

汪慧泉, 杨国英, 顾克军. 秸秆还田背景下农田碳排放效应研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(18): 10–17.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.18.002

秸秆还田背景下农田碳排放效应研究进展

汪慧泉¹, 杨国英², 顾克军²

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014)

摘要:作为农田废弃物高效利用的重要措施, 秸秆还田具有改善土壤结构、固氮培肥的作用, 但长期秸秆还田存在增加碳排放的风险。碳排放的增加会导致温室效应加剧、臭氧层破坏等环境问题。已有的文献总结了不同秸秆还田措施对碳排放的影响, 但缺乏秸秆还田背景下农田碳排放的机理、影响因素及相关减排措施等的归纳。本文通过查阅文献从分析碳排放产生的机理入手, 概述碳排放产生规律, 并对影响碳排放的因素进行系统归纳和分析, 总结出影响碳排放的因素主要包括环境因素、农艺措施(还田量与还田年限、还田方式、还田深度)、土壤因素(水分、温度、有机质含量、土壤微生物、土壤酶活性及肥料管理)等。此外, 探讨了有助于实现秸秆还田背景下碳减排的秸秆炭化还田、农艺(沟埋还田、深埋还田)、肥料管理和灌溉等措施, 指出了当前主要减排措施的不足及今后研究的方向, 如:需综合考虑净生态经济效益, 在减排效果优异的同时降低成本; 加强不同秸秆还田背景下土壤根际微生物的变化对碳排放的影响机制研究, 同时增加田间长期定位试验。通过对以上内容的综述, 以期绿色秸秆还田与碳减排研究提供理论依据。

关键词: 秸秆还田; 碳排放; 排放机理; 影响因素; 减排措施

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2024)18-0010-08

秸秆是农作物收获后剩余茎叶的总称, 具有丰富的有机质和营养物质^[1]。秸秆还田作为一种低投入、可持续的农业废弃物利用方式, 既可减少秸秆废弃物对环境的危害, 又可补充土壤养分, 促进农作物生长, 被广泛应用于农业生产中^[2]。秸秆还田能够促进土壤固碳, 提高土壤肥力, 促进作物根系生长, 从而提高产量^[3]。目前, 秸秆还田主要有直接还田(粉碎还田和整秆还田)和间接还田(堆沤还田、炭化还田等)2种方式^[4]。

农业碳排放是指农业生产及农地利用过程中产生的温室气体总称, 主要包括 CH₄、N₂O 及 CO₂ 的排放。温室气体排放增加将加剧全球变暖, 是全球面临的严峻问题之一^[5]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出, 2011—2020 年全

球气温比 1850—1900 年高 1.09 °C。与此同时, 自 1990 年来, 温室气体(包括 CH₄、N₂O 及 CO₂)排放增加 17%, 且近年来温室气体排放增量占比较大^[6]。农田系统固碳减排对大气温室气体浓度具有重要的调节作用。因此, 通过农田碳减排以应对大气温室气体浓度增加, 已成为国际社会普遍关注的问题。秸秆还田在农田固碳过程中发挥了非常积极的作用, 但秸秆还田后温室气体增排导致的温室效应可能大于其固碳的效果, 从而导致新的温室气体排放^[7]。如何在秸秆还田背景下实现最大程度碳减排是当前亟待解决的关键问题。本文对秸秆还田导致碳排放的机理、影响因素以及减排措施进行综述, 以期为实现绿色秸秆还田与碳减排的目标提供理论依据与技术参考。

1 秸秆还田背景下的碳排放机理

1.1 秸秆还田背景下 CH₄ 产生的机理

众多研究表明, 在全球气候变暖背景下, 秸秆还田会增加 CH₄ 排放^[8-10]。Hu 等研究发现, 不同秸秆覆盖于农田, 腐化还田后均有增加 CH₄ 的趋势, 与不还田相比增加 141.9%^[11]。农田系统甲烷产生的原因主要有:(1)秸秆还田后由于秸秆废弃物覆盖, 营造了好的厌氧环境, 并提供大量的有机

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2022YFD2300704); 江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(22)1002]。

作者简介: 汪慧泉(1998—), 男, 江苏泰州人, 硕士, 研究方向为农业环境生态学。E-mail: w18925054658@163.com。

通信作者: 顾克军, 研究员, 研究方向为作物秸秆还田利用与稻茬小麦高效耕播农机农艺融合, E-mail: gkjjas@163.com; 杨国英, 博士, 助理研究员, 研究方向为农业环境生态学, E-mail: 18260410518@163.com。

碳源,为产甲烷菌的产生提供了有利条件,再加上秸秆还田的固碳效应,使得农田土壤碳库不断增加,部分土壤有机碳受微生物作用分解为 CH_4 ,相应地增加了 CH_4 排放^[12]。(2) 秸秆腐解过程消耗氧气,以及覆盖的秸秆形成的厌氧环境,可有效提高产甲烷菌活性,抑制甲烷氧化菌活性^[13]。同时,秸秆腐解增加土壤有机质含量,从而导致 CH_4 排放增加^[14]。此外,甲烷的产生还与诸多因素有关,如环境因素、还田量、还田年限等^[15-16]。

