

施肥对稻田甲烷排放的影响^①

马 静, 徐 华*, 蔡祖聪

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 本文综述了N肥和有机肥的种类、施用量、施用方式和施用时间对稻田CH₄排放的影响, 提出了减少稻田CH₄排放的施肥策略, 并指出了今后的研究重点: 加强对稻田CH₄排放机理的研究; 针对以往研究中的不足, 全面深入研究施肥对稻田CH₄排放的影响; 进一步研究稻田温室气体排放的交互作用。

关键词: 甲烷排放; 氮肥; 有机肥; 减排对策; 稻田

中图分类号: X511

施肥是农业生产中增加作物产量和提高产品质量的一项必要而有效的措施。肥料可分为无机肥和有机肥两大类。无机肥是指用化学合成方法生产的肥料。我国是世界上最大的化肥消费国。据统计, 2005年全国农用化肥施用量达4 766.2万t, 其中N肥施用量占46.8%^[1]。有机肥是由有机物质组成的肥料, 主要包括动、植物残体或排泄物等。我国有机肥资源丰富, 农作物秸秆的年产量约为5亿t, 禽畜粪便的年产量约为17.3亿t^[2]。无机肥和有机肥的大量施用, 大大增加了农业生产系统的物质和能量循环的内容, 对我国农业生产持续稳定增长、保障国家粮食安全起到了积极的作用。

稻田是大气CH₄的重要排放源之一。据IPCC第4次评估报告^[3], 稻田CH₄的年排放量为31~112 Tg, 占全球总排放的5%~19%。我国是世界上的水

稻生产大国。统计数据表明, 2005年全国水稻种植面积为2 884.7万hm², 水稻总产量为18 058.8万t^[1]。我国传统的稻田施肥以有机肥为主, 随着工农业生产的发展, 稻田施用N肥的比例越来越大。稻田施用的N肥或有机肥均会与土壤原有的C库、N库发生复杂的生物化学和物理化学作用, 改变土壤C、N循环过程, 从而影响稻田CH₄的排放。

1 氮肥对稻田甲烷排放的影响

稻田CH₄的排放是稻田土壤中CH₄的产生、再氧化和向大气传输3个过程共同作用的结果。施用N肥会不同程度地影响这3个过程, 最终影响稻田CH₄的排放。N肥对稻田CH₄排放的影响程度与施用肥料的种类、施用量、施用方式和施用时间有关(表1)。

表1 N肥对稻田CH₄排放的影响Table 1 Effects of nitrogen fertilizers on CH₄ emissions from rice fields

影响因素	地点	水稻种植	N肥施用情况	CH ₄ 排放通量 (mg/(m ² ·h))	CH ₄ 排放总量 (kg/hm ²)	参考文献
N肥种类	天津	单季稻	尿素N 112.5 kg/hm ²	57.1 ^a	1 632	陶战等 ^[4]
			硝酸铵N 112.5 kg/hm ²	42.1 ^a	1 202	
			硫酸铵N 112.5 kg/hm ²	30.7 ^a	878	
	江苏南京	单季稻	-	3.31	89	Cai等 ^[5]
			尿素N 300 kg/hm ²	2.85	77	
			硫酸铵N 300 kg/hm ²	1.34	36	

① 基金项目: 国际科技合作项目(2008DFA21330)、科技部科技支撑计划项目(2007BAD89B18)和中国科学院重大创新项目(KSCX1-YW-09-08)资助。

* 通讯作者(hxu@issas.ac.cn)

作者简介: 马静(1974—), 女, 四川南充人, 博士, 助理研究员, 主要从事农田温室气体排放及其减缓对策研究。E-mail: jma@issas.ac.cn

续表 1

江苏苏州	单季稻	(堆肥+尿素) N 191 kg/hm ²	4.58	148	熊效振等 ^[6]
		(堆肥+碳铵) N 191kg /hm ²	2.92	94	
湖北武汉	早稻	硫铵N 150 kg/hm ²	6.69	133	林匡飞等 ^[7]
		尿素N 150 kg/hm ²	8.38	167	
		包膜复合肥N 150 kg/hm ²	4.39	88	
	晚稻	硫铵N 150 kg/hm ²	6.54	151	
		尿素N 150 kg/hm ²	11.1	256	
		包膜复合肥N 150 kg/hm ²	5.65	130	
台湾嘉义	早稻	硫铵N 280 kg/hm ²	0.90	28	Liou等 ^[8]
		硝酸钾N 280 kg/hm ²	2.82	87	
	晚稻	硫铵N 280 kg/hm ²	9.17	246	
		硝酸钾N 280 kg/hm ²	13.56	364	
Louisiana, USA	早稻	-	2.69	60	Lindau ^[9]
		硫铵N 60 kg/hm ²	3.14	70	
		硝酸钾N 60 kg/hm ²	3.58	80	
		尿素N 60 kg/hm ²	4.93	110	
		-	2.69	60	
		硫铵N 120 kg/hm ²	4.48	100	
		硝酸钾N 120 kg/hm ²	4.03	90	
		尿素N 120 kg/hm ²	9.86	220	
Bengal, India	晚稻	-	-	53 ^b	Banik等 ^[10]
		尿素 1 g/kg soil	-	152 ^b	
		磷酸氢二铵 1 g/kg soil	-	138 ^b	
		硫铵 1 g/kg soil	-	136 ^b	
		硝酸钠 1 g/kg soil	-	90 ^b	
Los Baños, Philippines	旱季稻	尿素N 200 kg/hm ²	0.30	8	Bronson等 ^[11]
		硫铵N 200 kg/hm ²	0.08	2	
	雨季稻	尿素N 120 kg/hm ²	1.15	27	
		硫铵N 120 kg/hm ²	0.43	10	
Los Baños, Philippines	旱季稻	尿素N 150 kg/hm ²	1.13	27	Wassmann等 ^[12]
		(尿素+硫铵) N 150 kg/hm ²	0.38	9	
	雨季稻	尿素N 150 kg/hm ²	0.58	13	
		(尿素+硫铵) N 150 kg/hm ²	0.29	7	
Cuttack, India	旱季稻	-	-	34.7 ^c	Rath等 ^[13]
		尿素N 60 kg/hm ²	-	40.6 ^c	
		硫代硫酸铵N 60 kg/hm ²	-	14.3 ^c	
N 肥施用量	北京	单季稻	- ^d	14.39	Li等 ^[14]
		尿素N 72 kg/hm ^{2d}	4.99	-	
		尿素N 144 kg/hm ^{2d}	2.25	-	
江苏南京	单季稻	-	3.31	89	Cai等 ^[5]
		尿素N 100 kg/hm ²	3.07	83	
		尿素N 300 kg/hm ²	2.85	77	
江苏南京	单季稻	尿素N 150 kg/hm ²	6.11	173	Zou等 ^[15]
		尿素N 300 kg/hm ²	2.58	73	
		尿素N 450 kg/hm ²	1.48	42	
江苏宜兴	单季稻	-	1.26	39	Ma等 ^[16]
		尿素N 200 kg/hm ²	0.73	23	
		尿素N 270 kg/hm ²	1.06	33	

