103.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最低值和最高值分别出现在 2018 年和 2017 年(图 4c);单位产量氮足迹变化范围为 $17.91 \sim 20.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 $18.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,最低值和最高值分别出现在 2020 年和 2016 年(图 4d)。

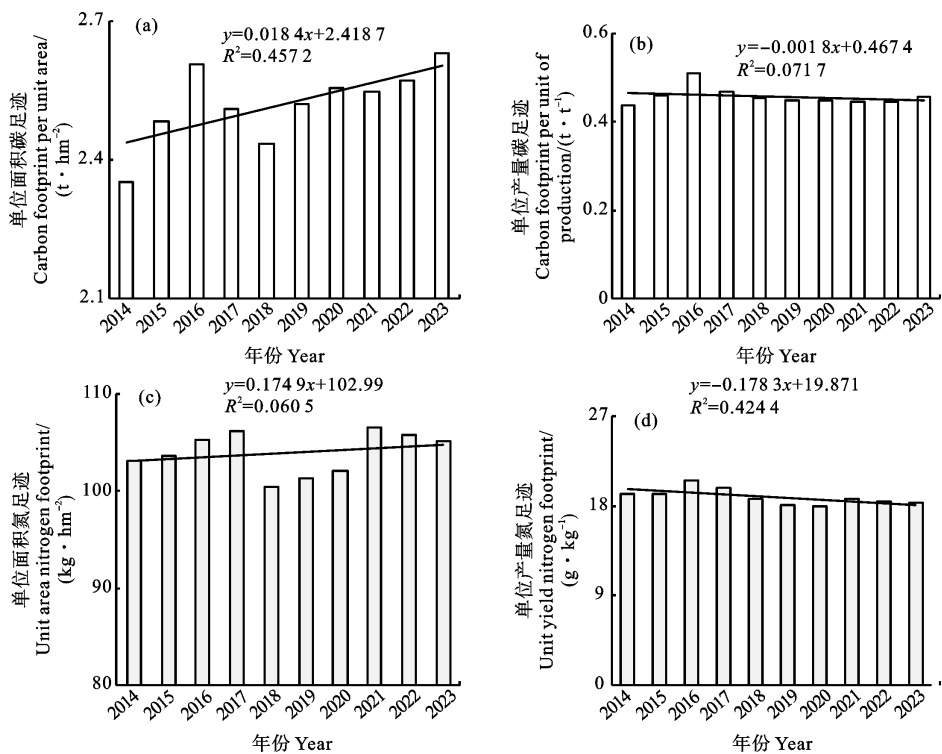


图 4 2014—2023 年江苏省小麦生产体系单位面积和单位产量的碳氮足迹
Fig. 4 Carbon and nitrogen footprint per unit area and per unit yield of wheat production system in Jiangsu Province from 2014 to 2023

2.4 小麦碳氮足迹组成

小麦碳足迹构成包括碳排放和碳固定两部分(图 5)。2014—2023 年,小麦生产体系碳排放呈上升趋势,小麦碳排放量由 635.36 万 t 增加至 777.11 万 t,增加量和增幅分别为 141.75 万 t 和 22.31%,年均增幅为 2.23%。小麦各项农资投入中碳排放量较多的是施肥(418.67 万~491.73 万 t)和柴油消耗(84.52 万~109.71 万 t),其次是灌溉(54.20 万~79.13 万 t)和农药(43.09 万~74.35 万 t),最低的是种子(34.88 万~47.17 万 t)。2014—2023 年小麦生产体系碳固定量呈增加趋势,小麦碳固定量由 127.60 万 t 增加至 149.08 万 t,增幅 16.83%。小麦固碳环节可分为秸秆固碳和施肥固碳,固碳量最大的是秸秆固碳(93.03 万~114.12 万 t),其次是施肥固碳

(31.18 万~36.25 万 t)。小麦氮足迹构成中,NH₃ 挥发阶段氮足迹(72.60 万~77.40 万 t)最大,其次是农资投入氮足迹,NH₄⁺淋失、NO₃⁻淋失和 N₂O 排放氮足迹较低。

