

# 不同肥料的施用对稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响及其减排措施

韩鹏飞, 郭敏 (南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095)

**摘要** 稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放受水分、温度、施肥情况、有机质含量、pH 值、氧化还原电位 (Eh) 等诸多环境因素的影响, 而水分和肥料是稻田温室气体排放的 2 大驱动因子。综述了不同肥料施用对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响, 并提出了相应的温室气体减排措施。

**关键词** 施肥; 稻田;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ; 排放; 减排措施

中图分类号 S147.2 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)17-08153-03

## Effects of Different Fertilizer Applications on the Emission of Methane and Nitrous Oxide from Paddy Field and Its Mitigation Measures of Emission

HAN Peng-fei et al (College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095)

**Abstract** The emissions of methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) from paddy field are affected by several environmental factors, such as water, temperature, status of fertilizer application, organic matter content, pH value, Eh. However, water and fertilizers are two main driving factors of gas emission in greenhouse of paddy field. The effects of different fertilizer applications on the emission of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  from paddy field were reviewed. And some corresponding emission mitigation measures of greenhouse gas were put forward.

**Key words** Fertilization; Paddy field;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ; Emission; Mitigation measures of emission

$\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  被认为是 2 种最重要的温室气体,  $\text{CH}_4$  的增温效应是  $\text{CO}_2$  的 15 ~ 30 倍,  $\text{N}_2\text{O}$  的增温效应是  $\text{CO}_2$  的 150 ~ 200 倍<sup>[1]</sup>。稻田是大气  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的重要排放源之一, 其  $\text{CH}_4$  排放量占大气总来源的 8% ~ 13% 左右<sup>[2-3]</sup>。我国是水稻种植大国, 水稻总产与种植面积分别占全球的 34% 和 22%<sup>[4]</sup>。IPCC 第四次评估报告指出, 已观测到的  $\text{CH}_4$  浓度的增加很可能主要是由于农业生产活动和化石燃料的使用。 $\text{N}_2\text{O}$  浓度的增加主要是由于农业<sup>[5]</sup>。

肥料是稻田温室气体排放的主要驱动因子之一。全球人为排放  $\text{N}_2\text{O}$  的 60% ~ 90% 直接来源于农田施用氮肥<sup>[6-8]</sup>, 中国目前农田氮肥消费量(纯 N) 年均在 2 000 万 t 以上, 约占全球的 27%, 居世界首位<sup>[9-10]</sup>。施用氮肥直接导致的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量约占全球的 20%<sup>[9]</sup>。目前, 人们已认清了许多稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的现象和规律, 并初步提出了一些减排途径<sup>[11]</sup>, 其中, 肥料施用和管理的合理与否相当重要, 广大科学工作者围绕这一问题进行了大量的研究, 取得了丰硕的研究成果。笔者依据这些成果, 对施肥对稻田土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放的影响作一综述, 以期为致力于这方面研究的科学工作者提供参考。

## 1 $\text{CH}_4$

**1.1 稻田  $\text{CH}_4$  产生和排放的机理** 稻田  $\text{CH}_4$  的排放是土壤  $\text{CH}_4$  产生、再氧化及排放传输 3 个过程相互作用的结果。 $\text{CH}_4$  的产生是这个体系中的第一步, 其数量的大小会直接影响排放通量的大小。 $\text{CH}_4$  的形成是产  $\text{CH}_4$  菌利用土壤中碳水化合物代谢过程中的产物产生的<sup>[11]</sup>。 $\text{CH}_4$  菌存活在厌氧条件下, 要求氧化还原电位 (Eh) 低于 -200 mV, pH 值在 6.0 ~ 8.0。在稻田中,  $\text{CH}_4$  产生主要发生在稻田土壤耕作层 2 ~ 20 cm, 但不同的农田作业对此有很大的影响。意大利稻田中 7 ~ 17 cm 土壤层是重要的  $\text{CH}_4$  产生区域, 13 cm 处的  $\text{CH}_4$  产生率最大, 而我国湖南地区由于独特的有机肥铺施操作, 土壤中  $\text{CH}_4$  的产生在耕作层以下 3 ~ 7 cm 就到达最大值<sup>[12-13]</sup>。