续表 1

	Louisiana, USA	早稻	-	10.17	210	Lindau等 ^[17]
			尿素N 100 kg/hm ²	14.53	300	
			尿素N 200 kg/hm ²	15.02	310	
			尿素N 300 kg/hm ²	17.93	370	
	Bengal, India	晚稻	-	-	53 ^b	Banik等 ^[10]
			尿素 0.2 g/kg soil	-	68 ^b	
			尿素 0.4 g/kg soil	-	108 ^b	
			尿素 0.6 g/kg soil	-	123 ^b	
			尿素 0.8 g/kg soil	-	131 ^b	
			尿素 1 g/kg soil	-	152 ^b	
	江苏南京	单季稻	-	3.31	89	Cai等 ^[5]
			硫铵N 100 kg/hm ²	1.91	51	
			硫铵N 300 kg/hm ²	1.34	36	
	Bengal, India	晚稻	-	-	53 ^b	Banik等 ^[10]
			硫铵 0.2 g/kg soil	-	68 ^b	
			硫铵 0.4 g/kg soil	-	97 ^b	
			硫铵 0.6 g/kg soil	-	106 ^b	
			硫铵 0.8 g/kg soil	-	117 ^b	
			硫铵 1 g/kg soil	-	136 ^b	
N 肥施用方 式	Vercelli, Italy	单季稻	尿素N 200 kg/hm ² , 表施	15.8	428	Schütz等 ^[18]
			尿素N 200 kg/hm ² , 深施	7.9	214	
	Cuttack, India	雨养稻田	-	-	3 475	Rath等 ^[19]
			尿素N 60 kg/hm ² , 表施	-	3 075	
			尿素N 60 kg/hm ² , 深施	-	2 950	
N 肥施用 时 间	北京	单季稻	不施追肥	14.3	487	邵可声和李震 ^[20]
			追施分蘖肥硫铵 300 kg/hm ²	7.8	266	
			追施穗肥硫铵 300 kg/hm ²	12.1	412	

注：a：基肥施用农家肥；b：盆栽试验，移栽至开花期观测的CH₄排放量；c：施肥后 28 天的观测值；d：盆栽试验。

1.1 氮肥种类对稻田甲烷排放的影响

常用的N肥包括尿素、硫铵、碳铵、复合肥等。尿素是稻田中最常用的一种N肥，目前关于尿素对稻田CH₄排放影响的观测结果很不一致。以往一些研究发现^[9-10, 17, 21-23]，尿素施用增加了稻田CH₄排放量。原因在于：尿素促进根系的发育，增加根系分泌物，为CH₄产生提供更多的前体基质；尿素在土壤中水解为NH₄⁺，NH₄⁺对CH₄氧化有竞争作用，从而增加了CH₄的排放量；土壤产生的CH₄主要通过植株排放到大气中，尿素促进作物生长，从而提高了植株向大气传输CH₄的能力。而另外一些研究发现^[5, 14-16, 18-19]，尿素施用降低了稻田CH₄的排放。原因可能是：在稻田高内源CH₄浓度的条件下，虽然施用铵态氮肥对稻田土壤氧化CH₄开始表现为抑制作用，但同时高浓度CH₄和NH₄⁺-N的存在促进了甲烷氧化菌的生长，随着时间的延长和NH₄⁺-N的逐渐消失，被促进的甲烷氧化菌氧化更多的CH₄，从而降低后期CH₄排放量。Schimel^[24]从

3个层次分析了铵态肥料对CH₄排放的影响：在植株/生态系统水平上，N促进植株生长，为CH₄产生提供前体基质，从而促进CH₄的排放；在微生物群落水平上，N促进甲烷氧化细菌的生长和活性，从而减少CH₄的排放；在生物化学水平上，NH₄⁺竞争CH₄的氧化，从而促进CH₄的排放。在这3个层次中，铵态肥料既有促进CH₄排放的作用，也有减少CH₄排放的作用，最终的CH₄排放量取决于铵态氮肥在3个层次作用的相对强弱。

硫铵也是一种常用的N肥，关于硫铵对稻田CH₄排放影响的观测结果也有很大差异。一些研究发现^[5-12]，硫铵施用降低稻田CH₄的排放。还有一些研究发现^[9-10]，硫铵施用促进稻田CH₄的排放。稻田施用硫铵对CH₄排放的影响取决于NH₄⁺对CH₄氧化的抑制作用和SO₄²⁻对CH₄产生的抑制作用的相对强弱：一方面，由于CH₄和NH₄⁺在分子形状和大小上的相似及催化CH₄和NH₄⁺氧化微生物反应的单氧化酶相对较低的选择

