

DOI: 10.12357/cjea.20240193

CSTR: 32371.14.cjea.20240193

陈坚, 吴柳格, 张鑫, 邓艾兴, 宋振伟, 张卫建, 郑成岩. 黄淮海地区不同种植模式作物产量和温室气体排放特征及其差异[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(3): 508–519

CHEN J, WU L G, ZHANG X, DENG A X, SONG Z W, ZHANG W J, ZHENG C Y. Characteristics and differences of crop yield and greenhouse gas emissions under different cropping systems in the Huang-Huai-Hai Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(3): 508–519

黄淮海地区不同种植模式作物产量和温室气体排放特征及其差异*

陈 坚, 吴柳格, 张 鑫, 邓艾兴, 宋振伟, 张卫建, 郑成岩**

(中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室 北京 100081)

摘 要: 气候变化导致极端天气频发, 严重影响作物可持续生产。解析不同种植模式下作物产量和农田温室气体排放特征, 可为黄淮海地区构建作物丰产和低碳排放的气候韧性种植模式提供理论依据。本研究于 2015—2020 年在中国农业科学院作物科学研究所新乡试验基地开展, 设置 5 种不同种植模式, 分别为单季冬小麦 (W)、单季夏大豆 (S)、单季夏玉米 (M)、冬小麦-夏大豆一年两熟 (W-S) 和冬小麦-夏玉米一年两熟 (W-M)。结果表明: W-M 模式周年玉米当量产量、能量产量和经济效益均显著高于 W、S、M 和 W-S 模式; W-S 模式的 N_2O 累积排放量、直接温室气体排放量和单位播种面积碳足迹分别比 W-M 模式降低 10.7%、11.1% 和 4.7%; 3 种作物的氮素积累量表现为大豆>小麦>玉米, 玉米的氮肥偏生产力最高。综上, 冬小麦-夏玉米一年两熟模式可获得最高的作物产量、能量产量和经济效益, 在以产量和经济效益为目标的作物生产中, 冬小麦-夏玉米模式是较好的种植模式, 但其温室气体排放也最高, 后续应深入研究该种植模式的碳减排技术, 以达到丰产和低碳排放协同。

关键词: 产量; 温室气体; 种植模式; 经济效益; 碳足迹

中图分类号: S344

Characteristics and differences of crop yield and greenhouse gas emissions under different cropping systems in the Huang-Huai-Hai Region*

CHEN Jian, WU Liuge, ZHANG Xin, DENG Aixing, SONG Zhenwei, ZHANG Weijian, ZHENG Chengyan**

(Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: Climate change has increasingly triggered extreme weather events, leading to significant adverse effects on crop production and posing challenges to the sustainability of agricultural systems. This study investigated the effects of different cropping systems on crop yields and greenhouse gases (GHG) emissions in the Huang-Huai-Hai Region to provide a scientific basis for constructing climate-resilient, high-yield, and low-carbon cropping systems in this region. The field experiments were conducted between 2015 and 2020 at the Xinxiang Experimental Base of the Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Five distinct cropping systems were established: single-cropping system of winter wheat (W), single-cropping system of summer maize

* 国家自然科学基金项目 (32272218)、中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ZDRW202407, 01-ICS-20) 和国家现代农业产业技术体系建设专项项目 (CARS-22) 资助

** 通信作者: 郑成岩, 主要研究方向为作物耕作与农田生态。E-mail: zhengchengyan@caas.cn

陈坚, 主要研究方向为作物耕作与农田生态。E-mail: 18811739285@163.com

收稿日期: 2024-04-13 接受日期: 2024-09-06

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (32272218), the Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ZDRW202407, 01-ICS-20) and the Modern Agro-industry Technology Research System of China (CARS-22).

** Corresponding author, E-mail: zhengchengyan@caas.cn

Received Apr. 13, 2024; accepted Sep. 6, 2024

(M), single-cropping system of summer soybean (S), double-cropping system of winter wheat-summer soybean (W-S), and double cropping system of winter wheat-summer maize (W-M). This study comprehensively analyzed crop yield under the five cropping systems over six years and calculated the output value and economic benefit associated with each system. Additionally, from 2017 to 2019, we monitored soil GHG emissions, measured crop nitrogen accumulation, and calculated the partial factor productivity of nitrogen. The carbon footprint of each cropping system was assessed. The results revealed that the W-M cropping system consistently outperformed the other systems regarding annual maize equivalent yield, energy output, and economic benefit. This system demonstrated superior productivity, making it a highly effective system for achieving high yield and maximizing economic return. However, the W-M cropping system also exhibited the highest GHG emissions, indicating a potential trade-off between yield and environmental sustainability. In contrast, the W-S cropping system reduced cumulative N_2O emissions, direct GHG emissions, and carbon footprint per unit sown area by 10.7%, 11.1%, and 4.7%, respectively, compared with the W-M cropping system. This reduction highlighted the GHG mitigation potential of the W-S cropping system with a relatively high yield. Moreover, the nitrogen accumulation of the three crops from high to low was soybean>wheat>maize. However, despite the lower nitrogen accumulation in maize, it exhibited the highest partial factor productivity of nitrogen. In conclusion, although the W-M cropping system emerged as the most effective system for maximizing crop yield and economic benefit, it also presents environmental challenges owing to its higher GHG emissions. Therefore, further research is essential to develop carbon emission-reduction techniques for the W-M cropping system, with the aim of balancing high yield and low carbon emissions. This study provides critical insights into the trade-offs and synergies between crop productivity and environmental sustainability under different cropping systems, offering valuable guidance for the development of climate-resilient agricultural practices in the Huang-Huai-Hai Region and similar agroecological regions.

Keywords: yield; greenhouse gases; cropping system; economic benefits; carbon footprint

黄淮海地区是我国重要的粮食产区,长期采用冬小麦 (*Triticum aestivum* L.)-夏玉米 (*Zea mays* L.) 一年两熟的种植模式,该地区小麦和玉米产量分别占全国的 50% 和 40% 左右,为保障我国粮食安全,稳定经济社会发展做出了重要贡献^[1]。受全球气候变化的影响,黄淮海粮食产区极端天气频发^[2],不仅直接影响作物生长发育和产量形成,也对作物布局及种植制度产生了重大影响。黄淮海地区冬小麦-夏玉米种植模式依赖于大量化肥、灌溉用水等资源的投入,造成了很多环境问题,如地下水超采^[3]、温室气体排放增加^[4],其中 CH_4 和 N_2O (非 CO_2 的温室气体) 对全球变暖的贡献分别占 16% 和 7% 以上^[5],旱地 N_2O 排放是农田温室气体主要排放源之一^[6],因此在提高作物生产力和经济效益的同时,也需要减少农业生产对环境造成的负担^[7-8]。本研究对黄淮海地区不同种植模式的产量和温室气体排放差异进行研究,探索并选择适宜的种植模式,对保障我国粮食安全,助力“双碳”目标实现具有重要意义。

优化种植模式是作物增产和农田温室气体减排的重要途径。针对黄淮海区域不同种植模式对作物产量的影响,不同学者已经开展了较多研究。郑孟静等^[9]分析了华北平原基于麦玉轮作的粮薯、粮豆种植模式的周年当量产量差异,结果表明,与麦玉模式相比,粮薯模式的周年当量产量平均增加 29.1%,而粮豆模式的周年当量产量平均降低 6.0%;基于 APSIM (Agricultural Production System Simulator) 模型,有学者对华北平原 1980—2014 年不同种植模式

