

施肥对稻田 N_2O 排放的影响

马二登^{1,2}, 马 静¹, 徐 华¹, 蔡祖聪¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 肥料施用是影响稻田 N_2O 排放的重要因素之一。以国内外相关文献为基础, 综述了肥料的种类、施用量、施用方式和施用时间对稻田 N_2O 排放的影响, 指出了有待研究的内容: 加强对土壤 N_2O 排放机理的研究; 进一步研究肥料施用对稻田 N_2O 排放的影响; 进一步研究施肥管理措施对稻田温室气体 (CH_4 和 N_2O) 排放的交互影响, 寻求科学合理、切实可行的减排措施。

关键词: N_2O 排放; 无机氮肥; 有机肥; 稻田

中图分类号: S513, X16 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)12-2453-06

Effects of Fertilization on Nitrous Oxide Emission from Paddy Fields: A Review

MA Er-deng^{1,2}, MA Jing¹, XU Hua¹, CAI Zu-cong¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Fertilizer application is one of the important factors affecting N_2O emission from paddy fields. Based on related literatures from China and abroad, this paper summarized the effects of fertilizer type, fertilizer quantity, fertilization pattern and the time of fertilization on N_2O emission from paddy fields. The research emphases in the future are to investigate the mechanism of N_2O emission, to further investigate N_2O emission from paddy fields as affected by fertilizer application, to further investigate the integrated effect of fertilization on greenhouse gases (CH_4 and N_2O) emissions from paddy fields and to find out feasible mitigation technologies.

Keywords: N_2O emission; inorganic fertilizer; organic fertilizer; paddy fields

氧化亚氮(N_2O)是大气中一种重要的温室气体, 其浓度的增加不仅加剧了全球温室效应, 而且导致臭氧层的破坏与地面紫外线辐射增强^[1]。在过去几十年里, N_2O 以每年约 $0.8 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的速率线性增加, 2005 年大气中 N_2O 浓度已达到 $319 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, 比工业化前的数值高 18%^[2]。农田土壤是大气 N_2O 的主要排放源之一, 其排放量占全球 N_2O 年排放总量的 24%^[3-4]。水稻是世界上最主要的农作物之一。我国是水稻生产大国, 水稻种植面积约占世界水稻种植总面积的

20%^[5], 我国稻田 N_2O 年排放量估算为 $169 \text{ Gg N}^{[6]}$ 。

为了提高耕地利用效率、增加农作物产量, 大量无机氮肥被投入到农田土壤中。据统计, 全球每年生产的无机氮肥总量可达到 $7 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7 \text{ t}^{[7]}$ 。我国是世界上氮肥年均消耗量最多的国家, 1995 年, 我国无机氮肥的消耗总量高达 $2.22 \times 10^7 \text{ t}$, 占世界氮肥消耗总量的 25%^[8]。农业生产实践中, 除了施用无机氮肥, 在有机农业迅速发展的地区则大力提倡施用有机肥以有利于土壤肥力的维持和提高^[9]。肥料的大量施用是导致农业土壤成为大气 N_2O 主要排放源的重要原因^[10-12]。本文以国内外相关文献为基础, 分别探讨了无机氮肥和有机肥施用种类、施用量、施用方式和施用时间对稻田 N_2O 排放的影响, 并指出了今后的研究重点。

1 无机氮肥对稻田 N_2O 排放的影响

土壤中 N_2O 主要是由微生物主导的硝化和反硝

收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2008DFA21330); 中国科学院知识创新重要方向项目群项目(KZCX2-YW-Q1-07); 国家自然科学基金项目(40671094)

作者简介: 马二登(1983—), 安徽定远人, 主要从事农田生态系统温室气体排放及其减排措施研究。E-mail: erdma@issas.ac.cn

通讯作者: 徐 华 E-mail: hxu@issas.ac.cn

化过程产生,大气中 N_2O 有 90%来源于这两个过程^[13]。大量研究表明^[14-16],施用无机氮肥能明显促进土壤 N_2O 排放,这是因为氮肥进入土壤后可以增加土壤氮素含量,为硝化反硝化过程提供底物 NO_3^- 和 NH_4^+ 。其中, NO_3^- 不仅可以促进反硝化速率,而且能够刺激 NO_3^- 还原酶活性,增加 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 比率^[17]。Mulvaney 等^[18]发现:在 O_2 的供应受到限制时, NH_4^+ 可以促进反硝化作用,导致 N_2O 生成量增加;同时, NH_4^+ 可以降低土壤的 pH,形成有利于 N_2O 产生的条件。Groot 等^[19]研究证实, NO_3^- 和 NH_4^+ 两种离子同时存在可促进 N_2O 的生成。