性, 甲烷氧化菌和氨氧化菌都可以氧化 CH_4 和 NH_4^+ , 硫酸解离出的 NH_4^+ 竞争 CH_4 的氧化, 从而促进 CH_4 的排放; 另一方面, 稻田淹水后, 氧的耗尽迫使土壤兼性细菌和厌氧细菌依次利用 NO_3^- 、 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 和 CO_2 作为电子受体来进行有机质分解和呼吸作用, 分子氧在土壤Eh大约为 +350 mV时首先被还原, 随后 NO_3^- 和 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 及 SO_4^{2-} 分别在 +250、+125 mV及大约 -150 mV时被还原, 产甲烷菌在土壤氧化还原电位为 -200 ~ -150 mV时开始产生 CH_4 , 硫酸解离出的 SO_4^{2-} 在土壤还原过程中作为电子受体延缓土壤Eh的下降, 从而减少 CH_4 的排放; 此外, SO_4^{2-} 的还原产物 S^{2-} 对产甲烷菌有毒害作用, 从而减少 CH_4 的排放。

在可比较的条件下, 还可以观察到其他N肥品种对稻田 CH_4 排放的不同影响。太湖地区单季稻的观测发现, 与碳铵相比, 施用尿素使 CH_4 排放增加 10% ~ 70%^[6]。湖北地区的早、晚稻田观测发现, 包膜复合肥处理比施尿素处理年 CH_4 排放总量减少 48.6%^[7]。大量研究发现^[4-5, 9-11], 硫酸处理的稻田 CH_4 排放量小于尿素处理, 原因可能在于 SO_4^{2-} 对 CH_4 产生的抑制作用。

1.2 氮肥施用量对稻田甲烷排放的影响

以往研究发现, 稻田 CH_4 排放量随N肥施用量而变化的关系也不明确, 稻田 CH_4 排放量随N肥施用量增加而增加^[10, 17]或减少^[5, 14-15]报道都有。这些研究中, 无论N肥施用对稻田 CH_4 排放是促进作用还是抑制作用, N肥施用量和 CH_4 排放量之间呈极显著的线性关系(表1)。而宜兴^[16]的稻田观测结果显示, N肥施用对稻田 CH_4 排放的影响与肥料施用量有关, 在N 0、200、270 kg/hm^2 三个尿素施用水平中, 施用量为N 200 kg/hm^2 时, 稻田 CH_4 排放量最低。N肥施用量对稻田 CH_4 排放量的影响还需要进一步研究。

1.3 氮肥施用方式对稻田甲烷排放的影响

N肥施用方式也是影响稻田 CH_4 排放的因素之一。

意大利^[18]的稻田观测结果显示, 施用尿素和硫酸对稻田 CH_4 排放的影响程度取决于施肥方式, 相对于表施, N肥深施可以减少稻田 CH_4 的排放。印度^[19]的雨养稻田也同样观测到: 尿素粒肥深施降低稻田 CH_4 的排放, 而尿素表施对稻田 CH_4 排放影响不大。此外, Kimura等^[25]的盆栽试验发现, 与土面施用比较, 叶面追施硫酸铵、氯化铵和尿素, CH_4 排放量分别减少 45%、60% 和 20%。N肥施用方式影响稻田 CH_4 排放量的原因可能是: 稻田 CH_4 的氧化主要发生在土水界面及根土界面的氧化区域, 与N肥深施或叶面施用比较, N肥表施或土面施用产生的 NH_4^+ 竞争 CH_4 的氧化, 从而促进 CH_4 的排放。

1.4 氮肥施用时间对稻田甲烷排放的影响

N 肥施用时间对稻田 CH_4 排放也有一定的影响。邵可声和李震^[20]分别在不同时间施加硫酸铵追肥, 研究发现: 与对照相比, 硫酸铵作为分蘖肥追施可使 CH_4 排放量降低 45%, 而硫酸铵作为穗肥追施仅使 CH_4 排放量降低了15%。原因在于: 水稻生长过程中出现两个 CH_4 排放高峰, 分别在水稻分蘖期和水稻扬花、灌浆、结实阶段, 而硫酸铵对 CH_4 抑制效果持续时间较长, 施加分蘖肥对第 2 个 CH_4 排放高峰仍有一定的抑制作用。

2 有机肥对稻田甲烷排放的影响

CH_4 是在严格厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果, 充足的产甲烷基质和适宜的产甲烷菌生长环境是 CH_4 产生的先决条件。施用有机肥一方面为土壤产甲烷菌提供了丰富的产甲烷基质; 另一方面, 淹水条件下有机肥的快速分解加速稻田氧化还原电位(Eh)的下降, 为产甲烷菌的生长提供了适宜的环境条件, 从而促进稻田 CH_4 的排放。有机肥对稻田 CH_4 排放的影响在很大程度上还取决于有机肥的种类、施用量、施用方式及施用时间(表2)。

表 2 有机肥对稻田 CH_4 排放的影响

Table 2 Effects of organic fertilizers on CH_4 emissions from rice fields

影响因素	地点	水稻种植	有机肥施用情况	CH_4 排放通量 ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	CH_4 排放总量 (kg/hm^2)	参考文献
有机肥种类	天津	单季稻	-	0.67	19	陶战等 ^[26]
			马粪沼渣 2.25 t/hm ²	0.57	16	
			猪粪沼渣 2.25 t/hm ²	0.82	23	
			农家肥(猪粪 + 马粪) 2.25 t/hm ²	44.18	1 241	
	湖南桃源	早稻	-	4.5	-	王明星等 ^[27]
			沼渣 45 t/hm ²	9.9	-	

