

# 水稻低碳生产研究进展

周胜<sup>1</sup> 宋祥甫<sup>1,\*</sup> 颜晓元<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>上海市农业科学院, 上海 201403; <sup>2</sup>中国科学院 南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; \* 通讯联系人, E-mail: songxfu@263.net)

## Progress in Research on Low-carbon Rice Production Technology

ZHOU Sheng<sup>1</sup>, SONG Xiang-fu<sup>1,\*</sup>, YAN Xiao-yuan<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; <sup>2</sup>Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; \* Corresponding author, E-mail: songxfu@263.net)

ZHOU Sheng, SONG Xiangfu, YAN Xiaoyuan. Progress in research on low-carbon rice production technology. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(2): 213-222.

**Abstract:** China is the most important rice producing country in the world and rice production process is one of the important emission sources of methane and nitrous oxide. The production, consumption, and transport of methane and nitrous oxide in rice field are influenced by many factors, such as soil type, water regime, fertilizer, fertilizer application rate, cultivation system and rice variety. There is a trade-off relationship between methane and nitrous oxide emissions in rice field due to water regime change. Although methane emission would be decreased under midseason drainage and moist intermittent irrigation conditions, the emission of nitrous oxide would be enhanced. Therefore, simultaneous minimization of methane and nitrous oxide emission from rice field is a very important technology for low carbon rice production. In addition, soil carbon sequestration in rice field is another key technology for changing rice field from greenhouse gas emission source to sink. This review summarized the progress in research on emission of methane and nitrous oxide from rice field, change of soil organic carbon, mitigation of greenhouse gas emission. The effect of key factors on methane and nitrous oxide emissions from rice field, major methods of increasing soil organic matter and evaluation of mitigation options using global warming potential were emphasized and the further studies of low carbon rice production were discussed.

**Key words:** rice plant; methane; nitrous oxide; soil carbon sequestration; mitigation; global warming potential (GWP)

周胜, 宋祥甫, 颜晓元. 水稻低碳生产研究进展. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 213-222.

**摘 要:** 稻田是甲烷(methane, CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(nitrous oxide, N<sub>2</sub>O)的重要发生源。稻田中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的产生、消耗以及传输过程受稻田土壤类型、水分条件、肥料种类、施肥量及方法、耕作模式和制度、水稻品种等多种因素影响。CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 具有不同的排放特性, 很多研究结果表明, 水稻生长期间的中期排水烤田、后期干湿交替能显著降低 CH<sub>4</sub> 排放量, 但同时也可能促进 N<sub>2</sub>O 的排放, 因此, 如何同时减少 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量是实现稻田低碳生产的关键要素; 另一方面, 稻田土壤的碳固定也是使稻田系统从源转变成汇的关键技术。从水稻生产过程中 CH<sub>4</sub> 排放、N<sub>2</sub>O 排放、稻田土壤有机碳动态、减排措施四个方面综述了近年来水稻低碳生产相关研究状况, 重点总结了国内外有关影响稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的关键影响因素、增加稻田土壤有机质含量的主要措施以及各种减排措施的全球增温潜势评价研究, 并对水稻低碳生产研究作了展望。

**关键词:** 水稻; 甲烷; 氧化亚氮; 土壤固碳; 减排措施; 全球增温潜势

**中图分类号:** S181.6; S511.06      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-7216(2013)02-0213-10

全球气候变化是指由于人为活动排放温室气体(greenhouse gases)造成大气组成变化, 从而引起全球气候系统发生变化的现象。全球气候变化不仅影响经济的可持续发展而且也将影响人类生存环境。农业是最易受自然环境条件影响的产业, 气候变化将增加农业生产的不稳定性, 使产量波动幅度增大。同时, 农业生产也是温室气体的主要贡献者之一, 其

中的水稻生产是温室气体 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的重要发生源。因此, 如何降低水稻生产过程中的温室气体排放量, 以达到低碳生产的目的, 是发展低碳农业的重要内容。

从 1750 年以来大气中主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的浓度一直在增加。到 2006 年, 大气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度从工业革命前的 280 mL/m<sup>3</sup>

增加到  $380 \text{ mL/m}^3$ , 增幅达 36%;  $\text{CH}_4$  浓度从  $715 \text{ }\mu\text{L/m}^3$  增加到  $1774 \text{ }\mu\text{L/m}^3$ , 增幅达 148%, 而  $\text{N}_2\text{O}$  浓度从  $270 \text{ }\mu\text{L/m}^3$  增加到  $319 \text{ }\mu\text{L/m}^3$ , 增幅为 18%<sup>[1]</sup>。尽管  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度比  $\text{CO}_2$  低, 但是单位质量的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的温室效应却分别是  $\text{CO}_2$  的 25 倍和 298 倍(100 年尺度)<sup>[2]</sup>。尤其是  $\text{N}_2\text{O}$  浓度的增加, 不仅加剧全球气候变暖, 而且极有可能成为 21 世纪最主要的臭氧层破坏物质<sup>[3]</sup>。工业革命以来,  $\text{CH}_4$  排放量增加的主要原因是化石燃料的使用和农业生产, 而  $\text{N}_2\text{O}$  则主要来自农业生产。农业领域是继能源之后的第二大温室气体排放源, 占总体排放量的 15%。特别是人类活动引起的  $\text{CH}_4$  排放量的 50% 和  $\text{N}_2\text{O}$  的 60% 都是来自于农业领域<sup>[4]</sup>。根据《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》, 我国温室气体的总排放量为 36 亿 t  $\text{CO}_2$  当量, 其中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  分别占 73.1%、19.7% 和 7.2%; 农业源温室气体排放占我国温室气体排放总量的 17%, 高于世界平均水平。农业活动  $\text{CH}_4$  排放量为 17.2 Mt, 其中, 稻田  $\text{CH}_4$  排放量为 6.15 Mt, 占农业活动  $\text{CH}_4$  排放量的 36%; 农业源  $\text{N}_2\text{O}$  排放量估计为 0.79 Mt, 其中直接或间接从农田释放出来的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量占农业源  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的 80%<sup>[5]</sup>。同时, 相对于其他领域, 农业领域的固碳减排可行性更高。IPCC 第四次评估报告认为, 农业土壤最大可以起到 20% 的全球  $\text{CO}_2$  排放当量的减排份额。据估算, 全球农业减排潜力可达每年 55 亿~60 亿 t  $\text{CO}_2$  当量<sup>[6]</sup>。我国是一个农业大国, 而我国农田土壤有机碳含量普遍较低, 耕地平均有机碳含量低于世界平均值 30% 以上, 低于欧洲 50% 以上。因此, 我国农田生态系统具有巨大的减排空间。

