

稻田 CH₄ 和 N₂O 排放消长关系及其减排措施

李香兰^{1,2}, 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:稻田 CH₄ 和 N₂O 排放存在互为消长的关系, 此种关系不受时间、空间及有无水稻植株的影响, 考虑稻田 CH₄ 减排措施的同时必须兼顾该措施对 N₂O 排放的促进作用。本文从水分管理、施肥管理、水稻品种、甲烷抑制剂及脲酶/硝化抑制剂、耕种方式及耕作制度等方面综述了近年来关于稻田 CH₄ 和 N₂O 减排措施的研究, 以期从农业实践中总结缓解稻田 CH₄ 和 N₂O 排放引起的综合温室效应的生产措施。分析表明, 稻田低施氮水平条件下进行中期烤田是减少 CH₄ 和 N₂O 排放的有效措施, 有机秸秆进行堆腐好氧分解后施入或在休闲期(如秋季或冬季)施入稻田表现出较好的应用前景, 施用甲烷抑制剂、脲酶抑制剂及硝化抑制剂和缓释/控释肥料对降低稻田温室气体排放及提高作物产量意义重大。

关键词:稻田; CH₄; N₂O; 消长关系; 减排措施

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672–2043(2008)06–2123–08

Trade-off Relationship and Mitigation Options of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice Paddy Field

LI Xiang-lan^{1,2}, 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: A trade-off relationship was found existing between methane(CH₄)and nitrous oxide(N₂O)emissions from rice paddy field and was not affected by seasonal variation, spatial changes and whether the crop was planted or not. Mitigation of CH₄ emission would bring about more N₂O emission. Effects of both CH₄ and N₂O emissions from rice paddy field on global warming potential(GWP)should be taken into consideration when any mitigation options are to be established. In this paper, studies focused on mitigating CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields were summarized and the rice cultivation methods which could decrease the global warming potential were proposed. Those mitigation options commonly studied and used including water regime management, fertilization, selection of rice cultivar varieties, application of inhibitors (methane inhibitor, urease inhibitor and nitrification inhibitor, etc), tillage, rice-wheat rotation and so on. In general, midseason aeration of paddy fields with low dosage of nitrogen fertilizer after short-term drainage was one of the most promising strategies for reducing CH₄ and N₂O emissions. Improving organic matter management by promoting aerobic degradation through composting or incorporating crop straws into soil in autumn or winter was another one. It was also useful to apply methane inhibitor, urease inhibitor, nitrification inhibitor and slow/control-released fertilizer to increase rice yield and decreased greenhouse gases emissions from rice paddy field.

Keywords:rice paddy field; methane; nitrous oxide; trade-off relationship; mitigation options

甲烷(CH₄)是土壤中极端厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果,而氧化亚氮(N₂O)是硝化、反

硝化作用的中间产物。稻田是大气中 CH₄ 和 N₂O 排放的重要来源之一。据 IPCC(2007)^[1]估算,稻田 CH₄ 的年排放量为 31~112 Tg, 占全球 CH₄ 总排放的 5%~19%。仅我国稻田水稻生长期 N₂O 排放量高达 29 Gg·a⁻¹, 占我国农田 N₂O 年排放总量的 7%~11%^[2]。水、肥是影响稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的两大主控因子,有利于 CH₄ 产生的土壤条件不利于 N₂O 的产生排放,反之亦然。综合考虑 CH₄ 和 N₂O 排放的消长关系,才能有效减

收稿日期:2008–02–01
基金项目:2008DFA21330 科技部国际科技合作项目;国家自然科学基金(40621001)
作者简介:李香兰(1980—),山东莱芜人,博士研究生,主要从事农田生态系统温室气体排放及其减排对策的研究。
E-mail: xlli@issas.ac.cn; xianglanli@yahoo.cn
通讯作者:徐 华 E-mail: hxu@issas.ac.cn

缓稻田 CH₄ 和 N₂O 排放引起的综合温室效应。

1 CH₄ 和 N₂O 排放消长关系

所谓“消长”,即 CH₄ 和 N₂O 排放存在此消彼长、交互排放的关系,又称“trade-off”关系。继 1995 年陈冠雄等^[3]在国内提出 CH₄ 和 N₂O 排放的消长关系后,1997 年 Cai 等^[4]在国际上首次提出 CH₄ 和 N₂O 排放的“trade-off”关系,并引起广泛关注。同时发现,CH₄ 和 N₂O 排放的消长关系不仅存在于时间系列,即:CH₄ 排放量较大时,N₂O 排放量小,而且也存在于不同施肥类型、施肥量、土壤质地等处理和不同地区之间,即 CH₄ 排放量较大的处理和地区,N₂O 排放量较小^[5]。

稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的消长关系不受有无水稻植株影响,且此种关系在川中丘陵地区土壤水分变化不大的冬灌田仍然存在。邹建文等^[6]通过比较无水稻植株的裸地和有水稻植株的稻田 CH₄ 和 N₂O 排放,发现 CH₄ 和 N₂O 排放都存在消长关系。连续 1 年的田间原位测定发现,无论种稻区还是对照区(未种稻区)、无论水稻生长期还是无水稻生长的冬季淹水期(冬灌田),CH₄ 和 N₂O 排放随水分条件的变化此消彼长^[7]。晒田(即烤田)前后 CH₄ 和 N₂O 排放有明显变化,CH₄ 排放峰值出现在晒田前稻田淹水期,N₂O 排放峰值则出现在稻田晒田期间和落干期,即不同水稻生长阶段 CH₄ 和 N₂O 排放同样呈显著负相关($P<0.01$)^[8]。