续表 2

			紫云英 15 t/hm ²	14.9	-	
			紫云英 15 t/hm ² + 猪粪 15 t/hm ²	21.9	-	
	晚稻		-	6.8	-	
			沼渣 45 t/hm ²	9.8	-	
			稻草 3 t/hm ²	20.2	-	
			稻草 3 t/hm ² + 猪粪 22.5 t/hm ²	22.1	-	
北京	单季稻		-	0.17	6	Wang等 ^[28]
			猪粪N 40 kg/hm ²	5.79	191	
			牛粪N 13 kg/hm ²	1.29	43	
			稻草N 9 kg/hm ²	4.25	141	
江苏南京	单季稻		-	1.40	39	邹建文等 ^[29]
			猪厩肥 2.25 t/hm ²	1.34	37	
			牛厩肥 2.25 t/hm ²	2.03	57	
			菜饼 2.25 t/hm ²	4.94	137	
			麦秆 2.25 t/hm ²	4.90	136	
湖南望城	早稻		-	10.33	201	秦晓波等 ^[30]
			猪粪 15 t/hm ²	23.79	463 ^a	
			稻草 2.625 t/hm ²	27.09	527 ^a	
	晚稻		-	10.27	215	
			猪粪 15 t/hm ²	20.38	426 ^a	
			稻草 2.625 t/hm ²	51.38	1 073 ^a	
Mito, Japan	单季稻		-	1.2	36	Yagi和Minami ^[31]
			稻草堆肥 12 t/hm ²	1.9	59	
			稻草 6 t/hm ²	3.2	98	
Los Baños, Philippines	旱季稻		-	1.13	27	Wassmann等 ^[12]
			稻草N 60 kg/hm ²	26.42	634	
			田菁N 60 kg/hm ²	4.96	119	
	雨季稻		-	0.58	13	
			稻草N 60 kg/hm ²	25.88	602	
			田菁N 60 kg/hm ²	1.75	40	
Luzon, Philippines	旱季稻		-	6.88	160	Corton等 ^[32]
			稻草堆肥 2.5 t/hm ²	7.67	178	
			稻草 4 t/hm ²	18.04	420	
	雨季稻		-	11.33	272	
			稻草堆肥 2.5 t/hm ²	14.71	353	
			稻草 4 t/hm ²	39.67	952	
有机肥施用量	台湾桃源	早稻	- ^b	-	295	Yang 和 Chang ^[23]
			稻草 6 t/hm ^{2b}	-	915	
			稻草 12 t/hm ^{2b}	-	2 012	
	晚稻		- ^b	-	76	
			稻草 6 t/hm ^{2b}	-	518	
			稻草 12 t/hm ^{2b}	-	1 331	
江苏南京	单季稻		-	1.10	30	蒋静艳等 ^[33]
			麦秆 2.25 t/hm ²	5.08	140	
			麦秆 4.5 t/hm ²	9.16	253	
Mito, Japan	单季稻		-	1.2	36	Yagi 和Minami ^[31]
			稻草 6 t/hm ²	3.2	98	
			稻草 9 t/hm ²	4.1	126	

续表 2

有机肥施用方式	浙江杭州	晚稻	-	6.94	185	Lu等 ^[34]
			稻草C 600 kg/hm ² , 均匀混施	10.49	279	
			稻草C 600 kg/hm ² , 表面覆盖	9.30	248	
	湖南宁乡	早稻	稻草 6.75 t/hm ² , 翻耕混施	11.1	234	肖小平等 ^[35]
			稻草 6.75 t/hm ² , 旋耕混施	11.5	243	
			稻草 6.75 t/hm ² , 表面覆盖	8.4	177	
	江苏句容	单季稻	-	2.35	69	Ma等 ^[36]
			麦秆 4.8 t/hm ² , 均匀混施	9.21	272	
			麦秆 4.8 t/hm ² , 墒沟埋草	9.51	281	
			麦秆 4.8 t/hm ² , 条带状覆盖	6.28	185	
			麦秆 4.8 t/hm ² , 原位焚烧	5.40	159	
	Prachinburi, Thailand	深水稻田	稻草 12.5 t/hm ² , 均匀混施 ^c	12.96	619	Chareonsilp等 ^[37]
稻草 12.5 t/hm ² , 表面覆盖 ^c			2.67	127		
稻草 12.5 t/hm ² , 灰施 ^c			1.46	69		
有机肥施用时间	江苏句容	单季稻	稻草 5 g/kg soil, 前季施用 ^d	4.06	-	Xu等 ^[38]
			稻草 5 g/kg soil, 当季施用 ^d	19.73	-	
			稻草 5.83 g/kg soil, 前季施用 ^d	3.15	-	
			稻草 5.83 g/kg soil, 当季施用 ^d	35.20	-	
	浙江杭州	早稻	-	7.48	142	Lu等 ^[34]
			稻草C 600 kg/hm ² , 前季施用	10.56	200	
			稻草C 600 kg/hm ² , 当季施用	11.84	225	
	Aichi, Japan	单季稻	-	-	189 ^f	Watanabe 和 Kimura ^[39]
			稻草 3 g/kg soil, 前季施用 ^e	-	319 ^f	
稻草 3 g/kg soil, 当季施用			-	513 ^f		

注: a: 有机肥从 1981 年起长期施用, 观测值为 2004 年排放量; b: 盆栽试验; c: 稻草湿重; d: 盆栽试验; e: 水稻收获后, 稻草保留在田间; f: CH₄排放量单位为mg/pot。

2.1 有机肥种类对稻田甲烷排放的影响

有机肥的种类很多, 常用的有机肥包括作物秸秆、绿肥、堆肥、厩肥、沼渣肥和饼肥等。施用有机肥促进稻田CH₄排放, 其程度大小取决于有机物的成分和性质(表 2)。四川乐山单季稻^[40]和湖南桃源早、晚稻^[27]的研究发现, 沼渣肥对稻田CH₄排放的正效应要大大低于新鲜有机肥, 原因在于: 沼渣经过了相当长时间的发酵, 原来新鲜有机肥中易分解的成分相当一部分已生成沼气而消失, 产甲烷前体减少, 从而导致土壤中CH₄产生量较低。邹建文等^[29]采用不同种类的有机肥进行研究, 发现稻田CH₄排放总量为: 菜饼、麦秆 > 牛厩肥 > 猪厩肥, 可能的原因是: 牛厩肥的有机C含量较低, 而猪厩肥的有机C大部分以大分子复杂有机物存在, 可利用的产甲烷前体较少。

