

引用格式: 居浩然, 都昊田, 朱昌进, 等. 不同轮作模式对农田温室气体排放影响的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(6): 1315–1329. JU Haoran, DU Haotian, ZHU Changjin, et al. Research progress on the impact of crop rotation patterns on greenhouse gas emissions[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(6): 1315–1329.

不同轮作模式对农田温室气体排放影响的研究进展

居浩然¹, 都昊田¹, 朱昌进¹, 霍中洋^{1,2}, 戴其根^{1,2}, 李国辉^{1,2}, 许 轲^{1,2}

(1. 扬州大学 水稻产业工程技术研究院 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州大学 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009)

摘要: 温室气体排放导致了日益严重的温室效应, 加剧气候变暖和极端天气频发等全球环境问题。农业生产中排放的甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等是温室气体排放的重要来源。中国是世界主要的农业大国, 由于耕地有限, 粮食需求量大, 且地形种类丰富、气候多样, 产生了多种适应当地生产条件的轮作模式。研究表明: 轮作模式通过土壤管理、灌溉和施肥策略显著影响温室气体的排放。例如, 水稻 *Oryza sativa*-小麦 *Triticum aestivum* 轮作因水分管理导致较高的CH₄排放, 小麦-玉米 *Zea mays* 轮作因频繁耕作增加了N₂O排放。不同轮作模式下, 土壤微生物群落结构和功能的变化也对温室气体排放产生重要影响。尽管已有研究揭示了部分机制, 但关于轮作模式长期效应及其与气候变化的互作仍需深入研究。本研究综述了水旱轮作、旱地轮作等常见轮作模式对农业温室气体排放影响的研究进展, 提出了未来的研究方向, 以期环境保护和温室气体减排提供理论参考。参 106

关键词: 轮作模式; 温室气体; 农业减排; 环境保护; 综述

中图分类号: S157.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)06-1315-15

Research progress on the impact of crop rotation patterns on greenhouse gas emissions

JU Haoran¹, DU Haotian¹, ZHU Changjin¹, HUO Zhongyang^{1,2}, DAI Qigen^{1,2}, LI Guohui^{1,2}, XU Ke^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology, Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract: Greenhouse gas emissions have led to the increasingly severe greenhouse effect, exacerbating global environmental issues such as climate change and frequent extreme weather. The emissions of methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and other gases in agricultural production are important sources of greenhouse gas emissions. They are important research topics in crop production. China is a major agricultural country in the world. Due to the limited cultivated land, large food demand, rich terrain and diverse climate, a variety of rotation modes adapted to local production conditions have been produced. Studies have shown that rotation patterns significantly affect greenhouse gas emissions by changing soil management, irrigation, and fertilization strategies. For example, rice-wheat rotation leads to higher methane emissions due to paddy field management, while wheat-maize rotation increases nitrous oxide emissions due to frequent tillage. Changes in the structure

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32272200); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目 (BE2022425); 江苏省重点研发计划项目 (BE2021361); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介: 居浩然 (ORCID: 0009-0006-0473-0539), 从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: 1104788253@qq.com。

通信作者: 许轲 (ORCID: 0009-0002-0741-5279), 教授, 博士, 从事作物栽培学与耕作学的研究与推广工作。E-mail: xuke@yzu.edu.cn

and function of soil microbial communities under different rotation patterns also have an important impact on greenhouse gas emissions. Although some mechanisms have been revealed, the long-term effects of rotation patterns and their interaction with climate change still need to be further studied. This paper summarized the research progress on the effects of common paddy-upland rotation and dryland rotation on agricultural greenhouse gas emissions, and put forward the future research direction, in order to provide theoretical reference for environmental protection and greenhouse gas emission reduction. [Ch, 106 ref.]

Key words: rotation system; greenhouse gas; agricultural emission reduction; environmental protection; review

人类活动引起的温室气体排放量的增加,导致了全球气候变暖、极端天气频发等一系列生态环境问题,给人类正常的生产生活造成了严重影响,已经成为亟待解决且极具挑战性的“全球性危机”^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告^[2]表明:2019年温室气体排放量达590亿t,比2010年提高约12%,其中全球农林生态系统温室气体排放量占温室气体总排放量的13%~20%,农田生态系统无疑成为了温室气体的重要来源之一^[3]。

农业生产活动是重要的生物排放源^[4],其在生产经营过程中深刻影响着温室气体排放,每年贡献了温室气体总排放量的20%^[5],其中产生的甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是仅次于二氧化碳(CO₂)的主要温室气体^[6],且具有更强的增温效应。全球约50%的CH₄和60%的N₂O来自农业生产活动^[7],非CO₂温室气体减排的重要性愈发突出。农业领域内温室气体减排的研究已日益受到学术界、政策制定者以及相关利益群体的高度关注。

目前,全球约1.35亿hm²农田(12%的全球农田)用于作物轮作种植^[8],在热带和亚热带农业中是一种主要的土地管理策略。具体的轮作系统及其面积在全球不同地区的分布存在显著差异。中国幅员辽阔,地形复杂,不同地区形成了与其相适应的作物轮作模式,明显改变了土壤的理化性质,也影响农田温室气体的排放^[9-10]。例如,旱地作物与水稻*Oryza sativa*轮作会导致频繁的水淹和干燥条件转换,影响土壤中的营养平衡和有机物分解速率,从而影响CH₄排放^[11];豆科Leguminosae作物轮作系统中,由于豆科作物残留物富含氮,返还土壤后会提供额外的硝化和反硝化底物,从而导致N₂O排放增加^[12]等。

不同地区的气候、土壤类型、管理方式等对轮作系统的温室气体排放存在显著影响,但具体的影响机制和量化数据仍不充分,最佳管理措施仍需进一步研究。此外,目前的研究多集中在短期效应,长期效应尚不明确。鉴于此,本研究总结了不同轮作模式的耕作方式差异及其对农田温室气体排放的影响,分析当前不同轮作模式存在的问题,并讨论未来的主要研究方向,以期减少农田温室气体排放提供思路与方案。

1 主要轮作模式对温室气体排放的影响

目前,农业生产面临着粮食增产与环境保护之间、经济效益与生态效益之间的矛盾。单一的耕作模式,容易带来土壤理化性质的进一步恶化,作物产量不断降低等诸多负面影响,而多样化的轮作模式既可以提高粮食产量,又可以改善土壤环境、减少农业生产中温室气体的排放^[10]。不同轮作模式的适用地区、水肥及管理措施不同,田间CH₄与N₂O的排放量存在差异,总结主要轮作模式对农田温室气体排放的影响,将有助于指导作物生产可持续发展。

1.1 水旱轮作模式对温室气体排放的影响

水旱轮作是在同一田块上,有顺序地轮换种植水稻和其他旱地作物的种植方式。长江中下游地区主要以水旱轮作模式为主,干湿交替是该模式的主要特征,其中包括以水稻-小麦*Triticum aestivum*轮作(稻麦轮作)、水稻-油菜*Brassica chinensis*轮作(稻油轮作)等为主体的轮作模式^[13]。不同水旱轮作模式对农业生产中CH₄和N₂O的排放存在差异^[14]。水稻季主要排放的温室气体是CH₄,占全年总排放量的87.84%~98.16%,小麦季CH₄排放量大于油菜季;旱作季集中排放的温室气体为N₂O,占全年总排放量的41.48%~65.48%,油菜季N₂O排放量大于小麦季^[15]。对比几种水旱轮作模式,CH₄排放量从大到小依次为双季稻模式、水稻-小麦轮作、水稻-油菜轮作、稻闲模式,N₂O排放量从大到小依次为水稻-油菜轮作、水稻-小麦轮作、双季稻模式、稻闲模式^[16-17],主要由于小麦秸秆碳氮比高,还田后利于生物固氮从

而减少 N_2O 排放量^[18]，使得水稻-油菜轮作 N_2O 排放量高于水稻-小麦轮作。但也有研究表明：因油菜季根呼吸量小于小麦季， CH_4 和 N_2O 排放量从大到小依次均为水稻-小麦轮作、水稻-油菜轮作^[19-21]，且油菜为直根系作物，可改善土壤及微生物状况^[22]，从而减少 CH_4 和 N_2O 的排放量。

