

水分管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放季节变化的影响

李香兰^{1,4}, 马 静^{1,4}, 徐 华¹, 曹金留², 蔡祖聪¹, 八木一行³

(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. 江苏农林职业技术学院, 江苏 句容 212400; 3. 国立农业环境技术研究所, 日本 筑波 305; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:通过温室盆栽试验研究了持续淹水和间隙灌溉两种典型水分管理模式对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放季节变化的影响。结果表明, 间隙灌溉条件下 N_2O 排放集中在施分蘖肥后的烤田期及随后复水期, 烤田结束复水后持续 9 d 的 N_2O 排放量占季节排放量的 34.30%; 持续淹水处理, 在土壤追肥后且土温较高时同样观测到 N_2O 的排放。间隙灌溉条件下, CH_4 排放峰值出现在烤田开始后的第 3 d 并在烤田结束前降为零, 烤田结束复水后无 CH_4 排放, 水稻生长期 CH_4 排放与土壤 Eh 呈显著负相关($r=-0.667^{**}$, $P<0.01$); 持续淹水条件下水稻移栽后 31 d 至收获期间土壤 Eh 持续较低, CH_4 排放与土温呈显著正相关($r=0.682^{**}$, $P<0.01$)。采样频率明显影响水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放量的估算, 特别在水分变化剧烈的烤田期及复水期影响更大。

关键词:间隙灌溉; 甲烷; 氧化亚氮; 采样频率; 水稻土

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)02-0535-07

Effect of Water Management on Seasonal Variations of Methane and Nitrous Oxide Emissions During Rice Growing Period

LI Xiang-lan^{1,4}, MA Jing^{1,4}, XU Hua¹, CAO Jin-liu², CAI Zu-cong¹, K.Yagi³

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing 210008, China; 2. Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China; 3. National Institute of Agro-Environmental Sciences, Tsukuba 305, Japan; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A pot experiment was carried out in greenhouse to study effect of water management on seasonal variation of methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions during the rice growing period. Two treatments with three replicates were designed, i.e. continuous flooding to keep a 3 ~ 5 cm water layer over the soil during the rice growth season; and intermittent irrigation, to keep a 3 ~ 5 cm water layer from D1 (the first day after rice transplanting) till D30, aerate the soil till D43, and re-flood the field till D62. Results indicated that two peaks of N_2O fluxes in Treatment II (intermittent irrigation) were observed during the mid-season aeration and re-flooding period. The peak flux in the latter accounted for 34.30% of the total volume emitted during the rice growing period. However, in Treatment CF (continuous flooding), N_2O flux was monitored after fertilization when the soil temperature was high. In Treatment II, CH_4 emission reached a peak on the 3rd day after the beginning of the mid-season aeration and then declined to nearly zero at the end of the aeration period and no CH_4 flux was found in the re-flooding period. Significant negative correlation was observed between CH_4 emission and soil Eh in Treatment II ($r=-0.667^{**}$, $P<0.01$), whereas in Treatment CF, significant positive correlation existed between CH_4 flux and soil temperature during the rice growing period, excluding the first 30 days ($r=0.682^{**}$, $P<0.01$). Sampling frequency obviously affected accuracy of the estimation of CH_4 and N_2O emissions, especially during the mid-season aeration and re-flooding periods.

Keywords: intermittent irrigation; methane; nitrous oxide; sampling frequency; rice paddy soil

CH_4 和 N_2O 是两种重要的温室气体, 可导致全球气候变暖或臭氧层破坏, 对人类生存环境产生严重影

响。虽然它们在大气中含量低于 CO_2 , 但其增温潜势 (以 100 年计) 分别是 CO_2 的 23 倍和 296 倍^[1]。20 世纪 90 年代, 大气中 CH_4 浓度的年增长速度已达到 $7.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1[2]}$ 。稻田是大气 CH_4 和 N_2O 的重要排放源之一。稻田 CH_4 的年排放量为 31~112 Tg, 占全球总排放的 5%~19%^[3]。尽管早期的研究者曾一度认为水稻生长期没有 N_2O 的排放^[4,5], 但近十多年来的许多研究发现

收稿日期: 2007-06-24

基金项目: 国家自然科学基金 (40621001, 40671094)

