

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171155

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

JIANG Y, GUAN D H, ZHANG W J. The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 175-181

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*

江瑜^{1,2}, 管大海³, 张卫建^{1**}

(1. 中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态重点实验室 北京 100081; 2. Department of Geography, College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 4 RJ, UK; 3. 农业部农业生态与资源保护总站 北京 100125)

摘要: 水稻是我国最主要的口粮作物, 稻田是重要温室气体甲烷的主要排放源之一。水稻植株特性既是水稻产量形成的关键因子, 也是稻田甲烷排放的主要影响因子。但是, 至今关于水稻植株对稻田甲烷排放的调控效应及其机制仍存在许多不一致的认识。为此, 本文从形态特征、生理生态特征、植株-环境互作等方面, 对现有的相关研究进行了综合论述。水稻地上部形态特征如分蘖数、株高、叶面积等对稻田甲烷排放的影响的研究结果不尽相同, 起关键作用的是地下系统。优化光合产物分配在持续淹水的情况下可以减少稻田甲烷排放。提高水稻生物量在低碳土壤增加稻田甲烷排放, 但在高碳土壤降低甲烷排放。本文还明确了相关研究现状和存在的问题。在此基础上, 作者认为未来应加强水稻根系形态及其生理特征, 以及水稻植株-土壤环境(尤其是水分管理和养分管理)互作对稻田甲烷产生、氧化和排放影响的研究, 在方法上应加强微区试验和大田试验的结合, 并开展植株和稻田的碳氮互作效应及其机制研究, 为高产低碳排放的水稻品种选育和低碳稻作模式创新提供理论参考和技术指导。

关键词: 温室气体排放; 甲烷; 稻田; 水稻植株特性; 植株-环境互作; 碳排放; 粮食安全

中图分类号: X511; S318 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)02-0175-07

The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: A review*

JIANG Yu^{1,2}, GUAN Dahai³, ZHANG Weijian^{1**}

(1. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Department of Geography, College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 4 RJ, UK; 3. General Station for Agricultural Ecology and Resources Protection, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China)

Abstract: Rice is the most important staple food in China and rice paddies constitute a major source of methane (CH₄) emission. Rice plant traits not only play an important role in rice yield, but also significantly affect CH₄ emission from paddy fields. However, there have been wide gaps in the understanding of the effects of rice plant traits on CH₄ emissions from paddy fields.

* 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFD0300903)资助

** 通信作者: 张卫建, 主要研究方向为耕作制度与农田生态。E-mail: zhangweijian@caas.cn

江瑜, 主要研究方向为农田生态。E-mail: jiangyu198610@163.com

收稿日期: 2017-12-05 接受日期: 2017-12-12

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300903).

** Corresponding author, E-mail: zhangweijian@caas.cn

Received Dec. 5, 2017; accepted Dec. 12, 2017

Thus research status and progress on the impact of rice plant on CH₄ emissions were reviewed in terms of plant morphological and physiological characteristics (especially photosynthetic characteristics), plant-environment interactions, etc. The effects of aboveground plant traits (e.g. tiller, plant height and leaf area) on CH₄ emissions from paddy fields have remained inconclusive. The belowground system plays a key role in CH₄ emission. Optimizing photosynthate allocation can reduce CH₄ emission in continuously flooded paddy fields. High biomass rice plants can increase CH₄ emission in low C paddy soils, but reduce CH₄ emission in high C paddy soils. Based on the summary of the effects and the underlying mechanisms reported in existing studies, further efforts were needed, such as assessment of the effects of root morphological and physiological characteristics and plant-environment interactions on CH₄ production, oxidation and emission. There was also the need to pay more attention on the underlying mechanisms that combines microcosmic and field experiments and other new research methods. Meanwhile, the interaction and underlying mechanisms of carbon and nitrogen in plant-soil systems needed further exploration in future studies. A good understanding of the impact of rice plants on CH₄ emissions can provide the theoretical basis for rice cultivar breeding and innovative rice cropping with less greenhouse gas emissions and high yields.