1.1.1 水稻-小麦轮作对温室气体排放的影响 水稻-小麦轮作作为中国最典型的水旱轮作模式，在水旱轮作体系中占据最大比例。该模式广泛应用于长江中下游的江苏、安徽、湖北等省市的稻作区，且应用面积占比较大，其可持续发展与国家粮食安全问题息息相关^[23-24]。

总体来看，水稻-小麦轮作模式在水稻季的 CH_4 排放量显著高于水稻单一种植模式。与单季稻相比，水稻-小麦轮作模式虽然在水稻季 N_2O 排放量极低，但是 CH_4 排放量呈现上升趋势，不能抵消 CH_4 高排放量造成的温室效应^[25]。因此，水稻-小麦轮作系统中稻田周年全球增温潜势 (GWP) 显著高于单季稻。水稻-小麦轮作模式中小麦季 N_2O 排放量也显著高于小麦单季种植模式；水稻-小麦轮作模式干湿交替水分管理方式会导致土壤孔隙度增加、通气性改善，促进 N_2O 的产生和排放^[26]，而小麦单季种植模式下，土壤保持相对稳定，孔隙度和通气性变化较小，因此 N_2O 排放量较低。

CH_4 和 N_2O 排放量与季节有较大关系。水稻-小麦轮作全球增温潜势主要受水稻季 CH_4 排放的影响^[26]，因为水稻生长处于全年气温最高的时期，气温增高加速了有机物分解，为甲烷菌提供能量^[27]与缺氧环境^[28]，进而加速 CH_4 排放^[29]，此外淹水环境有利于甲烷菌快速生长^[30]，并且可以有效抑制甲烷氧化菌活性^[31]；而旱季作物缺少厌氧条件，故 CH_4 排放量较少。 N_2O 对全球增温潜势的贡献只占小部分，其排放主要与硝化和反硝化作用有关^[30]，水稻季气温高的环境有利于 N_2O 的产生与排放。不过，由于水稻田长期处于淹水状态， N_2O 会转化为 N_2 ，但在干湿交替的晒田期，会出现 N_2O 的排放高峰^[32]。而在旱地作物生长期间， N_2O 的排放受养分、水分和气温等因素的影响。当氮肥施用量增加、降水量增多以及气温升高时， N_2O 排放量也会随之不断增加^[33]。

不同种植方式和作物种类会对 CH_4 和 N_2O 的排放量产生影响。直播稻与移栽稻 CH_4 排放通量均有双峰趋势，分别在分蘖中期和拔节孕穗期，其中直播稻的 CH_4 排放通量明显低于移栽稻。而在旱作季，种植元麦 *Hordeum vulgare* var. *nudum* 和小麦的 CH_4 排放量均较低，且排放量随气温的降低而减少。 N_2O 主要在小麦季排放，小麦和元麦的 N_2O 排放量呈现双峰变化趋势，峰值出现在拔节期，小麦比元麦 N_2O 排放量高 96.19%。在水稻季中， N_2O 排放量呈现单峰变化趋势，在分蘖末期 N_2O 排放量急剧增加并达到峰值，其中直播稻的 N_2O 排放量要高于移栽稻^[33]。

不同施肥方式也会影响温室气体的产生与排放。与常规施肥相比，施用生物质炭 3 a 后， CH_4 、 N_2O 等温室气体排放量显著降低，并且具有增产效果。生物质炭的影响较长久，在第 4~6 年仍然有使水稻-小麦轮作系统增产与减排的潜力^[34]。有机肥部分替代化肥的施肥方式，可有效提高水稻-小麦轮作模式下的产量、氮素利用率与氮素吸收量^[35]，会增加水稻-小麦轮作中 CH_4 的排放量，但可以有效降低大田氮氧化物 (N_2O 与 NO) 的排放量^[36]。

稻、麦秸秆还田是生产上极被重视并长期推行的耕作方式，能够有效改善土壤理化性质，增加土壤有机质含量，提高作物产量^[37]。在水稻-小麦轮作中，秸秆还田为甲烷菌提供养分和底物，促进农田 CH_4 的排放， CH_4 排放量与秸秆还田量呈显著正相关^[38]，在稻田淹水条件下， CH_4 排放量显著增长^[39]。有学者认为：秸秆还田并不能减少^[40]甚至增加 N_2O 的排放量^[41]， N_2O 排放量随秸秆还田量的增加而增长^[42]，小麦季排放量显著增长^[43]；也有学者指出：在水稻-小麦轮作背景下， N_2O 排放量相较于不还田处理降低了 19.00%^[44]，水稻季 N_2O 排放量明显减少^[45]。总体上看，水稻-小麦轮作模式下，秸秆还田措施在短期内会增加 CH_4 和 N_2O 的排放量，但长期秸秆还田能够降低温室气体的排放量^[46]。

目前，水稻-小麦轮作模式仍然是长江中下游地区覆盖最广、规模最大、最典型的水旱轮作模式， CH_4 和 N_2O 是该模式排放的主要温室气体，分别集中于水稻季和小麦季。进一步研究耕作与水肥等栽培措施对 CH_4 和 N_2O 排放的调控及机制，将有助于实现水稻季降低 CH_4 排放和小麦季降低 N_2O 排放的“双降”目标。

1.1.2 水稻-油菜轮作对温室气体排放的影响 水稻-油菜轮作是代表性的水旱轮作生产模式，可有效改善土壤理化性质，提高复种指数以及土地利用率，对于农业可持续发展具有重要意义。水稻-油菜轮作

模式广泛分布于中国南方稻区,尤其分布在以湖北和湖南为代表的长江中游地区。

与单季水稻种植模式相比,水稻-油菜轮作模式中全球增温潜势增长了26.3%~65.8%,稻季 CH_4 排放量较多,冬季 N_2O 排放量也有增长^[47]。此外,水稻-油菜轮作模式中水稻季 CH_4 排放量和油菜季 N_2O 排放量均显著高于油菜单季种植模式。这与小麦单季种植模式类似,主要是因为土壤理化特性以及微生物活性的变化,导致 CH_4 和 N_2O 的排放量增加。水稻-油菜轮作模式下水稻季 CH_4 排放量占周年总 CH_4 排放量的91.80%~98.50%,油菜季 N_2O 排放量占周年总 N_2O 排放量的57.20%~70.20%。综合经济、生态、环境等多方效益以及南方水分、光热等条件,一季杂交晚稻-油菜轮作是值得推广的有效减少温室气体排放的轮作模式^[47]。

不同田间管理方式影响水稻-油菜轮作的 CH_4 和 N_2O 产生与排放。与水稻-小麦轮作模式相同,秸秆还田会显著增加水稻-油菜轮作的 CH_4 排放量^[48];相比于传统耕作土壤,免耕处理的土壤可以减少5.20%的 N_2O 排放量^[49];水稻季净增温潜势随着油菜秸秆还田量的增加呈减少趋势^[50]。地膜覆盖技术被称为“白色革命”^[51],在水稻-油菜轮作模式中已得到广泛应用,这种技术具有保墒、保温、抑制杂草生长等作用,同时也会改变土壤理化性质,影响农业生产中温室气体的排放。地膜覆盖显著提高了 CH_4 和 N_2O 排放量,减少了 CO_2 固定量^[52]。因为地膜覆盖提高了土壤温度,而 CH_4 排放量与土壤温度呈正相关,导致 CH_4 排放量增加; N_2O 排放量与施肥和土壤干湿有关,地膜覆盖在湿润冬季减少了 N_2O 的排放量,在干旱冬季增加了 N_2O 的排放量,且 CH_4 和 N_2O 排放量在水稻季呈此消彼长的趋势,在油菜季呈现同步的状态^[53]。

水稻-油菜轮作模式的温室气体排放与水稻-小麦轮作模式相似,水稻季 CH_4 排放量占比大,油菜季 N_2O 排放量大。水稻-油菜轮作模式下 CH_4 排放量小于水稻-小麦轮作,虽然在 N_2O 排放上还有着争议,但是一季杂交晚稻-油菜轮作已被证实是一种切实有效、能够降低温室气体排放的轮作模式,针对该模式下冬季作物 N_2O 减排的栽培管理措施还有待深入研究。

