

稻田 N₂O 排放影响因素与减排研究进展

夏仕明 陈洁 蒋玉兰 陈璐 刘贺 刘立军*

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室/农业部长江中下游作物生理生态与栽培重点开放实验室, 江苏 扬州 225009; 第一作者: 349395838@qq.com; * 通讯作者: ljliu@yzu.edu.cn)

摘要: 氧化亚氮(N₂O)是稻田生态系统中一种主要的温室气体,在全球温室效应中起着很大作用。本文从稻田 N₂O 的产生机制、影响稻田 N₂O 排放的主要因素以及稻田 N₂O 减排的技术措施等方面综述了稻田 N₂O 的研究进展,并对未来开展稻田 N₂O 排放研究提出了一些设想,以期减少稻田温室气体排放和氮损失提供参考。

关键词: 稻田; 氧化亚氮; 温室气体; 减排技术

中图分类号: S511.05 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8082(2017)02-0005-05

由于大气中温室气体含量逐年升高,全球温室效应越发严峻,引发了全球温度升高、冰川融化、海平面上升等一系列问题,已经严重影响到人类的生存和全球的发展。氧化亚氮(N₂O)是大气中仅次于甲烷(CH₄)和二氧化碳(CO₂)的最主要的温室气体,其温室效应是 CO₂ 的 310 倍^[1]。我国是一个水稻种植大国,种植面积约占世界总种植面积的 17%,约有 60% 的人口以稻米为主食^[2-3]。近年来,为了追求高产,稻田氮肥用量呈增加态势,过量的氮肥施用造成了氮肥利用率的下降。有研究表明,我国稻田氮肥利用率仅为 30%~35%^[4]。大量氮素通过径流、氨挥发、硝化和反硝化等形式流失。这一情况也直接导致我国稻田 N₂O 的年排放量呈现上升的趋势^[5]。据统计,稻田排放的 N₂O 约占农田系统的 10% 左右。因此,进一步深入研究我国稻田 N₂O 排放规律和减排措施显得尤为重要。已有研究表明,影响 N₂O 排放的因素众多,释放机理复杂,很多排放源、排放强度等还未能准确定量。本文在前人研究基础上,从水稻品种、肥料管理、秸秆还田和水管理等方面分析了其与稻田 N₂O 排放之间的关系,并提出了未来稻田 N₂O 研究的重点,以期水稻高产、养分资源高效利用和稻田温室气体减排提供参考。

1 N₂O 的产生机制

稻田中 N₂O 产生的主要途径是土壤中的微生物进行了硝化与反硝化作用^[6]。土壤中 N₂O 的排放量取决于土壤中的 N₂O 扩散及被还原的程度^[7]。

1.1 硝化作用

硝化作用是指土壤中的硝化细菌在通气良好的条件下将氨氧化为硝酸和亚硝酸的过程^[8-9]。方程式: $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ 。这个方程式可以分解为两

部分: $\text{NH}_4^+ + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NO}_2^- + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ 。N₂O 是羟胺氧化成 NO₂-N 过程中因酶反应和化学反应而生成的。在酸性条件下 NO₂⁻ 更容易变为 N₂O^[10]。

1.2 反硝化作用

在缺氧条件下,NO₃⁻ 由反硝化细菌和化学还原剂作用还原生成 NO、N₂O、N₂。在参加还原反应的细菌中有些生成 N₂,有些仅还原生成 N₂O,而有些产生 N₂O 和 N₂ 的混合物^[11]。它的化学反应过程是: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ 。各个反应过程都有酶的参与,促进反应的进行。张玉铭等^[12]认为,反硝化过程中生成的 NO、N₂O、N₂ 通常受多种因素的影响,比如土壤湿度、质地、pH 值、有机质含量和温度等。

2 稻田 N₂O 排放的影响因素

2.1 肥料管理

施肥对 N₂O 的排放有重要影响^[13]。施肥既能影响硝化反应又能影响反硝化反应的进行,而且能够影响水稻的生长,稻田 N₂O 是通过水稻植株进入土壤,然后从土壤进入大气^[14]。稻田施用肥料会促进水稻植株的生长,继而促进了植株 N₂O 的传输能力。氮肥是促进水稻生长和产量形成的重要外部投入,但氮肥也是稻田 N₂O 排放的重要来源,氮肥投入量越多, N₂O 排放量也就越多^[15]。其主要原因在于氮肥的施用增加了稻田氮素的含量,为硝化和反硝化反应提供了底物 NO₃⁻ 和 NH₄⁺,从而促进了稻田 N₂O 的排放。易琼等^[16]的研究结