Keywords: Greenhouse gas emission; Methane; Paddy field; Rice plant traits; Plant-environment interaction; Carbon emission; Food security

1 前言

稻田是温室气体——甲烷(CH₄)的主要排放源之一,其排放量约占人为甲烷排放总量的 11%^[1]。而甲烷是继二氧化碳(CO₂)之后第二大温室气体,其增温潜势是 CO₂ 的 25 倍,对全球温室效应的贡献率约为 20%^[2-3]。我国稻田的甲烷排放量比重最大,约占全球稻田甲烷排放量的 29.2%^[4]。稻田甲烷的减排已经纳入我国政府的减排总目标,在未来的全球气候谈判和碳减排的承诺上,稻田减排的压力将与日俱增。水稻(*Oryza sativa*)是全球最主要的口粮作物,世界 50%以上的人口以稻米为主食。预计到 2050 年,全球水稻产量仍需提高 30%左右才能满足未来人口增长和经济发展对稻米的需求^[5]。我国作为世界水稻主产国之一,种植面积约占世界总种植面积的 20%,产量约占全球总水稻产量的 29%。而且 65%的中国人以大米为主食,据预测到 2030 年我国水稻需求量将增加 20%^[6]。为了确保“口粮绝对安全”,水稻单产的持续稳定增长至关重要。可见,在确保水稻丰产的同时,能否实现稻田甲烷减排是现代水稻生产面临的新挑战。

水稻植株特性既是影响水稻产量的关键因子,又是影响稻田甲烷排放的关键因子。众所周知,稻田甲烷的排放是甲烷产生、氧化以及传输共同作用的结果^[7-9]。水稻植株可以通过影响甲烷产生、氧化以及传输 3 个过程,实现对甲烷排放影响。首先,水稻植株以根系分泌物和凋落物的形式为甲烷产生菌提供底物^[10-11];其次,水稻植株可以通过通气组织向根际泌氧为甲烷氧化菌创造有氧环境^[12-13];另外,水稻植株也为甲烷的主要传输提供通道,大量研究表明稻田土壤中产生的 60%~90%甲烷通过植株通气组织排放到大气中^[14-15]。因此,掌握水稻植株对甲烷排

放的调控效应和机制,将可以通过调控水稻植株生长,实现水稻单产递增和稻田甲烷减排的协同。

20 世纪 90 年代以来,很多研究机构和科学家都从事了水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其机理的研究,并取得了较好的成果。但是,由于各自采用的研究方法、试验材料和试验地点等差异,关于水稻植株对稻田甲烷排放的影响机制仍存在不一致的方面,影响了高产低碳排放的稻作技术研发。因此,本文从水稻植株形态特征、植株生理特征(尤其是光合特征)、植株-环境互作和研究方法 4 个方面,综述了水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其作用机理的研究进展和不足。本文不仅可为未来的进一步深入研究明确方向和方法,而且可为未来高产低碳排放的水稻品种选育和低碳稻作模式创新提供理论参考和技术指导。

2 现有研究进展

2.1 植株形态特征

水稻地上部形态特征如分蘖数、株高、叶面积等是影响水稻产量的关键因子,但关于这些特征对稻田甲烷排放影响的研究结果不尽相同。Gogoi 等^[16]表明叶片数量、分蘖数、叶面积与总甲烷排放显著正相关。Das 等^[17]也发现在水稻营养生长期叶片数量、叶面积、分蘖数和甲烷排放呈显著正相关。但 Gutierrez 等^[18]发现,稻田甲烷排放与水稻分蘖数和株高都没有显著的相关关系。闫晓君等^[19]在同一环境下种植了粳型超级稻和籼型超级稻,发现两种类型超级稻的甲烷排放总量均与最大叶面积呈显著正相关;水稻株高与粳型超级稻甲烷排放显著正相关,而与籼型超级稻的甲烷排放量相关不显著。Zhang 等^[20]在我国单季稻区、水旱轮作区和双季稻区都发现分蘖数、株高和叶面积都与稻田甲烷排放没有显著相关关系,

