

# 多样化种植对农田土壤温室气体排放影响的研究进展<sup>①</sup>

司孝刚<sup>1</sup>, 谯祖勤<sup>1,2\*</sup>, 龙治英<sup>1</sup>, 周昌平<sup>1</sup>, 易璇<sup>2</sup>, 陶兴梅<sup>2</sup>

(1 贵州省化工研究院, 贵阳 550002; 2 昆明学院农学与生命科学学院, 昆明 650000)

**摘要:** 多样化种植作为生态农业的重要内容之一, 通过时间和空间维度优化作物配置(轮作、间套作、混作或覆盖作物等), 在提升耕地质量与农业生产力的同时, 对农田土壤温室气体排放产生显著影响。然而, 当前农田土壤温室气体排放对多样化种植的响应规律尚无统一定论, 特别是对多样化种植下农田土壤温室气体排放机理机制的理解还较为局限。基于此, 本文综述了多样化种植对农田土壤温室气体(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)排放的影响和作用机制, 以及多样化种植下影响农田土壤温室气体排放的农艺管理措施。总结表明, 多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响效应主要因作物种类、种植区域、种植年限、作物品种、氮肥施用等因素而异; 多样化种植通过影响土壤微生物、作物氮吸收和外源氮投入、土壤呼吸以及土壤 pH 来影响温室气体排放; 此外, 耕作方式、灌溉管理、氮肥施用及秸秆还田等措施通过不同机理影响农田土壤温室气体排放, 需优化农艺管理策略以促进多样化种植下的温室气体减排。最后, 对未来研究方向进行了展望, 以期对多样化种植在农田土壤固碳减排中的应用提供参考。

**关键词:** 多样化种植; 温室气体; 轮作; 间作; 固碳减排

中图分类号: X511 文献标志码: A

## Research Progresses on Effects of Diversified Planting on Greenhouse Gas Emissions from Farmland Soil

SI Xiaogang<sup>1</sup>, QIAO Zuqin<sup>1,2\*</sup>, LONG Zhiying<sup>1</sup>, ZHOU Changping<sup>1</sup>, YI Xuan<sup>2</sup>, TAO Xingmei<sup>2</sup>

(1 *Guizhou Research Institute of Chemical Industry, Guiyang 550002, China*; 2 *College of Agronomy and Life Sciences, Kunming University 650000, China*)

**Abstract:** As one of the important contents of ecological agriculture, diversified planting optimizes crop configuration (rotation, intercropping, mixed cropping or mulching crops, etc.) through time and space dimensions, which not only improves the quality of cultivated land and agricultural productivity, but also has a significant impact on greenhouse gas emissions from farmland soil. However, there is no unified conclusion on the response of farmland soil greenhouse gas emissions to diversified planting, especially the understanding of the mechanism of farmland soil greenhouse gas emissions under diversified planting is still limited. Based on this, this paper reviewed the effects and mechanisms of diversified planting on greenhouse gas (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) emissions from farmland soils, and the agronomic management measures that affect greenhouse gas emissions from farmland soils under diversified planting. The summary showed that the effect of diversified planting on greenhouse gas emissions from farmland soil mainly varies due to factors such as crop species, planting area, planting years, crop varieties, and nitrogen fertilizer application. Diversified planting affects greenhouse gas emissions by affecting soil microorganisms, crop nitrogen uptake and exogenous nitrogen input, soil respiration, and soil pH; in addition, tillage methods, irrigation management, nitrogen fertilizer application and straw returning affect greenhouse gas emissions from farmland soil through different mechanisms, and agronomic management strategies need to be optimized to promote greenhouse gas emission reduction under diversified planting. Finally, the future research directions were prospected, in order to provide reference for the application of diversified planting in farmland soil carbon sequestration and emission reduction.

**Key words:** Diversified planting; Greenhouse gases; Rotation; Intercropping; Carbon sequestration

①基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]—一般 017)和贵州科学院青年基金项目(黔科院 J 字〔2023〕10 号)资助。

\* 通信作者(425739318@qq.com)

作者简介: 司孝刚(1994—), 男, 贵州遵义人, 本科, 工程师, 主要研究方向为新型绿色肥料研究与应用、耕地质量提升及环境保护。

E-mail: 215580738@qq.com

人为活动驱动的温室气体排放正引发全球气候系统的非线性演变，严重威胁粮食生产的稳定，并加速全球生物多样性的减少。研究表明，农业系统是人为温室气体排放的主要来源，约占温室气体总排放量的 20%~35%<sup>[1]</sup>，而我国农业温室气体排放量占全球总排放量的 11%<sup>[2]</sup>。据统计，我国 4 种粮食作物(小麦、水稻、玉米和大豆)供应链的温室气体排放量从 1990 年的  $3.45 \times 10^9 \text{ t CO}_2\text{-eq}$  增至 2021 年的  $4.56 \times 10^9 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ <sup>[3]</sup>。从作物对温室气体排放特定贡献角度来看，玉米、水稻和小麦的温室气体排放强度位居各类作物前列<sup>[4]</sup>。可见，我国因农业生产而引起的气候和环境变化值得关注。农田土壤是农业温室气体重要排放源之一，据有关数据显示，我国稻田  $\text{CH}_4$  排放占全国农业活动温室气体排放总量的 39.1%<sup>[5]</sup>；农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量约为 0.19~0.53 Tg/a，占我国农业源释放的温室气体总量的 19%~25%<sup>[6]</sup>。另外，土壤中有有机碳输出是  $\text{CO}_2$  排放的主要来源，据估算，我国农田土壤(0~1 m)的碳库储量为 85~95 Pg<sup>[7]</sup>。土壤碳库的微小变化也可能对  $\text{CO}_2$  排放产生强烈影响，农田既是碳源，也可作碳汇。目前，长期单一、粗放、高强度的耕地资源集约化利用方式及过量的化肥农药施用等不合理的农业生产方式造成温室气体排放增加，将农田变成碳源<sup>[8]</sup>，同时还削弱土壤的固碳能力，使农田无法发挥其作为碳汇的潜力<sup>[9]</sup>。基于农业生态系统碳中和目标导向，亟须通过农艺措施的系统性优化与技术创新，突破农田土壤有机碳库容量，减少温室气体的排放，这对重构我国环境友好型农业生产体系及农业可持续发展具有深远意义。

多样化种植指在时间和空间的尺度上，在同一地块通过合理的轮作、间套作、混作或覆盖等方式增加作物多样性，实现提高生物多样性、系统生产力和生态服务功能的种植模式<sup>[10]</sup>；其核心在于通过时空维度优化作物配置，构建不同于单作系统的具有多维度增效特征的复合生态系统。多样化种植主要内涵为作物多样化、种植方式多样化以及多功能属性，其在生物多样性保育、生态系统服务功能增加及耕地质量提升等方面发挥重要作用<sup>[10-11]</sup>。大量的研究已证实，和单一种植体系相比，多样化种植具有实现农田土壤温室气体减排的优势。比如，Shen 等<sup>[11]</sup>对玉米 || 大豆间作系统连续 3 年温室气体排放的观测发现，与玉米单作相比，间作系统土壤中温室气体总排放量显著减少。与连作相比，改进轮作可在提高作物产量的同时减少温室气体排放<sup>[12]</sup>。在碳中和背景下，有关多样化种植对土壤温室气体排放影响的研究已成为热点。通过在

“Web of Science”数据库中检索发表于 2014—2024 年主题词为(intercropping 或 rotation 或 cover crops)、(soil 或 soils) 和 ( $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{CH}_4$ ) 的文献数量，发现多样化种植与土壤温室气体排放有关的研究论文产出量在近 3 年逐年上升(图 1)；在发文数量排名前十位的国家中，中国学者的贡献度领先于其他国家(图 2)，彰显了我国在农业碳中和研究领域的学术引领地位。这种科研布局既反映我国对《巴黎协定》的实践响应，也契合全球农业绿色转型的战略需求。但需关注的是，受气候条件、地形地貌及土壤异质性等多维度生态因子的影响，不同作物种植可能会表现出不同的温室气体排放强度。相比单一种植体系，多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响效应是抑制还是促进目前也尚未形成普适性结论。因此，系统解析农田土壤温室气体排放对多样化种植的响应特征对促进农业系统温室气体减排至关重要。

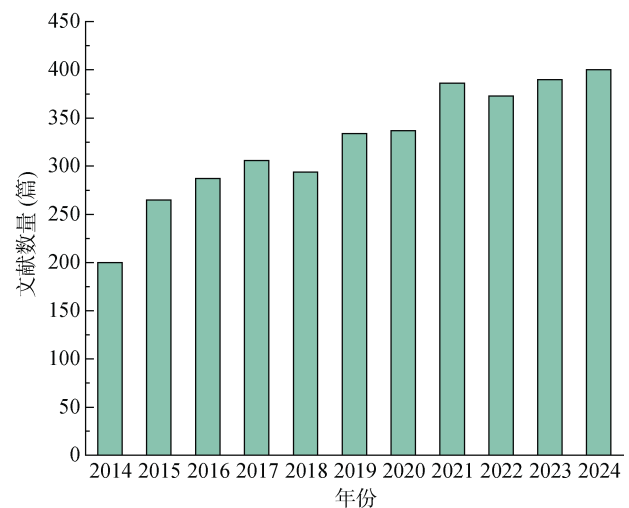


图 1 2014—2024 年多样化种植与土壤温室气体排放相关论文发表数量

Fig. 1 Numbers of published papers related to diversified planting and soil greenhouse gas emissions from 2014 to 2024

为此，本文基于前人研究成果，总结了多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响，解析其内在机制，并阐述了相关农艺管理措施的作用。最后，对未来的研究方向进行了展望，以期优化农业生态系统的碳中和功能提供理论依据。

## 1 多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响

### 1.1 多样化种植对稻田土壤 $\text{CH}_4$ 排放的影响

农田土壤中稻田被认为是  $\text{CH}_4$  排放的重要来源，多样化种植对  $\text{CH}_4$  排放的影响研究主要集中于厌氧环

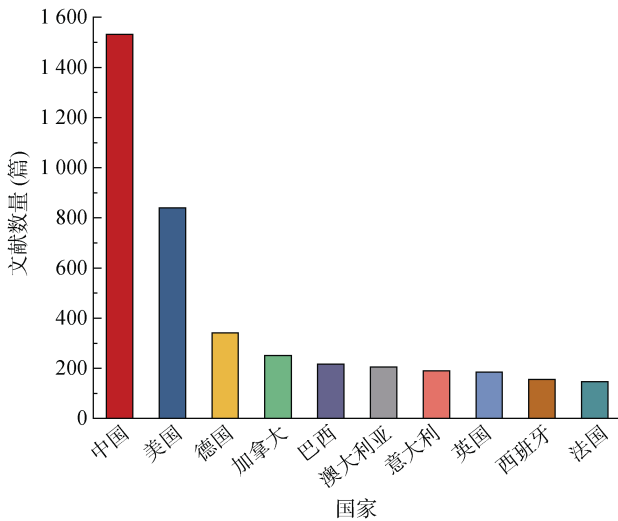


图 2 2014—2024 年多样化种植与土壤温室气体排放研究论文发表量前十位的国家

Fig. 2 Top ten countries in numbers of published papers on diversified planting and soil greenhouse gas emissions from 2014 to 2024

