



# 稻田温室气体排放与减排研究进展

王晓萌<sup>1,2</sup>, 孙羽<sup>1</sup>, 王麒<sup>1</sup>, 宋秋来<sup>1</sup>, 曾宪楠<sup>1</sup>, 冯延江<sup>1</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院 耕作栽培研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:**水稻是重要的粮食作物,在我国农业中占有重要作用。稻田是温室气体重要排放源之一,产生大量的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等温室气体,这些温室气体已经严重威胁到人类生存并破坏环境。为阐明稻田内  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  的产生机制,从水分、施肥、耕作 3 个方面论述其对稻田温室气体产生及排放的影响,并根据温室效应等因素,综合性地提出了推行节水灌溉技术、选择合理的施肥方式、选择合理的耕作制度 3 种减排措施,对发展低碳农业和降低温室效应具有重要意义。

**关键词:**稻田;温室气体;影响因素;减排

自工业化社会以来,人类活动导致向大气排放大量的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等温室气体,这些温室气体会造成严重的大气污染并导致气候变暖,给人类生活带来严重威胁。在 100 年内, $\text{CH}_4$  的增温潜势是  $\text{CO}_2$  的 25 倍, $\text{N}_2\text{O}$  的增温潜势是  $\text{CO}_2$  的 298 倍<sup>[1]</sup>,截止到 2012 年,大气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  这 3 种温室气体的浓度分别是工业化之前的 1.4、2.6 和 1.2 倍<sup>[2]</sup>,其中温室气体浓度升高的一个重要原因是土地利用排放<sup>[3]</sup>。据 IPCC 第 4 次评估得出,世界上农业源释放的温室气体总量占全球温室气体总量的 14%,而我国农业源释放的温室气体总量占中国温室气体的比例却超过了 17%<sup>[4]</sup>,因此减缓中国农业温室气体排放刻不容缓。

稻田被认为是主要的温室气体排放源之一。水稻是世界重要的主粮之一,世界水稻的种植面积约占总耕作面积的 10%<sup>[5]</sup>,其中中国水稻种植面积占世界水稻种植面积的 27%。随着中国人口数量的不断增加,在有限的耕作面积下,需要提高水稻的产量,但同时也会导致更多的温室气体排放。因此,既要保证水稻产量又要减少温室气体排放是一个艰难的挑战。本文综述了影响水稻温室气体排放机制、影响因素,提出了减排措施对于发展低碳农业以及减缓全球变暖速度具有重要意义。

## 1 稻田温室气体产生机制

### 1.1 $\text{CO}_2$ 产生机制

作为主要的温室气体,大气中  $\text{CO}_2$  的浓度在逐年增加,这可能引发一系列生态问题,比如极端天气、强风暴、干旱、海平面上升等。预计到 21 世纪中期,全球温度将升高 1.5~4.5 °C<sup>[6]</sup>。 $\text{CO}_2$  的主要来源除了工业生产之外,稻田也是其中一个重要来源。大气中的  $\text{CO}_2$  将绿色植物作为载体进行光合作用合成有机物质,将有机碳固定于土壤当中,同时有机碳再经过呼吸作用产生  $\text{CO}_2$  释放到大气中。稻田  $\text{CO}_2$  的排放主要来源于呼吸作用,其中产生  $\text{CO}_2$  的呼吸作用主要包括水稻地上茎叶呼吸和地下的土壤呼吸这两部分<sup>[7]</sup>。地下部分土壤呼吸产生的  $\text{CO}_2$  是生物代谢和生物化学等因素的综合产物<sup>[8]</sup>,主要包括水稻自身根呼吸、土壤动物和土壤微生物的呼吸以及土壤含碳有机物的氧化过程。因此,土壤呼吸释放  $\text{CO}_2$  的速率由土壤有机物含量、氧化速率、水稻根活力,微生物活性以及土壤通透性等因素决定<sup>[9]</sup>。