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(31371562; 31171481); 公益性行业(农业)专项(201203031-02)

果表明,施用常规氮肥明显提高了稻田 N_2O 的排放,改施缓释肥可有效降低稻田 N_2O 的排放量。张怡等^[17]研究认为,控释肥可以减少覆膜栽培措施下稻田 43.6% 的 N_2O 排放。李方敏等^[18]也发现,施用控释肥与施用尿素相比,控释肥在水稻生长期释放养分较为缓慢,稻田土壤溶液中的 NO_3^- 浓度较低,能够有效降低稻田土壤中 N_2O 的排放。

有研究^[19-20]认为,稻田施用磷肥可以增加稻田土壤磷酸酶活性,导致土壤 pH 值产生变化,土壤性质的变化会增加或降低 N_2O 排放量。但也有研究^[21]认为,施用磷肥促进水稻对 N 的吸收,从而降低了稻田 N_2O 的排放量。我国稻田普遍施用尿素和硝态氮,有研究^[22-23]证明,尿素对 N_2O 的促进作用较硝态氮更大。普遍研究认为,与有机肥相比,化肥的施用促进了稻田 N_2O 的排放。田光明^[24]研究也认为,有机肥对 N_2O 的排放有明显减少的作用。而陈玉芬等^[25]发现,对于早稻而言,施用化肥产生的 N_2O 量多于施用有机肥产生的 N_2O ; 对于晚稻而言,施用化肥产生的 N_2O 量则少于施用有机肥产生的 N_2O 。

2.2 秸秆还田

我国的秸秆资源十分丰富。秸秆还田是一种低投入可持续的资源利用方式。秸秆的科学还田还可以减少稻田化学肥料的施用。有研究^[26]表明,在种植水稻时,秸秆还田可以有效降低 N_2O 的排放量,而在无水稻种植时,秸秆还田增加了 N_2O 的排放。也有研究^[27]表明,秸秆还田量越高, N_2O 排放量也越高。潘婷^[28]的研究则认为,秸秆还田对稻田 N_2O 的排放与水稻类型有很大关系。秸秆还田降低了早稻稻田 N_2O 的排放量,但会提高晚稻稻田 N_2O 的排放量。因此,秸秆还田对稻田 N_2O 排放的影响仍需进一步深入研究。

2.3 水分管理

水分管理是影响稻田 N_2O 排放的重要因素之一。稻田 N_2O 主要来源于土壤微生物的硝化与反硝化作用。土壤酶活性、土壤氧化还原电位(Eh)和土壤氮素浓度等都受水分的影响^[29],因而也会明显影响硝化与反硝化过程,从而引起稻田 N_2O 排放的变化。Terry 等^[30]研究发现,旱地土壤水分含量高低是决定 N_2O 产生的重要因素。土壤含水量高时, N_2O 产生的主要途径为反硝化作用;土壤含水量适中时, N_2O 产生的主要途径是硝化和反硝化作用;而土壤含水量低时, N_2O 的产生途径主要是硝化作用。王立超^[31]的研究也认为,在湿润水分管理下,硝化作用比反硝化作用产生的 N_2O 量多;在淹

水处理下,反硝化作用产生的 N_2O 量多于硝化作用。

相对于旱地的 N_2O 排放研究而言,对稻田 N_2O 的排放研究较少。有研究表明,稻田 N_2O 排放主要集中在搁田期,搁田增加了稻田土壤的通透性,为土壤提供了大量氧气,有利于硝化反应和反硝化反应同时进行,促进 N_2O 排放;在淹水时排放几乎为零,稻田 N_2O 的大量排放主要出现在干湿交替灌溉期。Yan 等^[32]研究了排水搁田和淹水条件下对 N_2O 排放的影响,结果发现,排水搁田条件下大部分 N_2O 通过土壤表面排放,只有 17.5% 的 N_2O 通过水稻植株排入空气中;而淹水条件下 87.3% 的 N_2O 通过水稻植株排放。还有研究^[33]表明,随着晒田期的推迟,稻田 N_2O 排放逐渐减少。但推迟晒田减少稻田 N_2O 排放的影响机制尚不清楚。