几乎所有关于稻田 CH₄ 和 N₂O 排放“trade-off”关系的研究均支持这样的观点:稻田水分变化是影响稻田 CH₄ 和 N₂O 排放消长关系的主导因素。CH₄ 和 N₂O 生成对土壤水分的不同要求是导致其交互排放的基础,CH₄ 的生成需要持续淹水条件,淹水时间越长 CH₄ 生成量和排放量就越大,有利于 CH₄ 产生排放的淹水条件严重阻碍了 N₂O 的产生排放;N₂O 生成需要频繁的水分波动或土壤内部水分含量不均匀的条件,土壤水分波动较大或内部水分含量越不均匀,N₂O 生成和排放量就越大,如稻田烤田加剧 N₂O 排放却抑制了 CH₄ 的生成。由于大气中单分子 N₂O 的温室效应和 N₂O 在大气中的寿命都远远大于 CH₄,当考虑减少稻田生态系统 CH₄ 排放量时,必须兼顾该措施对 N₂O 排放的促进作用,不能顾此失彼。

2 稻田 CH₄ 和 N₂O 减排措施

2005 年 2 月 16 日,《京都议定书》实施,世界各

国拉开温室气体减排大幕。稻田作为大气中 CH₄ 和 N₂O 两种重要温室气体主要来源倍受国内外环境科学家关注。

2.1 稻田 CH₄ 减排措施

CH₄ 排放是稻田土壤中 CH₄ 产生、氧化及向大气传输 3 个过程相互作用的结果。控制稻田 CH₄ 排放应从这 3 个方面入手,或改变适宜产甲烷菌存活的环境来抑制产甲烷菌活性,或创造甲烷氧化菌存活的条件促进甲烷氧化菌生长,或阻断 CH₄ 向大气的传输途径减缓 CH₄ 排放。具体包括:水分管理、施肥管理、筛选水稻品种、研制和应用稻田甲烷抑制剂、提高收获指数、选择栽培方式等。

2.1.1 水分管理

2.1.1.1 排水烤田

水稻生长中期排水烤田原本为了减轻持续淹水造成的极端还原条件对水稻生长的不良影响和控制分蘖数。近十几年来大量研究表明,水稻生长期排水烤田(相对于持续淹水)能大量减少稻田 CH₄ 排放^[9-11],这是因为排水烤田增强土壤通透性,有利于土壤氧化还原电位提高,烤田时氧化还原电位可达 400~800 mV,破坏产甲烷菌的生存条件,从而抑制 CH₄ 形成和排放。丁维新等^[12]指出,土壤中 CH₄ 氧化主要发生在 10 cm 左右的土层中,明显受土壤水分状况的影响,CH₄ 氧化的最佳土壤含水量为 20%~70%,烤田为甲烷氧化菌提供合适的水分条件。

值得一提的是,采用排水烤田措施抑制稻田 CH₄ 排放,要选择水稻对水分较不敏感时期和稻田 CH₄ 排放量较大的生长阶段。最适宜的烤田时期是水稻分蘖期至幼穗分化前,这一阶段水稻生长旺盛、通气组织发达,稻田 CH₄ 排放量占全生育期排放总量的 39%~52%,是控制稻田 CH₄ 排放的关键时期^[11]。研究表明,稻田幼穗分化前烤田一次可使稻田 CH₄ 排放量比淹灌降低 29%,分蘖后期和幼穗分化期分别烤田一次可降低 36%的 CH₄ 排放量^[13]。稻田排水后 CH₄ 排放量迅速下降,很可能与 O₂ 进入非根际土壤,使非根际土壤氧化 CH₄ 的潜力得以发挥有关^[14]。盆栽试验结果表明,水稻生长期经历烤田土壤的 CH₄ 排放量比持续淹水处理降低达 92%~95%^[11],这可能与盆钵内土量较少、烤田期间土面落干较快有关。虽然中期烤田能有效减少稻田 CH₄ 排放,但同时会增加 N₂O 排放,减排效应需从两者综合增温潜势进行评估。

2.1.1.2 节水灌溉

随着人们节水意识的提高,各种水稻节水灌溉技

术如“薄浅湿晒”、“薄露”、“浅湿晒”、“控制灌溉”、“间隙灌溉”、“半旱栽培”、“覆膜旱作”等节水灌溉模式得到了大面积的推广应用,它们的共同特点是在水稻特定生育期特定时间段内保持田面无水层或土壤含水量低于饱和含水量。

节水灌溉条件下,土壤通气状况得到极大改善,既促进 CH_4 氧化又部分抑制 CH_4 产生,特别是非充分灌溉条件下,水稻植株会受到一定程度的水分胁迫可能关闭部分气孔,减少植株体途径的 CH_4 排放^[15]。大量研究表明,干湿交替的间隙灌溉稻田比长期淹水稻田 CH_4 排放量少得多;常湿灌溉对稻田 CH_4 的减排作用最大,但水稻有较大幅度减产^[16-17]。近年来发展起来的 GCRPS 系统(Ground Cover Rice Production System)是一种有效的节水灌溉系统^[18],水稻旱直播后覆盖稻草或薄膜,水稻生长期土壤保持较高的土壤水分但不出现淹水的灌溉措施不仅有效降低 CH_4 排放量,而且节省大量水资源。在缺水较为严重的华北平原,GCRPS 节水灌溉系统更值得推广应用。