境的稻田中。由表 1 可见,在稻田土壤中,相比于单作,多样化种植对  $\text{CH}_4$  排放的影响因作物种类而异,表现为排放增加、无显著影响和排放减少 3 种情况。同一作物种类,如稻-麦、稻-油轮作系统,相比于水稻单作,对农田土壤  $\text{CH}_4$  排放的影响在不同试验地点或区域的研究结果不尽相同<sup>[13, 15-16, 19]</sup>。这可能与不同种植地点或区域之间的气候条件、土壤类型、土壤性质(如水分含量、温度<sup>[16]</sup>、氧化还原电位<sup>[22]</sup>、pH)等不同有关。当前研究发现,单作体系中加入 C/N 较低的十字花科作物或豆科绿肥作物会减少稻田  $\text{CH}_4$  排放<sup>[17, 19-20, 23]</sup>。这是由于 C/N 低的作物,其残留物更易被分解,有助于植物吸收养分的同时,减少土壤中不稳定碳的累积,从而降低产甲烷菌的碳源供应,最终导致  $\text{CH}_4$  排放减少<sup>[17]</sup>。稻田土壤  $\text{CH}_4$  排放对多样化种植响应特征在试验地点、作物种类、田间管理措施均相同的情况下还受作物种植年限的影

表 1 多样化种植对稻田土壤  $\text{CH}_4$  排放的影响  
Table 1 Effects of diversified planting on  $\text{CH}_4$  emission from paddy soils

种植模式	试验地点	试验年限(a)	土壤类型	多样化种植相比单作 $\text{CH}_4$ 排放量的变化率(%)	参考文献
水稻单作	湖北省江陵县	1	潞育水稻土		[13]
水稻-油菜轮作				-57.8	
水稻-小麦轮作				/	
常规早稻-杂交晚稻-冬闲	湖南省益阳市	1	紫潮泥		[14]
常规早稻-杂交晚稻-油菜轮作				+17.6	
水稻单作	江苏省南京市	1	黄棕壤		[15]
紫云英-水稻轮作				-18.9	
小麦-水稻轮作				+44.8	
油菜-水稻轮作				/	
蚕豆-水稻轮作				/	
水稻单作	四川省绵阳市	3	紫色土		[16]
水稻-小麦轮作				-26.8	
水稻单作	江西省南昌市	2	红黏土		[17]
水稻-红薯  大豆轮间作				-82.3	
水稻-紫云英  大豆轮间作				-26.9	
水稻单作	江苏省常熟市	6	乌栅土		[18]
紫云英-水稻轮作				+28.9	
小麦-水稻轮作				+58.3	
水稻单作	重庆市永川区	3	灰棕壤		[19]
水稻-油菜轮作				-87.6	
水稻-蚕豆轮作				-42.8	
水稻-萝卜轮作				-142.8	
水稻-冬闲	重庆市北碚区	1	紫色水稻土		[20]
水稻-油菜轮作				-68.8	
水稻-儿菜轮作				-87.9	
油菜-水稻轮作	江西省南昌市	1	红黏土		[21]
油菜-早稻-甘薯  晚大豆轮间作				-47.0	

注:种植模式中“-”表示轮作,“||”表示间作; $\text{CH}_4$  排放量的变化率中数值前“+”表示排放增加、“-”表示排放减少,“/”表示无明显变化。下同。

响, 种植年限不同, 多样化种植对  $\text{CH}_4$  排放量的影响存在差别<sup>[17, 21]</sup>。

多样化种植对稻田  $\text{CH}_4$  排放的作用还受作物(水稻)品种的影响。有研究发现, 品种混栽相比于单作会在一定程度上提高  $\text{CH}_4$  排放通量<sup>[24]</sup>。也有研究发现, 相比水稻品种单一种植, 不同水稻品种间作可显著提高或降低  $\text{CH}_4$  排放, 具体品种间作组合还需仔细筛选<sup>[25]</sup>。通常情况下, 选择收获指数(HI)高或生物量高的品种进行间作, 可能会促进  $\text{CH}_4$  减排。这是因为: 高 HI 品种分配给籽粒的光合产物数量增加, 从而减少分配给根沉积物的数量, 进而减少产甲烷菌可利用的底物<sup>[26]</sup>; 而植物生物量高的品种, 其植株根系通常较发达, 可以释放更多的  $\text{O}_2$ , 促进甲烷氧化菌氧化, 减少  $\text{CH}_4$  排放<sup>[27]</sup>。

施肥(特别是氮肥的施用), 也会影响多样化种植对稻田  $\text{CH}_4$  排放的作用效果。比如, 王书伟等<sup>[28]</sup>对比了太湖地区不同轮作方式对稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响, 结果表明, 在不施氮肥水平下, 紫云英-水稻和油菜-水稻轮作的  $\text{CH}_4$  累积排放量显著低于水稻单作; 而在施氮  $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$  水平下, 水稻单作与紫云英-水稻和油菜-水稻轮作的  $\text{CH}_4$  累积排放量无显著差异。多样化种植下优化氮肥施用量及肥料种类可促进稻田土壤  $\text{CH}_4$  减排<sup>[29]</sup>。

## 1.2 多样化种植对农田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

多样化种植对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响尚存在争议。稻田典型轮作体系(水稻-小麦、水稻-油菜轮作)相较于水稻连作, 有研究表明会减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[13]</sup>; 也有研究显示  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加<sup>[14-15, 28]</sup>或无显著影响<sup>[18]</sup>。这可能主要源于不同试验间作物氮肥施用量的区域差异性, 因为氮肥施用直接为硝化和反硝化微生物提供底物, 是农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的主要物质来源, 显著影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 二者之间呈指数关系<sup>[30]</sup>。除氮肥施用量的差异外, 不同种植区域之间的水热条件差异以及土壤本身的异质性(如通气性、酸碱度)和农田水管理、耕作制度等也可能影响稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[16, 18-19]</sup>。

在单一种植系统中通过轮作或者间作引入豆科/绿肥作物的种植体系, 是当前农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  减排研究较多、应用最为广泛的多样化种植体系。诸多研究结果表明, 在同一施肥制度下包含豆科/绿肥作物的多样化种植体系, 相较于单一种植体系, 会显著减少农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[13, 31-35]</sup>。这可能与包含豆科/绿肥作物的多样化种植体系下氮利用效率的提高、氮肥投入量的减少有关<sup>[32-33]</sup>。包含豆科/绿肥作物的多样化种植体系对农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的作用效果同样受到氮肥施用的

影响。Wang 等<sup>[36]</sup>通过连续 5 年的田间试验表明, 在不施氮肥水平下, 玉米单作与玉米 || 大豆间作处理间的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量无显著差异, 在施氮  $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$  及  $360 \text{ kg}/\text{hm}^2$  水平下, 玉米 || 大豆间作下的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量均显著低于玉米单作。

相同试验条件下, 粮食豆科作物对  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响也存在差异。例如, Huang 等<sup>[37]</sup>通过 2 年的田间试验对比了单一种植玉米、玉米 || 花生和玉米 || 大豆间作对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响。结果发现, 与玉米单一种植相比, 玉米 || 大豆间作  $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著降低, 而玉米 || 花生间作的研究结果却相反。相较于粮食豆类, 在种植体系中纳入豆科牧草可能会更促进土壤  $\text{N}_2\text{O}$  减排<sup>[38]</sup>。农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放对多样化种植响应规律还与种植年限有关。例如, Yu 等<sup>[31]</sup>通过连续 8 年田间试验发现, 在相同条件下, 多样化间作较单作在前 3 年能显著减少土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 后 5 年中单作与间作之间的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量无显著差异。包含豆科作物的多样化种植系统中豆科作物的品种也能显著影响  $\text{N}_2\text{O}$  的排放特征。比如, 相比大麦单作, 大麦 || 豌豆(*Zero4*)间作 3 年内的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量显著降低, 而大麦 || 豌豆(*Nitouche*)间作却显著增加<sup>[39]</sup>。

除此之外, 有研究发现, 将豆科/绿肥作物引入单一种植系统进行多样化种植对农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放并无显著影响<sup>[40-42]</sup>(表 2)。究其原因, 有学者认为, 这可能是因为降水量对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响相较于种植模式具有更强的主导性, 土壤含水量与  $\text{N}_2\text{O}$  排放呈显著相关, 降水量显著影响土壤含水量, 在同一试验区域降水量一致的情况下, 种植方式的改变并不会影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[41]</sup>; 也有研究认为, 这是因为氮肥施入的影响大于种植模式的影响<sup>[44]</sup>。

也有研究表明, 将豆科/绿肥作物引入单一种植系统进行多样化种植会增加农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放(表 2)。例如, 玉米 || 大豆间作和毛叶苕子轮作体系相比于玉米及大豆单作,  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量显著增加<sup>[45]</sup>。这可能是因为毛叶苕子从土壤中吸收的氮较少, 促进了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的直接排放。在包含豆科作物增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放的稻田土壤上, Zhong 等<sup>[17]</sup>在稻田连续 2 年的田间试验发现, 与紫云英-水稻、油菜-水稻轮作相比, 紫云英-水稻 || 红薯-大豆轮间作及油菜-水稻 || 红薯-大豆轮间作系统的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量均显著增加。3 年的田间试验中, 水稻-蚕豆轮作处理相比于水稻单作的  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量显著增加<sup>[19]</sup>。相比于水稻单作, 包含豆科作物的稻田多样化种植系统中增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放的机制可能是: ①多样化种植系统中作物的需氮量高于单作, 氮

表 2 多样化种植对农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响  
Table 2 Effects of diversified planting on N<sub>2</sub>O emission from farmland soils

种植模式	试验地点	试验年限(a)	土壤类型	多样化种植相比单作 N <sub>2</sub> O 排放量的变化率(%)	参考文献
水稻单作	江苏省常熟市	6	乌栅土		[18]
紫云英-水稻轮作				/	
小麦-水稻轮作				/	
水稻单作	重庆市永川区	3	灰棕壤		[19]
水稻-油菜轮作				+32.0	
水稻-蚕豆轮作				+22.8	
水稻-萝卜轮作				+112.4	
玉米单作	云南省昆明市	8	铁铝土		[31]
玉米    马铃薯间作				-14.5	
小麦-玉米轮作	河北省栾城区	6	砂壤土		[32]
花生→小麦-玉米轮作				-30.0	
大豆→小麦-玉米轮作				-42.0	
甘薯→小麦-玉米轮作				-49.0	
玉米单作	陕西省长武县	2	黑垆土		[33]
玉米    大豆间作				-13.0	
冬小麦单作	河南省新乡市	5	褐潮土		[43]
冬小麦-夏玉米轮作				+49.5	
冬小麦-夏大豆轮作				+33.5	
棉花单作	河南省安阳市	3	砂壤土		[40]
二月兰棉花套作				-58.0	
二月兰毛叶苕子套作				+48.3	
玉米单作	甘肃省武威市	3	灌漠土		[41]
小麦    玉米间作				-12.3	
棉花单作	河北省栾城区	3	砂质壤土		[42]
黑麦草-棉花→花生→冬小麦-夏玉米轮作				/	