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全球变化的研究。

E-mail: xlli@issas.ac.cn

通讯作者: 徐 华 E-mail: hxu@issas.ac.cn

水稻田也能排放较多的 N₂O^[6-8]。我国是水稻种植大国,因此对我国稻田 CH₄ 和 N₂O 排放规律、总量估算及减缓措施的研究一直受到国内外的高度关注。

间隙灌溉原本主要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。近十几年的大量研究表明,间隙灌溉(相对于持续淹水)能大幅度减少稻田 CH₄ 排放量,却明显增加了 N₂O 的排放量^[9-14]。这些研究大部分都注意到烤田期间 CH₄ 和 N₂O 的排放,但对烤田结束后复水期 CH₄ 和 N₂O 排放关注不够,尽管也有研究发现复水后存在 N₂O 排放^[15]。另外,以往有关研究采样间隔时间多在 4~5 d 左右,这样的采样频率对水稻生长期的大部分时间是合理的,但在水分变化较大又可能有 N₂O 和 CH₄ 集中排放的烤田及随后的复水期,应该增加采样次数以能更准确地观测并估算水稻生长期,特别是烤田及随后的复水期 CH₄ 和 N₂O 排放量。本文通过温室盆栽试验研究了常规施肥条件下水分管理对水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 排放季节变化的影响,并对烤田及随后的复水期 CH₄ 和 N₂O 排放进行了更密切的观测。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤采自江苏省宜兴市大浦镇(31°17'N, 119°54'E)的水稻田。土壤全 C 和全 N 含量分别是 12.6 g·kg⁻¹ 和 1.3 g·kg⁻¹, pH 值 6.23。试验为盆栽试验,盆钵为圆柱体,直径 25 cm,高 35 cm,每盆装土 16 kg(风干土)。水稻于 6 月 11 日移栽,10 月 28 日收获,生长期为 139 d。试验依水稻生长期水分管理设两个处理:①持续淹水,水稻生长期自始至终保持 3~5 cm 水层;②间隙灌溉,水分管理模拟传统的前期淹水(6 月 11 日—7 月 10 日)、中期烤田(7 月 11 日—7 月 23 日)和后期干湿交替(7 月 24 日—10 月 28 日)的管理模式。每个处理设 3 个重复,随机排列。为充分观测土壤水分变化对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响,增加采样密度,烤田期及随后复水期每天采样,其他时期每周采样 2~3 次。

1.2 施肥管理

N、P、K 肥施用量为每盆尿素 3.74 g、KH₂PO₄ 0.84 g、KCl 0.24 g。水稻移栽前施入基肥,基肥施氮量为设计施氮量的 50%,KH₂PO₄ 和 KCl 全部作为基肥施入;分蘖肥和穗肥分别于 6 月 27 日和 8 月 4 日施入,施氮量均为设计施氮量的 25%。

1.3 采样和测定

采集气样时,将有机玻璃采气箱(30 cm×30 cm×100 cm)放置在 5 cm 深的水槽(与顶端下 5 cm 处盆钵外侧焊为一体)中。通过插进密封采样垫的两通针采集箱内气体于 18 mL 真空瓶中,每隔 10 min 采一次样,共 4 瓶。CH₄ 由带有氢火焰离子检测器的气相色谱仪(岛津 GC-12A)测定,N₂O 由带有 Ni⁶³ 电子捕获检测器的气相色谱仪(岛津 GC-14A)测定。N₂O 标准气由日本国立农业环境技术研究所温室气体研究团队提供,CH₄ 标准气由南京气体厂提供。

土壤溶液则由预先埋入盆钵的溶液采集器收集到专用真空瓶,保存至 4℃冰箱中,然后采用 Skalar(SAN++SYSTEM)流动分析仪测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度。土壤 Eh 通过插入盆钵土壤的 3 支铂电极(深度为 10 cm)用便携式土壤 Eh 计测定,由于仪器故障造成水稻移栽后 19 d 至 24 d 的土壤 Eh 数据缺失。土表、5 cm 及 10 cm 土层深度土壤温度由带温度探针的便携式温度计测定。

1.4 CH₄ 和 N₂O 排放通量计算

CH₄ 和 N₂O 排放通量计算公式如下:

$$F = \rho [(0.3 \times 0.3 \times 0.95 \times 0.00049 \times h) / (0.049)] \Delta c / \Delta t \times 273 / T$$

式中,F 为 CH₄ 和 N₂O 排放通量,单位分别为 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 μg·m⁻²·h⁻¹;ρ 为标准状态下 CH₄ 和 N₂O 的密度,其值分别是 0.714 kg·m⁻³ 和 1.25 kg·m⁻³;h 为盆钵顶部至盆钵内土面或水面的深度,单位为 cm;Δc/Δt 为单位时间密闭箱内 CH₄ 和 N₂O 浓度的变化量;T 为密闭箱内温度,单位为 K。CH₄ 和 N₂O 排放通量用 3 个重复的平均值表示,CH₄ 和 N₂O 季节平均排放通量则是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权累加平均后再取平均值。