1.2 秸秆还田背景下 CO_2 产生的机理

大量研究表明,秸秆还田会导致 CO_2 排放增加^[17-19]。这可能是由于还田的秸秆在腐解过程中,一部分经微生物的分解直接以 CO_2 的形式排放于大气中。秦越等研究认为,秸秆还田增加了土壤可溶性有机碳(DOC)含量,而土壤中的 DOC 是可以被微生物直接利用的有效碳源^[20]。李金等通过研究不同秸秆还田方式对 CO_2 排放变化,发现了微生物碳含量与 CO_2 排放呈现正相关,这可能是由于秸秆覆盖在土壤上,增加了活性 DOC 含量,促进微生物代谢活动,从而增加了 CO_2 排放^[21]。也有研究认为,秸秆还田能显著增加 DOC 中胺类物质和芳香族化合物的含量,这些物质在环境及农艺措施等外界因素变化时会发生分解,从而促使 CO_2 排放^[22]。因此秸秆还田情景下 DOC 含量变化对 CO_2 排放有着重要影响。

1.3 秸秆还田背景下 N_2O 产生的机理

目前,秸秆还田对 N_2O 排放的影响,研究结果并不一致,主要体现在 2 个方面:一是秸秆还田为土壤硝化与反硝化微生物提供了充足的碳源,提高了微生物活性,从而增加 N_2O 排放;另一方面,秸秆还田补充了氮素并将其固持在土壤中,从而降低硝化与反硝化细菌对氮素的利用,减少 N_2O 排放^[23]。秸秆还田对 N_2O 排放的作用效果与秸秆还田量、还田方式及土壤碳氮比等因素有关。秸秆还田通过改变土壤 C/N 来影响土壤微生物对氮素的吸收利用,进而影响 N_2O 排放^[24]。胡天怡等研究发现,水稻秸秆碳氮比高,矿化速率慢,减少了无机氮供应,从而降低了硝化过程,减少 N_2O 的排放^[25]。Wang 等研究发现,秸秆还田可以改变土壤硝化反硝化细菌的组成,降低 nirS 与 nirK 的基因丰度,从而减少 N_2O 排放^[26]。而 Qiu 等研究则认为,秸秆还田增加土壤营养物质,促进微生物活性,且秸秆腐解会消耗氧气,营造利于硝化反硝化的厌氧环境,从而增

加 N_2O 排放^[27]。因此,要深刻揭示秸秆还田对农田 N_2O 排放的作用机理,还需借助长期定位试验,加强秸秆还田过程中硝化与反硝化微生物作用对农田 N_2O 排放的机制研究。

2 秸秆还田背景下影响碳排放的因素

2.1 温度

温度是影响农田温室气体排放的重要因素。一般情况下,温度升高会导致 CH_4 与 CO_2 排放增加,特别是秸秆还田情景下,会增加农田系统 CH_4 与 CO_2 排放。有研究认为, CH_4 排放是由产甲烷菌与甲烷氧化菌共同作用的结果,与土壤微生物群落结构与丰度关系密切。增温导致土壤水分减少,增加土壤间隙,改善了土壤通气状况,提高了甲烷氧化酶活性及 CH_4 氧化速率,促进土壤对 CH_4 的吸收^[28-29]。

增温影响秸秆还田土壤 CO_2 排放。增温能加速秸秆分解,改变土壤呼吸并影响土壤微生物活性;李晓莎等研究认为,秸秆还田有利于改善土壤养分状况,增加了土壤中碳的投入^[30]。秸秆覆盖后会显著影响土壤呼吸通量,增加土壤孔隙度,进而增加 CO_2 排放^[31-32]。Zhang 等研究也指出,气温升高增加土壤温度,加快有机碳分解速度,促进 CO_2 排放^[33]。

目前,关于增温对农田 N_2O 排放的影响研究结果并不统一。增温改变土壤微生物群落多样性,增加酶活性,并加速土壤有机质分解与转化,从而影响土壤硝化反硝化作用^[34]。刘艳等发现,在小麦—大豆轮作背景下,增温提高了土壤硝化反硝化速率^[35]。任宏芳研究发现,在增温条件下,覆盖还田方式下农田 N_2O 排放要低于翻耕还田方式下农田 N_2O 排放,主要原因是:覆盖还田降低了土壤温度,间接证明温度对秸秆还田背景下 N_2O 排放的影响,且其影响与秸秆还田方式有关^[36]。

2.2 农艺农技措施

2.2.1 还田量与还田年限 还田量与还田年限对 CH_4 排放产生影响,但两者对 CH_4 排放影响的研究结果并不一致。Eusufzai 等通过多年秸秆还田试验发现,连续多年秸秆还田比短期的秸秆还田产生的 CH_4 更多,且随着秸秆还田年份的增加和还田量的增多, CH_4 排放也越多,这可能与土壤中电子供体的利用率以及土壤有机碳含量有关^[37-38]。而江瑜等通过 meta 分析总结得出长期秸秆还田比短期秸秆

