

水分管理影响稻田甲烷排放研究进展

李香兰^{1,2}, 徐 华¹, 李小平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:水分管理是影响稻田甲烷(CH_4)产生、氧化与排放的重要因素之一。根据国内外文献资料,综述了非水稻生长期和水稻生长期水分管理对稻田 CH_4 产生排放的影响,以及非水稻生长期水分管理对水稻生长期 CH_4 产生排放的影响,并提出有待研究的内容。综合多年的研究结果表明,冬季淹水不仅引起冬季(非水稻生长期) CH_4 的大量排放,还影响水稻生长期 CH_4 排放量。非水稻生长期土壤水分含量越高,随后水稻生长期 CH_4 排放量越大,产生和氧化能力越强。水稻生长期烤田相对于持续淹水能大量减少 CH_4 排放。

关键词:水稻生长期;非水稻生长期;水分管理;甲烷;稻田;冬水田

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)02-0221-07

Water Regime Management Affects Methane Emission from Rice Paddy Field: A Review

LI Xiang-lan^{1,2}, XU Hua¹, LI Xiao-ping¹, 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: Water regime management is one of the factors affecting methane(CH_4) generation, oxidation, and emission of rice paddy fields. Flooding of the paddy field in winter causes high CH_4 emission not only during the non-rice growing season, i. e. winter, but also during the rice growing season to follow. The higher the soil moisture content in the non-rice growing season, the higher CH_4 emission, and the stronger CH_4 production and oxidation capacities of the soil during the rice growing season. The effect of water regime management during the non-rice growing season on CH_4 emission during rice growth season was attributed to water content affecting methanotroph and methanogenesis. Drying rice paddy fields in sunshine or plantation of wheat in winter could profoundly reduce CH_4 emission from long flooded paddy fields. Also, CH_4 emission could be sharply decreased by midseason aeration during rice growing period. In this paper a review is presented to summarize the effect of water regime management during the non-rice and rice growing seasons on CH_4 emission from the soils and the effect of water regime management during the non-rice growing season on CH_4 emission during the rice growing season, and issues that need further studying are also put forward.

Keywords: rice growing season; non-rice growing season; water regime management; methane; rice paddy field; year-round flooded rice paddy field

甲烷(CH_4)是仅次于 CO_2 的最重要的温室气体^[1],稻田排放的 CH_4 约占全球排放的 8.85%~18.79%^[2]。 CH_4 是极端厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果,与土壤还原条件关系密切的土壤水分状况是

影响稻田 CH_4 排放的最重要的因素之一,人们寄希望于寻求合适的水分管理措施来减少稻田 CH_4 排放量。

根据全年水分管理不同我国稻田大致分为 3 类: 间隙灌溉水旱轮作稻田、持续淹水水旱轮作稻田及全年淹水稻田(冬水田)。冬水田是我国西南山地丘陵区广泛存在的独特农田生态系统,其特点是春季种水稻、9 月水稻收割后蓄水保田直到次年 5 月再移栽水稻。冬水田总面积 2.7~4.0 百万 hm^2 , 占我国水稻种植面积的 8%~12%,但 CH_4 排放量却高达全国稻田 CH_4 排放总量的 60%^[3]。冬季淹水不仅引起冬季(非水稻

收稿日期:2008-01-29

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;40671094)

作者简介:李香兰(1980—),女,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措施研究。

E-mail: xli@issas.ac.cn

通讯作者:徐 华 E-mail: hxu@issas.ac.cn

生长期) CH_4 的大量排放,还是导致水稻生长期 CH_4 排放过高的主要因素^[4-6]。改变冬水田耕种利用方式,如将一季中稻的冬水田改为半旱垄作或稻麦轮作,能显著改变冬水田生态环境及土壤条件,从而改变土壤 CH_4 排放^[14-15]。对水稻生长期而言,以前期淹水、中期烤田、后期干湿交替为特征的间隙灌溉是我国及其他水稻种植国家主要的水分管理措施,它原本是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 CH_4 排放^[7-9]。