产量进行了评估,发现冬小麦-夏玉米种植模式平均产量高于冬小麦-夏玉米-早播玉米种植模式^[10];也有研究发现,海河平原冬小麦-夏玉米一年两熟的种植模式产量最高,但总耗水量也最高,水分利用效率低于春玉米-冬小麦-夏玉米两年三熟和春玉米-夏玉米一年两熟种植模式^[11]。有研究发现,优化作物轮作方式可以在不牺牲产量的情况下减少温室气体排放^[12-13],也有研究对 5 种轮作系统的生产力和碳足迹进行了评价,结果发现,2 年轮作制度可以减少碳足迹,在冬小麦-夏玉米轮作中引入春花生 (*Arachis hypogaea* L.) 可以同时提高系统生产力和经济效益^[14]。总体来看,前人研究主要关注不同轮作种植模式下的作物产量和资源利用效率等方面的差异,而对不同种植模式的周年产量、资源利用效率、经济效益和农田温室气体排放的综合研究鲜见报道。

本研究以黄淮海区域典型的小麦、玉米和大豆 [*Glycine max* (L.) Merr.] 3 种作物为研究对象,探究不同种植模式下作物产量和氮素利用效率等差异;基于周年温室气体排放监测,定量评估不同种植模式的温室气体排放效应;进一步根据生产过程中的资源投入,分析不同种植模式的经济效益和碳足迹。以上研究结果可为黄淮海区域农业生产应对气候变化过程中的种植模式优化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于中国农业科学院作物科学研究所新乡

试验基地进行(37°41'02"N, 116°37'23"E)。试验所在地属于暖温带大陆性季风气候, 区域光热资源丰富, 年均气温 14 ℃, 海拔 75 m, 无霜期 191 d, 全年 ≥ 10 ℃ 积温 4 700 ℃, 年均降水量 560.6 mm, 并且多在 7 月和 8 月, 年日照时数达 2 323.9 h, 能够充分满足小麦-玉米和小麦-大豆轮作种植模式。试验田土壤类型为褐潮土, 试验开始前耕层有机质 $8.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $93.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $22.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $158.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验从 2015 年开始, 至 2020 年结束, 采用随机区组设计的方法, 设置 5 个种植模式, 分别为单季冬小麦(W)、单季夏玉米(M)、单季夏大豆(S)、冬小麦-夏大豆一年两熟(W-S)和冬小麦-夏玉米一年两熟(W-M), 每个种植模式重复 3 次。冬小麦均在每年 10 月播种, 6 月初收获; 夏季作物为大豆或玉米, 在 6 月初播种, 10 月初收获。小麦、玉米和大豆 3 种作物的播种及施肥管理措施参照当地作物常规生产方式: 小麦播种量为 $172.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 玉米播种行距为 60 cm, 株距为 25 cm; 大豆行距为 40 cm, 株距为 10 cm; 小麦、玉米和大豆均施用 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的配方肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15), 肥料均作为底肥施入土壤。所有种植模式的田间灌溉及病虫害防控均与当地常规高产田一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质及产量测定

冬小麦成熟期, 各小区选连续 20 株小麦, 按照不同部位分开, 80 ℃ 烘干至恒重, 测定植株地上部干物质质量。从小区选取 1 m 5 行小麦收获测产, 自然风干后脱粒, 测定籽粒含水量, 按照 13% 含水量计算产量。

玉米成熟期, 取连续 3 株玉米, 按照不同部位分开, 80 ℃ 烘干至恒重, 测定植株地上部干物质质量。连续收获 5 m 2 行玉米测产, 自然风干后脱粒, 测定籽粒含水量, 按照 14% 含水量计算产量。

大豆成熟期, 取连续 10 株大豆, 按照不同部位分开, 80 ℃ 烘干至恒重, 测定植株地上部干物质质量。同时取 1 m 4 行进行测产, 自然风干后脱粒, 测定籽粒含水量, 按照 13% 含水量计算产量。

为了对不同种植模式的作物产量进行比较, 将单个作物产量按照作物籽粒的经济价值折算为玉米当量产量进行分析, 计算公式如下^[14]:

$$\text{MEEY} = Y_g \times (P_x / P_M) \quad (1)$$

式中: MEEY 为作物的玉米当量产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_g 为作物籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); P_x 为作物价格 ($\text{¥} \cdot \text{kg}^{-1}$); P_M 为玉米价格 ($\text{¥} \cdot \text{kg}^{-1}$)。2015—2020 年间, 小麦、玉米和大豆的平均价格分别为 2.15、1.71 和 $3.49 \text{ ¥} \cdot \text{kg}^{-1}$ (<http://olap.epsnet.com.cn>)。

将不同作物秸秆生物量和籽粒产量折算成能量产量进行比较, 计算公式如下^[15]:

$$\text{EY} = (Y_g \times E_g + Y_s \times E_s) \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: EY 为作物能量产量 ($\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_g 和 Y_s 分别为作物籽粒产量和秸秆生物量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); E_g 和 E_s 分别为作物籽粒和秸秆热值 ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。小麦和玉米的籽粒热值均为 $16.3 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秸秆热值均为 $14.6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大豆的籽粒和秸秆热值分别为 $20.9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $15.1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16]。

1.3.2 氮素积累量及氮肥偏生产力

将植株各部位粉碎后, 采用半微量凯氏定氮法测定植株各器官氮含量, 并根据相对应的干物质量计算植株各器官的氮积累量, 根据作物籽粒产量计算氮肥偏生产力^[17]:

$$\text{ANA} = N_g + N_s \quad (3)$$

$$\text{PFPN} = Y_g / F \quad (4)$$

式中: ANA 为作物地上部氮素积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); N_g 和 N_s 分别为作物籽粒和秸秆的氮素积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); PFPN 为作物氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); F 为施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 经济效益

不同种植模式的经济效益为总收入减去总投入。总投入包括种子、肥料、灌溉、机械、农药和人工, 这些投入均通过作物生产期间的记录得到, 根据试验期间当地市场平均价格, 计算所有生产的投入(表 1)。

1.3.4 田间直接温室气体排放

2017 年 6 月—2019 年 6 月监测了不同种植模式农田温室气体排放。温室气体采样装置由不透明聚氯乙烯塑料制成, 包括箱体(长 30 cm×宽 15 cm×高 30 cm)和矩形底座(长 30 cm×宽 15 cm×高 10 cm)两部分。作物播种后, 每个小区随机选取平整均匀的地块, 保持静态箱矩形底座长边与播种行平行, 底座固定在两行作物的行间, 深度为 10 cm, 整个生育期内保持底座位置不变。底座顶端留有水槽, 取样时在水槽中注水并与箱体底部嵌合, 以保证气箱内部形成密闭环境。取样前准备抽好真空的 50 mL 密封

表 1 农田生产投入成本
Table 1 Input cost to farm production

¥·hm⁻²

生产投入 Production input	W	S	M	W-S	W-M
种子 Seed	774	420	1 080	1 194	1 854
复合肥 Fertilizer	3 525	3 525	3 525	7 050	7 050
灌溉 Irrigation	675	225	225	900	900
机械 Machinery	1 950	1 005	1 500	2 955	3 450
农药 Pesticide	675	450	750	1 125	1 425
人工 Labor	2 100	1 950	2 400	4 050	4 500
总投入 Total input	9 699	7 575	9 480	17 274	19 179

W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize.