施肥不仅影响硝化和反硝化反应的进行,且能影响农作物的生长状况,在稻田生态系统中,作物植株的传输作用是 N_2O 从土壤进入大气的重要途径^[20],因此,施肥可通过影响水稻植株的传输能力影响 N_2O 的排放。另外,氮肥还能刺激作物根系生长和根系分泌物增加,进而影响土壤中微生物的生长及其活性,最终影响 N_2O 的产生与排放。

以上讨论的是无机氮肥影响稻田生态系统的 N_2O 直接排放(direct emission)。除此之外,施用无机氮肥还可以通过以下两种途径间接地影响 N_2O 排放:①氮肥分解转化后,生成 NH_3 与 NO_x 等可挥发性物质成分,而后通过沉降过程返回稻田或其他陆地生态系统表面;②硝态氮通过淋溶和径流进入地表水体或地下水。施用于稻田的氮肥通过以上两种途径进入稻田或其他陆地生态系统,并在这些系统中通过转化所产生和排放的 N_2O 称为 N_2O 间接排放(indirect emission)。与 N_2O 直接排放相比, N_2O 间接排放只占 N_2O 排放总量相当小的一部分^[21]。

具体而言,无机氮肥对稻田 N_2O 排放的影响因氮肥施用的种类、施用量、施用方式和施用时间的不同而异。

1.1 无机氮肥种类对稻田 N_2O 排放的影响

按其化学结构,无机氮肥可分为两大类:①铵态氮肥,主要包括碳酸氢铵、硫酸铵、氯化铵以及氨水等。另外,由于尿素经过水解可形成碳酸铵或碳酸氢铵,故也可列为铵态氮肥。②硝态-硝铵态氮肥,主要包括硝酸铵、硝酸钠、硝酸钾等。按其形态,无机氮肥可分为普通氮肥、包膜氮肥、控释氮肥等。

一般认为除无水氨外,各品种氮肥引起的 N_2O 排放无显著差异。无水氨能够促进 N_2O 的大量排放,但其机制还有待研究。Focht 和 Verstraete^[22]认为可能是 NH_3 抑制了硝化细菌的活性导致 NO_2^- 的积累。在我

国,农田化学氮肥以尿素和碳铵为主,少量硫铵。Xu 等^[23]观测到稻田施用硫铵比施用尿素排放出更多的 N_2O 。Breitenbeck 等^[24]96 d 的田间观测表明,尿素处理 N_2O 排放量始终低于硫铵处理。Lindau 等^[25]也发现,硫铵处理稻田所排放的 N_2O 要高于尿素处理,但都低于硝酸钾处理。而 Bronson 等^[26]的试验表明,施用硫铵对稻田 N_2O 排放的促进作用(与施用尿素相比)受到田间水分管理方式的制约。旱季孕穗期排水的稻田,施用硫铵处理所排放的 N_2O 多于施用尿素处理,原因可能是施用硫铵的稻田比施用尿素的稻田有着更为深厚的土壤好氧层,此时好氧条件下发生的硝化作用促进了土壤 N_2O 排放;而在雨季持续淹水的稻田,施用尿素处理与施用硫铵处理的 N_2O 排放量大致相同。

控释肥(CAF, controlled availability fertilizer)是既适应作物全生长期不同生育阶段氮素营养的需求,而又不使土壤中剩余无机氮浓度过高的一种可控释放氮肥。对于这种形态的氮肥能否减少 N_2O 排放已有一些报道,但结果不一。李方敏等^[27]试验结果表明,施用控释肥能减少稻田 N_2O 排放:施肥后 100 d 内,控释肥的 N_2O 累积排放量仅为复合肥的 13.45%~21.26%;全水稻生长季,控释肥处理的 N_2O 累积排放量仅为尿素处理的 71.17%。而 Yan 等^[28]同样在稻田中进行的试验却未得到施用控释氮肥能有效降低 N_2O 排放的结论。其原因可能是,稻田 N_2O 的排放峰值主要出现在烤田和复水期间,由于控释肥的缓释性和持续释放性,烤田落干时施用控释肥处理的土壤保持较高的 NH_4^+ 浓度,为落干时的土壤硝化作用提供了丰富的基质,促进了硝化作用,复水时则又积累了较多的硝态氮,促进了反硝化,因而导致 N_2O 排放增加。