2.1.1.3 深水淹灌

常规灌溉稻田的土壤水层厚度一般为 3 cm 左右,为 CH_4 产生提供适宜的厌氧环境,温度稍高时便出现大量 CH_4 排放。水稻生长期保持 10 cm 水层的深水灌溉所起的水封作用较好,能有效阻碍稻田 CH_4 向大气排放,而且有利于保持土壤中的有机物,对水稻产量影响较小^[19]。上官行健等^[20]指出,深灌方式(水深 10 cm)在早稻期降低 CH_4 产生率的效果明显好于晚稻期。这可能因为早稻期较低的气温和较深的水层使土壤中生成的 CH_4 向大气排放的效率降低;而晚稻期间气温较高,较深的水层不能有效阻止土壤中生成的 CH_4 向大气传输。由于灌溉水源不足及维持水层复杂,深水灌溉不是稻田 CH_4 理想的减排放法。

2.1.2 施肥管理

为保持土壤肥力,提高粮食产量,土壤中通常有有机肥与化肥混施。研究表明,水稻生长期有机肥与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 混施作为基肥, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 单独施入作为分蘖肥,相对于不施分蘖肥能减少 58% 的 CH_4 排放量和增加 31.7% 的水稻产量^[21]。稻田施用有机厩肥、绿肥和秸秆直接还田为产甲烷菌提供了极为丰富的生长条件和产甲烷基质,明显促进稻田 CH_4 排放。施用堆腐秸秆(好氧分解)或非水稻生长期稻田排水阶段秸秆还田能极大降低 CH_4 排放量^[22-23]。若施用处理后的有机肥(如沼渣)可明显降低稻田 CH_4 排放,因为沼渣 C/N 明显低于有机肥,使土壤中有机碳含量降低^[24-25]。

沼渣是指有机物经沼气发酵后的剩余残渣。新鲜有机物在沼气中发酵后,纤维素和半纤维素成分已经分解,产生的沼气(主成分 CH_4)被用来照明、取暖等,但沼渣中的氮、磷、钾等成分的变化却比较小,肥力变化不大。沼渣作为一种特殊形式的有机肥,施入稻田后能明显地降低稻田甲烷排放量,对水稻产量几乎无影响。但未经干燥、堆腐阶段的沼渣肥中含大量活性甲烷菌,会使土壤中有有机物加速向 CH_4 转化,因此沼渣肥施用前应经过一定时间的干燥以灭菌或降低甲烷菌的活性。沼渣具有廉价、可再生、分布广泛等特性,如取代目前常用的有机肥,可有效降低稻田 CH_4 排放量从而达到节能减排的目的,具有可观的经济价值和环境效益。

2.1.3 筛选水稻品种

选择高产量低 CH_4 排放的水稻品种是最早的减排途径之一。不同水稻品种对稻田 CH_4 排放影响不同,种植和选育合适的水稻品种可减排 CH_4 达 25%~50%^[26]。 CH_4 排放与水稻植株高度成正比,种植高秆品种(株高 120 cm)的 CH_4 排放量是矮秆品种(株高 90 cm)的 2.9 倍^[27]。李晶等^[19]对稻田 CH_4 排放和水稻生物量的关系进行研究,认为一般情况下稻田 CH_4 排放和水稻生物量成反比关系,即具有较大生物量的水稻品种 CH_4 排放量较少,且杂交稻的 CH_4 排放量比常规稻低。

水稻根系具有较强的输送 CH_4 能力,对稻田 CH_4 释放起着重要作用,55%~73% 的 CH_4 是通过作物释放^[28]。不同品种的稻田 CH_4 排放通量与根系氧化力密切相关,随着水稻根系氧化力的增强,各品种的 CH_4 排放通量均有下降趋势^[29]。水稻根系活力与稻田 CH_4 的产生和排放,存在着抑制和促进两方面的影响。根系氧化力强,泌氧能力强,根际氧化还原电位上升,从而抑制了 CH_4 的产生。同时甲烷氧化菌活力增强,促进了 CH_4 氧化, CH_4 排放量减少;根系活力强,主动吸收 CH_4 的能力也强,反而促进 CH_4 的传输和排放。根系分泌物为微生物提供丰富的碳源和能源,进而影响 CH_4 产生排放量,选择根系分泌物少的水稻品种有减少稻田 CH_4 排放的作用。

2.1.4 研制和应用甲烷抑制剂

甲烷抑制剂通过减少产甲烷基质(如减少土壤中有机质含量)和抑制产甲烷菌活性从而减缓稻田 CH_4 排放量。中国农业科学院农业气象研究所研制了肥料型甲烷抑制剂和农药型甲烷抑制剂,无论何种抑制剂均以不影响水稻产量、且能有效降低 CH_4 排放量为前

提。一种称为 AMI-AR2 的肥料型甲烷抑制剂,主要原料为特种腐植酸,可以将有机质转化为腐殖质,增加稻谷产量的同时减少形成 CH₄ 的基质,适用于中等或肥力条件较差的稻田。研究表明,AMI-AR2 可以降低稻田甲烷排放量的 30.5%^[30]。另一种称为 AMI-DJ1 的农药型甲烷抑制剂,其主要成分是一种光谱灭菌剂和少量表面活性剂,不仅能抑制甲烷菌活性从而降低稻田 CH₄ 排放,同时抑制有害病菌的发展,适用于易发生病虫害的南方稻区。研究表明,AMI-DJ1 可以抑制稻田 CH₄ 排放量的 18.5%^[30]。