2 结果与讨论

2.1 CH₄ 和 N₂O 排放的季节变化

图 1 表示水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 排放的季节变化,其中 CH₄ 和 N₂O 排放通量是 3 个重复的平均值。由图 1 可知,对间隙灌溉处理而言,N₂O 排放集中在施分蘖肥后的烤田期及随后复水期,水稻生长前期持续淹水阶段只有少量 N₂O 排放,施分蘖肥后 N₂O 排放略有增加;后期仅在施穗肥后较短时间内(约 15 d)有相对较高的 N₂O 排放,之后 N₂O 排放量较少;CH₄ 排放峰值同样出现在烤田期间,烤田开始后 CH₄ 排放迅速升高,然后急剧下降,烤田结束前接近于零;烤田结束复水后无 CH₄ 排放,后期干湿交替阶段只有少量

CH₄ 排放。图 2 显示间隙灌溉处理不同水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 排放量, 由图 2 可知, 烤田期间 CH₄ 和 N₂O 排放量分别是 1 599.45 mg·m⁻² 和 228.50 mg·m⁻², 分别占季节排放量的 49.69% 和 43.22%。尽管烤田结束复水后没有 CH₄ 排放, 而此时持续 9 d 的 N₂O 平均排放通量为 181.35 mg·m⁻², 占季节总排放量的 34.30% (图 1-I、II, 图 2)。

N₂O 是通过土壤中硝化和反硝化两个主要的微生物过程生成的, 而 CH₄ 是极端还原条件下产 CH₄ 菌活动的产物。与土壤硝化、反硝化等生物过程及氧化还原条件关系密切的土壤水分状况是影响水稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的最重要的因素之一。施分蘖肥 15 d 后对间隙灌溉处理土壤进行充分烤田, 此时稻田水分状况开始剧烈变化, 水稻生长期 N₂O 的两次排放峰值分别是 2.38 和 1.82 mg·m⁻²·h⁻¹, 出现在烤田开始后的第 8 d 和第 13 d; CH₄ 排放峰值为 15.98 mg·m⁻²·h⁻¹, 出现在烤田开始后的第 3 d (图 1-I、II)。与 CH₄ 排放规律不同的是 N₂O 在烤田结束后复水期出现另一排放峰值, 而 CH₄ 在复水期的排放为零 (图 1-I、II)。

间隙灌溉条件下, 稻田土壤 CH₄ 和 N₂O 季节平均排放通量为 0.94 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 170.22 μg·m⁻²·h⁻¹。

从图 1-II、IV 还可以看出, 持续淹水处理 CH₄ 排放量远远高于间隙灌溉处理, 并且在相应的烤田开始、水稻进入分蘖期后出现大幅度上升, 在水稻抽穗期达到高峰, 生长后期在水稻移栽后 99 d 时出现大幅度降低。持续淹水条件下水稻生长期 CH₄ 排放通量为 17.52 mg·m⁻²·h⁻¹, 是间隙灌溉处理的 18 倍多。前人大量研究发现, 持续淹水条件下几乎没有或只有少量 N₂O 产生排放^[14-16], 但本试验持续淹水处理中同样能观测到 N₂O 排放峰值, 主要出现在两次追肥后 (图 1-III)。

虽然持续淹水处理在两次施肥后 N₂O 的排放峰值远远低于间隙灌溉处理的排放峰值 (图 1-I、III), 但与自身水稻生长期其他时间较低或无 N₂O 排放相比, 这两个排放峰值表明即使在持续淹水条件下氮肥施用也明显促进了 N₂O 排放。持续淹水处理 N₂O 季节排放通量为 22.81 μg·m⁻²·h⁻¹, 是间隙灌溉处理 N₂O 排放通量的 13.40%。而且, 间隙灌溉处理烤田前短时

