

基于沼气工程的稻田甲烷排放减半策略

晏珍梅¹, 孙辉¹, 郭建斌¹, 鞠鑫鑫², 董仁杰^{1*}

(1. 国家级生物质能科学与技术国际联合研究中心 农业农村部可再生能源清洁化利用技术重点实验室 中国农业大学工学院农业农村碳中和研究中心, 北京 100083; 2. 山东中农三月环保科技股份有限公司, 山东 烟台 264006)

摘要: 我国水稻种植每年产生近两亿 t 二氧化碳当量的稻田甲烷排放。针对稻秸直接还田、稻秸离田进入沼气工程厌氧消化去除产甲烷潜力后沼渣还田(简称“稻秸沼渣还田”)以及稻秸沼渣还田耦合稻田水分管理等 3 种情景, 核算了稻田甲烷减排潜力。结果表明, 与稻秸直接还田相比, 稻秸沼渣还田不减少稻秸还田对稻田有机质和养分的贡献, 但可减少我国南方一年多熟稻田甲烷排放 40% 以上, 可减少北方一年一熟稻田甲烷排放 15% 以上。稻秸沼渣还田与稻田水分管理耦合, 有望在未来实现全国范围内稻田甲烷减半目标。

关键词: 稻田; 甲烷; 沼气工程; 减排

中图分类号: Q152; S216.4; X705 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2022)03-0003-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022030003

Strategy for Halving Methane Emissions from Paddy Fields Based on Biogas Project / YAN Zhenmei¹, SUN Hui¹, GUO Jianbin¹, JU Xinxin², DONG Renjie^{1*} / (1. National Center for International Research of BioEnergy Science and Technology (iBEST), MoA Key Lab of Clean Production and Utilization of Renewable Energy (CPURE), Carbon-Neutral Agriculture Research Center of CAU College of Engineering (CNA), Beijing 100083, China; 2. Shandong Zhongnong March Environmental Protection Technology Co Ltd, Yantai 264006, China)

Abstract: Rice production generates nearly 200 million tons of CO₂e methane emissions each year in China. The methane emission and mitigation potential of rice production were analyzed under three scenarios: rice straw direct return to the field, rice straw treated in the biogas plant and digestate return to the field (rice straw digestate return to the field), and coupling of rice straw digestate return to the field and rice field water management. Compared with the rice straw direct return to the field, the rice straw digestate return to the field keeps the final organic matter and nutrients for the soil, and can reduce the methane emission from rice production by more than 40% and 15% in southern and northern China respectively. The coupling of rice straw digestate return to the field and rice field water management will realize half reduction of methane emission for the overall China in the future.

Key words: rice field; methane; biogas plant; emission mitigation

根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》^[1] 2014 年我国温室气体年排放为 111.86 亿吨二氧化碳当量(CO₂e), 其中农业活动的排放为 8.3 亿吨 CO₂e, 包括 4.67 亿吨 CO₂e 的农业活动甲烷排放, 占全国总甲烷排放量的 40%。农业活动甲烷排放来源于动物肠道、动物粪便管理、水稻种植、农业废弃物田间焚烧等 4 个方面(见图 1), 其中水稻种植产生的甲烷排放约为两亿吨 CO₂e, 占全国甲烷排放的 15% 以上。面向我国双碳战略和甲烷减

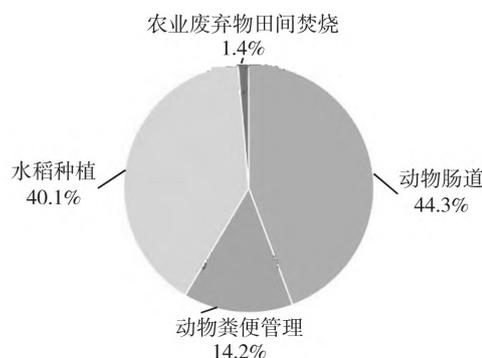


图 1 我国农业活动中甲烷排放的来源及比例^[1]

收稿日期: 2022-03-05

项目来源: 国家自然科学基金联合基金(U20A2086)

