

秸秆还田对麦田土壤温室气体排放影响的 Meta 分析

马朋辉^{1,2} 张会敏¹ 景明¹ 宋常吉¹ 杨智文^{1,3} 陈伟伟¹
梁冰洁^{1,2} 胡亚瑾^{3,4}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 河南省农村水环境治理工程技术研究中心, 郑州 450003;
3. 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003; 4. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要: 为系统分析不同气候条件、土壤性质和田间管理措施下秸秆还田对小麦农田土壤温室气体排放的影响, 通过文献检索整合已发表论文中的田间试验数据, 采用 Meta 分析方法定量分析不同生产条件下秸秆还田对小麦农田土壤温室气体排放的影响, 同时对秸秆还田下各影响因子对温室气体排放的相对重要性进行评估。结果表明, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田显著增加土壤 N₂O 排放量 15.50%、CO₂ 排放量 10.68%、CH₄ 吸收量 26.45% ($P < 0.05$)。当年降雨量大于 1 000 mm 时, 秸秆还田下土壤 N₂O 和 CO₂ 排放量增加最少, CH₄ 吸收量增加最多, 效应值分别为 5.02%、9.88% 和 381.63%; 当年均气温为 0~10℃ 时秸秆还田下土壤 CO₂ 排放量增加最少, 当年均气温大于 15℃ 时秸秆还田下土壤 N₂O 排放量增加最少、CH₄ 吸收量增加最多。秸秆还田下土壤 N₂O 排放效应值随土壤有机碳含量增加而减小, CH₄ 吸收效应值随土壤有机碳含量增加而增大。秸秆还田下土壤 N₂O 排放效应值随施氮量增加而减小, CO₂ 排放效应值随施氮量增加先增大后减小; 免耕条件下, 秸秆还田显著减少土壤 CO₂ 排放量 10.81% ($P < 0.05$), 显著增加 CH₄ 吸收量 91.00% ($P < 0.05$); 秸秆覆盖还田显著增加 CH₄ 吸收量 202.04% ($P < 0.05$); 秸秆部分还田减少土壤 N₂O 排放量 11.33%, 显著增加 CH₄ 吸收量 121.64% ($P < 0.05$)。年降雨量、土壤全氮含量、土壤有机碳含量、氮肥施用量对秸秆还田下农田温室气体排放影响较大。研究结果可为优化秸秆还田管理实践和减少农田生态系统温室气体排放提供参考。

关键词: 温室气体排放; 土壤; 秸秆还田; 小麦农田; Meta 分析

中图分类号: S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)03-0425-12

OSID:



Meta-analysis on Effects of Straw Returning on Greenhouse Gas Emissions from Wheat Fields

MA Penghui^{1,2} ZHANG Huimin¹ JING Ming¹ SONG Changji¹ YANG Zhiwen^{1,3}
CHEN Weiwei¹ LIANG Bingjie^{1,2} HU Yajin^{3,4}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China

2. Henan Engineering Research Center of Rural Water Environment Improvement, Zhengzhou 450003, China

3. Henan Key Laboratory of Ecological Environment Protection and Restoration of the Yellow River Basin, Zhengzhou 450003, China

4. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Aiming to systematically analyze the effects of straw returning on greenhouse gas emissions from wheat farmland under different climatic conditions, soil properties and field management measures, field trial data from published papers were integrated through literature retrieval and Meta-analysis method was used to quantitatively study the effect of straw returning on greenhouse gas emissions from wheat farmland under various production conditions. Simultaneously, the relative importance of various influencing factors on greenhouse gas emissions was evaluated. The results indicated that compared with no straw returning, straw returning significantly increased soil N₂O emission by 15.50%, CO₂ emission

收稿日期: 2024-10-13 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809105)、黄河水利科学研究院科技发展基金专项(HKF202316)、中央公益性科研院所基本科研项目(HKY-JBYW-2023-26)、河南农业大学哲学社会科学类科研创新基金项目(30201181)和河南农业大学大学生创新训练计划项目(24XM0340)

作者简介: 马朋辉(1990—),男,工程师,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: mapenghui0371@163.com

通信作者: 胡亚瑾(1989—),女,讲师,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: huyajinxn@163.com

by 10.68%, and CH₄ absorption was increased by 26.45% ($P < 0.05$). When the annual precipitation was higher than 1 000 mm, straw returning resulted in the smallest increase in soil N₂O and CO₂ emissions, and the largest increase in CH₄ absorption, with effect values of 5.02%, 9.88% and 381.63%, respectively. When the annual average temperature was no more than 10°C, straw returning resulted in the smallest increase in soil CO₂ emissions, and when the annual average temperature was higher than 15°C, straw returning resulted in the smallest increase in soil N₂O emissions and the largest increase in CH₄ absorption. Under straw returning, soil N₂O emission effect values were decreased as soil organic carbon content was increased, while CH₄ absorption effect values were increased with the increase of organic carbon content. Under straw returning, the N₂O emission effect was decreased with the increase of nitrogen application rates, while the CO₂ emission effect was firstly increased and then decreased with the increase of nitrogen application rates. Under no-tillage conditions, straw returning significantly reduced soil CO₂ emissions by 10.81% ($P < 0.05$) and significantly increased CH₄ absorption by 91.00% ($P < 0.05$). Straw mulching significantly increased CH₄ absorption by 202.04% ($P < 0.05$). Partial straw returning reduced soil N₂O emissions by 11.33% and significantly increased CH₄ absorption by 121.64% ($P < 0.05$). Annual precipitation, total nitrogen, organic carbon, and nitrogen application rate had significant impacts on greenhouse gas emissions from farmland soil under straw returning. These findings can provide a reference for optimizing straw management practices and reducing greenhouse gas emissions from farmland ecosystems.

Key words: greenhouse gas emission; soil; straw returning; wheat field; Meta analysis

0 引言

甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、二氧化碳(CO₂)等温室气体增多引起的全球变暖对生态可持续性和粮食生产安全构成了重大挑战^[1]。农业生产活动是温室气体排放的最主要途径之一^[2],约占全球人为温室气体排放总量的23%。在100年时间尺度上,CH₄和N₂O全球增温潜势分别为CO₂的25倍和298倍^[3]。因此,减少农业生产中的温室气体排放对于减缓温室效应、确保生态可持续性和粮食生产安全至关重要^[4]。

农业生产中影响温室气体排放的因素众多,主要包括气候条件、土壤性质、田间管理措施以及田间作物特性^[5]。农作物秸秆是农业活动的重要副产品,含有对作物生长至关重要的氮、磷、钾等营养物质^[6]。中国农作物秸秆年产量约占世界总产量的1/4^[7],秸秆还田作为中国农业的一项基本实践,其采用率稳步上升,2010—2015年秸秆直接还田率达到61%^[8]。秸秆还田主要是通过机械粉碎或覆盖将秸秆重新返还到农田中^[9],长期试验研究结果表明,秸秆还田能够增加土壤有机碳和养分含量^[6,10],降低土壤容重,改善土壤结构^[11],还会显著影响农田温室气体的产生和排放。秸秆还田进入土壤后,作为有机质来源会导致土壤CO₂排放量增加^[12],还田秸秆分解刺激有机碳矿化也能够增加CO₂排放^[13]。部分研究则表明,秸秆覆盖能够通过减少土壤干扰和延缓土壤碳分解来减少CO₂排放^[14]。秸秆还田增加了碳输入,为产

CH₄活动提供了底物,同时创造了有利于增加CH₄排放的厌氧环境^[15-16]。部分研究则表明,在土壤湿度低的干旱地区,可能不会形成严格的厌氧条件,导致甲烷氧化菌活性增强,从而促进CH₄负排放^[17]。秸秆分解过程中产生的土壤无机氮和水溶性有机碳可为硝化反硝化作用提供充足底物,同时增强氧气消耗形成厌氧环境从而促进反硝化作用及N₂O排放^[18-19]。部分研究则表明,秸秆会固化土壤中的有效氮,减少硝化和反硝化细菌的氮源,从而减少N₂O排放^[20]。