还田 CH_4 排放要减少 30% ~ 70%^[39]。Jiang 等研究也发现,随着还田年限增加, CH_4 排放减弱,还田 13 年比 8 年降低 73%^[40]。这可能是由于长期还田提高土壤含氧量,利于甲烷氧化菌的生长代谢,从而抑制 CH_4 排放。因此,还田量与还田年限对 CH_4 排放的影响与环境及土壤因素有关。前期研究表明,秸秆直接还田相较于焚烧还田会增加 CO_2 排放量。Qiang 等研究发现,在小麦玉米秸秆还田背景下, CO_2 排放会随着还田量的增加而增加,这主要是因为秸秆还田有利于土壤团聚体的形成,从而增加土壤孔隙度和土壤微生物量,还田量的增加有利于土壤有机碳的形成与固定,为微生物活动提供了充足的碳源,并随着微生物丰度和活性的增强,加速了土壤有机碳中易变组分的分解,从而增加 CO_2 排放^[41]。但 Chen 等利用 DNDC 模型模拟秸秆还田下 CO_2 排放发现,秸秆还田相比于焚烧减少 CO_2 排放^[42]。相对而言,秸秆还田年限对 CO_2 排放的影响研究较少,尚需进一步研究。 N_2O 是土壤硝化反硝化作用的结果,其产生过程复杂,且受多种因素的影响。已有研究表明,短期秸秆还田可减少农田 N_2O 排放。Jiang 等也认为,秸秆还田可以降低 N_2O 排放,其排放量与秸秆还田量成反比^[43]。邹建文等研究结果显示,秸秆还田 2 年后 N_2O 排放减少 18%^[44]。而另有研究表明,长期秸秆还田促进了 N_2O 排放^[45-47]。黄琼等研究发现,第 2 年秸秆还田减少 N_2O 排放,但长期还田会加剧 N_2O 排放,到第 13 年呈线性增加趋势^[48]。这可能是由于长期秸秆还田增加了土壤中有机质与氮含量,促进硝化反硝化作用;同时长期秸秆还田提高土壤碳氮比,增加土壤氮固定,减少 NH_4^+ 的产生,从而抑制 N_2O 排放^[49]。因此,目前还田年限对 N_2O 排放的研究结果并不一致。

2.2.2 还田方式 秸秆还田方式对农田碳排放产生重要影响。Hu 等研究发现,与不还田相比,麦秸沟埋还田、旋耕还田和翻耕还田方式都显著增加了 CH_4 与 N_2O 排放,且沟埋还田方式下, CH_4 与 N_2O 的排放量增加少于其他 2 种还田方式^[11]。这可能是由于 3 种还田方式掺入秸秆的位置、混合与深度不同,改变土壤中 DOC、氮释放与土壤氮矿化,从而影响 CH_4 与 N_2O 排放^[50]。王保君等在稻麦轮作体系中也得出同样结论,稻秆沟埋还田与其他 2 种还田方式相比 CH_4 和 N_2O 排放减少 48.13% 和 3.38%,且表层覆盖还田下增排最大^[51]。

2.2.3 还田深度 还田深度影响碳排放。朱晓晴等研究发现,相较于直接还田,秸秆不同还田深度 (0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm) 下 CO_2 与 N_2O 排放增加,而 CH_4 排放降低^[52]。于建光等研究发现,秸秆还田越深,越有利于土壤有机碳的稳定^[53];宋依依等的研究结果表明,秸秆还田深度为 30 ~ 40 cm 更利于土壤团聚化,使深层土壤有机碳很难被微生物利用,土壤呼吸减弱,从而减少 CO_2 排放^[54]。另外,由于秸秆深还增加了微生物对氮的固持,降低土壤反硝化作用强度,使 N_2O 排放减少^[55-56]。翟洋洋等研究认为,产甲烷菌对于温度的敏感程度大于甲烷氧化菌,而深层土壤会增高土壤温度,从而抑制产甲烷菌的活性,因此深埋秸秆更利于减少 CH_4 排放^[57-58]。

2.3 土壤因素

秸秆还田背景下,影响 CH_4 、 CO_2 及 N_2O 排放的土壤因素主要有土壤水分、温度、有机质含量、土壤微生物及土壤酶活性等。其中,土壤有机质与微生物活性是影响 CH_4 和 CO_2 排放最重要的因素^[59]。还田秸秆腐解后能为土壤提供充足的有机质,一部分有机质为产甲烷菌提供足够的基质,另一部分则转化为 CO_2 排放到大气中,增加 CO_2 排放^[60]。秸秆在腐解过程中会消耗大量 O_2 ,这会抑制甲烷氧化菌活性,但促进了产甲烷菌的活性,从而增加了 CH_4 排放^[27,61]。