日本^[31]和菲律宾^[32]的研究发现, 施用秸秆堆肥只略微增加稻田CH₄的排放量。然而, 堆肥制作过程中, 由于大量有机物质的集中堆放, 形成一定程度的厌氧环境, 也会导致CH₄排放。王明星等^[41]在假定堆肥处理场的CH₄产率是沼气池 10% 基础上, 粗略估算国内

堆肥场的CH₄年排放总量为 3.2×10^{12} g。因此, 堆肥对稻田CH₄排放的影响应综合考虑堆肥施用后稻田CH₄排放减少的量(相对于新鲜有机物)与堆肥制作过程中CH₄排放的量。施用好氧条件下制作的堆肥才是更有效的CH₄减排措施^[42-44]。

2.2 有机肥施用量对稻田甲烷排放的影响

大量研究表明^[23,31,33,45], 稻田CH₄排放量随有机肥施用量增加而增加。然而, 有机肥施用量和CH₄排放量之间并不是简单的线性关系。Schütz等^[18]在意大利稻田的研究发现, 稻草施用量为 12 t/hm²时, CH₄排放量是对照的 2 倍多, 但当施用量继续增加时, CH₄排放量不再增加。Wang等^[46]在实验室的稻草培养试验发现, 各处理的CH₄产生量与稻草加入量呈极显著的线性关系, 但这种线性关系仅适用于稻草加入量在 2% 的范围内, 超过这个范围时, 由于基质浓度过饱和, 可能不再遵循线性关系。

通过数学建模等方法拟合, 也发现稻田CH₄排放量与有机肥施用量的关系是非线性的。Denier van der Gon和Neue^[47]综合中国、菲律宾、日本、美国和意大

利在 1989—1993 年的相关研究结果, 采用高斯-牛顿迭代法 (Gauss-Newton iteration) 得到非线性方程:

$$y = \frac{5.3}{1 + e^{0.17(8.2 - x)}}$$

式中: y 为 CH_4 季节排放量 (g/m^2); x 为有机物输入量 (t/hm^2)。

Yan 等^[48]采用混合线性模型分析稻田 CH_4 排放的主要影响因素, 得到线性方程:

$$\ln(\text{flux}) = \text{constant} + a \times \ln(\text{SOC}) + \text{pH}_m + \text{PW}_i + \text{WT}_j + \text{CL}_k + \text{OM}_l \times \ln(1 + \text{AOM}_l)$$

式中: flux 为稻季 CH_4 平均排放通量; SOC 为土壤有机 C 含量; a 为 SOC 的效应; pH_m 为土壤 pH 的效应; PW_i 为前季水分效应; WT_j 为稻季水分管理效应; CL_k 为气候效应; OM_l 为输入的有机物的效应; AOM_l 为有机物输入的数量。

2.3 有机肥施用方式对稻田甲烷排放的影响

作为一种重要的有机肥资源, 作物秸秆直接还田可以改善土壤结构、提高土壤有机质含量、促进农业生态系统良性循环。作物秸秆有多种还田方式: 均匀混施、表面覆盖、墒沟埋草、条带状覆盖、焚烧还田等等。以往研究发现^[34-35,37,49], 相对于均匀混施, 表面覆盖的还田方式可以减少稻田 CH_4 的排放量, 原因在于表面覆盖促进了秸秆的好氧分解。Harada 等^[50]盆栽试验发现, 光照几乎不影响稻草混施处理的 CH_4 排放量, 但显著降低稻草表施处理的 CH_4 排放量, 光照以及随后产生的光养生物抑制了水土界面 CH_4 的生成。Ma 等^[36-51]田间试验发现, 墒沟埋草处理中, 非墒沟区域由于没有施用秸秆, 其 CH_4 排放量远低于均匀混施处理, 但埋草的墒沟集中堆放了大量秸秆, 既为土壤产甲烷菌提供了丰富的产甲烷基质, 又加速了淹水后土壤 Eh 的下降, 因而其 CH_4 排放量远高于均匀混施处理, 总体上, 墒沟埋草处理的 CH_4 排放量与均匀混施处理相当; 秸秆以条带状覆盖还田时, 秸秆带顶部暴露于空气中, 既有利于秸秆的好氧分解, 又有利于淹水期间产生的大量 CH_4 的氧化, 因而其 CH_4 排放量显著低于均匀混施处理。秸秆灰施可以降低稻田 CH_4 排放量^[36-37], 原因在于: 秸秆含有的大部分有机 C 在焚烧过程中以气体形式损失掉, 其能为土壤产甲烷菌提供的产甲烷基质也相应减少, 从而减少 CH_4 的产生和排放。但秸秆烧灰过程中也有相当数量的 CH_4 排放^[52-53], 因而秸秆焚烧还田对稻田 CH_4 排放的影响应综合考虑灰施稻田 CH_4 排放减少的量 (相对于均匀混施) 与烧灰过程中 CH_4 排放的量。

2.4 有机肥施用时间对稻田甲烷排放的影响

有机肥施用时间也是影响稻田 CH_4 排放的主要因素之一。Xu 等^[38]的盆栽试验发现, 相对于水稻移栽前施用稻草, 冬季非水稻生长期施用稻草显著降低稻季 CH_4 排放量, 原因在于: 经过冬作季节的好氧分解, 稻草中易分解有机质已经基本被分解, 残余的难分解有机质促进 CH_4 排放的效应不大。Lu 等^[34]对杭州早稻研究也发现, 前季稻草还田可以显著降低稻田 CH_4 排放量。Watanabe 和 Kimura^[39]分别在前季水稻收获时以及水稻移栽前收集田间的稻草进行盆栽试验, 发现后者的 C/N 比为前者的 58%, 相应地, CH_4 排放量仅为前者的 62%。