起关键作用的是地下系统。这些不同的研究结果可能是试验品种和试验环境不同导致的, 未来的研究需要用更多的品种在不同稻田系统和栽培技术下, 进行更系统的综合比较。

水稻根系直接为甲烷产生和氧化提供底物和环境, 但关于水稻根系形态特征对稻田甲烷排放影响的研究较少。Singh 等^[21]发现稻田甲烷季节排放量与根体积和根系孔隙度正相关。Das 等^[17]指出甲烷排放通量与根体积和根长呈正相关。根系形态特征如: 根面积、直径、拓扑结构等对稻田甲烷排放的影响鲜有报道, 是今后的一个重点研究方向。

大量的研究表明植株形态特征影响稻田甲烷的传输能力, 但通气组织建成后, 水稻植株将不是甲烷传输的限制因子。稻田土壤中产生的甲烷主要通过植株通气组织排放到大气中^[14-15]。土壤产甲烷菌产生的甲烷在甲烷浓度梯度差的作用下, 从土壤产生部位扩散到根际, 通过自由扩散的方式和皮层气态化, 进入通气组织。通气组织内的甲烷主要通过叶鞘的微孔、节板和节的裂缝处排到大气^[22-23]。Wang 等^[24]指出在水稻生长前期叶面积大的水稻植株甲烷传输能力强, 穗对甲烷传输几乎无影响。曹云英等^[25]对水稻根系的剪根试验表明, 甲烷传输速率随着水稻植株根数的增加而增加, 随着根长度的减小而减小。Aulakh 等^[26-27]发现在水稻穗分化期, 分蘖多的水稻植株甲烷传输能力高, 而在通气组织完全建成后植株生长特性对甲烷传输没有影响。Zhang 等^[20]通过比较剪去和不剪去水稻地上部的甲烷排放, 表明水稻地上部不是稻田甲烷传输的限制因子。

2.2 植株生理生态特征

大量研究表明水稻植株当季光合产物是稻田甲烷排放的主要底物之一, 但其对甲烷排放的贡献取决于土壤有机碳和有机添加物。稻田甲烷是产甲烷菌在土壤淹水、无氧条件(一般氧化还原电位 $E_h \leq -150$ mv)下, 利用厌氧细菌分解土壤有机物(当季光合产物、土壤有机质、有机添加物等)产生的 H_2 、 CO_2 、乙酸和甲酸等小分子化合物产生的。因此, 普遍认为当季光合会显著影响稻田甲烷排放。Tokida 等^[11]利用 FACE 和 ^{13}C 研究了当季光合产物对稻田甲烷排放的贡献, 研究结果表明在分蘖期当季光合产物对稻田甲烷排放的贡献可以忽略不计, 而在抽穗期和灌浆中期, 40%~60%的甲烷排放的碳源来自当季光合产物。Yuan 等^[28]利用不同 ^{13}C 丰度的秸秆研究了当季光合产物对甲烷排放的影响, 发现在分蘖期当季光合产物对甲烷排放的贡献率达到

40%, 到孕穗期达到 69%。Watanabe 等^[10]研究表明在秸秆还田的情况下, 土壤有机质、根系和秸秆对稻田甲烷排放的贡献率分别为 18%~21%、37%~40%和 42%; 而无秸秆还田条件下, 有机质的贡献率为 15%~20%, 根系的贡献率为 80%~85%。但是, 以上的研究都是在持续淹水的情况下进行的, 而现在在大田生产中一般都采取中期排水和间歇灌溉。在中期排水或间歇灌溉下, 当季光合产物对 CH_4 排放的贡献尚需要进一步阐明。