作者简介: 晏珍梅(1996-), 女, 汉族, 江西宜春人, 硕士在读, 研究方向为农业源温室减排, E-mail: zmyan_go@qq.com

通信作者: 董仁杰, E-mail: rjdong@cau.edu.cn

排的国际博弈^[2] 稻田甲烷减排具有重要的现实意义。

1 稻秸沼渣还田

“稻秸沼渣还田”是指在水稻收获时,稻秸离田进入沼气工程厌氧消化生产清洁能源沼气,并以去除产甲烷潜力后的沼渣形式还田。当前国家鼓励秸

秆还田实现肥料化利用^[3],其具有促进土壤有机质积累、增加土壤氮磷钾等养分含量、实现作物增产等效果。但与此同时实践中发现秸秆直接还田时存在一些问题,例如土传病虫害的高发、为快速降解秸秆需额外施用氮肥等^[4],同时在水稻种植中稻秸还田无疑将增大进入稻田的有机物量,进而导致稻田甲烷排放的提升。

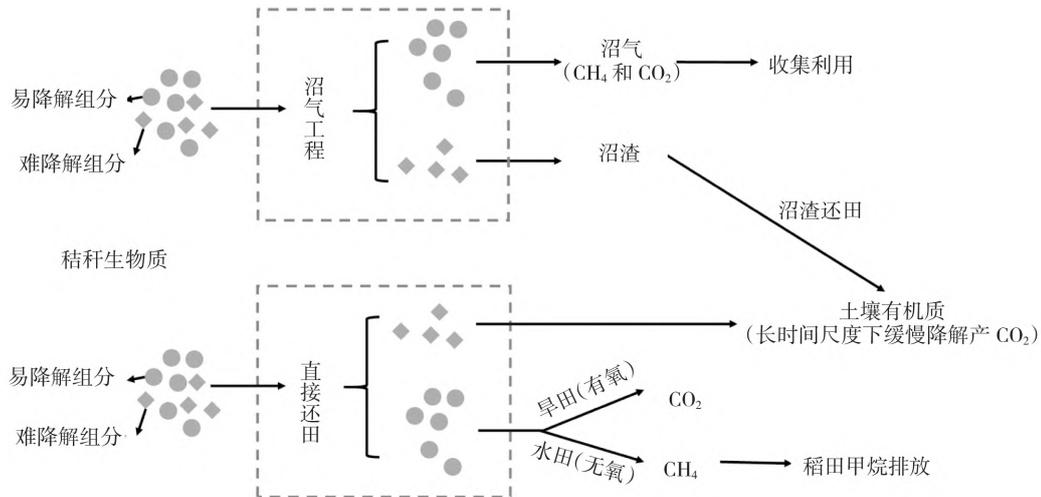


图2 秸秆生物质直接还田和经沼气工程处理还田的物质流动

图2展示了秸秆生物质通过直接还田和经沼气工程处理还田的物质流动。秸秆生物质中有机组分根据结构和降解难易可以分为易降解组分(非结构性有机物)和难降解组分(结构性有机物),以质量计其中非结构性的易降解组分可占总重的50%~60%^[5]。在秸秆直接还田时,土壤微生物将快速降解秸秆中的易降解组分,在旱田非厌氧环境下被分解产生二氧化碳,而在水田厌氧环境下被分解产生甲烷(即产生稻田甲烷排放),而难降解组分将成为土壤有机质在长时间尺度下缓慢降解产生CO₂;在秸秆沼渣还田时,易降解组分将于沼气工程中分解产生沼气实现清洁能源的产出,同时难降解组分进入沼渣还田同样将成为土壤有机质在长时间尺度下缓慢降解产生CO₂。因此秸秆的直接还田或沼渣还田将不会影响还田对土壤有机质的增加和固碳效果。侯晓莉^[6]围绕稻田不同施肥措施下固碳效果的研究也证实了这一观点。此外厌氧消化还具有灭活病虫害的作用,可以避免直接还田时土传病害的发生^[7];同时厌氧消化过程还将生成植物激素、腐殖质类等具有良好农艺效果的物质^[8]。总体而言,相比秸秆直接还田,通过秸秆沼渣还田不仅不减少对农田有机质的贡献,还可实现更为良好的肥料化利