注：种植模式中“→”表示跨年轮作。

肥施入量的增加促进了 N<sub>2</sub>O 排放；②在非稻季种植旱地作物过程中灌溉管理易造成土壤干湿交替，增加 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[46]</sup>。

### 1.3 多样化种植对农田土壤全球增温趋势(GWP)的影响

由于农田土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放存在此消彼长的关系<sup>[47]</sup>，因此，还需采用全球增温趋势(GWP)综合评估多样化种植模式下农田温室气体排放导致的增温效应。100 年尺度上，单位分子 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的增温趋势分别是 CO<sub>2</sub> 的 27.9 倍和 273 倍<sup>[48]</sup>，GWP 通常表示 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的综合作用。多样化种植对 GWP 的作用效果受到作物类型的影响，通常情况下，包含豆科/绿肥的多样化种植系统相比单一种植在同一试验区域下，对降低农田系统的综合净增温潜势不会带来负面影响，而粮食作物比如玉米、大麦、水稻之间相互多样化种植下的 GWP 要大于单作，因粮食作物之

间相互多样化种植时氮肥投入量多于单作，而包含豆科/绿肥的多样化种植体系则可能会减少氮肥用量<sup>[37, 49]</sup>。

GWP 对多样化种植响应特征还受到水肥管理的影响，因为水肥管理显著影响 N<sub>2</sub>O 及 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[13]</sup>，而这两种温室气体的全球增温潜势强<sup>[48]</sup>，对温室效应的贡献显著。此外，多样化种植对 GWP 的作用效果也受种植区域的影响，同一多样化种植体系采用相同的水肥管理，在不同试验区域由于气候条件和土壤特性的差异，对 GWP 的影响结果不同<sup>[15, 28]</sup>。而根本上，多样化种植对 GWP 的影响效果，主要还是取决于温室气体对 GWP 的相对贡献大小。在稻田土壤上，CH<sub>4</sub> 的排放贡献了全球变暖潜势的大部分，N<sub>2</sub>O 排放影响很小，因此缓解 GWP 的关键在于 CH<sub>4</sub> 减排。例如，Yin 等<sup>[19]</sup>在重庆市连续为期 3 年的田间试验表明，水稻-油菜、水稻-蚕豆轮作相比水稻单作虽然增加了稻田 N<sub>2</sub>O 排放，但显著减少了 CH<sub>4</sub> 排放，最终降低了农

田土壤的综合净增温潜势。大麦-水稻轮作相比水稻单作，虽对 N<sub>2</sub>O 排放无显著影响，但显著增加了 CH<sub>4</sub> 排放量，使得 GWP 显著提高<sup>[18]</sup>。

旱地生态系统的 GWP 主要由 N<sub>2</sub>O 排放主导，减少其排放对缓解 GWP 至关重要<sup>[38]</sup>。Shen 等<sup>[11]</sup>通过在华北平原连续 3 年田间试验表明，与玉米单作及大豆单作相比，在施肥量一致的情况下，玉米||大豆间作虽然对 CH<sub>4</sub> 排放无显著影响，但减少了 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放，最终使得间作系统的 GWP 比单作显著降低。Lee 等<sup>[50]</sup>连续 2 年的小区试验发现，与大麦单作相比，大麦-毛叶苕子混播在显著提高 CO<sub>2</sub> 排放的同时显著降低了 N<sub>2</sub>O 排放，同时，对 CH<sub>4</sub> 排放无显著影响，最终使得混播系统的 GWP 显著低于单作。这主要是因为 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 273 倍<sup>[48]</sup>。目前，同时测定单一种植和多样化种植下 3 种温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)排放的研究相对较少，而如果同时测定这 3 种气体，则可以通过计算 GWP 更加准确地评估多样化种植的减排效应。

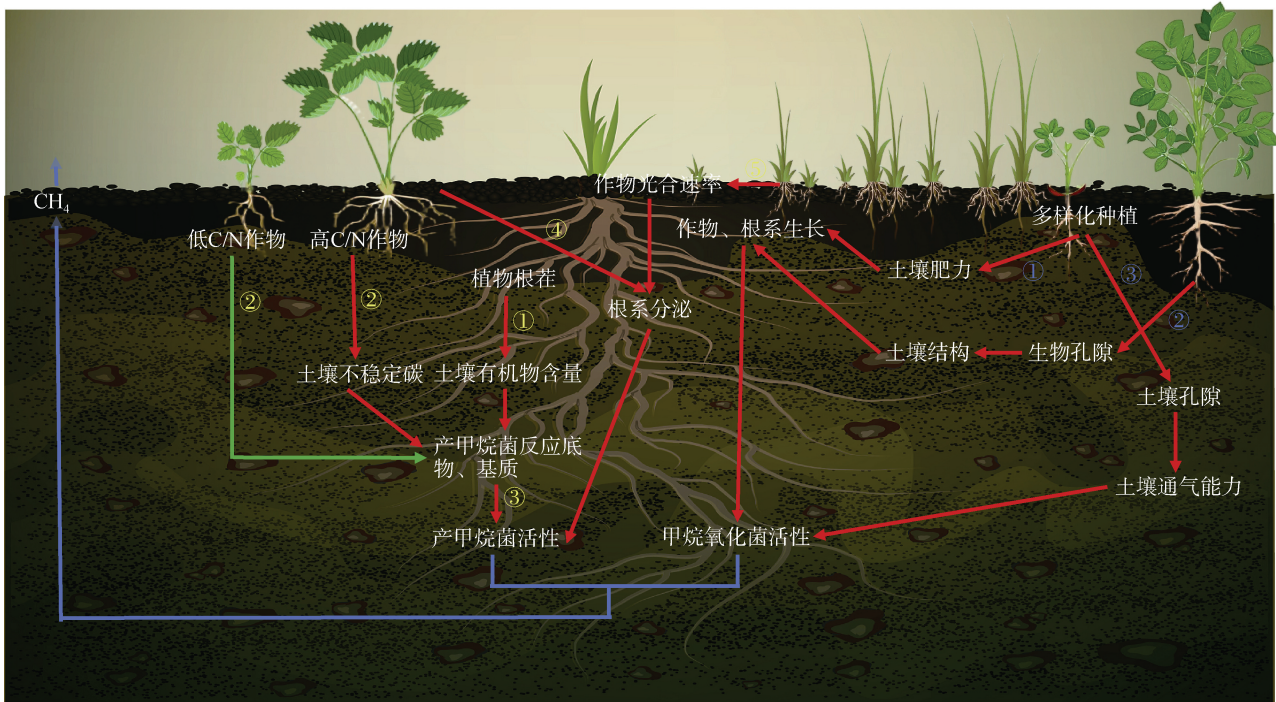
## 2 多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响机制

农田土壤中，温室气体主要来源于微生物分解、农田管理、土壤和植物呼吸等过程，其产生与排放通常受到土壤微生物、外源氮输入、土壤结构、土壤 pH

以及作物生理特性等多个因素的调控<sup>[7-8]</sup>。其中，土壤微生物和外源氮输入对 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 的影响尤为显著。多样化种植主要是通过影响土壤微生物、作物氮吸收和外源氮投入、土壤呼吸及土壤 pH 进而影响农田土壤中 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 排放。

### 2.1 多样化种植对土壤微生物的影响

土壤微生物作为土壤碳氮循环的重要驱动因素，直接影响温室气体的排放。农田土壤 CH<sub>4</sub> 的产生及排放主要由土壤中的产甲烷菌和甲烷氧化菌共同调控，抑制产甲烷菌的繁殖或者激发甲烷氧化菌的增长是控制 CH<sub>4</sub> 排放的关键。多样化种植影响产甲烷菌的机制包括(图 3)：①相比单一种植，多样化种植有较多的植物根茬留在田里，翻耕还田或返回土壤后补充了稻田土壤有机物含量，为产甲烷菌提供了大量的反应底物和基质，增加了产甲烷菌活性，进而增加 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[13]</sup>。②在单一种植体系中引入植物生物量碳氮比较低的豆科/绿肥作物，其残留物更易于被微生物利用，也更有助于植物吸收，减少了土壤中产甲烷菌的反应底物和基质的可用性<sup>[51]</sup>，进而减少产甲烷菌活性，降低 CH<sub>4</sub> 排放；而引入高碳氮比或有机碳含量的作物残渣可能会增加土壤中不稳定碳的浓度，为产甲烷菌提供足够的碳源，进而刺激厌氧条件下产甲烷菌活性的增长，增加 CH<sub>4</sub> 排放。③多样化种植影响产甲烷菌基因丰度，改变土壤产甲烷菌和甲烷营养菌群落组成，最终影响



(图中绿色箭头表示减少/降低，红色箭头表示增加/促进，蓝色箭头表示影响；下同)

图 3 多样化种植对稻田土壤 CH<sub>4</sub> 排放的影响机制

Fig. 3 Mechanism of the impact of diversified planting on CH<sub>4</sub> emission from farmland soil

稻田  $\text{CH}_4$  排放<sup>[51]</sup>。例如, 相比水稻单一种植, 水稻-紫云英-大豆轮作可显著降低产甲烷细菌 *mcrA* 基因的丰度, 最终减少  $\text{CH}_4$  排放<sup>[17]</sup>。相比单作模式, 作物品种多样化种植显著减少了产甲烷古菌 *mcrA* 基因丰度的增加, 减少  $\text{CH}_4$  排放<sup>[25]</sup>。④相比作物单一种植, 作物间作会通过根系分泌物向农田土壤中释放出一些有抑菌作用, 特别是能够抑制产甲烷菌及与甲烷形成有关的其他中间体的微生物的活性, 进而影响  $\text{CH}_4$  排放<sup>[52]</sup>。⑤作物品种混栽相比于单作模式, 提高了作物光合速率, 促进根系分泌, 进而促进产甲烷古菌活性, 提高产甲烷古菌数量, 增加  $\text{CH}_4$  排放<sup>[24]</sup>。

此外, 多样化种植对甲烷氧化菌的影响也不容忽视, 其机制包括: ①包含豆科作物的多样化种植系统中, 豆科作物有一定的培肥作用, 稻田土壤肥力显著提高, 水稻的植株和根系生长旺盛, 激发了甲烷氧化菌的快速增长, 将更多的  $\text{CH}_4$  氧化, 从而降低了  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[15]</sup>。②相比于单一种植体系, 在多样化种植体系中, 增加丰根系的豆科/绿肥覆盖作物可以通过形成生物孔隙(根通道)改善土壤结构, 为根系生长减少阻力, 土壤含氧量增加, 进而促进甲烷氧化菌的快速增长,  $\text{CH}_4$  被氧化, 排放量显著下降<sup>[53]</sup>。③相比连作, 多样化种植可以增加土壤总孔隙度、毛管孔隙度和田间持水量, 显著改善土壤孔隙状况, 增强土壤通气能力<sup>[54]</sup>, 这使得土壤氧气得到输送, 甲烷氧化菌活性增加, 最终减少  $\text{CH}_4$  排放。