### 1.2 $\text{CH}_4$ 的产生机制

$\text{CH}_4$  是由产  $\text{CH}_4$  菌在极度厌氧(Eh 值在 150 mV 左右)的环境中分解有机物产生的一种有机气体。稻田中  $\text{CH}_4$  的生成主要有两种途径,产酸途径和不产酸途径<sup>[10]</sup>。产酸途径是在某种细菌的作用下,土壤中有有机物被分解为乙酸,乙酸再经过产  $\text{CH}_4$  菌的作用直接产生  $\text{CH}_4$  或者乙酸分解产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$  再经过产  $\text{CH}_4$  菌的作用产生  $\text{CH}_4$ 。不产酸途径是有机物直接被产  $\text{CH}_4$  菌分解产生  $\text{CH}_4$ 。由于稻田淹水时期较长,

收稿日期:2018-03-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFD0300107)。

第一作者简介:王晓萌(1995-),女,在读硕士,从事稻田温室气体研究。E-mail:wxml3673301892@163.com。

通讯作者:冯延江(1972-),男,博士,研究员,从事水稻耕作栽培研究。E-mail:zixuanfeng2008@163.com。

为土壤创建还原性厌氧环境,有利于厌氧产甲烷菌的存活从而促进  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[10]</sup>,因此稻田被认为是重要的  $\text{CH}_4$  排放源。

稻田产生的  $\text{CH}_4$  不会完全排放到大气中,因为在  $\text{CH}_4$  排放之前稻田产生的  $\text{CH}_4$  有 80%~94% 被氧化<sup>[11]</sup>,其次产生的  $\text{CH}_4$  通过植株的通气组织、气泡以及分子扩散这 3 条途径排放到大气中<sup>[12]</sup>。因此  $\text{CH}_4$  的排放不但受  $\text{CH}_4$  产生的影响,而且受  $\text{CH}_4$  的氧化以及传输途径的限制。

### 1.3 $\text{N}_2\text{O}$ 的产生机制

土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  是硝化作用与反硝化作用共同作用的结果<sup>[13]</sup>。硝化作用是氨或铵盐在好氧条件下,通过硝化细菌的作用转化为硝酸盐,并在反应过程中释放  $\text{N}_2\text{O}$  的过程。如果土壤中  $\text{O}_2$  不足,在硝化作用中则不能将底物彻底氧化成  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  的生成量也会随之增加。反硝化作用是硝酸盐或硝态氮在厌氧条件下,通过反硝化细菌的作用还原产生  $\text{N}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$  的过程<sup>[14]</sup>。 $\text{N}_2$  是反硝化作用的最终产物,但是在反硝化过程中可能会由于缺少还原酶而只能进行某些步骤,必然会产生  $\text{N}_2\text{O}$  这个中间产物。

## 2 稻田温室气体产生和排放的影响因素

### 2.1 水分管理

水分管理是影响稻田温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )排放的一个重要因素<sup>[15]</sup>。稻田土壤的含水量与  $\text{CO}_2$  的排放量具有显著相关关系。土壤含水量影响水稻根系生长、根系呼吸、土壤微生物活力从而影响水稻的呼吸作用<sup>[16]</sup>,而  $\text{CO}_2$  是呼吸作用的产物,因此土壤含水量通过影响呼吸作用进而影响  $\text{CO}_2$  的产生。此外,土壤含水量还会对土壤的通气状况和  $\text{CO}_2$  在土壤的溶解量产生影响,进一步限制  $\text{CO}_2$  的排放。邹建文等<sup>[17]</sup> 研究结果证明在无植株作用下,土壤含水量是影响稻田  $\text{CO}_2$  排放季节变化的主要因素。朱咏莉等<sup>[18]</sup> 研究发现虽然排水措施对水稻各生育期  $\text{CO}_2$  速率影响差异较大,但是都会造成稻田  $\text{CO}_2$  的排放量增加,其中含水量的降低是引起  $\text{CO}_2$  排放增加、光合作用降低的主要原因。排水后土壤通透性增加以及呼吸增强,并且  $\text{CO}_2$  的排放通道阻碍降低,大大促进稻田  $\text{CO}_2$  的排放。有研究表明,当温度达到 10℃ 以上时,从土壤中排放的  $\text{CO}_2$  通量与 5 cm 深度的土壤含水率呈显著的正相关关系<sup>[19]</sup>。