优化光合产物分配即提高收获指数在持续淹水的情况下可以减少稻田甲烷排放。由于在水稻灌浆期当季光合产物是稻田甲烷排放的最主要的来源^[10-11], 提高光合产物向穗部转移可以降低光合产物向根系分配进而降低稻田甲烷排放。van der Gon 等^[29]通过多年的大田试验发现在高收获指数的季节稻田甲烷排放低, 并通过剪穗试验进一步证明改变光合产物分配可以影响稻田甲烷排放。Das 等^[17]发现光合产物向穗部分配较多的水稻品种稻田甲烷排放低。Su 等^[30]的研究表明, 向水稻转入大麦 *SUSIBA2* 基因增加了光合产物向穗部转移, 提高了水稻产量并减少了光合产物向根系分配, 进而减少了甲烷产生菌数量和降低了稻田甲烷排放。我们的研究也表明, 相比于野生型, 小穗突变体降低了水稻产量, 提高了土壤水溶性有机碳、土壤甲烷产生菌数量、土壤甲烷产生潜力和稻田甲烷排放^[31]。以上的研究都是在持续淹水的情况下进行的, 在间歇灌溉下优化光合产物分配对稻田甲烷排放的影响还未见报道, 仍需要进一步探讨。

净光合累积量即生物量对稻田甲烷排放的影响仍不确定。有些研究认为: 由于当季水稻光合产物是稻田甲烷排放的主要底物之一, 提高生物量会增加产甲烷菌的底物进而显著提高稻田甲烷排放。Huang 等^[32]研究表明稻田甲烷排放通量与地上部生物量显著正相关, van Groenigen 等^[33]利用全球的二氧化碳浓度升高试验和 meta 分析方法发现二氧化碳浓度升高提高了水稻地上部生物量和根系生物量进而提高稻田甲烷排放。但有不少研究认为提高生物量可以增加根系泌氧、促进甲烷氧化进而降低甲烷排放。比如 Watanabe 等^[34]的研究表明水稻生物量与稻田甲烷排放显著负相关。又如 Ma 等^[12]指出由于高生物量的杂交稻泌氧强, 其甲烷排放小于低生物量的粳型常规稻; Jiang 等^[35]表明高生物量的超级稻稻田甲烷排放低于低生物量的常规稻。此外, 还有一些研究指出水稻生物量和甲烷排放没有显著关系^[18,20]。闫

晓君等^[19]指出籼型超级稻甲烷排放总量与生物量和籽粒产量呈显著负相关,而粳型超级稻的相关不显著。Jiang 等^[13]指出高生物量品种对稻田甲烷排放的影响与土壤有机碳有关。这些不同的研究结果可能是由试验品种类型造成的,更有可能是植株和环境互作造成的,亟须进一步明确造成生物量对甲烷排放不确定的关键因子。

除了光合特性,其他的植株生理特性如根际氧化力、蒸腾速率、根系分泌物组成等也可能影响稻田甲烷排放,但研究更少。Gutierrez 等^[36]指出根际氧化面积与土壤水溶液甲烷浓度和植株甲烷排放量显著负相关,但与甲烷氧化菌数量显著正相关。Das 等^[17]的研究发现,蒸腾速率和甲烷排放间显著正相关;但 Nouchi 等^[22]认为植株蒸腾与甲烷排放没有关系。Aulakh 等^[37]指出不同水稻品种根系分泌物有机酸含量不同,土壤甲烷产生量和根系分泌物有机酸含量正相关。现有的研究很难形成统一的认识,还需深入研究。

2.3 植株与环境互作

稻田甲烷的产生和氧化不仅受水稻植株的影响,还受稻田环境(土壤状况、气候条件、水分管理和肥料管理等)的影响^[7-9]。也就意味着稻田环境可能影响水稻植株特性对稻田甲烷产生和氧化的影响,共同调控 CH_4 排放。

首先,土壤有机碳状况决定当季光合产物对稻田甲烷产生的影响。甲烷产生的底物主要来自于当季光合产物和土壤活性有机碳包括作物秸秆和土壤有机质^[10-11]。当土壤活性有机碳很低时,当季光合产物是主要的甲烷底物^[10]。高生物量植株向土壤中输入更多的有机碳,会增加稻田甲烷产生。而当土壤活性有机碳很多时,当季光合产物不再是甲烷产生的限制因子^[10,38],高生物量植株不能显著提高甲烷产生。Zheng 等^[38]认为增加二氧化碳浓度可以提高水稻植株生物量;在秸秆不还田的情况下增加稻田甲烷的产生,但是在高量秸秆还田下对甲烷产生没有影响。我们的研究也发现高生物量的水稻品种在低活性有机碳的情况下,可以显著增加稻田甲烷产生菌数量,但是在高活性有机碳的土壤或秸秆还田条件下,高生物量水稻品种对甲烷产生菌数量没有影响^[13]。

