

长期施肥下稻田甲烷排放的研究进展

林 诚, 王 飞, 何春梅, 李清华, 李 昱 (福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建福州 350013)

摘要 综述了国内外长期施肥条件下稻田甲烷排放的研究概况以及环境因素对甲烷排放的影响, 并就产甲烷菌、甲烷氧化菌的研究进展进行阐述。

关键词 长期施肥; 甲烷; 排放

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)02-00421-03

Research Progress on Methane Emission in Rice Paddy under Long-Term Fertilization

LIN Cheng et al (Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013)

Abstract The latest research advances about methane emission in rice paddy under long-term fertilization and the effect from the environment at home and abroad were summarized, as well as the research on methanogens and methanotrophs.

Key words Long-term fertilization; Methane; Emission

施肥既是保证作物高产的基础, 又是影响稻田温室气体排放量的重要田间管理措施。长期定位施肥是研究肥料对土壤影响的最佳方式。因此, 研究长期不同施肥制度对稻田温室气体排放的影响可以为减少农田甲烷(CH_4)排放提供理论依据。笔者综述了国内外长期施肥条件下稻田 CH_4 排放的研究进展, 为进一步开展稻田 CH_4 排放控制的施肥管理措施研究寻找依据。

1 长期施肥对稻田 CH_4 排放的影响

1.1 长期施用有机肥对稻田 CH_4 排放的影响

目前, 长期试验中施用有机肥的种类较多, 常用的包括作物秸秆、绿肥、堆肥、厩肥、沼渣肥等。施用有机肥可促进稻田 CH_4 排放, 其程度取决于有机物的成分和性质^[1]。吕琴等^[2]研究表明, 长期施用有机肥能显著增加稻田的 CH_4 排放通量, 特别是当有机肥和无机肥配合施用, 土壤 CH_4 排放通量显著高于单施有机肥或无机肥。王增远等^[3]研究表明, 施猪粪的 CH_4 效应最大, 其次是施稻草和牛粪。大量研究证明, 施用“新鲜”有机肥会促进稻田 CH_4 的排放, 原因是有机肥能为产 CH_4 菌提供丰富的能量来源和反应底物^[4]。沼渣肥对稻田 CH_4 排放的影响要大大低于新鲜有机肥, 原因在于沼渣经过长时间发酵后有机肥中易分解的成分生成沼气而挥发, 因此产 CH_4 基质减少, 土壤中 CH_4 产生量较低^[1]。秦晓波等^[5]研究认为, 长期化肥配施稻草处理的早、晚稻 CH_4 排放量大于化肥配施猪粪处理, 特别是晚稻化肥配施稻草 CH_4 排放量为化肥配施猪粪的252%。国外许多原位试验表明, 施用稻草可显著增加土壤 CH_4 的排放量, 例如在意大利、日本和菲律宾等地, 施用秸秆的土壤 CH_4 排放量增加2~9倍^[6]。虽然秸秆还田作为氮肥投入可以抑制 CH_4 的吸收, 但氮素含量较低, 因此抑制作用甚微; 另一方面, 秸秆还田可以增加土壤有机碳含量, 就相当于丰富产 CH_4 的基质, 因此抑制吸收和促进生成的双重作用使得秸秆还田显著增加 CH_4 排放^[7]。吴家

梅等^[8]认为, 有机肥对稻田 CH_4 排放的影响程度与其C/N比值有直接关系。有机肥的C/N越高, 稻田产 CH_4 潜力和排放能力越大。

蒋静艳等^[9]研究发现, 稻田 CH_4 排放量随着有机肥施用量的增加而增加。荣湘民等^[10]在早稻长期定位试验中发现增施有机肥可提高 CH_4 的排放量, 秸秆全部还田处理高于部分秸秆还田处理, 但施用高量稻草则不再增加 CH_4 的排放。但是, 有机肥用量和 CH_4 排放量之间并不呈简单的线性关系。Schütz等^[11]研究表明, 当稻草施用量为12 t/hm²时, CH_4 排放量是不施用稻草 CH_4 排放量的2倍, 但当稻草施用量增加时, CH_4 的排放量不再增加。