玻璃瓶。上午 8:00—10:00 采集气体样品。在箱体与底座密闭后的 0、10、20 和 30 min, 用塑料注射器抽取 50 mL 箱内气体样品, 注入玻璃瓶中, 同时用温度计测量气箱内部温度。气体样品中 N₂O 与 CH₄ 的浓度 (μL·L⁻¹) 采用气相色谱仪 (Agilent 7890 A, USA) 检测。温室气体排放通量计算公式如下^[18]:

$$F = \rho \times 273 / (273 + T) \times H \times dC / dt \quad (5)$$

式中: F 为温室气体 (N₂O 或 CH₄) 排放通量 (μg·m⁻²·h⁻¹); ρ 为标准大气压下待测气体密度 (kg·m⁻³); T 为气箱内平均温度 (°C); H 为气箱高度 (m); dC/dt 为气体浓度变化速率 (μL·L⁻¹·h⁻¹)。作物生育期内温室气体累积排放量计算公式如下^[19]:

$$CE = \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \right] \times 24 \quad (6)$$

$$CE_{\text{direct}} = 298 \times CE_{\text{N}_2\text{O}} + 25 \times CE_{\text{CH}_4} \quad (7)$$

式中: CE 为温室气体 (N₂O 或 CH₄) 的累积排放量 (kg·hm⁻²); n 为采样总次数; i 为第 i 次采样; $t_{i+1} - t_i$ 为两次采样的时间间隔; CE_{direct} 为整个生产过程中直接排放温室气体总量的 CO₂ 当量 (kg·hm⁻²); $CE_{\text{N}_2\text{O}}$ 和 CE_{CH_4} 分别为生产过程中 N₂O 和 CH₄ 的累积排放总量 (kg·hm⁻²); 298 和 25 分别为 100 a 时间尺度下 N₂O 和 CH₄ 对应的增温潜势值。

1.3.5 碳足迹核算

碳足迹是应对气候变化、定量评价碳排放强度的计量手段, 指某个产品在其生长周期或生产过程中直接和间接排放的温室气体; 直接排放指农田 CH₄ 和 N₂O 的排放, 间接排放指由种子、农药、化肥等农资投入及机械、灌溉和人工等生产资料投入引起的温室气体排放^[20]。本研究基于单位播种面积、单位玉米当量产量和单位能量产量评估 2017—2019 年碳足迹, 计算公式如下^[15,21]:

$$CE_{\text{indirect}} = \sum_{i=1}^n Q_i \times M_i \quad (8)$$

$$CF_A = CE_{\text{direct}} + CE_{\text{indirect}} \quad (9)$$

$$CF_{\text{MEEY}} = CF_A / \text{MEEY} \quad (10)$$

$$CF_{\text{EY}} = CF_A / \text{EY} \quad (11)$$

式中: CE_{indirect} 为生产过程中农资投入造成的间接温室气体排放, 以 CO₂-eq 计 (kg·hm⁻²); Q_i 为生产过程中单位播种面积农资 i 的消耗量 (详见电子版资源附件 <http://www.ecoagri.ac.cn/article/doi/10.12357/cjea.20240193>); M_i 为农资 i 的温室气体排放系数 (表 2); CF_A 为作物生产的单位播种面积碳足迹, 以 CO₂-eq 计 (kg·hm⁻²); CF_{MEEY} 为作物生产的单位玉米当量产量碳足迹, 以 CO₂-eq 计 (kg·hm⁻²); MEEY 为玉米当量产量 (kg·hm⁻²); CF_{EY} 为作物生产的单位能量产量碳足迹, 以 CO₂-eq 计 (kg·hm⁻²); EY 为能量产量 (MJ·hm⁻²)。根据农田实际投入, 计算生产过程中不同种植模式间接温室气体排放, 计算结果如表 3 所示。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 对试验数据进行处理, 采用 OriginPro 2023 作图, 采用

表 2 生产资料的温室气体排放系数
Table 2 Greenhouse gas emission factor of input items

投入项 Input item	温室气体排放系数 (以 CO ₂ -eq 计) Greenhouse gas emission factor (based on CO ₂ -eq)	数据来源 Data source
复合肥 Compound fertilizer	1.77 kg·kg ⁻¹	[22]
农药 Pesticide	6.58 kg·kg ⁻¹	[14]
灌溉电力 Electricity for irrigation	0.92 kg·kWh ⁻¹	[14]
柴油 Diesel fuel	3.32 kg·kg ⁻¹	[14]
小麦种子 Wheat seed	1.16 kg·kg ⁻¹	[14]
玉米种子 Maize seed	1.22 kg·kg ⁻¹	[14]
大豆种子 Soybean seed	0.25 kg·kg ⁻¹	[14]
人工 Labor	0.86 kg·d ⁻¹	[14]

表 3 生产过程中不同种植模式间接温室气体排放量 (以 CO₂-eq 计)Table 3 Indirect greenhouse gas emissions under different cropping systems during the production process (based on CO₂-eq) kg·hm⁻²

模式 System	投入 Input						CE _{indirect}
	复合肥 Compound fertilizer	农药 Pesticide	电力 Electricity	柴油 Diesel fuel	种子 Seed	人工 Labor	
W	1 327.50	29.61	349.14	185.92	200.10	22.58	2 114.85
S	1 327.50	19.74	116.38	99.60	15.00	20.96	1 599.18
M	1 327.50	32.90	116.38	166.00	36.60	25.80	1 705.18
W-S	2 655.00	49.35	465.52	285.52	215.10	43.54	3 714.03
W-M	2 655.00	62.51	465.52	351.92	236.70	46.76	3 818.41

W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟; CE_{indirect}: 间接温室气体总排放量。
W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize; CE_{indirect}: total indirect greenhouse gas emissions.

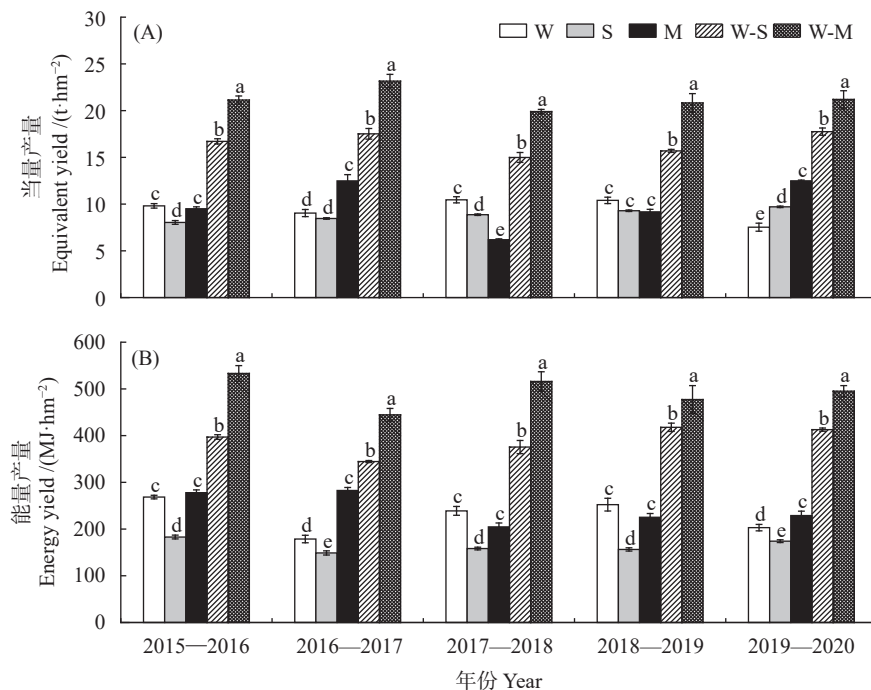
Duncan 法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式周年玉米当量产量和能量产量