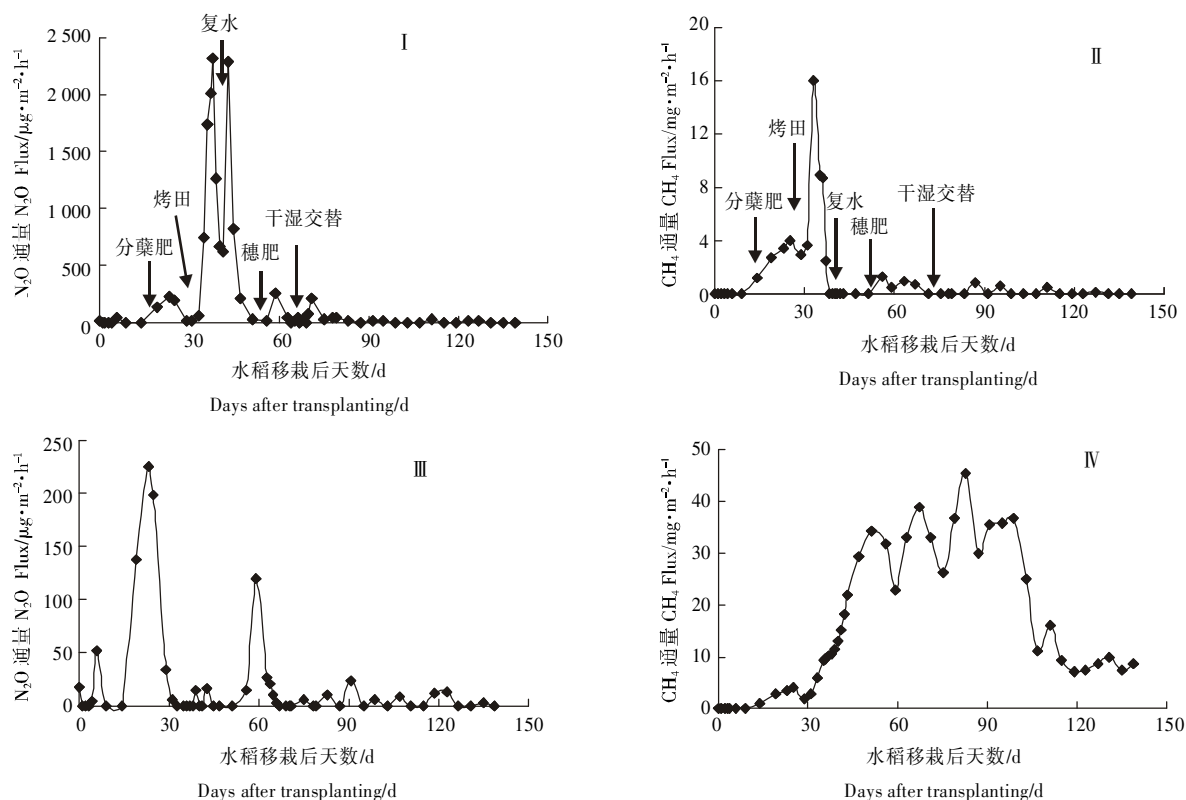


图 I、II 为间隙灌溉处理, 图 III、IV 为持续淹水处理
I, II: intermittent irrigation treatment; III, IV: continuous flooding treatment

图 1 水稻生长期 N₂O 和 CH₄ 排放的季节变化

Figure 1 Seasonal variations of N₂O and CH₄ fluxes during rice growing period

间持续淹水期(29 d)排放的 N_2O 在量上可与生长后期较长时间干湿交替期(77 d) N_2O 的排放量相当(图2),进一步说明稻田土壤持续淹水条件下,特别是施肥后土壤中存在大量氮源时 N_2O 的排放不容忽视。此外,土壤类型也可能是影响持续淹水条件下 N_2O 排放的另一个因素。持续淹水条件下 N_2O 排放量大小、影响 N_2O 排放的因素还值得进一步研究。

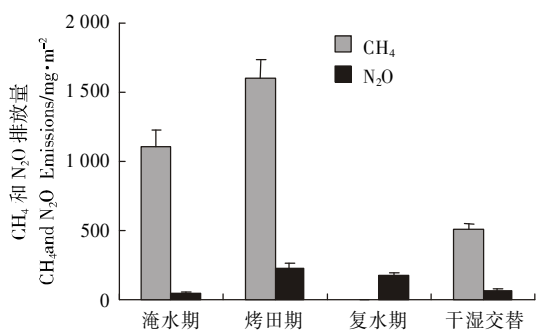


图2 间灌灌溉处理不同水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放量

Figure 2 CH_4 and N_2O emissions of intermittent irrigation treatments during different rice growing period