学者就秸秆还田对农田温室气体排放的影响开展了大量试验研究,但由于气候条件、土壤性质和田间管理措施的不同,区域尺度结论尚未见报道。因此,本研究采用Meta分析方法,综合分析不同气候条件、土壤性质和田间管理措施下秸秆还田对中国小麦农田土壤温室气体排放的影响,以期优化秸秆管理实践和减少农田生态系统温室气体排放提供参考。

1 材料与方 法

1.1 数据收集与筛选

通过Web of Science、ScienceDirect和中国知网等数据库,检索“秸秆还田(straw returning)、温室气体(greenhouse gas)、氧化亚氮(nitrous oxide或N₂O)、二氧化碳(carbon dioxide或CO₂)、甲烷(methane或CH₄)”等关键词,收集筛选2024年10月以前发表的关于秸秆还田对中国小麦农田土壤温室气体排放影响的研究论文。筛选标准如下:①试

验区域位于中国,田间管理措施明确。②小麦田间试验(不包括盆栽和防雨试验)。③试验需同时包含秸秆还田和不还田处理,每个处理 3 个重复。④文中至少提供 1 种温室气体数据,以及平均值和标准差(或标准误差)。基于以上筛选标准,收集了来自国内已发表的 403 篇中英文文献,在其中筛选出 49 篇文献,共计 216 组数据,其中 N_2O 排放数据 127 组, CO_2 排放数据 47 组, CH_4 吸收数据 42 组。筛选出的文献研究地点分布在华北地区(18 篇)、西北地区(16 篇)、长江中下游地区(11 篇)、西南地区(4 篇),基本涵盖了我国小麦主产区。从筛选出的文

献中试验研究时间分布情况看,2000 年前 1 篇,2000—2010 年 12 篇,2011—2020 年 28 篇,2021—2024 年 8 篇。

1.2 数据分类

鉴于中国不同农业区域气候条件、土壤性质和田间管理措施的差异,秸秆还田对小麦农田土壤温室气体排放的影响可能存在差异。因此,将获取的数据进行分类统计(表 1),分类标准如下:气候条件(年降雨量、年均气温);土壤性质(土壤有机碳、土壤全氮含量);田间管理措施(氮肥施用量、耕作类型、还田年限、还田方式、还田比例)。

表 1 数据分类
Tab. 1 Data classification

一级因子	二级因子	分组			
		1	2	3	4
气候条件	年降雨量/mm	0 ~ 500	500 ~ 1 000	> 1 000	
	年均气温/°C	0 ~ 10	10 ~ 15	> 15	
土壤性质	土壤有机碳含量(质量比)/(g·kg ⁻¹)	0 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	> 20
	土壤全氮含量(质量比)/(g·kg ⁻¹)	0 ~ 0.9	0.9 ~ 1.5	> 1.5	
田间管理措施	氮肥施用量/(kg·hm ⁻²)	0 ~ 120	120 ~ 180	180 ~ 240	> 240
	耕作类型	免耕	翻耕	旋耕	
	还田年限/a	0 ~ 3	3 ~ 7	≥ 7	
	还田方式	覆盖还田	掺入还田		
	还田比例	全部还田	部分还田		

1.3 数据分析

1.3.1 标准差计算

当筛选的文献中提供有温室气体排放数据标准差(SD)时,则直接使用该值;若文献中无标准差,但提供有标准误差(SE)和样本重复次数 m 时,则采用公式计算,计算式为

$$SD = SE \sqrt{m} \quad (1)$$

若文献中标准差和标准误差均未提供,则假设标准差为平均值的 $1/10^{[21]}$ 。

1.3.2 效应值计算与整合

利用各研究中秸秆还田处理(试验组)和秸秆不还田(对照组)处理下小麦生长季农田土壤温室气体平均排放量、其对应的标准差、重复次数,采用生态学中常用的对数响应比作为效应值 $\ln R^{[22]}$,每个效应值权重因子 w_i 是其方差的倒数。

所有秸秆还田与不还田处理平均效应值估计为

$$\ln R_{++} = \frac{\sum (w_i \ln R_i)}{\sum w_i} \quad (2)$$

式中 $\ln R_i$ ——秸秆还田相对不还田处理的效应值

95% 置信区间 C_I 计算式为

$$C_I = \ln R_{++} \pm 1.96 E_{\ln R_{++}} \quad (3)$$

$$E_{\ln R_{++}} = \sqrt{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (4)$$

获得的 95% 置信区间若包括 0,表示秸秆还田对小麦农田土壤温室气体排放无显著影响($P > 0.05$);若大于 0,表示秸秆还田会显著增加小麦农田土壤温室气体排放($P < 0.05$);若小于 0,表示秸秆还田会显著减少小麦农田土壤温室气体排放($P < 0.05$);以上原则对亚组分析同样适用。

为更加直观地反映秸秆还田对小麦农田土壤温室气体排放的影响,将效应值转换为秸秆还田相对于秸秆不还田条件下温室气体排放量变化率 Z ,计算式为^[23]

$$Z = (\exp(\ln R_{++}) - 1) \times 100\% \quad (5)$$

1.3.3 发表偏倚检验

运用图形分析法绘制频率分布直方图检验所收集筛选数据的正态符合性。采用罗森博格失安全数检验文献是否存在发表偏倚,当失安全数大于 $5n + 10$ (n 为样本量)时,认为无发表偏倚,反之存在发表偏倚。

1.4 数据处理

采用 GetData Graph Digitizer 2.26 软件提取以图像形式呈现的温室气体排放量数据,Excel 2016

收集与处理数据,MetaWin 2.1 软件进行 Meta 分析和发表偏倚检验,Origin 2022 软件作图,利用 R 中的“随机森林”包来评估各因子对温室气体排放的重要性。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对温室气体排放的综合效应与偏倚性检验

秸秆还田对小麦农田土壤 N_2O 排放、 CO_2 排放和 CH_4 吸收效应值频数分布见图 1,研究数据通过正态性分布检验。发表偏倚检验结果表明,秸秆还

田下土壤 N_2O 排放、 CO_2 排放和 CH_4 吸收的罗森博格失安全系数分别为 25 251.2、156 173.8 和 2 311.5,均大于 $5n + 10$,故不存在发表偏倚。分别对土壤 N_2O 排放、 CO_2 排放和 CH_4 吸收进行效应值计算,结果表明,与秸秆不还田相比,秸秆还田可使 N_2O 排放量显著增加 15.50% ($P < 0.05$), CO_2 排放量显著增加 10.68% ($P < 0.05$), CH_4 吸收量显著增加 26.45% ($P < 0.05$) (图 2,误差线右侧数字为样本数,误差线表示 95% 置信区间,若误差线与虚线相交,表示秸秆还田和不还田处理之间差异不显著 ($P > 0.05$),下同)。