用。

秸秆生物质不同还田路径物质流动计算:

秸秆易降解有机物质量分数为50%~60%^[5],同时秸秆中有机碳含率约为40%^[9],因此1 kg干秸秆中易降解组分的有机碳量为0.20~0.24 kg,难降解组分的有机碳量为0.16~0.20 kg。

(1) 旱田秸秆直接还田时,1 kg秸秆中的易降解组分将转化为0.73~0.88 kgCO₂(由于秸秆生长中吸收CO₂,这部分并不产生温室气体排放);难降解组分进入农田可实现土壤有机质增加并产生0.16~0.20 kg C的固碳效果(折合0.59~0.73 kg-CO₂)。

(2) 稻田秸秆直接还田时,1 kg秸秆中的易降解组分将转化为0.27~0.32 kgCH₄(折合6.75~8.00 kgCO₂e),即造成稻田甲烷排放,此值为理论上限,但这部分甲烷在进入大气前将有大约80%被土壤和根系附近的甲烷氧化菌氧化^[10],因此实际的甲烷减排要远小于此;难降解组分进入农田可实现土壤有机质增加并产生0.16~0.20 kgC的固碳效果(折合0.59~0.73 kgCO₂)。

(3) 秸秆沼渣还田,阻断了易降解组分向旱田或稻田中的流动,在消化罐中1 kg秸秆中的易降解

组分将可生成 0.37 ~ 0.44 kgCO₂ 和 0.13 ~ 0.16 kgCH₄(以二氧化碳和甲烷产生比 1:1 计算,其中所产 CO₂ 不会产生温室气体排放;所产 CH₄ 将被收集利用作为清洁能源折合 5.8 ~ 7.0 MJ 能量,折合 0.20 ~ 0.24 kg 标准煤,换言之可减少标准煤燃烧释放的 0.54 ~ 0.65 kgCO₂ 排放);秸秆的难降解组分将进入沼渣还田实现土壤有机质增加并产生 0.16 ~ 0.20 kgC 的固碳效果(折合 0.59 ~ 0.73 kgCO₂)。

先前已有报道针对秸秆沼气工程替代化石能源和实现土壤固碳效果温室气体减排的测算,例如霍丽丽^[11]等认为,通过沼气工程处理离田秸秆生产沼气替代煤炭并将沼渣还田固碳可减少温室气体排放 945.4 g CO₂e·kg⁻¹ 秸秆。针对产生大量甲烷排放的水稻种植,稻秸沼渣还田还可有效阻断稻秸直接还田所带来的甲烷排放。

2 稻田甲烷排放核算方法

稻田甲烷的排放是植株—土壤—微生物互作的结果,本质上决定于稻田的厌氧状态和稻田中有机质的产甲烷潜力^[12]。在以国家或省域等为对象计算大尺度下稻田甲烷排放时,《2019 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[13] 中的推荐公式为:

$$CH_{4\ rice} = \sum_{i,j,k} (EF_{ijk} \times t_{ijk} \times A_{ijk})$$

即通过汇总不同生态系统与水分管理体系(*i*)、有机质添加(*j*)和其他条件(*k*)的日排放因子 *EF* 与其种植时间 *t* 和年度收获面积 *A* 获得。其中,生态系统与水分管理体系决定了稻田中的厌氧状态水平;有机质添加决定了稻田中有机质的产甲烷潜力;其他条件包括土壤类型、水稻品种、含添加剂的硫酸盐等,将通过影响稻田厌氧水平、甲烷菌活动等对稻田甲烷排放产生影响。

通过选择不同的生态系统和水分管理体系以改变厌氧环境实现稻田甲烷减排,已有不少研究成果和实际的农业模式^[14-15],不再赘述。而在有机物方面,稻田甲烷排放核算中涉及的“有机质的投入”是指通常具有产甲烷潜力的有机质,例如稻秸、堆肥。如果将有机质在投入稻田之前去除其产甲烷潜力,即消除前季作物根茬残留、稻秸还田和农家肥等有机质的产甲烷潜力,则无论生态系统和水分管理体系如何,从有机质角度将大大减少甲烷产生的可能,这即是探索的水稻甲烷减排的另一个主要方式:基于沼气工程处理离田稻秸后沼渣还田助力稻田甲烷减排。