2.2 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的季节变化

图3表示水稻生长期土壤溶液中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的季节变化。由图3可知,各处理 NH_4^+-N 浓度变化趋势基本一致且在水稻生长前期浓度较高,但间灌灌溉处理烤田开时后(水稻移栽30 d后) NH_4^+-N 浓度下降速度更快。间灌灌溉条件下烤田期及复水期土壤溶液中 NO_3^--N 浓度明显高于水稻其他生长期(最高达 $29.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而持续淹水处理中 NO_3^--N 浓度持续较低($0.026 \sim 0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。各处理水

稻生长后期干湿交替阶段 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度均维持在较低水平。

除受水分状况影响外,水稻生长期 N_2O 排放还受土壤中有效氮含量的影响。土壤中有效氮含量越多,土壤中可用来转化为 N_2O 的氮源越多,氮素转化为 N_2O 的几率越大。烤田前施入土壤的大量氮肥为 N_2O 产生提供基础,烤田前淹水阶段 NH_4^+-N 浓度较高,加上烤田期间土面落干改善土壤的供氧状况,极大地促进硝化过程进行,这些都有利于 N_2O 的生成,导致烤田开始后出现第一个 N_2O 排放高峰(图1-I)。随着烤田的进行, NH_4^+-N 浓度逐渐降低,烤田结束时基本降为最低; NO_3^--N 含量在烤田及复水期较短时间内出现较大幅度变动。落干后再淹水初期,土壤中较高的 NO_3^--N 含量(图3)和淹水条件促进了反硝化反应的进行。而且厌氧条件下 N_2O 还原酶的生成滞后于 NO_3^--N 还原酶,滞后期随 NO_3^--N 含量升高而延长^[17]。因此,在烤田结束后复水期又出现 N_2O 的第二排放高峰(图1-I)。随着作物对氮肥的吸收和土壤中硝化、反硝化反应的进行,后期干湿交替阶段土壤中氮源不足限制了 N_2O 产生排放。在适宜的水分条件下,水稻生长期稻田土壤 N_2O 排放受土壤中有效氮含量的影响。

2.3 土壤 Eh 和土壤温度对 CH_4 和 N_2O 季节排放的影响

图4表示水稻生长期土壤 Eh 的季节变化。从图4可以看出,间灌灌溉处理土壤 Eh 在水稻移栽后呈下降趋势,烤田开始后土壤 Eh 迅速上升,后期干湿交替阶段土壤 Eh 一直处于较高的水平;持续淹水处理土壤 Eh 在水稻移栽30 d后至水稻收获一直处于较低的水平。比较图1-I、II,图4不难发现,间灌灌

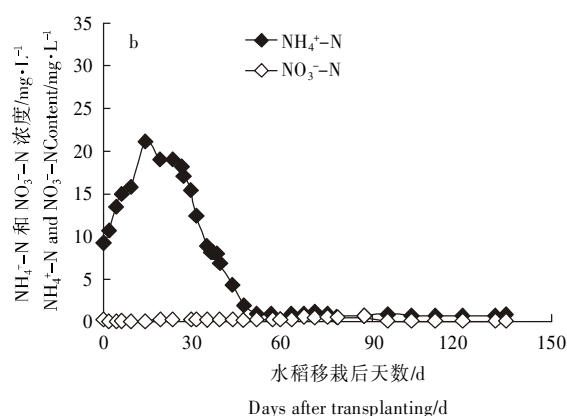
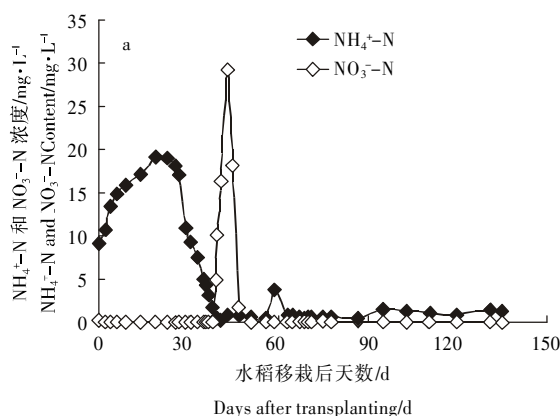


图 a 为间灌灌溉处理, b 为持续淹水处理

a: intermittent irrigation treatment, b: continuous flooding treatment

图3 各处理水稻生长期土壤溶液中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的季节变化

Figure 3 Seasonal changes of NH_4^+-N and NO_3^--N concentrations in soil solutions under different treatments during rice growing period