氧化在稻田  $\text{CH}_4$  的排放过程中起着重要的作用。观测表明, 稻田中  $\text{CH}_4$  排放量占  $\text{CH}_4$  产生量的 3% ~ 81%<sup>[13-14]</sup>。一些研究认为氧化过程能消耗稻田土壤所产生  $\text{CH}_4$  总量的 50 ~ 90%<sup>[13-15]</sup>。土壤中消耗  $\text{CH}_4$  的细菌主要有甲烷氧化细菌和硝化细菌, 但硝化细菌氧化  $\text{CH}_4$  的最大速率要比甲烷氧化细菌氧化  $\text{CH}_4$  的最小速率小约 5 倍<sup>[15]</sup>, 因此可以认为土壤  $\text{CH}_4$  的氧化主要由甲烷氧化细菌来完成<sup>[16-17]</sup>。土壤中的  $\text{CH}_4$  主要通过 3 种途径排入大气中<sup>[1]</sup>: 大部分被植株根系等吸收, 随着养分的输送再经作物的通气组织排放到大气中; 形成含  $\text{CH}_4$  的气泡, 气泡上升到水面破裂而喷射到大气中; 少量  $\text{CH}_4$  是由于浓度梯度的形成沿土壤-水和水-气界面而扩散排出。在水稻生长的大多数阶段, 一般认为大约 90% 的  $\text{CH}_4$  排放量是通过水稻植物体排到大气中去的<sup>[13]</sup>。

## 1.2 施用不同肥料对稻田 $\text{CH}_4$ 排放的影响

**1.2.1 施有机肥。**不同有机肥料对稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响研究结果不尽相同。但一般认为, 腐熟的有机肥施用为产甲烷菌提供极为丰富的产  $\text{CH}_4$  基质, 导致土壤产生更多的  $\text{CH}_4$ , 从而增加其排放<sup>[18-19]</sup>; 然而研究表明经过发酵的沼渣施用并不显著增加稻田  $\text{CH}_4$  排放<sup>[2,18]</sup>。 $\text{CH}_4$  排放的增加程度受土壤成分的影响。此外, 有机肥的施用种类对稻田  $\text{CH}_4$  排放量的影响也有差别。王增远等发现在中国北方稻田, 施用猪粪  $\text{CH}_4$  排放通量最大, 施稻草次之, 施用牛粪则最低<sup>[20]</sup>。邹建文等研究指出, 菜饼、秸秆、牛厩肥、化肥和猪厩肥各处理的全球增温潜势 (GWP) 为从高到低。单位产量的 GWP 以秸秆处理最高, 菜饼次之, 牛厩肥比化肥处理略高, 猪厩肥处理最低<sup>[21]</sup>。蒋静艳计算了相同水分管理条件下不同水平有机质处理与对照的 GWP 比值, 结果表明施加有机质处理无论是烤田还是淹水条件, 其 GWP 是对照的 2.0 ~ 5.4 倍, 说明有机质的施加总体上是增强温室效应的<sup>[22]</sup>。

**1.2.2 施化肥。**施用化肥可能影响土壤 pH 值、Eh 值等, 而引起  $\text{CH}_4$  排放量的增减。但不同的试验结果差异很大, 有的甚至相反。在太湖地区研究发现, 太湖地区单季稻施用尿素比施用碳铵  $\text{CH}_4$  排放量增加 10% ~ 70%<sup>[19]</sup>, 在杭州的试验也观测到尿素使  $\text{CH}_4$  排放增加<sup>[23]</sup>; 而在中国北京观测到