尽管欧美国家关于稻田温室气体排放已有不少研究, 如德国关于稻田  $\text{CH}_4$  生成和氧化微生物的研究<sup>[7-8]</sup>, 美国关于稻田温室气体排放的模型计算等<sup>[9-10]</sup>, 但因为世界上绝大多数的稻田都集中在亚洲地区, 因此, 包括中国、日本和印度在内的水稻生产大国, 针对稻田温室气体排放规律和减排措施方面的研究比欧美国家更多, 其中以我国的研究最多。各国的研究结果表明, 淹水稻田会排放大量的  $\text{CH}_4$ , 而氮肥的大量施用也促进了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。我国是世界上最重要的水稻生产国, 水稻种植面积约 0.3 亿  $\text{hm}^2$ , 占世界水稻种植面积的 19%, 其中, 93% 为人工灌溉稻田, 5% 为雨水灌溉低洼稻田, 2% 为旱地稻田<sup>[11]</sup>。据世界粮农组织 (FAO) 1995 —

1997 年统计资料, 我国水稻氮肥用量占全球水稻氮肥总用量的 37%<sup>[12]</sup>。虽然单季水稻平均氮肥用量为  $180 \text{ kg/hm}^2$ , 与我国测土配方推荐的氮肥使用量相近, 但地域之间氮肥施用量差异很大, 如太湖流域氮肥施用量高达  $450 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[13]</sup>, 并且与主要产稻国相比, 我国水稻生产氮肥施用量较高而利用率较低<sup>[14]</sup>。由此可见, 我国在降低稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量方面具有更大的潜力。

确定合理的施肥量, 提高肥料利用率是减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量的有效手段。控制稻田土壤的水分条件是减少灌溉稻田  $\text{CH}_4$  排放量的常规措施。从 20 世纪 80 年代起, 为有效提高水稻产量和节约用水量, 水稻生长前期淹水、中期烤田和后期干湿交替的管理方法在我国获得推广,  $\text{CH}_4$  排放量得到了一定程度的削减<sup>[15]</sup>。但  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  具有相反的排放特性, 有利于减少  $\text{CH}_4$  排放的措施往往会增强  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 反之亦然<sup>[16]</sup>。因此, 如何同时减少  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量是实现稻田低碳生产的关键。另一方面, 据估算, 全球土壤碳固定能力能够达到农业温室气体减排潜力的 89%<sup>[17]</sup>, 而水田比旱田有更大的固碳能力<sup>[18]</sup>。由此可见, 如何增加稻田土壤有机质含量并使之稳定化, 同样是使稻田从温室气体源转变成汇的关键技术。

本文综述了水稻生产过程中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  产生的机理和特征(表 1), 指出到目前为止, 尽管国内外研究人员对稻田温室气体排放规律和影响因素进行了大量研究, 但由于不同地域的气候条件以及管理措施的差异造成研究结果间差异较大, 而且此类研究多为单因素研究, 鲜见有关水稻低碳生产的技术集成研究。基于目前的研究现状, 提出了今后稻田低碳生产的研究方向, 认为应该在统一的条件下对各种稻田减排技术进行比较和集成, 阐明各单项技术间的减排效果和集成时的耦合效果, 同时对技术集成后温室气体减排的长期效果进行评估, 提出对水稻生产消费全过程的温室气体排放量进行评价和开展减排方法学研究的重要性。

## 1 水稻生产过程中 $\text{CH}_4$ 排放和影响因素

$\text{CH}_4$  由极端厌氧环境的产  $\text{CH}_4$  古细菌产生, 而多数  $\text{CH}_4$  氧化菌则在好氧环境下氧化  $\text{CH}_4$ , 使之转化为  $\text{CO}_2$ <sup>[19]</sup>, 也有部分厌氧  $\text{CH}_4$  氧化菌可以在厌氧环境下和反硝化进行耦合来氧化  $\text{CH}_4$ <sup>[20]</sup>。稻田  $\text{CH}_4$  排放通量受稻田土壤类型和水分条件、肥料种

表 1 关于水稻生产过程中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的研究进展

Table 1. Progress in research on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions during rice production.

研究方向 Research direction	影响因素 Influence factor	关键词 Key word	参考文献 Reference
水稻生产过程中 CH <sub>4</sub> 排放和影响因素 CH <sub>4</sub> emission and influence factors during rice production	水分管理 Water management	水分管理;土壤氧化还原电位;持续淹水;烤田 Water management; soil redox potential; permanent flooding; drainage (soil drying in field)	[23-27]
	肥料种类和施用技术 Fertilizer type and application technique	有机肥;稻/麦秸秆;绿肥;化肥 Organic fertilizer; rice/wheat straw; green manure; chemical fertilizer	[25,28-30]
	耕作模式和制度 Farming mode and system	免耕;直播;冬季休闲;紫云英 Non-tillage; direct seeding; winter fallow; milk vetch	[31-34]
	水稻品种 Rice variety	干物质生产量;气体传输能力;根部分泌物 Dry matter production; gas transport capacity; root secretion	[35-41]
水稻生产过程中 N <sub>2</sub> O 排放和影响因素 N <sub>2</sub> O emission and influence factors during rice production	土壤水分 Soil moisture	硝化;反硝化;渗透速度;干湿交替 Nitrification; denitrification; infiltration velocity; dry-wet alternation	[16,43-46]
	肥料种类和施肥方式 Fertilizer type and application technique	有机肥;无机肥;复合肥;控/缓释肥;氮负荷;撒施;条施 Organic fertilizer; inorganic fertilizer; compound fertilizer; controlled/slow-release fertilizer; nitrogen loading rate; broadcast application; row application	[16,30,45, 47-49]
	硝化抑制剂 Nitrification inhibitor	氨态氮肥;氢醌;双氰胺;N-丁基硫代磷酰三胺 Ammonia nitrogen fertilizer; hydroquinone; dicyandiamide; N-(n-butyl) thiophosphorictriamide	[50-54]