1.2 旱地轮作模式对温室气体排放的影响

旱地轮作模式包括小麦-玉米 *Zea mays* 轮作、玉米-大豆 *Glycine max* 轮作、小麦-大豆轮作等轮作模式,主要分布于秦岭-淮河以北半干旱或半湿润易干旱的北方地区。旱地农田排放的主要温室气体为 CO_2 和 N_2O ,随着全球变暖问题的不断加剧,旱地农田温室气体排放逐渐成为研究重点^[54]。不同旱地轮作模式对温室气体产生的影响不同,排放量也有明显差异。

总体来看,小麦-大豆轮作模式的 N_2O 累计排放量比小麦-玉米轮作模式低10.7%,直接温室气体排放量比小麦-玉米轮作模式低11.1%^[55];农田生产过程碳排放量从大到小依次为冬小麦-夏玉米轮作、冬小麦-夏大豆轮作、冬小麦-夏闲轮作、冬油菜-夏玉米轮作。在旱地轮作模式中,小麦-玉米轮作模式下作物的产量和经济效益最优,温室气体排放量最高。与传统的禾本科 *Poaceae* 作物轮作相比,玉米-大豆、小麦-大豆和玉米-大豆轮作模式中,由于引入了豆科作物, N_2O 排放量显著降低,与玉米连作模式相比,玉米-大豆轮作模式下的 CO_2 排放量比玉米-大豆轮作模式高18.0%^[56]。

1.2.1 小麦-玉米轮作对温室气体排放的影响 小麦-玉米轮作主要分布在中国重要的粮食主产区之一——黄淮海地区。小麦-玉米轮作模式中温室气体排放量存在明显的季节性,冬季最低、夏季最高^[57]。李新华等^[58]研究表明:黄淮海小麦-玉米轮作模式下,周年 CO_2 排放量呈波动性变化,最小值出现在2月,最大值出现在8月;周年 N_2O 排放量呈双峰型变化,最小值也是出现在2月,最高峰值出现在3月,第2次峰值出现在8月; CH_4 排放量呈波动性变化,整体上表现为对 CH_4 的吸收。因此,黄淮海区域小麦-玉米轮作农田是 N_2O 和 CO_2 的排放源,同时也是 CH_4 的吸收汇。

小麦-玉米轮作体系中, CO_2 排放量通常高于小麦单季种植模式与玉米单季种植模式,且由于涉及2个作物较长的生长周期和较大的土壤扰动,施氮也显著增加了小麦-玉米轮作体系中 N_2O 的排放量,明显增加了该轮作模式的全球增温潜势和温室气体排放强度^[55]。合理的耕作和培肥方式可以有效降低小麦-玉米轮作中农田温室气体的排放量。张黛静等^[59]研究表明:不同耕作和施肥方式的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等3种温室气体的排放强度、累计排放量和全球增温潜势从大到小依次为深耕、浅耕、免耕,增施有机肥大于单独施用氮肥。秸秆还田配合不同耕作方式是当前的研究热点,对冬小麦-夏玉米轮作下秸

秸秆整地覆盖免耕播种、秸秆粉碎覆盖免耕、秸秆粉碎还田旋耕、秸秆粉碎还田深翻耕和传统耕作等 5 种耕作方式的农田土壤 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 的年排放量监测表明：秸秆粉碎还田旋耕为最佳的耕作方式，既能保证作物的经济效益，同时也能减少温室气体的排放，也可兼顾生态效益^[60]；与不还田相比，秸秆还田增加了 N_2O 的排放强度，且增施氮磷肥进一步刺激 N_2O 的排放量^[61]。

小麦-玉米轮作是华北平原的主要种植制度^[62]。该地区存在严重氮肥施用过量问题，导致土壤 N_2O 排放超过全国农田 N_2O 排放的 50%，严重掣肘绿色农业发展^[63-64]。减少不合理施氮量是降低农田 N_2O 排放的有效措施，冬小麦-夏玉米轮作下施用控释掺混肥，起到了稳产作用，同时减少了 N_2O 累计排放量^[65]；不同配比控释掺混肥均能保持作物产量，且能显著降低小麦-玉米轮作体系下 N_2O 的周年排放总量，降低小麦-玉米轮作体系中 9.6%~11.5% 的周年全球增温潜势和 11.2%~13.8% 的温室气体排放强度^[66]。

综上所述，小麦-玉米轮作模式中，主要排放 N_2O 和 CO_2 等温室气体，是 CH_4 重要的“汇”；采用秸秆粉碎还田旋耕和施用控释掺混肥能降低小麦-玉米轮作的温室气体排放，而不同栽培管理技术对小麦-玉米轮作模式下温室气体排放的影响及其机制仍需深入研究。

1.2.2 小麦-大豆轮作对温室气体排放的影响 小麦-大豆轮作模式主要分布在东北春大豆区、西北春大豆区、黄淮海夏大豆区和伊犁河谷等地区，作物包含小麦以及重要油料和蛋白作物大豆^[67]，同时大豆具有生物固氮和提高土壤肥力等作用。小麦-大豆轮作模式中， N_2O 排放量和 CH_4 吸收量在冬小麦季最高，在大豆生长前期中等，在后期最低^[68]。在无其他因素干扰下，气温为 10~30 °C 时， N_2O 排放量随着气温的升高呈增加趋势，但无明显的线性关系；气温为 10~20 °C 时， CH_4 吸收量与气温呈正相关。对于 CO_2 排放，小麦-玉米-大豆 3 种轮作作物中大豆季 CO_2 排放量最高^[69]。总体而言，小麦-大豆轮作体系下的温室气体排放量通常低于小麦单季种植。小麦-大豆轮作通过减少氮肥使用和增加土壤有机碳含量，显著降低了 CO_2 和 N_2O 的排放量，同时保持了较高的土壤 CH_4 吸收量^[70]，从而有效降低了全球增温潜势和温室气体排放强度。

小麦-大豆轮作模式下，施肥集中在小麦季。不论是小麦季还是大豆季，施用氮肥 1~4 d 后，土壤微生物活动增强，推动了硝化和反硝化作用，致使 N_2O 排放量迅速上升至峰值，随后又迅速降至稳定值^[71]，且大豆季 N_2O 累积排放量要高于小麦季。小麦季施用有机肥，或者施用化肥和有机物配方肥，可显著促进当季 CO_2 、 CH_4 与 N_2O 的排放量^[72]；同时，小麦季施用有机肥对大豆季温室气体排放具有明显后效影响^[73]，可显著提高大豆季 CO_2 与 N_2O 的排放量，而少量施肥的冬小麦-夏大豆轮作可以显著降低 N_2O 排放量^[74]。此外，小麦-大豆轮作中长期全量秸秆还田配减量施氮肥可以有效降低 N_2O 排放量，明显改善土壤理化性质，同时可提高氮肥利用率，对小麦-大豆轮作种植系统中的固氮减排、土壤培肥、稳定产量具有积极作用^[75]。

小麦-大豆轮作模式与其他旱地轮作模式类似，也是 CH_4 重要的吸收“汇”与 N_2O 和 CO_2 的排放“源”。与小麦季、玉米季相比，虽然大豆季 CO_2 的排放量最高，但大豆具有固氮和土壤培肥作用，是一种良好的用养结合方式，保证了大豆的产量，降低了生产投入成本，对中国农业的可持续发展有着重要意义，未来仍需进一步研究该模式 N_2O 和 CO_2 的减排技术和机制。