水稻生长期、非水稻生长期水分管理强烈影响稻田 CH_4 产生排放,非水稻生长期水分管理对水稻生长期 CH_4 排放的影响不可低估。本文试图在前人研究的基础上,总结非水稻生长期和生长期水分管理对我国稻田 CH_4 产生排放的影响以及非水稻生长期水分管理对水稻生长期 CH_4 产生排放的影响,旨在为我国稻田 CH_4 排放规律及减缓措施的研究提供理论支持,为拟定合理的稻田水分管理措施提供理论基础。

1 非水稻生长期水分管理对 CH_4 产生排放的影响

土壤中 CH_4 的生成是一个生物化学过程^[16]。水稻土中复杂的有机质,包括有机肥料、动植物残体、土壤腐殖质以及水稻根系脱落物和分泌物等,被各类细菌组成的食物链转化成简单的产甲烷前体。产甲烷菌在严格厌氧条件下作用于这些产甲烷前体产生 CH_4 ,主要有两条途径^[17]:一是在专性矿质化学营养产甲烷菌的参与下,以 H_2 或有机分子为 H 供体还原 CO_2 或直接利用 HCOOH 和 CO 形成 CH_4 ,即: $\text{CO}_2+4\text{H}_2\rightarrow\text{CH}_4+2\text{H}_2\text{O}$, $4\text{HCOOH}\rightarrow\text{CH}_4+3\text{CO}_2+2\text{H}_2\text{O}$, $4\text{CO}+\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{CH}_4+3\text{CO}_2$;二是在甲基营养产甲烷菌的参与下,对甲基化合物(主要是天然条件下有机化合物厌氧分解的发酵过程的主要中间产物乙酸)的脱甲基作用,即: $\text{RCOOH}\rightarrow\text{RH}+\text{CO}_2$ (R 主要是 $\text{CH}_3\cdot$),这是 CH_4 形成的主要途径,占70%左右^[18]。 CH_4 产生是土壤有机质厌氧微生物分解的最后一步,受土壤水分管理、施肥、土壤理化性质、土壤温度及水稻植株生长等因素的综合影响。

尽管冬季较低的气温抑制了产甲烷菌活性,但冬水田持续淹水造成的极端厌氧环境使土壤 Eh 处于适合产甲烷菌活动范围内,当土壤温度一旦适宜产甲烷菌活性时便会有大量 CH_4 产生排放。Yagi等^[20]通过

原状土柱试验也发现,冬季休闲期 CH_4 排放量是水稻生长期持续淹水稻田的14%~18%。蔡祖聪等^[19]通过1995—2000连续6年的大田试验研究分析冬水田影响水稻生长期 CH_4 排放的因素,结果显示冬季(非水稻生长期)淹水休闲稻田 CH_4 排放量占 CH_4 年排放量的39%~44%; CH_4 排放量与土壤温度呈显著正相关。同时发现,改冬季淹水稻田为旱作小麦, CH_4 年排放量会显著下降,说明稻田冬季排水能有效降低 CH_4 排放量。

马秀梅等^[21]对我国西南地区川中丘陵地带冬水田休闲期温室气体排放通量进行原位观测研究,发现冬水田休闲期 CH_4 排放通量为 $5.37\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;受温度和地表水的影响,冬水田休闲期 CH_4 排放通量呈现高-低-高的明显的动态变化。魏朝富等^[15]发现,虽然非水稻生长期冬水田 CH_4 排放量总体上低于水稻生长期,但表现出明显的季节变化规律:9月份水稻收获至10月上旬, CH_4 排放量相对较高,其间有两个明显峰值;在此期间的 CH_4 排放量主要决定于稻田中再生稻、杂草的生长情况及气温、土温的波动等;随后直到3月下旬,气温、土温均较低且相对稳定, CH_4 排放量较低;3月下旬后,随着气温、土温逐步回升,稻田杂草生长速率和生长量增大, CH_4 排放量随之升高。冬水田 CH_4 排放量高是产甲烷菌在淹水造成的极端还原条件下数量不能得到有效控制的结果。由于产甲烷菌是严格厌氧菌,低浓度的氧气也足以杀死产甲烷菌,非水稻生长期排干、耕翻土壤使其最大限度地暴露于空气,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,从而减少非水稻生长期稻田 CH_4 排放量。