1.2 长期施用化肥对稻田 CH_4 排放的影响

众多研究表明, 稻田施用化肥的 CH_4 排放量明显低于施用有机肥。化肥的施用对稻田 CH_4 排放量的影响有很多报道, 但是不同种类的化肥对土壤 CH_4 排放的结果不一致。有研究表明, 施用硫酸盐能提高土壤的氧化还原电位(Eh), 且其还原产生的 S^{2-} 对产 CH_4 菌有毒害作用, 从而降低土壤 CH_4 的生成。尿素等化肥施用可通过促进植物生长和光合作用来增加植物根系的分泌物, 提供产 CH_4 基质, 增加稻田 CH_4 排放^[12]。上官行健等^[13]在尿素施用对 CH_4 排放影响的研究中认为, 尿素施用对 CH_4 排放无影响或可以减少 CH_4 的排放^[13]。Wassmann等^[14]研究表明, 同是无机肥, 施用相同量的硫酸铵处理 CH_4 排放量小于尿素处理。吕琴等^[2]在黄松稻田上的研究发现, 单施氮肥、氮钾肥处理 CH_4 排放通量低于不施肥、不耕作, 而NPK处理的 CH_4 排放通量高于长期不施肥处理, 虽然尿素能抑制土壤的好氧 CH_4 氧化活性, 但是一定量的磷和钾能促进土壤的 CH_4 氧化活性, 因而混合施肥后, 钾或磷能缓解由尿素引起的抑制作用。Liu等^[15]进行了有机肥、化肥单施及配施试验后发现, 单施有机肥处理的 CH_4 排放最高, 单施化肥处理 CH_4 排放最低, 而有有机肥与化肥配施甲烷排放通量虽高于单施化肥处理, 但比单施有机肥降低, 同时有机无机肥配施水稻产量得到大幅度的提高。

目前关于化肥施用量与 CH_4 排放的关系并不明确, 例如一方面施用硫酸后 SO_4^{2-} 还原产生的 S^{2-} 可抑制 CH_4 的生

基金项目 福建省自然科学基金项目(2011J01111); 公益性行业(农业)科研专项(201203030)。

作者简介 林诚(1981-), 男, 福建永泰人, 助理研究员, 从事植物营养与土壤环境方面的研究。

收稿日期 2013-12-16

成,另一方面 $\text{NH}_4\text{-N}$ 对土-水界面 CH_4 氧化的抑制作用将增加 CH_4 向大气的排放量,因此施用硫酸铵对 CH_4 有正负效应^[16],而影响该效应还与多种土壤环境因子有关。

2 长期施肥下环境因子对稻田甲烷排放的影响

影响稻田 CH_4 排放的环境因子主要集中在土壤温度、水分、 Eh 、 pH 。一般来说,大多数情况下 CH_4 产生的最适温度在 $30\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ ^[17],在这个温度范围外,土壤微生物活性会受到抑制,因此温度过高或过低土壤 CH_4 的排放都会受到影响,而在稻田土壤上 CH_4 排放的日变化规律与土壤温度有较高的相关性^[18]。在稻田淹水后,土壤中缺氧增强土壤中产甲烷菌活性,促进 CH_4 的形成,但水层的加深也使得土壤中已产生的 CH_4 在通过气泡或扩散形式穿越水层时,被氧化掉的量增大,从而减少 CH_4 向大气中的排放^[19]。蔡祖聪等^[20-21]研究表明,良好的排水管理可有效地减少后续水稻田 CH_4 排放量,烤田也能明显减少水稻田 CH_4 排放量。此外,土壤的 pH 、 Eh 等对稻田土壤 CH_4 排放均有不同程度的影响。土壤 pH 通过影响微生物活动而影响土壤有机碳的分解矿化^[22],而大多数 CH_4 产生菌活性在中性或稍碱性的环境中最佳,酸性土壤的 CH_4 产生量仅有中性土壤的 25%,较低的 Eh 促进 CH_4 产生菌活性的提高,大大提高 CH_4 的生成和转化^[23]。