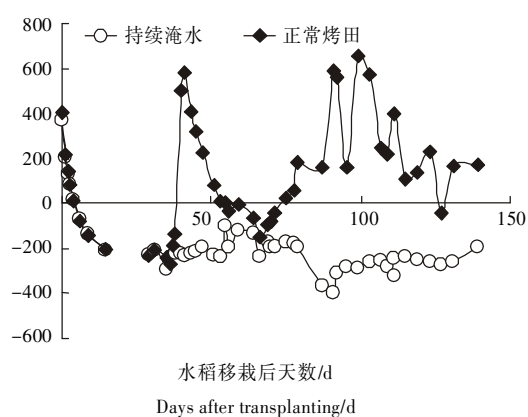


图 4 水稻生长期土壤 Eh 的季节变化

Figure 4 Seasonal changes of soil Eh during rice growing period

溉处理烤田期及复水期 N_2O 的排放峰值是伴随着土壤 Eh 的峰值出现的;而 CH_4 的排放峰值则出现在土壤 Eh 达最低值时,在土壤 Eh 达到峰值时 CH_4 排放量则降为零。相关性分析表明,间隙灌溉条件下水稻生长期 CH_4 排放通量与土壤 Eh 呈显著负相关 ($r=-0.667^{**}$, $P<0.01$),而 N_2O 排放与土壤 Eh 无显著相关性。

间隙灌溉处理从水稻移栽 69 d 至水稻收获较长时间内 CH_4 和 N_2O 排放均较低(图 1-I、II)。一方面,在此期间较高的土壤 Eh 限制产 CH_4 菌活性,从而抑制 CH_4 产生排放(图 4);另一方面,尽管水稻生长后期较高的土壤 Eh 有利于 N_2O 的产生排放,但土壤中缺少氮源(NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度几乎为零),导致土壤中几乎无 N_2O 排放(图 3-a、图 1-I)。其中,

CH_4 在烤田开始后达到排放峰值而后迅速降为零,这可能是因为稻田土壤经历烤田干涸到一定程度,裸露在空气中,盆钵土量较少、土壤 Eh 大幅度升高(最高达 582.11 mV),抑制产 CH_4 菌活性,即使重新淹水土壤的 Eh (烤田结束复水期最低土壤 Eh 仍为 -3.11 mV)不可能在短期内降低到适宜 CH_4 产生的水平(图 4)。因此土壤 CH_4 产生率减小, CH_4 氧化率增加,从而抑制复水后稻田土壤 CH_4 排放。而对田间试验而言,小区土量大,相同落干情况下土壤水分变化较慢,土壤 Eh 短时间内可能不会出现大幅度升高,可能导致大田土壤 CH_4 排放量高于盆钵试验的排放量,而 N_2O 排放量低于盆钵试验的。为进一步明确水分变化对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放的影响,我们将开展田间试验进一步研究。

图 5 是水稻生长期土温的季节变化,其中不同深度土壤温度是各处理不同深度土壤温度的平均值。由于盆钵内土量较少,随气温变化较快,土表、5 cm 和 10 cm 深土温的变化趋势基本一致。烤田期间 N_2O 的排放峰值出现在土壤温度达峰值时,后期干湿交替阶段当土面落干时(水稻移栽后 64 d) N_2O 排放出现另一较小峰值,此时土壤温度达到水稻生长季最高温度 33.93 $^{\circ}\text{C}$ (图 1-I、图 5)。相关性分析表明,水稻生长期 N_2O 排放与不同深度土温呈显著正相关,且与 10 cm 土温的相关性最大($r=0.405^{**}$, $P<0.01$)。可见,间隙灌溉条件下, CH_4 排放通量的变化只受土壤 Eh,而不是土温的显著影响;在适宜 N_2O 产生排放的土壤 Eh 条件下,土温与 N_2O 排放呈显著负相关,国内其他一