参照 IPCC 方法学 Tier2,可以对特定条件下的稻田甲烷日排放因子 *EF* 进行改进与修正以提高精确性:

$$EF = EF_o \times SF_i \times SF_p \times SF_s \times SF_r \times SF_j \quad (1)$$

式中: *EF* 为日排放因子, kgCH₄ ha⁻¹ d⁻¹; *EF_o* 为不含有机添加物的持续性淹水稻田的基准排放因子(见表 1); *SF_i* 为种植期中生态系统和水分管理换算系数(见表 2); *SF_p* 为种植期前季前不同水分状况的换算系数(无量纲,本文取作 1); *SF_s* 和 *SF_r* 为土壤类型和水稻品种转化系数,暂无推荐值需根据核算实际情况确定,缺省值可暂取 1; *SF_j* 为有机添加物类型和数量变化的换算系数,其计算公式为:

$$SF_j = (1 + \sum ROA_m \times CFOA_m)^{0.59} \quad (2)$$

式中: *ROA_m* 为第 *m* 种有机添加物的施用率, t·ha⁻¹ 稻秸为干重,其它为鲜重; *CFOA_m* 为第 *m* 种有机添加物的转换系数(见表 3)。

表 1 不含有机添加物的持续性淹水稻田的基准排放因子 *EF_o* (kgCH₄·ha⁻¹·d⁻¹)

全球平均		地区		
排放因子	误差	地区	排放因子	误差
1.19	0.80 ~ 1.76	非洲	1.19	0.80 ~ 1.76
		东亚	1.32	0.89 ~ 1.96
		东南亚	1.22	0.83 ~ 1.81
		南亚	0.85	0.58 ~ 1.26
		欧洲	1.56	1.06 ~ 2.31
		北美	0.65	0.44 ~ 0.96
		南美	1.27	0.86 ~ 1.88

表 2 种植期中生态系统和水分管理换算系数 *SF_i*

水分情况	总体情况		分类情况		
	换算系数	误差范围	换算系数	误差范围	
旱作型	0	—	0	—	
灌溉型	连续性灌水	0.60	0.44 ~ 0.78	1.00	0.73 ~ 1.27
	间歇性灌水—单次落干			0.71	0.53 ~ 0.94
	间歇性灌水—多次落干			0.55	0.41 ~ 0.72
深水型	经常下雨	0.45	0.32 ~ 0.62	0.54	0.39 ~ 0.74
	干旱			0.16	0.11 ~ 0.24
	深水	0.06	0.03 ~ 0.12	0.06	0.03 ~ 0.12

3 稻秸沼渣还田的稻田甲烷减排量

稻秸直接还田和稻秸沼渣还田直接影响的是稻田的甲烷排放因子 *EF* 中稻田有机物添加的系数

表3 有机添加物的转换系数 $COFA_i$

有机添加物	转换系数	误差范围
种植前不久进行稻秸还田	1.00	0.85 ~ 1.17
种植前很久进行稻秸还田	0.19	0.11 ~ 0.28
堆肥	0.17	0.09 ~ 0.29
农场粪肥	0.21	0.15 ~ 0.28
绿肥	0.45	0.36 ~ 0.57

注:此表中稻秸还田指稻秸已进入土壤中进行腐败,不包括将稻秸仅置于土壤表层或田间焚烧。

SF_j 。 SF_j 与有机添加物使用率 ROA_m 和有机添加物转换系数 $CFOA_m$ 有关,稻秸直接还田和稻秸沼渣还田的有机物使用情况列于表4。

表4 稻秸直接还田和稻秸沼渣还田下有机物施用情况

情景	有机物种类	有机物施用量	有机物转化系数 $CFOA_m$
		ROA_m ($t \cdot hm^{-2}$)	
稻秸直接还田	稻秸	7.00	0.19 或 1.00
稻秸沼渣还田	稻秸	1.82	0.19 或 1.00
	沼渣	2.59	0.09 ~ 0.17