类、耕作制度和模式、水稻品种等多种因素的影响。水稻生产过程中的 CH<sub>4</sub> 排放通量是稻田环境里 CH<sub>4</sub> 生成、氧化以及传输三个过程相互综合作用的结果<sup>[19, 21]</sup>。稻田 CH<sub>4</sub> 可通过三种途径排放:通过水稻植株通气组织的传输作用;通过稻田水面的扩散作用;通过冒泡形式。其中,水稻植株对 CH<sub>4</sub> 的传输作用是 CH<sub>4</sub> 排放的主要途径,可占本田生育期总排放量的 55%~73%,而通过水面的扩散作用的排放量很小,平均只有气泡排放的 10%左右<sup>[22]</sup>。CH<sub>4</sub> 在大气中的滞留时间相对较短,大约只有 N<sub>2</sub>O 的 1/10,因此,控制稻田 CH<sub>4</sub> 排放能够更快地从大气浓度上反映出来。这一特性在应对气候变化上具有重要的现实意义。影响水稻生产过程中 CH<sub>4</sub> 排放强度的主要因素可以归纳为以下几个方面。

1.1 水分管理

产 CH<sub>4</sub> 古细菌在极端厌氧环境中生成 CH<sub>4</sub>, 因此,与土壤氧化还原电位密切相关的土壤水分状况

是影响稻田 CH<sub>4</sub> 排放的最重要因素之一<sup>[23]</sup>,而不同的水分管理措施又直接导致水稻生长期土壤水分状况具有不同的变化规律。稻田排水烤田及较高的下渗速度都会促进氧气进入到土壤中,有利于提高土壤氧化还原电位,抑制 CH<sub>4</sub> 生成,提高 CH<sub>4</sub> 氧化能力。Yagi 等<sup>[24]</sup>的研究表明,水稻生长期的多次排水烤田能有效减少稻田 CH<sub>4</sub> 排放,与持续淹水稻田的 CH<sub>4</sub> 排放量相比平均可降低 45%。同样,Yan 等<sup>[25]</sup>的结果表明水稻生长期的单次排水和多次排水的 CH<sub>4</sub> 排放量是持续淹水稻田的 60%和 52%。稻田节水灌溉也会影响到 CH<sub>4</sub> 的排放,控制灌溉(维持田面 5~25 mm 薄水层)的平均 CH<sub>4</sub> 排放通量为 191 /mg (m<sup>2</sup> · d),比持续淹水稻田(维持 30~50 mm 田面水)减少了 39%<sup>[26]</sup>。在我国和日本等一些主要水稻生产国,水稻生长期间的水分管理主要采用前期淹水、中期排水烤田、后期干湿交替的间隙灌溉模式。这种水分管理方式不仅改善了持续淹水对

水稻根部的不良影响,控制了无效分蘖,而且大大降低了  $\text{CH}_4$  排放量。Li 等<sup>[27]</sup>利用 DNDC 模型(DeNitrification-DeComposition Model)计算的结果表明,间隙灌溉模式对于温暖地带、土壤黏土成分高和有机质含量低的稻田(如我国的四川、湖北、湖南、广东、广西、安徽、江苏等地),可能会有较好的控制温室气体排放效果,在我国华南地区  $\text{CH}_4$  排放量每年至少可以减少  $200 \text{ kg/hm}^2$ ,但同时也会促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。

## 1.2 肥料种类和施用技术

不同施肥方式对稻田  $\text{CH}_4$  排放影响较大,长期施用有机肥为土壤产生  $\text{CH}_4$  提供了更多的反应底物。施用有机肥的稻田释放的  $\text{CH}_4$  高于施用等氮量化肥的稻田,而不同的有机肥种类、用量和施用时期也导致不同的  $\text{CH}_4$  排放量。在水稻生长期间,仅施用化肥或不施肥的稻田土壤中  $\text{CH}_4$  产生率在水稻移栽后逐渐增加,并在收割前达到最大,而施用有机肥的稻田无论是早稻还是晚稻,土壤中  $\text{CH}_4$  产生率在水稻生长初期及末期均会出现最大值<sup>[28]</sup>。Wassmann 等<sup>[29]</sup>认为施用水稻秸秆的菲律宾稻田的  $\text{CH}_4$  排放量是施用等氮量尿素稻田的 34 倍,而施用绿肥长喙田菁(*Sesbania rostrata*)为等氮量尿素的 3 倍。秦晓波等<sup>[30]</sup>的研究结果表明,与施用等氮量化肥的稻田相比,施用猪粪的稻田  $\text{CH}_4$  排放通量升高了 2.3 倍,而施用水稻秸秆配施化肥的稻田也升高了 2.6 倍。Yan 等<sup>[25]</sup>模拟了不同秸秆施用时期对  $\text{CH}_4$  排放量的影响,发现在水稻移栽前施用水稻秸秆( $6 \text{ t/hm}^2$ )会使  $\text{CH}_4$  排放量增加 2.1 倍,但如果在上一个季节施用,则仅增加 0.8 倍。不同施肥方式决定  $\text{CH}_4$  排放总量的差异,而土壤有机碳、温度、水分管理和土壤 pH 等因素则影响排放通量的变化形式。尽管施用化肥所产生的  $\text{CH}_4$  排放量最少,但长期单施化肥可能会带来一些土壤环境问题,而施用有机肥可以增加土壤有机碳含量。

## 1.3 耕作模式和制度

不同的耕作模式会影响稻田土壤的有机质含量和容重等物理化学特性。免耕栽培因为不进行翻耕和耘田,所以透水性好,即使在水稻生长期淹水状态下耕作层也不会形成很强的还原状态,可以抑制  $\text{CH}_4$  的产生<sup>[31]</sup>。Ishibashi 等<sup>[32]</sup>在西日本的试验结果表明,当稻田渗透速率较小时,免耕直播模式的  $\text{CH}_4$  排放通量为翻耕移栽模式的  $47\% \sim 91\%$ ;当稻田渗透速率较大时,免耕直播模式的  $\text{CH}_4$  排放通量

只有翻耕移栽模式的 21%。而我国的湖北省稻田不同耕作模式试验结果也表明,免耕区的  $\text{CH}_4$  排放量比常规耕作区降低  $22\%$ <sup>[33]</sup>。湖南省的不同稻田耕作制度研究结果则表明,在冬季休闲和种植绿肥紫云英(*Astragalus sinicus* L.), $\text{CH}_4$  的排放均在早稻抽穗期出现排放高峰,其中的冬闲免耕实验区的最大  $\text{CH}_4$  排放通量只有紫云英实验区的约  $1/3$ ,以后随水稻生长发育  $\text{CH}_4$  排放呈递减趋势;但紫云英稻田早稻生物产量普遍高于冬闲稻田的早稻生物量<sup>[34]</sup>。