许多化学物质如溴甲烷-磺酸、氯仿、氯甲烷也可以抑制甲烷菌的活性,肥料型的甲烷抑制剂如碳化钙胶囊能降低稻田 CH₄ 排放量。EM (Effective Microorganisms) 是一种含有光合细菌的微生物菌剂,能使光合作用在土壤中或水中进行,并且具有利于 CH₄ 气体、吡啶、3-甲基吡啶、甲烷有机酸等氢还原碳的作用。EM 对稻田 CH₄ 排放有抑制作用,并可代替化肥使水稻产量增加。此外,DDT (dichloro-diphenyl-trichloroethane)、乙炔 (acetylene)、氯啉 (nitrapyrin)、双氢胺 (dicyandiamide)、碳化钙 (Calcium carbide) 等也都具有抑制 CH₄ 产生的作用^[31]。

2.1.5 选择耕种方式

稻田 CH₄ 氧化率受耕种方式的影响,采用耕作强度低的少耕或免耕的管理方法,可增加土壤 CH₄ 氧化能力^[32]。这是因为开垦耕作改变了土壤的物理化学性质和土壤中微生物区系的结构和组成,从而使土壤对 CH₄ 氧化能力发生改变,稻田 CH₄ 氧化速率随着耕作强度的降低而增加。稻田 CH₄ 排放量还受栽插密度的影响,曹云英等^[29]指出,适当降低栽插密度不但有利于控制稻田 CH₄ 排放,而且可提高水稻产量。提高水稻栽植密度,稻田 CH₄ 排放通量增大,究其原因密度较大的水稻茎叶多、叶量和根量大,加速了 CH₄ 的传输和排放。

水稻半旱式栽培是水田起垄、垄顶两侧栽秧、垄沟蓄水的一种耕种制度。以浸润灌溉为核心,通常将水灌溉到垄沟的三分之二深处。垄作能改良土壤结构,协调土壤中水、热、气、肥的关系,加快土壤有机质分解和养分转化,消除稻田冷、毒等障碍因素,促进水稻早生快发,具有显著的增产效果。同时可提高土壤的通透性,有效改善了土壤氧化还原条件,大幅度降低 CH₄ 排放^[33]。

冬水田(水稻收割后冬季淹水直到次年水稻移栽)在我国西南和南方山地丘陵地区广泛存在,冬季

淹水休闲期 CH₄ 排放量占全年 CH₄ 排放量的 39%~44%^[34]。冬季排水种植旱作作物不仅减少冬水田非水稻生长期 CH₄ 排放而且减少水稻生长期 CH₄ 排放,年总量减少 47%~68%^[35]。非水稻生长期排干、耕翻土壤使其最大限度地暴露于空气或种植旱作作物可以有效减少稻田产甲烷菌存活数量及其活性,从而减少水稻生长期稻田 CH₄ 排放量。减少冬水田面积、排水种植冬小麦、油菜等旱作作物不失为减缓稻田 CH₄ 排放的有效措施。

秸秆还田是为了满足保持土壤肥力和保护环境需要,但秸秆还田显著促进 CH₄ 排放。选择旱作季节秸秆还田能够避免淹水种植水稻之前秸秆还田造成的大量 CH₄ 排放^[36],这是因为旱作期间秸秆还田使易分解的有机质在好气条件下分解,在淹水时对 CH₄ 排放的促进作用显著下降。

2.1.6 提高收获指数

收获指数 (Harvest Index, HI) 是作物收获时经济产量(子粒、果实等)与生物量之比,又称经济系数 (Coefficient of Economic, CE)。其生理本质反映了作物同化产物在子粒和营养器官上的分配比例,HI 也被用于评价栽培成效的重要指标和作物品种选育的重要内容。稻田 CH₄ 排放与水稻收获指数呈负相关,提高水稻收获指数可有效减少稻田 CH₄ 排放^[37]。改善水稻栽培技术,可增加光合产物向子粒输送、减少空瘪粒、提高结实率和干粒重,有助于提高收获指数,减少光合产物向根际土壤的输送,因而减少产 CH₄ 基质。矮秆水稻一般具有较高的收获指数,CH₄ 排放较低^[37]。选择高收获指数的水稻品种和改善种植技术提高收获指数一定程度上可以减缓稻田 CH₄ 排放。

2.2 稻田 N₂O 减排措施

尽管早期的研究者曾一度认为水稻生长期没有 N₂O 的排放,但近十多年来的大量研究发现稻田也能排放较高的 N₂O,特别是水分变化剧烈的烤田及复水期^[11,38-39]。为此,许多科学家在进行稻田 N₂O 排放观测的同时,也进行了 N₂O 减排措施的研究。稻田 N₂O 排放的减缓措施主要是减少土壤中产 N₂O 基质,改变影响硝化和反硝化作用的土壤环境,控制 N₂O 生成的内部因素,但同时不能降低作物产量。主要有以下几个方面:施肥管理、水分管理、脲酶抑制剂和硝化抑制剂、包膜型缓释/控释肥、耕作制度和水稻品种等。

2.2.1 施肥管理

2.2.1.1 调整 N、P 和 K 比例的“非协调性”