2.4 耕作方式

不同的耕作模式对稻田 N_2O 的产生及排放也有很大影响。耕作改变了土壤的理化性质,直接或者间接地影响了稻田 N_2O 的排放。目前,关于耕作方式对稻田 N_2O 排放的影响结果不太一致。有研究^[34]认为,与传统翻耕相比,免耕和旋耕可以减少稻田 N_2O 的排放;但也有研究^[35]表明,免耕和旋耕会促进 N_2O 的排放;还有研究^[36]认为,免耕和旋耕对 N_2O 的排放没有影响。最近,成臣等^[37]的研究结果表明,不同耕作方式对双季稻田 N_2O 排放无明显影响。

2.5 水稻品种

水稻植株本身在 N_2O 排放过程中扮演者很重要的角色,深入研究水稻品种对 N_2O 的排放具有重要意义。已有研究证明,稻田 N_2O 的传输途径有 3 种:(1)通过水稻植株的通气组织释放到大气中;(2)通过气泡扩散到大气中;(3)液相扩散。其中,通过植株本身的通气组织释放的 N_2O 占稻田土壤 N_2O 总排放量的 80%。孙会峰等^[38]观察到,各个水稻品种生长初期即有 N_2O 排放。在中期常规搁田之前,各水稻品种的 N_2O 的排放量较低;在搁田期间,常规籼稻和常规粳稻 N_2O 排放剧烈,而杂交籼稻和杂交粳稻 N_2O 排放量基本为 0。稻田淹水后各水稻品种的 N_2O 排放量基本为 0。分析其原因,可能由于杂交水稻的生物量大于常规水稻,其吸收的氮素多于常规稻,从而减少了稻田 N_2O 的排放^[39]。

水稻株型对稻田 N_2O 的排放也有一定的影响。吕小红^[40]的研究表明,在相同氮肥水平下,紧凑型水稻品种的硝化反应较松散型品种强烈,导致紧凑型水稻品种 N_2O 的排放量多于松散型品种。

2.6 土壤性状

稻田土壤性状明显影响稻田 N_2O 排放, 比如土壤微生物、温度、质地、氧气含量、pH 值和有机质等^[41]。秦晓波等^[42]研究发现, 稻田 N_2O 的排放通量与土壤 pH 值呈正相关关系, 但是相关性不显著。稻田土壤 60% 左右的 N_2O 排放量集中在 $5 < \text{pH} < 6$ 之间。稻田土壤 N_2O 排放与土壤氧气的相关性较弱, 但土壤氧气的可获得性对 N_2O 的产生和排放有很大的影响, 土壤氧气可获得性水平较低时, 反硝化作用主导 N_2O 的产生。土壤温度影响土壤微生物的活性及硝化与反硝化作用的速率, 从而影响 N_2O 的排放。总体而言, 土壤 N_2O 的排放量与温度的高低呈正相关。

另外, 土壤质地影响了土壤水分含量和土壤通透性, 从而影响土壤硝化和反硝化作用的强弱以及 N_2O 在稻田土壤中的扩散速度。徐华等^[43]观察到, 砂质土壤 N_2O 的排放量明显高于壤土和粘土。

3 稻田 N_2O 减排的主要技术措施

我国是一个农业大国, 水稻种植面积位居世界第 2 位。稻田是 N_2O 排放的主要来源, 减少稻田温室气体的排放对控制全球变暖有重要作用。在保证水稻种植面积和产量的同时, 设法降低稻田 N_2O 排放是一个亟待解决的重要问题。根据以往众多研究结果, 稻田 N_2O 减排的主要技术措施大体有以下几个方面。

3.1 合理施肥

肥料施用的方式、种类、施用量和施用时间都会对稻田 N_2O 排放产生影响。合理施肥, 提高肥料利用效率是减少稻田 N_2O 排放的有效措施^[44]。根据水稻各个时期所需的养分, 测土配方施肥, 合理的养分配比, 改表施为深施, 提高肥料的利用效率, 避免因肥料的过度施用导致稻田 N_2O 的排放。研究表明, 目前我国的氮肥利用率在 20%~30% 之间, 若将氮肥利用率从 20%~30% 提高到 30%~40%, 则可减少 10% 的 N_2O 排放^[45]。施用缓释肥可以有效降低稻田 N_2O 排放。另外, 铵态氮肥的深施或者混施也可以有效减少稻田 N_2O 的排放^[46]。