水分管理是影响稻田  $\text{CH}_4$  排放的一个重要环境因素。水分影响稻田的 Eh 值、产  $\text{CH}_4$  菌的活性、 $\text{CH}_4$  的扩散速率从而影响稻田  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[14]</sup>。 $\text{CH}_4$  是产  $\text{CH}_4$  菌在极度厌氧的环境中产生的,常规稻田在长期淹灌环境中土壤处于厌氧状态,Eh 值远低于 150 mV,产  $\text{CH}_4$  菌活性增强,大大促进了  $\text{CH}_4$  的排放量。张西超等<sup>[15]</sup> 研究显示,土壤的含水量与  $\text{CH}_4$  的排放通量具有显著相关性。控制灌溉、浅湿灌溉、间歇性灌溉等节水灌溉方式增加了土壤的通透性,提高了土壤的氧化还原能力,在促进  $\text{CH}_4$  氧化菌的活性的同时抑制产  $\text{CH}_4$  菌活性,减少稻田  $\text{CH}_4$  的产生和排放<sup>[20]</sup>。同时,由于土壤的通透性增加,氧气渗透到土壤并导致土壤有机碳被氧化,释放  $\text{CO}_2$ ,最终抑制了  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[21]</sup>。Peng 等<sup>[22]</sup> 研究表明控制灌溉能够有效的降低全球增温潜势,控制灌溉条件下稻田排放的  $\text{CH}_4$  总量减少 80% 以上。

稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放具有消长(trade-off)关系,其中水分变化是主导这种关系的主要因素<sup>[23]</sup>。淹水的时间越长  $\text{CH}_4$  的排放量越大,但是  $\text{N}_2\text{O}$  的排放却受到阻碍。水分通过影响土壤的硝化与反硝化作用以及土壤通气状况进而影响  $\text{N}_2\text{O}$  的产生与排放<sup>[24]</sup>。硝化过程与土壤含氧量呈正相关,而反硝化过程与土壤通透性呈负相关,因此土壤水分含量波动越大  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量也越大,稻田间歇性灌溉和干湿交替的节水灌溉下,土壤氧化还原电位升高,有利于氨转化形成  $\text{N}_2\text{O}$ ,大大的促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[5]</sup>。但王孟雪<sup>[25]</sup> 对黑龙江寒地稻田研究发现控制灌溉和浅湿灌溉会减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,可能是由于黑龙江省在水稻生长期间降水较为频繁,导致田间含水量较高,减少了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,其中原因还需要进一步研究证明。

### 2.2 施肥管理

肥料的种类、数量和施肥方式都会大大影响稻田温室气体的排放。肥料通过影响土壤特性如有机质含量、微生物数量及活性等来影响稻田  $\text{CO}_2$  的排放。单施氮肥虽然会在一定时间内导致土壤微生物活性增强并提高  $\text{CO}_2$  的排放,但土壤有机碳含量会在短期内消耗完毕,造成  $\text{CO}_2$  的排放降低。此外单施氮肥降低土壤 C/N 和土壤微生物量,从而限制了稻田  $\text{CO}_2$  的排放<sup>[26]</sup>。但氮肥配施有机肥不仅增加了碳源,还提高了氮素,从而

增加了土壤的 C/N 比,增强了植株呼吸和土壤呼吸,从而促进了 CO<sub>2</sub> 的排放。李平等<sup>[27]</sup>对东北黑土地采用不同施肥措施研究表明,在氮肥和有机物料配施下稻田 CO<sub>2</sub> 排放量提高了一个数量级。刘春海等<sup>[28]</sup>通过不同的施肥方式得到相同的结果。外源有机碳的添加可以显著增加稻田 CO<sub>2</sub> 的排放<sup>[29]</sup>。江峰<sup>[16]</sup>研究发现秸秆还田+干湿灌溉处理下秸秆分解,根系呼吸作用增强,稻田 CO<sub>2</sub> 的排放增加。