2 水稻生长期水分管理对 CH_4 产生排放的影响

20世纪50年代,我国稻田水稻生长期水分管理方式主要是持续淹水。进入20世纪80年代后,水稻生长中期排水烤田因有效提高水稻产量而被农民广为接受。随着节水意识的提高和管理技术的发展,前期淹水、中期烤田(通常烤田7~10d)、后期干湿交替(每周灌溉1次、期间出现土面落干状态)至水稻收获,成为一项值得推广的农业措施,特别在水稻种植面积较大而缺水较为严重的华北平原^[22]。稻田水分管理会影响土壤通透性及氧化还原状态,进而影响稻田 CH_4 产生排放及氧化。

2.1 土壤水分对 CH_4 产生排放的影响

近十几年来大量研究表明,水稻生长期持续淹水

造成稻田极端厌氧,有利于 CH_4 的产生排放;相反,烤田增加土壤通透性,大气中 O_2 扩散到土壤中破坏原有的还原状态,从而抑制 CH_4 产生,即烤田相对于持续淹水能大量减少水稻生长期 CH_4 的排放^[5-7]。早在 1992 年, SASS 等^[7]发现间隙灌溉相对于持续淹水能大幅度减少稻田 CH_4 排放量。Cai 等^[8]指出水稻生长期持续淹水,稻田 CH_4 排放量远远高于经历烤田和干湿交替处理的稻田 CH_4 排放量,其平均排放通量分别为 $6.22, 3.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Yagi 等^[9]研究了持续淹水及水分排干对稻田 CH_4 排放的影响,结果表明水稻生长期几次短时间的水分排干大大降低了 CH_4 排放量,淹水和排干处理 1991 年和 1992 年水稻生长期 CH_4 排放总量分别为 $14.8, 8.63 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 及 $9.49, 5.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。蔡祖聪等^[23]通过培养试验研究淹水、好气(70% WHC)和淹水好气交替的不同水分类型对土壤温室气体排放的影响,结果表明连续淹水条件下土壤排放出大量的 CH_4 ,好气条件下土壤不排放 CH_4 ,淹水好气交替处理的土壤排放的 CH_4 在好气和连续淹水之间。Towprayoon 等^[24]研究了烤田天数和烤田频度对稻田 CH_4 排放的影响,结果表明水稻生长期水分排干大大降低了稻田 CH_4 的排放,排水一次及排水两次相对于持续淹水 CH_4 排放量分别降低了 29%和 36%。持续淹水处理 CH_4 排放通量是烤田处理的 12~20 倍^[25]。水稻移栽后烤田开始前持续淹水时间越长即烤田开始时间越迟, CH_4 排放量越高;与土壤水分变化密切相关的土壤 Eh 是影响不同烤田处理水稻生长期 CH_4 排放的主要因素。

2.2 土壤水分对 CH_4 氧化的影响

CH_4 排放是土壤中 CH_4 产生、氧化及向大气传输 3 个过程相互作用的结果。 CH_4 产生是土壤极端厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果,主要发生在土壤耕作层; CH_4 氧化则是有氧条件下甲烷氧化菌活动的结果,主要发生在土壤表层和根际氧化微域,也可能发生在植株体内的有氧环境中。稻田土壤中生成的 CH_4 在排放到大气前约 80%~94%被氧化^[26],只有很少部分通过水稻植株、气泡和分子扩散 3 种途径向大气排放,分别占排放总量的 55%~73%, 20%~40%和 3%~5%^[27-28]。稻田 CH_4 产生的厌氧条件及 CH_4 氧化的有氧环境以及 CH_4 的植株排放途径在很大程度上都取决于土壤水分状况,不同灌溉模式下稻田水分状况的变化对稻田 CH_4 的氧化及排放有着重大影响。