其次,土壤有机碳状况决定水稻植株泌氧对稻田甲烷氧化的影响。稻田土壤中甲烷的氧化主要发生在水气交界面、水土交界面、水稻的根际有氧区等区域^[8-9]。但由于甲烷传输主要通过水稻植株,少量通过水土交界面,因此其发生部位主要在根际^[14-15]。

根际甲烷氧化不仅受氧浓度的限制,还可能受土壤中甲烷浓度或甲烷产生的限制^[9]。Cai 等^[39]发现稻田土壤甲烷氧化发生在甲烷浓度较高时,在甲烷浓度很低时,几乎不发生甲烷氧化。因此,土壤有机碳状况可能影响根际泌氧对稻田甲烷氧化的影响。也就是说当土壤有机碳很低时,甲烷产生量较少,即使增加植株泌氧,也可能不会促进甲烷氧化。Schrope 等^[40]在低有机碳($<1\%$)的土壤下发现二氧化碳浓度升高增加了水稻根系生物量和根系孔隙度,但对甲烷氧化没有显著影响。van der Gon 等^[41]发现在低甲烷排放土壤中改变氧气浓度对甲烷氧化没有影响。我们的研究也表明尽管高生物量的水稻品种有更强大的根系和通气组织,能向根际分泌更多的氧,但是只在高活性有机碳的土壤或秸秆还田条件下促进甲烷氧化,在低活性有机碳的土壤对甲烷氧化没有影响^[13]。

另外,土壤有机碳状况决定高生物量品种对稻田甲烷排放的影响。我们利用全球的水稻品种试验研究了不同土壤有机碳水平下高生物量品种对稻田甲烷排放影响^[13]。发现土壤有机碳决定了高生物量品种对稻田甲烷排放的影响。在土壤有机碳 $<8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下,高生物量的水稻品种增加稻田甲烷排放;而在土壤有机碳 $>12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下,高生物量的水稻品种降低稻田甲烷排放。同时,我们的 3 个独立但又互补的试验进一步表明土壤活性有机碳决定高生物量水稻品种对稻田甲烷排放的影响。在土壤活性有机碳很低的情况下,高生物量水稻品种的甲烷排放显著高于低生物量水稻品种;但是在活性有机碳高的土壤或秸秆还田条件下,高生物量水稻品种甲烷排放低于低生物量水稻品种,品种生产力与土壤碳状况共同影响甲烷排放。

除了土壤有机碳,其他稻田环境因子如灌溉、氮肥和有机物等都可能和与水稻植株形成互作效应^[38,42]。同时,近 20 年来,水稻种植管理措施有了大幅度的改变,例如在秸秆管理方面已经从秸秆不还田快速转变成秸秆还田;水分管理方面,花后间歇灌溉越来越普遍。这些管理措施的改变显著影响了稻田甲烷排放^[42-43],但是这些稻田环境因子与植株互作对稻田甲烷产生、氧化和排放的研究还鲜有报道,在新型的稻作模式和生产环境下,品种效应及其机制仍需要进一步探讨。

2.4 试验设计和监测分析方法

现有的研究多是利用水稻品种试验来研究水稻植株特性对稻田甲烷排放影响^[16,20]。但是水稻品种

间差异往往包含多个植株特性差异, 而不是唯一特性差异。因此, 确定单一水稻特性对稻田甲烷排放影响的研究较难。而且, 有些研究往往只采用单个或几个水稻品种进行研究^[16-18]。而 20 世纪 50 年代以来, 我国水稻品种选育的数量就在 3 500 个左右, 一般的试验研究难以覆盖所有品种类型。因此, 这类研究的结果可能是由所选品种特异性造成的, 只能说明所选品种的问题, 很难得到一个共性研究的结果。有些研究已经采用突变体材料或转基因材料来针对某一水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响进行研究^[30-31]。例如, Jiang 等^[31]利用小穗突变体研究了穗大小对稻田甲烷排放的影响, 但也没能针对所有的主要品种类型。