3.2 优化水分管理

水分管理主要是改变了土壤的通透性和氧化还原状态, 抑制硝化和反硝化作用的进行, 从而减少 N_2O 的排放。在常规水分管理模式, 减少搁田和后期干湿交替灌溉的时间, 是减少稻田 N_2O 排放的有效措施^[47]。长期淹水条件下稻田 N_2O 的排放系数仅为 0.02%, 远低于“淹水-搁田-淹水”和“淹水-搁田-干湿交替”两种水分管理模式 N_2O 的排放系数^[48]。但是长期淹水会导

致另外一种温室气体 CH_4 的急剧上升。由于两者存在互为消长的关系, 因此综合考虑水分状况对 2 种温室气体排放的影响, 这是优化稻田水分管理的前提。与间歇灌溉相比, 常规灌溉稻田 N_2O 的排放量较低, 但是其甲烷的排放量高于间歇灌溉。间歇灌溉稻田的综合温室效应比长期淹水灌溉弱很多^[49]。由此可见, 间歇灌溉是较为适宜的减少稻田温室气体的水分管理模式。

3.3 选用高产低 N_2O 排放的水稻品种

不同水稻品种 N_2O 的排放量差异很大。有研究表明, 杂交稻品种的温室气体效应明显低于常规水稻品种^[50]。也有研究^[51-52]认为, 增产潜力大或经济产量高的水稻品种通常需要吸收较多的氮素, 减少稻田土壤氮素残留, 从而可以降低稻田 N_2O 排放。因此, 选择既高产又低 N_2O 排放的水稻品种将是减少稻田 N_2O 排放的重要措施。

4 研究展望

稻田 N_2O 的排放与很多因素有关, 是一个极其复杂的过程。虽然前人对这方面已有很多研究, 但研究结果存在较大差异, 很多问题仍不明确。进一步深入研究稻田 N_2O 排放机理及减排措施对减少稻田温室气体排放具有重要意义。未来对稻田排放 N_2O 的研究应注重以下几个方面。

4.1 水稻品种改良对稻田 N_2O 排放的影响及其机理

不同水稻品种间 N_2O 排放存在明显差异。在过去的几十年中, 水稻品种不断更新改良, 产量和品质都有很大提升, 但是品种改良对稻田 N_2O 排放的影响尚不清楚。深入研究水稻品种改良对 N_2O 排放的影响及其机理, 可为高产优质水稻选育和温室气体减排栽培提供重要的理论论据。

4.2 稻田 N_2O 和 CH_4 排放互补效应的研究

众多研究表明, 水分和肥料是影响 CH_4 和 N_2O 产生的两大主要因素, 有利于 CH_4 产生的土壤条件不利于 N_2O 的产生, 反之亦然, CH_4 和 N_2O 的排放存在互为消长的关系。在不同的水分养分管理条件下, 稻田温室气体净排放量是增加还是减少目前尚不清楚。加强在不同水分养分管理模式稻田温室气体净排放量的研究尤为重要。未来应该综合考虑两者的排放关系, 制定更合理的灌溉模式和施肥方法, 减少稻田温室气体排放。

4.3 干湿交替灌溉对稻田 N_2O 排放的影响及其机理

传统的长期淹水灌溉方式不仅浪费水资源, 而且

不利于水稻产量和品质的形成。近年来,干湿交替灌溉技术作为一种高产节水灌溉模式已在生产上大面积应用。干湿交替灌溉技术虽有显著的节水和提高水分利用效率的效果,但其对稻田 N₂O 和其他温室气体排放的影响则少见报道。研究明确干湿交替灌溉对稻田 N₂O 排放的影响及其机理,对水稻高产节水栽培和稻田温室气体减排有重要意义。