注:此表中 $CFOA_m$ 参考表3,稻秸的 $COFA_m$ 为 0.19 或 1.00 (0.19 为北方地区一年一熟水稻田情景,1.00 为南方一年多熟水稻田情景);沼渣的 $COFA_m$ 为 0.09 ~ 0.17 (由于当前 IPCC 指南未报道沼渣的转化系数,此处 0.17 取表3中堆肥的排放因子;事实上厌氧消化工艺比堆肥能去除更多的甲烷生产潜力,根据 CH4MOD 模型中堆肥和沼渣的非结构有机物与结构有机物比例,进入稻田后沼渣的甲烷排放率约为堆肥的 55%^[5],因此此处下限取 0.09)。

根据我国当前水稻生产情况,每公顷约产稻 7 吨,相应稻秸产量约为每公顷 7 吨(水稻稻草比约为 1^[16])。在直接还田的情景下,7 吨稻秸将全部进入稻田导致甲烷的生成,根据表4中 $COFA_m$ 系数和公式2,对于稻秸还田不久就进行下一季种植(南方一年多熟水稻田情景)和稻秸还田很久才进行下一季种植(北方地区一年一熟水稻田情景)而言, SF_j 分别约为 3.41 和 1.65。

在稻秸沼渣还田情景下,同样每公顷 7 吨稻秸,根据当前稻秸离田收获的机械收集系数为 74%^[17],即大约 1.82 t 稻秸(含根系)仍无法离田,这部分稻秸与直接还田的情景相类似;对于 5.18 t 离田稻秸,考虑当前厌氧消化降解率约为 50%^[18],则经沼气工程处理后有约 2.59 t 沼渣返还田中。根据表4中 $COFA_m$ 系数和公式2,在稻秸沼渣还田情景下,南方一年多熟水稻田的 SF_j 为 1.93 ~ 2.01,相比稻秸直接还田的 3.41 减少了 41% ~ 43%;北方一年一熟水稻田的 SF_j 为 1.31 ~ 1.41,相比稻秸直接还田的 1.65 减少了 15% ~ 21%。

稻秸沼渣还田的稻田甲烷减排量计算过程如

下:

(1) 南方一年多熟稻田,稻秸直接还田时:

$$SF_j = (1 + 7 \times 1.00)^{0.59} \approx 3.41$$

(2) 北方一年一熟稻田,稻秸直接还田时:

$$SF_j = (1 + 7 \times 0.19)^{0.59} \approx 1.65$$

(3) 南方一年多熟稻田,稻秸沼渣还田时,当沼渣的 $CFOA_m$ 取下限 0.09 时:

$$SF_j = (1 + 1.82 \times 1.00 + 2.59 \times 0.09)^{0.59} \approx 1.93$$

当沼渣的 $CFOA_m$ 取上限 0.17 时:

$$SF_j = (1 + 1.82 \times 1.00 + 2.59 \times 0.17)^{0.59} \approx 2.01$$

因此南方一年多熟稻田稻秸沼渣还田时:

$$SF_j = 1.93 \sim 2.01$$

(4) 北方一年一熟稻田,稻秸沼渣还田,当沼渣的 $CFOA_m$ 取下限 0.09 时:

$$SF_j = (1 + 1.82 \times 0.19 + 2.59 \times 0.09)^{0.59} \approx 1.31$$

当沼渣的 $CFOA_m$ 取上限 0.17 时:

$$SF_j = (1 + 1.82 \times 0.19 + 2.59 \times 0.17)^{0.59} \approx 1.41$$

因此北方一年一熟稻田稻秸沼渣还田时:

$$SF_j = 1.31 \sim 1.41$$

比较不同情景的 SF_j ,对于南方一年多熟稻田,稻秸沼渣还田比稻秸直接还田减少 41% ~ 43%;对于北方一年多熟稻田,稻秸沼渣还田比稻秸直接还田减少 15% ~ 21%。