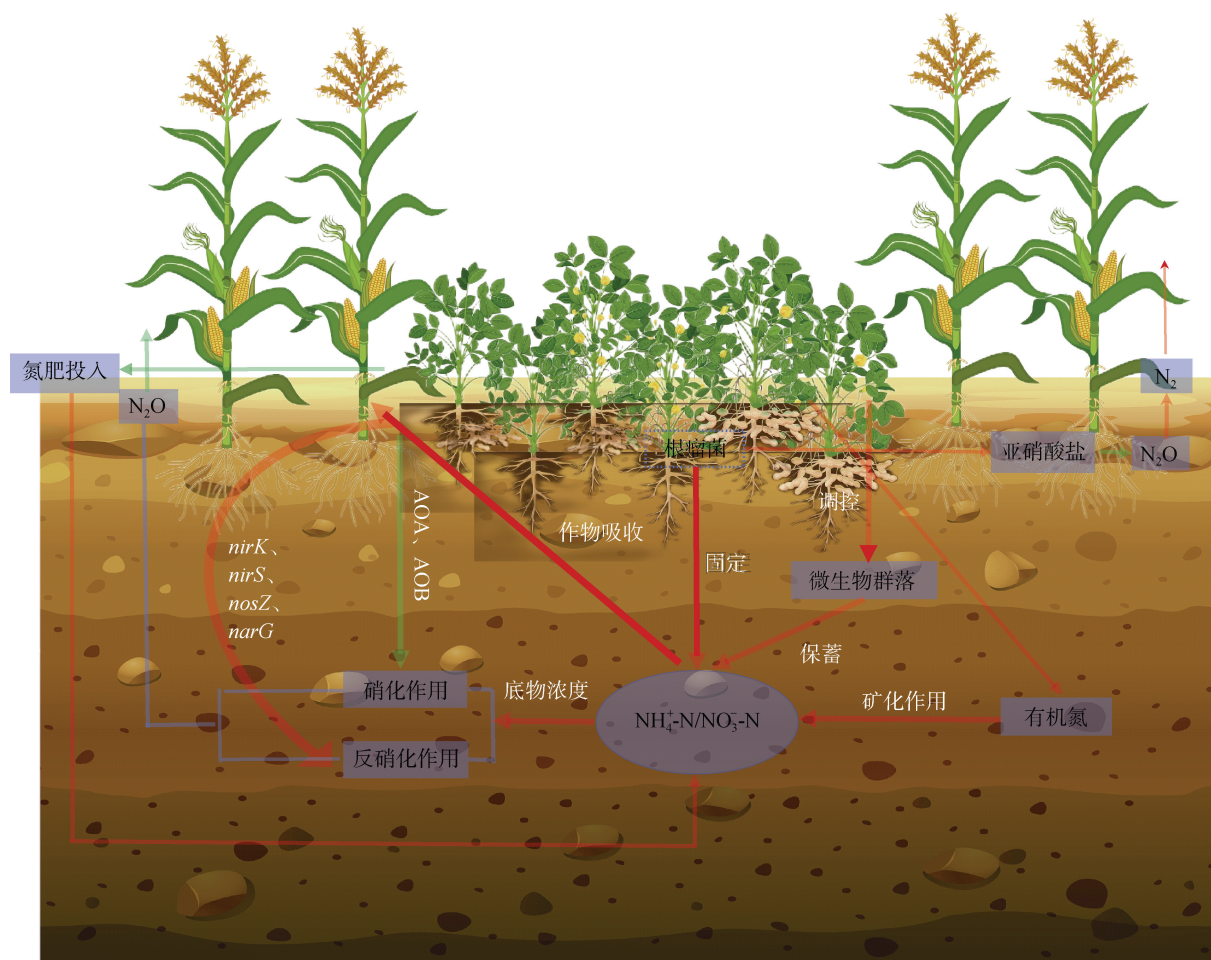
$\text{N}_2\text{O}$  的产生由氨氧化细菌(AOB)、氨氧化古菌(AOA)和完全氨氧化菌 3 组氨氧化微生物介导的好氧条件下的硝化作用, 以及由反硝化细菌功能基因 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 介导的厌氧条件下的反硝化作用共同主导<sup>[55-56]</sup>。多样化种植通过影响功能基因减少土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的机制, 可以归纳为以下几点: ①由 *nosZ* 基因编码的携带并表达  $\text{N}_2\text{O}$  还原酶的微生物可将  $\text{N}_2\text{O}$  还原为  $\text{N}_2$ , 因此提升 *nosZ* 基因丰度可减少农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[57]</sup>。研究表明, 与单作相比, 多样化种植可显著增加 *nosZ* 基因丰度, 从而降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[31]</sup>。②在单作系统中通过引入豆科/绿肥作物进行多样化种植, 可显著增加固氮基因(*nifH*)的相对丰度, 同时显著降低反硝化基因(如 *narG*)的相对丰度<sup>[58]</sup>。③抑制 *nirK*、*nirS* 基因的功能活性可减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放。与大豆连作相比, 大豆-玉米轮作体系中 *nirS* 和 *nirK* 基因的丰度分别下降了约 2% 和 11%<sup>[59]</sup>; 与玉米连作相比, 大豆-玉米轮作体系中(*nirS+nirK*)/*nosZ* 比值降低了约 10%<sup>[60]</sup>。④抑制由携带 *amoA* 基因的 AOB 和 AOA 介导的氨氧化过程是限制土壤产生硝化作用的关键<sup>[61]</sup>。

相比于单作, 多样化轮作可显著降低土壤中 AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因丰度<sup>[62]</sup>。

多样化种植通过影响土壤微生物群落从而减少土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的作用机制主要包括: ①多样化种植改善了土壤微生物群落结构, 增加了参与氮循环的微生物丰度, 如放线菌门、变形菌门和拟杆菌门<sup>[63-64]</sup>; 这些微生物能够调节土壤硝酸盐浓度、提高土壤氮素的利用率以及土壤固氮能力<sup>[65]</sup>, 进而实现  $\text{N}_2\text{O}$  的减排。②固氮菌是一种自由生活的、固氮的需氧土壤细菌, 能够为植物提供相当一部分的土壤氮, 其数量的增多有利于减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[66]</sup>。大豆-玉米轮作可使固氮菌数量较大豆连作显著增加<sup>[60, 67]</sup>。另有研究发现, 豆科作物根瘤菌占农田生物固氮总量的 59.17%<sup>[68]</sup>。因此, 在单一种植体系中引入豆科作物可通过增加土壤固氮菌数量有效固定土壤中的氮, 减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[37]</sup>(图 4)。总体来看, 多样化种植减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放的微生物机制, 本质在于其降低了土壤无机氮(铵态氮、硝态氮)含量, 提高了土壤氮素利用率, 减少了氮肥投入, 从而削减了由土壤微生物介导的硝化作用和反硝化作用的底物供应<sup>[31, 69-70]</sup>。然而, 多样化种植也可能通过影响土壤微生物而增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 主要体现在: ①土壤 pH 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度是直接影响氨氧化过程的关键因素<sup>[71]</sup>, 包含豆科作物的多样化种植系统, 由于豆科作物残留物的快速分解和矿化, 可能导致土壤 pH 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度升高, 显著增加 AOB、AOA 的相对丰度<sup>[20, 72]</sup>, 从而促进土壤硝化作用的进行。②多样化种植系统中作物间的养分竞争强于单作, 这可能会导致更多的氮肥投入, 进而为由土壤微生物介导的硝化作用和反硝化作用提供更多的底物, 增强硝化细菌和反硝化细菌的活性, 最终促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[73]</sup>。目前, 关于多样化种植对土壤中氮循环关键微生物类群的长期影响, 以及如何从分子、生化、生理和群落水平上认知多样化种植下土壤关键微生物组参与影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放的机制, 仍需要深入探索。

## 2.2 多样化种植对作物氮吸收和外源氮投入的影响

土壤氮矿化是土壤有机氮转化为无机氮的关键, 无机氮(矿质氮)是作物氮吸收和利用的基础<sup>[74]</sup>。多样化种植通过影响作物的氮吸收来影响土壤矿质氮(铵态氮、硝态氮)含量, 最终影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量(图 4)<sup>[70]</sup>。在减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放方面, 单作中加入 C/N 与其秸秆相当的豆科绿肥, 可通过作物生长吸收氮, 减少氮的浸出, 从而减少土壤氮含量及  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[75]</sup>。例如, 玉米 || 花生及玉米 || 大豆间作中的  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  浓度比单作系统显著降低了 27%~30%, 从而使  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量显

图 4 多样化种植对农田土壤  $N_2O$  排放的影响机制Fig. 4 Mechanism of the impact of diversified planting on  $N_2O$  emission from farmland soil

著减少了 14%~23%<sup>[76]</sup>。相比单一种植，多样化种植可以通过促进相邻植物竞争吸收土壤中的氮素，实现  $N_2O$  减排。如当玉米 || 豌豆间作时，在豌豆收获后，玉米进入恢复生长期，土壤氮素吸收利用率提高，无机氮残留减少，产生  $N_2O$  的氮源减少，进而降低了土壤  $N_2O$  排放<sup>[77-78]</sup>。在增加  $N_2O$  排放方面，相同施氮量下，有机氮对硝态氮含量有正向影响。单作系统中加入 C/N 较低的豆科绿肥，为  $N_2O$  的产生提供大量氮源，促进氮矿化，增加了土壤硝态氮含量，从而增加了  $N_2O$  的排放<sup>[79]</sup>。Li 等<sup>[80]</sup>对比了作物单作与不同作物多样化种植对农田  $N_2O$  的影响，结果表明，相比于黑麦单作，豌豆、黑麦、萝卜混种系统的  $N_2O$  排放量增加；主要机制为：豌豆植物具有较低的 C/N，通过矿化其植物残渣，为土壤提供了更多的矿物氮，增加了土壤反硝化作用主要底物硝态氮含量，最终增加了  $N_2O$  排放。另外，豆科植物的富氮残留物在作物收获阶段可能返回土壤，为硝化和反硝化提供额外的底物，从而导致  $N_2O$  排放量的增加<sup>[81]</sup>。

过量的氮肥施用已被认为是增加农田土壤温室气体排放的关键因素，通过优化种植系统以减少氮肥投入被认为是农田温室气体减排的有效措施<sup>[82]</sup>。豆科作物具有固氮效率高的特性<sup>[82]</sup>，在单作系统中引入豆科作物，其固定的氮可以替代部分化肥氮，减少外源氮肥的投入，在保持作物产量的同时减少  $N_2O$  排放<sup>[32]</sup>。例如，包含大豆的多样化轮作可以通过氮遗留效应为后续作物提供额外氮源，从而减少过量氮肥投入带来的潜在氮损失，进一步提高氮肥利用率<sup>[81]</sup>，减少氮排放。减少外源氮肥投入，也相应减少了产甲烷细菌可利用的底物，从而降低  $CH_4$  排放<sup>[83]</sup>。此外，在相同施氮量下，多样化种植系统中作物的养分需求也高于单作，这在一定程度上提高了氮肥利用率，降低了土壤中进行温室气体产生过程的底物浓度，进而促进农田土壤固碳减排。而当氮肥投入量不一致时，粮食作物(如玉米、大麦、水稻)之间的多样化种植对氮的需求高于单作，此时，氮肥施入量的增加反而可能加剧温室气体排放<sup>[37]</sup>。