蔡祖聪等^[29]通过实验室培育试验研究土壤水分

状况对 CH_4 氧化的影响,结果表明,当土壤水分含量为 20%~95% WHC 时,稻-麦轮作土壤 CH_4 氧化量与土壤水分含量的变化可用抛物线方程拟合($R^2=0.9342$, $P<0.01$),氧化 CH_4 的最佳土壤水分含量为 71% WHC;而对一年二熟且冬季休闲的常年淹水稻田土壤 CH_4 氧化量随着土壤含水量的增加而呈指数增加($R^2=0.9392$, $P<0.01$);在土壤含水量低于 60% WHC 时土壤的 CH_4 氧化量很小,高于 60% WHC 时, CH_4 氧化量迅速增加,大于 90% WHC 时仍未出现最大氧化量。同时发现,稻田土壤氧化主要是土壤中生成的 CH_4 而不具备氧化大气 CH_4 的能力,对高浓度 CH_4 的氧化能力远大于其他土壤类型(如草地土壤);并且一水一早的稻-麦轮作水稻土其氧化 CH_4 的最佳土壤水分含量显著低于常年淹水的水稻土,说明土壤所处环境的常年水分状况是决定其氧化 CH_4 最佳水分含量的主要因素,土壤常年水分含量越高,氧化 CH_4 的最佳水分含量越大,导致这一现象的原因可能是甲烷氧化微生物对环境适应的结果。

旱地、森林、草原、沼泽和湿地土壤氧化大气 CH_4 的最佳水分含量不同于水稻土。Whalen 和 Reeburgh 等^[30]对 3 种氧化大气 CH_4 的土壤进行研究的结果表明,2 种旱地森林土壤氧化大气 CH_4 的最佳水分含量为 21%和 27% WHC,1 种沼泽土壤氧化 CH_4 的最佳水分含量为 50% WHC;土壤水分含量与 CH_4 氧化速率的关系均可用抛物线方程拟合。Gulledge 和 Schimel 等^[31]发现 5 种土壤氧化大气 CH_4 的最佳水分含量介于 20%~40% WHC,与这些土壤原位环境典型的土壤含水量一致。增加土壤水分含量可以减少微生物的水分胁迫,但 CH_4 扩散受阻,抑制 CH_4 氧化,即 CH_4 扩散速率是土壤水分含量高于 25%~45% WHC 时 CH_4 氧化率受到限制的主要因素。

有氧条件下土壤中甲烷氧化菌可氧化 CH_4 并将其作为惟一的碳源和能源。Bender 和 Conrad 等^[32]推测土壤中存在两种甲烷氧化菌:一种在高浓度 CH_4 ($>40 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$)下生长,对 CH_4 亲和力低,其临界浓度高,主要存在于湿地和稻田土壤中;另一种在与大气 CH_4 浓度相近的条件下生长,对 CH_4 亲和力高,其临界浓度低,通常小于大气 CH_4 的浓度,因而这些甲烷氧化菌可以靠消耗大气 CH_4 为生,主要存在于旱地不饱和土壤中。李俊等^[33]对不饱和土壤 CH_4 的吸收与氧化做了系统分析与总结,指出不饱和土壤是已知惟一的 CH_4 生物壑。研究表明,甲烷氧化菌消耗 CH_4 的能力一般超过 CH_4 由大气向土壤中扩散的潜力^[34],土壤

中气体扩散的速率成为 CH_4 氧化的调控因子^[35-36]。由于气体在液相中扩散速率比在气相中慢的多,土壤水分含量成为 CH_4 氧化的主要因素,土壤湿度过低引起水分胁迫影响微生物活性,从而影响对 CH_4 的氧化^[37]。