1.2.3 油菜-玉米轮作对温室气体排放的影响 油菜-玉米轮作模式通过合理种植时间和作物搭配，提高了土地利用率和单位面积产量，还通过油菜的多功能性改善土壤肥力，减少病虫害，实现粮油兼丰、绿色高效等目标。该种植模式在陕西关中、四川、湖北与河南地区得到了广泛的应用。与小麦-玉米轮作模式、小麦-大豆轮作模式、小麦单季种植模式相比，油菜-玉米轮作模式中 CO_2 的排放速率和排放量最低，说明冬油菜-夏玉米轮作过程对农田 CO_2 减排有重要作用，是良好的减排生产模式^[76]。类似于小麦-玉米轮作模式，油菜-玉米轮作中 CO_2 排放量也呈波浪式变化趋势，表现出夏季排放量高于冬季的现象^[77]。适宜的肥料运筹措施，可以减轻油菜-玉米轮作模式中温室气体的排放。有机无机配施可在确保产量提升的基础上，达到减排的目的， N_2O 累积排放量降低 24.42%~44.14%， CO_2 累积排放量有所增长^[78]，但不影响其减排效果。

油菜-玉米轮作是一种可持续发展的减排绿色模式，但目前对油菜-玉米轮作模式的温室气体排放的

研究较少,有待进一步研究其温室气体排放生态生理机制及规律,探索相关固碳减排的高效栽培管理措施。

2 不同作物种植模式下温室气体的减排策略

2.1 水旱轮作模式减排策略

水旱轮作模式在中国南方地区较为常见。从整个轮作系统角度出发,周年尺度上的减排策略应综合考虑旱季作物和水稻季的管理措施。

通过不断优化水旱轮作模式下的肥料类型配置、施肥量以及施肥时间,可以有效减少 CH_4 、 N_2O 等温室气体的排放。秸秆还田可使全球增温潜势降低 4.72%,但 5 a 时间尺度下没有显著差异^[79],而温室气体的排放量随着秸秆还田量的增加而增加。因此,在可溶性碳含量较高的田块,可以通过减少秸秆和粪肥的施用量,或在非水稻季进行秸秆还田,在保障产量的同时减少了温室气体的排放^[80];在前茬旱地作物生长季或休耕期间,提前施用水稻季碳氮比较高的绿肥,也可一定程度上减少温室气体排放的影响^[81]。在秸秆还田基础上,根据土壤氮素残留率和秸秆还田的氮量,采取精准减施氮肥策略,不仅减少氮肥使用量,还降低因过量施氮导致的 N_2O 排放^[82]。施入生物质炭可降低 17.1% 的 N_2O 和 8.9% 的 CH_4 排放,长时间施用可有效降低水旱轮作中温室气体的排放^[83]。对比水旱轮作模式下几种施肥策略发现:短期内,秸秆还田和精准减氮都可以显著减少温室气体排放,但从长期效应看,生物质炭的效果更为显著和持久。因此,考虑综合效果,生物质炭在水旱轮作模式中可能是最有效的温室气体减排措施。

通过改进栽培技术,有助于减少水旱轮作模式下温室气体的排放。不同旱季作物对氮素残留率和温室气体排放有不同的影响。因此,通过优化轮作结构,选择合适的、 N_2O 排放量较低的旱季作物是减少温室气体排放的有效措施。在水稻季,相较于常规移栽方式,免耕直播可以有效降低 CH_4 的排放量,但也增长了 N_2O 的排放量^[84],在技术与设备允许的情况下,免耕直播是一种具有潜力的减排策略。为了尽可能减少水稻季 CH_4 的排放量,可以采取多次搁田的策略,不论是单次还是多次搁田,都能有效降低 CH_4 的排放量^[85]。相比于传统的搁田措施,在水稻 CH_4 排放高峰期进行排水搁田,可以大幅度减少 CH_4 的排放量^[86]。

2.2 旱地轮作模式减排策略

旱地轮作模式在中国北方地区较为普遍,周年尺度上的减排策略同样需要从轮作系统整体出发,考虑不同作物的种植特点和管理措施。

对于旱地轮作,肥料管理对温室气体减排有着十分重要的意义。优化轮作周年的氮肥管理措施,能够显著降低 N_2O 排放。如轮作周年施用控释氮肥可以协同实现 N_2O 的减排和增产,采用控释氮肥一次性施用,可有效减少温室气体排放,且减少劳动力投入。合理减氮与施用控释氮肥结合的方式,也有良好的减排效果^[87]。

通过调整耕作管理与优化轮作种植结构,可以调节旱地轮作系统的温室气体排放量。在旱地轮作中引入豆科作物,通过根瘤菌的固氮作用,减少对化肥氮的依赖,以降低 N_2O 的排放量^[88]。在适宜地区,可将部分耕地用于多年生牧草轮作或绿肥轮作,降低温室气体的排放^[89]。秸秆覆盖可以减少氮素挥发,在冬小麦-夏玉米轮作中显著降低氨挥发量^[90]。综合考虑减排效果和实施的可行性,秸秆覆盖是旱地轮作模式中减少温室气体排放效果最好的措施。增加豆科作物比例和多年生牧草轮作也是有效的减排策略,可以在不同地区和不同条件下灵活应用,以实现最佳的减排效果。

3 展望

3.1 建立合理的温室气体排放评价机制与周年排放评估机制

目前,国内学者在研究中国农业碳足迹时,多采用国际碳足迹因子,而较少使用本地化参数。中国地域广阔,各地条件差异大,实际生产情况与国际标准存在显著差异。有研究发现:使用国际碳排放参数来测算国内碳排放时,偏差较大,难以完全符合中国的实际情况^[91]。因此,在进行国内碳排放研究时,建立适应当地条件的碳足迹参数显得尤为重要。此外,尽管针对水旱轮作模式下温室气体排放研究较多,但大多集中于轮作模式中单一作物单季的温室气体排放^[92],对于轮作整体的温室效应和生态效益

的研究相对不足^[93]。同时，有关综合评价不同轮作模式周年温室效应环境及经济效益的研究也较为有限，优势生态服务功能和可持续发展功能的明确性仍有待提高，亟待开展更加深入细致的研究。

3.2 深入开展不同轮作模式温室气体排放调控机制研究

由于水稻-小麦轮作中产生 CH_4 和 N_2O 等温室气体的原因和情况较为复杂，相关机制研究结果存在差异或不一致的现象，一定程度上阻碍了对水稻-小麦轮作模式中 CH_4 和 N_2O 排放的进一步了解与研究^[36]。以往对水稻-小麦轮作中温室气体排放的研究，多侧重于其中 1~2 种温室气体的排放，缺乏较为全面的、系统的综合排放研究。同时，目前研究主要围绕水稻季温室气体排放的监测，但对水稻-小麦轮作模式下后茬作物冬小麦田间温室气体排放的后效性研究较少^[94]。大多研究侧重于耕作方式对农田温室气体排放的影响，对水稻-小麦轮作模式下农业温室气体整体的评估较为缺乏^[95]。

水稻-油菜轮作模式存在水稻-油菜轮作、水稻-水稻-油菜轮作等不同熟制。在南方水稻-油菜轮作制度下，对双季稻 CH_4 的排放研究较多，鲜有对单季稻 CH_4 的排放报道，特别是在相同的生长季节和地点，还需要更进一步研究单季稻和双季稻排放量之间的差异^[47]。此外，地膜覆盖技术是当今农业生产上常用的方法，但是国内外地膜覆盖对水旱轮作模式的研究较少，成果不显著^[96]。由于农田环境复杂、试验周期长等原因，地膜覆盖对土壤理化性质的改变、对农业温室气体的产生和排放研究较少，且已有报道有关地膜覆盖对水稻-油菜轮作温室气体排放的影响呈现不同结果^[53]，针对地膜覆盖下的水稻-油菜轮作模式有待进一步深入研究。

3.3 亟待加强旱地轮作模式下温室气体排放的研究

由于缺乏旱地轮作模式的长期监测数据，缺少区域估算模型的验证^[70]，今后还需加大对旱地轮作的相关研究。目前，国内外针对旱地农田生态系统温室气体排放的研究主要包括：季节性排放特征、动态变化、原位观测和排放机制、排放通量估算等，且集中于小麦-玉米轮作模式，得到的研究结果差异性很大^[97]。