### 2.3 多样化种植对土壤呼吸的影响

多样化种植系统中不同类型作物相互作用,形成不同于单作系统的根呼吸和根围微生物呼吸,并影响土壤呼吸,进而影响土壤温室气体排放。通常土壤呼吸速率越低,温室气体排放量越少<sup>[84]</sup>。多样化种植减少土壤呼吸的机制主要包括两个方面:①与单作相比,间作提高了地表覆盖度,使地面接收太阳辐射降低,从而导致土壤温度下降。土壤温度降低会限制植物根系活性和植物生长光合作用,进而降低土壤呼吸速率<sup>[85]</sup>。②间作条件下,植物根系扩展程度大于单作,增加了土壤水分的利用,降低田间土壤含水率,使呼吸底物的扩散受到限制,从而抑制土壤呼吸作用,减少温室气体的排放<sup>[86]</sup>。而多样化种植增加土壤呼吸的机制主要包括 3 个方面:①间作通过调节根系分泌物提高土壤微生物生物量碳氮含量,增强微生物代谢活动,进而提升土壤呼吸速率<sup>[86]</sup>。②如前文所述,包含豆科作物的多样化种植系统相比谷物类单作促进了豆科作物的固氮作用,提高根际固氮菌的呼吸强度,从而导致土壤呼吸增强<sup>[87]</sup>。③在单作系统中引入生物量高的绿肥作物进行混作,增加了碳输入,提升了植物根系活性,进而提高土壤呼吸速率<sup>[84]</sup>。当前,多数研究只是对比了单一种植和多样化种植下农田土壤呼吸及 N<sub>2</sub>O 排放量的区别,即通过作物类别和数量的“差减法”来了解多样化种植对农田土壤呼吸、温室气体排放的影响。然而,关于多样化种植如何调控根际与根围微生物呼吸、不同作物根系互作如何影响土壤呼吸,进而影响农田温室气体排放的田间原位调控机制,目前仍鲜见系统报道。因此,进一步系统探究不同种植模式下土壤呼吸的动态变化,对阐明农田温室气体排放的内在机理与复杂调控机制具有重要科学意义。

### 2.4 多样化种植系统中豆科作物对土壤 pH 的影响

土壤 pH 通过影响参与土壤氮转化的特定微生物的活性,在调节氮转化过程和 N<sub>2</sub>O 排放中发挥着关键作用<sup>[88]</sup>。较低的土壤 pH 提高了反硝化对 N<sub>2</sub>O 产生的贡献,且在反硝化过程中, N<sub>2</sub>O 还原酶对酸性环境的敏感性高于其他还原酶;同时,较低的土壤 pH 降低了 *nosZ* 基因丰度,增加了(*nirS+nirK*)/*nosZ* 比值,导致反硝化产物中 N<sub>2</sub>O 的比例增加<sup>[89]</sup>。20 年长期试验表明,以大豆为基础的轮作系统中土壤 pH 高于玉米单作<sup>[60]</sup>。相比于禾本科单作,多样化种植系统中豆科作物主要通过两种机制影响土壤 pH:①豆科作物中的生物固氮减少了对土壤矿质氮的吸收,导致作物根系所吸收的阳离子总量超过了吸收的阴离子总量。因此,

豆科作物分泌 H<sup>+</sup>,从而引起根际土壤 pH 的变化<sup>[90]</sup>。②豆科作物可减少化学氮肥的施用,特别是铵氮肥,这将减少由阳离子吸收引起的酸化作用,缓解土壤酸化,减缓土壤 pH 降低速率<sup>[32, 81]</sup>。多样化种植系统中豆科作物对土壤 pH 的影响通常是一个长期过程,未来研究中还需长期评估多样化种植下不同作物对不同类型土壤 pH 的影响趋势。

## 3 影响多样化种植下农田土壤温室气体排放的农艺管理措施

多样化种植作为一种高效、可实现温室气体减排的种植模式在农业生产中得到越来越广泛的应用。然而,农田土壤温室气体排放还受到气候条件(如降雨、季节温度变化)等自然因素以及农艺管理措施的影响。因此,只考虑农业种植模式对温室气体的影响,对实现农田土壤温室气体减排的潜力有限。由于自然因素条件不可控,因此,本文只讨论多样化种植下农艺管理措施对农田土壤温室气体排放的影响,同时提出了相应农艺措施的优化,以促进多样化种植下的农田土壤温室气体减排。

### 3.1 耕作方式

不同的耕作方式可以通过影响土壤结构、团聚状况和微生物活性来影响温室气体排放。免耕对温室气体排放表现出促进或抑制作用,比如,其虽因导致土壤压实而促进厌氧微生物增殖,增加了 CH<sub>4</sub> 排放,但同时也因减弱土壤呼吸,而减少了 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[91]</sup>。深耕可以增加底土中的氧含量,减少土壤反硝化作用,增强甲烷氧化菌活性,从而减少 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 的排放,但却可能因破坏土壤团聚体而显著增加土壤 CO<sub>2</sub> 的排放<sup>[92]</sup>。可见,耕作制度对温室气体排放的影响仍有不确定性。稻田土壤多样化种植轮作系统中免耕与深耕进行有效结合可能对促进温室气体减排有利。Wang 等<sup>[93]</sup>通过连续 5 年的田间试验表明,水稻-油菜轮作系统中,水稻季免耕和油菜季适度深耕(耕作深度为 20~25 cm)相比于常规耕作可以显著减少温室气体排放。在旱地生态系统中采用免耕、少耕等措施减少耕作频率有助于温室气体减排。荟萃分析表明,免耕可减少温室气体排放<sup>[94]</sup>。相比于小麦连作免耕和常规耕作,小麦||豌豆间作系统免耕可减少温室气体排放量<sup>[95]</sup>。稻田土壤多样化种植轮作系统中,免耕与深耕有效结合可能对促进温室气体减排有利。目前,单一种植与多样化种植和不同耕作制度下对土壤温室气体排放的交互影响机制研究较为匮乏,未来仍需深入探索。

### 3.2 农田灌溉管理

多样化种植下灌溉管理已被证实显著影响有机碳固存及温室气体排放<sup>[96]</sup>。过度灌溉增加了土壤中水分含量,促进了土壤厌氧环境的形成,增加了CH<sub>4</sub>排放;厌氧环境也使得土壤反硝化作用加快,导致N<sub>2</sub>O排放速率加快。因此,优化农田灌溉管理对农田温室气体减排有积极作用。在稻田土壤多样化种植系统中,采用间歇灌溉以减少灌水量可显著减少CH<sub>4</sub>排放<sup>[97]</sup>。在稻季CH<sub>4</sub>高排放阶段进行适度排水、采取干湿交替灌溉,虽然可能会增加N<sub>2</sub>O排放,但综合考虑对全球增温趋势的影响,CH<sub>4</sub>排放的减少通常大于N<sub>2</sub>O的增加<sup>[17]</sup>。例如,Zhao等<sup>[98]</sup>的荟萃分析发现,与传统的连续淹水灌溉相比,干湿交替灌溉虽使N<sub>2</sub>O排放显著增加,但显著减少了CH<sub>4</sub>排放,从而降低了全球增温趋势(GWP)。Li等<sup>[99]</sup>通过荟萃分析发现,稻田种植中采用干湿交替灌溉可使CH<sub>4</sub>排放、GWP和温室气体排放强度(GHGI)分别减少43.23%、36.84%和38.57%,同时提升水稻产量。

在旱地土壤的灌溉方式上,Zhang等<sup>[100]</sup>对比了小麦-玉米种植系统中地表滴灌、地下滴灌、根系分区灌溉、漫灌4种方式对土壤温室气体排放的影响。结果表明,地下滴灌对降低GWP、GHGI以及温室气体排放表现最优,而漫灌处理则会显著增加温室气体排放;原因主要是地下滴灌在降低水分含量使土壤湿润环境维持适宜的同时提高了氮素利用效率,减少了N<sub>2</sub>O排放。与番茄单作沟灌、番茄冬季豆科作物覆盖种植沟灌相比,地下滴灌与番茄冬季豆科作物覆盖种植结合可以减少温室气体排放<sup>[101]</sup>。在灌水量上,减量灌水对温室气体减排有益,例如,与玉米单作传统灌溉(540 mm)以及玉米豌豆传统灌溉相比,玉米||豌豆间作减量灌溉(495 mm)的GWP、GHGI均显著降低<sup>[102]</sup>。与单作传统灌溉用水相比,番茄与毛叶苕子进行多样化种植并结合减少25%灌溉用水有利于土壤固碳减排<sup>[103]</sup>。因此,干湿交替灌溉技术是实现农田温室气体减排及推动水资源节约的一项可行技术。

### 3.3 氮肥施用

长期以来,氮肥过度施用导致温室气体排放加剧,其施用量往往与温室气体排放呈正相关<sup>[82]</sup>。优化氮肥管理措施以提高氮肥利用率、降低氮肥用量,是减少农田土壤温室气体排放的关键。氮肥优化管理措施应采取“4R”原则,即合理的氮肥用量、正确的施用时间、正确的施用位置以及正确的氮肥种类<sup>[104]</sup>。在多样化种植系统的氮肥管理中,减量施氮通常有助于减少温室气体排放。然而,由于不同作物的需氮量存

在差异,过度的减量施氮可能会给作物产量带来不利影响。因此,最佳减施量需根据不同作物种类而定。Wang等<sup>[36]</sup>在华南地区通过5年的田间试验表明,施氮量300 kg/hm<sup>2</sup>水平下,甜玉米和大豆间作的作物行比为2:4时的GWP低于不施氮肥及施氮量360 kg/hm<sup>2</sup>的玉米单作及间作;同时,该施氮水平下相比于高施氮可维持作物产量。该施肥量也适用于我国降水量较低的玉米种植区域。例如,在我国西北地区4年的田间试验发现,玉米间作箭筈豌豆、玉米间作油菜在减量25%施氮(270 kg/hm<sup>2</sup>)的碳排放显著低于单作玉米常规施氮(360 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[105]</sup>。在我国绿洲灌区11年的田间试验也表明,玉米间作豌豆减量20%施氮(300 kg/hm<sup>2</sup>)的温室气体排放强度显著低于单作玉米常规施氮(375 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[77]</sup>。可见,当玉米与豆科作物进行多样化种植时,减量20%~25%施氮较为适宜。玉米、小麦均为粮食作物,当二者轮作时,通过优化氮肥用量在两作物间的分配,以促进两作物对氮肥的高效吸收利用也是一种可行的举措。在华北平原典型冬小麦-夏玉米轮作体系中,相比于小麦和玉米常规施氮量(180 kg/hm<sup>2</sup>),增加对小麦的氮肥投入(240 kg/hm<sup>2</sup>),并减少对玉米的氮肥投入(120 kg/hm<sup>2</sup>),可减少温室气体排放总量<sup>[106]</sup>。当玉米、小麦种植体系中包含豆科植物时,也可采用适宜的减量施氮措施。在西北地区玉米、小麦及苕子轮作系统中,减量20%施氮(288 kg/hm<sup>2</sup>),在不影响玉米产量的同时,碳排放低于常规施氮(360 kg/hm<sup>2</sup>)以及减量10%施氮(324 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[107]</sup>。棉花作为我国的经济作物之一,其种植过程中也会产生温室气体排放,通过优化种植方式与氮肥管理相结合可能是一种实现温室气体减排的技术途径<sup>[79]</sup>。研究发现,相比玉米单作、二月兰||棉花带状间作下的常规施氮量(225 kg/hm<sup>2</sup>),二月兰||棉花带状间作减量25%施氮(168.75 kg/hm<sup>2</sup>)在不减少棉花产量的同时可减少N<sub>2</sub>O排放<sup>[79,108]</sup>。在枣树与棉花间作系统中为期2年的田间试验表明,氮肥施用量280 kg/hm<sup>2</sup>条件下,对棉籽产量提升及温室气体减排效果优于氮肥施用量为420 kg/hm<sup>2</sup>处理组<sup>[109]</sup>。