N_2O 排放的土壤影响因素较复杂,土壤微生物量及其活性是主要影响因素。王青霞等指出, N_2O 主要由土壤硝化与反硝化功能菌共同作用产生,这 2 种微生物会因土壤理化性质的改变而增加或减少^[62]。如:秸秆还田可通过增加土壤有机碳含量来改变土壤硝化基因群落结构,提高硝化功能菌的丰度来影响 N_2O 排放,而土壤含水量的增加也会影响硝化功能菌的丰度,其基因丰度会随着含水量增加而增加^[63-64]。

反硝化作用主要是将 NO_3^- 和 NO_2^- 还原为 N_2 和 N_2O 的过程,也是 N_2O 产生的主要方式。反硝化过程由多种微生物共同作用,研究反硝化功能菌相对困难^[65]。土壤 pH 值、有机质、温度等是影响土壤反硝化作用的主要因素^[66]。马玲等研究发现,施用氮肥会加快土壤反硝化速率,其造成的气体损失 (N_2O 和 N_2) 在无秸秆还田情况下达到 60%,而秸秆还田情况下仅 20%,说明秸秆还田可以减少反硝化作用,从而降低 N_2O 排放^[67]。

3 秸秆还田背景下碳减排的措施

秸秆还田导致碳排放增加是多种因素共同作用的结果,需寻求在保证粮食稳产的前提下实现碳减排的措施。根据以往研究结果,从稳产的实际出发,秸秆还田背景下碳减排的措施主要包括以下几种。

3.1 秸秆炭化还田

秸秆炭化(生物炭)是指将秸秆在低氧或缺氧环境下进行热解产生,还田后能够影响土壤物理和化学性质,提高土壤微生物活性^[68]。将秸秆制成生物炭还田可增强碳固定并减少 CO_2 、 CH_4 及 N_2O 排放。这可能是由于将生物质转化为生物炭后,生物炭中的碳相对更稳定,还田后能在土壤中存在更长时间^[69]。Wang 等研究发现,将小麦秸秆制成生物炭还田比其直接还田能减少 90.25% CO_2 排放^[26]。这可能是由于生物炭具有比表面大、吸附能力强、稳定性高等特点,还田后可提高土壤保肥保水能力、增加土壤有机碳储量、增加微生物和有益真菌含量等来有效改善土壤肥力和微生物群落结构。Liu 等研究表明,将秸秆制成生物炭后持续还田 5 年, N_2O 总排放量(5 年累积)减少 27.1% ~ 40.7%,且作物产量略有增加^[70]。

秸秆炭化还田对 CH_4 排放影响的研究结果并不一致。Liu 等的研究表明,将水稻秸秆炭化还田可减少约 90% CH_4 排放^[71];张向前等研究发现,施用生物炭后,稻麦轮作区 CH_4 减排 10.38% ~ 55.45%^[72]。这可能由于土壤 CH_4 累计排放量与 *pmoA* 基因丰度呈负相关,添加生物炭能增加 *pmoA* 丰度,减少 CH_4 排放^[73]。但也有研究认为,添加生物炭增加了 34% 甲烷排放,且随着生物炭施用量的增加而增加^[74]。减排效果的差异可能与施用量及土壤类型等有关^[75]。目前,炭化还田相比于直接还田,在碳减排方面仍有很大优势,但炭化还田制备成本较高,未来需进一步优化热解系统,降低成本,结合炭化还田量对作物产量与品质的影响,寻找最佳炭化还田方式。

3.2 改进农艺措施

通过改变农艺措施,配合适宜的还田方式与还田深度能够有效减少土壤温室气体排放。朱晓晴等研究指出,与秸秆直接还田相比,不同深度的秸秆还田都会增加 N_2O 和 CO_2 排放,同时降低 CH_4 排放,但随着还田深度增加, N_2O 与 CO_2 排放增幅下

降,还田深度为 30 ~ 40 cm 时,相比于直接还田, N_2O 与 CO_2 仅增加 10%,但作物产量显著提高^[52]。并且陈黎等比较了 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 这 2 种还田深度下的 N_2O 排放,指出秸秆还田 10 ~ 20 cm 能够有效降低 N_2O 排放^[76]。因此,可能由于秸秆还田深度增加后,土壤微生物丰度和大多数酶活性随土壤深度的增加而降低,从而导致农田温室气体排放减少^[77]。

秸秆沟埋还田是有效降低 CH_4 与 N_2O 排放的重要措施^[11,51]。马玲等研究发现,与常规还田相比,秸秆深还(20 ~ 40 cm)能够降低 CO_2 与 N_2O 排放,因此可通过沟埋还田方式来增加秸秆还田深度,达到减排效果^[67]。然而,由于沟埋深埋所需人工较多,未来需研发沟埋还田机械来替代人工。