## 1.4 水稻品种

在水稻生长过程中,大部分  $\text{CH}_4$  是通过水稻植株排放到大气中的。水稻植株的通气组织发达, $\text{CH}_4$  通过水稻根系进入植株后通过茎叶传输排放出去;同时水稻植株也能将大气中的氧气以及光合作用产生的氧气传输到根系,以维持根系组织的呼吸,同时也影响根际  $\text{CH}_4$  氧化菌的活性。另一方面,水稻的光合作用产物也可以通过根系释放到根际,成为产  $\text{CH}_4$  古细菌的重要底物,从而促进  $\text{CH}_4$  的产生<sup>[35-36]</sup>。不同的水稻品种具有不同的生物学和形态学特性,会影响到  $\text{CH}_4$  的产生量、根际再氧化能力和传输能力。一些研究表明地上干物质生产量和  $\text{CH}_4$  排放通量呈正相关<sup>[36-37]</sup>。但王增远等<sup>[38]</sup>的研究结果表明水稻根系的大小才是导致水稻品种间  $\text{CH}_4$  排放量差异的主要原因。根量大的水稻品种, $\text{CH}_4$  排放通量高,稻田气泡形式排放的  $\text{CH}_4$  强度大;Das 等<sup>[39]</sup>也评价了印度 10 个水稻品种的  $\text{CH}_4$  排放通量,他们发现不同水稻品种的解剖学和形态学特征会直接影响到  $\text{CH}_4$  的排放,不同水稻品种间  $\text{CH}_4$  排放通量差异很大, $\text{CH}_4$  排放通量较高的品种具有较大的茎髓腔组织、较大的叶面积、较高的蒸腾速率以及气孔密度大等特征,因此从温室气体减排的角度来看,有必要培育气体传输能力低和根分泌物少的水稻品种<sup>[40]</sup>。另外,Nayak 等<sup>[41]</sup>的研究结果表明,水稻的移栽时间和苗龄也会影响到  $\text{CH}_4$  的排放,移栽时间迟及苗龄长也会减少  $\text{CH}_4$  的排放。

## 2 水稻生产过程中 $\text{N}_2\text{O}$ 排放和影响因素

稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的产生及其削减与微生物氮素循环过程密切相关。硝化过程产生  $\text{N}_2\text{O}$ ,如羟胺是氨被氧化过程中的中间产物,而羟胺被氧化过程中作为副产物生成了  $\text{N}_2\text{O}$ ,氨氧化细菌和氨氧化古细菌都能产生  $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[42]</sup>;另外, $\text{N}_2\text{O}$  也出现在反硝化过程

中,是反硝化过程的中间产物。因为硝化和反硝化过程均能产生和释放  $\text{N}_2\text{O}$ ,而这两个微生物反应过程在不同土壤环境下具有不同的特性,使  $\text{N}_2\text{O}$  的排放规律在各种因素影响下显得更加复杂。

## 2.1 土壤水分

我国的稻田大多采取水旱轮作以及水稻生长前期淹水、中期烤田、后期干湿交替、末期排干的水分管理方式。稻田复杂的土壤水分变化状况影响到土壤氧化还原电位、微生物活性,从而进一步影响氮素在稻田土壤中的动态变化。Zhou 等<sup>[43]</sup>利用氮素稳定同位素作为示踪剂评价施用畜产液肥后稻田土壤在不同水分管理条件下的硝化和反硝化动态,发现在低渗透持续淹水的情况下,反硝化速率增长潜力大于高渗透干湿交替土壤,但高渗透干湿交替土壤促进了硝化反应,为反硝化反应提供了更多的反应底物硝态氮,使之可以在厌氧的土壤团粒中进行反硝化反应。通过分析密封采样箱顶空气中氮气同位素比的变化,发现高渗透干湿交替土壤的最大反硝化速率可达到  $1035 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,比低渗透持续淹水稻田土壤高 3 倍左右。因为硝化和反硝化反应速率直接决定了稻田土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  的产生、消耗和释放率,因此,在稻田水分变化剧烈的干湿交替阶段,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放要大于持续淹水时期,在中期烤田和末期排干措施造成的土壤水分变化也会促进  $\text{N}_2\text{O}$  的大量生成和排放<sup>[16, 44-46]</sup>。

## 2.2 肥料种类和施肥方式

$\text{N}_2\text{O}$  的排放量与施用于土壤的有机和无机氮肥的种类以及施用量有关。秦晓波等<sup>[30]</sup>在有机肥配施化肥、单施化肥、不同有机肥、不施肥的对比试验中发现,早稻田化肥处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量大于施用有机肥的处理,而晚稻田使用有机肥处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量却大于化肥处理。这可能是因为早稻期间,化肥处理更适合硝化反硝化反应,氮素随水稻生育期逐步分解,导致  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量较高;而晚稻生育期间平均气温较高,有机肥在高温下彻底分解,微生物活性比单施化肥强,导致  $\text{N}_2\text{O}$  升高。

在田间持水量为 70% 和 90% 的条件下,施用铵态氮肥土壤的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量是硝态氮肥的 3 倍左右;但因为高水分处理时更利于反硝化作用的进行,所以施用硝态氮肥土壤的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量更大<sup>[47]</sup>。而在控释肥料和常规肥料的对比试验中,包膜型控释肥比未包膜复合肥能显著地降低稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量,复合肥处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放主要集中在施肥后 1~

25 d 和中期烤田期间,而控释肥在此时期的排放量显著降低<sup>[48]</sup>,这是因为控释肥料在水稻生长前期能缓慢释放养分,降低了土壤溶液中硝态氮浓度,因而显著降低了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。土壤中氮素浓度是直接影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的重要因子,施用的氮肥负荷越大,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量也就越大<sup>[16, 45]</sup>。

施肥方式的不同可使氮肥处于不同的环境条件下,包括土壤水分条件、氧气供应速率、微生物菌群等对氮素动态影响很大,因此,也是控制  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的重要手段之一。李鑫等<sup>[49]</sup>比较了撒施后翻耕、条施后覆土、撒施后灌水三种施肥方式对氨挥发和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响,发现撒施后灌水方式最易造成氮肥的气态损失,其中,氨挥发造成的氮损失是对照区的 1.4 倍,而  $\text{N}_2\text{O}$  是对照区的 5.2 倍;条施后覆土的氨挥发损失量最小,而撒施后翻耕方式的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量最小。