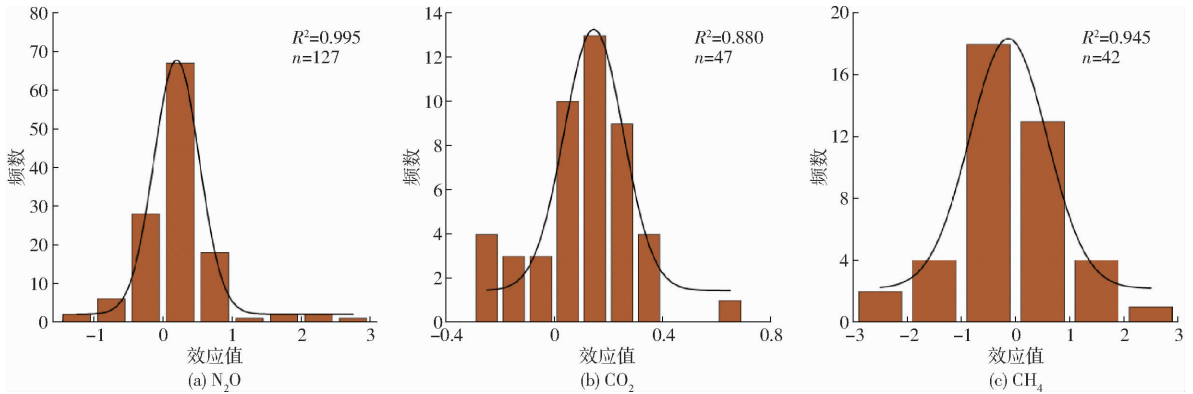


图 1 N_2O 排放、 CO_2 排放和 CH_4 吸收对秸秆还田效应值的频数分布

Fig. 1 Frequency distributions of effect value of N_2O emission, CO_2 emission and CH_4 uptake in response to straw returning

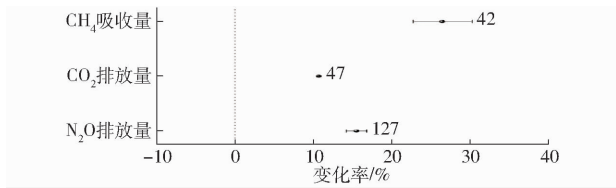


图 2 秸秆还田下 N_2O 排放、 CO_2 排放和 CH_4 吸收综合效应

Fig. 2 Overall response of change in N_2O emissions, CO_2 emissions and CH_4 uptake for straw returning

2.2 不同气候条件下温室气体排放效应

不同气候条件下秸秆还田对农田土壤温室气体排放效应的影响见图 3。在不同年降雨量下,秸秆还田均增加了农田土壤 N_2O 和 CO_2 排放,且排放效应值随年降雨量的增加而减小; CH_4 吸收效应值随年降雨量的增加而增大。当年降雨量为 0 ~ 500 mm 时,与秸秆不还田相比,秸秆还田下土壤 N_2O 和 CO_2 排放显著增加 19.94% 和 23.47% ($P < 0.05$),95% 置信区间分别为 13.08% ~ 28.09% 和 10.58% ~ 39.92%;秸秆还田对土壤 CH_4 吸收影响不显著。当年降雨量为 500 ~ 1 000 mm 时,秸秆还田下土壤 N_2O 、 CO_2 排放量显著增加 18.82% 和 12.66% ($P < 0.05$),95% 置信区间分别为 14.57% ~ 24.46% 和 10.01% ~ 15.37%;秸秆还田对土壤 CH_4 吸收影响不显著。

当年降雨量大于 1 000 mm 时,秸秆还田下土壤 N_2O 和 CO_2 排放量增加最少, CH_4 吸收量增加最多,分别增加 5.02%、9.88% 和 381.63%,95% 置信区间分别为 -12.11% ~ 25.50%、7.62% ~ 11.15% 和 201.41% ~ 669.60%。秸秆还田下各年降雨量亚组之间 N_2O 和 CO_2 排放效应没有显著差异,而 CH_4 吸收效应在年降雨量大于 1 000 mm 时显著大于 500 ~ 1 000 mm 和 0 ~ 500 mm。

随着年均气温的增加,秸秆还田下土壤 N_2O 排放效应值减小, CO_2 排放效应值和 CH_4 吸收效应值增大。当年均气温为 0 ~ 10℃ 时,与秸秆不还田相比,秸秆还田下土壤 N_2O 排放量显著增加 34.14% ($P < 0.05$),95% 置信区间为 18.82% ~ 51.45%;秸秆还田抑制了土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收,与不还田处理差异不显著,在此气温条件下秸秆还田增加土壤 CO_2 排放最少。当年均气温为 10 ~ 15℃ 时,秸秆还田下土壤 N_2O 和 CO_2 排放量显著增加 18.41% 和 13.76% ($P < 0.05$),95% 置信区间分别为 12.60% ~ 25.17% 和 11.03% ~ 16.56%;秸秆还田抑制了土壤对 CH_4 吸收,与不还田处理差异不显著。当年均气温大于 15℃ 时,秸秆还田下土壤 N_2O 排放增加最少且与不还田处理差异不显著; CO_2 排放量、 CH_4 吸收量显著增加 18.13% 和 119.20% ($P < 0.05$),95%

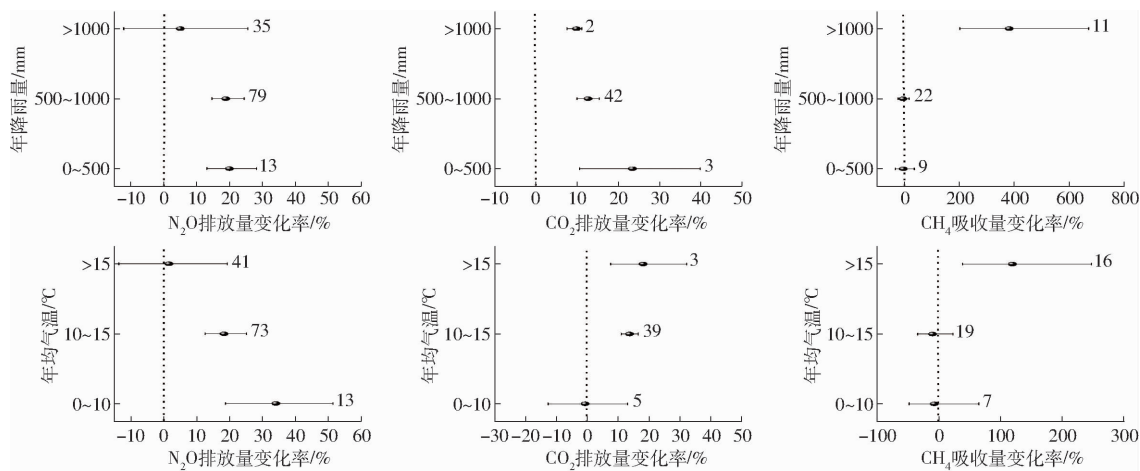


图 3 不同年降雨量和年均气温下秸秆还田温室气体排放效应

Fig. 3 Effects of different precipitation and temperature on greenhouse gas emissions from straw returning to field

置信区间分别为 7.62% ~ 32.21% 和 38.43% ~ 247.09%。秸秆还田下各年均气温亚组之间 N₂O 和 CO₂ 排放效应没有显著差异, 而 CH₄ 吸收效应在年均气温大于 15℃ 时显著大于 10 ~ 15℃。

2.3 不同土壤性质下温室气体排放效应

不同土壤性质下秸秆还田对农田土壤温室气体排放效应的影响见图 4。秸秆还田下土壤 N₂O 排放效应值随土壤有机碳含量的增加而减小, 而 CH₄ 吸收效应值随土壤有机碳含量的增加而增大; 与秸秆不还田相比, 当土壤有机碳含量小于 20 g/kg 时, 秸秆还田均增加了农田土壤 N₂O 和 CO₂ 排放。当土壤有机碳含量为 0 ~ 10 g/kg 时, 秸秆还田下土壤 N₂O 和 CO₂ 排放量显著增加 71.57% 和 26.29% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 43.88% ~ 104.60% 和 10.92% ~ 43.79%, 秸秆还田对 CH₄ 吸收影响不显著。当土壤有机碳含量为 10 ~ 15 g/kg 时与 0 ~ 10 g/kg 结果相似。当土壤有机碳含量为 15 ~ 20 g/kg 时, 秸秆还田下土壤 N₂O 和 CO₂ 排放量