施用碳铵基本上不能减少稻田  $\text{CH}_4$  的排放,而尿素却比碳铵能更有效地减少  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[24]</sup>。Wang 等认为尿素对  $\text{CH}_4$  释放的不同作用可能是由于它可以提高土壤 pH 值,大多数酸性土壤中施入尿素后土壤 pH 值变得有利于  $\text{CH}_4$  形成,而中性或碱性土壤中施入尿素后则由于 pH 值升高抑制  $\text{CH}_4$  形成。Jakobsen 等发现稻田施用  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  使  $\text{CH}_4$  排放减少<sup>[26]</sup>。研究还发现,稻田施包膜复合肥处理比仅施有机肥或仅施尿素年  $\text{CH}_4$  排放分别减少 73.4% 和 48.6%<sup>[27]</sup>。

**1.2.3 稻草还田。**稻草还田在我国各稻区普遍应用。Yagi 等在日本研究发现,当稻田施用稻草时, $\text{CH}_4$  排放量提高 1.8~3.6 倍<sup>[28]</sup>。陈苇等研究表明,稻草无论采用翻施或表施,与仅施尿素比,均显著地提高稻田  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[29]</sup>。综合考虑水稻生长季  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的 GWP,在按 4.5 t/hm<sup>2</sup> 施用量秸秆还田的情况下,烤田的 GWP 只占连续淹水处理的 60%<sup>[24]</sup>。

### 1.3 稻田 $\text{CH}_4$ 的施肥减排措施

**1.3.1 用沼渣代替常规有机肥。**稻田施用有机厩肥、绿肥或秸秆直接还田明显促进稻田  $\text{CH}_4$  排放,施用堆腐秸秆能极大地降低  $\text{CH}_4$  排放量。施用灭过菌的沼渣也明显降低  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[2,18]</sup>。沼渣廉价、可再生、分布广泛,能有效降低  $\text{CH}_4$  排放量达到减排目的,具有客观的经济价值和环境效益<sup>[30]</sup>。

**1.3.2 化肥与有机肥配合使用。**化肥代替有机肥虽能有效地减少稻田  $\text{CH}_4$  排放,但长期使用化肥对土壤和生态环境产生较大影响。有机肥是保持土壤肥力、保证农田生态系统可持续发展的重要措施之一,且价格较低,所以在大量使用有机肥的水稻产区可以实行有机肥和化肥混施的方法来减少稻田  $\text{CH}_4$  排放<sup>[31]</sup>。化肥使用  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$  会使  $\text{CH}_4$  排放减少,因为有  $\text{SO}_4^{2-}$  存在下的硫酸盐还原细菌对于产  $\text{CH}_4$  细菌具有明显的抑制效应<sup>[26]</sup>。

**1.3.3 秸秆表施。**改变稻草的施用方式,采用稻草表施,可显著降低稻草  $\text{CH}_4$  排放量,约比稻草翻施减少 11%。其原因主要是由于减少稻草与土壤的接触,部分稻草在土壤表层进行有氧降解,其降解产物在土壤氧化层中还原产生  $\text{CH}_4$  的可能性较小,主要产物以  $\text{CO}_2$  的形式排放,降低了稻田因施用稻草  $\text{CH}_4$  排放的增加值<sup>[29]</sup>。

**1.3.4 研制和应用  $\text{CH}_4$  抑制剂。**在不影响水稻产量且不破坏环境的前提下,研制肥料型甲烷抑制剂,如中国农业科学院研制的 AM-AR2 肥料型甲烷抑制剂,主要原料为特种腐殖酸,可将有机质转化为腐殖质,增加稻谷产量的同时,减少形成甲烷的基质,研究表明它可降低稻田甲烷排放量的 30.5%<sup>[30-31]</sup>。

## 2 $\text{N}_2\text{O}$

**2.1 稻田  $\text{N}_2\text{O}$  产生和排放的机理** 随着对  $\text{N}_2\text{O}$  排放机理认识的深入以及信息技术的发展,许多学者发展了基于机理或过程的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量估算模型。过程机理模型关注  $\text{N}_2\text{O}$  产生排放的动力过程。这些模型的建立大都得益于 Firestone 和 Davidson 的描述,即 HP 模型(Hole in the Pipe)。该模型将通过硝化和反硝化过程产生  $\text{N}_2\text{O}$  的氮的转化过程比喻成在带有孔洞的管道中的液体的流动。孔洞的尺寸决定了  $\text{N}_2\text{O}$ 、NO 的相对排放量,而管道中孔洞的尺寸由许多因素决定,如土