## 2.3 硝化抑制剂

当施用尿素或铵态氮肥时,硝化过程是产生  $\text{N}_2\text{O}$  的重要步骤,而且铵态氮被硝化成硝酸盐离子后,容易通过反硝化或淋溶造成氮素损失。因此,使用硝化抑制剂抑制硝化过程,可以使土壤中的氮肥能够较长时间以铵态氮形式存在,提高植物氮吸收率,减少硝酸盐积累。硝化抑制剂是一类能够抑制土壤中亚硝化细菌等微生物活性的有机或无机化合物的总称。在施用尿素时通常将脲酶抑制剂和硝化抑制剂同时添加而获得更好的抑制效果,氢醌(hydroquinone, HQ)和双氰胺(dicyandiamide, DCD)是近年来稻田系统应用较多的组合。而稻田在水稻生长期的中期烤田、后期干湿交替以及麦季的土壤水分含量较低情况下,有利于硝化反应的进行,因此  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量比较大,此时使用硝化抑制剂对  $\text{N}_2\text{O}$  的抑制效果比较好。Majumdar 等<sup>[50-51]</sup>发现将 DCD 和尿素混施,与不施用 DCD 相比,在稻季可以减少 18%,在麦季可以减少 49% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量。李香兰等<sup>[52]</sup>总结了 HQ/DCD 组合影响稻麦轮作系统的研究结果,发现在稻田水稻生长期施用 HQ/DCD 组合能比对照区减少 4%~26% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量,而在稻田麦季则能降低 6%~49%。当将另一种脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺[N-(n-butyl) thiophosphoric triamide, NBPT]、DCD、NBPT/DCD 分别和尿素混施时,与单施尿素相比,分别可以降低 37.7%、39.0%、46.8% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量<sup>[53]</sup>。添加硝化抑制剂不仅对常规耕作方式有降低综合温室效应

的效果,对免耕方式也能较好地降低温室气体排放量<sup>[54]</sup>。

### 3 稻田土壤碳素动态和固碳能力

土壤有机碳是大气和陆地生态系统地上部碳储量的 2.0~2.5 倍,土壤有机碳的动态直接影响到全球环境气候变化。据估算,土壤碳固定可以占到农业领域温室气体减排潜力的 89%<sup>[4]</sup>。稻田是亚洲季风性气候区域的主要农业生产基地,是生产能力高、土壤质量相对较好的农业资源。水稻土碳储量以有机碳为主,占水稻土碳总储量的 95%左右,并且水稻土碳密度具有高度的空间变异性,水稻土剖面 0~100 cm 有机碳密度介于 0.53~446.20 kg/m<sup>2</sup>,表面 0~20 cm 有机碳密度介于 0.17~55.38 kg/m<sup>2</sup><sup>[55]</sup>。与旱地相比,稻田土壤的有机碳含量较高,固碳潜力更大。据江苏省第二次土壤普查,江苏省旱地土壤平均有机碳含量为 6 g/kg,而稻田则达 12 g/kg;湖南省的旱地土壤与水田土壤的平均有机碳含量分别为 10.22 g/kg 和 18.36 g/kg,水田土壤有机碳均显著高于旱地土壤<sup>[56]</sup>。

稻田土壤的有机碳含量比旱地高,其土壤有机碳的稳定和累积作用也受施肥方式、耕作制度和模式等生产方式影响而呈现不同的变化趋势。王立刚等<sup>[57]</sup>利用 DNDC 模型对不同施肥处理下土壤有机碳含量的变化进行了实验模拟,发现不施肥和单施氮肥或者磷肥的处理,土壤有机碳含量都呈下降趋势,而氮肥与磷肥配施土壤有机碳含量呈上升趋势;秸秆还田和免耕也能持续有效增加土壤有机碳含量。吴小丹等<sup>[58]</sup>对长期不同施肥模式下水稻土活性有机质含量变化进行了调查,发现连续种植 25 年水稻后,不施肥处理土壤中的总活性有机质含量低于试前土壤;而施用无机 NK 肥和 NPK 肥的处理中土壤活性有机质均有所增加,并且 NPK 肥处理的增幅较大;有机肥配施无机肥的处理中土壤活性有机质明显增加。吴晓晨等<sup>[59]</sup>研究了红壤荒地垦殖为稻田,长期定位施肥 15 年后不同施肥措施下水稻土的有机碳特征,结果表明将荒地开垦为稻田后,表层 0~15 cm 土壤有机碳含量在 8.19~10.13 g/kg,与实验开始前相比,无肥对照、NP、NPK、NPK+秸秆等各种不同施肥措施的土壤有机碳含量均有所增加,其中 NPK+秸秆等处理最高,无肥区最低;但 15~30 cm 的有机碳含量为 3.92~4.92 g/kg,不同施肥处理间差异不显著,并且与实验开始前相

比几乎没有变化。

少耕免耕等保护性耕作方式可以减少土壤有机碳的损失,与秸秆还田等技术结合起来,可以有效增加稻田土壤有机碳的含量。王成己等<sup>[60]</sup>收集整理了 1979—2008 年有关我国保护性耕作的长期试验结果,发现保护性耕作处理下,旱地和水田表土有机碳年变化分别介于-0.30~0.75 g/kg 和-0.20~2.71 g/kg,平均增幅分别达 0.21 g/kg 和 0.51 g/kg。可见长期保护性耕作下,农田表土有机碳含量总体呈上升趋势,水田的增长高于旱地,与少免耕相比,秸秆还田更有利于促进表土有机碳的积累。马玉芳等<sup>[61]</sup>应用 DNDC 模型模拟了不同耕作措施下土壤有机碳含量,也发现免耕覆盖秸秆和传统耕作+秸秆还田能够较大幅度地提高土壤有机碳含量;免耕处理下土壤有机碳也增加了 39%,但传统耕作不覆盖处理下土壤有机碳则呈下降趋势。但如果将新鲜秸秆直接还田,有机质的迅速分解转化会促进 CH<sub>4</sub> 大量排放。先将秸秆等农业废弃物进行热裂解转换成生物质碳后再施用于稻田,生物质碳中含有芳香族结构能使碳长期被固定在土壤中<sup>[62]</sup>,所以此方法不仅能增加稻田土壤的碳储量<sup>[63]</sup>,而且还能提高作物产量、降低 N<sub>2</sub>O 的排放量<sup>[64-65]</sup>。