由图 1A 可知, 2015—2020 年, W、S、M、W-S 和 W-M 年均周年玉米当量产量分别为 9.45、8.87、9.97、16.53 和 21.25 t·hm⁻², W-M 的周年玉米当量产量分别比 W、S、M 和 W-S 显著增加 124.9%、139.6%、113.2% 和 28.6% ($P<0.05$), W-S 的周年玉米当量产量也显著高于 W、M 和 S ($P<0.05$)。3 种单

季种植模式 (W、S 和 M) 周年玉米当量产量年际变化较大, 2016—2017 年和 2019—2020 年 M 模式显著高于 W 和 S 模式 ($P<0.05$), 而 2017—2018 年显著低于 W 和 S 模式 ($P<0.05$), 3 种单季种植模式年均周年玉米当量产量表现为 M>W>S。不同种植模式周年能量产量和玉米当量产量趋势类似 (图 1B), W、S、M、W-S 和 W-M 年均周年能量产量分别为 228.29、164.13、243.86、389.56 和 493.23 MJ·hm⁻²。2015—2020 年, W-M 模式的周年能量产量分别比 W、S、M 和 W-S 显著提高 116.1%、200.5%、102.3% 和



W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟。不同小写字母表示同一年份不同种植模式在 $P<0.05$ 水平差异显著。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize. Different lowercase letters mean significant differences among different cropping systems in the same year at $P<0.05$ level.

图 1 2015—2020 年不同种植模式周年玉米当量产量和能量产量

Fig. 1 Maize equivalent yield and energy yield under different cropping systems from 2015 to 2020

26.6% ($P<0.05$)。W-S 模式的周年能量产量也显著高于 W、S 和 M ($P<0.05$)。3 种单季种植模式周年能量产量的年际变化较大, 2016—2017 年和 2019—2020 年 M 模式显著高于 W 和 S ($P<0.05$), 而另外 3 年则表现为 S 模式显著低于 W 和 M 模式 ($P<0.05$), W 和 M 间无显著差异; 2015—2020 年, 年均周年能量产量表现为 $M>W>S$ 。本试验结果表明, W-M 种植模式可获得最高的周年玉米当量产量和能量产量。

2.2 不同种植模式对作物氮素积累量和氮肥偏生产力的影响

由表 4 可以看出, 3 种作物氮素积累量均表现为大豆>小麦>玉米。2017—2019 年, 小麦氮素积累量均表现为 $W>W-S>W-M$, W 模式的小麦年均氮素积累量分别比 W-S 和 W-M 模式增加 8.1% 和 13.1%, 但差异不显著; 玉米氮素积累量年际间变化较大, M 模式的玉米年均氮素积累量高于 W-M 模式; 从大豆年均氮素积累量来看, W-S 模式比 S 模式显著提高 25.6% ($P<0.05$)。以上表明, 大豆氮素积累能力高于小麦和玉米, 在轮作系统中增加大豆种植, 可以促进作物系统对氮素的吸收和积累。

2017—2019 年间, W 模式的小麦年均氮肥偏生产力相较于 W-S 和 W-M 模式分别显著提高 13.4%

和 6.5% ($P<0.05$); M 模式的玉米平均氮肥偏生产力比 W-M 模式显著提高 37.6% ($P<0.05$); S 模式的大豆平均氮肥偏生产力比 W-S 模式高 11.4%, 但差异不显著 (表 5)。

2.3 不同种植模式经济效益

2015—2020 年不同种植模式的年均产值和经济效益中 (图 2), 除 W 和 M 模式外, 不同种植模式间差异均显著 ($P<0.05$), 且年均产值和经济效益均表现为 $W-M>W-S>M>W>S$ 。W、S、M、W-S 和 W-M 模式每公顷年均产值分别为 1.61 万、1.05 万、1.72 万、2.83 万和 3.63 万元, W-M 模式的产值分别为 W、S、M 和 W-S 模式的 2.3、3.5、2.1 和 1.3 倍; W、S、M、W-S 和 W-M 模式每公顷平均经济效益分别为 0.64 万、0.29 万、0.77 万、1.10 万和 1.71 万元, W-M 模式的经济效益分别为 W、S、M 和 W-S 模式的 2.7、5.9、2.2 和 1.6 倍。以上表明, 一年两熟的轮作种植模式的经济效益高于单季种植模式, 其中 W-M 模式的产值和经济效益均最高。

2.4 不同种植模式温室气体排放通量变化

如图 3 所示, 2017—2019 年, 不同种植模式下 N_2O 排放通量的峰值均出现在施肥后, 峰值过后排放通量整体趋势随着时间推移逐渐减小; 2017 年和

表 4 2017—2019 年不同种植模式的作物氮素积累量
Table 4 Nitrogen accumulation under different cropping systems from 2017 to 2019 $kg \cdot hm^{-2}$

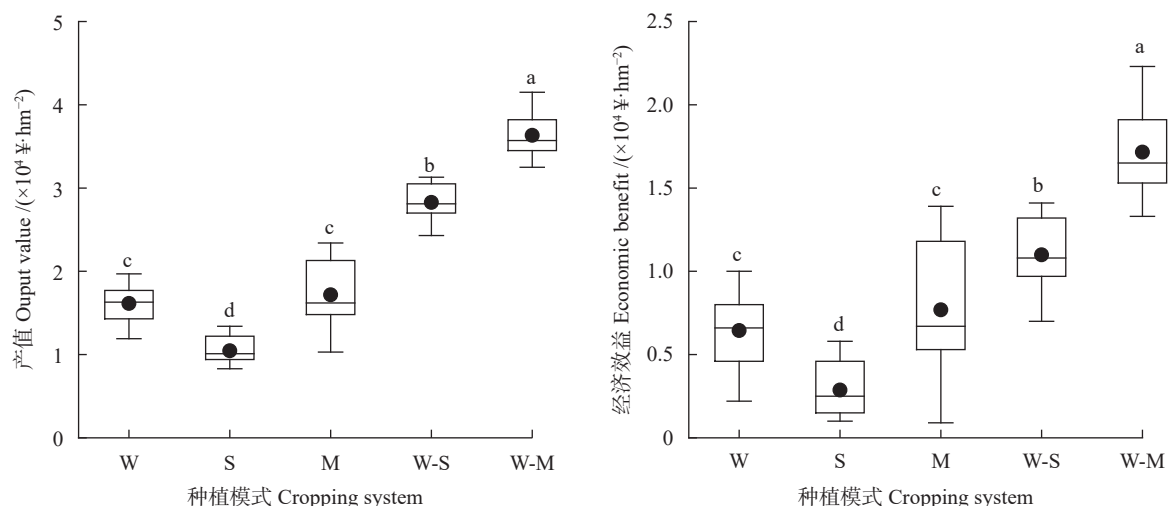
种植模式 Cropping system	2017—2018			2018—2019		
	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean
W	254.68±27.07a	—	—	231.65±14.13a	—	—
S	—	—	308.23±7.10b	—	—	329.40±22.07b
M	—	190.20±23.56a	—	—	149.33±2.60a	—
W-S	230.23±27.11a	—	358.94±22.10a	219.78±21.51a	—	441.90±33.13a
W-M	222.58±35.58a	208.99±30.87a	—	207.52±3.34a	120.22±15.07b	—

W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟。同列不同小写字母表示同一作物不同种植模式在 $P<0.05$ 水平差异显著。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different cropping systems of the same crop at $P<0.05$ level.