另有研究表明,有机物的施入会显著提高产 CH<sub>4</sub> 菌的活性和增加 CH<sub>4</sub> 有机底物,从而增加稻田 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[30]</sup>。秦晓波等<sup>[31]</sup>对长期不同施肥的稻田进行观察,发现单施氮肥抑制了 CH<sub>4</sub> 的排放。可能是由于氮肥的施入向土壤中提供了 CH<sub>4</sub> 氧化菌所需的必需营养素 N,促进了 CH<sub>4</sub> 的氧化<sup>[32]</sup>,但是氮肥配施有机肥却显著提高 CH<sub>4</sub> 的排放量。刘春海<sup>[28]</sup>也得到了同样的结果。施用绿肥、秸秆还田等施肥管理为产 CH<sub>4</sub> 菌提供了底物基质促进了 CH<sub>4</sub> 的排放,但是施用堆腐秸秆或堆肥稻田 CH<sub>4</sub> 的排放量明显降低。Jeong<sup>[33]</sup>研究发现堆肥的使用会降低全球增温潜势,在整个生长过程中,稻田 CH<sub>4</sub> 的排放量降低 60%。CH<sub>4</sub> 转换率与有机肥中的 C/N 比有线性关系,腐熟后的有机肥中 C/N 比降低,产 CH<sub>4</sub> 率也降低。

施肥水平显著影响稻田 N<sub>2</sub>O 的排放。为保证水稻产量,每年都会向稻田施入大量氮肥。氮肥的大量施用显著增加了硝化反应与反硝化反应的反应基质,大大增加了 N<sub>2</sub>O 的排放量。但是蔡延江等<sup>[34]</sup>研究发现氮磷钾肥配施增强水稻的吸氮水平,从而与单施氮肥的措施相比降低稻田 N<sub>2</sub>O 的排放量。长期施用有机肥促进土壤微生物活动和有机质,促进反硝化作用从而增加稻田 N<sub>2</sub>O 的排放。李平等<sup>[27]</sup>研究发现氮肥配施猪粪或秸秆处理比单施氮肥处理,稻田 N<sub>2</sub>O 的排放量增加了两个数量级。这样的处理方式不仅提供了氮源也提供了碳源,促进土壤微生物的呼吸,为反硝化作用提供了厌氧条件,促进了稻田 N<sub>2</sub>O 的排放。但是曹云英等<sup>[35]</sup>研究表明氮肥和秸秆混施能降低稻田 N<sub>2</sub>O 的排放量。可能是秸秆在土壤中要经过腐熟,在这过程中释放的化感物质对土壤的微生物活性具有抑制作用,同时抑制了稻田 N<sub>2</sub>O 的排放。因此有关有机物对稻田 N<sub>2</sub>O 排放

的影响还需进一步研究。

### 2.3 耕作管理

稻田耕作管理措施对稻田温室气体排放产生重要影响。耕作措施通过改变与 CO<sub>2</sub> 排放密切相关的微生物循环和土壤有机碳分解环境进而影响 CO<sub>2</sub> 的排放<sup>[36]</sup>。许多研究表明免耕措施下农田 CO<sub>2</sub> 的排放量远低于传统耕作。传统耕作下土壤的通气性增强,有利于微生物的活性和根系的呼吸作用,并且传统耕作措施会分解被固定的有机质,促进土壤 CO<sub>2</sub> 的排放。免耕措施下,减缓有机碳的分解,土壤中微生物对有机碳的利用降低,相应生成的 CO<sub>2</sub> 随之降低。曹凑贵等<sup>[37]</sup>指出耕作管理对稻田 CO<sub>2</sub> 排放呈年际变化的影响,免耕 3 年之内对稻田 CO<sub>2</sub> 的排放不影响,然而 3 年之后免耕处理会促进稻田 CO<sub>2</sub> 的排放。但是也有研究表明耕作措施对稻田 CO<sub>2</sub> 的排放无影响。李成芳等<sup>[26]</sup>研究发现耕作对稻田 CO<sub>2</sub> 的排放没有显著影响,可能是由于免耕增加了土壤表面有机质含量和酶活性,从而减少了与翻耕措施下土壤排放 CO<sub>2</sub> 的差异。因此耕作管理对稻田 CO<sub>2</sub> 的影响需要进一步研究分析。