3 稻田甲烷排放的减缓对策

自从确认稻田是大气 CH_4 的重要排放源后, 如何减少稻田 CH_4 排放成为一个受人关注的问题。在研究稻田 CH_4 减排措施时, 必须充分注意以下几个方面:

① 水稻生产在全球粮食保障体系中发挥着举足轻重的作用, 任何稻田 CH_4 减排措施都应以不降低水稻产量为前提; ② 稻田既是 CH_4 排放源也是 N_2O 排放源, 而且相互之间存在互为消长关系^[5,15-16,21], 评估稻田 CH_4 减排措施时, 必须同时考虑对这两种温室气体的影响。③ 采用稻田 CH_4 减排措施时必须考虑其实际可行性及其对生态和环境的其他影响。

通过施肥策略的改变可以有效地减缓稻田 CH_4 排放:

(1) 肥料种类。通常情况下, 施用硫酸铵的稻田 CH_4 排放量低于施用尿素的稻田^[4,5,9-11], 但在还原性强烈的稻田土壤中, 硫酸铵中的 SO_4^{2-} 常还原生成 H_2S , 毒害水稻根系生长和呼吸, 产生水稻黑根, 所以在水稻生产中不常施用硫酸铵。以堆肥和沼渣肥替代稻草、绿肥等新鲜有机肥可以达到稻田 CH_4 减排的目的^[27, 31-32, 40], 但应在好氧条件下制作堆肥以避免堆肥制作过程中大量 CH_4 排放, 而沼渣肥施用前应经过一定时间的干燥以降低产甲烷菌活性和数量。

(2) 施肥量。稻田 CH_4 排放量与 N 肥施用量之间关系较为复杂, 而稻田 N_2O 排放量随 N 肥施用量增加而升高。在不降低农作物产量的前提下, 选择合适施肥量可以达到减少稻田排放 CH_4 和 N_2O 的综合温室效应的目的。在宜兴的田间试验研究发现, 将 N 肥施用量从当地农民平均施用量 $\text{N} 270 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 降低到 $\text{N} 200 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 减少稻田 CH_4 和 N_2O 排放以及两者产生的综合温室效应, 同时不影响水稻产量^[16]。

(3) 施肥方式。已有的研究表明, N 肥深施可以减少稻田 CH_4 的排放^[18-19], 但要考虑这一方式的实际可

操作性。我国稻田N肥施用通常采用基肥和追肥相结合的分次施肥方式,水稻基肥较容易进行深施,而依靠手工深施追肥是不现实的。单位质量CH₄产生的温室效应远低于单位质量CO₂的温室效应^[3],因此,促进有机肥料和作物秸秆的好氧分解(使其易分解C尽可能转化为CO₂,而不是CH₄)是减缓有机肥对稻田CH₄排放促进作用的有效措施。相对于均匀混施,表面覆盖的秸秆还田方式可以减少稻田CH₄的排放^[34-35,37,49],但在实施中难以解决覆盖物漂积成堆、肥水淤阻、插秧困难、夺N现象突出等问题,推广受到极大的限制。秸秆以条带状覆盖的方式还田能避免以上问题,且能减少稻田CH₄排放量以及稻田CH₄和N₂O排放产生的综合温室效应,还可增加水稻产量^[36,51],是一种环境、经济友好的秸秆还田方式。

(4) 施肥时间。在非水稻生长期施用有机肥,有利于其在稻田淹水前有充分的好氧分解,从而达到稻田CH₄减排的目的^[34,38]。此外,在水稻移栽前施用稻草或其他有机肥,影响秧苗的正常站立,且淹水条件下有机物质的快速分解很快耗尽土内O₂,形成极端厌氧的土壤环境,损害水稻根系的生长,而在非水稻生长期施用有机肥可以避免这些不良影响。应鼓励和大力推广在土壤好氧季节施用有机肥和秸秆还田。在双季稻地区,应尽可能避免立即将早稻收获的秸秆在晚稻移栽前还田。

4 问题与展望

关于施肥影响稻田CH₄排放的报道很多,然而,N肥对稻田CH₄排放影响的研究结果差异很大,影响机理不十分清楚;有机肥如堆肥、灰施等对稻田CH₄排放影响的研究缺乏综合全面的考虑;N肥和有机肥配合施用是稻田施肥的必然趋势,而两种肥料对稻田CH₄排放可能的交互影响迄今未见报道。作为水稻生产大国,我国科学家对稻田CH₄排放通量、影响因素、总量估算及减排措施等方面进行了大量研究,但有关稻田CH₄排放的机理性研究还相对比较薄弱。此外,目前稻田温室气体的研究已从单一影响因素或单一温室气体发展到多因素或多气体交互影响的研究。因此,今后的研究工作中,应在以下几方面进一步加强:

(1) 加强对稻田 CH₄ 排放机理的研究。稻田 CH₄ 的产生、氧化和传输这 3 个过程均存在同位素分馏,稳定性碳同位素方法通过测定稻田 CH₄ 产生、氧化和传输 3 个过程中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 值的变化,计算稻田 CH₄ 不同产生途径的相对贡献率和氧化率。与传统的放射性示踪技术和添加 CH₄ 产生抑制剂测定 CH₄ 产

生途径的方法以及土壤厌氧培养和添加 CH₄ 氧化抑制剂测定 CH₄ 氧化率的方法相比,稳定性碳同位素方法可在自然条件下测定 CH₄ 产生途径和氧化率,避免对土壤环境的扰动,所以其测定结果更加可靠。20 世纪 90 年代以来,国外已将稳定性碳同位素方法应用到稻田 CH₄ 的研究中^[54-57]。我国水稻种植具有自身鲜明的水肥管理特色,稻田CH₄产生途径、氧化率及其季节变化规律可能不同于西方国家稻田,因此有必要应用先进的观测手段,深入研究与 CH₄ 排放关系密切的 CH₄ 产生和氧化等土壤微观过程。