表 5 2017—2019 年不同种植模式下作物氮肥偏生产力
Table 5 Partial factor productivities of nitrogen of different crops under different cropping systems from 2017 to 2019 $kg \cdot kg^{-1}$

种植模式 Cropping system	2017—2018			2018—2019		
	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean
W	73.95±3.98a	—	—	73.52±4.19a	—	—
S	—	—	25.23±1.85a	—	—	28.30±2.60a
M	—	82.14±0.36a	—	—	105.79±9.32a	—
W-S	65.01±5.14b	—	22.95±1.80a	64.99±3.76b	—	25.11±3.27a
W-M	75.38±2.93a	55.07±1.32b	—	63.12±4.73b	81.53±4.21b	—

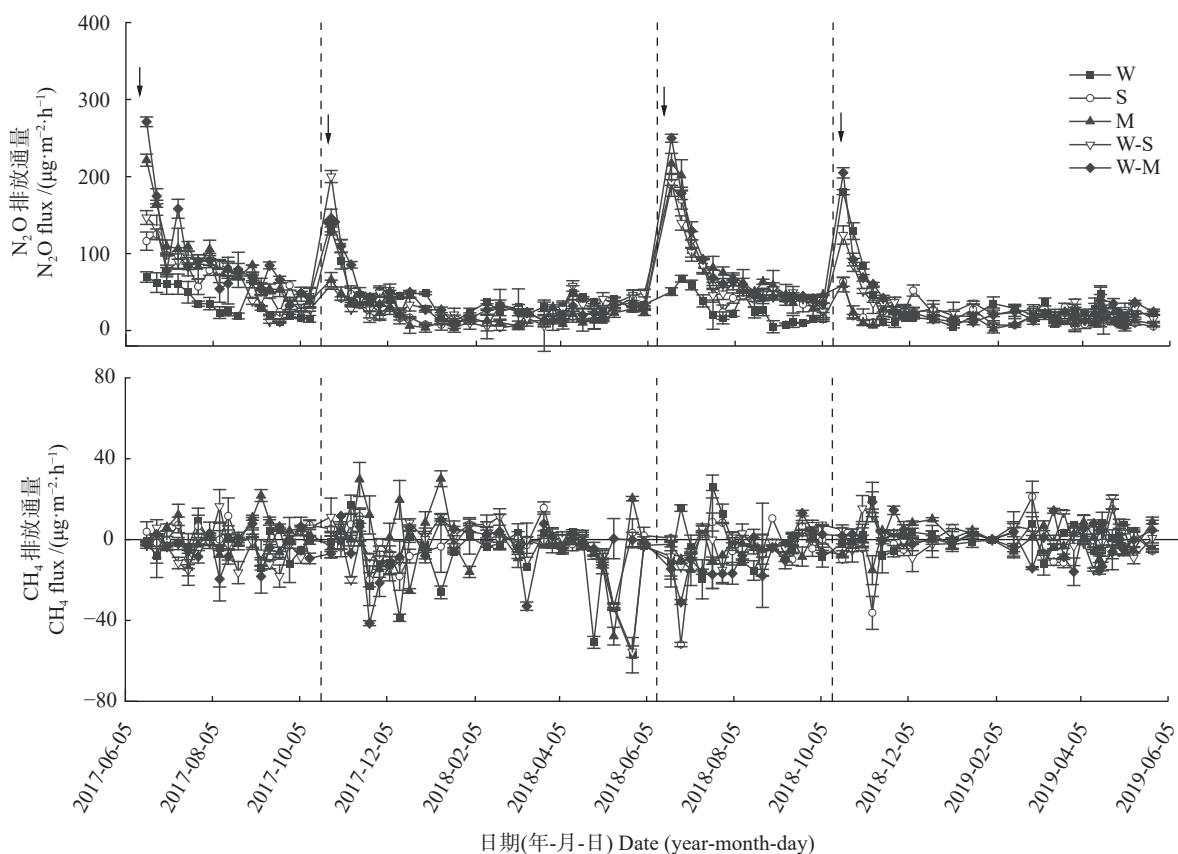
W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟。同列不同小写字母表示同一作物不同种植模式在 $P<0.05$ 水平差异显著。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different cropping systems of the same crop at $P<0.05$ level.



W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟。不同小写字母表示不同种植模式在 $P<0.05$ 水平差异显著。图中的点为平均值。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize. Different lowercase letters mean significant differences among different cropping systems at $P<0.05$ level. Dot in the figure refers to average value.

图 2 2015—2020 年不同种植模式的年平均产值和经济效益

Fig. 2 Annual average output values and economic benefits of different cropping systems from 2015 to 2020



W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟。箭头表示施肥时间, 虚线表示两季作物生育期的间隔。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize. The arrow indicates the fertilization time, and the dashed line indicates the interval between two crop growth periods.

图 3 2017—2019 年不同种植模式温室气体排放通量变化

Fig. 3 Variations of greenhouse gas emission fluxes under different cropping systems from 2017 to 2019

2018年的6—9月, W模式的 N_2O 排放通量低于其他4种植植模式, 10月—翌年5月, M和S模式的平均排放通量低于W-M、W-S和W模式, 肥料施用是 N_2O 排放通量出现峰值的主要原因。W、S、M、W-S和W-M在2017年和2018年6—9月的平均 N_2O 排放通量分别为32.22、72.79、84.14、70.81和87.60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 10月—翌年5月平均 N_2O 排放通量分别为32.80、18.38、17.17、31.04和30.65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

CH_4 排放通量的动态变化无明显规律, 各种植模式的 CH_4 排放通量既有正值也有负值, 呈现较大的波动性。W、S、M、W-S和W-M模式在6—9月年均 CH_4 排放通量分别为-2.05、-1.22、-1.41、-4.12和-5.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 10月—翌年5月年均 CH_4 排放通量分别为-6.57、-1.31、-1.36、-4.38和-2.19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 均表现为碳汇效应。

2.5 不同种植模式温室气体累积排放量

从表6可以看出, 2018—2019年度 N_2O 累积排放量低于2017—2018年度。不同种植模式两年总体规律一致, W-M模式的 N_2O 累积排放量最高, 年均累积排放量为3.91 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别为W、S和M模式的1.52、1.36和1.25倍。一年两熟种植模式中的W-S模式年均 N_2O 累积排放量比W-M模式显著降低10.7% ($P<0.05$)。单季种植模式(W、S和M)的年均 N_2O 累积排放量显著低于一年两熟的W-S和W-M模式 ($P<0.05$)。单季种植模式中的M模式年均 N_2O 累积排放量分别比W和S模式显著提高21.4%和8.3% ($P<0.05$)。由此可见, 一年两熟轮作种植模式增加了 N_2O 累积排放量, 且W-M模式 N_2O 的累积排放量最高。

不同种植模式 CH_4 累积排放量均为负值,

2017—2018年为-0.65~-0.08 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 2018—2019年为-0.30~-0.08 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2017—2018年W模式的 CH_4 累积排放量最低, 为-0.65 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 2018—2019年的W-M模式最低, 为-0.30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 2017—2019年, W、W-S和W-M模式的年均 CH_4 累积排放量均显著低于M和S模式。W-S模式的年均 CH_4 累积排放量低于W-M模式, 年均降低24.1%, 但差异不显著。