一般认为传统耕作管理会使土壤的原有结构遭到破坏,减少土壤中 CH<sub>4</sub> 的氧化<sup>[7]</sup>。像少耕和免耕这种对土壤扰动性小或者无扰动性的耕作措施能够减少土壤 CH<sub>4</sub> 的排放。白小琳等<sup>[38]</sup>研究耕作措施对双季稻温室气体排放的影响发现免耕秸秆还田能够显著降低 CH<sub>4</sub> 的排放。CH<sub>4</sub> 需要在稳定的有机质中产生,旋耕秸秆还田有利于秸秆与有机质混匀促进 CH<sub>4</sub> 的排放,并且产生层较浅,CH<sub>4</sub> 的排放量较大。伍芬琳等<sup>[39]</sup>研究证明在秸秆还田的前提下,免耕措施下 CH<sub>4</sub> 的排放量相比旋耕措施减少 15%。

耕作管理通过影响土壤温度、土壤性质等从而影响硝化作用和反硝化作用,会对 N<sub>2</sub>O 的排放产生重要调控作用。目前关于免耕措施影响 N<sub>2</sub>O 排放的研究有不同的结论。有研究表明免耕相比传统耕作旋耕能降低稻田 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[40]</sup>。但秦晓波等<sup>[41]</sup>通过研究耕作方式对湖南双季稻稻田温室气体的影响结果表明耕作方式对稻田 N<sub>2</sub>O 排放无显著影响。另外还有研究表明免耕能促进稻田 N<sub>2</sub>O 的排放,白小琳等<sup>[38]</sup>在湖南省宁乡县研究不同耕作下的双季稻 N<sub>2</sub>O 的排放特征,研究

结果表明在水稻的生长季秸秆还田下免耕稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量最高,翻耕下  $\text{N}_2\text{O}$  排放量最低。可能是翻耕措施下土质不均一,秸秆在土壤中氧化,Eh 下降抑制了  $\text{N}_2\text{O}$  的产生。

### 3 减排措施

温室气体的排放越来越严重,对人类生活造成严重威胁。稻田是重要的排放源之一,因此探讨并采取稻田温室气体减排措施具有重要意义。

#### 3.1 推行节水灌溉技术

优化水管理是一种能提高作物产量并减少温室气体排放的简单有效的办法<sup>[42]</sup>。浅湿灌溉、控制灌溉、间歇灌溉、覆膜旱作等节水灌溉技术已经得到了大面积的推广,这种节水灌溉技术不仅大大的节省了水稻用水,并且能够减少温室气体的排放<sup>[23]</sup>。在间歇灌溉条件下稻田  $\text{CH}_4$  排放量是持续淹水条件的 5.4%,虽然  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量增加了 6.5 倍,但是间歇灌溉条件下的综合温室效应却减少了 90%<sup>[43]</sup>,同时水稻产量没有显著影响。Li 等<sup>[44]</sup>也得到了同样的结果,即使在浅湿节水灌溉下增加了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量,但是温室气体排放强度平均下降了 24%。节水灌溉技术是在水稻特定的生育期保持田面无水层,满足各生育阶段的生理需水,减少生态需水,不仅节约用水,还有利于水稻的生长。

#### 3.2 选择合理的施肥方式

在增加作物产量的前提下要注意施肥对环境造成的危害,一般为了增加土壤肥力会采用有机肥与化肥配施的施肥方法。施用新鲜的粪肥或秸秆直接还田增加了产甲烷菌的反应基质,并且营造了厌氧环境,促进了  $\text{CH}_4$  的产生,但是腐熟后的粪肥或者秸秆能够减少  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[23]</sup>。根据水稻生长时期的需肥状况,适当的调整氮磷钾肥的施用比例,并相应减少氮肥的施用量有利于稻田温室气体的排放。朱利群等<sup>[45]</sup>对长江中下游稻区 339 组温室气体排放数据采用 Meta 分析法进行分析,得出综合施用氮磷钾肥特别是 P 肥的施用对水稻增产和温室气体的减排具有显著作用。除了降低氮肥的施用率,延迟氮肥的施用时期也能减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。同时通过施用控释肥和添加剂也能达到减少稻田温室气体排放的效果<sup>[46]</sup>。

#### 3.3 选择合理的耕作制度

选择合理的耕作制度能降低稻田温室气体的排放量。采用免耕和少耕的耕作措施能够改良土壤的性质,增加土壤肥力,增强土壤团聚结构,减少温室气体的排放。轮作制度能降低冬闲泡田期温室气体的排放量。泡田期为产  $\text{CH}_4$  菌提供了厌氧环境,并且稻田中的氮肥促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。在泡田期轮作小麦、绿肥等旱作作物可以促进养分循环和改良土壤性质,从而减少温室气体的排放<sup>[47]</sup>。