果类作物与豆科作物间作时采取减量施氮对温室气体减排也有正向作用。例如,柑橘与毛叶苕子间作减量30%施氮(260 kg/hm<sup>2</sup>)下的作物产量提升以及对土壤N<sub>2</sub>O减排效果优于柑橘单作常规施肥(371 kg/hm<sup>2</sup>)和柑橘||毛叶苕子间作常规施肥(371 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[110]</sup>。在甘蔗田中,9年的田间试验表明,甘蔗||大豆间作在施氮300 kg/hm<sup>2</sup>条件下的温室气体排放量显著低于施氮525 kg/hm<sup>2</sup>条件下的甘蔗单作及甘蔗||大豆间作<sup>[111]</sup>。

在稻田土壤上, Ma 等<sup>[112]</sup>在我国长江中下游地区对比了典型水稻-小麦轮作体系中 360、300、240、180 kg/hm<sup>2</sup> 4 种施氮水平下对温室气体排放的影响, 结果表明, 土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放随氮肥施加量的增加而增加, 鉴于过低氮肥投入量会给作物产量带来负面影响, 223 kg/hm<sup>2</sup> 施氮可以在不损失产量和投入成本的情况下显著降低 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放。Jiang 等<sup>[29]</sup>在同一种植区域的稻麦轮作体系研究也表明, 减少 18%~32% 的当地氮肥施入量(500 kg/hm<sup>2</sup>)可在保持作物产量的同时显著减少温室气体总排放量。在包含绿肥作物的稻田多样化种植体系中, 有研究发现, 水稻-紫云英轮作体系中减量 30% 施氮(105 kg/hm<sup>2</sup>)下的 CH<sub>4</sub> 排放量低于常规施氮量(150 kg/hm<sup>2</sup>)下的水稻单作及水稻-紫云英轮作<sup>[113]</sup>。另有研究表明, 相比水稻单作, 水稻-紫云英轮作减量 20% 施氮可以减少温室气体排放, 同时提高作物产量和氮吸收<sup>[114]</sup>。综上, 在多样化种植结合氮肥管理中, 减量 20%~30% 施氮, 可在减少温室气体排放的同时, 不对作物产量造成负面效应。

在氮肥种类上, 用增效氮肥(如缓/控释氮肥)替代普通氮肥, 对农田温室气体的减排也有正向作用。例如, 稻麦轮作体系中相比常规施氮, 施用缓释氮肥(脲甲醛)可在维持作物产量的同时减少温室气体排放<sup>[29]</sup>。这主要得益于缓释氮肥通过改变氮释放速率实现养分释放与作物需求同步, 提高了肥料中氮素吸收利用率, 减少了土壤中相关细菌比如硝化-反硝化细菌底物浓度<sup>[115]</sup>。此外, 配施氮肥抑制剂(脲酶和硝化抑制剂)或有机肥替代部分氮肥也能减少温室气体排放<sup>[29, 116]</sup>。就氮肥施用位置而言, 采用深施方式较表施能够有效降低温室气体排放<sup>[117]</sup>。这是因为浅层土壤的微生物硝化和反硝化过程比深层更活跃, 相关硝化、反硝化细菌活性也更高<sup>[118]</sup>, 从而导致 N<sub>2</sub>O 排放量增加。土豆-小麦-豌豆轮作体系为期 2 年的试验表明, 表施(≤10 cm)缓释肥的 N<sub>2</sub>O 排放量高于深施(20 cm)缓释肥<sup>[119]</sup>。在氮肥施用时间上, 根据作物需肥阶段施用氮肥, 即增加氮肥施用次数或减少氮肥施用比例也能显著减少温室气体排放量<sup>[120]</sup>。

### 3.4 作物秸秆还田

秸秆还田对于改善农田土壤健康、提升碳汇能力至关重要, 以科学还田为核心的固碳减排措施, 是缓解温室气体排放的新突破<sup>[121]</sup>。秸秆还田通过将秸秆中的碳转移到土壤中影响温室气体的排放。通常情况下, 秸秆还田可以为土壤提供有机物质和养分, 为产甲烷细菌的生长和繁殖提供大量的底物, 从而增加 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[13]</sup>。秸秆还田后释放的氮促使稻田水土环境中的微

生物氮循环过程发生变化, 影响稻田土壤硝化-反硝化过程, 从而影响 N<sub>2</sub>O 的产生与排放<sup>[122]</sup>。当前, 多样化种植下秸秆还田对土壤温室气体排放的影响结果尚不一致, 这种差异与作物秸秆本身的 C/N 有关<sup>[15]</sup>。作物还田秸秆的 C/N 越高, 其提供的能源物质越丰富, 提高了土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳含量, 为产甲烷菌提供了大量的含碳底物, 从而提高 CH<sub>4</sub> 排放速率; 而 C/N 较低的作物秸秆还田后, 更易于被微生物利用, 反而降低了土壤中碳底物的可用性, 从而减少碳排放<sup>[83]</sup>。例如, 在作物秸秆粉碎还田下, 与水稻单一种植相比, 小麦-水稻、油菜-水稻轮作增加了 CH<sub>4</sub> 排放, 而紫云英-水稻、蚕豆-水稻轮作则减少了 CH<sub>4</sub> 排放; 在 N<sub>2</sub>O 累积排放量上, 水稻单作低于所有轮作处理。最终, 稻田周年增温趋势表现为小麦-水稻>油菜-水稻>空闲=蚕豆-水稻>紫云英-水稻<sup>[15]</sup>。邓姣等<sup>[123]</sup>研究发现, 水稻-油菜、水稻-小麦轮作处理在秸秆还田下的 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放以及 GWP 均高于水稻-紫云英轮作。可见, 在多样化种植结合秸秆还田模式中, 引入豆科/绿肥作物有助于减少温室气体排放。

不同秸秆还田方式对农田土壤温室气体排放的影响也不同。秸秆深层注入/深沟还田相比于秸秆覆盖还田通常可以减少温室气体排放。一方面, 秸秆深置减少了碳源的均匀释放, 降低了土壤中产甲烷菌的反应底物和基质的可用性, 进而降低了 CH<sub>4</sub> 的生成潜力<sup>[124]</sup>; 另一方面, 秸秆埋置减少了氮素均匀分布, 这可能抑制了氮素转化过程中的 N<sub>2</sub>O 释放<sup>[124]</sup>。Hu 等<sup>[124]</sup>对比了不同秸秆还田方式对稻麦轮作体系中温室气体排放的影响, 结果表明, 小麦沟埋还田(以 10% 的面积埋深 20 cm, 其余区域 3~5 cm 深度)对降低单位产量的全球增温趋势效果最佳, 其次为秸秆 20 cm 深度还田, 秸秆 10 cm 深度还田的效果最弱。秸秆制备成生物质炭还田也是实现固碳减排的一项可行举措。在水稻-油菜轮作体系中连续 4 年的田间试验表明, 相比直接秸秆还田处理, 秸秆制成生物质炭后在水稻季还田、油菜季秸秆覆盖还田处理的年度 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放量均显著降低<sup>[125]</sup>。稻麦轮作体系中, 相比秸秆粉碎直接还田, 将秸秆制备成生物质炭还田, 不仅减少了 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放, 还显著增加了有机碳固存, 提高了碳排放效率<sup>[126]</sup>。

秸秆还田量的差异也能显著影响农田温室气体排放。稻麦轮作体系连续 5 年的田间试验发现, 相比秸秆还田量 7.5 t/hm<sup>2</sup>, 等量秸秆制备生物质炭还田量为 2.6 t/hm<sup>2</sup> 时可显著降低净 GWP<sup>[127]</sup>。单次大量秸秆生物质炭还田(22.5 t/hm<sup>2</sup>)相比于秸秆还田量 8.0 t/hm<sup>2</sup>

虽能显著减少 CH<sub>4</sub> 排放及 CO<sub>2</sub>-eq, 但随着时间的推移, 其减排效果不断衰减, 而少量多次秸秆生物质炭还田(2.8 t/hm<sup>2</sup>)则具备实现温室气体的长期减排效果<sup>[128]</sup>。对于秸秆直接还田的最佳还田量, He 等<sup>[129]</sup>通过荟萃分析表明, 稻田秸秆还田量大于 7 500 kg/hm<sup>2</sup> 对农田温室气体减排有利。Lin 等<sup>[130]</sup>发现, 8 000~11 000 kg/hm<sup>2</sup> 的秸秆还田量对增加土壤有机碳固存及提升作物产量的效果最佳。在多样化种植系统实际的田间管理中, 秸秆还田量可参考上述推荐。

## 4 结论与展望

农田土壤是温室气体排放的重要来源, 多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响备受关注。本文对多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响和作用机制及影响多样化种植下农田土壤温室气体排放的农艺管理措施进行了归纳总结。总体来看, 以间套作及轮作为基础的作物多样化种植对温室气体减排发挥了重要作用, 将豆科/绿肥作物引入主要种植体系是当前农田土壤温室气体减排的可行种植模式; 同时, 多样化种植与其他农艺管理措施进行有效结合更能促进农田的增汇减排。但目前高效多样化种植模式还存在一些短板和问题, 为充分构建以温室气体减排、耕地质量提升、作物产量提高为核心的多样化种植体系, 建议未来应加强以下几方面的研究和探索。

1) 目前, 多样化种植对农田土壤温室气体排放的影响研究多为短期试验(<5 年), 且多基于作物单一种植季的数据, 未能反映长期多样化种植下的累积效应。为准确评估多样化种植对温室气体排放的影响, 需要长期监测不同多样化种植类别的作用效应, 探索多种作物性状如何在多样化种植系统发挥作用, 并综合考虑作物种类、种植年限、作物品种等多样化因素的长期效应。同时, 建议未来利用大数据模型, 长期评估我国各区域多样化种植下的温室气体排放趋势。

2) 种植模式、农艺管理措施(如施肥、耕作、作物品质选择等)对温室气体排放均有影响, 且不同种植系统与农艺管理措施间可能存在拮抗或协同作用。目前, 关于多样化种植下土壤温室气体排放特征的研究大多为单因素试验, 而多样化种植与农艺管理措施相互作用对温室气体减排机制的研究较为匮乏。未来应量化这些相互作用, 并建立针对不同区域、不同作物与不同农艺管理相结合的多样化种植技术体系。