生产过程中的直接温室气体排放总量($\text{CE}_{\text{direct}}$)与 N_2O 的累积排放量表现出相似规律。年均 $\text{CE}_{\text{direct}}$ 表现为W-M>W-S>M>S>W; W-S模式在2017—2019年均显著低于W-M模式, 年均降低11.1% ($P<0.05$); 单季种植模式中, M模式的年均 $\text{CE}_{\text{direct}}$ 分别比W和S模式显著提高22.7%和8.3% ($P<0.05$)。以上表明, 直接温室气体排放总量主要受 N_2O 累积排放量影响, 并且W-M模式的直接温室气体排放量最高。

2.6 不同种植模式碳足迹

基于2017—2019年平均农资投入和温室气体排放计算的 CF_A 、 CF_{MEEY} 和 CF_{EY} 如表7所示。一年两熟模式(W-M和W-S)的 CF_A 显著高于单季种植模式(W、S和M), W-M模式的 CF_A 最高, 分别是W、S和M模式的1.7、2.0和1.9倍; 一年两熟模式的W-S比W-M模式显著降低4.7% ($P<0.05$); 单季种植模式中, W模式的 CF_A 分别比S和M模式显著增加16.9%和9.0% ($P<0.05$)。与W-S模式相比, W-M模式的 CF_{MEEY} 和 CF_{EY} 分别显著降低17.2%和16.2% ($P<0.05$); 单季种植模式中, M模式的 CF_{MEEY} 比W和S模式均显著增加14.3% ($P<0.05$), 而S模式的 CF_{EY} 比W和M模式分别显著增加36.2%和41.4% ($P<0.05$)。总体上看, W-M模式的 CF_A 最高, 但其 CF_{MEEY} 和 CF_{EY} 显著低于其他种植模式 ($P<0.05$)。

表6 2017—2019年不同种植模式温室气体累积排放量
Table 6 Cumulative greenhouse gas emissions under different cropping systems from 2017 to 2019 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

种植模式 Cropping system	2017—2018			2018—2019		
	$\text{CE}_{\text{N}_2\text{O}}$	CE_{CH_4}	$\text{CE}_{\text{direct}}$	$\text{CE}_{\text{N}_2\text{O}}$	CE_{CH_4}	$\text{CE}_{\text{direct}}$
W	2.90±0.05c	-0.65±0.16c	849.05±20.35c	2.23±0.12d	-0.15±0.05ab	660.90±33.01d
S	2.93±0.17c	-0.12±0.16a	870.61±50.97c	2.83±0.12c	-0.08±0.03a	840.52±35.49c
M	3.27±0.10b	-0.08±0.12a	973.86±35.40b	2.96±0.10c	-0.13±0.12ab	879.54±27.94c
W-S	3.56±0.35b	-0.39±0.10b	1 050.14±104.51b	3.42±0.10b	-0.28±0.17b	1 010.88±32.94b
W-M	4.11±0.09a	-0.24±0.10ab	1 219.61±26.79a	3.71±0.05a	-0.30±0.05b	1 099.09±14.69a

W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟; $\text{CE}_{\text{N}_2\text{O}}$: 直接排放的 N_2O ; CE_{CH_4} : 直接排放的 CH_4 ; $\text{CE}_{\text{direct}}$: 直接排放的温室气体。同列不同小写字母表示同一指标不同种植模式在 $P<0.05$ 水平差异显著。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize; $\text{CE}_{\text{N}_2\text{O}}$: direct emissions of N_2O ; CE_{CH_4} : direct emissions of CH_4 ; $\text{CE}_{\text{direct}}$: direct greenhouse gas emissions. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different cropping systems of the same indicator at $P<0.05$ level.

表 7 2017—2019 年不同种植模式的平均碳足迹
Table 7 Average carbon footprints of different cropping systems from 2017 to 2019

种植模式 Cropping system	CF _A /(kg·hm ⁻²)	CF _{MEEY} /(kg·kg ⁻¹)	CF _{EY} /(kg·MJ ⁻¹)
W	2 869.82±13.79c	0.28±0.00c	11.76±0.28b
S	2 454.75±17.73e	0.28±0.00bc	16.02±0.24a
M	2 631.88±6.66d	0.32±0.01a	11.33±0.47b
W-S	4 744.53±38.69b	0.29±0.00b	11.80±0.12b
W-M	4 977.76±6.09a	0.24±0.00d	9.89±0.43c

W: 单季冬小麦; S: 单季夏大豆; M: 单季夏玉米; W-S: 冬小麦-夏大豆一年两熟; W-M: 冬小麦-夏玉米一年两熟; CF_A: 单位播种面积碳足迹; CF_{MEEY}: 单位玉米当量产量碳足迹; CF_{EY}: 单位能量产量碳足迹。同列不同小写字母表示相同指标不同种植模式在 $P<0.05$ 水平差异显著。W: single-cropping system of winter wheat; S: single-cropping system of summer soybean; M: single-cropping system of summer maize; W-S: double-cropping system of winter wheat-summer soybean; W-M: double-cropping system of winter wheat-summer maize; CF_A: carbon footprint per unit of sown area; CF_{MEEY}: carbon footprint per unit maize equivalent yield; CF_{EY}: carbon footprint per unit energy yield. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different cropping systems of the same indicator at $P<0.05$ level.

3 讨论

3.1 不同种植模式对作物产量、氮肥利用效率及经济效益的影响

种植模式的改变会显著影响作物周年产量。本研究发现, 黄淮海平原冬小麦-夏玉米一年两熟的种植模式周年玉米当量产量和能量产量显著高于其他种植模式, 这与前人在其他区域的研究结果相似。如郑媛媛等^[11]的研究发现, 华北平原冬小麦-夏玉米一年两熟的种植模式产量显著高于其他种植模式; 马小艳等^[23]在关中平原的研究中也发现, 小麦-玉米轮作的夏季作物产量高于小麦-大豆轮作, 小麦-玉米轮作的冬季作物产量也高于小麦-大豆轮作模式。这可能是因为玉米是 C4 作物, 而小麦和大豆是 C3 作物, C4 作物光合作用能力约是 C3 作物的两倍, 玉米具有高光合效率和高物质生产能力, 产量潜力及生产力均高于小麦和大豆^[24]。因此, 在种植模式调整中, 充分利用 C4 作物(如玉米)物质生产能力高的优势, 通过调整播期和选用合理积温的玉米品种进行搭配等方式, 协调光、温资源向玉米的分配比例, 可显著提高光温资源利用效率, 进而提高作物周年产量^[25-26]。

研究表明, 在作物生产系统加入豆科作物轮作, 能够显著提高后茬作物籽粒产量、氮素吸收量、氮肥利用效率和水分利用效率^[27-28]。本研究结果表明, 大豆氮素积累能力高于小麦和玉米, 相同作物在不同种植模式中的氮素积累量差异较小, 这说明作物氮素积累能力主要和作物种类有关。氮肥偏生产力是反映土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标, 能够表征氮肥利用效率^[29], 本研究中不同作物的氮肥偏生产力和作物的周年玉米当量产量表现一致, 玉米的氮肥偏生产力高于小麦和大豆, 相同作物在不同种植模式中的氮肥偏生产力存在差异。

经济效益是影响作物生产模式可持续性的重要衡量指标。本研究表明, 与冬小麦-夏玉米一年两熟模式(W-M)相比较, 冬小麦-夏大豆一年两熟模式(W-S)的产值和经济效益分别降低 22.0% 和 35.7%, 单季种植模式的产值和经济效益表现为 $M>W>S$, 这主要是由不同作物的产量差异造成的, 虽然单价上大豆>小麦>玉米, 但产量之间的差异大于单价的差异, 因此, 冬小麦-夏玉米一年两熟模式(W-M)的经济效益显著高于其他种植模式。