4 稻秸沼渣还田和水分管理相耦合

通过沼气工程处理离田稻秸并以沼渣形式还田的减排策略还可与稻田水分管理措施进行耦合。稻秸沼渣还田发生在水稻收获后和新一季水稻种植前,而稻田水分管理发生在水稻生长期。两种稻田甲烷减排工艺不冲突,通过耦合可以形成减排的叠加效果。

根据表2,采用先进的水分管理策略,例如“间歇性灌水+单次落干”、“间歇性灌水+多次落干”,其水分管理系数 SF_i 分别是连续灌水的 71% 和 55%。尽管有的研究中认为先进节水型灌溉技术可实现稻田甲烷排放减少 60% 以上^[19],本文仍参考 IPCC 推荐的水分管理系数 SF_i (见表2) 计算 $SF_i \times SF_j$,比较分析情景下稻田甲烷排放变化。对于南方一年多熟水稻田,稻秸沼渣还田耦合间歇性灌水相比常规水稻生产(稻秸直接还田并连续灌水),稻田甲烷排放可减少 58% ~ 69%;对于北方一年一熟水稻田,稻秸沼渣还田耦合间歇性灌水相比常规水稻生产可减少 39% ~ 56%。

需要指出的是,稻田水分管理虽然是一项有效的稻田甲烷减排的技术路径,但受当地气候条件影响巨大。在我国南方,水稻生产季节与连雨天气季节高度重叠,即使不灌水也难以实现稻田落干的目标,这给我国稻田生产甲烷减排带来一定的挑战。如果考虑南方水稻生产中有一半的机会可以实施有效的稻田水分管理,耦合稻秸沼渣还田的平均稻田甲烷排放可减少50%~56%。

目前全国秸秆还田率约为50%^[20],其中稻秸还田率达70%左右^[21],按此测算实施稻秸沼渣还田且南方水稻生产中有一半的机会、北方水稻生产全部进行有效的稻田水分管理,全国稻田甲烷减排将达到31%~39%。随着耕地质量提升要求的进一步落实,稻秸还田率将进一步增加,有机化肥替代的力度也进一步加强,稻秸沼渣还田耦合水分管理有望在全国范围内实现稻田甲烷减半的目标。

稻秸沼渣还田和水分管理相耦合的减排量计算过程如下:

(1) 南方一年多熟稻田,稻秸直接还田+连续灌水时:

$$SF_i \times SF_j = 1.00 \times 3.41 = 3.41$$

(2) 北方一年一熟稻田,稻秸直接还田+连续灌水时:

$$SF_i \times SF_j = 1.00 \times 1.65 = 1.65$$

(3) 南方一年多熟稻田,稻秸沼渣还田($SF_j = 1.93 \sim 2.01$) + 间歇性灌水时,当采用“间歇性灌水+单次落干”($SF_i = 0.71$)时:

$$SF_i \times SF_j \approx 1.37 \sim 1.43$$

若采用“间歇性灌水+多次落干”($SF_i = 0.55$)时:

$$SF_i \times SF_j \approx 1.06 \sim 1.11$$

因此南方一年多熟稻田,间歇性灌水+稻秸沼渣还田时:

$$SF_i \times SF_j \approx 1.06 \sim 1.43$$

(4) 北方一年一熟稻田,稻秸沼渣还田($SF_j = 1.31 \sim 1.41$) + 间歇性灌水时,当采用“间歇性灌水+单次落干”($SF_i = 0.71$)时:

$$SF_i \times SF_j \approx 0.93 \sim 1.00$$

若采用“间歇性灌水+多次落干”($SF_i = 0.55$)时:

$$SF_i \times SF_j \approx 0.72 \sim 0.78$$

因此北方一年多熟稻田,间歇性灌水+稻秸沼渣还田时:

$$SF_i \times SF_j \approx 0.72 \sim 1.00$$

比较不同情景的 $SF_i \times SF_j$,对于南方一年多熟稻田间歇性灌水+稻秸沼渣还田比连续灌水+稻秸直接还田减少58%~69%;对于北方一年一熟稻田间歇性灌水+稻秸沼渣还田比连续灌水+稻秸直接还田减少39%~56%。