1995 年我国 N:P:K 肥料的比例为 1:0.45:0.16,与

世界同期 N:P:K 比例为 1:0.45:0.27 相比,钾肥的比例太小^[40]。鉴于我国化肥品种结构的“非协调性”问题,要充分发挥氮肥的增产效果及减少 N_2O -N 形式氮损失必须调整 N:P:K 比例。至 2010 年,我国 N:P:K 比例应调整到 1:(0.4~0.45):0.30,即减小化学氮肥的相对增加量,提高钾肥的施用量。稻田氮肥的过量施入为硝化及反硝化的进行提供丰富的氮素基础,合适的水分条件下即会释放出大量 N_2O 。协调 N、P 和 K 比列,有助于减缓稻田 N_2O 排放对大气环境的污染及控制 NO_3^- 、 NO_2^- 流失对水体环境的破坏。

2.2.1.2 缩小 N 肥地区性分配的“非平衡性”

我国地区间化学氮肥用量存在很大差异。邢光熹等^[40]指出,化学氮肥 1/3 集中在占总耕地面积不到 1/5 的东南沿海省区,而占耕地总面积 37% 的黑龙江、吉林、内蒙古、山西、宁夏、甘肃、青海、新疆、云南、贵州和西藏等 11 省区化学氮肥年施用量只占总用量的 18%。我国是水稻生产大国,水稻种植面积占我国耕地面积的 23%^[41]。减小稻田氮肥施用的地区“非平衡性”,不仅能够进一步增加水稻产量,而且可以减少化学氮肥过量施用造成的环境影响,包括有效减少稻田 N_2O 排放。

2.2.1.3 提高氮肥施用量及施肥方法的“科学性”

氮肥施用量应该尽可能控制在满足作物生长需求而不造成大量氮肥损失。 N_2O 产生量通常占氮肥施用量的 0.01%~2.00%,低水平施肥能减少 N_2O 损失,但不能以降低水稻产量为代价。缓释/控释肥料的可溶性氮肥逐步释放出来,有利于作物吸收且减少氮素损失和生物固定。与碳酸氢铵和尿素相比,长效碳酸氢铵能减少 76% 左右的 N_2O 排放,缓释尿素能减少 58% 左右的 N_2O 排放^[42]。中国科学院沈阳应用生态研究所大量研究发现,脲酶抑制剂和硝化抑制剂与尿素混施可有效降低稻田 N_2O 排放量^[43]。

2.2.2 添加脲酶/硝化抑制剂

脲酶抑制剂和硝化抑制剂是分别用来减缓土壤中尿素酰胺态氮水解至铵态氮,抑制 NH_4^+ -N 至 NO_3^- -N 的氧化,减少 NH_3 挥发、 NO_2^- 和 NO_3^- 径流与淋溶、 N_2O 与 N_2 等气态损失的元素和化合物。我国 97% 以上的化学氮肥是尿素和碳酸氢铵等铵态氮肥,脲酶抑制剂和硝化抑制剂对于减缓稻田 N_2O 排放潜力巨大。如果将二者合理配合施用,使氮素转化全过程得到有效控制,使施入土壤的氮肥尽可能为作物吸收利用,减少 N_2O 和 N_2 等形式的氮损失。氢醌和双氢胺是目前研究较多的脲酶/硝化抑制剂组合,与尿素混施应用于

稻田生态系统在提高产量的同时可减少 10%~60% N_2O 排放量,并一定程度上降低 CH_4 排放量^[43~46]。目前,市场也有将脲酶抑制剂和硝化抑制剂添加到氮肥中制成的成品化肥,但因为此类化肥价格偏高、农民习惯于购买传统化肥,而使添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂肥料的推广应用受到阻碍。

2.2.3 研制和应用缓释/控释肥料

氮肥中氮素不能为作物充分吸收的一个重要原因是现有化学肥料溶解过快,由此加快了土壤微生物对肥料的分解和养分的转化、挥发、淋失等。为了使肥料养分释放速率与植物养分吸收速率尽量吻合,早在 20 世纪初农业科学家就开始了缓释肥料的研发。

武志杰等^[47]对缓释/控释肥料定义、分类以及作用机理与应用作了详尽介绍。简单地讲,缓释肥料是养分释放速率小于速溶性肥料释放速率的肥料;而控释肥料是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,使其养分释放规律与作物养分需求特性相匹配的缓释肥料,是缓释肥料的高级阶段。缓释/控释肥料主要有包裹型、包膜型及添加抑制剂型缓释/控释肥料。与速效氮肥相比,缓释/控释肥料具有提高氮肥利用率、减少施肥量及节省施肥劳动力、减轻施肥对环境的污染等优势,特别是减缓 N_2O 等温室气体的排放。

中国科学院南京土壤所研制了钙镁磷包膜碳铵(长效碳铵),在提高氮肥利用率的同时间接减少 N_2O 排放,但由于包膜肥料价格较传统化肥高,包膜肥料养分释放评价方法研究相对滞后,包膜材料和包膜工艺发展缓慢等因素,使包膜肥料的研发受到一定限制。