3.3 加强肥料管理

通过合理的肥料管理模式可有效改善秸秆还田情景下温室气体排放。多项研究表明,与单秸秆还田相比,秸秆还田配施肥料更利于碳减排。Zhong 等发现,在水旱轮作体系中,秸秆还田配合紫云英种植对 CH_4 减排有积极作用^[78]。通过紫云英降低土壤有机碳和土壤 C/N 的值可降低土壤 C 有效性,从而降低产甲烷菌的丰度^[79]。Wang 等研究发现,秸秆还田配施氮肥可在水稻不减产的情况下降低 N_2O 排放,这可能是因为高碳氮比的秸秆分解会增加氮的固定,从而减少硝化与反硝化作用的有效氮量,另外秸秆还田还提供了可溶性有机碳,刺激 N_2O 通过反硝化还原为 N_2 ^[80]。此外,也可通过在秸秆还田基础上配施脲酶抑制剂或硝化抑制剂等肥料增效剂来减缓氮素转化,从而减少 N_2O 排放^[81-83]。

3.4 改变灌溉方式

灌溉方式与秸秆还田的协同作用被认为是减少农田碳排放的有效措施。我国目前主流的灌溉方式可分为常规灌溉和节水灌溉(覆膜滴灌、干湿交替灌溉、间歇灌溉和控制灌溉)^[84-85]。与无秸秆还田相比,无论是常规灌溉还是节水灌溉,均会促进 CH_4 的排放,但节水灌溉处理下 CH_4 排放量的增加相对更少^[85-86]。Nie 等研究发现,在相同还田方式下,节水灌溉与常规灌溉相比,稻田 CH_4 的排放量降低了 58% ~ 63%^[87]。Tang 等研究也发现,与连续漫灌相比,间歇灌溉平均 CH_4 排放通量降低 22.81% ~ 32.39%^[88]。这可能是因为间歇灌溉为甲烷化营养菌(专性好氧细菌)的生长提供了更好

的栖息地,利于细菌繁殖,相对于常规灌溉提高了 CH_4 氧化能力^[89]。对于 N_2O 的排放,有研究表明覆膜滴灌与常规灌溉 N_2O 排放通量无显著差异,由于秸秆还田本身就有减缓 N_2O 排放的潜力,而间歇灌溉能够降低 CH_4 的排放通量^[90]。因此,将秸秆还田与灌溉方式进行协同耦合对减少农田温室气体排放尤其重要,可行方法例如深埋还田与间歇灌溉的协同,免耕还田与加气灌溉的配合,均可以实现碳减排的目标^[91]。

3.5 种养模式结合

近年来,生态种养模式结合的方法在我国发展迅速,在秸秆还田后通过稻鸭共作、稻虾共作等方式,可以添加生态位,延长食物链的增环作用,通过利用动物的觅食、行走等活动,可以不同程度地影响碳排放量^[92]。徐祥玉等比较了不还田、仅稻草还田以及稻草还田后加入螯虾 3 种情况对于碳排放的影响,结果显示,与不还田相比,仅稻草还田提高了 CH_4 与 CO_2 的排放量,而在还田基础上加入螯虾可大幅度抑制 CH_4 增排效应^[93]。这可能是由于一方面稻虾系统中由于虾掘洞的原因,增加了土壤氧化还原电位以及降低土壤还原性物质总量,另外虾的活动增加了水中溶解氧,从而导致 CH_4 被氧化的概率增加,削减了 CH_4 的排放^[94]。罗加伟等在不同小龙虾品种与稻田共作的体系中探究碳排放的影响,得出了稻虾共作能够降低 CH_4 排放,虽增加了 N_2O 排放,但综合考虑 GWP,稻虾共作能实现碳减排的作用^[95]。同样,稻鸭共作也具有相类似的结果。傅志强等在稻鸭共作体系中运用静止箱原位采样法测定了稻田 CH_4 排放通量,得出了稻鸭共作显著减少了 CH_4 的排放通量,其原因可能是鸭的活动增加了水体的溶解氧含量,提高土壤氧化还原电位,减少产甲烷细菌种群数量,抑制产甲烷菌活性,降低 CH_4 产生率,从而减少 CH_4 排放量^[96-98]。

4 研究展望

近年来,秸秆还田作为一种农业废弃物利用方式,对于改善生态环境,减少碳排放有重要作用。秸秆还田背景下,土壤因素的改变是影响碳排放的重要因素。土壤温度、湿度、有机质含量及 pH 值等土壤理化性质,通过影响土壤微生物和相关酶活性来改变土壤碳排放。因此,为提升秸秆还田背景下碳排放减排效果,土壤因素是关键。通过文献调研发现,改变秸秆还田方式、还田农艺措施及水肥管

理措施等均有利于改变土壤理化性状及土壤微生物,从而有利于实现碳减排的目标。

为更好地发挥秸秆还田在农业生产中的减排作用,今后研究应从以下几个方面入手:(1)加强不同秸秆还田背景下土壤因素与土壤根际微生物的变化对碳排放的影响机制研究。例如不同秸秆还田条件下土壤微生物与酶在各个阶段的活性与作用机理的研究。(2)要加强分析和评价不同的减排技术,综合考虑净生态经济效应,例如秸秆制成生物炭的连续应用消耗成本太高,则需要优化秸秆热解系统以降低能源消耗和总体制作成本;深施沟埋的农艺措施难度大、耗费人力多,则需要研发操作简易、成本低廉的机械代替劳作。(3)在秸秆还田背景下,加强秸秆还田对碳排放长期影响的研究,例如可以进行长期田间定位试验,构建秸秆还田背景下减排的最佳技术体系。