增加 19.29% 和 29.62%, 95% 置信区间分别为 -6.75% ~ 52.61% 和 9.57% ~ 53.33%; CH₄ 吸收量显著减少 82.68% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 -55.71% ~ -93.22%。当土壤有机碳含量大于 20 g/kg 时, 秸秆还田下土壤 N₂O 排放量最少且显著减少 14.63% ($P < 0.05$), CH₄ 吸收量最多且显著增加 150.48% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 -26.77% ~ -1.26% 和 44.83% ~ 333.19%。

与秸秆不还田相比, 当土壤全氮含量为 0 ~ 0.9 g/kg 时, 秸秆还田下土壤 N₂O 和 CO₂ 排放量显著增加 26.97% 和 9.47% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 14.58% ~ 40.71% 和 6.40% ~ 12.61%; 秸秆还田对 CH₄ 吸收影响不显著。当土壤全氮含量为 0.9 ~ 1.5 g/kg 时, 秸秆还田下土壤 N₂O 排放量增加 17.80%, CO₂ 排放量显著增加 29.30% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 -0.48% ~ 39.43% 和 21.02% ~ 38.17%; 秸秆还田对 CH₄ 吸收影响不显著。当土壤全氮含量大于 1.5 g/kg 时, 秸秆还田下

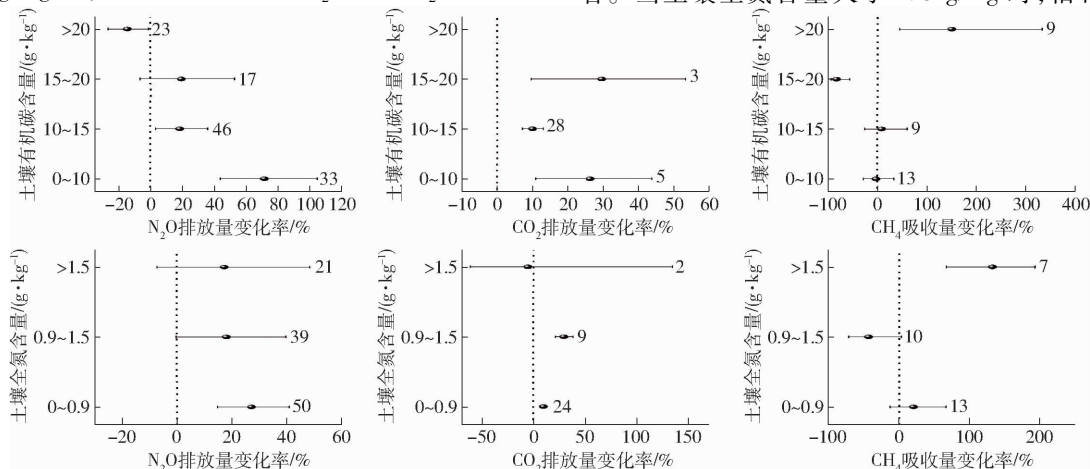


图 4 不同土壤有机碳和全氮含量下秸秆还田温室气体排放效应

Fig. 4 Effects of different soil organic carbon and total nitrogen contents on greenhouse gas emissions from straw returning to field

土壤 CH_4 吸收量显著增加 132.89% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 67.45% ~ 193.09%, 对 N_2O 和 CO_2 排放影响不显著。

2.4 不同田间管理措施下温室气体排放效应

不同田间管理措施下秸秆还田对农田土壤温室气体排放效应的影响见图 5。秸秆还田下土壤 N_2O 排放效应值随氮肥施用量增加而减小, CO_2 排放效应值随氮肥施用量增加先增大后减小。与秸秆不还田相比, 当氮肥施用量为 0 ~ 120 kg/hm^2 时, 秸秆还

田下土壤 N_2O 排放量增加最多, 显著增加 N_2O 排放量达 62.53% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 32.13% ~ 99.95%。当氮肥施用量为 120 ~ 180 kg/hm^2 时, 秸秆还田下土壤 CO_2 排放增加最多, 显著增加 CO_2 排放量达 17.52% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 9.94% ~ 25.60%。当施氮量大于 240 kg/hm^2 时, 秸秆还田下土壤 CH_4 吸收增加最多, 显著增加 CH_4 吸收量达 69.33% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 10.76% ~ 224.04%。

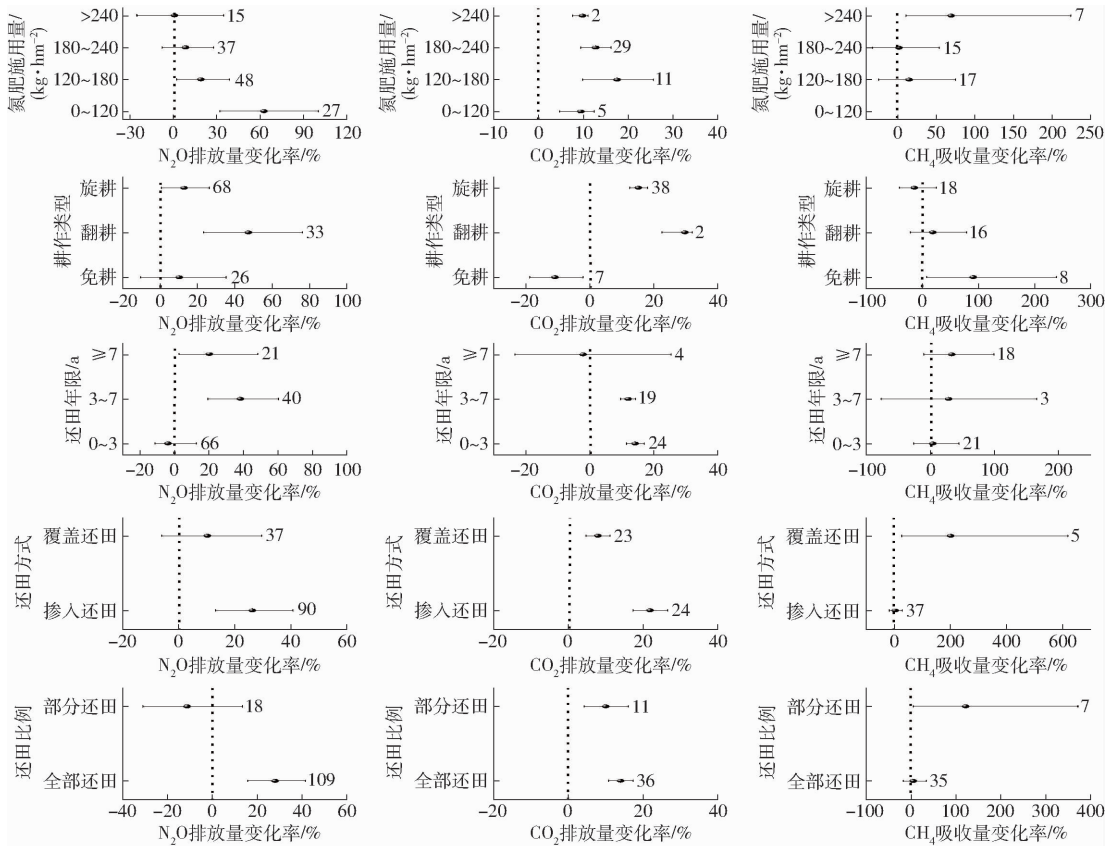


图 5 不同氮肥施用量、耕作类型、还田年限、还田方式和还田比例下秸秆还田温室气体排放效应

Fig. 5 Effects of different nitrogen application amount, tillage types, returning years, returning types and returning proportions on greenhouse gas emissions from straw returning to field