3 非水稻生长期水分管理对水稻生长期 CH_4 产生排放的影响

除了水稻生长期水分管理强烈影响 CH_4 排放量外,前作(非水稻生长期)水分管理措施对后作(水稻生长期) CH_4 排放量的影响也不可低估。Trollidenier 等^[39]通过盆栽试验研究了两季单季稻之间土壤水分管理对水稻生长期稻田产甲烷菌数量及 CH_4 排放量的影响,发现两季单季稻之间持续淹水的土壤,其水稻生长期产甲烷菌数量及 CH_4 排放量明显高于两季单季稻之间持续干燥的土壤;而且前茬干燥休闲处理,稻季土壤 Eh 下降缓慢, CH_4 排放较低;土壤持续淹水 90 d 后呈极端还原状态有利于产甲烷菌活性时, CH_4 排放量才略有升高。蔡祖聪等^[40]研究了我国华南、西南稻田非水稻生长期水分管理措施对水稻生长期 CH_4 排放的影响,发现非水稻生长期水分排干稻田 CH_4 排放量远远低于冬灌田(非水稻生长期淹水稻田),且非水稻生长期水分排干时间越长水稻生长期 CH_4 排放量越低,这种作用仅能维持一季水稻生长期。徐华等^[41]的盆栽试验也发现,冬季持续淹水处理的 CH_4 排放通量是冬季自然干燥休闲的 5.74 倍。水稻土 CH_4 产生、氧化和排放皆受土壤历史水分条件的强烈影响,非水稻生长期土壤水分含量越高,随后水稻生长期 CH_4 排放量越大, CH_4 产生和氧化能力越强^[42]。非水稻生长期水分管理对水稻生长期 CH_4 排放影响的主要原因可能与土壤水分影响产甲烷菌和甲烷氧化菌的种群状态,长期的好氧条件可能使产甲烷菌数量大幅度减少,活性受到极大抑制有关。

江长胜等^[43]通过田间原位测定研究川中丘陵区冬灌田 CH_4 排放特征和耕作制度对冬灌田 CH_4 排放的影响,结果表明一年只种一季中稻冬季灌水休闲的冬灌田水稻生长期 CH_4 平均排放通量为 $21.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,非水稻生长期为 $3.77 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,冬灌田不仅在水稻生长期排放 CH_4 而且在长达 230~250 d 的休闲期内仍排放 CH_4 ,非水稻生长期 CH_4 排放量占全年总排放量的 23%;采用水旱轮作后,冬灌田 CH_4 排放量大大降低,稻-麦轮作和稻-油菜轮作全年 CH_4 排放量分别为中稻-冬季灌水休闲处理的 44%和 41%。究

其原因,一方面水旱轮作水稻收获后排水种植小麦和油菜等旱地作物,土壤通气性增强使土壤 Eh 升高,一些还原性物质被转化为氧化态: NH_4^+ 通过硝化过程转化为 NO_3^- ,低价态 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 S^{2-} 等均被氧化。另一方面土壤连续干燥时间越长,这些还原性物质氧化就越彻底,第二年淹水还原这些物质所需时间就越长,土壤 Eh 下降到适合产甲烷菌活动范围时间也越长,从而延缓稻田水稻生长期 CH_4 排放。而冬灌田土壤长时间持续淹水,土壤的氧化还原状况已经适合产甲烷菌生命活动的需要,在合适的温度、有机质和其他营养物质供应时即可产生 CH_4 ^[12,43,47]。因此,改善冬水田排水设施,大幅度减少冬水田面积,改一年一季稻为一水一旱,不仅提高土壤生产力,而且对降低我国稻田 CH_4 排放具有重要意义。

此外,蔡祖聪等^[40]在四川和广州的田间试验不仅发现将冬灌田冬季排干种植小麦,可使次年水稻生长季的 CH_4 排放通量比冬季淹水的稻田减少 63%~72%;同时发现在排除冬季淹水和有机肥过多施用的观测值后,我国现有的稻田 CH_4 排放量观测结果与冬季降水量呈极显著的指数关系^[42]。Kang 等^[44]利用1990年 CH_4 观测点每天降雨量数据用 DNDC 模型估算土壤水分含量,并对我国稻田 CH_4 排放量与非水稻生长期降雨量及土壤水分含量做相关性分析,结果表明非水稻生长期降雨量能解释 73%的 CH_4 排放量的变异;土壤水分含量能解释 85%的空间变异。在排水良好的条件下,非水稻生长期土壤水分含量与相应时期的降雨量存在密切关系,通过水稻生长期 CH_4 排放量与非水稻生长期土壤水分含量之间的定量关系,利用现成的降雨量数据进行估算我国稻田 CH_4 排放总量已成为估算我国稻田 CH_4 排放量的方法之一。