参考文献:

- [1]王 健,吴义强,李贤军,等. 稻/麦秸秆资源化利用研究现状[J]. 林产工业,2021,58(1):1-5.
- [2]张晓晔,秦耀辰,吴乐英,等. 农业温室气体排放研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版),2019,49(6):649-662,713.
- [3]赵明月,刘源鑫,张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. 生态学报,2022,42(23):9405-9416.
- [4]姜玥珊,李衍素,王娟娟,等. 我国秸秆还田技术发展现状[J]. 中国蔬菜,2021(11):27-32.
- [5]Shi W J, Fang Y R, Chang Y Y, et al. Toward sustainable utilization of crop straw: greenhouse gas emissions and their reduction potential from 1950 to 2021 in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 190: 106824.
- [6]Masson V, Zhai P, Pirant A, et al. Climate change 2021: the physical science basis [J]. Chemistry International, 2021, 43(4): 22-23.
- [7]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.
- [8]江 瑜,朱相成,钱浩宇,等. 水稻丰产与稻田甲烷减排协同的研究展望[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(5): 839-847.
- [9]Li F Y, Cao X D, Zhao L, et al. Short-term effects of raw rice straw and its derived biochar on greenhouse gas emission in five typical soils in China [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 59(5): 800-811.
- [10]Liu Y, Wang K K, Liao S P, et al. Differences in responses of ammonia volatilization and greenhouse gas emissions to straw return and paddy upland rotations [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(17): 25296-25307.
- [11]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.
- [12] 曾文静, 邱岚英, 陈俊杰, 等. 秸秆还田下大气 CO₂ 浓度升高对水稻生长和 CH₄ 排放的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(5): 543 – 550.
- [13] 张坚超, 徐德钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6592 – 6603.
- [14] Liu J L, Huang X Y, Jiang H B, et al. Sustaining yield and mitigating methane emissions from rice production with plastic film mulching technique [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106667.
- [15] 杨世梅, 何腾兵, 杨 丽, 等. 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 75 – 81.
- [16] 张杏雨, 李思宇, 余 锋, 等. 作物秸秆还田对稻田温室气体排放效应的研究进展[J]. 杂交水稻, 2021, 36(5): 1 – 7.
- [17] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils; a review [J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277 – 304.
- [18] 何甜甜, 王 静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 450 – 458.
- [19] 武开阔, 张 哲, 武志杰, 等. 不同秸秆还田量和氮肥配施对玉米田土壤 CO₂ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 664 – 670.
- [20] 秦 越, 李彬彬, 武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO₂ 排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1442 – 1449.
- [21] 李 金, 任立军, 李晓宇, 等. 不同秸秆还田方式对玉米农田土壤 CO₂ 排放量和碳平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(14): 2738 – 2750.
- [22] 李彬彬, 武兰芳, 许艳艳, 等. 秸秆还田土壤溶解性有机碳的官能团特征及其与 CO₂ 排放的关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2535 – 2543.
- [23] Shan J, Yan X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils [J]. Atmospheric Environment, 2013, 71: 170 – 175.
- [24] Kan Z R, Zhou J J, Li F M, et al. Straw incorporation interacting with earthworms mitigates N₂O emissions from upland soil in a rice – wheat rotation system [J]. Science of the Total Environment, 2023, 859(2): 160338.
- [25] 胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 等. 秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2023, 52(2): 1 – 16.
- [26] Wang N, Luo J L, Juhasz A L, et al. Straw decreased N₂O emissions from flooded paddy soils via altering denitrifying bacterial community compositions and soil organic carbon fractions [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2020, 96(5): fiae046.
- [27] Qiu H H, Wei W L. Crop straw retention influenced crop yield and greenhouse gas emissions under various external conditions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 42362 – 42371.
- [28] Sjögersten S, Wookey P A. Spatio – temporal variability and environmental controls of methane fluxes at the forest – tundra ecotone in the Fennoscandian mountains [J]. Global Change Biology, 2002, 8(9): 885 – 894.
- [29] 王 君, 陈书涛, 张婷婷, 等. 增温对冬小麦根系残体及秸秆分解特性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 472 – 480.
- [30] 李晓莎, 武 宁, 刘 玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1765 – 1771.
- [31] 胡文沛, 张 闯, 胡春胜, 等. 长期增温和施氮对华北平原农田土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(5): 761 – 768.
- [32] Wu G, Ling J, Liu Z X, et al. Soil warming and straw return impacts on winter wheat phenology, photosynthesis, root growth, and grain yield in the North China Plain [J]. Field Crops Research, 2022, 283(6): 108545.
- [33] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, et al. Soil carbon dioxide flux from shelterbelts in farmland in temperate arid region, northwest China [J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 48(9): 24 – 31.
- [34] 张婷婷, 陈书涛, 王 君, 等. 增温及秸秆施用对豆 – 麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4718 – 4724.
- [35] 刘 艳, 陈书涛, 刘 燕, 等. 增温对农田土壤碳氮循环关键过程的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 674 – 679.
- [36] 任宏芳. 气候变化背景下秸秆还田方式对大豆土壤温室气体排放及相关酶活性的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021: 1 – 2.
- [37] Eusufzai M K, Tokida T, Sugiyama S, et al. Effect of rice straw application on CH₄ emission in continuous and recently converted paddy fields [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2011, 67(3): 185 – 192.
- [38] 王鸿飞, 吴怡慧, 张 瑞, 等. 水稻秸秆添加对不同种稻年限黑土 CH₄ 排放特征的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1421 – 1430.
- [39] 江 瑜, 管大海, 张卫建. 水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其机制的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 175 – 181.
- [40] 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.
- [41] Qiang X C, Yuan H L, Gao W S. Effect of crop – residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass [J]. The Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 469 – 472.
- [42] Chen C, Chen D L, Pan J J, et al. Application of the denitrification – decomposition model to predict carbon dioxide emissions under alternative straw retention methods [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 851901.
- [43] Jiang J Y, Huang Y, Zong L G. Influence of water controlling and straw application on CH₄ and N₂O emissions from rice field [J]. China Environmental Science, 2003, 23(5): 552 – 556.
- [44] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄

- 和 N_2O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7–12.
- [45] Wang H H, Shen M X, Hui D F, et al. Straw incorporation influences soil organic carbon sequestration, greenhouse gas emission, and crop yields in a Chinese rice (*Oryza sativa* L.) – wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104377.
- [46] Guo L J, Zhang L, Liu L, et al. Effects of long – term no tillage and straw return on greenhouse gas emissions and crop yields from a rice – wheat system in central China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 322: 107650.
- [47] 蒙世协, 刘春岩, 郑循华, 等. 小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤 – 大气间甲烷、二氧化碳、氧化亚氮和一氧化碳交换的影响[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(4): 504–514.
- [48] 黄 琼, 朱小莉, 沈皖豫, 等. 秸秆还田年限及还田量对稻田净温室效应的影响[J]. 土壤, 2022, 54(5): 912–919.
- [49] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, et al. Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice – wheat cropping systems in central China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 122: 636–644.
- [50] Webster F A, Hopkins D W. Contributions from different microbial processes to N_2O emission from soil under different moisture regimes [J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 22(4): 331–335.
- [51] 王保君, 胡乃娟, 顾泽海, 等. 稻秆还田方式对稻麦轮作农田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3): 367–375.
- [52] 朱晓晴, 安 晶, 马 玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 977–989.
- [53] 于建光, 李辉信, 胡 锋, 等. 施用秸秆及接种蚯蚓对土壤颗粒有机碳及矿物结合有机碳的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 606–610.
- [54] 宋依依, 曹 阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 344–350.
- [55] 陈 慧, 高丽萍, 廖庆喜, 等. 肥料减量深施对土壤 N_2O 排放和冬油菜产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 80–87.
- [56] 彭 术, 张文钊, 侯海军, 等. 氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 153–160.
- [57] 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.
- [58] 庞明亮, 李 波, 姚名泽. 日光温室玉米秸秆深埋土壤温度变化规律研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 231–237.
- [59] 王美琦, 刘银双, 黄亚丽, 等. 秸秆还田对土壤微生态环境影响的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 807–816.
- [60] Heintze G, Eickenscheidt 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(5): 807–821.
- [61] Wang H H, Ren T B, Yang H J, et al. Research and application of biochar in soil CO_2 emission, fertility, and microorganisms: a sustainable solution to solve China's agricultural straw burning problem[J]. Sustainability, 2020, 12(5): 1922.
- [62] 王青霞, 陈喜靖, 喻 曼, 等. 秸秆还田对稻田氮循环微生物及功能基因影响研究进展[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(2): 333–342.
- [63] Sun X, Han X A, Ping F, et al. Effect of rice – straw biochar on nitrous oxide emissions from paddy soils under elevated CO_2 and temperature[J]. Science of the Total Environment, 2018, 628/629: 1009–1016.
- [64] Abid A A, Gu C, Zhang Q C, et al. Nitrous oxide fluxes and nitrifier and denitrifier communities as affected by dry – wet cycles in long term fertilized paddy soils [J]. Applied Soil Ecology, 2018, 125: 81–87.
- [65] 韩紫璇, 房静静, 武雪萍, 等. 长期秸秆配施化肥下土壤团聚体碳氮分布、微生物量与小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2023, 56(8): 1503–1514.
- [66] 谢婉玉, 王永明, 纪红梅, 等. 秸秆还田种类对稻田 N_2O 排放及硝化反硝化微生物的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 769–778.
- [67] 马 玲, 王丹蕾, 韩昌东, 等. 秸秆还田方式对东北农田土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2351–2360.
- [68] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [69] Tan Z X, Lin C S K, Ji X Y, et al. Returning biochar to fields: a review[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 116: 1–11.
- [70] Liu Y J, Bi Y C, Xie Y X, et al. Successive straw biochar amendments reduce nitrous oxide emissions but do not improve the net ecosystem economic benefit in an alkaline sandy loam under a wheat – maize cropping system[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(7): 868–883.
- [71] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 930–939.
- [72] 张向前, 张玉虎, 赵 远, 等. 不同裂解温度稻秆生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放影响分析[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 630–639.
- [73] Huang Y B, Wang C J, Lin C, et al. Methane and nitrous oxide flux after biochar application in subtropical acidic paddy soils under tobacco – rice rotation[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 17277.
- [74] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(4): 469–475.
- [75] Liu Y X, Wang Y F, LÜ H H, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties[J]. Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2166–2172.
- [76] 陈 桀, 包云轩, 吕 青, 等. 基于 DNDC 模型的不同秸秆还田填埋深度下农田 N_2O 气体排放模拟[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(14): 64–67, 74.
- [77] Ji B Y, Hu H, Zhao Y L, et al. Effects of deep tillage and straw