有些试验通过人为调控某一植株特性来阐述某个水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响, 取得了很好的成果^[20,29-30]。例如, van der Gon 等^[29]通过剪穗人为降低了水稻收获指数, 直接阐明了提高收获指数可以降低稻田甲烷排放。Su 等^[30]采用转基因手段改变单个基因, 来研究当季光合产物对稻田甲烷排放的影响。但是, 大部分研究都是用相关关系来表达植株特性与稻田甲烷排放的关系, 尤其是在植株形态特征方面。限于试验手段和监测方法, 难以设计单一因子试验来验证某个水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响。

关于作用机理方面的研究, 多采用盆栽控制试验, 大田试验的验证较少^[10,12,28,32]。而这些盆栽试验的条件往往不是从模拟大田的角度出发, 导致了盆栽试验的机理不适用于大田生产的实际状况。例如, 在研究光合产物对稻田甲烷排放贡献时, 有些研究选取了一种甲烷排放非常低的土壤或环境, 甲烷排放主要发生在抽穗期左右, 而在水稻生长前期几乎没有甲烷排放^[10,28]。但是大量的大田试验表明稻田甲烷排放最高峰往往是水稻分蘖期, 而不是光合作用最大的抽穗期^[43-45]。过去的许多盆栽试验结果, 需要在大田条件或者模拟大田条件下进一步加以验证。

已有的大部分研究都采用静态箱法来测定稻田甲烷排放^[44-46], 在排放总量计算上存在不足。静态箱包括两种, 一种是黑箱(箱体材质不透光), 另一种透明箱。但这两种都会显著影响水稻光合作用, 黑箱没有光照, 透明箱则温度过高、湿度过大。大多数试验都在晴天, 由于雨天田间操作困难, 雨天测定较少。测定时间一般在上午 9:00 到 11:00, 由于此时土壤温度与日平均温度相近。但此时排放是否能

代表日平均排放还不清楚。测定的频率一般每 5~10 d 测定一次。这种测定方法在气体监测时显著影响了水稻植株生长状况, 同时获取的数据有限, 可能会导致试验偏差。在开放的田间环境下, 进行连续无损自动监测是未来发展的方向, 急需监测方法的创新。

3 未来研究展望

本文从水稻形态特征、生理特征、植物与环境互动和研究方法等方面综述了水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其作用机理, 明确了现有研究的不足。为了更深入地了解水稻植株对稻田 CH₄ 排放的影响, 今后应在以下领域加强研究:

1) 加强地下系统尤其是根系形态(根数、面积、长度和直径)、根系生理特性(氧化力和激素水平)和根系与地上部互作对稻田甲烷产生、氧化和排放影响的研究。水稻根系是水稻植株直接影响稻田甲烷产生、氧化和传输的组织, 直接影响到 CH₄ 的排放。但上面的论述可以看出, 其形态和生理特性对稻田甲烷排放影响的机理研究依然很少。此外, 甲烷产生需要厌氧环境而氧化需要有氧环境, 根际甲烷产生和氧化位点可能不同, 需明确甲烷产生菌和甲烷氧化菌在根际的分布。

2) 加强植株与稻田环境互作对稻田甲烷产生、氧化和排放影响方面的研究。无论是在植株形态特征方面还是在生理特性方面, 水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响都存在大量的不确定性。研究植株与稻田环境互作有利于寻找造成不确定性的原因, 为育种和栽培提供理论依据。同时, 近 20 年来, 水稻种植管理措施有了大幅度的改变, 例如在秸秆管理方面已经从秸秆不还田快速转变成秸秆还田; 水分管理方面, 花后间歇灌溉越来越普遍。这些因素的改变都有可能影响水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响, 急需开展新的田间试验, 对现有的知识进行再认识。