1.2 无机氮肥施用量对稻田 N_2O 排放的影响

无机氮肥施用量显著影响土壤 N_2O 排放^[29-31]。稻田生态系统中,水稻生长季水分管理一致的条件下,不论是施用尿素还是硫铵, N_2O 的排放量都随氮肥施用量增加而升高^[23]。Li 等^[32]水稻盆栽试验发现,在持续淹水和间歇灌溉水分条件下,尿素的施入能够显著增加 N_2O 排放,且 N_2O 排放速率随着尿素施用量的增加而增加。Ma 等^[33]连续 3 年的田间观测试验结果也表明稻田 N_2O 排放随尿素施用量的增加而增加。

黄树辉等^[34]报道,在水稻生长季 5 个不同施肥处理下, N_2O 排放通量随施氮量增加而有不同程度的升高。在不施尿素、施 90 和 180 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素的处理中, N_2O 排放通量虽有随施氮量增加而升高的趋

势,但差异并不显著,只有施用尿素量在 270 和 360 kg N·hm⁻² 时,N₂O 排放通量才有明显升高。

1.3 无机氮肥施用方式对稻田 N₂O 排放的影响

无机氮肥施用方式可以通过影响氮肥利用率影响土壤的 N₂O 排放。尿素或碳酸氢铵无水层与土壤混合施用,与撒施方式相比可有效降低土壤反硝化损失,同时可使水稻增产^[35]。Yan 等^[28]观测到同是施肥后持续淹水,基肥与土壤混施后持续淹水期间几乎没有 N₂O 排放,而追肥撒施入表层水后 7 d 即出现明显的 N₂O 排放峰。Mosier 等^[36]在田间试验和温室试验中都观察到尿素施入水田后几天内即出现 N₂O 排放峰值,该试验施肥方式是表施。氮肥混施和表施,N₂O 排放存在如此明显的区别,其可能的原因在于水稻土中存在氧化层和还原层的分化,氧化层中的硝化过程对还原层中的反硝化过程起着至关重要的作用。基肥与土壤混施后,尽管土壤溶液中 NH₄⁺ 的浓度高,但由于深层土壤缺乏好氧条件,施入的 NH₄⁺ 难以被氧化成 NO₃⁻。由于缺乏反应基质,反硝化作用不能有效地进行,导致 N₂O 排放较少。当氮肥施用于土壤表层时,在水土界面好氧层中被氧化,生成 NO₃⁻,硝化作用产生的 NO₃⁻ 扩散进入表层以下的厌氧层,进行反硝化作用。这两个过程都将导致 N₂O 的产生和排放。由此可以看出,铵态氮肥深施或混施可以有效地减少稻田生态系统中的 N₂O 排放。

1.4 无机氮肥施用时间对稻田 N₂O 排放的影响

马静等^[37]田间试验表明,稻季施用氮肥可能会影响后续麦季的 N₂O 排放。与不施氮肥相比,水稻生长季施用氮肥能够减少后续麦季的 N₂O 排放,其原因可能是:稻季施用氮肥促进水稻根系的生长发育,水稻收割后残留在土壤中的水稻根茬影响了后续麦季的 N₂O 产生与排放。

2 有机肥对稻田 N₂O 排放的影响

与无机氮肥相比,有机肥对 N₂O 排放的影响要复杂得多。有机肥在分解过程中不仅能为土壤提供氮源,而且还能提高土壤中碳的含量,促进土壤微生物的生长和活动;如果有机肥的 C/N 比过大,会导致其分解过程中微生物吸收同化无机氮,使土壤无机氮含量下降;另外,土壤施用有机肥将会改变土壤结构及其物理环境。上述一系列物理、化学和生物因素的改变均会对 N₂O 的产生和排放产生重要影响。