与秸秆不还田相比, 在不同耕作类型下秸秆还田均增加了农田土壤 N_2O 排放, 其中免耕条件下秸秆还田对土壤 N_2O 排放影响不显著; 耕作类型为翻耕和旋耕时, 秸秆还田下土壤 N_2O 排放量分别显著增加 47.27% 和 12.89% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 23.08% ~ 76.23% 和 0.59% ~ 26.21%。耕作类型为免耕时, 秸秆还田下土壤 CO_2 排放量显著减少 10.81% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 -18.73% ~ -2.13%; 耕作类型为翻耕和旋耕时, 秸秆还田下土壤 CO_2 排放量分别显著增加 29.71% 和 15.23% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 22.59% ~ 31.94% 和 12.42% ~ 18.10%。耕作类型为免耕时, 秸秆还田下土壤 CH_4 吸收量显著增加 91.00%

($P < 0.05$), 95% 置信区间为 7.85% ~ 238.24%; 耕作类型为翻耕和旋耕时, 秸秆还田对土壤 CH_4 吸收影响不显著。

与秸秆不还田相比, 当还田年限为 0 ~ 3 a 时, 土壤 CO_2 排放量显著增加 14.21% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 11.44% ~ 17.07%, 对土壤 N_2O 排放和 CH_4 吸收影响不显著。当还田年限为 3 ~ 7 a 时, 土壤 N_2O 和 CO_2 排放量分别显著增加 38.21% 和 12.01% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 19.28% ~ 60.14% 和 9.67% ~ 14.40%, 对 CH_4 吸收影响不显著。当还田年限大于 7 a 时, 土壤 N_2O 排放量显著增加 20.19% ($P < 0.05$), 95% 置信区间为 2.63% ~ 48.28%, 对土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收影响

不显著。

与秸秆不还田相比, 秸秆覆盖还田下土壤 CO_2 排放量和 CH_4 吸收量分别显著增加 7.89% 和 202.04% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 4.70% ~ 11.16% 和 26.83% ~ 619.37%; 土壤 N_2O 排放量增加 10.20%, 95% 置信区间为 -6.21% ~ 29.49%, 呈不显著的增加效应。秸秆掺入还田下土壤 N_2O 、 CO_2 排放量分别显著增加 26.16% 和 21.82% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 13.13% ~ 40.69% 和 17.26% ~ 26.57%; 秸秆掺入还田下土壤 CH_4 吸收量增加 3.05%, 95% 置信区间为 -17.77% ~ 29.14%, 呈不显著的增加效应。秸秆部分还田下 CO_2 排放量和 CH_4 吸收量分别显著增加 9.95% 和 121.64% ($P < 0.05$), 95% 置信区间分别为 4.24% ~ 15.99% 和 4.46% ~ 370.35%; 土壤 N_2O 排放量减少 11.33%, 95% 置信区间为 -30.86% ~ 13.41%, 呈不显著的减少效应。秸秆全部还田下土壤 N_2O 、 CO_2 排放量显著增加 27.95% 和 14.00% ($P <$

0.05), 95% 置信区间分别为 15.77% ~ 41.43% 和 10.75% ~ 17.33%; 土壤 CH_4 吸收量增加 15.95%, 95% 置信区间为 -17.92% ~ 43.02%, 呈不显著的增加效应。

2.5 温室气体排放对影响因子的响应

秸秆还田下, 气候条件、土壤性质和田间管理措施对土壤 N_2O 、 CO_2 排放和 CH_4 吸收均有一定影响, 各因素对温室气体排放影响的相对重要性见图 6。对土壤 N_2O 排放影响较大的前 3 位因素分别为年降雨量 (15.75%)、土壤全氮含量 (11.43%) 和土壤有机碳含量 (9.80%), 对 CO_2 排放影响较大的前 3 位因素分别为土壤有机碳含量 (17.11%)、土壤全氮含量 (15.91%) 和年降雨量 (11.47%), 对 CH_4 吸收影响较大的前 3 位因素分别为年降雨量 (13.54%)、土壤全氮含量 (11.19%) 和氮肥施用量 (8.52%)。还田年限、还田方式、还田比例和耕作措施对秸秆还田下温室气体排放的影响相对较弱。

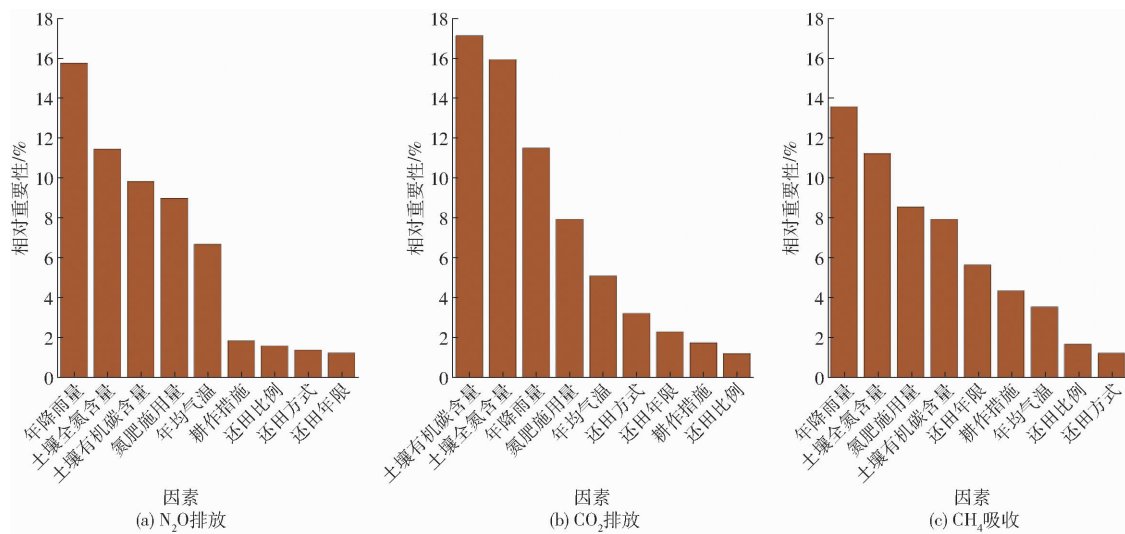


图 6 秸秆还田下各因素对温室气体排放影响的相对重要性

Fig. 6 Relative importance of each factor on greenhouse gas emissions from returning straw to field

3 讨论

3.1 气候条件对秸秆还田下温室气体排放的影响

年降雨量和年均气温可以影响土壤温度、含水率、孔隙度和微生物活动, 进而影响秸秆分解和温室气体排放^[24]。本研究中, 当年均气温大于 15°C 时, 秸秆还田对 N_2O 排放的影响不显著。这是由于在高温地区, 秸秆还田的降温作用会减缓微生物活动速率, 进而减缓秸秆氮的释放, 导致秸秆还田对 N_2O 排放的影响降低。然而, 当气温小于等于 15°C 时, 秸秆还田通常表现为对土壤的保温作用, 从而促进了 N_2O 排放。当土壤温度大于等于 10°C 时, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田对 CO_2 排放的影响差异显著,

虽然秸秆具有一定降温作用, 但秸秆的输入增加了土壤碳含量, 进而促进了 CO_2 排放^[25]。土壤温度增加促进了作物残体和有机物分解, 最终增加了 CO_2 排放^[26]。土壤表面温度升高也可能增强硝化细菌活性, 导致 CO_2 排放。当年均气温大于 15°C 时, 秸秆还田显著增加了土壤对 CH_4 的吸收效应^[27-28]。本研究表明, 秸秆还田下降雨量对土壤 N_2O 排放具有重要的影响(图 6), 当年降雨量为 0 ~ 500 mm 时, 秸秆还田会产生更多的 N_2O 排放(图 3), 这可能是由于与不还田相比, 在降雨较少地区, 秸秆还田保水效果更好, 促进了反硝化作用, 从而增加了 N_2O 排放^[29-31]。