不同农资投入对小麦生产成本的年均贡献率大小表现为化肥(35.86%)>机械(33.36%)>种子(20.17%)>农药(10.61%)(图 6)。10 年间机械、化肥、种子和农药对碳排放的年均贡献率为 22.38%、63.70%、5.88%和 8.04%。这说明机械和化肥对小麦生产成本和碳排放的影响较大。

2.5 小麦碳氮足迹与产量的相关性分析

相关分析结果(图 7)表明,江苏省小麦生产系统的单位面积碳氮足迹与小麦单产呈正相关,单位产量碳氮足迹与小麦单产呈显著负相关。

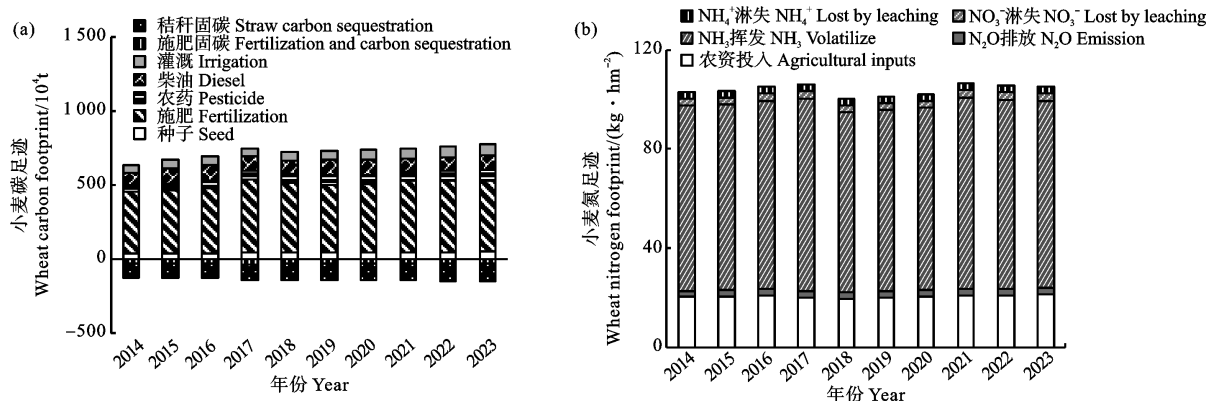


图5 江苏省小麦生产体系不同环节单位碳氮足迹占比

Fig. 5 Proportion of carbon and nitrogen footprint per unit in different stages of wheat production system in Jiangsu Province

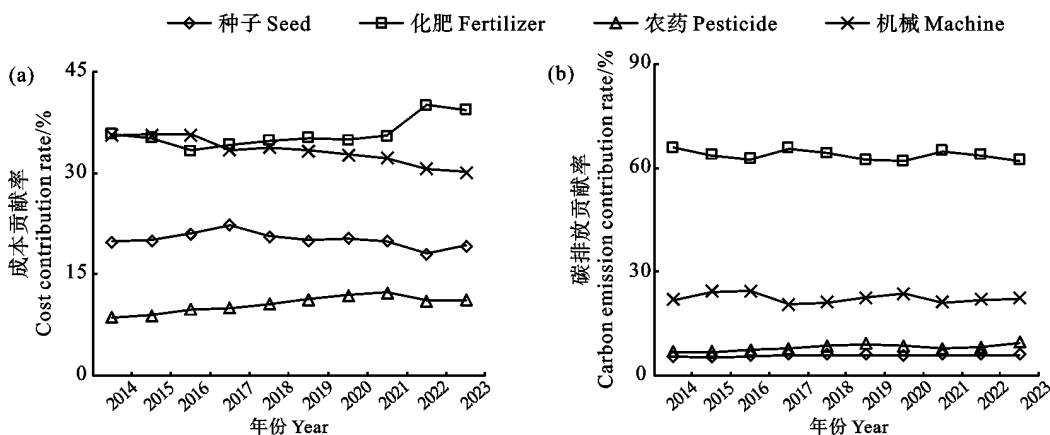


图6 农资投入对江苏省小麦生产体系成本和碳排放的贡献率

Fig. 6 Contribution rate of agricultural inputs to the cost and carbon emissions of wheat production system in Jiangsu Province