3 长期施肥对产甲烷菌、甲烷氧化菌的影响

对稻田 CH_4 排放机理的研究主要集中在产甲烷菌和甲烷氧化菌上。稻田 CH_4 排放是在产甲烷菌、甲烷氧化菌综合作用下的结果。产甲烷菌是一类能够将无机化合物或有机化合物厌氧发酵转化成 CH_4 和 CO_2 的古细菌^[24]。全球 CH_4 的排放量每年约 500 t,其中 74% 是由产甲烷菌代谢产生的^[25]。陈中云等^[26]研究发现,厌氧环境和 CH_4 形成基质的提供是 CH_4 细菌种群发育的首要条件。有研究表明,施用有机肥料(腐熟牛粪或菜饼)能促进土壤中产甲烷菌数量的增加^[27-28],若无外源有机质输入,植物根系活力将成为最重要的 CH_4 产生因素^[29]。陈美慈等^[30]发现,早稻土生长前期的产甲烷菌数量较后期低 2~3 个数量级,而晚稻土在生长中期土壤中产甲烷菌数量略高于生长前期和后期。赵英等^[31]对早稻、晚稻各生长期土壤中产甲烷菌进行计数分析,发现分蘖期、孕穗期土壤中产甲烷菌数量达到最高。Masscheleyn 等^[32]认为,在大部分情况下,当稻田土壤 Eh 高于 -150 mV 时,产甲烷菌的活性将受到抑制。但是,也有研究发现从表层到 18 cm 深的土壤 Eh 均可适应产甲烷菌的生长发育,其中 5~13 cm 深的土壤产甲烷菌数量最多^[33]。另外,大多数产甲烷菌的最佳繁殖温度为 $30\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 。在稻田生态环境中,土壤温度一般低于 $35\text{ }^\circ\text{C}$,在这样的条件下温度上升会增加 CH_4 的产率^[34]。

甲烷氧化菌是以 CH_4 为生长的唯一碳源和能源的微生物。据估计,稻田产生的内源 CH_4 在排向大气之前有 50%~90% 在根际和土-水界面被重新氧化,因此甲烷氧化菌对于稻田 CH_4 的减排有重要的作用。目前,关于长期施用有机肥对土壤氧化 CH_4 的能力报道不一。Hütsch^[35]报道,长期在旱地中施用农家肥会显著降低土壤对 CH_4 的氧化。英国洛

桑实验站的试验表明,有机肥的长期施用(140年)对土壤氧化 CH_4 的能力没有任何影响^[36]。但,有研究表明,有机肥长期施用可增加土壤对 CH_4 的氧化能力^[2,37]。因此,Gulledge 等^[38]认为,肥料对土壤 CH_4 的氧化有长期效应和短期效应。短期效应可能是基质竞争引起的氧化能力下降,而长期施肥可能引起甲烷氧化菌群落结构的改变。Seghers 等^[37]报道,在施用纯化肥的处理中 CH_4 氧化能力显著降低。Castro 等^[39]认为,施用尿素后土壤中氧化大气 CH_4 的优势种群由原来的甲烷氧化菌变成硝化细菌,使得甲烷氧化菌数量减少,功能受到抑制。郑聚锋等^[40]对长期不同施肥下水稻土的研究中发现,长期单一施用氮肥为主的化肥显著降低土壤对 CH_4 的氧化能力,同时显著降低稻田土壤甲烷氧化菌的多样性和丰富度。Le Mer 等^[41]研究表明,土壤甲烷氧化菌活性与田间持水量有关,当土壤含水量低于田间持水量时,其活性随含水量的增加而增加,当超过时其活性随含水量的增加而降低。蔡祖聪等^[42]认为,甲烷氧化菌比产甲烷菌有更广的温度适应性,且忍受低温能力更强, CH_4 氧化的最适温度为 $35\text{ }^\circ\text{C}$,当温度超过 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 或低于 $12.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时 CH_4 氧化被完全抑制。