(2) 针对以往研究中的不足,全面深入研究施肥对稻田CH₄排放的影响。通过稻田CH₄排放机理的研究,阐明稻田CH₄排放与N肥施用之间的相互关系;观测有机肥制造过程中和施用稻田后的CH₄排放,全面评价有机肥对稻田CH₄排放的影响;探索N肥和有机肥对稻田CH₄排放的交互影响及其机理,寻求环境、经济友好的施肥模式。

(3) 进一步研究稻田温室气体排放的交互作用。交互作用表现在两个方面:①一种农业管理措施对不同温室气体排放的影响可能不同。CH₄和N₂O是大气中仅次于CO₂的两种最重要温室气体。稻田CH₄和N₂O排放存在互为消长的关系,有利于抑制稻田CH₄排放的土壤环境常常促进N₂O排放。研究某一农业管理措施如施肥对稻田CH₄排放的影响,还应综合考虑稻田CH₄和N₂O排放的互为消长关系及综合温室效应。②不同农业管理措施对某一温室气体的影响可能存在交互作用。除施肥管理外,水分管理、耕作方式、水稻品种、研制和应用甲烷抑制剂等也是影响稻田CH₄排放量的重要因素。明确这些管理措施的减排潜力、适用区域、可能的协同作用和不利效应、潜在的限制因素、经济和社会效益等则是决策者选择减排措施的决策依据。

参考文献:

- [1] 中国统计年鉴. 2006. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm>
- [2] 周文利, 汤利, 苗艳芳, 刘红霞. 我国有机肥料资源、加工的现状及其存在的问题. 江西农业学报, 2007, 19(9): 83-85
- [3] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>
- [4] 陶战, 杜道灯, 周毅, 买光熙, 刘箫威. 不同农作措施对稻田甲烷排放通量的影响. 农业环境保护, 1995, 14(3): 101-104
- [5] Cai ZC, Xing GX, Yan XY, Xu H, Tsuruta H, Yagi K, Minami K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as

- affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7-14
- [6] 熊效振, 沈壬兴, 王明星, 郑循华, 王跃思, 李晶, Kogge M. 太湖流域单季稻的甲烷排放研究. *大气科学*, 1999, 23(1): 9-18
- [7] 林匡飞, 项雅玲, 姜达炳, 胡球兰, 李志红, 杜道灯, 陶战. 湖北地区稻田甲烷排放量及控制措施的研究. *农业环境保护*, 2000, 19(5): 267-270
- [8] Liou RM, Huang SN, Lin CW. Methane emission from fields with differences in nitrogen fertilizers and rice varieties in Taiwan paddy soils. *Chemosphere*, 2003, 50(2): 237-246
- [9] Lindau CW. Methane emissions from Louisiana rice fields amended with nitrogen fertilizers. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(3): 353-359
- [10] Banik A, Sen M, Sen SP. Effects of inorganic fertilizers and micronutrients on methane production from wetland rice (*Oryza sativa* L.). *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 21(4): 319-322
- [11] Bronson KF, Neue HU, Singh U, Abao Jr EB. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. Residue, nitrogen, and water management. *Soil Sciences Society of America Journal*, 1997, 61(3): 981-987
- [12] Wassmann R, Buendia LV, Lantin RS, Bueno CS, Lubigan LA, Umali A, Nocon NN, Javellana AM, Neue HU. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Baños, Philippines. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 107-119
- [13] Rath AK, Ramakrishnan B, Sethunathan N. Effect of application of ammonium thiosulphate on production and emission of methane in a tropical rice soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 90(3): 319-325
- [14] Li Y, Lin ED, Rao MJ. The effect of agricultural practices on methane and nitrous oxide emissions from rice field and pot experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1/3): 47-50
- [15] Zou JW, Huang Y, Jiang JY, Zheng XH, Sass RL. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2021
- [16] Ma J, Li XL, Xu H, Han Y, Cai ZC, Yagi K. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(5): 359-367
- [17] Lindau CW, Bollich PK, Delaune RD, Patrick Jr WH, Law VJ. Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH₄ emissions from a Louisiana, USA rice field. *Plant and Soil*, 1991, 136(2): 195-203
- [18] Schütz H, Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Rennenberg H, Seiler W. A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(D13): 16405-16416
- [19] Rath AK, Swain B, Ramakrishnan B, Panda D, Adhya TK, Rao VR, Sethunathan N. Influence of fertilizer management and water regime on methane emission from rice fields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 76(2/3): 99-107
- [20] 邵可声, 李震. 水稻品种以及施肥措施对稻田甲烷排放的影响. *北京大学学报(自然科学版)*, 1996, 32(4): 505-513
- [21] 陈冠雄, 黄国宏, 黄斌, 吴杰, 于克伟, 徐慧, 薛晓华, 王正平. 稻田CH₄和N₂O的排放及养萍和施肥的影响. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 378-382
- [22] Singh JS, Singh S, Raghubanshi AS, Singh S, Kashyap AK. Methane flux from rice/wheat agroecosystems as affected by crop phenology, fertilization and water level. *Plant and Soil*, 1996, 183(2): 323-327
- [23] Yang SS, Chang EH. Effect of fertilizer application on methane emission/production in the paddy soils of Taiwan. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(3): 245-251
- [24] Schimel J. Global change: Rice, microbes and methane. *Nature*, 2000, 403(6768): 375-377
- [25] Kimura M, Asai K, Watanabe A, Murase J, Kuwatsuka S. Suppression of methane fluxes from flooded paddy soil with rice plants by foliar spray of nitrogen fertilizers. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, 38(4): 735-740
- [26] 陶战, 杜道灯, 周毅, 买光熙, 刘箫威. 稻田施用沼渣对甲烷排放通量的影响. *农村生态环境*, 1994, 10(3): 1-5
- [27] 王明星, 上官行健, 沈壬兴, 王跃思, Wassmann R, Renenber H, Seiler W, 谢小立, 王卫东. 华中稻田甲烷排放的施肥效应及施肥策略. *中国农业气象*, 1995, 16(2): 1-5
- [28] Wang ZY, Xu YC, Li Z, Guo YX, Wassmann R, Neue HU, Lantin RS, Buendia LV, Ding YP, Wang ZZ. A four-year record of methane emissions from irrigated rice fields in the Beijing region of China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 55-63
- [29] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 王跃思, Sass RL. 不同种类有机肥施用对稻田CH₄和N₂O排放的影响. *环境科学*, 2003, 24(4): 7-12
- [30] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 万运帆. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 143-148
- [31] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4): 599-610