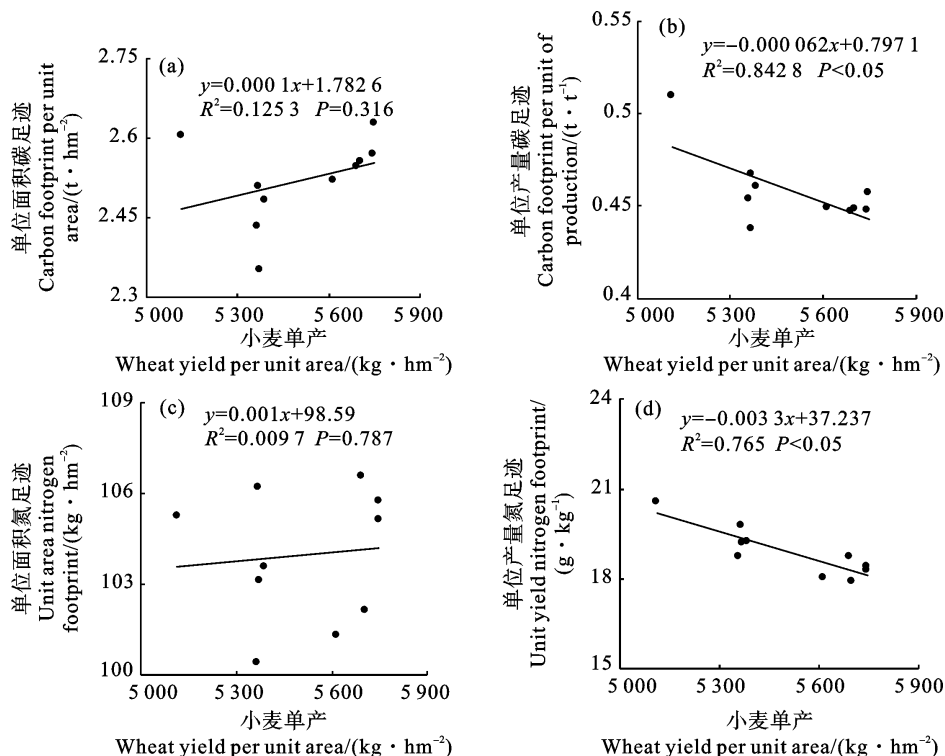


图7 江苏省小麦生产体系碳氮足迹与产量的关系

Fig. 7 Relationship between carbon and nitrogen footprint and yield of wheat production system in Jiangsu Province

3 讨论

3.1 江苏省小麦生产体系碳氮足迹年际变化特征

本研究表明,2014—2023 年间江苏省小麦生产体系单位面积碳足迹均值为 $2.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,高于温桂香等^[21]对河南省小麦的研究结果($1.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)及史磊刚等^[22]对华北平原冬小麦的研究结果($1.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),低于张丹等^[23]对中国粮食作物的研究结果($5.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。江苏省小麦单位产量碳足迹均值为 $0.46 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,高于河南省小麦单产碳足迹均值($0.32 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$),低于江苏省1990—2020 年小麦单位产量碳足迹的均值 $0.99 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[10]。江苏省单位面积氮足迹均值为 $103.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高于河南省小麦单位面积氮足迹均值 $48.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[21],也高于中国粮食作物单位面积氮足迹均值 $100.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[23]。江苏省单位产量氮足迹均值为 $18.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于河南省小麦单位产量氮足迹均值 $7.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21],也高于中国粮食作物单位产量氮足迹均值 $18.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23]。总体而言,江苏省小麦生产体系单位面积和单位产量碳氮足迹均高于河南省,单位面积和单位产量氮足迹略高于全国水平。出现这种差异一方面可能是江苏省小麦种植化肥投入量大,同时机械化程度高造成柴油消耗大,另一方面可能与不同研究采用不同的碳氮排放因子有关。此外,本研究表明,江苏省小麦生产体系单位面积碳氮足迹和单位产量碳氮足迹十年间整体没有下降趋势,表明江苏省小麦生产体系的温室气体排放需要及时采取有效措施进行干预,使小麦产业朝着低碳可持续发展。