3) 土壤微生物是调控农田生态系统温室气体排放的关键因素, 因此, 理解温室气体排放与土壤微生物之间的功能联系至关重要。未来需进一步深

入挖掘多样化种植体系中生物多样性、土壤微生物多样性与生态功能之间的关联机制, 利用土壤学、微生物学、生态学、植物学等学科交叉完善多样化种植模式, 同时揭示基于温室气体减排的“土壤-植物-微生物”互动与优化调控原理。此外, 利用多组学技术加强对未知土壤微生物组成和功能的探索, 通过调控多样化种植下土壤微生物网络的稳定性, 促进土壤健康发展及温室气体减排, 也是未来研究中需关注的方向。

4) 农田地力培育、土壤健康提升以及安全高效的粮食生产均对农业可持续发展起重要作用。建议在多样化种植系统设计中, 充分结合作物种植结构, 针对不同区域的作物生产、土壤特性以及气候条件, 自上而下地设计多样化种植系统。同时, 通过优化种植系统, 加强作物-土壤适配研究, 设计多功能型多样化种植模式, 以实现土壤固碳减排、土壤健康、作物产量提升与农产品优质化的协同增效。

## 参考文献:

- [1] Bamber N, Johnson R, Laage E, et al. Life cycle inventory and emissions modelling in organic field crop LCA studies: Review and recommendations[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 185: 106465.
- [2] Nayak D, Saetan E, Cheng K, et al. Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 108-124.
- [3] Yang Z H, Yao Z Z, Yin H Y, et al. Spatiotemporal dynamics of China's food supply chains and associated greenhouse gas emissions[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2025, 55: 297-311.
- [4] Xu X B, Zhao Q R, Guo J B, et al. Inequality in agricultural greenhouse gas emissions intensity has risen in rural China from 1993 to 2020[J]. *Nature Food*, 2024, 5(11): 916-928.
- [5] Liu D, Dong H W, Ma C, et al. Inhibiting N<sub>2</sub>O emissions and improving environmental benefits by integrating garlic growing in grain production systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 347: 108371.
- [6] Tian H Q, Yang J, Xu R T, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(2): 640-659.
- [7] Friedlingstein P, Jones M W, Osullivan M, et al. Global carbon budget 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1783-1838.
- [8] Lu C Q, Yu Z, Hennessy D A, et al. Emerging weed resistance increases tillage intensity and greenhouse gas emissions in the US corn-soybean cropping system[J]. *Nature Food*, 2022, 3(4): 266-274.

- [9] Shah K K, Modi B, Pandey H P, et al. Diversified crop rotation: An approach for sustainable agriculture production[J]. *Advances in Agriculture*, 2021, 2021(1): 8924087.
- [10] 田慎重, 管西林, 宁堂原, 等. 多样化种植对提升耕地质量的作用: 进展与展望[J]. *土壤学报*, 2024, 61(3): 619–634.
- [11] Shen Y W, Sui P, Huang J X, et al. Greenhouse gas emissions from soil under maize–soybean intercrop in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 110(3): 451–465.
- [12] 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.
- [13] 李成伟, 刘章勇, 龚松玲, 等. 稻作模式改变对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(5): 961–968.
- [14] 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.
- [15] 岳骞, 吴思远, 张岳芳, 等. 不同水旱轮作模式全生命周期温室效应及经济效益评价[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(8): 1825–1835.
- [16] Xu P, Zhou W, Jiang M D, et al. Conversion of winter flooded rice paddy planting to rice-wheat rotation decreased methane emissions during the rice-growing seasons[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104490.
- [17] Zhong C, Liu Y, Xu X T, et al. Paddy-upland rotation with Chinese milk vetch incorporation reduced the global warming potential and greenhouse gas emissions intensity of double rice cropping system[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 276: 116696.
- [18] 胡安永, 孙星, 刘勤. 太湖地区不同轮作模式对稻田温室气体(CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 99–106.
- [19] Yin X W, Li Q, Zhang X C, et al. Paddy-upland rotation improves rice growth and reduces greenhouse gas emissions in winter paddy fields[J]. *Agronomy*, 2025, 15(2): 349.
- [20] 冯夕, 江长胜, 彭小乐, 等. 轮作方式对冬水田温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(1): 392–400.
- [21] 钟川, 杨滨娟, 张鹏, 等. 基于冬种不同作物的水旱轮作模式对水稻产量及稻田 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(2): 379–388.
- [22] Akter M, Deroo H, Kamal A M, et al. Impact of irrigation management on paddy soil N supply and depth distribution of abiotic drivers[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 261: 12–24.
- [23] Hasukawa H, Inoda Y, Toritsuka S, et al. Effect of paddy-upland rotation system on the net greenhouse gas balance as the sum of methane and nitrous oxide emissions and soil carbon storage: A case in western Japan[J]. *Agriculture*, 2021, 11(1): 52.
- [24] 杨蕙琳, 娄运生, 刘燕, 等. 夜间增温品种混栽对稻田土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 553–564.
- [25] 那好为, 刘瑛涵, 赵璐峰, 等. 水稻品种间作对甲烷排放的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2024, 50(2): 270–279.
- [26] Su J, Hu C, Yan X, et al. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice[J]. *Nature*, 2015, 523(7562): 602–606.
- [27] Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2007: 1–63.
- [28] 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<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放量的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 63–71.
- [29] Jiang J Y, Jiang S S, Xu J Y, et al. Lowering nitrogen inputs and optimizing fertilizer types can reduce direct and indirect greenhouse gas emissions from rice-wheat rotation systems[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 97: 103152.
- [30] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions to fertilizer nitrogen[J]. *PNAS*, 2014, 111(25): 9199–9204.
- [31] Yu W C, Zhao P, Li C, et al. Intercropping achieves long-term dual goals of yield gains and soil N<sub>2</sub>O emission mitigation[J]. *Resources, Environment and Sustainability*, 2025, 20: 100210.
- [32] Yang X L, Xiong J R, Du T S, et al. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 198.
- [33] Zhang W, Lu J S, Bai J, et al. Introduction of soybean into maize field reduces N<sub>2</sub>O emission intensity *via* optimizing nitrogen source utilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 442: 141052.
- [34] Dang P F, Zhang M M, Chen X L, et al. Plant diversity decreases greenhouse gas emissions by increasing soil and plant carbon storage in terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2024, 27(7): e14469.
- [35] Lyu H Q, Li Y, Wang Y L, et al. No-tillage with total green manure mulching: A strategy to lower N<sub>2</sub>O emissions[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109238.
- [36] Wang X L, Chen Y, Yang K P, et al. Effects of legume intercropping and nitrogen input on net greenhouse gas balances, intensity, carbon footprint and crop productivity in sweet maize cropland in South China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127997.
- [37] Huang J X, Chen Y Q, Sui P, et al. Soil nitrous oxide emissions under maize-legume intercropping system in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(6): 1363–1372.
- [38] De Antoni Migliorati M, Bell M, Grace P R, et al. Legume pastures can reduce N<sub>2</sub>O emissions intensity in subtropical cereal cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 27–39.

- [39] Pappa V A, Rees R M, Walker R L, et al. Nitrous oxide emissions and nitrate leaching in an arable rotation resulting from the presence of an intercrop[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1/2): 153–161.
- [40] 张正贵. 冬种绿肥配合氮肥减施的棉田生产和生态效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
- [41] 苟志文. 作物多样化对绿洲灌区农田温室气体排放的调控效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Raji S G, Dörsch P. Effect of legume intercropping on N<sub>2</sub>O emissions and CH<sub>4</sub> uptake during maize production in the Great Rift Valley, Ethiopia[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17(2): 345–359.
- [45] 成志. 粮油间作-冬绿肥轮作对农田水碳氮过程及生态服务功能的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [46] 李熠凡, 李烙布, 李伏生. 不同灌溉施氮模式对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(12): 44–53.
- [47] Yang J, Liu G J, Tian H Y, et al. Trade-offs between wheat soil N<sub>2</sub>O emissions and C sequestration under straw return, elevated CO<sub>2</sub> concentration, and elevated temperature[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164508.
- [48] Masson-Delmotte V. Climate change 2021: The Physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [49] Zugasti-López I, Cavero J, Clavería I, et al. Alternatives to maize monocropping in Mediterranean irrigated conditions to reduce greenhouse gas emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169030.
- [50] Lee H H, Kim S U, Han H R, et al. Mitigation of global warming potential and greenhouse gas intensity in arable soil with green manure as source of nitrogen[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117724.
- [51] Said-Pullicino D, Miniotti E F, Sodano M, et al. Linking dissolved organic carbon cycling to organic carbon fluxes in rice paddies under different water management practices[J]. *Plant and Soil*, 2016, 401(1): 273–290.
- [52] 陈素云, 吴洪生, 李季, 等. 麦田间作大蒜减排温室气体: 兼顾经济环境效益[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(6): 832–839.
- [53] Linquist B, van Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 194–209.
- [54] 范倩玉, 李晋, 刘振华, 等. 不同轮作模式对潮土土壤物理性状的影响[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(8): 1267–1270.
- [55] Fang J H, Zhao R Q, Cao Q Q, et al. Effects of emergent aquatic plants on nitrogen transformation processes and related microorganisms in a constructed wetland in northern China[J]. *Plant and Soil*, 2019, 443(1): 473–492.
- [56] Suzuki K, Kashiwa N, Nomura K, et al. Impacts of application of calcium cyanamide and the consequent increase in soil pH on N<sub>2</sub>O emissions and soil bacterial community compositions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(2): 269–279.
- [57] You L C, Ros G H, Chen Y L, et al. Global meta-analysis of terrestrial nitrous oxide emissions and associated functional genes under nitrogen addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 165: 108523.
- [58] Wang T, Duan Y, Liu G D, et al. Tea plantation intercropping green manure enhances soil functional microbial abundance and multifunctionality resistance to drying-rewetting cycles[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 151282.
- [59] He H, Miao Y J, Zhang L Q, et al. The structure and diversity of nitrogen functional groups from different cropping systems in Yellow River Delta[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(3): 424.
- [60] Behnke G D, Zabaloy M C, Riggins C W, et al. Acidification in corn monocultures favor fungi, ammonia oxidizing bacteria, and nirK-denitrifier groups[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137514.
- [61] Hink L, Nicol G W, Prosser J I. Archaea produce lower yields of N<sub>2</sub>O than bacteria during aerobic ammonia oxidation in soil[J]. *Environmental Microbiology*, 2017, 19(12): 4829–4837.
- [62] Qi C, Zhou Y W, Suenaga T, et al. Organic carbon determines nitrous oxide consumption activity of clade I and II *nosZ* bacteria: Genomic and biokinetic insights[J]. *Water Research*, 2022, 209: 117910.
- [63] Zhong Y J, Liang L N, Xu R N, et al. Intercropping tea plantations with soybean and rapeseed enhances nitrogen fixation through shifts in soil microbial communities[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9(3): 344–355.
- [64] 刘晖, 郭清毅, 寇明红, 等. 半夏间作生姜对产量、土壤酶活性和根际微生物群落结构的影响[J]. *微生物学通报*, 2025, 52(4): 1600–1616.
- [65] Ma Q, Qian Y S, Yu Q Q, et al. Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 349: 108445.
- [66] Sumbul A, Ali Ansari R, Rizvi R, et al. *Azotobacter*: A potential bio-fertilizer for soil and plant health management[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2020, 27(12): 3634–3640.
- [67] Pérez-Brandan C, Meyer A, Meriles J M, et al. Relationships between soil physicochemical properties and nitrogen fixing, nitrifying and denitrifying under varying land-use practices in the northwest region of Argentina[J]. *Soil and Water Research*, 2019, 14(1): 1–9.