3.2 土壤性质对秸秆还田下温室气体排放的影响

不同土壤质地表现出不同的透气性和可耕性,而不同土壤性质,如土壤有机碳或全氮,对异养反硝化细菌非常重要,从而影响土壤温室气体排放^[28]。本研究中,当土壤有机碳含量较低时,秸秆还田下土壤 N_2O 排放显著增加(图4)。土壤有机碳效应值与土壤初始有机碳含量有关,此外,秸秆还田可直接提供有机碳,土壤微生物可将这些有机质转化为可供作物利用的养分,提高土壤有机碳总含量^[32]。土壤有机碳在 NH_3 和 NO_3 同化过程中是硝化和反硝化微生物的关键底物,高土壤有机质含量促进异养硝化和反硝化,从而产生 N_2O ^[33]。秸秆还田下土壤 CO_2 排放显著增加,这可能是由于秸秆还田直接增加了土壤有机碳,而土壤有机碳对土壤温室气体排放有重要影响(图6),有机碳直接增加了土壤微生物呼吸的底物有效性,促进了土壤微生物新陈代谢,并且秸秆还田增大了土壤孔隙,提高了土壤通透性,使得土壤有机质与土壤空气中的氧气充分接触,有机质分解速度增加,导致土壤呼吸速率增加^[34]。此外,土壤有机碳含量显著影响土壤微生物丰度和活性,土壤微生物可以调节 CH_4 吸收。

3.3 田间管理措施对秸秆还田下温室气体排放的影响

当氮肥施用量为 $0 \sim 180 \text{ kg/hm}^2$ 时,秸秆还田显著增加了土壤 N_2O 排放(图5),这可能是因为在适当施氮量下,秸秆掺入破坏了原有的物质和能量平衡,在土壤中造成更多分离和通风不良的缺氧微环境,这些条件增强了土壤硝化和反硝化作用,导致土壤 N_2O 排放增加^[35]。氮肥施用下,秸秆还田均显著增加了土壤 CO_2 排放。氮肥施用量为 $0 \sim 120 \text{ kg/hm}^2$ 时, CO_2 排放增加量低于其他氮肥施用量亚组,这是因为 CO_2 排放与作物残茬分解、根系呼吸和有机碳矿化有关,氮肥施用量过低可能抑制土壤胞外酶活性、真菌生物量、细菌生物量和根系生物量,从而抑制土壤 CO_2 排放^[36-37]。本研究表明,氮肥施用量为 $0 \sim 240 \text{ kg/hm}^2$ 时,秸秆还田对 CH_4 吸收影响不显著,氮肥施用量大于 240 kg/hm^2 时秸秆还田才显著增加土壤对 CH_4 的吸收(图5),这可能是由于 N 的投入促进了作物生长、氧化和甲烷营养细菌活性,从而增加了 CH_4 消耗^[38]。然而,也有研究表明秸秆也可能将更多的作物碎屑带入土壤,提高碳水平和甲烷菌活性,并增加 CH_4 排放^[39]。

不同耕作类型下秸秆还田对温室气体排放的影响也存在差异,有研究表明免耕能显著增加温室气体排放^[26,40],主要原因是免耕增加了土壤微生物活性,增强土壤异养呼吸^[41-42],但也有研究表明免耕

可以减少温室气体排放^[43-44]。本研究中耕作类型为免耕时秸秆还田下 N_2O 排放增加量低于翻耕和旋耕,但三者之间没有显著差异(图5),这与 PETERSEN 等^[45]的研究结果一致。然而也有研究表明,与免耕相比翻耕和旋耕显著增加了秸秆还田下土壤 N_2O 排放^[46],原因是翻耕和旋耕在一定程度上改善了土壤透气透水性,并可能将土壤从厌氧状态转变成富氧状态,促使土壤的干湿循环变换过程加快,使土壤内营养物质和微生物混合更加均匀,加深了硝化反应程度,并且使产生的 N_2O 更容易向外释放^[47]。产生不一致结果的原因可能是在厌氧环境下反硝化反应增强以及硝化反应减弱的程度也会因为受到其他各因素(尤以施肥为最)的影响而发生改变, N_2O 排放变化的最终情况取决于其增强和减弱的程度^[48]。本研究表明,秸秆还田下免耕比翻耕和旋耕减少了 CO_2 排放、增加了土壤对 CH_4 的吸收,这与之前的研究结果一致^[49],主要由于免耕为作物残体腐殖质化提供了有利环境,并提高了植物生物量碳稳定速率^[50]。此外,秸秆还田结合免耕措施还增加了土壤团聚体稳定性,降低酶和微生物对有机碳的分解,从而减少了有机碳矿化和 CO_2 排放^[51-52],而且部分秸秆在土壤表面发生好氧降解,其降解产物在土壤氧化层中还还原为 CH_4 的可能性较小^[52-53]。

有研究表明,秸秆还田对土壤 N_2O 排放有一定的抑制作用^[54]。秸秆还田后的前 $1 \sim 2 \text{ a}$,向土壤中添加秸秆作为碳源,促进固氮,增加土壤总氮,同时减少 N_2O 排放^[55-57]。随着秸秆还田时间延长,土壤总氮含量持续增加,可能为氮转化提供更多的基质^[58-59],并逐渐降低秸秆还田对 N_2O 排放的抑制作用。本研究表明,短期秸秆还田对 N_2O 排放有抑制作用但不显著,但长期秸秆还田促进了 N_2O 排放(图5)。短期秸秆还田显著增加了 CO_2 排放,长期秸秆还田下 CO_2 排放和 CH_4 吸收与秸秆不还田相比无显著差异,这与 JIANG 等^[60]的研究结果一致。长期秸秆还田改变了土壤结构和质量,尤其是增加土壤团聚体,可以保护土壤有机碳(SOC)不被分解,从而降低 CO_2 和 CH_4 排放量^[61]。其次,长期秸秆投入能提高土壤肥力,促进藻类生长,进而增加溶解氧浓度^[62]。另外,长期秸秆投入促进植物良性快速生长,加快氧气输送到根际土壤,促进 CH_4 氧化细菌生长^[63]。

秸秆全部还田会形成局部厌氧环境,促进反硝化作用,增加土壤 N_2O 排放^[64]。与秸秆覆盖还田相比,秸秆掺入还田加速秸秆分解并消耗氧气,促进

硝化反硝化作用,增加了土壤 N_2O 排放^[65-66]。本研究中,与秸秆不还田相比,秸秆掺入还田和全部还田下土壤对 CH_4 的吸收增加不显著,这与 HUANG 等^[64]的研究结论一致,原因可能是秸秆掺入还田和秸秆全部还田虽较秸秆覆盖和秸秆部分还田增加了甲烷菌底物,但硝化和反硝化的 C、N 反应底物也会增加,秸秆的好氧降解也呈增加趋势,从而增加土壤 CO_2 的排放效应,但对 CH_4 吸收效应没有显著影响^[54,67]。

4 结论

(1)与秸秆不还田相比,秸秆还田可使 N_2O 排放量显著增加 15.50% ($P < 0.05$), CO_2 排放量显著增加 10.68% ($P < 0.05$), CH_4 吸收量显著增加 26.45% ($P < 0.05$)。

(2)当年降雨量大于 1 000 mm 时,秸秆还田下土壤 N_2O 和 CO_2 排放量增加最少, CH_4 吸收量增加

最多。随着年均气温的增加,秸秆还田下土壤 N_2O 排放效应值减小, CO_2 排放效应值和 CH_4 吸收效应值增大。

(3)当土壤有机碳含量为 0 ~ 10 g/kg 时,秸秆还田下土壤 N_2O 、 CO_2 排放量显著增加 71.57% 和 26.29% ($P < 0.05$);当土壤有机碳含量大于 20 g/kg 时,秸秆还田对土壤 N_2O 排放具有抑制作用,对 CH_4 吸收具有促进作用。