壤水分状况、土壤通气状况、土壤 pH 值、土壤质地等,  $\text{N}_2\text{O}$ /NO 比主要取决于土壤湿度<sup>[32]</sup>。土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的产生要经历一个复杂的物理、化学和生物学过程,主要是在微生物的参与下,通过硝化和反硝化作用完成的<sup>[33]</sup>。在透气条件下,氨或铵盐通过微生物的作用被氧化成亚硝酸盐和硝酸盐,这一过程称为硝化作用。反硝化是在嫌气条件下,多种微生物将硝态氮还原成氮气( $\text{N}_2$ )和氧化氮( $\text{N}_2\text{O}$ 、NO)的过程,造成土壤中氮元素以  $\text{N}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 NO 的形态向大气逸失。

### 2.2 施用不同肥料对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

**2.2.1 氮肥的施用。**氮肥的施用对农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放有明显的促进作用<sup>[34]</sup>。化肥氮转化为  $\text{N}_2\text{O}$  的比例在 0.1%~1.4% 左右,其转化率受环境因素和其他管理措施的影响<sup>[35]</sup>。 $\text{N}_2\text{O}$  的释放速率不完全取决于土壤的含氮水平,而与植物对 N 的利用率有关,过量施加氮肥导致  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率增加<sup>[36-37]</sup>。相对于含氮量相同的有机肥,化肥对农田中  $\text{N}_2\text{O}$  的排放贡献更大<sup>[11,38]</sup>。不同肥料品种和施肥量引起  $\text{N}_2\text{O}$  形成与排放量也存在差异, $\text{NH}_4^+$ -N 肥、 $\text{NO}_3^-$ -N 肥和尿素  $\text{N}_2\text{O}$  排放损失率分别为 0.01%~0.94%、0.04%~0.18% 和 0.15%~1.98%。另外,在不同土壤类型及其他各种条件影响下,结果也有较大差异<sup>[38]</sup>。

**2.2.2 有机肥料施用。**对于含氮量相同的有机肥和化学氮肥,由于有机肥中存在更多可分解的有机碳,从而土壤还原性提高, $\text{NH}_4^+$  被氧化成  $\text{NO}_3^-$ ,紧接着在反硝化作用下被还原成  $\text{N}_2$ ,所以  $\text{N}_2\text{O}$  主要产生在硝化作用阶段<sup>[11]</sup>。秸秆区和习惯性施肥区温室效应较大,化肥区和习惯性施肥区  $\text{N}_2\text{O}$  温室效应较大,其中综合温室效应以秸秆区最大,习惯性施肥区和化肥区次之,无肥区最低<sup>[39]</sup>。

**2.2.3 有机无机肥混合施用。**试验表明,与单独施用化肥相比,施用菜饼+化肥促进  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,其季节排放总量分别增加了 252% 和 22%;施用小麦秸秆+化肥和牛厩肥+化肥明显增加  $\text{CH}_4$  排放,增加量分别为 250% 和 45%,同时却减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放,分别减少 18% 和 21%;施用猪厩肥+化肥降低  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,分别降低 4% 和 18%。对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的综合温室效应分析表明,菜饼和秸秆处理的 GWP 约为化肥处理的 2.5 倍,牛厩肥和化肥处理基本持平,但施用猪厩肥可减少 10%~15%。各处理的 GWP 从高到低依次为菜饼、秸秆、牛厩肥、化肥和猪厩肥<sup>[40]</sup>。对烤田期稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的观测表明,堆肥加尿素处理田块的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量比  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  处理田块少 30% 左右<sup>[11]</sup>。