在小麦-玉米轮作模式中，研究较多的是玉米季免耕条件下小麦季不同耕作方式的对比分析，而对玉米季不同耕作方式的轮作模式报道较少，无法确定该体系下最适宜的轮作方式组合。土壤 pH 能够显著影响农田 N_2O 的排放量^[98]，在碱性土壤环境下，小麦-玉米轮作对农田土壤 N_2O 排放的差异和调控机制并不明确^[99]。在小麦-玉米轮作模式中，秸秆还田的研究对象主要是小麦或玉米单季作物，不同种植季秸秆还田方式对农业温室气体排放的影响研究较少。小麦-玉米轮作模式体系中施氮量严重超标，引起了日益严重的土壤质量退化和温室气体排放量大等问题^[100]，应是今后重点研究的方向。

中国生态循环农业近年来不断发展，但是以豆科作物作为生物固氮基础的可持续轮作模式下的农业温室气体排放的报道还较为少见，目前仍然不清楚以豆科作物生物固氮为基础的轮作方式对 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等主要农业温室气体增汇减排的影响及潜力^[101]。大豆-小麦轮作体系中，施肥只在小麦季进行^[102]，而小麦季施肥对后季作物大豆的温室气体排放影响以及机制研究较为缺乏^[73]。

3.4 明确轮作模式的可持续发展研究方向

粮食生产需要综合平衡产量与环境之间的矛盾，实现可持续发展^[103]。大量研究证明：轮作模式中代表性的作物多样化种植能够明显提高粮食产量，轮作种植模式可增加土壤碳的输入，提高土壤碳的固定效率，降低碳排放^[104-105]，不同地区采用适用的轮作模式可以更加合理、充分地利用光热资源，提高生产力，减轻病虫害的发生，增加生物多样性^[106]。

农田生态系统既是温室气体的“源”，同时也是温室气体的“汇”。未来的生产活动中，应当在不同地区结合当地的轮作模式开展更多相关的研究，不断探索对相关农业温室气体的排放特征和规律。合理高效施肥是当今研究的重点，不合理的施肥方式会造成温室效应加剧等一系列不良的环境问题。在轮作周年系统中减少氮肥施用量进而降低农业碳排放，探索有机肥部分替代化肥对多种农田生态系统的影响，对当前热门的秸秆还田方式进行合理科学的改进。还需要不断加强实地调研考察，积极完善本地数据库与相关温室气体排放预测参数，更加全面且准确地评估农田生态系统的温室效应。

要加强在全球变暖背景下生态系统温室气体排放的研究，不断促进多学科交叉与跨学科结合研究，利用生态学、生物学、土壤肥料学、耕作学、化学等学科，从“土壤-微生物-作物”的角度，进一

步认识农业生态系统温室效应的机制与影响,综合考虑作物产量、经济效益与生态效益,建立环境友好型农业,为农田温室气体的减排措施提供更多强有力的理论依据。

4 参考文献

- [1] 孔德雷,姜培坤. “双碳”背景下种植业减排增汇的途径与政策建议[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(6): 1357–1365.
KONG Delei, JIANG Peikun. Approaches and policy recommendations for reducing emissions and increasing carbon sinks in crop industry under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1357–1365.
- [2] IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 215–294.
- [3] 王兴来,苗淑杰,乔云发. 基于江苏省本地化参数评价稻麦周年轮作系统碳足迹[J]. *生态环境学报*, 2023, **32**(9): 1682–1691.
WANG Xinglai, MIAO Shujie, QIAO Yunfa. Evaluating the carbon footprint of the rice-wheat rotation system based on localized parameters in Jiangsu Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, **32**(9): 1682–1691.
- [4] ZHANG Xiaodan, LIAO Kaicheng, ZHOU Xianghong. Analysis of regional differences and dynamic mechanisms of agricultural carbon emission efficiency in China's seven agricultural regions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(25): 38258–38284.
- [5] PAUSTIAN K, COLE C V, SAUERBECK D, *et al.* CO₂ mitigation by agriculture: an overview [J]. *Climatic Change*, 1998, **40**(1): 135–162.
- [6] GHOSH S, MAJUMDAR D, JAIN M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of north India [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 181–195.
- [7] VOLPI I, RAGAGLINI G, NASSI O DI NASSO N, *et al.* Soil N₂O emissions in Mediterranean arable crops as affected by reduced tillage and N rate [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, **116**(1): 117–133.
- [8] WAHA K, DIETRICH J P, PORTMANN F T, *et al.* Multiple cropping systems of the world and the potential for increasing cropping intensity[J/OL]. *Global Environmental Change*, 2020, **64**: 102131 [2024-12-20]. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2020.102131](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102131).
- [9] LI Yue, CHEN Ji, DRURY C F, *et al.* The role of conservation agriculture practices in mitigating N₂O emissions: a meta-analysis[J/OL]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, **43**(5): 63 [2024-12-20]. DOI: [10.1007/s13593-023-00911-x](https://doi.org/10.1007/s13593-023-00911-x).
- [10] YANG Xiaolin, XIONG Jinran, DU Taisheng, *et al.* Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health[J/OL]. *Nature Communications*, 2024, **15**: 198 [2024-12-20]. DOI: [10.1038/s41467-023-44464-9](https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9).
- [11] CHA-UN N, CHIDTHAISONG A, YAGI K, *et al.* Greenhouse gas emissions, soil carbon sequestration and crop yields in a rain-fed rice field with crop rotation management[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **237**: 109–120.
- [12] YANG Yuhao, TI Jinsong, ZOU Jun, *et al.* Optimizing crop rotation increases soil carbon and reduces GHG emissions without sacrificing yields[J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, **342**: 108220 [2024-12-20]. DOI: [10.1016/j.agee.2022.108220](https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108220).
- [13] 邓姣,李心雨,朱杰,等. 秸秆还田和水旱轮作模式对稻季土壤温室气体排放的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2024, **30**(2): 268–278.
DENG Jiao, LI Xinyu, ZHU Jie, *et al.* Greenhouse gas emissions of rice season soils under different paddy-upland rotation systems [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, **30**(2): 268–278.
- [14] 元生朝. 合理的复种轮作与湖北省稻田耕作制度改革[J]. *作物学报*, 1981, **7**(3): 211–216.
YUAN Shengchao. The suitable crop rotation and the improvement of the cropping system on rice field in Hubei Province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1981, **7**(3): 211–216.
- [15] 李成伟. 稻作模式对稻田温室气体排放及土壤有机碳的影响[D]. 荆州: 长江大学, 2022.
LI Chengwei. *Effects of Rice Cropping Patterns on Greenhouse Gas Emissions and Soil Organic Carbon in Paddy Fields* [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022.
- [16] 帅艳菊. 湖北省主要稻作模式温室气体排放模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.