3.2 不同种植模式对温室气体排放的影响

2017—2019 年的田间试验结果发现, 不同作物生育期 N₂O 排放通量均在施肥后一周内出现排放峰值, 这与前人研究结果基本一致^[30-31]。施肥为土壤输入了额外的无机氮源, 使硝化和反硝化作用底物增加, 导致 N₂O 排放增加^[32]。另有研究认为, 通过轮作或者间作引入豆科作物, 会减少土壤 N₂O 排放^[33-34]。本研究中, 与小麦-玉米一年两熟模式(W-M)相比, 小麦-大豆一年两熟模式(W-S)显著降低了 N₂O 排放。研究还发现, 5 种植植模式的 CH₄ 累积吸收量均为正值, 年均吸收量为 0.10~0.40 kg·hm⁻², 且单季冬小麦模式(W)最高, 这可能是因为干燥的旱地土壤环境中, 甲烷氧化菌在微生物群体中起主导作用, 其生命活动的维持会消耗和吸收地面大气中的 CH₄, 进而使得农田表现为 CH₄ 的弱汇^[35-36]。旱地土壤温室气体排放主要来源于 N₂O 排放, CH₄ 表现为吸收, 且 N₂O 排放量远大于 CH₄ 吸收量。因此, 旱地土壤的温室气体减排主要是减少 N₂O 排放, 其中优化肥料施用量和施肥方式是重要的减排措施^[37-38]。

W-S 模式的直接温室气体排放总量显著低于 W-M 模式, 年均降低 11.1%; 与 M 模式相比, S 模式也降低了年均直接温室气体排放总量, 且在 2017—2018 年具有显著差异。相比传统的禾本科轮作模式, 将玉米替换为大豆可降低轮作系统的直接温室

气体排放总量,其减排效果较好。这可能是因为大豆可以吸收和积累更多的氮素,在本研究中单季夏大豆的氮素积累量相比单季夏玉米提高 87.8%,轮作模式下大豆的氮素积累量也高于玉米的氮素积累量;作物能够吸收更多的氮素,因此可以减少土壤中的氮素,进而减少 N_2O 排放^[39]。

3.3 不同种植模式对碳足迹的影响

农业碳排放核算是农业碳减排政策制定与落实的基础,可为精准掌握农业碳排放情况及评估农业减排措施的效果提供科学支撑^[40]。在农业生产碳排放的组成上,农业投入部分所占比重和直接排放一样不容忽视,其中肥料投入导致的碳排放在碳足迹中占比最大,因此,降低肥料生产过程中的能耗和优化农田施氮量等方式是降低农田碳足迹的重要措施^[41]。

本研究中,不同种植模式的单位播种面积碳足迹为 $2.45\sim 4.98\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,这与前人的一些研究结果接近,如 Xu 等^[42] 计算的我国小麦和玉米单位面积碳足迹分别为 2.8 和 $2.7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,但 Yan 等^[43] 基于我国数据计算的小麦和玉米单位面积碳足迹分别为 3.0 和 $2.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,Sun 等^[15] 在东北通过试验得到的玉米和大豆单位面积碳足迹分别为 2.1 和 $1.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。以上可以看出,不同研究中相同作物的碳足迹也存在差异,这可能和研究方法、研究尺度大小、地区生产投入不同有关,如 Yan 等^[43] 的研究增加了地膜投入带来的碳足迹;另外,不同研究中的肥料投入差异也较大,而肥料对碳足迹的贡献较大,本试验中施用了复合肥,而在一些试验中则为单独的氮磷钾肥^[9,15,43],因此计算的碳足迹之间存在差异。本研究中,冬小麦-夏大豆一年两熟(W-S)模式的单位播种面积碳足迹显著低于冬小麦-夏玉米一年两熟(W-S)模式,而单位玉米当量产量和单位能量产量碳足迹则显著高于冬小麦-夏玉米一年两熟(W-S)模式;单季夏大豆(S)模式的单位播种面积碳足迹显著低于单季冬小麦(W)和单季夏玉米(M)模式。在未来环境友好的作物生产中,黄淮海区域可考虑采用生产投入较低的作物,以降低作物生产中的单位播种面积碳排放。

4 结论

本研究发现,冬小麦-夏玉米一年两熟模式的周年玉米当量产量、能量产量、产值和经济效益均显著高于其他种植模式,但是其 N_2O 累积排放量、直接温室气体排放总量和单位播种面积碳足迹也最高。为了实现粮食产量和经济效益的协同,冬小麦-夏玉米一年两熟模式仍是黄淮海区域的最优种植模式,

但后续应深入研究该种植模式的低碳生产技术;冬小麦-夏大豆一年两熟模式能够提高种植系统对氮素的积累,减少温室气体排放,降低单位播种面积碳足迹。从兼顾产量和温室气体减排的角度出发,冬小麦-夏大豆一年两熟模式是较为环境友好的作物种植模式。

不同种植模式的田间生产投入以及 2017—2019 年不同种植模式的年均作物氮素积累量、作物氮肥偏生产力和温室气体累积排放量文中附件见电子版资源附件(<http://www.ecoagri.ac.cn/article/doi/10.12357/cjca.20240193>)。

参考文献 References

- [1] 周宝元,葛均筑,侯海鹏,等.黄淮海平原南部不同种植体系周年气候资源分配与利用特征研究[J].作物学报,2020,46(6): 937-949
ZHOU B Y, GE J Z, HOU H P, et al. Characteristics of annual climate resource distribution and utilization for different cropping systems in the south of Yellow-Huaihe-Haihe Rivers Plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(6): 937-949
- [2] LING M H, HAN H B, WEI X L, et al. Temporal and spatial distributions of precipitation on the Huang-Huai-Hai Plain during 1960-2019, China[J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(6): 2232-2244
- [3] 张凯,周婕,赵杰,等.华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究——以河北省吴桥县为例[J].中国生态农业学报,2017,25(3): 328-336
ZHANG K, ZHOU J, ZHAO J, et al. Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 328-336
- [4] WANG G C, LUO Z K, WANG E L, et al. Reducing greenhouse gas emissions while maintaining yield in the croplands of Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260/261: 80-94
- [5] 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
ZHANG W J, YAN S J, ZHANG J, et al. Win-win strategy for national food security and agricultural double-carbon goals[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(18): 3892-3902
- [6] BURNEY J A, DAVIS S J, LOBELL D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(26): 12052-12057
- [7] DAVIS K F, RULLI M C, SEVESO A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution[J]. Nature Geoscience, 2017, 10: 919-924
- [8] CUI J X, SUI P, WRIGHT D L, et al. Carbon emission of maize-based cropping systems in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 300-308
- [9] 郑孟静,张经廷,崔永增,等.华北平原基于麦玉轮作的粮薯、粮豆轮作模式碳足迹评价[J].华北农学报,2022,37(S1):