2.2.4 水分管理

近年来,前期淹水、中期烤田和后期干湿交替的间隙灌溉模式可有效控制无效分蘖造成的水稻减产逐渐被农民接受,但一定程度上加剧了 N_2O 排放。与持续淹水相比,烤田及干湿交替明显增加了 N_2O 排放,平均排放通量分别是淹水条件的 47 和 23 倍^[38]。间隙灌溉条件下,土壤干湿交替频繁,土壤中通气和厌气区域共存,适宜的土壤含水量可促进硝化和反硝化共同作用导致 N_2O 排放显著。在低施氮量条件下,间隙灌溉在减少稻田 CH_4 排放的同时可缓解硝化作用产生的 N_2O ,进而降低 CH_4 和 N_2O 排放引起的综合温室效应^[48]。

在我国缺水较为严重的华北平原,节水灌溉成为一项值得推广的稻田水分管理措施。节水灌溉能够抑制稻田 CH_4 排放却促进了 N_2O 产生^[18]。但对全年而

言,采取节水措施增加的 N_2O 排放量相对于由此减少的 CH_4 排放量是微不足道的。

2.2.5 选择耕种制度

选择合适的耕种方法是减少 N_2O 释放量的重要途径。研究表明耕作土壤比免耕土壤能产生和排放更多的 N_2O ,采用免耕法 N_2O 排放量将减少 5.2%^[42]。免耕有助于改良土壤的理化性质,提高土壤养分和水分利用效率,增强土壤团聚作用和增加有机质,有助于进一步培肥地力。耕作改变了土壤的结构和通透性,影响土壤中硝化和反硝化作用的相对强弱及 N_2O 在土壤中的扩散速率及其土壤有机质的分解速率,进而影响产生 N_2O 微生物基质。长期连续免耕与轮作配合有利于土壤化学过程向肥力提高的方向发展,氮肥利用率提高将间接影响 N_2O 排放。

秸秆还田不仅有利于改善水稻生长环境促进作物增产,而且秸秆腐解过程产生的化感物质会抑制土壤微生物活性,使稻田 N_2O 排放减少。研究表明,秸秆与氮肥混施平均降低 30% N_2O 排放^[49]。不同土壤类型及施氮水平下,秸秆施用量要因地制宜。

2.2.6 关注冬闲田

冬闲田越冬方式包括:板茬越冬(水稻收割后稻茬留田里,土面保持落干至翌年移栽前翻耕)、炕冬(水稻收割后翻耕土壤加速有机质氧化分解,土面保持落干至翌年移栽前)、泡冬(水稻收割后土面蓄水越冬)。对休耕或炕冬水田,由于不存在作物吸收,有机质矿化分解作用和硝化作用产生的有机 C 和 NO_3^- 将在土壤中不断累积。经长达半年的越冬期后土壤中势必蓄积着大量有机 C 和 NO_3^- ,为反硝化作用生成的 N_2O 提供了充足的营养基质,合适的土壤水分和土壤温度时,必能产生大量 N_2O 。因此,越冬期的起始和结束阶段,土壤可能存在强烈的 N_2O 脉冲释放^[7,50]。经粗略估算,全球冬闲田 N_2O -N 年释放量达 0.75 Tg,占全球 N_2O 年释放量的 5%,全球大气 N_2O 年增长量的 20%^[51]。冬闲田不同于淹水水田,从土壤 N_2O 生成机理和影响因素、冬闲田土壤中碳氮营养基质的积累、 N_2O 的强烈脉冲释放和全球冬闲田的分布面积来看,北半球热带-亚热带地区的冬闲田可能是一个重要的尚未确定的 N_2O 释放源,值得进一步深入研究。

2.2.7 筛选水稻品种

不同水稻品种对 N_2O 产生排放影响不同,水稻根系分泌物影响根际微生物活性进而影响 N_2O 产生排放,特别是根系吸收离子和分泌有机酸改变土壤 pH,产生有机物碳化物刺激微生物活动。尽管稻麦轮作生

态系统植株本身 N_2O 排放量较低,仅为稻田 N_2O 排放量的 1%~3%^[52],但水稻植株发达的通气组织为 N_2O 排放提供畅通通道,为土壤 N_2O 产生间接影响。水稻品种间植株长势差异影响 N_2O 排放,选择矮秆或 N_2O 传输能力较差的水稻品种对 N_2O 排放调控措施的研究更有价值。

3 总结与研究展望

稻田 CH_4 和 N_2O 排放存在互为消长的关系,减排效应需从两者综合增温潜势进行评估。对 CH_4 而言,加强稻田水肥管理是控制其排放的主导因素,甲烷抑制剂具有较大的抑制潜力,加大甲烷抑制剂研发力度和生产适宜推广的抑制剂类型可减缓稻田 CH_4 排放。对 N_2O 而言,协调施肥比例和平衡施肥差异能降低氮肥过量施用造成的大量 N_2O 产生排放,改变农民施肥模式,提高缓释/控释肥料的认知度对缓解因氮肥利用率低造成的 N_2O 大量排放具有更重要的科学意义和实践价值。此外,选择合适的水稻品种和合理的耕种方式对缓解稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要性不容忽视。

水和肥是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的两大主控因子。烤田,特别是在铵态氮肥用量不高的条件下,能有效减缓 CH_4 和 N_2O 排放引起的综合温室效应。而水稻移栽后不同烤田开始时间及烤田持续时间对综合温室效应的影响,值得深入研究。脲酶/硝化抑制剂在减少 N_2O 排放的同时会影响稻田 CH_4 排放,改脲酶/硝化抑制剂传统施入方式(移栽或播种前与基肥混施)为水分变化剧烈的烤田前与分蘖肥或穗肥混施,不失为缓解综合温室效应的有效措施。考虑稻田全年 CH_4 和 N_2O 排放,非水稻生长期水肥管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放影响不容忽视。非水稻生长期根茬翻埋时间及翻埋方式对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放的影响鲜见报道。综合考虑水肥交互作用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放影响意义重大,值得深入探讨。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry[R/OL]. http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Ch07.pdf.
- [2] ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41, 8030-8042.
- [3] 陈冠雄, 黄国宏, 黄 斌, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 的排放及养萍和施肥

的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 378–382.