- SHUAI Yanju. *Simulation Research on Greenhouse Gas Emission of Major Rice-based Cropping Systems in Hubei Province*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.
- [17] 王书伟, 吴正贵, 孙永泉, 等. 太湖地区典型轮作与休耕方式对稻田水稻季 N_2O 和 CH_4 排放量的影响[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(1): 63–71.
- WANG Shuwei, WU Zhenggui, SUN Yongquan, *et al.* Effects of typical crop rotation systems and land fallow on paddy soil N_2O and CH_4 emissions in Taihu Lake Region of China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(1): 63–71.
- [18] BRONSON K F, NEUE H U, ABAO Jr E B, *et al.* Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. residue, nitrogen, and water management [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**(3): 981–987.
- [19] 吴梦琴, 李成芳, 盛锋, 等. 基于 DNDC 模型评估湖北省不同稻作系统不同管理措施温室气体排放的周年变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, **29**(9): 1480–1492.
- WU Mengqin, LI Chengfang, SHENG Feng, *et al.* Assessment of the annual greenhouse gases emissions under different rice-based cropping systems in Hubei Province based on the denitrification-decomposition (DNDC) model [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(9): 1480–1492.
- [20] 邹凤亮, 曹凑贵, 马建勇, 等. 基于 DNDC 模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(9): 1291–1301.
- ZOU Fengliang, CAO Cougui, MA Jianyong, *et al.* Greenhouse gases emission under different cropping systems in the Jiangnan Plain based on DNDC model [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(9): 1291–1301.
- [21] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. 基于 DNDC 模型的川中丘陵区不同轮作制度下稻田 CO_2 排放研究[J]. 中国农业气象, 2011, **32**(4): 530–537.
- SUN Yuanyuan, SUN Yongjian, WANG Ruiting, *et al.* Simulation of CO_2 emission from rice fields under different cropping systems in central Sichuan hilly area with DCDC model [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, **32**(4): 530–537.
- [22] FINN D, KOPITKE P M, DENNIS P G, *et al.* Microbial energy and matter transformation in agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **111**: 176–192.
- [23] 李萍萍, 韩建刚, 陈欣, 等. 我国设施生态农业主要模式及配套技术的研究与实践[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2024, **50**(2): 149–160.
- LI Pingping, HAN Jian'gang, CHEN Xin, *et al.* Research and practice on the main models and supporting technologies of ecological greenhouse agriculture in China [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2024, **50**(2): 149–160.
- [24] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(6): 1611–1621.
- YANG Jianchang, DU Yong, LIU Hui. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze River [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41**(6): 1611–1621.
- [25] 许国春. 不同轮作系统和稻作模式对稻田温室气体排放及氮素平衡的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- XU Guochun. *Effects of Different Rotation Systems and Cultivation Modes on Greenhouse Gas Emissions and Nitrogen Balance in Rice Field*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [26] WEI Huanhuan, LI Yue, ZHU Kun, *et al.* The divergent role of straw return in soil O_2 dynamics elucidates its confounding effect on soil N_2O emission[J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, **199**: 109620[2024-12-20]. DOI: [10.1016/j.soilbio.2024.109620](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109620).
- [27] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(11): 1412–1417.
- LIU Min, YU Wantai, JIANG Zishao, *et al.* A research review on soil active organic carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(11): 1412–1417.
- [28] CHAN A S K, PARKIN T B. Effect of land use on methane flux from soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(3): 786–797.
- [29] 王从. 稻麦轮作生态系统温室气体排放对大气 CO_2 浓度和温度升高的响应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- WANG Cong. *Effects of Elevated CO_2 and Temperature on Greenhouse Gases (CH_4 and N_2O) Emission from Rice-Wheat Rotation Systems*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.

- [30] 陈秋会, 王磊, 席运官, 等. 太湖地区有机与常规种植方式下稻麦轮作农田温室气体短期排放特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(11): 2642–2649.
CHEN Qiuhui, WANG Lei, XI Yunguan, *et al.* Short-term greenhouse gas emissions from organic and conventional rice-wheat rotation cropping systems in Taihu Lake region, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(11): 2642–2649.
- [31] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. *生态环境*, 2007, **16**(6): 1781–1788.
LI Haifang, XIA Hanping, XIONG Yanmei, *et al.* Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: a review [J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(6): 1781–1788.
- [32] 徐华, 蔡祖聪, 李小平, 等. 冬作季节土地管理对水稻土 CH₄ 排放季节变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2000, **11**(2): 215–218.
XU Hua, CAI Zucong, LI Xiaoping, *et al.* Effect of land management in winter crop season on seasonal variations of CH₄ emissions from rice paddy soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(2): 215–218.
- [33] 石吕, 石晓旭, 韩笑, 等. “元麦-稻”轮作体系短期温室气体排放及经济效益评价[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2024-06-17[2024-12-20]. <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2024.0123>.
SHI Lü, SHI Xiaoxu, HAN Xiao, *et al.* Short-term greenhouse gas emission and economic benefit evaluation of ‘naked barley-rice’ rotation system[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024-06-17[2024-12-20]. <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2024.0123>.
- [34] 吴震. 生物质炭减缓稻麦轮作系统 N₂O 和 CH₄ 排放——三年原位观测及机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
WU Zhen. *Three-year in-situ Observations and Mechanisms of Biochar Amendment Mitigating N₂O and CH₄ Emissions in Rice-wheat Rotation System* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [35] GUO Shufang, PAN Junting, ZHAI Limei, *et al.* The reactive nitrogen loss and GHG emissions from a maize system after a long-term livestock manure incorporation in the North China Plain[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2020, **720**: 137558[2024-12-20]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137558](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137558).
- [36] 孔德雷. 有机肥部分替代化肥对稻麦轮作系统甲烷和氮氧化物排放的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
KONG Delei. *Methane and Nitrogenous Gas Emissions from Rice-wheat Rotations under Substitution of Chemical Fertilizer with Manure* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.
- [37] JIANG Mengdie, YANG Niping, ZHAO Jinsong, *et al.* Crop straw incorporation mediates the impacts of soil aggregate size on greenhouse gas emissions[J/OL]. *Geoderma*, 2021, **401**: 115342[2024-12-20]. DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115342](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115342).
- [38] 龚振平, 颜双双, 闫超, 等. 寒地水稻秸秆还田和温度对稻田甲烷排放的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2015, **46**(12): 8–15.
GONG Zhenping, YAN Shuangshuang, YAN Chao, *et al.* Effect of rice straw retention and temperature on methane emission in rice field in cold region [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, **46**(12): 8–15.
- [39] 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 等. 稻田水分管理和秸秆还田对甲烷排放的微生物影响[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(增刊 2): 69–76.
WU Ne, HOU Haijun, TANG Yafang, *et al.* Methane-related microbe influenced by water management and rile straw returning in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(suppl 2): 69–76.
- [40] CHEN Huaihai, LI Xuechao, HU Feng, *et al.* Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(10): 2956–2964.
- [41] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2001, **3**(6): 47–50.
ZOU Guoyuan, ZHANG Fusuo, CHEN Xinping, *et al.* Effect of straw addition on denitrification in upland soil [J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, **3**(6): 47–50.
- [42] 马朋辉, 张会敏, 景明, 等. 秸秆还田对麦田土壤温室气体排放影响的 Meta 分析[J]. *农业机械学报*, 2025, **56**(3): 425–436.
MA Penghui, ZHANG Huimin, JING Ming, *et al.* Meta-analysis on effects of straw returning on greenhouse gas emissions from wheat fields [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, **56**(3): 425–436.
- [43] LIU Chunyan, WANG Kai, MENG Shixie, *et al.* Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous

- oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **140**(1/2): 226–233.
- [44] ZOU Jianwen, HUANG Yao, JIANG Jingyan, *et al.* A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J/OL]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2): GB2021 [2024-12-20]. DOI: [10.1029/2004GB002401](https://doi.org/10.1029/2004GB002401).
- [45] LIU Chang, LU Meng, CUI Jun, *et al.* Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(5): 1366–1381.
- [46] 杨正宇, 李宗明, 李言言, 等. 连续 11 年不同秸秆还田量下稻田甲烷增排效应变化研究[J/OL]. *土壤学报*, 2024-07-22 [2024-12-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.p.20240718.1641.004>.
YANG Zhengyu, LI Zongming, LI Yanyan, *et al.* Variation of the increased CH₄ emissions in paddy fields with straw incorporation across 11 consecutive years[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024-07-22 [2024-12-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.p.20240718.1641.004>.
- [47] 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 等. 稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4701–4710.
CHEN Youde, ZHAO Yang, GAO Dujuan, *et al.* Effects of different rotation patterns of oil-rice on methane and nitrous oxide emissions in rice fields [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4701–4710.
- [48] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 墒沟埋草对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, **24**(4): 27–31.
MA Jing, XU Hua, CAI Zucong, *et al.* Influence of wheat straw buried in ditches on CH₄ and N₂O emissions from rice fields [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, **24**(4): 27–31.
- [49] 向静. 稻油轮作模式土壤培肥、增产增效和温室气体排放的效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
XIANG Jing. *Study on Effects of Rice Tanker Mode on Soil Fertilization, Yield Increase and Efficiency and Greenhouse Gas Emission* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [50] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2362–2367.
LI Chengfang, KOU Zhikui, ZHANG Zhisheng, *et al.* Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(11): 2362–2367.
- [51] 王明, 逢蕾, 马明生, 等. 不同覆盖方式对马铃薯-小麦轮作土壤养分表观平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, **31**(2): 292–304.
WANG Ming, PANG Lei, MA Mingsheng, *et al.* Effects of mulching methods on soil nutrient apparent balance under wheat-potato rotation system in the rain-fed area [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, **31**(2): 292–304.
- [52] QIU Tianyi, SHI Yu, PEÑUELAS J, *et al.* Optimizing cover crop practices as a sustainable solution for global agroecosystem services[J/OL]. *Nature Communications*, 2024, **15**: 10617 [2024-12-20]. DOI: [10.1038/s41467-024-54536-z](https://doi.org/10.1038/s41467-024-54536-z).
- [53] 范志伟. 地膜覆盖稻-油轮作农田中温室气体的排放特征及影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
FAN Zhiwei. *Characteristics of Greenhouse Gases Emission and its Influencing Factors from a Rice-rapeseed Rotation Cropland under Plastic Film Mulching* [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [54] 尚杰, 杨果, 于法稳. 中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, **23**(3): 354–364.
SHANG Jie, YANG Guo, YU Fawen. Agricultural greenhouse gases emissions and influencing factors in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(3): 354–364.
- [55] 陈坚, 吴柳格, 张鑫, 等. 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 Jian, WU Liuge, ZHANG Xin, *et al.* 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.
- [56] WILSON H M, AL-KAISI M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO₂ emissions in central Iowa [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**(3): 264–270.
- [57] USSIRI D A N, LAL R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **104**(1): 39–47.