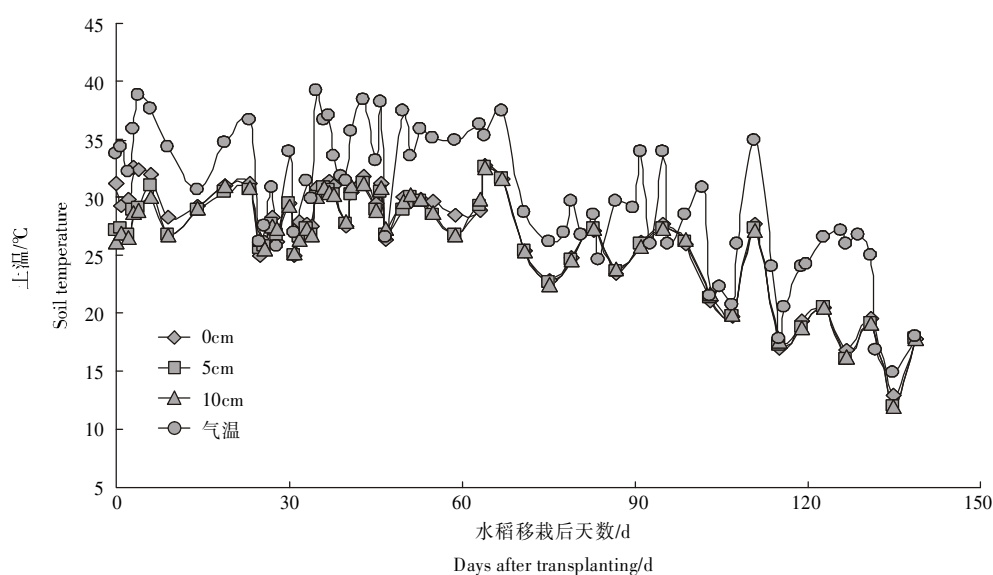


图 5 水稻生长期气温及不同深度土温的季节变化

Figure 5 Seasonal changes of air temperature and soil temperature during rice growing period

些研究也证实了这一点^[18,19]。

对持续淹水处理, 水稻移栽 31 d 至收获期间土壤 Eh 持续较低, CH₄ 排放量与土温呈显著正相关($r=0.682^{**}$, $P<0.01$), 而与土壤 Eh 之间无显著相关性。持续淹水条件下水稻生长期 N₂O 排放同样受土壤温度的影响($r=0.312^{*}$, $P<0.05$), 与土壤 Eh 无显著相关性($r=0.073$, $P>0.05$)。这可能因为持续淹水条件下土壤 Eh 皆较低, 其间 CH₄ 和 N₂O 排放通量的变化主要受土壤 Eh 之外的因素, 如土壤温度的显著影响。

2.4 采样频率对 CH₄ 和 N₂O 季节排放量估算的影响

由图 1-I、II 可知, N₂O 排放主要集中在烤田及随后复水的短暂时间内, 且变化很快, 幅度也很大, CH₄ 排在烤田期间持续时间也很短, 且变化很快、很大。在烤田及随后短暂复水期, 只有提高采样频率, 争取每天采样, 才能尽可能完整了解该时间段 CH₄ 和 N₂O 的排放规律, 准确估算 CH₄ 和 N₂O 的排放量。通常静态箱法人工采样在水稻生长后期水分干湿交替期间每周采样 1 次, 在此之前则每周采样 2 次, 这样的采样计划对水稻生长期大部分时间是合理的, 但如果在本文中所指的烤田及随后复水的 CH₄ 和 N₂O 排放的重要时间段(约 2 周左右)也沿用相当的采样频率(仅采 4 次样)则会错过 CH₄ 和 N₂O 排放的一些重要信息而使测定值产生较大偏差。为比较不同采样频率下 CH₄ 和 N₂O 的季节排放差异, 人为将间隙灌溉处理的采样频率控制在一周两次和一周一次, 重新计算水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 的季节排放通量, 并与本试验加密采样的数据对比。结果显示, 就水稻整个生长季节而言, 随着采样频率的降低, 一周两次采样和一周一次采样的 CH₄ 和 N₂O 排放通量较加密采样时

的都偏高, CH₄ 排放通量分别提高了 22.34% 和 36.17%, N₂O 提高了 6.46% 和 14.53%(表 1)。对水分变化较大的烤田及复水期而言, 一周两次采样和一周一次采样的 N₂O 排放量较加密采样的偏高 12.23% 和 28.62%, CH₄ 则降低 27.78% 和 76.38%(表 1)。为进一步准确估算和评价水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 的排放, 必须合理提高采样频率, 特别是在水分剧烈变化的烤田期及随后复水的短暂期间(约 2 周左右)更应如此。

2.5 水分管理对 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应的影响

尽管水稻生长期 CH₄ 排放量高于 N₂O, 但单分子 N₂O 增温潜势大约是单分子 CH₄ 的 13 倍且在大气中残留时间大约是 CH₄ 的 10 倍^[1]。表 2 显示不同水分管理对水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应及产量的影响。由表 2 可知, 持续淹水条件下 CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应是间隙灌溉的 10 倍多, 而水分管理对水稻产量的影响不大。