### 4 温室气体减排措施与全球增温潜势

CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的生成机制不同,CH<sub>4</sub> 的生成是产 CH<sub>4</sub> 古细菌在极端厌氧环境中利用产酸细菌分解有机物所获的产物完成的,一系列的反应途径涉及到的微生物种类繁多,同时还受土壤环境中易分解有机物浓度、氧化还原电位、酸碱度等因素的影响;而 N<sub>2</sub>O 既可以在好氧环境下由硝化反应产生,也可以在厌氧环境下由反硝化反应产生,而且在不同氮浓度和环境中,各反应过程产生的 N<sub>2</sub>O 比例也不同,因此,稻田的水分管理等减排措施有时会使这两种温室气体出现此消彼长的现象,而且,这两种温室气体在不同时间尺度下全球增温潜势是不同的。CH<sub>4</sub> 在大气中的滞留时间只有 N<sub>2</sub>O 的约 1/10,并且随着时间尺度的增加,N<sub>2</sub>O 对全球增温潜势的贡献率也会增加,所以对稻田温室气体减排措施进行评价时,需要注重二者排放强度的协调,才能从全球增温潜势的角度综合评价稻田减排效果。

根据水稻生长过程中影响 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 生成的因素,目前针对 CH<sub>4</sub> 采取的主要减排措施有水分管理、化肥和有机肥配施等;针对 N<sub>2</sub>O 采取的主要减



排措施有减少氮肥施用量、水分管理及添加硝化抑制剂等。Yan 等<sup>[66]</sup>研究表明,对稻田采取排水烤田措施和改变秸秆还田时间,可使每年全球稻田  $\text{CH}_4$  排放量减少  $7.6 \times 10^6 \text{ t}$ ,同时造成的  $\text{N}_2\text{O}$  增量与  $\text{CH}_4$  排放量相比可忽略不计;但很多研究也表明当稻田氮肥用量较大或土壤氮浓度较高时,水分含量的变化会很大程度地促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[16, 67-68]</sup>。我国稻田的氮肥施用量显著高于世界平均水平,尤其是长江下游地区可高达  $300 \text{ kg/hm}^2$  (以纯氮计),如果排水烤田时期不合适,反而会大大增加  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,从而在一定程度上抵消因烤田所获得的  $\text{CH}_4$  减排效益。根据石生伟等<sup>[67]</sup>整理的数据可以发现,在稻田低氮 ( $120 \text{ kg/hm}^2$ ) 投入条件下,相对于持续淹水灌溉稻田排放的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  全球增温潜势 ( $8200 \text{ kg/hm}^2$ , 100 年),前期淹水-中间烤田-淹水模式、前期淹水-中间烤田-复水-间隙灌溉模式,以及干湿交替灌溉模式的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  全球增温潜势分别为  $3881$ 、 $3210$ 、 $2027 \text{ kg/hm}^2$ ,分别比持续淹水灌溉降低了  $53\%$ 、 $61\%$ 、 $75\%$ ,但其中  $\text{N}_2\text{O}$  占全球增温潜势的比重却从  $7\%$  增加到最高的  $64\%$ 。而在高氮投入 ( $240 \text{ kg/hm}^2$ , 以纯氮计) 条件下,这三种模式相对于持续淹水灌溉稻田的全球增温潜势 ( $6645 \text{ kg/hm}^2$ ) 分别降低了  $50\%$ 、 $54\%$ 、 $52\%$ ,但  $\text{N}_2\text{O}$  占全球增温潜势的比重最高可达到  $82\%$ 。Zou 等<sup>[69]</sup>在前期淹水-中间烤田-复水-间隙灌溉模式下对污水灌溉的温室气体排放作了调查, $\text{N}_2\text{O}$  占这两种温室气体全球增温潜势 ( $2500 \text{ kg/hm}^2$ ) 的  $42\%$ 。因此,在控制  $\text{CH}_4$  排放量的同时,为进一步减小稻田生产过程中释放温室气体所造成的全球增温潜势,需要对  $\text{N}_2\text{O}$  的产生和排放机理进行更加深入的研究,开发同时减少  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的方法。

Ahmad 等<sup>[33]</sup>研究了持续淹水灌溉和施用复合肥条件下免耕的减排效果,发现与施用复合肥常规耕作实验区的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  全球增温潜势 ( $18\ 162 \text{ kg/hm}^2$ ) 相比,施用复合肥免耕可以减少  $17\%$ 。Shang 等<sup>[70]</sup>研究了双季稻稻田中不同施肥模式下的温室气体排放。在早稻持续淹水和晚稻有  $1\sim 2$  次排水烤田的前提下,无论早稻还是晚稻,与无肥对照区的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  全球增温潜势相比 (早稻  $4499 \text{ kg/hm}^2$ ; 晚稻  $11\ 058 \text{ kg/hm}^2$ ),施用 NPK 肥和无机有机混合肥实验区均大幅增加,并且所有施肥模式下晚稻的温室气体全球增温潜势都大约是早稻的  $2$  倍;其中  $\text{N}_2\text{O}$  所占全球增温潜势的比重均为  $1\%$

左右。另外,因为使用 NPK 肥和无机有机混合肥大幅增加了水稻产量,早稻单位产量所释放的温室气体全球增温潜势要低于无肥对照区,施用 NPK 肥的晚稻也有类似趋势,例外的是无机有机混合肥晚稻期间的  $\text{CH}_4$  排放量大幅增加,所以单位生产量所释放的温室气体全球增温潜势要高于无肥对照区。Bhatia 等<sup>[71]</sup>研究则表明,尽管增加灌溉和氮肥用量会加剧稻田温室气体全球增温潜势,但也增加了水稻产量,从而提高了碳效率指数 (carbon efficiency ratio, CER)。因此,今后利用碳效率指数或单位产量的全球增温潜势对稻田生产过程中的温室气体排放进行评价,在一定程度上可以兼顾农业生产发展和全球气候变化这两个主题的要求。