- [58] 李新华, 董红云, 朱振林, 等. 秸秆还田方式对黄淮海区域小麦-玉米轮作制农田土壤周年温室气体排放的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, **8**(3): 280–287.
LI Xinhua, DONG Hongyun, ZHU Zhenlin, *et al.* Influences of straw returning on greenhouse gas emissions in a wheat-corn rotation farmland of Huang-Huai-Hai region [J]. *Soils and Crops*, 2019, **8**(3): 280–287.
- [59] 张黛静, 胡晓, 马建辉, 等. 耕作和培肥对豫中区小麦-玉米轮作系统土壤氮平衡和温室气体排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(5): 1753–1760.
ZHANG Daijing, HU Xiao, MA Jianhui, *et al.* Effects of tillage and fertility on soil nitrogen balance and greenhouse gas emissions of wheat-maize rotation system in Central Henan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(5): 1753–1760.
- [60] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. *中国生态农业学报*, 2016, **24**(6): 704–715.
YAN Cuiping, ZHANG Yuming, HU Chunsheng, *et al.* Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, **24**(6): 704–715.
- [61] 程伯豪, 白金泽, 刘镇远, 等. 秸秆还田对关中地区麦玉米轮作田 N_2O 排放的短期效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, **29**(6): 1002–1012.
CHENG Bohao, BAI Jinze, LIU Zhenyuan, *et al.* Short-term effects of straw return on N_2O emissions from wheat and maize rotation fields in Guanzhong area [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, **29**(6): 1002–1012.
- [62] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(增刊 2): 135–141.
WANG Wenyan, DONG Wenxu, CHEN Suying, *et al.* Effect of continuously applying controlled-release fertilizers on nitrogen balance and utilization in winter wheat-summer maize cropping system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(suppl 2): 135–141.
- [63] JU Xiaotang, ZHANG Chong. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in north China: a review [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(12): 2848–2862.
- [64] 曹兵, 丁紫娟, 侯俊, 等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, **38**(13): 56–63.
CAO Bing, DING Zijuan, HOU Jun, *et al.* Effects of the blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers combined with dense planting on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in a paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, **38**(13): 56–63.
- [65] 曹兵, 高玮, 李洪杰, 等. 控释掺混肥对麦玉米轮作体系农田温室气体排放和硝态氮残留的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, **40**(7): 240–250.
CAO Bing, GAO Wei, LI Hongjie, *et al.* Effects of controlled-release blended fertilizers on greenhouse gas emissions and nitrate residue in wheat-maize rotation system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, **40**(7): 240–250.
- [66] 高玮, 王学霞, 谢建治, 等. 控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2024, **45**(5): 2891–2904.
GAO Wei, WANG Xuexia, XIE Jianzhi, *et al.* Effects of controlled-release blended fertilizer on crop yield and greenhouse gas emissions in wheat-maize rotation system [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(5): 2891–2904.
- [67] 李洋, 石柯, 朱长伟, 等. 不同轮作模式对黄淮平原潮土区土壤养分及作物产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(2): 312–321.
LI Yang, SHI Ke, ZHU Changwei, *et al.* Effect of different crop rotations on soil nutrients and crop yield in fluvo-aquic soil in Huang Huai Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(2): 312–321.
- [68] 谢军飞. 北京麦豆轮作生态系统 N_2O 排放、 CH_4 吸收观测与模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2003.
XIE Junfei. *The Simulation and Observation Study of N_2O Emission, CH_4 Absorption in Wheat-soybean Rotation Ecosystem in Beijing* [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2003.
- [69] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(4): 395–401.

- LIANG Yao, HAN Xiaozeng, QIAO Yunfa, *et al.* Soil respiration and carbon budget in black soils of wheatmaize-soybean rotation system [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(4): 395–401.
- [70] 孔德杰. 秸秆还田和施肥对麦豆轮作土壤碳氮及微生物群落的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- KONG Dejie. *Effect on Nitrogen and Carbon Content and Microbial Community Structure of Wheatsoybean Rotation Soil under Straw Return and Fertilizer Application Treatments*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [71] TAN Yuechen, WU Di, BOL R, *et al.* Conservation farming practices in winter wheat-summer maize cropping reduce GHG emissions and maintain high yields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, **272**: 266–275.
- [72] QIAO Yunfa, MIAO Shujie, HAN Xiaozeng, *et al.* The effect of fertilizer practices on N balance and global warming potential of maize-soybean-wheat rotations in Northeastern China [J]. *Field Crops Research*, 2014, **161**: 98–106.
- [73] ZHANG Xin, ZHANG Jun, ZHENG Chengyan, *et al.* Significant residual effects of wheat fertilization on greenhouse gas emissions in succeeding soybean growing season [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **169**: 7–15.
- [74] GAO Bing, JU Xiaotang, SU Fang, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 112–124.
- [75] 刘镇远. 长期秸秆还田配施氮肥对麦豆轮作农田土壤理化性质、 N_2O 排放和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- LIU Zhenyuan. *Long-term Straw Retention and Nitrogen Fertilization Effects on Soil Physiochemical Properties, N_2O Emission and Yield of Wheat-soybean Rotation System*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [76] 李昌珍. 基于轮作过程的农田碳源/汇效应研究——以陕西关中灌区为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- LI Changzhen. *The Research of Effects of Carbon Source/sink based on Rotation Fields in Guanzhong Irrigation Region* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [77] 李昌珍, 张婷婷, 冯永忠, 等. 不同轮作方式对免耕农田土壤 CO_2 排放的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(4): 143–149.
- LI Changzhen, ZHANG Tingting, FENG Yongzhong, *et al.* Effects of different rotation modes on soil CO_2 emission fluxes from no-till farmland [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, **42**(4): 143–149.
- [78] 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 等. 覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3426–3438.
- JIANG Hongli, LEI Qi, ZHANG Biao, *et al.* Effects of mulching and application of organic and chemical fertilizer on greenhouse gas emission and water and nitrogen use in summer maize farmland [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3426–3438.
- [79] 马小婷, 隋玉柱, 朱振林, 等. 秸秆还田对农田土壤碳库和温室气体排放的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(6): 14–20.
- MA Xiaoting, SUI Yuzhu, ZHU Zhenlin, *et al.* Research progress on the influence of straw returning to field on soil carbon pool and greenhouse gas emission in farmland [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(6): 14–20.
- [80] WANG Jinyang, CIAIS P, SMITH P, *et al.* The role of rice cultivation in changes in atmospheric methane concentration and the Global Methane Pledge [J]. *Global Change Biology*, 2023, **29**(10): 2776–2789.
- [81] ZHANG Bin, PANG Chengqing, QIN Jiangtao, *et al.* Rice straw incorporation in winter with fertilizer-N application improves soil fertility and reduces global warming potential from a double rice paddy field [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**(8): 1039–1052.
- [82] 胡明明, 李志欣, 丁峰, 等. 不同水旱轮作模式下秸秆还田与精量减氮对水稻产量、氮素吸收利用及土壤氮含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, **30**(8): 1500–1514.
- HU Mingming, LI Zhixin, DING Feng, *et al.* Effects of straw returning and precise N reduction on rice yield, N uptake and utilization and soil N content under different paddy-upland rotation patterns [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, **30**(8): 1500–1514.
- [83] 屈田华, 李永夫, 张少博, 等. 生物质炭输入影响土壤氮素转化与氧化亚氮排放的研究进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(5): 926–936.
- QU Tianhua, LI Yongfu, ZHANG Shaobo, *et al.* Effects of biochar application on soil nitrogen transformation and N_2O