5 结论与展望

稻秸沼渣还田相比较稻秸直接还田可使我国南方一年多熟稻田甲烷排放减少40%以上,使北方一年一熟水稻田甲烷排放减少15%以上。

与连续灌溉和稻秸直接还田相比,稻秸沼渣还田与优化水分管理耦合,可以减少南方一年多熟水稻田甲烷排放50%以上,减少北方一年一熟水稻田甲烷排放39%以上。

随着耕地质量提升要求的进一步落实,稻秸还田率将进一步增加,有机化肥替代的力度也进一步加强,稻秸沼渣还田耦合水分管理有望在全国范围内实现稻田甲烷减半的目标。

综合而言,稻秸离田进入沼气工程厌氧消化去除产甲烷潜力后沼渣还田具有巨大的稻田甲烷减排潜力,此外其还具有以下优点:1) 稻秸沼渣还田可以避免稻秸直接还田带来的土传病虫害高发、稻秸难以腐烂需额外肥料投入等缺点;2) 通过建设沼气工程实施稻秸沼渣还田具有良好的工艺可操作性,秸秆沼气工程厌氧消化技术成熟,与当前水稻生产传统不存在冲突,可以在不影响现有的种植制度下进行,农民接受度高。

稻田甲烷减排策略的实施,受限于水稻生产的经济性。首先应该出台完整的稻田甲烷减排测算方法学,稻田甲烷减排纳入国家温室气体减排交易;其次,国家应在稻田甲烷减排建设初期进行水分管理和沼气工程建设和运行补贴,引领全球稻田甲烷减排策略的实施,掌握全球甲烷减排的话语权。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[R]. 2018.
- [2] 张博,李蕙竹,仲冰,等. 中国甲烷控排面临的形势、问题与对策[J]. 中国矿业, 2022, 31(02): 1-10.
- [3] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于推介发布秸秆农用十大模式的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dwq/201712/t20171230_6133475.htm 2017-05-20.

- [4] Liu B, Wu Q, Wang F, et al. Is straw return-to-field always beneficial? Evidence from an integrated cost-benefit analysis [J]. *Energy*, 2019, 171: 393–402.
- [5] Huang Y. Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D8).
- [6] 侯晓莉. 不同施肥措施下双季稻田固碳减排研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [7] 张莉娟, 尹芳, 赵兴玲, 等. 秸秆沼气在我国生态农业中的应用 [J]. *现代农业科技*, 2013(16): 263–264.
- [8] 王红梅, 屠焰, 张乃锋, 等. 中国农作物秸秆资源量及其“五料化”利用现状 [J]. *科技导报*, 2017, 35(21): 81–88.
- [9] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [10] Cai Yuanfeng, Zheng Yan, Bodelier Paul L E, et al. Conventional methanotrophs are responsible for atmospheric methane oxidation in paddy soils. [J]. *Nature communications*, 2016, 7(1): 11728.
- [11] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(01): 349–359.
- [12] 唐志伟, 张俊, 邓艾兴, 等. 我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径 [J/OL]. *中国生态农业学报(中英文)*: 1–10 [2022–02–21].
- [13] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. 2019.
- [14] 农业农村部农业生态与资源保护总站. 农业农村减排固碳十大技术模式 [EB/OL]. [2021–11–22]. http://www.reea.agri.cn/stkzszy/202111/t20211122_7782554.htm.
- [15] 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(04): 852–862.
- [16] Yin H, Zhao W, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2695–2702.
- [17] 农业农村部. 农业农村部办公厅关于做好农作物秸秆资源台账建设工作的通知 [EB/OL]. [2019–02–20]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2019/201902/201905/t20190518_6309472.htm.
- [18] 工业和信息化部, 科学技术部, 生态环境部. 国家鼓励发展的重大环保技术装备目录(2020年版) [EB/OL]. [2020–12–25]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art_e3740bb44c544e989ba260b8ab13b868.html.
- [19] 冯泽宇. 不同水分管理对稻田温室气体、氮素利用率和产量的影响 [D]. 武汉: 湖北大学, 2020.
- [20] 中国农业年鉴委员会. 中国农业年鉴(2010—2019) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [21] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算 [J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(09): 32–37.