### 4 总结与展望

水稻田作为一个重要的温室气体排放源,对全球变暖有严重威胁,因此,为了人类的可持续发展,急需控制稻田温室气体的排放。只有了解温室气体的产生、排放机制以及影响因素才能更好地提出减排措施。目前国内外的许多研究人员已经对稻田温室气体的排放及减排进行了研究,但是效果良好和应用广泛的减排措施却比较少。目前我国稻田温室排放的研究大多集中在南方双季稻稻区,而北方寒地稻区的研究甚少。因此在今后的研究中要结合多因素提出效果最佳且应用广泛的减排措施,这将对发展低碳农业、减缓全球气候变暖产生重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] WMO. Greenhouse gas bulletin [R]. 2013.
- [3] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [4] 蔡松峰, 黄德林. 我国农业源温室气体技术减排的影响评价——基于一般均衡模型的视角[J]. 北京农业职业学院学报, 2011, 25(2): 24-29.
- [5] 邵美红, 孙加焱, 阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 181-187.
- [6] IPCC. Climate Change 2001[EB/OL]. 2001-09-30. <http://www.ipcc.ch/>.
- [7] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
- [8] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研

- 究进展[J]. 中国农业气象, 2002(4): 48-53.
- [9] 翟胜, 高宝玉, 王巨媛, 等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境学报, 2008, 17(6): 2488-2493.
- [10] 徐丹. 寒地黑土稻田水肥管理与温室气体排放关系研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [11] 王楷, 李伏生, 方泽涛, 等. 不同灌溉模式和施氮量条件下稻田甲烷排放及其与有机碳组分关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 1012-1020.
- [12] Tong C, Wang W Q, Zeng C S, et al. Methane( $\text{CH}_4$ ) emission from a tidal marsh in the Min River estuary, southeast China[J]. Journal of Environmental Science & Health Part A Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering, 2010, 45(4): 506-516.
- [13] Zhu X, Burger M, Doane T A, et al. Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{NO}$  under low oxygen availability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(16): 6328-6333.
- [14] 吴琼, 王强盛. 稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制[J]. 中国生态农业学报, 2018(10): 633-642.
- [15] 张西超, 叶旭红, 韩冰, 等. 灌溉方式对设施土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(10): 1487-1496.
- [16] 江峰. 秸秆还田与灌溉模式对超级稻产量形成、及温室气体排放的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [17] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764.
- [18] 朱咏莉, 吴金水, 朱博宇, 等. 排水措施对稻田  $\text{CO}_2$  通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2206-2210.
- [19] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田  $\text{CO}_2$  排放影响及水热关系分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 47-53.
- [20] 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[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006(5): 546-550.
- [21] Oo A Z, Sudo S, Inubushi K, et al. Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2018, 252: 148-158.
- [22] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Field experiments on greenhouse gas emissions and nitrogen and phosphorus losses from rice paddy with efficient irrigation and drainage management[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1581.
- [23] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2123-2130.
- [24] 徐华, 邢光喜, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 土壤学报, 2000(4): 499-505.
- [25] 王孟雪, 张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放增加水稻产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 72-79.
- [26] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 不同耕作方式下稻田土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的排放及碳收支估算[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2482-2488.
- [27] 李平, 郎漫, 李森, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响[J]. 环境科学, 2018(5): 1-9.
- [28] 刘春海, 傅民杰, 吴凤日. 不同施肥类型对北方稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(7): 1653-1658.
- [29] 王海飞, 贾兴永, 高兵, 等. 不同土地利用方式土壤温室气体排放对碳氮添加的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1172-1182.
- [30] Kumaraswamy S, Ramakrishnan B, Sethunathan N. Methane production and oxidation in an anoxic rice soil as influenced by inorganic redox species[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(6): 2195.
- [31] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 长期施肥对湖南稻田甲烷排放的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(1): 19-22.
- [32] Zhou M, Zhu B, Wang X, et al. Long-term field measurements of annual methane and nitrous oxide emissions from a Chinese subtropical wheat-rice rotation system[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 115: 21-34.
- [33] Jeong S T, Kim G W, Hwang H Y, et al. Beneficial effect of compost utilization on reducing greenhouse gas emissions in a rice cultivation system through the overall management chain[J]. Science of the Total Environment, 2017, 613-614.
- [34] 蔡延江, 王连峰, 温丽燕, 等. 培养实验研究长期不同施肥制度下中层黑土氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 219-223.
- [35] 曹云英, 朱庆森, 郎有忠, 等. 水稻品种及栽培措施对稻田甲烷排放的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2000, 21(3): 22-27.
- [36] Ahmad S, Li C, Dai G, et al. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 106(1): 54-61.
- [37] 曹凑贵, 李成芳, 展茗, 等. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 93-98.
- [38] 白小琳, 张海林, 陈阜, 等. 耕作措施对双季稻田  $\text{CH}_4$  与  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 282-289.
- [39] 伍芬琳, 张海林, 李琳, 等. 保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应[J]. 中国农业科学, 2008(9): 2703-2709.
- [40] Gregorich E G, Rochette P, Stgeorges P, et al. Tillage effects on  $\text{N}_2\text{O}$  emission from soils under corn and soybeans in Eastern Canada[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2008, 88(2): 153-161.
- [41] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 216-224.
- [42] Liang K, Zhong X, Huang N, et al. Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water