3.2 江苏省小麦生产体系碳氮足迹构成

本研究中,江苏省小麦生产体系碳排放的3大主要来源是施肥、柴油消耗和灌溉耗电,2014—2023 年间化肥和机械的碳排放量占排放总量的63.70%和22.38%,这与东北地区作物生产碳足迹组成的研究结果一致^[11]。2014—2023 年间,化肥一直是碳排放第一大来源,表明降低小麦生产碳足迹需从化肥的生产施用等各环节进行优化,降低化肥用量,从而减少化肥环节的碳排放。机械环节包括柴油消耗和灌溉电力耗能,降低机械柴油消耗是抑制碳排放的关键因素。在氮足迹组成中, NH_3 挥发是活性氮排放的主要来源,因此

减少 NH_3 挥发是降低小麦生产氮足迹的重要途径,有效降低活性氮对生态环境负荷,也能提高土壤对氮素的蓄持能力^[24]。

3.3 江苏省小麦生产碳氮减排策略分析

从本研究结果可以看出,江苏省小麦生产体系碳氮排放仍未呈现明显下降趋势,但在产量潜力、秸秆资源利用、节能减排和降本增效等方面仍有较大上升空间。为实现江苏省小麦生产的绿色低碳可持续发展,从降低不同环节碳氮排放和增加碳氮固定的角度,提出减少江苏省小麦生产体系碳氮足迹的减排措施:(1)在小麦生育期需水量较多的淮北麦区探索节水灌溉技术,提高灌溉效率,减少电力用量,降低灌溉环节碳足迹^[25];研发小麦高产品种,提高小麦产量;研发低碳环保农药种类,从而从农药原材料上游减少碳氮排放。(2)通过政策引导,采用托管种植或土地租赁等方式,整合小面积农户,实现家庭农场或村集体组织规模化种植,提高机械化作业规模。完善农用机械作业服务体系,从小麦播种到收获实现机械化生产,有效降低机械燃油成本。推广节能低碳农业机械设备及新能源技术,改进农业机械结构,减少柴油消耗和碳氮排放^[26]。(3)持续推进化肥减量增效,加大推广有机肥替代化肥、水肥一体化、测土配方和研发新型肥料产品降低碳氮排放^[27]。同时,通过施用控释氮肥、脲酶抑制剂、硝化抑制剂来降低氮素损失,并运用秸秆等有机物料改良土壤结构,增加养分蓄持能力,提高肥料利用率,从而降低碳氮足迹。(4)大力推广秸秆还田技术,有效利用秸秆中的矿物质元素,增加固碳能力。

3.4 本研究不足和展望

本研究利用生命周期评价法,定量计算分析了2014—2023 年十年间江苏省小麦生产体系的碳氮足迹组成、变化趋势和不同环节成本投入贡献率,但仍存在一定的不确定性和局限性。首先,本研究采用的大部分数据来源于《全国农产品成本收益汇编》、《江苏省统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》及国家统计局官方网站公布的数据,由于采用的是统计数据,必然存在一定误差,造成碳氮足迹计算结果与小麦生产体系实际碳氮排放总量有一定偏差。其次,不同学者研究采用的碳氮排放系数不同导致计算得出的碳氮足迹结果不同,增加了碳氮排放数据的不确定性。最后,不同学者利用生命周期法进行碳氮足迹核算时,系统边界的界定往往会根据研究主旨而划定不同的范围,