- emissions: a review [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(5): 926–936.
- [84] CHAKRABORTY D, LADHA J K, RANA D S, *et al.* A global analysis of alternative tillage and crop establishment practices for economically and environmentally efficient rice production[J/OL]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 9342[2024-12-20]. DOI: [10.1038/s41598-017-09742-9](https://doi.org/10.1038/s41598-017-09742-9).
- [85] JIANG Yu, CARRIJO D, HUANG Shan, *et al.* Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: a global meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2019, **234**: 47–54.
- [86] SOUZA R, YIN Jun, CALABRESE S. Optimal drainage timing for mitigating methane emissions from rice paddy fields[J/OL]. *Geoderma*, 2021, **394**: 114986[2024-12-20]. DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.114986](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114986).
- [87] 蔡连凤, 王学霞, 王甲辰, 等. 不同施氮措施对麦玉轮作系统 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2024, **45**(10): 6148–6156.
CAI Lianfeng, WANG Xuexia, WANG Jiachen, *et al.* Effects of different nitrogen application measures on N_2O emissions in wheat-maize rotation system [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(10): 6148–6156.
- [88] 李波, 赵财, 殷民兴, 等. 轮作及减氮对绿洲灌区农田温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, **42**(4): 210–220.
LI Bo, ZHAO Cai, YIN Minxing, *et al.* Effects of rotation and nitrogen reduction on greenhouse gas emissions and soil enzyme activities in oasis irrigation areas [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, **42**(4): 210–220.
- [89] 张涛, 何燕. 绿肥还田对贵州黄壤玉米产量及温室气体排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, **50**(9): 70–76.
ZHANG Tao, HE Yan. Impacts of green manure returning to field on maize yield and greenhouse gas emission in yellow soil of Guizhou Province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, **50**(9): 70–76.
- [90] KANG Jiahui, WANG Jingxia, HEAL M R, *et al.* Ammonia mitigation campaign with smallholder farmers improves air quality while ensuring high cereal production [J]. *Nature Food*, 2023, **4**(9): 751–761.
- [91] 胡永浩, 张昆扬, 胡南燕, 等. 中国农业碳排放测算研究综述[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, **31**(2): 163–176.
HU Yonghao, ZHANG Kunyang, HU Nanyan, *et al.* Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, **31**(2): 163–176.
- [92] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(9): 1521–1526.
ZHANG Yuefang, ZHENG Jianchu, CHEN Liugen, *et al.* Effects of different upland crops cultivation on CH_4 and N_2O emissions during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(9): 1521–1526.
- [93] 王赟, 徐昌旭, 周国朋, 等. 连续种植翻压紫云英减施化肥对江西早稻产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, **27**(10): 1735–1745.
WANG Yun, XU Changxu, ZHOU Guopeng, *et al.* Effects of long-term incorporation of milk vetch combined with reduction of chemical fertilizer on yield, quality and soil fertility of early rice in Jiangxi [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(10): 1735–1745.
- [94] 侯会静, 陈慧, 杨士红, 等. 水稻控制灌溉对稻麦轮作农田 N_2O 排放的调控效应[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(12): 125–131.
HOU Huijing, CHEN Hui, YANG Shihong, *et al.* Effects of controlled irrigation of paddy fields on N_2O emissions from rice-winter wheat rotation systems [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(12): 125–131.
- [95] 何昊, 李丹丹, 吴泽, 等. 长江中下游稻麦轮作农业源温室气体排放及减排研究[J]. 环境科学与管理, 2021, **46**(12): 19–23.
HE Hao, LI Dandan, WU Ze, *et al.* Research on greenhouse gas emissions and emission reduction from agricultural sources of rice-wheat rotation in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, **46**(12): 19–23.
- [96] 杨那, 毛晓涵, 李彦, 等. 农田土壤有机碳及活性碳组分对秸秆和地膜覆盖响应的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(4): 2292–2300.
YANG Na, MAO Xiaohan, LI Yan, *et al.* Meta-analysis of soil organic carbon and its active fractions in response to straw and film mulching [J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(4): 2292–2300.

- [97] 翟洋洋, 程云湘, 常生华, 等. 干旱地区农田生态系统土壤温室气体排放机制[J]. *中国农学通报*, 2015, **31**(9): 231–236.
ZHAI Yangyang, CHENG Yunxiang, CHANG Shenghua, *et al.* Mechanism of greenhouse gas emission from agro-ecosystem soil in arid regions [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, **31**(9): 231–236.
- [98] 李金秋, 邵晓辉, 侯广林, 等. 水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3458–3471.
LI Jinqiu, SHAO Xiaohui, GOU Guanglin, *et al.* Effects of water and fertilization management on CH₄ and N₂O emissions in double-rice paddy fields in tropical regions [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3458–3471.
- [99] 白芳芳, 李平, 陆红飞, 等. 减氮对华北地区麦玉轮作农田土壤 N₂O 排放调控机理[J]. *灌溉排水学报*, 2024, **43**(5): 95–104.
BAI Fangfang, LI Ping, LU Hongfei, *et al.* Regulating nitrogen fertilization to reduce N₂O emission in wheat-maize rotation farmlands in North China [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, **43**(5): 95–104.
- [100] 唐继伟, 林治安, 李娟, 等. 潮土小麦-玉米轮作体系氮肥用量阈值及土壤硝态氮年际变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(12): 2246–2252.
TANG Jiwei, LIN Zhian, LI Juan, *et al.* Optimal nitrogen rate and the down movement of soil nitrate nitrogen in wheat-maize rotation system in fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(12): 2246–2252.
- [101] 孙兰. 豆科参与的轮作模式对皖北平原农田温室气体排放和作物产量的影响[D]. 凤阳: 安徽科技学院, 2020.
SUN Lan. *Effects of Soybean Related Rotation Patterns on Greenhouse Gas Emissions and Crop Production in North Anhui Plain* [D]. Fengyang: Anhui Science and Technology University, 2020.
- [102] QIN Wei, WANG Daozhong, GUO Xisheng, *et al.* Productivity and sustainability of rainfed wheat-soybean system in the North China Plain: results from a long-term experiment and crop modelling[J/OL]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 17514[2024-12-20]. DOI: [10.1038/srep17514](https://doi.org/10.1038/srep17514).
- [103] WANG Yanli, WU Pengnian, LI Yuming, *et al.* Optimized planting structures maintain system yield and economic benefits with less nitrogen footprint[J/OL]. *Field Crops Research*, 2024, **305**: 109197[2024-12-20]. DOI: [10.1016/j.fcr.2023.109197](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109197).
- [104] AMELUNG W, BOSSIO D, de VRIES W, *et al.* Towards a global-scale soil climate mitigation strategy[J/OL]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 5427[2024-12-20]. DOI: [10.1038/s41467-020-18887-7](https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7).
- [105] 姚权, 唐旭, 肖谋良, 等. 缓释氮肥配施有机肥对稻麦轮作体系作物生长和土壤养分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(1): 175–184.
YAO Quan, TANG Xu, XIAO Mouliang, *et al.* Effects of slow release nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer on crop growth and soil nutrient content in rice-wheat rotation system [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(1): 175–184.
- [106] 王玉英, 胡春胜, 董文旭, 等. 华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, **30**(4): 651–657.
WANG Yuying, HU Chunsheng, DONG Wenxu, *et al.* Carbon neutralization potential and carbon sequestration efforts in a wheatmaize rotation system in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(4): 651–657.