有机肥矿化作用能为土壤补充矿质氮,为 N₂O 的产生过程提供反应底物,同时也增强土壤微生物活

性。秸秆的分解过程将消耗土壤中的氧,造成土壤局部厌氧环境,从而有利于硝化反硝化过程的进行,这些因素都将促进土壤 N₂O 排放。研究表明^[38-39],秸秆较高的 C/N 比容易引起土壤中氮素的固定,秸秆腐解过程中产生的化感物质会抑制土壤微生物活性。另外,作物秸秆施入土壤后将增加土壤中可溶性有机碳含量,从而降低 N₂O/N₂ 比率。这些因素均会导致农田 N₂O 排放的减少。

除了以上这些因素,有机肥的施用还导致土壤中参与硝化和反硝化过程的微生物在种类和数量上发生变化,这也是有机肥影响农田 N₂O 排放的一个方面。有机肥的施用还可以改变土壤水分含量和土壤温度等某些物理性质,从而对 N₂O 排放产生重要影响。

与化学氮肥一样,有机肥对稻田 N₂O 排放的影响也因其施用种类、施用量、施用方式和施用时间而异。

2.1 有机肥种类对稻田 N₂O 排放的影响

有机肥包括各种厩肥、秸秆、绿肥、棉籽粉、饼肥、沼气的沼渣和沼液等。不同种类的有机肥不仅含氮量差异很大,而且可分解性差异也很大。其中,有机肥含氮量是影响 N₂O 排放的关键指标。杨军等^[40]研究认为,无论是早稻还是晚稻,施用化肥+猪粪处理的 N₂O 排放量都高于施用化肥+蘑菇肥的处理。陈玉芬等^[41]大田试验也发现了相同的现象。造成这种结果的原因可能是由于两种有机肥供氮能力的差异,试验所用的两种有机肥(猪粪和蘑菇肥)的有机质含量之比为 1.4:1,有效氮之比为 1.2:1,猪粪肥中较高的含氮量将为 N₂O 的产生提供更为充足的硝化反硝化底物。邹建文等^[42]通过大田试验发现,4 种有机肥处理中,菜饼处理的 N₂O 排放量最大,其次是秸秆处理,牛厩肥和猪厩肥处理的 N₂O 季节排放总量最小。显然这主要是由于菜饼氮含量较高、C/N 比较小的缘故。Bronson 等^[26]在试验中发现,早季稻田施用草料处理在水稻抽穗期排水期间所排放的 N₂O 少于施用绿肥处理。原因在于:微生物分解 C/N 比大的草料时大量固定氮素;草料的施用加速了土壤好氧层和根际氧的消耗,导致土壤中可以发生硝化作用的微区减少;由于草料加入而产生的高浓度 CH₄ 可能会对硝化作用起到抑制作用,这些因素均减少了 N₂O 的产生和排放。

2.2 有机肥施用量对稻田 N₂O 排放的影响

由于稻/麦秸秆具有氮含量低和 C/N 比高的特点,它们在分解过程中可以不同程度地净同化无机氮,减少土壤进行硝化和反硝化作用的基质。因此,随着秸秆施用量的增加,被净同化的无机氮量随之增

加,导致 N_2O 排放减少。蒋静艳等^[39]大田试验发现,持续淹水条件下,稻田施用麦秆, N_2O 累积排放量减少,且 N_2O 累积排放量与麦秆的施加量成反比;中期烤田条件下,麦秆施用量为 $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的 N_2O 排放量与对照之间无明显差异,而施用 $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 麦秆处理的 N_2O 排放量仅为对照的 13% 左右。