- management in a subtropical double-season rice cropping system[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 46-57.
- [43] 李香兰, 马静, 徐华, 等. 水分管理对水稻生长期  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放季节变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008(2): 535-541.
- [44] Li J L, Li Y, Wan Y, et al. Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield[J]. Geoderma, 2018, 315: 1-10.
- [45] 朱利群, 王春杰, 杨曼君, 等. 施肥对长江中下游稻田温室气体排放的影响——基于 Meta 分析[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 105-115.
- [46] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 314-323.
- [47] 董文军, 来永才, 孟英, 等. 稻田生态系统温室气体排放影响因素的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2015(5): 145-148.

## Research Progress on Greenhouse Gas Emission and Emission Reduction in Rice Fields

WANG Xiao-meng<sup>1,2</sup>, SUN Yu<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, SONG Qiu-lai<sup>1</sup>, ZENG Xian-nan<sup>1</sup>, FENG Yan-jiang<sup>1</sup>

(1. Crop Tillage and Cultivation Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Rice is an important ration crop and plays an important role in China's agriculture. Paddy fields are one of the major sources of greenhouse gas emissions. They produce large amounts of greenhouse gases such as carbon dioxide( $\text{CO}_2$ ), methane( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide( $\text{N}_2\text{O}$ ). These greenhouse gases have seriously threatened human survival and destroyed the environment. In order to elucidate the production mechanism of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in rice fields, the effects of water, fertilizer and tillage on the production and emission of greenhouse gases in paddy fields were discussed. According to the factors such as the greenhouse effect, 3 kinds of emission reduction measures were put forward, including the implementation of water saving irrigation technology, the selection of rational fertilization methods and the selection of reasonable farming system. It is of great significance for developing low-carbon agriculture and reducing greenhouse effect.

**Keywords:** rice field; greenhouse gases; influence factor emission; reduction

(上接第 143 页)

## Current Situation and Development Countermeasures of Agricultural Science and Technology Talent Team in Taizhou

SU Xue-jun<sup>1</sup>, ZONG Chun-yan<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>

(1. Taizhou Polytechnic Institute, Taizhou 225300, China; 2. Taizhou Agriculture Committee, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** In the process of agricultural modernization, whether we can break through the bottleneck of 'the three rural issues', and realize the continuous innovation of science and technology, largely depends on the construction of our talent team. In order to meet the new needs of local agricultural economic development and improve the talent policy. Through analyzing the present situation of agricultural science and technology talent team construction in Taizhou area, the crux of quantization problem specified. This paper put forward some measures to strengthen the construction of the talent team and promote the development of the regional agricultural economy by giving full play to the effect of the talent policy, implementing the warm heart to keep the people and the information service mode of the innovative talents, building the practical platform of the scientific and technological cooperative and boosting the right to increase the power of the female talents.

**Keywords:** team construction; talent training; agricultural economy; development countermeasures