- [68] Ladha J K, Peoples M B, Reddy P M, et al. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2022, 283: 108541.
- [69] Raseduzzaman M, Dong W X, Gaudel G, et al. Maize-soybean intercropping reduces greenhouse gas emissions from the fertilized soil in the North China Plain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(8): 3115–3131.
- [70] Maharjan B, Venterea R T. Nitrite intensity explains N management effects on N<sub>2</sub>O emissions in maize[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 66: 229–238.
- [71] Guo J H, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Pathways and organisms involved in ammonia oxidation and nitrous oxide emission[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43(21): 2213–2296.
- [72] Chu H Y, Morimoto S, Fujii T, et al. Soil ammonia-oxidizing bacterial communities in paddy rice fields as affected by upland conversion history[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(6): 2026–2031.
- [73] Wu L, Wu X, Shaaban M, et al. Decrease in the annual emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O following the initial land management change from rice to vegetable production[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(13): 13014–13025.
- [74] Yin X G, Beaudoin N, Ferchaud F, et al. Long-term modelling of soil N mineralization and N fate using STICS in a 34-year crop rotation experiment[J]. *Geoderma*, 2020, 357: 113956.
- [75] Abdalla M, Hastings A, Cheng K, et al. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(8): 2530–2543.
- [76] Zhang J C, Yao W, Wen Y K, et al. Temporal and spatial patterns of N<sub>2</sub>O emissions in maize/legume strip intercropping: Effects of straw incorporation and crop interactions[J]. *Field Crops Research*, 2025, 326: 109850.
- [77] Yang L, Luo Y, Lu B L, et al. Long-term maize and pea intercropping improved subsoil carbon storage while reduced greenhouse gas emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 349: 108444.
- [78] Hu F L, Gan Y T, Chai Q, et al. Boosting system productivity through the improved coordination of interspecific competition in maize/pea strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 50–60.
- [79] Zhang Z G, Wang J, Huang W B, et al. Cover crops and N fertilization affect soil ammonia volatilization and N<sub>2</sub>O emission by regulating the soil labile carbon and nitrogen fractions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108188.
- [80] Li Z H, Miles D M, Hammons L, et al. Nitrous oxide fluxes during a winter cover crop season in a Mississippi corn cropping system[J]. *Soil & Environmental Health*, 2024, 2(4): 100103.
- [81] Yang Y, Zou J, Huang W H, et al. Drivers of soybean-based rotations synergistically increase crop productivity and reduce GHG emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 372: 109094.
- [82] 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(11): 886–893.
- [83] Zhou Q, Zhang P, Wang Z Q, et al. Winter crop rotation intensification to increase rice yield, soil carbon, and microbial diversity[J]. *Heliyon*, 2023, 9(1): e12903.
- [84] 谢军, 孙鲁沅, 朱君康, 等. 不同种植模式对红壤坡耕地土壤呼吸和有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2025, 57(6): 1428–1437.
- [85] 任旭灵. 河西绿洲免耕密植玉米间作豌豆农田碳排放规律和增温潜势研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [86] 王祺蕊, 杨春怀, 李永梅, 等. 间作对坡耕地红壤呼吸速率的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(5): 1409–1418.
- [87] Latati M, Blavet D, Alkama N, et al. The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil[J]. *Plant and Soil*, 2014, 385(1): 181–191.
- [88] Daba N A, Li D C, Huang J, et al. Long-term fertilization and lime-induced soil pH changes affect nitrogen use efficiency and grain yields in acidic soil under wheat-maize rotation[J]. *Agronomy*, 2021, 11(10): 2069.
- [89] Wu G, Liang F, Wu Q, et al. Soil pH differently affects N<sub>2</sub>O emissions from soils amended with chemical fertilizer and manure by modifying nitrification and denitrification in wheat-maize rotation system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2024, 60(1): 101–113.
- [90] Timotiwi P B, Sakurai N. Identification of mono-, oligo-, and polysaccharides secreted from soybean roots[J]. *Journal of Plant Research*, 2002, 115(2): 77–85.
- [91] Hartmann M, Niklaus P A, Zimmermann S, et al. Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction[J]. *The ISME Journal*, 2014, 8(1): 226–244.
- [92] Tang J C, Li C F, Tan W F, et al. Introducing soil air injection device to reduce carbon footprint of rice production system in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 406: 137068.
- [93] Wang C Y, Wang Z K, Liu M Z, et al. Optimizing tillage regimes in rice-rapeseed rotation system to enhance crop yield and environmental sustainability[J]. *Field Crops Research*, 2024, 318: 109614.
- [94] Yue K, Fornara D A, Heděnc P, et al. No tillage decreases GHG emissions with no crop yield tradeoff at the global scale[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228: 105643.
- [95] Sainju U M, Allen B L, Jabro J D. Long-term continuous cropping reduces greenhouse gas emissions while sustaining crop yields[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2024, 53(6): 1073–1085.
- [96] 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.

- [97] Wang Z, Zhang X Y, Liu L, et al. Estimates of methane emissions from Chinese rice fields using the DNDC model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108368.
- [98] Zhao C X, Qiu R J, Zhang T, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on methane and nitrous oxide emissions from rice fields: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(12): e17581.
- [99] Li L, Huang Z, Mu Y X, et al. Alternate wetting and drying maintains rice yield and reduces global warming potential: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2024, 318: 109603.
- [100] Zhang H W, Liang Q, Peng Z P, et al. Response of greenhouse gases emissions and yields to irrigation and straw practices in wheat-maize cropping system[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 282: 108281.
- [101] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions differently depending on type of irrigation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(3/4): 251–260.
- [102] 殷民兴, 赵财, 葛丽丽, 等. 间作及减量灌溉对农田土壤温室气体排放的互作效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(1): 214–225.
- [103] Mancinelli R, Marinari S, Brunetti P, et al. Organic mulching, irrigation and fertilization affect soil CO<sub>2</sub> emission and C storage in tomato crop in the Mediterranean environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152: 39–51.
- [104] 李婷玉, 姚澜, 钟于秀, 等. 绿色发展背景下的中国氮肥需求[J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 308–321.
- [105] Li H T, Fan Z L, Wang Q M, et al. Green manure and maize intercropping with reduced chemical N enhances productivity and carbon mitigation of farmland in arid areas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 145: 126788.
- [106] Du C H, Liu Y, Guo J R, et al. Novel annual nitrogen management strategy improves crop yield and reduces greenhouse gas emissions in wheat-maize rotation systems under limited irrigation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 353: 120236.
- [107] Wang P F, Yu A Z, Li Y, et al. Reducing nitrogen application by 20% under the condition of multiple cropping using green manure after wheat harvesting can mitigate carbon emission without sacrificing maize yield in arid areas[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109232.
- [108] Sun G L, Zhang Z G, Xiong S W, et al. Mitigating greenhouse gas emissions and ammonia volatilization from cotton fields by integrating cover crops with reduced use of nitrogen fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 332: 107946.
- [109] Cao N, Chen G D, Wang S, et al. Optimizing plant density and nitrogen fertilization in jujube/cotton intercropping systems for sustainable yield and reduced greenhouse gas emissions[J]. *Field Crops Research*, 2025, 326: 109873.
- [110] Zhou W, Ma Q X, Wu L, et al. The effect of organic manure or green manure incorporation with reductions in chemical fertilizer on yield-scaled N<sub>2</sub>O emissions in a *Citrus* orchard[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 326: 107806.
- [111] Wang X L, Feng Y J, Yu L L, et al. Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen input improves crop productivity and reduces carbon footprint in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137517.
- [112] Ma Y Z, Qiao Y F, Tang Y J, et al. Estimation of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions in field study and DNDC model under optimal nitrogen level in rice-wheat rotation system[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 974: 179168.
- [113] Yu K, Xiao S Q, Shen Y, et al. Enhanced carbon sinks following double-rice conversion to green manure-rice cropping rotation systems under optimized nitrogen fertilization in southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 362: 108845.
- [114] Daba N A, Huang J, Shen Z, et al. Green manure substitution for chemical nitrogen reduces greenhouse gas emissions and enhances yield and nitrogen uptake in rice-rice cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2025, 322: 109715.
- [115] Zhu N Y, Qian Y S, Song L Q, et al. Regulating leaf photosynthesis and soil microorganisms through controlled-release nitrogen fertilizer can effectively alleviate the stress of elevated ambient ozone on winter wheat[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(17): 9381.
- [116] 余庆, 冯涛, 丁紫娟, 等. 有机肥与控释尿素减氮配施对再生稻田温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(6): 1675–1686.
- [117] Lan C J, Zou J N, Li J Y, et al. Slow-release fertilizer deep placement increased rice yield and reduced the ecological and environmental impact in Southeast China: A life-cycle perspective[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109224.
- [118] Venterea R T, Stanenas A J. Profile analysis and modeling of reduced tillage effects on soil nitrous oxide flux[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(4): 1360–1367.
- [119] Niedziński T, Szymańska M, Łabętowicz J, et al. Does the deep placement of fertilizers increase potato yields, fertilization efficiency and reduce N<sub>2</sub>O emissions from the soil[J]. *Agriculture*, 2024, 14(3): 368.
- [120] Xia L L, Lam S K, Chen D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution—A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917–1925.
- [121] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase — A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.
- [122] Ma E D, Zhang G B, Ma J, et al. Effects of rice straw returning methods on N<sub>2</sub>O emission during wheat-growing

- season[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(3): 463–469.
- [123] 邓皎, 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]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(2): 268–278.
- [124] Hu N J, Wang B J, Gu Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice–wheat rotation system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 115–122.
- [125] Zhang S T, Ren T, Yang X K, et al. Biochar return in the rice season and straw mulching in the oilseed rape season achieve high nitrogen fertilizer use efficiency and low greenhouse gas emissions in paddy-upland rotations[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 148: 126869.
- [126] Xia X, Zhao Z, Ding Y J, et al. Crop residue biochar rather than manure and straw return provided short term synergism among grain production, carbon sequestration, and greenhouse gas emission reduction in a paddy under rice-wheat rotation[J]. *Food and Energy Security*, 2024, 13(5): e70009.
- [127] Zhang W, Lu J S, Li S Q, et al. Equal-straw produced biochar continuous incorporation substitutes straw returns for global warming mitigation: An appraisal based on five-year field experiment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 515: 163546.
- [128] Nan Q, Speth D R, Qin Y, et al. Biochar application using recycled annual self straw reduces long-term greenhouse gas emissions from paddy fields with economic benefits[J]. *Nature Food*, 2025, 6(5): 456–465.
- [129] He Z J, Cao H X, Qi C, et al. Straw management in paddy fields can reduce greenhouse gas emissions: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109218.
- [130] Lin B J, Cheng J, Duan H X, et al. Optimizing straw and nitrogen fertilizer resources for low-carbon sustainable agriculture[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 209: 107743.

(责任编辑: 毛小芳)