2.3 有机肥施用方式对稻田 N_2O 排放的影响

秸秆还田方式影响稻田稻季 N_2O 排放。肖小平等^[43]对双季稻稻田 N_2O 排放的观测结果表明,稻草免耕还田处理的 N_2O 平均排放速率比翻耕还田和旋耕还田分别降低 42.1% 和 16.7%。不同耕作和秸秆还田方式可能导致耕作层土壤的氧化还原程度和均匀程度不同。土壤氧化还原的均匀性越好, N_2O 产生和排放量越少;反之,土壤氧化还原性的均匀性越差,容易导致 N_2O 的产生和排放。Ma 等^[37]观测了不同麦秆还田方式对稻田 N_2O 排放通量的影响。墒沟埋草处理中,非墒沟区域的 N_2O 排放量高于均匀混施处理,而墒沟的 N_2O 排放量低于均匀混施处理,总体上,墒沟埋草处理的 N_2O 排放量显著高于均匀混施处理。麦秆条带状覆盖还田处理中,麦秆带和非麦秆带区域的 N_2O 排放量均高于均匀混施处理,因此,麦秆条带状覆盖还田处理的 N_2O 排放量显著高于均匀混施处理。麦秆原位焚烧还田处理的 N_2O 排放量低于不施秸秆处理,但高于麦秆均匀混施处理。

秸秆还田方式也影响稻田麦季 N_2O 的排放。马二登等^[44]大田试验结果表明,与不施秸秆处理相比,秸秆表面覆盖处理的 N_2O 排放量增加了约 13%,而秸秆均匀混施与焚烧还田处理的 N_2O 排放量分别减少 18% 和 24%。

2.4 有机肥施用时间对稻田 N_2O 排放的影响

有关稻田秸秆还田对后续麦季 N_2O 排放影响的研究结果报道不一。马静等^[37]大田试验发现,稻季施用麦秆能够显著减少后续麦季的 N_2O 排放,并且这些减少量主要体现在小麦的播种-返青期。而焦燕等^[45]盆栽试验发现,稻季施用麦秆导致后续麦季 N_2O 排放量的增加,原因可能是:施用秸秆使土壤中有效态铁含量增加,增强硝化反硝化过程中亚硝酸还原酶的活性,从而增加 N_2O 排放。

稻田施用有机肥对后续麦季 N_2O 排放的影响受有机肥种类和稻季水分管理方式的制约:与仅施化肥相比,添加菜饼肥对后续麦季 N_2O 排放量无影响,添加麦秆可使后续麦季的 N_2O 排放量减少 15% 左右,而添加牛廐肥和猪廐肥可导致后续麦季的 N_2O 排放

量分别增加 29% 和 16%^[46];邹建文等^[47]研究发现,常规灌溉方式下,稻季施用麦秆处理的后续麦季 N_2O 排放量显著低于不施麦秆处理;而持续淹水方式下,两者无显著差异。

3 展望

总体而言,肥料种类、施用量、施用方式和施用时间均对稻田 N_2O 排放产生重要影响。因此,通过改善施肥管理可以有效地减缓稻田 N_2O 排放:控制土壤的外源氮投入量,提高氮肥利用率;选择合适的肥料种类,例如,施用尿素而避免施用硫酸铵和氨水,无机氮肥配合适量秸秆施用,调整还田有机肥组分以防止其 C/N 比过低等;采用科学的施肥方式,例如,无机氮肥采用土壤混施或深施,稻/麦秸秆以均匀混施方式还田等。

关于施肥影响稻田 N_2O 排放的报道很多,然而土壤 N_2O 排放主要来源于硝化和反硝化过程,严格区分土壤 N_2O 的产生机制仍存在很大困难;以往研究中,有关控释肥和秸秆还田时间对稻田 N_2O 排放影响的研究结果之间还存在着很大差异;氮肥和有机肥配合施用是稻田施肥的必然趋势,有关两种肥料对稻田 N_2O 排放可能的交互影响鲜见报道;稻田 CH_4 和 N_2O 排放存在互为消长的关系,研究某一农业管理措施如施肥对稻田 N_2O 排放的影响,还应考虑该措施对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应。因此,今后应加强以下几方面研究工作:①加强对土壤 N_2O 排放机理的研究:应用先进的观测手段,深入研究与 N_2O 排放关系密切的硝化和反硝化过程;②进一步研究肥料施用对稻田 N_2O 排放的影响:阐明稻田 N_2O 排放与肥料施用之间的相互关系,探索无机肥与有机肥对稻田 N_2O 排放的交互影响;③进一步研究施肥管理措施对稻田温室气体(CH_4 和 N_2O)排放的综合影响,寻求科学合理、切实可行的减排措施。

参考文献:

- [1] Cruzen P J. The influence of nitrogen oxide on the atmospheric ozone content[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1970, 96: 320-325.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [R/OL]. http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Ch02.pdf.
- [3] Kroeze C, Mosier A R, Bouwman A F. Closing the global N_2O budget: a retrospective analysis 1500-1994[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13: 1-8.
- [4] Mosier A R, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global N_2O budget:

- nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52: 225–248.
- [5] 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[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16: 1091–1101.
- [6] ZOU Jian-wen, HUANG Yao, LU Yan-yu, et al. Direct emission factor for N_2O from rice–winter wheat rotation systems in southeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 4755–4765.
- [7] Fixen P E, West F B. Nitrogen fertilizers: meeting contemporary challenges [M]. *Ambio*, 2002, 31: 1690.
- [8] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴(1996) [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- Editorial Committee of Agriculture Year Book of China. China agriculture yearbook (1996) [M]. Beijing: Agricultural Press, 1996.
- [9] 周文利, 汤利, 苗艳芳, 等. 我国有机肥料资源、加工的现状及存在的问题[J]. 江西农业学报, 2007, 19(9): 83–85.
- ZHOU Wen-li, TANG Li, MIAO Yan-fang, et al. Actuality and existing problems of organic fertilizer resources and machining in China[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2007, 19(9): 83–85.
- [10] 蒋静艳, 黄耀. 农业土壤 N_2O 排放的研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, 20(1): 51–54.
- JANG Jing-yan, HUANG Yao. Advance in research of N_2O emission from agricultural soils[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(1): 51–54.
- [11] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 土壤中氧化亚氮的产生及减少排放量的措施[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 143–148.
- WANG Cai-rong, TIAN Xiao-hong, LI Sheng-xiu. Nitrous oxide emissions from soils and strategy for reducing N_2O emission[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(2): 143–148.
- [12] 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, 23(4): 47–52.
- XIE Jun-fei, LI Yu-e. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils[J]. *Agricultural Meteorology*, 2002, 23(4): 47–52.
- [13] Bouwman A F. Soils and greenhouse effect[M]. New York: Wiley, 1990: 61–127.
- [14] Dobbie K E, McTaggart I P, Smith K A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D21): 26891–26899.
- [15] 侯爱新, 陈冠雄, Cleemput O V. 不同种类氮肥对土壤释放 N_2O 的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2): 176–180.
- HOU Ai-xin, CHEN Guan-xiong, Cleemput O V. Effect of different nitrogen fertilizers on N_2O emission from soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(2): 176–180.
- [16] XING Guang-xi, ZHU Zhao-liang. Preliminary studies on N_2O emissions fluxes from upland soils and paddy soils in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 17–22.
- [17] Knowles R, Blackburn T H. Isotopic techniques in plant, soil and aquatic biology[M]. San Diego: Academic Press, 1993: 181–208.
- [18] Mulvaney R I, Khan S A, Mulvaney C S. Nitrogen fertilizers promote denitrification[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 24: 211–220.
- [19] Groot C J D, Vermoesen A, Cleemput O V. Laboratory study of the emission of N_2O and CH_4 from a calcareous soil[J]. *Soil Science*, 1994, 158: 355–364.
- [20] Mosier A R, Mohanty S K, Bhadrachalam A. Influence of rice plants on the evolution of N_2 and N_2O from the soil to the atmosphere [J]. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1990, 60: 115–120.
- [21] ZHENG Xun-hua, HAN Sheng-hui, HUANG Yao, et al. Requantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB2018.
- [22] Focht D D, Verstraete W. Biochemical ecology of nitrification and denitrification[C]//Advances in Microbial Ecology. Alexander M. Plenum Press, New York, 1997.
- [23] XU hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Nitrous oxide emissions from there rice paddy fields in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 23–28.
- [24] Breitenbeck G A, blackmer A M, Bremner J M. Effects of different nitrogen fertilizers on emission of nitrous oxide from soil[J]. *Geophysical Research Letters*, 1980, 7: 85–88.
- [25] Lindau C W, Delaune R D, Patrick W H, et al. Fertilizer effect on nitrogen, nitrous oxide, and methane emissions from Lowland Rice[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54: 1789–1794.
- [26] Bronson K F, Neue H U, Singh U, et al. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. residue, nitrogen, and water management [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 981–987.
- [27] 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): 2170–2174.
- LI Fang-min, FAN Xiao-lin, LIU Fang, et al. Effects of controlled release fertilizers on N_2O emission from paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2170–2174.
- [28] YAN Xiao-yuan, SHI Shu-lian, DU Li-juan, et al. Pathways of N_2O emission from rice paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 437–440.
- [29] Byrnes B H. Environmental effects of N fertilizer use an overview[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 26: 209–215.
- [30] Erichsen M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soil: summary of available data[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19(4): 272–280.
- [31] Mosier A R, Schimel D S. Influence of agricultural nitrogen on atmospheric methane and nitrous oxide[J]. *Chemistry and Industry*, 1991, 23: 874–877.
- [32] LI Yue, LIN Er-da, RAO Min-jie. The effect of agricultural practices on methane and nitrous oxide emissions from rice field and pot experiment[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 49: 47–50.
- [33] MA Jing, LI Xiang-lan, XU Hua, et al. Effects of nitrogen fertilizer and wheat straw application on CH_4 and N_2O emissions from a paddy rice field[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45: 359–367.
- [34] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N_2O 排放的影响