3) 加强微区试验和大田试验相结合的机理研究, 创新田间开放监测的研究方法。微区试验的试验设计应该从模拟大田试验的角度出发。微区试验的现象应和大田试验一致。大田试验应尽量提供机理数据来验证微区试验阐述的机理。在研究方法上, 可以先依据线性关系假设某个植株特性对稻田甲烷排放的影响, 再通过人为调控这一植株特性来验证这一因素对稻田甲烷排放的影响。在现有的封闭监测方法基础上, 应通过方法创新, 创建基于田间开放

的动态监测方法,以更真实地反映田间实际排放。

参考文献 References

- [1] IPCC. Summary for policymakers[C]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535
- [2] BRIDGHAM S D, CADILLO-QUIROZ H, KELLER J K, et al. Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1325–1346
- [3] KIRSCHKE S, BOUSQUET P, CIAIS P, et al. Three decades of global methane sources and sinks[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(10): 813–823
- [4] YAN X Y, 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[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2002
- [5] ALEXANDRATOS N, BRUINSMA J. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision[R]. ESA Working Paper No. 12-03, Rome: FAO, 2012
- [6] PENG S B, TANG Q Y, ZOU Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 3–8
- [7] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. *土壤*, 1999, 31(5): 266–269
CAI Z C. Methane emissions from China's rice paddies: A review[J]. *Soils*, 1999, 31(5): 266–269
- [8] LE MER J, ROGER P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25–50
- [9] CONRAD R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 96: 1–63
- [10] WATANABE A, TAKEDA T, KIMURA M. Evaluation of origins of CH₄ carbon emitted from rice paddies[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D19): 23623–23629
- [11] TOKIDA T, ADACHI M, CHENG W G, et al. Methane and soil CO₂ production from current-season photosynthates in a rice paddy exposed to elevated CO₂ concentration and soil temperature[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3327–3337
- [12] MA K, QIU Q F, LU Y H. Microbial mechanism for rice variety control on methane emission from rice field soil[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3085–3095
- [13] JIANG Y, VAN GROENIGEN K J, HUANG S, et al. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4728–4738
- [14] TOKIDA T, CHENG W G, ADACHI M, et al. The contribution of entrapped gas bubbles to the soil methane pool and their role in methane emission from rice paddy soil in free-air[CO₂] enrichment and soil warming experiments[J]. *Plant and Soil*, 2013, 364(1/2): 131–143
- [15] ZHANG G B, YU H Y, FAN X F, et al. Carbon isotope fractionation reveals distinct process of CH₄ emission from different compartments of paddy ecosystem[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27065
- [16] GOGOI N, BARUAH K K, GUPTA P K. Selection of rice genotypes for lower methane emission[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(2): 181–186
- [17] DAS K, BARUAH K K. Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 134(2): 303–312
- [18] GUTIERREZ J, KIM S Y, KIM P J. Effect of rice cultivar on CH₄ emissions and productivity in Korean paddy soil[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146: 16–24
- [19] 闫晓君, 王丽丽, 江瑜, 等. 长江三角洲主要超级稻 CH₄ 排放特征及其与植株生长特性的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2518–2524
YAN X J, WANG L L, JIANG Y, et al. CH₄ emission features of leading super-rice varieties and their relationships with the varieties growth characteristics in Yangtze Delta of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2518–2524
- [20] ZHANG Y, JIANG Y, LI Z J, et al. Aboveground morphological traits do not predict rice variety effects on CH₄ emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 208: 86–93
- [21] SINGH S, SINGH J S, KASHYAP A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(9): 1219–1228
- [22] NOUCHI I, MARIKO S, AOKI K. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants[J]. *Plant Physiology*, 1990, 94(1): 59–66
- [23] NOUCHI I, HOSONO T, AOKI K, et al. Seasonal variation in methane flux from rice paddies associated with methane concentration in soil water, rice biomass and temperature, and its modelling[J]. *Plant and Soil*, 1994, 161(2): 195–208
- [24] WANG B, NEUE H U, SAMONTE H P. Role of rice in mediating methane emission[J]. *Plant and Soil*, 1997, 189(1): 107–115
- [25] 曹云英, 许锦彪, 朱庆森. 水稻植株状况对甲烷传输速率的影响及其品种间差异[J]. *华北农学报*, 2005, 20(2): 105–109
CAO Y Y, XU J B, ZHU Q S. Effect of rice plant status and difference rice varieties on methane transport rate[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(2): 105–109
- [26] AULAKH M S, BODENBENDER J, WASSMANN R, et al. Methane transport capacity of rice plants. I. Influence of methane concentration and growth stage analyzed with an automated measuring system[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 357–366
- [27] AULAKH M S, BODENBENDER J, WASSMANN R, et al. Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/3): 367–375
- [28] YUAN Q, PUMP J, CONRAD R. Partitioning of CH₄ and CO₂ production originating from rice straw, soil and root organic carbon