- returning on soil microorganism and enzyme activities[J/OL]. The Scientific World Journal (2014 - 05 - 26) [2023 - 01 - 10]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2014/451493?msocid=3df21057f2bd665525ea021cf6bd67c7>.
- [78] Zhong C, Liu Y T, Xu X, 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.
- [79] 潘孝晨, 唐海明, 肖小平, 等. 不同耕作和秸秆还田模式对紫云英 - 双季稻土壤微生物生物量碳、氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1585 - 1595.
- [80] Wang J Y, Jia J X, Xiong Z Q, et al. Water regime - nitrogen fertilizer - straw incorporation interaction: field study on nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Nanjing, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141 (3/4): 437 - 446.
- [81] He T H, Liu D Y, Yuan J J, et al. A two years study on the combined effects of biochar and inhibitors on ammonia volatilization in an intensively managed rice field[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 264: 44 - 53.
- [82] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effect of controlled - release fertilizer on nitrous oxide emission from a winter wheat field [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 94: 111 - 122.
- [83] 倪玉雪, 赵梦强, 周晓丽, 等. 硝化抑制剂对设施菜田土壤 N_2O 和 CO_2 排放及蔬菜产量品质的影响[J]. 福建农业学报, 2022, 37(3): 381 - 389.
- [84] Wang H T, Ma S T, Shao G D, et al. Use of urease and nitrification inhibitors to decrease yield - scaled N_2O emissions from winter wheat and oilseed rape fields: a two - year field experiment [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 319: 107552.
- [85] 邱 峰, 景元书. 不同灌溉方式对稻田微气象特征及水稻生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(5): 72 - 80.
- [86] 周 胜, 张鲜鲜, 王 从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 852 - 862.
- [87] Nie T Z, Chen P, Zhang Z X, et al. Effects of irrigation method and rice straw incorporation on CH_4 emissions of paddy fields in Northeast China [J]. Paddy and Water Environment, 2020, 18: 111 - 120.
- [88] Tang J, Wang J J, Li Z Y, et al. Effects of irrigation regime and nitrogen fertilizer management on CH_4 , N_2O and CO_2 emissions from saline - alkaline paddy fields in Northeast China[J]. Sustainability, 2018, 10(2): 475.
- [89] Zhang G B, Ji Y, Ma J, et al. Intermittent irrigation changes production, oxidation, and emission of CH_4 in paddy fields determined with stable carbon isotope technique[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 52: 108 - 116.
- [90] Fawibe O O, Honda K, Taguchi Y, et al. Greenhouse gas emissions from rice field cultivation with drip irrigation and plastic film mulch [J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2019, 113: 51 - 62.
- [91] 于笑天, 袁鹤龙, 李 涛, 等. 秸秆还田与加气灌溉对水稻泡田期温室气体排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 60 - 65.
- [92] 邸 超, 李海波. 稻田碳减排措施研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(14): 17 - 20.
- [93] 徐祥玉, 张敏敏, 彭成林, 等. 稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1591 - 1603.
- [94] Abutoama M, Abdulhalim I. Angular and intensity modes self - referenced refractive index sensor based on thin dielectric grating combined with thin metal film[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 72 - 80.
- [95] 罗加伟, 钱开国, 徐 博, 等. 稻虾共作模式下龙虾品种和养殖密度对 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1852 - 1859, 封 2.
- [96] 傅志强, 黄 璜, 廖晓兰, 等. 养鸭数量对 CH_4 排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2107 - 2114.
- [97] 邓 晓, 廖晓兰, 黄 璜, 等. 湿地稻 - 鸭复合生态种养对甲烷菌种群数量影响的研究[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(5): 393 - 395, 398.
- [98] 温 婷, 赵本良, 章家恩. 稻鸭共作中 CH_4 和 N_2O 排放规律及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1442 - 1450.