## 5 研究展望

到目前为止,国内外研究人员关于稻田温室气体排放进行了大量的研究,基本掌握了不同地域稻田在不同水分管理、施肥方式、耕作制度等条件下的温室气体排放规律,但大多数研究是关于温室气体排放规律的调查研究。为了最大限度地减少水稻生产过程中温室气体的排放量以及更好地评价各项减排措施,需要更加深入地了解  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  在稻田生态系统水-土-植物间的产生、消耗和传输机制。如不同稻田土壤条件下微生物菌群的变化及所起的作用;好氧和厌氧条件下  $\text{CH}_4$  氧化能力及限制因子;稻田排水后突发性  $\text{N}_2\text{O}$  排放的内在物理、化学和微生物学机制;如何对水稻生产全过程的碳氮物质收支平衡进行综合评价等。

另一方面,尽管关于稻田温室气体排放量及减排效果有了不少研究,但大多是基于单项技术应用条件下的结果,而且多在土壤条件、水稻品种、区域气候特征不同的条件下进行,因此,获得的数据间的可比性差,如前述稻田的温室气体全球增温潜势的各个研究结果,在研究中和对照实验相比可以评价单项技术的有效性,但不同研究之间的结果差异很大,当将各项技术的减排效果进行横向比较时,很难说清楚是地域不同造成的差异还是各技术减排效果本身的差异,因此,需要在相对统一条件下对各种稻田减排单项技术进行实验比较和集成,找出具有最佳稻田温室气体减排效果的技术组合。如开展同时减排  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的稻田水肥管理措施,包括在不影响水稻生长发育的前提下,根据稻田水土的铵态氮和硝态氮浓度判断是否进行灌溉和排水烤田;在施

用尿素或氨肥时添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂;利用发酵过的有机肥或生物质碳替代新鲜有机肥或绿肥;开发高产低排水稻品种并评价其在不同管理模式下的减排效果。因为稻田生态系统在不同的施肥灌溉条件、耕作制度和栽培模式下变化缓慢,因此,有必要对各种技术体系进行长期、系统的研究调查;并且面向自愿减排碳交易市场,开展有利于今后大规模推广的水稻生产过程温室气体减排方法学的研究。

另外需要补充的是,除了水稻生产过程中释放的温室气体外,水稻生产所需的农药、化肥、农机燃料的生产和消耗也释放温室气体;稻米收获后的加工、包装和运输贩卖同样也释放温室气体;加工后剩下的秸秆和谷壳的处理方式不同也会释放出差异很大的温室气体,因此有必要改善稻田秸秆和谷壳的综合利用方法来降低稻田生产过程的温室气体排放量,并用生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法对稻田生产、精米加工和运输贩卖过程进行评价。通过对不同方式生产的稻米所涉及的温室气体排放量进行评价,确立最佳水稻生产消费模式,并进行推广,从而降低水稻生产消费全过程的温室气体排放量,实现低碳农业的目标。

综上所述,基于以往的研究,针对水稻低碳生产可以提出以下几点主要应对措施:1)通过优化水分管理、肥料配方、施肥技术和耕作模式来降低  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放,同时增加稻田土壤固碳能力;2)开发低排放高产量的水稻品种;3)开发低成本硝化抑制剂来降低  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量;4)建立资源循环型水稻生产体系来降低整个系统的温室气体排放量。

## 参考文献:

- [1] Dalal R C, Allen D E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Aust J Bot*, 2008, 56:369-407.
- [2] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 2009, 326:123-125.
- [4] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Agriculture // Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate Change 2007: Mitigation. Cambridge and NY, Cambridge University Press; 2007,

- 497-540.
- [5] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报. 北京:中国计划出版社,2004: 15-20.
- [6] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agr Ecosyst Environ*, 2007, 118: 6-28.
- [7] Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Adv Agron*, 2007, 96:1-63.
- [8] Lu Y H, Lueders T, Friedrich M W, et al. Detecting active methanogenic populations on rice roots using stable isotope probing. *Environ Microbiol*, 2005, 7: 326-336.
- [9] Li C S, Qiu J J, Frolking S, et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980-2000. *Geophys Res Lett*, 2002, 29.
- [10] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling. *Global Biogeochem Cy*, 2004, 18: GB1043.
- [11] Frolking S, Qiu J J, Boles S, et al. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. *Global Biogeochem Cy*, 2002: 16.
- [12] FAO. Statistical databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.
- [13] 邓美华, 谢迎新, 熊正琴, 等. 长江三角洲氮收支的估算及其环境影响. *环境科学学报*, 2007, 27:1709-1716.
- [14] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. *中国农业科学*, 2002, 35:1095-1103.
- [15] 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放. *第四纪研究*, 2003, 23:493-503.
- [16] Riya S, Zhou S, Watanabe Y, et al.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from different varieties of forage rice (*Oryza sativa* L.) treating liquid cattle waste. *Sci Total Environ*, 2012, 419:178-186.
- [17] Minamikawa K, Yagi K, Nishimura S. Agriculture and global warming: Their interaction and other problems of sustainability. *J Dev Sustain Agric*, 2009, 4:79-81.
- [18] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力. *农村生态环境*, 2005, 21:6-11.
- [19] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Euro J Soil Biol*, 2001, 37:25-50.
- [20] Murase J, Kimura M. Methane production and its fate in paddy fields: 6. Anaerobic oxidation of methane in plow layer soil. *Soil Sci Plant Nutr*, 1994, 40:505-514.
- [21] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放、产生、转化、输送机理. *大气科学*, 1998, 22:600-612.
- [22] 上官行健, 王明星, 陈德章, 等. 稻田  $\text{CH}_4$  的传输. *地球科学进展*, 1993, 8:13-22.
- [23] 李香兰, 徐华, 李小平, 等. 水分管理影响稻田甲烷排放研究进展. *农业环境科学学报*, 2009, 28:221-227.
- [24] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K, et al. Effect of water manage-