### 2.3 稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 的施肥减排措施

**2.3.1 调整 N、P、K 比例。**我国 N P K 为 1.00 0.45 0.16,与世界 N P K 比例 1.00 0.45 0.27 相比,钾肥比例太小<sup>[41]</sup>。稻田氮肥的过量施用为硝化反硝化的进行提供丰富的氮素基础,合适的水分条件会释放大量  $\text{N}_2\text{O}$ 。减小化学氮肥的相对增加量,提高钾肥用量,有助于减缓稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。

**2.3.2 研制和应用缓释和控释肥料。**氮肥中氮素不能被农作物充分吸收的一个重要原因是现有化学肥料溶解过快,加速了养分的挥发、淋失和土壤微生物的分解。缓释肥料是指养分释放速率小于速溶性肥料释放速率的肥料;而控释肥料

指能够根据作物的需肥特性,减缓或促进养分释放,做到缓促结合,双向调节,使养分释放规律与作物养分需求特性相匹配的肥料<sup>[42]</sup>。与速效氮肥相比,缓释/控释肥料明显减少 N<sub>2</sub>O 等温室气体排放,还具有减轻农业面源污染、提高氮肥利用率、节省施肥劳动力等优势。但由于包膜材料、包膜工艺发展缓慢,包膜肥料养分释放评价方法相对滞后,包膜肥料价格偏高等因素,其推广受到一定限制。

**2.3.3 添加脲酶和硝化抑制剂。**脲酶抑制剂和硝化抑制剂分别用来减缓土壤中尿素酰胺态氮水解至铵态氮,抑制硝化过程,减少 N<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub> 等气态损失。如果将二者合理施用,使氮素转化过程得到有效控制,使施入土壤的氮肥尽可能为农作物吸收利用,对于减缓农田 N<sub>2</sub>O 排放潜力巨大<sup>[30]</sup>。目前,市场上也有将脲酶抑制剂和硝化抑制剂添加到氮肥中的成品化肥,但由于价格偏高,其推广受到影响,但随着科技的进步,成本的降低,必将为温室气体减排做出贡献。