4 总结及研究展望

4.1 总结

水稻生长期和非水稻生长期水分管理影响稻田土壤 CH_4 产生、氧化和排放。非水稻生长期持续淹水造成的极端厌氧条件使土壤 Eh 处于适合产 CH_4 范围内,当土壤温度一旦适宜产甲烷菌活性时便会有大量 CH_4 产生排放。冬季排干、翻耕土壤或种植旱作物(如冬小麦),可有效改变产甲烷菌和甲烷氧化菌的种群状态,使产甲烷菌数量大幅度减少和活性受到极大抑制,从而降低稻田 CH_4 排放量。水稻生长期以前期淹水、中期烤田、后期干湿交替为特征的间隙灌溉模式相对于持续淹水能极大降低 CH_4 排放量,这是因

为烤田极大促进土壤通透性,改变土壤原有的还原状态,从而抑制 CH_4 产生排放。不仅水稻生长期,而且非水稻生长期水分管理对 CH_4 产生排放的影响也不可低估。非水稻生长期土壤水分含量越高,随后水稻生长期 CH_4 排放量越大, CH_4 产生和氧化能力越强。其主要原因是土壤水分影响产甲烷菌和甲烷氧化菌的种群状态,长期的好氧条件可使产甲烷菌数量大幅度减少,活性受到极大抑制。综合分析全年水分管理对 CH_4 排放的影响,对正确估算及有效减缓稻田生态系统 CH_4 排放意义重大。

4.2 研究展望

传统的持续淹水灌溉模式会削弱土壤中有有机质对土壤的物理环境和生物学特性的改善效果,而合理的水分管理模式可明显改善土壤物理化学环境和提高土壤生物学活性,从而大大提高土壤的综合质量。水稻生长期稻田覆盖稻草或薄膜并使土壤水分处于不饱和状态能节省 2/3 的农田用水,对产量影响较小或几乎没有影响^[38]。覆盖稻草的不饱和稻田土壤能减少 87%~95% 的 CH_4 排放量,并有效降低 CH_4 引起的温室效应,因此引起国内高度重视。节水灌溉条件下,土壤通气状况得到极大改善,既促进了 CH_4 氧化又部分抑制了 CH_4 产生,水稻植株甚至会受到一定程度的水分胁迫可关闭部分气孔,减少植物体途径的 CH_4 排放^[14]。近年来,GCRPS 系统(Ground Cover Rice Production System)成为一种有效的节水灌溉系统^[13],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。但节水灌溉措施因改变淹水土壤的还原状态,可能促进另一种重要的温室气体 N_2O 的产生排放,值得进一步研究与探讨。

水、肥是影响稻田 CH_4 产生排放的两大主要因子。秸秆还田因其较好的保水保温作用促进水稻生长及提高水稻产量而被农民大力推广,但秸秆还田却极大促进 CH_4 的产生排放。秸秆不同的施用方式,如垄施、沟施、面施和混施,对稻田 CH_4 产生排放的影响如何还值得关注。此外,改传统的持续淹水的灌溉模式为节水灌溉(如控制水层 2 cm)对不同秸秆还田方式下 CH_4 产生排放的影响如何未见报道,研究水肥交互作用对稻田生态系统温室气体排放的影响意义重大。

冬水田地区冬季水分及稻草根茬管理是影响冬季非水稻生长期及次年水稻生长期 CH_4 排放的重要因素。改冬季淹水休闲为冬季排水种植旱作作物,或改稻草根茬水稻移栽前翻入地下为水稻收割后冬季

淹水前翻入地下,对稻田生态系统 CH_4 年排放量影响不同。此外,非水稻生长期水分管理对水稻生长期 CH_4 产生、氧化、传输和排放的影响机理及水稻生长期不同水分管理对 CH_4 产生氧化潜势的影响值得进一步深入研究。稳定性 C 同位素方法在自然条件下研究 CH_4 产生率、氧化率、产生途径及传输方式具有无破坏性、灵敏度高的优点^[10],目前尚缺乏相关报道。

参考文献:

- [1] Ramaswamy V, et al. Radiative forcing of climate change [C]//Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton J T, et al. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 349-416.
- [2] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing [C]//Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 539-544.
- [3] CAI Zu-cong. A category for estimate of CH_4 emission from rice paddy fields in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49: 171-179.
- [4] CAI Zu-cong, Tsuruta H, Minami K. Methane emission from rice fields in China: Measurement and influencing factors [J]. Geophys Res, 2000, 105: 17231-17242.
- [5] XU Hua, CAI Zu-cong, JIA Zhong-jun, et al. Effect of land management in winter crop season on CH_4 emission during the following flooded and rice growing period [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58: 327-332.
- [6] XU Hua. Effect of soil properties and soil water contents in the winter crop season on CH_4 flux during rice growth period and its mechanisms [D]. PhD thesis. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing, 2001.
- [7] Sass R L, Fisher F M, Wang Y B, et al. Methane emission from rice fields: The effect of floodwater management [J]. Global Biogeochem Cycles, 1992, 6: 249-262.
- [8] CAI Zu-cong, XU Hua, ZHANG Han-hui, et al. Estimate of methane emission from rice paddy fields in Taihu region [J]. China Pedosphere, 1994, 4(4): 297-306.
- [9] 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.
- [10] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪. 稻田甲烷氧化研究方法进展 [J]. 土壤, 2007, 39(2): 153-156.
MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong. Advances on methods to quantify methane oxidation in paddy fields [J]. Soils, 2007, 39(2): 153-156.
- [11] 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.
- [12] Cai Zu-cong, Xu Hua. Effect of land management in winter crop season on methane emission from following rice growth period. in Chemistry for the Protection of the Environment. vol. 3. edited by L. Pawloeski et al. Plenum. New York, 1998. 43-50.
- [13] Chritine Kreye, Klaus Dittert, Zheng X H, et al. Burkhard Sattelmacher. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2007, 77: 293-404.
- [14] 魏朝富, 高明, 车福才, 等. 浸润垄作稻田土壤生态系统的研究[J]. 生态学杂志, 1993, 12(3): 26-30.
- WEI Chao-fu, GAO Ming, CHE Fu-cai, et al. A study on infiltrated-ridged paddy soil ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 1993, 12(3): 26-30.
- [15] 魏朝富, 高明, 黄勤, 等. 耕作制度对西南地区冬水田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 157-164.
- WEI Chao-fu, GAO Ming, HUANG Qin, et al. Effect of tillage-cropping systems on methane emission from year-round flooded paddy field in southwest China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(2): 157-164.
- [16] 徐琪, 杨林章, 董元华. 中国稻田生态系统[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 50-95.
- XU Qi, YANG Lin-zhang, DONG Yuan-hua. Rice ecosystem of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996: 50-95.
- [17] Papen H, Renneberg H. Microbial processes involved in emissions of radioactively important trace gases, Trans. 14th Intern[J]. Congr Soil Sci, 1990, 2: 232-237.
- [18] Strayer R F, Tiedje J M. Kinetic parameters of the conversion of the methane precursors to methane in a hyperentrophic lake sediments[J]. Appl Environ Microbiol, 1978, 36: 330-346.
- [19] 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.
- [20] Yagi K, Minami K, Ogawa Y. Effects of water percolation on methane emission from rice paddies: a lysimeter experiment[J]. Plant and Soil, 1998, 198(2): 193-200.
- [21] 马秀梅, 朱波, 杜泽林, 等. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1199-1202.
- MA Xiu-mei, ZHU Bo, DU Ze-lin, et al. CH₄, CO₂ and N₂O emissions from the year-round flooded paddy field at fallow season[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(6): 1199-1202.
- [22] ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 8030-8042.
- [23] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36: 484-491.
- CAI Zu-cong. Effect of water regime on CO₂, CH₄ and N₂O emissions and overall potential for greenhouse effect caused by emission gases[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36: 484-491.
- [24] Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields[J]. Chemosphere, 2005, 59: 1547-1556.
- [25] 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.
- [26] Elizabeth J F, Hemond H F. Methane transport and oxidation in the unsaturated zone of sphagnum peatland[J]. Global Biogeochemistry Cycles, 1992, 6: 33-34.
- [27] 上官行健, 王明星, 陈德章, 等. 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, et al. The transport of methane in the rice paddy fields[J]. Advance in Earth Sciences, 1993, 8(5): 13-22.
- [28] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放、产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 600-612.
- WANG Ming-xing, LI Jing, ZHENG Xun-hua. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(4): 600-612.
- [29] 蔡祖聪, Mosier Arivn R. 土壤水分状况对 CH₄ 氧化, N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. 土壤, 1999, 31(6): 289-294, 298.
- CAI Zu-cong, Mosier Arivn R. Effect of water regime on CH₄ oxidation, N₂O and CO₂ emissions[J]. Soils, 1999, 31(6): 289-294.
- [30] Whalen S C, Reeburgh W S, Sandbeck K A. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56: 3405-3411.
- [31] Gullledge J, Schimel J P. Low-concentration kinetics of atmospheric CH₄ oxidation in soil and mechanism of NH₄⁺ inhibition[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64: 4291-4298.
- [32] Bender M, Conrad R. Kinetics of CH₄ oxidation in oxic soils[J]. Chemosphere, 1993, 26: 687-696.
- [33] 李俊, 同小娟, 于强. 不饱和土壤 CH₄ 的吸收与氧化[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 141-147.
- LI Jun, TONG Xiao-juan, YU Qiang. Methane uptake and oxidation by unsturated soil[J]. Acta Ecologica Sinia, 2005, 25(1): 141-147.
- [34] Striegl R G. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils[J]. Chemosphere, 1993, 26: 1-4.
- [35] Potter C S, Davidson E A, Verchot L V. Estimate of global biological controls and seasonality in soil methane consumption[J]. Chemosphere, 1996, 32(11): 2219-2246.
- [36] Bradford M A, Ineson P, Wookey P A, et al. Role of CH₄ oxidation, production and transport in forest soil CH₄ flux[J]. Soil Biology Biochemistry, 2001, 33: 1625-1631.
- [37] Kammann C, Grunhage L, Jager H J, et al. Methane fluxes from differentially managed grassland study plots: the important role of CH₄ oxidation in grassland with a high potential for CH₄ production[J]. Environmental Pollution, 2001, 115: 261-273.
- [38] SHI Ying, SHEN Qi-rong, MAO Ze-sheng. Biological response of rice