- [J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 540–543.
- HUANG Shu-hui, JIANG Wen-wei, LU Jun, et al. Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N_2O emissions in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 540–543.
- [35] 朱兆良, 张绍林, 徐银华. 种稻下氮素的气态损失与氮肥品种及施用方法的关系[J]. 土壤, 1987, 19: 5–12.
- ZHU Zhao-liang, ZHANG Shao-lin, XU Yin-hua. Gaseous loss of nitrogen and its relationship to fertilizers and fertilization approach in paddy soil[J]. *Soils*, 1987, 19: 5–12.
- [36] Mosier A R, Mohanty S K, Bhadrachalam A, et al. Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9: 61–67.
- [37] MA Jing. Effect of straw and nitrogen fertilizer application on CH_4 and N_2O emission from rice fields[D]. PhD thesis. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing, 2008.
- [38] 黄益宗, 张福珠, 刘淑琴, 等. 化感物质对土壤 N_2O 释放影响的研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5): 478–482.
- HUANG Yi-zong, ZHANG Fu-zhu, LIU Shu-qin, et al. Effect of allelochemicals on N_2O emission from soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(5): 478–482.
- [39] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552–556.
- JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of water controlling and straw application on CH_4 and N_2O emissions from rice field[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 552–556.
- [40] 杨军, 杨崇, 吕雪娟, 等. 广州地区施用不同有机肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 华南农业大学学报, 1999, 20(1): 123–124.
- YANG Jun, YANG Chong, LU Xue-juan, et al. Study on emission of N_2O from rice paddy field fertilized by using deferent basic manure in the Guangzhou area[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1999, 20(1): 123–124.
- [41] 陈玉芬, 杨军, 顾尉蓝, 等. 广州地区晚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, 1999, 20(2): 80–84.
- CHEN Yu-fen, YANG Jun, GU Wei-lan, et al. Relation between nitrous oxide emission flux and fertilization and irrigation of the late rice paddy-fields in guangzhou area[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1999, 20(2): 80–84.
- [42] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7–12.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(4): 7–12.
- [43] 肖小平, 伍芬琳, 黄凤球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 629–632.
- XIAO Xiao-ping, WU Fen-lin, HUANG Feng-qiu, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(5): 629–632.
- [44] 马二登, 马静, 徐华, 等. 稻秆还田方式对麦田 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2007, 39(6): 870–873.
- MA Er-deng, MA Jing, XU Hua, et al. Effects of rice straw returning methods on N_2O emissions from wheat-growing season[J]. *Soils*, 2007, 39(6): 870–873.
- [45] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同水稻土水稻生长季施用秸秆对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(1): 36–40.
- JIAO Yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Effect of straw incorporation to different soils in rice-growing season on N_2O emission in following wheat-growing season[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(1): 36–40.
- [46] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田不同种类有机肥施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1264–1268.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Effect of organic material incorporation in rice season on N_2O emissions from following winter wheat growing season[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7): 1264–1268.
- [47] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4): 409–414.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Effects of water regime and straw application in paddy rice season on N_2O emission from following wheat growingseason[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(4): 409–414.