参考文献

- [1] Stocker, Qin. Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental climate change [N]. NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Xie L Y, Lin E D. Effects of CO₂ enrichment on grain quality of rice and wheat: A research review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(3): 659-664.
- [3] Zhang S M, Zhang J M, Li D L, et al. The difference between starch chain length distribution and main quality characteristics of high resistant starch lines of japonica rice [J]. *Scientia Agric Sin*, 2009, 42(6): 2 237-2 243.
- [4] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 87-90.
- [5] 周文能. 中国农业氧化亚氮的排放量和减少对策[J]. 农业环境与发展, 1994, 11(1): 27-31.
- [6] Bouwman A F. Nitrogen oxide sand and tropical agriculture [J]. *Nature*, 1998, 392(6679): 866-867.
- [7] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, et al. Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification [J]. *Global Biogeochem Cy*, 1996, 10(3): 401-412.
- [8] Li C. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems [J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2000, 58(1): 259-276.
- [9] Xing G X. N₂O emission from cropland in China[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 1998, 52(2/3): 249-254.
- [10] Kool D M, Wrage N, Zechmeister-Bolten stern S, et al. Nitrifier denitrification can be source of N₂O from soil; A revised approach to the dual-isotope labelling method[J]. *Eur J Soil Sci*, 2010, 61(5): 759-772.
- [11] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. 土壤学进展, 1995, 23(6): 35-42.
- [12] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭, 等. 农田土壤 N₂O 生成与排放影响因素及 N₂O 总量估算的研究 [J]. 中国农业生态学报, 2004, 12(3): 119-123.
- [13] 马二登, 马静, 徐华, 等. 施肥对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2453-2458.
- [14] Mosier A R, Mohanty S K, Bhadrachalam A, et al. Influence of rice plants on the evolution of N₂ and N₂O from the soil to the atmosphere [J]. *Mitteilungen Der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1990: 115-120.
- [15] Zou J W, Huang Y, Lu Y, et al. Direct emission factor for N₂O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China [J]. *Atmos Environ*, 2005, 39(26): 4 755-4 765.
- [16] 易琼, 杨少海, 卢钰升, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1 432-1 437.
- [17] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 控释肥料对覆膜栽培稻田 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 769-775.
- [18] 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[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2 170-2 174.
- [19] Minami K. Effects of phosphate and calcium carbonate application on emission of N₂O from soils under aerobic conditions [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1983, 29(4): 517-524.
- [20] 李春越, 白红英, 党延辉, 等. 农田土壤磷酸酶活性与土壤 N₂O 排放通量的相关性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2): 231-234.
- [21] Mori T, Ishizuka S. Effects of phosphorus addition on N₂O emission in an Acacia mangium plantation with and without root exclusion[J]. Australia: Brisbane, 2010: 93-96.
- [22] De Groot C J, Vermoesen A, Cleemput O V. Laboratory study of the emission of N₂O and CH₄ from a calcareous soil [J]. *Soil Sci*, 1994, 158(5): 355-364.
- [23] Vermoesen A, Grootenjde, Nollet L, et al. Effect of ammonium and nitrate application on the NO and N₂O emission out of different soils[J]. *Plant Soil*, 1996, 181: 153-162.
- [24] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 294-298.
- [25] 陈玉芬, 杨军, 顾蔚蓝, 等. 广州地区晚造稻田氧化亚氮排放量与施肥灌溉关系的研究 [J]. 华南农业大学学报, 1990, 20(2): 80-84.
- [26] 汤宏. 秸秆还田下稻田温室气体排放及水分管理的响应 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [27] 蒙世协, 刘春岩, 郑循华, 等. 小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤一大气间甲烷、二氧化碳、氧化亚氮和一氧化氮交换的影响[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(4): 504-514.
- [28] 潘婷. 秸秆还田对福州稻田土壤碳库、甲烷与氧化亚氮排放的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
- [29] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1): 1-7.
- [30] Terry R E, Tate R L, Duxbury J M. Nitrous oxide emissions from drained, cultivated organic soils of south Florida [J]. *J Air Pollut Control Assoc*, 1981, 31(11): 1 173-1 176.
- [31] 王立超. 水分和氮肥管理对氧化亚氮排放的影响 [J]. 农业与技术, 2014, 34(4): 23-25.
- [32] Yan X, Shi S L, Du L J, et al. Pathways of N₂O emission from rice paddy soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32: 437-440.
- [33] Li X L, Yuan W P, Xu H, et al. Effect of timing and duration of mid-season aeration on CH₄ and N₂O emissions from irrigated lowland rice paddies in China [J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2011, 91(3): 293-305.
- [34] Gregorich E G, Rochette P, St-Georges P, et al. Tillage effects on

N₂O emissions from soils under corn and soybeans in eastern Canada [J]. *Canadian J Soil Sci*, 2008, 88(2): 153-161.