3 结论

(1) 间隙灌溉条件下, 49.69% 的 CH₄ 排放量集中在烤田期间, 烤田结束后复水期无 CH₄ 排放, 土壤 Eh 与 CH₄ 排放呈显著负相关($r=-0.667^{**}$, $P<0.01$); 烤田期间 N₂O 排放量占季节排放量的 43.22%, 烤田结束后复水期持续 9 d 的 N₂O 排放量占季节排放量的 34.30%, N₂O 排放与不同深度土温均呈显著正相关, 并与 10 cm 土温相关性最大($r=0.405^{**}$, $P<0.01$)。

(2) 持续淹水处理 N₂O 排放量是间隙灌溉条件下的 13.40%, 且 N₂O 排放峰值出现在追肥后且土温较高时; 持续淹水条件下 CH₄ 排放是间隙灌溉条件下的 18 倍多。

表 1 间隙灌溉处理整个水稻生长期、烤田及复水期 CH₄ 和 N₂O 排放通量在不同采样频率下的估算

Table 1 Estimations of CH₄ and N₂O emissions of intermittent irrigation treatment under different sampling frequency conditions during the whole rice growing period and during aeration and re-flooding period

温室气体	水稻生长期			烤田及复水期间		
	加密采样	一周两次	一周一次	加密采样	一周两次	一周一次
CH ₄ /mg·m ⁻² ·h ⁻¹	0.94	1.15	1.28	2.16	1.56	0.51
N ₂ O/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	170.22	181.21	194.96	525.06	589.26	675.33

表 2 水分管理对综合温室效应及产量的影响

Table 2 Effect of water management on global warming potential (GWP) and yields of rice and straw

处理	CH ₄ 通量/mg·m ⁻² ·h ⁻¹	N ₂ O 通量/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	综合温室效应/mmolCO ₂ ·m ⁻² ·h ⁻¹	子粒干重/g·pot ⁻¹	稻草干重/g·pot ⁻¹
持续淹水	17.52±0.67	22.81±0.88	25.34±0.97	72.83±9.49	69.19±11.86
间隙灌溉	0.94±0.05	170.22±33.12	2.50±0.11	66.89±6.07	73.71±2.14

注: GWPCH₄=23GWPCO₂; GWPN₂O=296GWPCO₂^[1]

(3) 水分管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 综合温室效应影响较大,而对水稻产量影响不大。采样频率同样影响稻田土壤 CH_4 和 N_2O 季节排放量的估算,水分变化剧烈的烤田期及复水期应加大采样频率。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [R/OL]. http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Ch02.pdf.
- [2] IPCC. Climate Change 2001: The Science Basis: Technical Summary. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [3] 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.
- [4] Buresh R J, Austin E R. Direct measurement of dinitrogen and nitrous oxide flux in flooded rice fields [J]. *Soil Sci Soc A J*, 1988, 52:681–687.
- [5] Smith C J, Brandon M, Patrick W H. Nitrous oxide emission following urea-N fertilization of wetland rice [J]. *Soi Sci Plant Nutr*, 1982, 28: 161–171.
- [6] 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 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 186–188.
- [7] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 N_2O 和 CH_4 排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2): 231–237.
- [8] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, 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.
- [9] Sass R L, Fisher F M, Wang Y B, et al. Methane emissions from rice fields: the effect of flood water management. *Global Biogeochem[J]. Cycles*, 1992, 6:249–262.
- [10] Yu K Chen, G Patrick Jr W H. Reduction of global warming potential contribution from a rice field by irrigation, organic matter, and fertilizer management[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2004, 18 (3), GB3018, doi: 10.1029/2004 GB062251.
- [11] Xu H, Xing G X, Cai Z C, et al. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49:23–28.
- [12] Cai Z C, Xing G X, Shen G Y, et al. Measurements of CH_4 and N_2O e-missions from rice paddies in Fengqiu, China[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1999, 45(1):1–13.
- [13] 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.
- [14] 徐 华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 499–505.
- [15] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 482–489.
- [16] 蔡祖聪, Arivn R. Mosier. 土壤水分状况对 CH_4 氧化, N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 土壤, 1999, 6:289–298.
- [17] Letey J, Valoras N, Hadas A. and Focht D D. Effect of air-filled porosity, nitrate concentration, and time on the ratio of $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ evolution during denitrification[J]. *Environ Qual*, 1980, 9:227–231.
- [18] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Characters of greenhouse gas (CH_4 , N_2O , NO) emissions from croplands of southeast China[J]. *World Resource Review*, 1999, 11(2): 239–246.
- [19] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758–764.