- in rice microcosms[J]. PLoS One, 2012, 7(11): e49073
- [29] VAN DER GON H A C D, KROPFF M J, VAN BREEMEN N, et al. Optimizing grain yields reduces CH₄ emissions from rice paddy fields[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(19): 12021–12024
- [30] SU J, HU C, YAN X, et al. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice[J]. Nature, 2015, 523(7562): 602–606
- [31] JIANG Y, TIAN Y L, SUN Y N, et al. Effect of rice panicle size on paddy field CH₄ emissions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(3): 389–399
- [32] HUANG Y, SASS R, FISHER F. Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH₄ emission[J]. Global Change Biology, 1997, 3(6): 491–500
- [33] VAN GROENIGEN K J, VAN KESSEL C, HUNGATE B A. Increased greenhouse-gas intensity of rice production under future atmospheric conditions[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(3): 288–291
- [34] WATANABE A, KAJIWARA M, TASHIRO T, et al. Influence of rice cultivar on methane emission from paddy fields[J]. Plant and Soil, 1995, 176(1): 51–56
- [35] JIANG Y, WANG L L, YAN X J, et al. Super rice cropping will enhance rice yield and reduce CH₄ emission: A case study in Nanjing, China[J]. Rice Science, 2013, 20(6): 427–433
- [36] GUTIERREZ J, ATULBA S L, KIM G, et al. Importance of rice root oxidation potential as a regulator of CH₄ production under waterlogged conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(5): 861–868
- [37] AULAKH M S, WASSMANN R, BUENO C, et al. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil[J]. Plant and Soil, 2001, 230(1): 77–86
- [38] ZHENG X H, ZHOU Z X, WANG Y S, et al. Nitrogen-regulated effects of free-air CO₂ enrichment on methane emissions from paddy rice fields[J]. Global Change Biology, 2006, 12(9): 1717–1732
- [39] CAI Y F, ZHENG Y, BODELIER P L E, et al. Conventional methanotrophs are responsible for atmospheric methane oxidation in paddy soils[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11728
- [40] SCHROPE M K, CHANTON J P, ALLEN L H, et al. Effect of CO₂ enrichment and elevated temperature on methane emissions from rice, *Oryza sativa*[J]. Global Change Biology, 1999, 5(5): 587–599
- [41] VAN DER GON H A C D, NEUE H U. Oxidation of methane in the rhizosphere of rice plants[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 22(4): 359–366
- [42] FENG J F, CHEN C Q, ZHANG Y, et al. Impacts of cropping practices on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in China: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 220–228
- [43] 谢立勇, 许婧, 郭李萍, 等. 水肥管理对稻 CH₄ 排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 958–967
- XIE L Y, XU Q, GUO L P, et al. Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 958–967
- [44] HANG X N, ZHANG X, SONG C L, et al. Differences in rice yield and CH₄ and N₂O emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 205–210
- [45] ZHANG L, ZHENG J C, CHEN L G, et al. Integrative effects of soil tillage and straw management on crop yields and greenhouse gas emissions in a rice–wheat cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 63: 47–54
- [46] ZHU X C, ZHANG J, ZHANG Z P, et al. Dense planting with less basal nitrogen fertilization might benefit rice cropping for high yield with less environmental impacts[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 75: 50–59