[35] 白小琳,张海林,陈阜,等. 耕作措施对双季稻田 CH₄ 与 N₂O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 282-289.

[36] 秦晓波,李玉娥,万运帆,等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (11): 216-224.

[37] Cheng C, Zeng Y J, Yang X, et al. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. *Acta Scien Circum*, 2015, 35(6): 1 887-1 895.

[38] 孙会峰,周胜,陈桂发,等. 水稻品种对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1 595-1 602.

[39] Li X K, Li Y X, Lu J W, et al. Does hybrid rice need more fertilizer than inbred rice [J]. *Hybrid Rice*, 2014, 29(2): 68-71.

[40] 吕小红. 不同株型水稻品种氮肥利用差异及其生理基础 [D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2011.

[41] Hansen M N, Henriksen K, Sommer S G. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: effects of covering [J]. *Atmos Environ*, 2006, 309(22): 4 172-4 181.

[42] 秦晓波,李玉娥,万运帆,等. 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5 546-5 555.

[43] 徐华,邢光熹,蔡祖聪,等. 土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 499-505.

[44] 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[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 99-104.

[45] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.

[46] 李迎春. 中国农业氧化亚氮排放及减排潜力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.

[47] 康新立,华银锋,田光明,等. 土壤水分管理对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2013, 23(2): 43-46.

[48] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime [J]. *Atmos Environ*, 2007, 41 (37): 8 030-8 042.

[49] 袁伟玲,曹凑贵,程建平,等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估 [J]. 中国农业科学, 2008, 31 (12): 4 294 - 4 300.

[50] 孙会峰,周胜,陈桂发,等. 水稻品种对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1 595-1 602.

[51] 王玲,魏朝富,谢德体. 稻田甲烷排放的研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 158-162.

[52] 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.

Advances in Nitrous Oxide Emission and Its Reduction in Rice Field

XIA Shiming, CHEN Jie, JIANG Yulan, CHEN Lu, LIU He, LIU Lijun*

(Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 1st author: 349395838@qq.com; *Corresponding author: ljliu@yzu.edu.cn)

Abstract: Nitrous oxide is an important greenhouse gas in paddy field ecosystem and plays a vital role in the global greenhouse effect. This article deals with the generation mechanism of paddy nitrous oxide, the influencing factors of paddy nitrous oxide emissions, and technical measures taken to reduce nitrous oxide emissions as well. And from these three aspects, this article further gives an overview of research progress regarding paddy field nitrous oxide and then offers some assumptions for future research concerning reduction of paddy nitrous oxide emissions, expecting to provide a reference for the reduction of greenhouse gas emissions and nitrogen losses.

Key words: paddy field; nitrous oxide; greenhouse gas; reduction of emission

· 综合信息 ·

内蒙古自治区 2016 年审定通过的水稻新品种

审定编号 (蒙审稻)	品种名称	类型	选育单位	品种来源	全生育期 (d)	区试产量 (kg/667 m ²)	生试产量 (kg/667 m ²)
2016001 号	吉源梗稻 9	粳型常规稻	吉林省公主岭市吉源水稻种子培育中心; 吉林省皓然种子有限公司	以通院 6 号为母本、延梗 25 为父本进行人工杂交选育	147	598.55	632.00
2016002 号	中梗 133	粳型常规稻	吉林省公主岭市中亚水稻种子繁育有限公司; 吉林省珍实农业科技有限公司	以松梗 3 号 / 小珍珠 3 号为材料人工有性杂交选育	148	586.20	628.30
2016003 号	龙锋稻 1 号	粳型常规稻	黑龙江省龙江县丰吉种业有限公司	以绥梗 4 号 / 太阳花为材料采用系谱法选育	136	494.50	498.00
2016004 号	龙锋稻 2 号	粳型常规稻	黑龙江省龙江县丰吉种业有限公司	以空育 131/ 绥梗 3 号为材料采用系谱法选育	136	469.50	553.00

(中稻宣)