(4)秸秆还田下土壤 N_2O 排放效应值随氮肥施用量增加而减小, CO_2 排放效应值随氮肥施用量增加先增大后减小。免耕条件下秸秆还田显著减少了土壤 CO_2 排放,增加了 CH_4 吸收。秸秆部分还田减少了土壤 N_2O 排放,全部还田增加了 N_2O 排放。秸秆部分还田和覆盖还田显著增加了 CO_2 排放和 CH_4 吸收。因此,实现秸秆还田下温室气体排放的有效控制需综合考虑气候条件、土壤性质和田间管理措施等。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 张作合,李铁成,张忠学,等. 水炭运筹下稻田痕量温室气体排放与水氮利用关系研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(8): 379-387.
ZHANG Zuohe, LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, et al. Relationship between trace greenhouse gas emission and water and nitrogen utilization under water biochar management in paddy fields[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(8): 379-387. (in Chinese)
- [3] MAUCIERI C, TOLOMIO M, MCDANIEL M D, et al. No-tillage effects on soil CH_4 fluxes: a Meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 212: 105042.
- [4] YANG L, MUHAMMAD I, CHI Y X, et al. Straw return and nitrogen fertilization regulate soil greenhouse gas emissions and global warming potential in dual maize cropping system[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158370.
- [5] 栾小波,高子涵,薛静,等. 气候与种植结构变化对温室气体排放及灌溉需水的影响[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 327-337.
LUAN Xiaobo, GAO Zihan, XUE Jing, et al. Effects of climate and plantation structure changes on greenhouse gas emissions and irrigation water demand[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12): 327-337. (in Chinese)
- [6] HUANG W, WU J F, PAN X H, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon fractions and enzyme activities in a double-cropped rice paddy in South China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(1): 236-247.
- [7] 高利伟,马林,张卫峰,等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 173-179.
GAO Liwei, MA Lin, ZHANG Weifeng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 173-179. (in Chinese)
- [8] 刘晓永,李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1-19.
LIU Xiaoyong, LI Shutian. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(21): 1-19. (in Chinese)
- [9] HU Y J, MA P H, ZHANG B B, et al. Exploring optimal soil mulching for the wheat-maize cropping system in sub-humid drought-prone regions in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 219: 59-71.
- [10] 赵政鑫,王晓云,李府阳,等. 秸秆还田施肥稳定性氮肥对麦玉轮作水氮利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 350-360.
ZHAO Zhengxin, WANG Xiaoyun, LI Fuyang, et al. Effects of straw returning and application of stable nitrogen fertilizer on water and nitrogen use efficiencies of wheat maize rotation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 350-360. (in Chinese)
- [11] HU Y J, SUN B H, WU S F, et al. Soil carbon and nitrogen of wheat-maize rotation system under continuous straw and plastic mulch[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2021, 119: 181-193.

- [12] HEINTZE G, EICKENSCHIEDT T, SCHMIDHALTER U, et al. Influence of soil organic carbon on greenhouse gas emission potential after application of biogas residues or cattle slurry: results from a pot experiment[J]. *Pedosphere*, 2017, 27: 807–821.
- [13] LI S, LI Y B, LI X S, et al. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize-wheat cropping system in Anthrosol of the Guanzhong Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 157: 43–51.
- [14] AL-KAISI M M, YIN X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(2): 437–445.
- [15] YAO Z S, ZHENG X H, WANG R, et al. Nitrous oxide and methane fluxes from a rice-wheat crop rotation under wheat residue incorporation and no-tillage practices[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 641–649.
- [16] WANG N, YU J G, ZHAO Y H, et al. Straw enhanced CO₂ and CH₄ but decreased N₂O emissions from flooded paddy soils: changes in microbial community compositions[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 174: 171–179.
- [17] ZHANG D X, PAN G X, WU G, et al. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 106–113.
- [18] 许宏伟,李娜,冯永忠,等. 氮肥和秸秆还田方式对麦玉米轮作土壤 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5668–5676.
- XU Hongwei, LI Na, FENG Yongzhong, et al. Effects of nitrogen fertilizer and straw returning methods on N₂O emissions in wheat-maize rotational soils[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5668–5676. (in Chinese)
- [19] 高焕平,刘世亮,赵颖,等. 秸秆与氮肥调节 C/N 比对潮土 CH₄, CO₂ 和 N₂O 排放/吸收的影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(1): 157–164.
- GAO Huanping, LIU Shiliang, ZHAO Ying, et al. Effects of straw and nitrogen fertilizer on emission and absorption of CH₄, CO₂ and N₂O in alluvial soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(1): 157–164. (in Chinese)
- [20] YEBOAH S, ZHANG R Z, CAI L Q, et al. Greenhouse gas emissions in a spring wheat-field pea sequence under different tillage practices in semi-arid Northwest China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 106: 77–91.
- [21] DU Y D, CUI B J, ZHANG Q, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a Meta-analysis[J]. *Catena*, 2020, 193: 104617.
- [22] 李荣,薛敏,沙炎,等. 基于 Meta 分析的黑龙省水稻水土肥资源协同优化调配[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(5): 302–311.
- LI Mo, XUE Min, SHA Yan, et al. Synergistic and optimal allocation of water, land and fertilizer resources of rice in Heilongjiang Province based on Meta-analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(5): 302–311. (in Chinese)
- [23] 李昊,李世平,南灵,等. 中国棉花地膜覆盖产量效应的 Meta 分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 228–235.
- LI Hao, LI Shiping, NAN Ling, et al. Meta-analysis of effect of plastic film mulching on cotton yield in China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 228–235. (in Chinese)
- [24] HU Y J, LI D H, WU Y, et al. Mitigating greenhouse gas emissions by replacing inorganic fertilizer with organic fertilizer in wheat-maize rotation systems in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118494.
- [25] WEI H H, ZHANG F, ZHANG K P, et al. Effects of soil mulching on staple crop yield and greenhouse gas emissions in China: a Meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2022, 284: 108566.
- [26] OORTS K, MERCHX R, GREHAN E, et al. Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95: 133–148.
- [27] FENG J F, CHEN C Q, ZHANG Y, et al. Impacts of cropping practices on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in China: a Meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 220–228.
- [28] WANG H M, ZHENG J, FAN J L, et al. Grain yield and greenhouse gas emissions from maize and wheat fields under plastic film and straw mulching: a Meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2021, 270: 108210.
- [29] LUO G J, KIESE R, WOLF B, et al. Effects of soil temperature and moisture on methane uptake and nitrous oxide emissions across three different ecosystem types[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10: 3205–3219.
- [30] PARN J, VERHOEVEN J T A, BUTTERBACH-BAHL K, et al. Nitrogen-rich organic soils under warm well-drained conditions are global nitrous oxide emission hotspots[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1–8.
- [31] GUO C, LIU X F. Effect of soil mulching on agricultural greenhouse gas emissions in China: a Meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2022, 17: e0262120.
- [32] VAN GROENIGEN K J, HASTINGS A, FORRISTAL D, et al. Soil C storage as affected by tillage and straw management: an assessment using field measurements and model predictions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140: 218–225.
- [33] XU G C, LIU X, WANG Q S, et al. Effects of screenhouse cultivation and organic materials incorporation on global warming potential in rice fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24: 6581–6591.
- [34] 陈曦,张彦军,邹俊亮,等. 耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1702–1712.
- CHEN Xi, ZHANG Yanjun, ZOU Junliang, et al. Tillage depth regulation and the effect of straw return on soil respiration in farmland[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1702–1712. (in Chinese)
- [35] 张冉,赵鑫,濮超,等. 中国农田秸秆还田土壤 N₂O 排放及其影响因素的 Meta 分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22):