4 展望

目前,稻田 CH_4 排放研究已取得重要进展,而不同施肥措施、环境因子对稻田 CH_4 排放的影响仍存在争议,尤其是施肥对稻田 CH_4 排放的影响存在短期效应和长期效应。施肥管理措施对 CH_4 排放的影响归根结底是施肥管理措施变化引起土壤特性变化及相应的 CH_4 相关菌群活性变化的结果。因此,有必要开展施肥措施对稻田 CH_4 排放的联合影响研究,并从 CH_4 产生、排放整个过程阐明其机理。利用仪器与手段准确监测土壤特性、 CH_4 相关菌群的同步动态变化,系统深入地了解长期不同施肥下 CH_4 排放关系及其机理。

参考文献

- [1] 马静,徐华,蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤,2010,42(2):153-163.
- [2] 吕琴,闵航,陈中云. 长期定位试验对水稻田土壤甲烷氧化活性和甲烷排放通量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(6):608-612.
- [3] 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.
- [4] 陈德章,王明星,上官行健,等. 我国西南地区的稻田 CH_4 排放[J]. 地球科学进展,1993,8(5):47-54.
- [5] 秦晓波,李玉娥,李克樱,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.
- [6] DENIER VAN DER GON, NEUE H A C. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland ricefield[J]. Global Biogeochemistry Cycles,1995,9:11-22.
- [7] 伍芬琳,张海林,李琳,等. 保护性耕作下双季稻田甲烷排放特征及温室效应[J]. 中国农业科学,2008,41(9):2703-2709.
- [8] 吴家梅,纪雄辉,刘勇. 不同施肥处理稻田甲烷排放研究进展[J]. 农业环境与发展,2010(2):19-24.
- [9] 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.
- [10] 荣相民,袁正平,胡瑞芝,等. 地下水位与有机肥及水分管理对稻田甲烷排放的影响[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2001,27(5):346-349.
- [11] SCHÜT Z 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 rates from an Italian rice paddy [J]. J Geophys Res,1989,94(D13):16405-16416.