从而影响碳氮足迹结果。在以后的碳氮足迹研究中,应该结合原位监测数据增加数据可靠性、合理界定系统核算边界促进研究规范性以及对碳氮排放系数统一标准提升结果准确性,进而完善评估准则,让研究结果为农业可持续发展更好地提供科学支撑。

4 结论

2014—2023年,江苏省小麦生产成本主要来源于肥料费和机械费,可以通过优化农艺措施降低肥料施用量和机械燃油耗能,降低小麦生产成本;江苏省小麦种植单位面积碳足迹从 $2.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 缓慢增加到 $2.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,单位产量碳足迹、单位面积和单位产量氮足迹没有明显变化;施肥、机械柴油消耗和灌溉电力耗能是主要的碳氮排放源。因此,降低江苏省小麦种植体系碳氮足迹可以从合理肥料运筹提高肥料利用率、规模化种植提升机械化生产效率、减少农资投入品上游生产环节碳氮排放及提升淮北麦区灌溉效率等方面着手,制定合理减碳降排计划,有效降低碳氮排放,实现江苏小麦产业绿色生态可持续发展。

参考文献:

- [1] 胡景心,沙青娥,刘慧琳,等.珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素[J].环境科学,2023,44(12):6643.
HU J X, SHA Q E, LIU H L, *et al.* Evolution characteristics and driving forces of carbon dioxide emissions and sinks in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6643.
- [2] LIANG D J, LU X, ZHUANG M H, *et al.* China's greenhouse gas emissions for cropping systems from 1978—2016 [J]. *Scientific Data*, 2021, 8: 171.
- [3] 张俊彪,何可.“双碳”目标下的农业低碳发展研究:现状、误区与前瞻[J].农业经济问题,2022(9):35.
ZHANG J B, HE K. Current situation, misunderstandings and prospects of agricultural low-carbon development under the targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022(9): 35.
- [4] 石敏俊,王妍,张卓颖,等.中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J].地理学报,2012,67(10):1327.
SHI M J, WANG Y, ZHANG Z Y, *et al.* Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1327.
- [5] 刘巽浩,徐文修,李增嘉,等.农田生态系统碳足迹法:误区、改进与应用:兼析中国集约农作碳效率[J].中国农业资源与区划,2013,34(6):1.
LIU X H, XU W X, LI Z J, *et al.* The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's intensive farming [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(6): 1.
- [6] 王占彪,王猛,陈阜.华北平原作物生产碳足迹分析[J].中国农业科学,2015(1):83.
WANG Z B, WANG M, CHEN F. Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015(1): 83.
- [7] 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.
- [8] 王钰乔,濮超,赵鑫,等.中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势[J].资源科学,2018,40(9):1800.
WANG Y Q, PU C, ZHAO X, *et al.* Historical dynamics and future trends of carbon footprint of wheat and maize in China [J]. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1800.
- [9] 李春喜,骆婷婷,闫广轩,等.河南省不同生态区小麦-玉米两熟制农田碳足迹分析[J].生态环境学报,2020,29(5):918.
LI C X, LUO T T, YANG G X, *et al.* Carbon footprint analysis of wheat-maize double cropping system in different ecological regions of Henan Province [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, 29(5): 918.
- [10] 张传红,韩露,谢佳男,等.江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究[J].南京信息工程大学学报,2022,14(1):110.
ZHANG C H, HAN L, XIE J N, *et al.* Carbon footprint dynamics and composition assessment of major crops production in Jiangsu Province [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2022, 14(1): 110.
- [11] 侯相成,李涵,董思奇,等.东北地区玉米种植系统碳足迹及氮足迹研究[J].吉林农业大学学报,2024,46(5):911.
HOU X C, LI H, DONG S Q, *et al.* Carbon footprint and nitrogen footprint of maize planting system in Northeast China [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2024, 46(5): 911.
- [12] 山楠,肖广敏,串丽敏,等.河北省农作物生产投入品碳排放变化特征[J].中国农业气象,2023,44(2):96.
SHAN N, XIAO G M, CHUAN L M, *et al.* Dynamics change of carbon emission from crops production inputs in Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(2): 96.
- [13] 张海霞,武晓琪,蔡昂祖,等.近十年邯郸市冬小麦生产氮足迹时空变化特征分析[J].麦类作物学报,2022,42(4):473.
ZHANG H X, WU X Q, CAI A Z, *et al.* Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes of nitrogen footprint of winter wheat production in Handan City in recent ten years [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(4): 473.
- [14] 肖广敏,茹淑华,侯利敏,等.河北省小麦玉米生产体系碳足迹分析[J].生态与农村环境学报,2022,38(11):1388.
XIAO G M, RU S H, HOU L M, *et al.* Carbon footprint analysis of wheat-maize production system in Hebei Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38