- [32] Corton TM, Bajita JB, Grospe FS, Pamplona RR, Asis Jr CA, Wassmann R, Lantin RS, Buendia LV. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in central Luzon (Philippines). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 37-53
- [33] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田CH₄和N₂O排放的影响. *中国环境科学*, 2003, 23(5): 552-556
- [34] Lu WF, Chen W, Duan BW, Guo WM, Lu Y, Lantin RS, Wassmann R, Neue HU. Methane emissions and mitigation options in irrigated rice fields in southeast China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 65-73
- [35] 肖小平, 伍芬琳, 黄凤球, 李永, 孙国峰, 胡清, 何莹莹, 陈阜, 杨光立. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究. *农业现代化研究*, 2007, 28(5): 629-632
- [36] Ma J, Xu H, Yagi K, Cai ZC. Methane emission from paddy soils as affected by wheat straw returning mode. *Plant and Soil*, 2008, 313(1/2): 167-174
- [37] Chareonsilp N, Buddhaboon C, Promnart P, Wassmann R, Lantin RS. Methane emission from deepwater rice fields in Thailand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 121-130
- [38] Xu H, Cai ZC, Li XP, Tsuruta H. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH₄ emission from rice cultivation. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(1): 1-12
- [39] Watanabe A, Kimura M. Effect of rice straw application on CH₄ emission from paddy fields IV. Influence of rice straw incorporated during the previous cropping period. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1998, 44(4): 507-512
- [40] 陈德章, 王明星, 上官行健, 黄俊, Rasmussen RA, Khalil MKA. 我国西南地区的稻田CH₄排放. *地球科学进展*, 1993, 8(5): 47-54
- [41] 王明星, 戴爱国, 黄俊, 任丽新, 沈壬兴, Schutz H, Renneberg H, Seiler W, Rasmussen RA, Khalil MAK. 中国稻田CH₄排放量的估算. *大气科学*, 1993, 17(1): 52-64
- [42] Minamikawa K, Sakai N, Yagi K. Methane emission from paddy fields and its mitigation options on a field scale. *Microbes and Environments*, 2006, 21(3): 135-147
- [43] Wassmann R, Neue HU, Ladha JK, Aulakh MS. Mitigation greenhouse gas emissions from rice-wheat cropping systems in Asia. *Environment, Development and Sustainability*, 2004, 6(1/2): 65-90
- [44] Yagi K, Tsuruta H, Minami K. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1/3): 213-220
- [45] Naser HM, Nagata O, Tamura S, Hatano R. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(1): 95-101
- [46] Wang ZP, Delaune RD, Lindau CW, Patrick Jr WH. Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizers. *Fertilizer Research*, 1992, 33(2): 115-121
- [47] Denier van der Gon HAC, Neue HU. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 11-22
- [48] Yan XY, Yagi K, Akiyama H, Akimoto H. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology*, 2005, 11(7): 1131-1141
- [49] 陈苇, 卢婉芳, 段彬伍, Wassmann R, Lantin RS. 稻草还田对晚稻稻田甲烷排放的影响. *土壤学报*, 2002, 39(2): 170-176
- [50] Harada N, Otsuka S, Nishiyama M, Matsumoto S. Influences of indigenous phototrophs on methane emissions from a straw-amended paddy soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 46-51
- [51] Ma J, Ma ED, Xu H, Yagi K, Cai ZC. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5), 1022-1028
- [52] Miura Y, Kanno T. Emissions of trace gases (CO₂, CO, CH₄ and N₂O) resulting from rice straw burning. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43(4): 849-854
- [53] Streets DG, Yarber KF, Woo JH, Carmichael GR. Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17 (4): 1099
- [54] Tyler SC, Bilek RS, Sass RL, Fisher FM. Methane oxidation and pathways of production in a Texas paddy field deduced from measurements of flux, $\delta^{13}\text{C}$, and δD of CH₄. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(3): 323-348
- [55] Bilek RS, Tyler SC, Sass RL, Fisher FM. Differences in CH₄ oxidation and pathways of production between rice cultivars deduced from measurements of CH₄ flux and $\delta^{13}\text{C}$ of CH₄ and CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 1029-1044
- [56] Conrad R, Klose M, Claus P. Pathway of CH₄ formation in anoxic rice field soil and rice roots determined by ¹³C-stable isotope fractionation. *Chemosphere*, 2002, 47(8): 797-806
- [57] Krüger M, Frenzel P. Effects of N-fertilisation on CH₄ oxidation and production, and consequences for CH₄ emissions from microcosms and rice fields. *Global Change Biology*, 2003, 9(5): 773-784

Effect of Fertilization on Methane Emissions from Rice Fields

MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong

(*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*)

Abstract: In this paper the effects of variety, application rate, application mode and time of nitrogen and organic fertilizers on methane emissions from rice fields were summarized, and the fertilization strategies for mitigating methane emissions from rice fields were suggested. The research emphases in the future should focus on investigating the mechanism of methane emissions, conducting complete and further investigations on the effects of fertilization on methane emissions to overcome the shortcomings of previous studies, and investigating the interactions of greenhouse gases emissions from rice fields.

Key words: CH₄ emission, Nitrogen fertilizer, Organic fertilizer, Mitigation strategy, Rice field