- ment on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochem Cy*, 1996, 10: 255-267.
- [25] Yan X Y, Yagi K, Akiyama H, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biol*, 2005, 11:1131-1141.
- [26] 彭世彰, 李道西, 缴锡云, 等. 节水灌溉模式下稻田甲烷排放的季节变化. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2006, 32: 546-50.
- [27] Li C S, Frolking S, Xiao X M, et al. Modeling impacts of farming management alternatives on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biogeochem Cy*, 2005: 19.
- [28] 上官行健, 王明星, Wassmann R, 等. 稻田土壤中甲烷的产生. 地球科学进展, 1993, 8(5):23-35.
- [29] Wassmann R, Buendia L V, Lantin R S, et al. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Banos, Philippines. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2000, 58:107-119.
- [30] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 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, 22:143-148.
- [31] Ishibashi E, Yamamoto S, Akai N, et al. The influence of no-till direct seeding cultivation on methane emissions from rice paddy fields in Okayama, Western Japan. *Jpn J Soil Sci Plant Nutr*, 2005, 76: 629-639.
- [32] Ishibashi E, Akai N, Ohya M, et al. The influence of no-tilled direct seeding cultivation on methane emission from three rice paddy fields in Okayama, western Japan: II. The relationship between the continuation of no-tilled cultivation and methane emission. *Jpn J Soil Sci Plant Nutr*, 2001, 72: 542-549.
- [33] Ahmad S, Li C, Dai G, et al. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China. *Soil Till Res*, 2009, 106: 54-61.
- [34] 胡立峰, 李琳, 陈阜, 等. 不同耕作制度对南方稻田甲烷排放的影响. 生态环境, 2006, 15:1216-9.
- [35] Kimura M, Murase J, Lu Y H. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation of organic materials and the fates of their end products (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>). *Soil Biol Biochem*, 2004, 36:1399-416.
- [36] Neue H U. Methane emission from rice fields. *Bioscience*, 1993, 43:466-474.
- [37] Wang B, Neue H U, Samonte H P. Effect of cultivar difference (IR72, IR65598 and Dular) on methane emission. *Agr Ecosys Environ*, 1997, 62: 31-40.
- [38] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响. 作物学报, 1999, 25: 441-446.
- [39] Das K, Baruah K K. Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant. *Physiol Plantarum*, 2008, 134: 303-312.
- [40] Majumdar D. Methane and nitrous oxide emission from irrigated rice fields: Proposed mitigation strategies. *Curr Sci*, 2003, 84: 1317-1326.
- [41] Nayak D R, Adhya T K, Babu Y J, et al. Methane emission from a flooded field of eastern India as influenced by planting date and age of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Agr Ecosyst Environ*, 2006, 115: 79-87.
- [42] Ishii S, Ikeda S, Minamisawa K, et al. Nitrogen cycling in rice paddy environments: Past achievements and future challenges. *Micro Environ*, 2011, 26: 282-292.
- [43] Zhou S, Sakiyama Y, Riya S, et al. Assessing nitrification and denitrification in a paddy soil with different water dynamics and applied liquid cattle waste using the <sup>15</sup>N isotopic technique. *Sci Total Environ*, 2012, 430: 93-100.
- [44] Zhou S, Iino H, Riya S, et al. Nitrogen transformations in paddy fields treated with high loads of liquid cattle waste. *J Chem Eng Jpn*, 2011, 44: 713-719.
- [45] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. *Plant Soil*, 1997, 196: 7-14.
- [46] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. 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 Biogeochem Cy*, 2005: 19.
- [47] 梁东丽, 方日尧, 李生秀, 等. 硝、铵态氮肥对旱地土壤氧化亚氮排放的影响. 干旱地区农业研究, 2007, 25: 67-72.
- [48] 李方敏, 樊小林, 刘芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响. 应用生态学报, 2004, 15: 2170-2174.
- [49] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响. 应用生态学报, 2008, 19: 99-104.
- [50] Majumdar D, Kumar S, Pathak H, et al. Reducing nitrous oxide emission from an irrigated rice field of North India with nitrification inhibitors. *Agr Ecosyst Environ*, 2000, 81:163-9.
- [51] Majumdar D, Pathak H, Kumar S, et al. Nitrous oxide emission from a sandy loam Inceptisol under irrigated wheat in India as influenced by different nitrification inhibitors. *Agr Ecosyst Environ*, 2002, 91:283-293.
- [52] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双脲胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展. 土壤学报, 2009, 46:917-924.
- [53] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain. *Biol Fert Soil*, 2011, 47:91-99.
- [54] Bhatia A, Sasmal S, Jain N, et al. Mitigating nitrous oxide emission from soil under conventional and no-tillage in wheat using nitrification inhibitors. *Agr Ecosyst Environ*, 2010, 136:247-253.
- [55] 刘庆花, 史学正, 于东升, 等. 中国水稻土有机和无机碳的空间分布特征. 生态环境, 2006, 15:659-664.
- [56] 许信旺, 潘根兴. 中国水稻土碳循环研究进展. 生态环境, 2005, 14:961-966.
- [57] 王立刚, 邱建军, 马永良, 等. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响. 中国农业大学学报,

- 2004, 9:15-19.
- [58] 吴小丹, 蔡立湘, 鲁艳红, 等. 长期不同施肥制度对红壤性水稻土活性有机质及碳库管理指数的影响. *中国农学通报*, 2008, 24:283-288.
- [59] 吴晓晨, 李忠佩, 张桃林. 长期不同施肥措施对红壤水稻土有机碳和养分含量的影响. *生态环境*, 2008, 17:2019-2023.
- [60] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析—基于中国农业生态系统长期试验资料. *农业环境科学学报*, 2009, 28:2464-2475.
- [61] 马玉芳, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下土壤有机碳含量的模拟研究. *自然资源学报*, 2011, 26:1546-1554.
- [62] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps NA. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant Soil*, 2010, 337:1-18.
- [63] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crop Res*, 2011, 121:430-440.
- [64] Liu X Y, Qu J J, Li L Q, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N<sub>2</sub>O emission in rice paddies? A cross site field experiment from South China. *Ecol Eng*, 2012, 42:168-173.
- [65] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crop Res*, 2012, 127:153-160.
- [66] Yan X, Akiyama H, Yagi K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeocheml Cy*, 2009, 23:1-15.
- [67] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 中国稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及减排整合分析. *中国农业科学*, 2010, 43:2923-2936.
- [68] Zou J, Liu S, Qin Y, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China. *Agr Ecosyst Environ*, 2009, 129:516-522.
- [69] Zou J W, Liu S W, Qin Y M, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China. *Agr Ecosyst Environ*, 2009, 129:516-522.
- [70] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments. *Global Change Biol*, 2011, 17:2196-2210.
- [71] Bhatia A, Pathak H, Aggarwal P K, et al. Trade-off between productivity enhancement and global warming potential of rice and wheat in India. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2010, 86:413-424.