- [12] 谢小立,王卫东,上官行健,等. 施肥对稻田甲烷的影响[J]. 农村生态环境,1995,11(1):10-14.
- [13] 上官行健,王明星. 稻田甲烷排放影响因子的研究进展[J]. 中国农业气象,1993,14(4):48-53.
- [14] WASSMANN R, BUENDIA L V, LANTIN R S, et al. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Banos, Philippines[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58: 107-119.
- [15] LIU K X, WEN L Z, YOU Z L. Effect of combined application of organic and fertilizers on methane emission from paddy soil and rice growth[J]. Pedosphere, 2007, 7(4): 379-382.
- [16] 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.
- [17] 孙文涛,肖千明,姜春荣,等. 土壤中甲烷的形成、排放及影响因素[J]. 杂粮作物, 2000, 20(5): 44-47.
- [18] 蔡祖聪,鹤田治雄,沈光裕,等. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 145-154.
- [19] 刘金剑,吴萍萍,谢小立,等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH₄ 的排放[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2878-2886.
- [20] 蔡祖聪,谢德体,徐华. 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.
- [21] 徐华,蔡祖聪. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2002, 37(1): 69-76.
- [22] GREENLAND D J, WILD A, PHILIP D. Myths and science of soils in the tropics[M]. AM. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, 1992: 17-34.
- [23] MER J L, ROGER P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soil: A review[J]. Eur J Soil Biol, 2001, 37: 25-50.
- [24] 单丽伟,冯贵颖,范三红. 产甲烷菌的研究进展[J]. 微生物学杂志, 2003, 23(6): 42-46.
- [25] LOWE D C. Global change: A green source of surprise[J]. Nature, 2006, 439(7073): 148-149.
- [26] 陈中云,闵航,吴伟祥. 不同离子水对稻田土壤甲烷氧化活性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 219-223.
- [27] 闵航,陈美慈,钱泽澎. 不同栽培措施对水稻田甲烷释放甲烷产生菌和甲烷氧化菌的影响[J]. 农业环境保护, 1994, 13(1): 7-11.
- [28] FRENZEL P, ROTHFUSS F, CONRAD R. Oxygen profiles and methane turnover in a flooded rice microcosm[J]. Biol Fertil Soils, 1992, 14: 84-89.
- [29] SASS R L, FISHER F M, HARCUMBE P A, et al. Methane production and emission in a Texas rice field[J]. Global Biogeochemical Cycle, 1990, 4: 47-68.
- [30] 陈美慈,闵航,吴伟祥,等. 不同类型土壤中甲烷释放特征和产甲烷菌数量的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(1): 79-83.
- [31] 赵英,钱泽澎. 水稻田中占优势的产甲烷细菌[J]. 中国沼气, 1993, 11(4): 36-40.
- [32] MASSCHELEYN P H, DELAUNE R D, PATRICK W H J. Methane and nitrous oxide emission from laboratory measurements of rice soil suspension: Effect of soil oxidation-reduction status[J]. Chemosphere, 1993, 26: 251-260.
- [33] ROY R, KLÜBER H D, CONRAD R. Early initiation of methane production in anoxic rice soil despite the presence of oxidants[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1997, 24: 311-320.
- [34] 李道西. 控制灌溉稻田甲烷排放规律及影响机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [35] HÜTSCH B W. Methane oxidation in soils of two long-term fertilization experiments in Germany[J]. Soil Biol Biochem, 1996, 28(6): 773-782.
- [36] HÜTSCH B W, WEBSTER C P, POWLSON D S. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the Broadbalk wheat experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(10): 1307-1315.
- [37] SEGHERS D, SICILIANO S D, TOP E M V. Combined effect of fertilizer and herbicide applications on the abundance, community structure and performance of the soil methanotrophic community[J]. Soil Biology and Soil Chemistry, 2005, 37: 187-193.
- [38] GULLEDGE J, HRYWNA Y, CAVANAUGH C, et al. Effects of long-term nitrogen fertilization on the uptake kinetics of atmospheric methane in temperate forest soil[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 49: 389-400.
- [39] CASTRO M S, PETERJOHN W T, MELILLO J M, et al. Effect of nitrogen fertilization on the fluxes of N₂O, CH₄, and CO₂ from soils in a Florida slash pine plantation[J]. Can J Forest Res, 1994, 24: 9-13.
- [40] 郑聚锋,张平究,潘根兴,等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4864-4872.
- [41] LE MER J, ESCOFFIER S, CHESEL C, et al. Microbiological aspects of methane emission by a ricefield soil from Camargue: 2. Methanotrophy and related microflora, European[J]. Journal of Soil Biology, 1996, 32: 7-80.
- [42] CAI Z C, YAN X Y. Kinetic model for methane oxidation by paddy soil as affected by temperature, moisture and N addition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 715-725.

(上接第 420 页)

于氮肥是小麦生长所需的大量元素,同时氮肥来自施肥的补给,但氮分解速率较快,因此在分蘖期土壤供应不足,所以这个时期就是追肥的最佳时期。拔节期或孕穗期追氮产量最高,品质较好。在浇水过程中,将氮肥撒入水中,让肥料均匀^[8]。

8 总结

合理施肥时间的选择及施肥量的把握至关重要。通过对土壤中铵态氮、硝态氮和速效氮的测定分析,计算出土壤中的施氮量。在合理的施肥时间施肥,最终增加小麦对土壤的氮素的充分吸收,进而提高小麦产量。

参考文献

- [1] 金继运. 土壤养分系统研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992: 705-709.
- [2] 王义芳,梅桂芳,丁波. 氮肥不同用量对小麦产量和效益的影响[J]. 现代农业科技, 2007(18): 99-100.
- [3] 路开梅,史学礼. 氮肥用量及施用期对强筋小麦产量和品质的影响[J]. 河南科技学院学报, 2008(3): 7-9.
- [4] 董炳友,王丽君. 氮碳代谢与粒重形成的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2003(3): 30-33.
- [5] 徐阳春,蒋廷惠,蔡大同. 氮肥用量对小麦加工品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 1999(4): 49-52.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [7] 张龙步,董克,徐正进,等. 水稻田间实验方法和测定技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993.
- [8] 陆景林. 植物营养学(上)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1994: 17-19.