#### 参考文献

- [1] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003:1.
- [2] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001:83-172.
- [3] 王明星. 大气化学[M]. 北京: 科学出版社, 2001:35.
- [4] 黄耀, 张稳, 郑循华, 等. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计[J]. 生态学报, 2006, 26(4):980-988.
- [5] FORSTER P, RAMASWAMY V, ARIAX O P. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing in di nate charge 2007[R]. Cambridge, Uk and New York, USA: The physical Science Basis, 2007.
- [6] IPCC. The initial core projects[R]. Backnell UK: International Geosphere and Biosphere Program, 1990.
- [7] FAO & IAEA. Measurement of methane and nitrous oxide emission from agriculture[R]. Vienna International Atomic Energy Agency, 1992.
- [8] 国家统计局农村社会经济统计司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1996.
- [9] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Backnell, UK, 1996.
- [10] 丁洪, 王跃思, 李卫华. 玉米-潮土系统中不同氮肥品种的反硝化损失与 N<sub>2</sub>O 排放量[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12):1886-1891.
- [11] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2):231-237.
- [12] TAKA Y. The mechanism of methane fermentation in flooded paddy soil[J]. Soil Sci and Hart Ntr, 1970, 16:238-244.
- [13] 上官行健, 王明星. 稻田土壤中的 CH<sub>4</sub> 产生[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5):1-12.
- [14] SCH TZ H, HOLZAPFEL PSCHORN A, CONRAD R, et al. A 3-year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rate from an Italian rice paddy[J]. J Geophys Res, 1989, 94:16406-16416.
- [15] WANG MX, SHANGGUAN X J, SHEN R X, et al. Methane production, emission and possible control measures in the rice agriculture[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1993, 10(30):307-314.
- [16] 蔡祖聪, 颜晓元, 鹤田治雄, 等. 丘陵区稻田 CH<sub>4</sub> 排放的空间分布[J]. 土壤学报, 1995(32):151-159.
- [17] BENDER M, CONRAD R. Methane oxidation activity in various soils and fresh water sediments: occurrence, characteristics, vertical profiles and distribution on grain size fraction[J]. J Geophys Res, 1994, 99:16531-16540.
- [18] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005:43-46.
- [19] 熊效振, 沈壬兴, 王明星, 等. 太湖流域单季稻的甲烷排放研究[J]. 大气科学, 1999, 23(1):9-18.
- [20] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 稻田甲烷排放及其控制[J]. 作物杂志, 1998(3):10-11.
- [21] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4):7-12.
- [22] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):552-556.
- [23] WASSMANN R, SCHUEITZ H. Quantification of methane emissions from Chinese rice fields (Zhejiang Province) as influenced by fertilizer treatment[J]. Biogeochemistry, 1992, 20:83-101.
- [24] CHEN Z L, LI D B. Features of CH<sub>4</sub> emission from rice fields in Beijing and Nanjing[J]. Chemosphere, 1993, 26:239-245.
- [25] WANG Z, KLUDZE C R, PATRICK W H, et al. Soil characteristics affecting methane production and emission in flooded rice [M]// PENG S. Climate change and rice. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1995:81-90.
- [26] JAKOBSEN P, PATRICK W H, WILLIAMS B G. Sulfide and methane formation in soil and sediments[J]. Soil Sci, 1981, 132:279-287.
- [27] 林匡飞, 项雅玲, 姜达炳, 等. 湖北地区稻田甲烷排放量及控制措施的研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5):267-270.
- [28] YAGI K, MINAMI K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy field[J]. Soil Science and Hart Nutrition, 1990, 36(4):599-610.
- [29] 陈苇, 卢婉芳, 段彬伍. 稻草还田对晚稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(2):170-176.
- [30] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>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.
- [31] 林而达, 李玉娥, 饶敏杰, 等. 稻田甲烷排放量估算和减缓技术研究[J]. 农村生态环境, 1994, 10(4):55-58.
- [32] 卢燕宇. 基于模型和 GIS 技术的中国农田化学氮源 N<sub>2</sub>O 直接排放量估计[D]. 南京: 南京农业大学, 2007:9-11.
- [33] 张振贤, 华珞, 尹逊霄, 等. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 的发生机制及其主要影响因素[J]. 首都师范大学学报, 2005, 26(3):114-120.
- [34] DOBBIE K E, MC TAGGART 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.
- [35] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰, 等. 不同种类氮肥对土壤释放 N<sub>2</sub>O 的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2):176-180.
- [36] 李楠, 陈冠雄. 植物释放 N<sub>2</sub>O 速率及施肥的影响[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3):295-298.
- [37] 曾江海, 王智平, 张玉铭, 等. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N<sub>2</sub>O 通量及总量估算[J]. 环境科学, 1995, 16(1):32-35, 67.
- [38] XING G X, ZHU Z L. Preliminary studies on N<sub>2</sub>O emissions fluxes from upland soils and paddy soils in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49:2217-2221.
- [39] 李琳, 胡立峰, 陈阜, 等. 长期不同施肥类型对稻田甲烷和氧化亚氮排放速率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1):707-710.
- [40] 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<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7):1264-1268.
- [41] 邢光熹, 颜晓元. 中国农田 N<sub>2</sub>O 排放的分析估算与减缓对策[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4):1-6.
- [42] 武志杰, 陈利军. 缓释/缓控肥料:原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003:9-25.
- [5] 夏继红, 严忠民. 生态河岸带研究进展与发展趋势[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3):252-255.
- [6] 郭会哲, 樊巍, 宋绪宗. 库滨带植被结构功能及修复技术研究发展[J]. 河南林业科技, 2005, 25(4):1-3.

(上接第8143页)

四川林勘设计, 2007(1):13-16.

- [4] 高甲荣, 王芳. 密云水库集水区河岸生物工程措施初探[J]. 北京水务, 2006(2):38-41.