- crop cultivated on aerobic soil condition and the effect of mulching on it[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2001, 7:291-297.
- [39] Trollidenier G. Methanogenesis during rice growth as related to the water regime between crop seasons[J]. *Biol Fertil Soils*, 1995, 19:84-86.
- [40] 蔡祖聪, 徐 华, 卢维盛, 等. 冬季水分管理方式对稻田 CH_4 排放量的影响[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(2):171-175.
- CAI Zu-cong, XU Hua, LU Wei-sheng, et al. Influence of water management in winter crop season on CH_4 emission during rice growing season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(2):171-175.
- [41] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平, 等. 冬作季节土壤水分状况对稻田 CH_4 排放的影响[J]. *农村生态环境*, 1999, 15(4):20-23.
- XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping, et al. Effect of soil water regime in winter cropping on CH_4 fluxes from rice field[J]. *Rural Eco-Environment*, 1999, 15(4):20-23.
- [42] 徐 华, 蔡祖聪, YAGI Kazuyuki. 水稻土甲烷产生、氧化和排放过程的相互影响—以水分历史处理为例[J]. *土壤*, 2006, 38(6):671-675.
- XU Hua, CAI Zu-cong, YAGI Kazuyuki. Interactions among CH_4 production, oxidation and emission in paddy soil. A Case study of soils with different water history[J]. *Soils*, 2006, 38(6):671-675.
- [43] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(2):207-213.
- JIANG Chang-sheng, WANG Yue-si, ZHENG Xun-hua, et al. Effect of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a central sichuan hilly area of southwest china[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2):207-213.
- [44] KANG Guo-ding, CAI Zu-cong, FENG Xue-zhi. Importance of water regime during the non-rice growing period in winter in regional variation of CH_4 emissions from rice fields during following rice growing period in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64:95-100.
-