- (11):1388.
- [15] WANG X L, CHEN Y Q, SUI P, *et al.* Preliminary analysis on economic and environmental consequences of grain production on different farm sizes in North China Plain [J]. *Agricultural Systems*, 2017, 153:181.
- [16] 郑秀兴, 王 莹. 我国复合肥料产业发展现状与趋势[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(11):1.
- ZHENG X X, WANG Y. Development status and trend of compound fertilizer industry in China [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2020, 35(11):1.
- [17] CHEN Z D, XU C C, JI L, *et al.* Effects of multi-cropping system on temporal and spatial distribution of carbon and nitrogen footprint of major crops in China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22:e00895.
- [18] 陈中督, 徐春春, 纪 龙, 等. 基于农户调查的长江流域双季稻生产碳、氮足迹分析:以江西和湖南为例[J]. 作物杂志, 2023(2):229.
- CHEN Z D, XU C C, JI L, *et al.* Carbon and nitrogen footprints of double rice production in Yangtze River based on farm survey data: A case study of Jiangxi and Hunan [J]. *Crops*, 2023(2):229.
- [19] LU F, WANG X K, HAN B, *et al.* Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2):281.
- [20] CUI Z L, WANG G L, YUE S C, *et al.* Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(10):5780.
- [21] 温桂香, 姚金哲, 韩 晴, 等. 河南省小麦玉米生产体系碳氮足迹时空变化特征及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2025, 46(2):1002.
- WEN G X, YAO J Z, HAN Q, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics and driving factors of carbon and nitrogen footprint in wheat and maize production systems in Henan Province [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2):1002.
- [22] 史磊刚, 陈 阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9):93.
- SHI L G, CHEN F, KONG F L, *et al.* The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on North China Plain [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(9):93.
- [23] 张 丹. 中国粮食作物碳足迹及减排对策分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- ZHANG D. Analysis on carbon footprint of grain crops and countermeasures of emission reduction in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [24] 陈绪昊, 高 强, 陈新平, 等. 东北三省玉米生产资源投入和环境效应的时空特征[J]. 中国农业科学, 2022, 55(16):3170.
- CHEN X H, GAO Q, CHEN X P, *et al.* Temporal and spatial characteristics of resources input and environmental effects for maize production in the three provinces of north-east China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(16):3170.
- [25] 徐国伟, 赵喜辉, 江孟孟, 等. 轻度干湿交替灌溉协调水稻根冠生长、提高产量及氮肥利用效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8):1388.
- XU G W, ZHAO X H, JIANG M M, *et al.* Alternate wetting and moderate drying irrigation harmonize rice root and shoot growth, improves grain yield and nitrogen use efficiency [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8):1388.
- [26] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9):1.
- DU Y F, FU S H, MAO E R, *et al.* Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9):1.
- [27] 李 慧, 代新俊. 山西省小麦种植体系活性氮排放及碳足迹对化肥施用的响应[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(15):45.
- LI H, DAI X J. The response of active nitrogen emissions and carbon footprint of wheat planting system in Shanxi Province to fertilizer application [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(15):45.