- 1-6.
- ZHANG Ran, ZHAO Xin, PU Chao, et al. Meta-analysis on effects of residue retention on soil N_2O emissions and influence factors in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 1-6. (in Chinese)
- [36] DONG D, YANG W C, SUN H, et al. Nitrogen fertilization decrease soil CO_2 emission in a rainfed maize field in Northeast China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(54): 81256-81264.
- [37] JIAN S Y, LI J W, CHEN J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: a Meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 32-43.
- [38] HE H, LI D D, PAN F F, et al. Effects of nitrogen reduction and optimized fertilization combined with straw return on greenhouse gas emissions and crop yields of a rice-wheat rotation system[J]. International Journal of Plant Production, 2022, 16(4): 669-679.
- [39] HU Q Y, LIU T Q, JIANG S S, et al. Combined effects of straw returning and chemical N fertilization on greenhouse gas emissions and yield from paddy fields in Northwest Hubei Province, China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20: 392-406.
- [40] PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J S. Greenhouse gas emissions from rice crop with different tillage permutations in rice-wheat system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 159: 133-144.
- [41] PLAZA-BONILLA D, CANTERO-MARTINEZ C, BARECHE J, et al. Soil carbon dioxide and methane fluxes as affected by tillage and N fertilization in dryland conditions[J]. Plant and Soil, 2014, 381: 111-130.
- [42] GUO L J, CAO C G, CHENG F, et al. Emissions of CH_4 and CO_2 from paddy fields as affected by tillage practices and crop residues in central China[J]. Paddy and Water Environment, 2016, 14(1): 85-92.
- [43] RUTKOWSKA B, SZULC W, SOSULSKI T, et al. Impact of reduced tillage on CO_2 emission from soil under maize cultivation [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 21-28.
- [44] TELLEZ-RIO A, GARCIA-MARCO S, NAVAS M, et al. N_2O and CH_4 emissions from a fallow-wheat rotation with low N input in conservation and conventional tillage under a Mediterranean agroecosystem[J]. Science of the Total Environment, 2015, 508: 85-94.
- [45] PETERSEN S O, SCHJONNING P, THOMSEN I K. Nitrous oxide evolution from structurally intact soil as influenced by tillage and soil water content[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40: 967-977.
- [46] 李长卓. 基于 Meta 分析研究不同耕作方式对麦田 N_2O 排放的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
LI Changzhuo. Effect of different tillage methods on N_2O emission from wheat fields based on Meta-analysis [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [47] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N_2O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1524-1530.
SUN Zhiqiang, HAO Qingju, JIANG Changsheng, et al. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1524-1530. (in Chinese)
- [48] 姚志生, 郑循华, 周再兴. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N_2O 排放对比观测研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 6(11): 691-701.
YAO Zhisheng, ZHENG Xunhua, ZHOU Zaixing. Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu region: a comparison case study[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 6(11): 691-701. (in Chinese)
- [49] ABDALLA M, OSBORNE B, LANIGAN G, et al. Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(2): 199-209.
- [50] DING G W, LIU X B, HERBERT S, et al. Effect of cover crop management on soil organic matter[J]. Geoderma, 2006, 130(4): 229-239.
- [51] YU Q, WANG H, WEN P F, et al. A suitable rotational conservation tillage system ameliorates soil physical properties and wheat yield: an 11-year in-situ study in a semi-arid agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104600.
- [52] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH_4 的排放[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2878-2886.
LIU Jinjian, WU Pingping, XIE Xiaoli, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2878-2886. (in Chinese)
- [53] LI Y C, HOU C C, LI Y, et al. Effects of no-till and straw mulch on greenhouse gas emission from farmland: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(6): 1076-1083.
- [54] XIA L L, WANG S W, YAN X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014, 197: 118-127.
- [55] HUANG Q, ZHANG G B, MA J, et al. Dynamic interactions of nitrogen fertilizer and straw application on greenhouse gas emissions and sequestration of soil carbon and nitrogen: a 13-year field study[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 325: 107753.
- [56] MILLAR N, NDUFA J K, CADISCH G, et al. Nitrous oxide emissions following incorporation of improved-fallow residues in the humid tropics[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(1): GB1032.

- [57] SHAN J, YAN X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71: 170 – 175.
- [58] BOOTH M S, STARK J M, RASTETTER E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data[J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75: 139 – 157.
- [59] GUTLEIN A, GERSCHLAUER F, KIKOTI I, et al. Impacts of climate and land use on N₂O and CH₄ fluxes from tropical ecosystems in the Mt. Kilimanjaro region, Tanzania[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24: 1239 – 1255.
- [60] JIANG Y, QIAN H Y, HUANG S, et al. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition[J]. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau9038.
- [61] ZHAO X, LIU B Y, LIU S L, et al. Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: a Meta-analysis[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(6): 694 – 709.
- [62] KRISHNAYYA G R, SETTER T L, SARKAR R K, et al. Influence of phosphorus application to floodwater on oxygen concentrations and survival of rice during complete submergence[J]. *Experimental Agriculture*, 1999, 35(2): 167 – 180.
- [63] JIANG Y, VAN GROENIGEN K J, HUANG S, et al. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4728 – 4738.
- [64] HUANG T T, WEN S Y, ZHANG M X, et al. Effect on greenhouse gas emissions (CH₄ and N₂O) of straw mulching or its incorporation in farmland ecosystems in China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 46: 223 – 232.
- [65] HU N J, CHEN Q, ZHU L Q. The responses of soil N₂O emissions to residue returning systems: a Meta-analysis[J]. *Sustainability*, 2019, 11(3): 748.
- [66] ZHOU Y Z, ZHANG Y Y, TIAN D, et al. The influence of straw returning on N₂O emissions from a maize-wheat field in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584: 935 – 941.
- [67] YAO Z, ZHENG X, WANG R, et al. Nitrous oxide and methane fluxes from a rice-wheat crop rotation under wheat residue incorporation and no-tillage practices[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 641 – 649.

(上接第 391 页)

- [18] 刘建航, 何鉴恒, 陈海华, 等. 基于改进 YOLO v4 和 ICNet 的番茄串检测模型[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10): 216 – 224, 254.
LIU Jianhang, HE Jianheng, CHEN Haihua, et al. Development of detection model for tomato clusters based on improved YOLO v4 and ICNet[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 216 – 224, 254. (in Chinese)
- [19] 吕强, 林刚, 蒋杰, 等. 基于改进 YOLO v5s 模型的自然场景中绿色柑橘果实检测[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(18): 147 – 154.
LÜ Qiang, LIN Gang, JIANG Jie, et al. Detecting green citrus fruit in natural scenes using improved YOLO v5s model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2024, 40(18): 147 – 154. (in Chinese)
- [20] 苗荣慧, 李志伟, 武锦龙. 基于改进 YOLO v7 的轻量化樱桃番茄成熟度检测方法[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10): 225 – 233.
MIAO Ronghui, LI Zhiwei, WU Jinlong. Lightweight maturity detection of cherry tomato based on improved YOLO v7[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 225 – 233. (in Chinese)
- [21] 全国果品标准化技术委员会贮藏加工分技术委员会. 番茄: GH/T 1193—2021[S]. 北京: 中华全国供销合作总社, 2021.
- [22] 徐彦威, 李军, 董元方, 等. YOLO 系列目标检测算法综述[J]. *计算机科学与探索*, 2024, 18(9): 2221 – 2238.
XU Yanwei, LI Jun, DONG Yuanfang, et al. Survey of development of YOLO object detection algorithms[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2024, 18(9): 2221 – 2238. (in Chinese)
- [23] ANDREW H, MARK S, GRACE C, et al. Searching for MobileNetV3[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision(ICCV)*, 2019: 1314 – 1324.
- [24] HOU Q B, ZHOU D Q, FENG J S. Coordinate attention for efficient mobile network design[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2016: 13713 – 13722.
- [25] LIU S, QI L, QIN H F, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2018: 8759 – 8768.
- [26] LIN T Y, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2017: 2117 – 2125.
- [27] TAN M X, PANG R M, LE Q V. Efficientdet: scalable and efficient object detection[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2020: 10781 – 10790.