- 81–89
ZHENG M J, ZHANG J T, CUI Y Z, et al. Carbon footprint evaluation of cereal-bean, cereal-potato rotation modes based on wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(S1): 81–89
- [10] 谢鸿飞, 赵俊芳, 艾金龙, 等. 基于 APSIM 的华北平原不同种植模式下主要温室气体排放效应评估[J]. *中国农业气象*, 2022, 43(12): 955–968
- XIE H F, ZHAO J F, AI J L, et al. Assessment of main greenhouse gas emission effects under different cropping patterns in North China Plain based on APSIM crop model[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(12): 955–968
- [11] 郑媛媛, 陈宗培, 王贵彦. 海河平原小麦-玉米不同种植制度节水特性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 9–15
- ZHENG Y Y, CHEN Z P, WANG G Y. Analysis on the water-saving characteristics of winter wheat and summer maize cropping system on Haihe Plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 9–15
- [12] YANG Y H, TI J S, ZOU J, et al. Optimizing crop rotation increases soil carbon and reduces GHG emissions without sacrificing yields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 342: 108220
- [13] XIAO H, VAN ES H M, AMSILI J P, et al. Lowering soil greenhouse gas emissions without sacrificing yields by increasing crop rotation diversity in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2022, 276: 108366
- [14] YANG L, NIE J W, ZHAO J, et al. Reduce carbon footprint without compromising system productivity: Optimizing crop rotation in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139124
- [15] SUN T, FENG X M, LAL R, et al. Crop diversification practice faces a tradeoff between increasing productivity and reducing carbon footprints[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 321: 107614
- [16] 陈阜. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 316
- CHEN F. *Agroecology*[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 316
- [17] 耿若鑫, 黑泽文, 油伦成, 等. 华北小麦施用脲铵氮肥实现轻简施肥的可行性及技术措施[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1103–1117
- GENG R X, HEI Z W, YOU L C, et al. Availability and technology of using urea-ammonium fertilizer to realize nitrogen reduction and simplified fertilization in wheat production of North China Plain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1103–1117
- [18] 张鑫, 郑成岩, 李升明, 等. 长期有机无机肥配施降低黄淮海区域小麦-大豆复种系统净温室效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2204–2215
- ZHANG X, ZHENG C Y, LI S M, et al. Long-term combined application of chemical and organic fertilizers decrease net greenhouse gas emission in wheat-soybean system in Huang-Huai-Hai region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2204–2215
- [19] 林志敏, 李洲, 翁佩莹, 等. 再生稻田温室气体排放特征及碳足迹[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1340–1351
- LIN Z M, LI Z, WENG P Y, et al. Field greenhouse gas emission characteristics and carbon footprint of ratoon rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1340–1351
- [20] 刘志铭, 司雨, 姚凡云, 等. 提高东北春玉米产量和资源利用效率降低碳足迹的优化综合管理措施[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(3): 380–388
- LIU Z M, SI Y, YAO F Y, et al. Integrated management improves spring maize yield and resources use efficiency, and reduces the carbon footprint in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(3): 380–388
- [21] 吴健成, 刘卿, 汪翠存, 等. 秸秆还田与氮肥施用对稻田温室气体排放的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(12): 5328–5339
- WU J C, LIU Q, WANG C C, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions in rice paddy fields and research on fertilizer recommendation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 5328–5339
- [22] HUANG X M, CHEN C Q, QIAN H Y, et al. Quantification for carbon footprint of agricultural inputs of grains cultivation in China since 1978[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1629–1637
- [23] 马小艳, 杨瑜, 黄冬琳, 等. 小麦化肥减施与不同轮作方式的周年养分平衡及经济效益分析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(8): 1589–1603
- MA X Y, YANG Y, HUANG D L, et al. Annual nutrients balance and economic return analysis of wheat with fertilizers reduction and different rotations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(8): 1589–1603
- [24] WANG X L, MA X X, YAN G, et al. Gene duplications facilitate C4-CAM compatibility in common purslane[J]. *Plant Physiology*, 2023, 193(4): 2622–2639
- [25] 王丹, 周宝元, 马玮, 等. 长江中游双季玉米种植模式周年气候资源分配与利用特征[J]. *作物学报*, 2022, 48(6): 1437–1450
- WANG D, ZHOU B Y, MA W, et al. Characteristics of the annual distribution and utilization of climate resource for double maize cropping system in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(6): 1437–1450
- [26] 周宝元, 陈传永, 孙雪芳, 等. 冬小麦-夏玉米双机收籽粒模式周年资源利用效率及经济效益[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(12): 1959–1972
- ZHOU B Y, CHEN C Y, SUN X F, et al. Resource use efficiencies and economic benefits of winter wheat-summer maize cropping system with double mechanical grain harvest[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(12): 1959–1972
- [27] LASISI A, LIU K. A global meta-analysis of pulse crop effect on yield, resource use, and soil organic carbon in cereal- and oilseed-based cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2023, 294: 108857
- [28] YANG H, ZHANG W P, XU H S, et al. Trade-offs and synergies of plant traits co-drive efficient nitrogen use in intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2023, 302: 109093
- [29] 魏文良, 刘路, 仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1384–1394
- WEI W L, LIU L, QIU H H. Effects of different organic

- resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8): 1384–1394
- [30] 李晓立, 何堂庆, 张晨曦, 等. 等氮量条件下有机肥替代化肥对玉米农田温室气体排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(5): 948–961
- LI X L, HE T Q, ZHANG C X, et al. Effect of organic fertilizer replacing chemical fertilizers on greenhouse gas emission under the conditions of same nitrogen fertilizer input in maize farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 948–961
- [31] WANG C, ZHAO J C, FENG Y P, et al. Optimizing tillage method and irrigation schedule for greenhouse gas mitigation, yield improvement, and water conservation in wheat–maize cropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 248: 106762
- [32] CHENG K, OGLE S M, PARTON W J, et al. Simulating greenhouse gas mitigation potentials for Chinese Croplands using the DAYCENT ecosystem model[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 948–962
- [33] BEHNKE G D, ZUBER S M, PITTELKOW C M, et al. Long-term crop rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 261: 62–70
- [34] DOS SANTOS I L, DE OLIVEIRA A D, DE FIGUEIREDO C C, et al. Soil N₂O emissions from long-term agroecosystems: interactive effects of rainfall seasonality and crop rotation in the Brazilian Cerrado[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 233: 111–120
- [35] 李春喜, 李斯斯, 邵云, 等. 有机物料还田对冬小麦农田土壤温室气体排放影响的研究[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2019, 27(6): 815–824
- LI C X, LI S S, SHAO Y, et al. Effects of organic waste application on soil greenhouse gas emissions of a winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 815–824
- [36] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(5): 977–989
- ZHU X Q, AN J, MA L, et al. Effects of different straw returning depths on soil greenhouse gas emission and maize yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 977–989
- [37] 张广斌, 马静, 徐华, 等. 中国农田非 CO₂ 温室气体减排的研究现状与建议[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(3): 504–517
- ZHANG G B, MA J, XU H, et al. Status quo of research and suggestions on reduction of non-CO₂ greenhouse gas emission from Chinese farmland[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(3): 504–517
- [38] CUI X Q, ZHOU F, CIAIS P, et al. Global mapping of crop-specific emission factors highlights hotspots of nitrous oxide mitigation[J]. *Nature Food*, 2021, 2: 886–893
- [39] 张学林, 何堂庆, 张晨曦, 等. 丛枝菌根真菌对玉米生育期土壤 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(10): 2000–2012
- ZHANG X L, HE T Q, ZHANG C X, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on soil N₂O emissions during maize growth periods[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(10): 2000–2012
- [40] 林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2022, 30(4): 500–515
- LIN B, XU M, WANG X X. Mitigation of greenhouse gas emissions in China's agricultural sector: Current status and future perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 500–515
- [41] 李春喜, 刘晴, 邵云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 527–536
- LI C X, LIU Q, SHAO Y, et al. Effects of organic material returning and nitrogen fertilizer reduction on the economic yields and carbon, nitrogen, and water footprints of wheat-maize annual farmland in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 527–536
- [42] 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
- [43] 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