CHEN Guan-xiong, HUANG Guo-hong, HUANG Bin, et al. CH₄ and N₂O emission from a rice field and effect of *Azolla* and fertilization on them[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 378–382.

[4] CAI Zu-cong, XING Guang-xi, YAN Xiao-yuan, et al. Methane and nitrous oxide from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7–14.

[5] CAI Zu-cong, XING Guang-xi, SHEN G Y, et al. Measurements of CH₄ and N₂O emissions from rice fields in Fengqiu, China[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1999, 45(1): 1–13.

[6] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758–764.

ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758–764.

[7] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 539–544.

JIANG Chang-sheng, WANG Yue-si, ZHENG Xun-hua, et al. CH₄ and N₂O emission from a winter-time flooded paddy field in a hilly area of southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 539–544.

[8] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143–148.

QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 143–148.

[9] CAI Zu-cong, XU Hua, ZHANG H H, et al. Estimate of methane emission from rice paddy fields in Taihu region, China[J]. *Pedosphere*, 1994, 4(4): 297–306.

[10] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K, et al. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring[J]. *Global Biogeochem Cycle*, 1996, 10, 255–267.

[11] 李香兰, 徐 华, 曹金柳, 等. 水分管理对水稻生长期 CH₄ 排放的影响[J]. 土壤, 2007, 39(2): 238–242.

LI Xiang-lan, XU Hua, CAO Jin-liu, et al. Effect of water management on CH₄ emission during rice-growing season[J]. *Soils*, 2007, 39(2): 238–242.

[12] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤甲烷氧化菌及水分状况对其活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 94–97.

DING Wei-xin, CAI Zu-cong. Mechanism of methane oxidation by methanotrophs and effect of soil moisture content on their activity[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(1): 94–97.

[13] Towprayoon S, Smakgahn, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields[J]. *Chemosphere*, 2005(59): 1547–1556.

[14] 贾仲君. 水稻植株对稻田甲烷排放过程的影响[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所博士学位论文. 2002.

JIA Zhong-jun. A process-based research on the effect of rice plants on CH₄ emission from paddy fields[D]. Nanjing: PH. D. Dissertation in Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2002.

[15] 李 晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究

进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 740–749.

LI Jing, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 740–749.

[16] Khalil MAK. Measurements of methane emissions from rice fields in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(19): 181–210.

[17] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 167–168, 218–219.

WANG Ming-xing. Methane emission from rice paddy field in China[M]. Beijing: Science Press, 2001. 167–168, 218–219.

[18] Chritine Kreye, Klaus Dittert, ZHENG Xun-hua, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2007(77): 293–404.

[19] 李 晶, 王明星, 陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究[J]. 中国农业气象, 1997, 18(6): 9–14.

LI Jing, WANG Ming-xing, CHEN De-zhang. Studies on mitigation of methane emission from rice field[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1997, 18(6): 9–14.

[20] 上官行建, 王明星. 稻田土壤中甲烷的产生[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 1–12.

SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing. Production of methane in rice paddy soil[J]. *Advances in Earth Science*, 1993, 8(5): 1–12.

[21] Lindau C W, Bollich P K, Delaune R D, et al. Methane mitigation in flooded Louisiana rice fields[J]. *Biol Fertil Soils*, 1993(15): 174–178.

[22] Kazuyuki Yagi, Haruo Tsuruta, Katsuyuki Minami. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997(49): 213–220.

[23] Kazunori Minamikawa, Naoki Sakai, Kazuyuki Yagi. Methane emission from paddy fields and its mitigation options on a field scale[J]. *Microbes Environ*, 2006, 21(3), 135–147.

[24] 李玉娥, 林尔达. 减缓稻田甲烷排放的技术研究[J]. 农业环境与发展, 1995, 12(2): 38–40.

LI Yu-e, LIN Er-da. Studies on mitigation of methane emission from rice paddy field[J]. *Agro-environ and Develop*, 1995, 12(2): 38–40.

[25] 陶 战, 杜道灯, 周 毅, 等. 稻田施用沼渣对甲烷排放通量的影响[J]. 农村生态环境(学报), 1994, 10(3): 1–5.

TAO Zhan, DU Dao-deng, ZHOU Yi, et al. Effect of applying biogas pit sediment on methane emission fluxes from paddy field[J]. *Rural Eco-Environment*, 1994, 10(3): 1–5.

[26] 徐雨昌, 王增远, 李 震, 等. 不同水稻品种对稻田甲烷排放量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 1999, 5(1): 93–96.

XU Yu-chang, WANG Zeng-yuan, LI Zhen, et al. Effect of rice cultivars on methane emission from Beijing rice field[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(1): 93–96.

[27] Ding A, Willis C R, Sass R L, et al. Methane emissions from rice fields: Effect of plant height among several rice cultivars[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 1045–1052.

[28] 上官行健, 王明星, 陈德章. 稻田 CH₄ 的传输[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 13–22.

SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing, CHEN De-zhang. The transport of methane in the rice paddy fields[J]. *Advances in Earth Sci-*

- ence, 1993, 8(5):13–22.
- [29] 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]. 江苏农业研究, 2000, 21(3):22–27.
- CAO Yun-ying, ZHU Qing-sen, LANG You-zhong, et al. Effect of rice varieties and cultivation approach on methane emission from paddy rice[J]. *Jiangsu Agriculture Research*, 2000, 21(3):22–27.
- [30] 林尔达, 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.
- LIN Er-da, LI Yu-e, RAO Min-jie, et al. Estimation of methane emission from China's rice fields and mitigation options[J]. *Rural Eco-Environment*, 1994, 10(4):55–58.
- [31] 张竹青, 李义纯. 稻田甲烷排放控制方法的研究进展[J]. 山西农业大学学报, 2004(1):89–92.
- ZHANG Zhu-qing, LI Yi-chun. Progress in research on controlling methods of methane emission in paddy field[J]. *J Shanxi Agric Univ*, 2004(1):89–92.
- [32] 郝晓辉, 苏以荣, 胡荣桂. 土地利用管理对土壤甲烷氧化的影响[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(3):369–374.
- HAO Xiao-hui, SU Yi-rong, HU Rong-gui. The effect of land use on methane oxidation in aerobic soils[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(3):369–374.
- [33] 周毅, 陶战, 杜道灯. 控制稻田甲烷排放的农业技术选择[J]. 农村生态环境(学报), 1994, 10(3):6–8.
- ZHOU Yi, TAO Zhan, DU Dao-deng. Agricultural measure options for reducing methane emissions from rice field[J]. *Rural Eco-Environment*, 1994, 10(3):6–8.
- [34] 蔡祖聪, 谢德体, 徐华, 等. 冬灌田影响水稻生长期甲烷排放量的因素分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5):705–709.
- CAI Zu-cong, XIE De-ti, XU Hua, et al. Factors influencing CH₄ emissions from a permanently flooded rice field during rice growing period[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5):705–709.
- [35] CAI Zu-cong, Tsuruta H, GAO Ming, et al. Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field[J]. *Global Change Biology*, 2003(9):37–45.
- [36] XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping, et al. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH₄ emission from rice cultivation[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2000(38):1–12.
- [37] 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.
- HUANG Yao. Emission of greenhouse gases in China and its reduction strategy[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5):722–732.
- [38] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2):186–188.
- XU Hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Effect of soil water regime and chemical N fertilizers application on N₂O emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2):186–188.
- [39] Buresh R J, Austin E R. Direct measurement of dinitrogen and nitrous oxide flux in flooded rice fields[J]. *Soil Sci Soc A*, 1998(52):681–687.
- [40] 邢光熹, 颜晓元. 中国农田 N₂O 排放的分析估算与减缓对策[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4):1–6.
- XING Guang-xi, YAN Xiao-yuan. Analysis and estimation of N₂O emissions from croplands in China and its mitigation options[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4):1–6.
- [41] International Rice Research Institute(IRRI). Rice state database, Los Baños, Philippines[EB/OL]. <http://www.irri.org/science/ricestat/index.asp>. 2004.
- [42] 李虎, 王立刚, 邱建军. 农田土壤 N₂O 排放和减排措施的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2007(5):1–5.
- LI Hu, WANG Li-gang, QIU Jian-jun. Studies of N₂O emissions from croplands and strategies for reducing N₂O emission[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2007(5):1–5.
- [43] Boeckx P, XU Xing-kai, Van Cleemput O. Mitigation of N₂O and CH₄ emission from rice and wheat cropping systems using dicyandiamide and hydroquinone[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72:41–49.
- [44] XU Xing-kai, Boeckx P, Van Cleemput O. Urease and nitrification inhibitors to reduce emissions of CH₄ and N₂O in rice production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64:203–211.
- [45] Majumdar D, Kumar S, Pathak H. Reducing nitrous oxide emission from an irrigated rice field of North India with nitrification inhibitors[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 81:163–169.
- [46] XU Xing-kai, WANG Yue-si, ZHENG Xun-hua, et al. Methane emission from a simulated rice field ecosystem as influenced by hydroquinone and dicyandiamide[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 263:243–253.
- [47] 武志杰, 陈利军. 缓释/控释肥料:原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2003. 9–15.
- WU Zhi-jie, CHEN Li-jun. Slow/control-released fertilizers: Mechanism and application[M]. Beijing: Science Press, 2003. 9–15.
- [48] Majumdar D. Methane and nitrous oxide emission from irrigated rice fields: Proposed mitigation strategies[J]. *Current Science*, 2003(84):1317–1326.
- [49] MA Jing, LI Xiang-lan, XU Hua, et al. Effect of nitrogen fertilizer and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45:359–367.
- [50] 徐文彬, 洪业汤. 冬闲水田土壤——一个重要的尚未确定的 N₂O 释放源[J]. 环境科学研究, 1999, 12(3):42–45, 48.
- XU Wen-bin, HONG Ye-tang. Paddy fields following a dry season fallow: A potential important N₂O source[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(3):42–45, 48.
- [51] Bouwman A F. Estimated global source distribution of nitrous oxide [M]//Miuami K, Moiser A R, Sass R L. CH₄ and N₂O: Global emission and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources. Tokyo: Yokendo, 1994. 147–159.
- [52] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5):1–5.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impacts of temperature on N₂O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5):1–5.