

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响

傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞

(湖南农业大学农学院, 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

摘要: 为给双季稻水肥高效利用调控技术提供理论基础, 设置间歇灌溉和淹水灌溉两种灌溉方式, 高氮、中氮、低氮和不施氮这 4 种施肥方式, 开展大田小区试验, 探讨了水氮组合模式对双季稻 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 结果表明, 间歇灌溉显著降低了 CH_4 积累排放量, 与淹水灌溉相比, 早晚稻分别降低 13.18 ~ 87.90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 74.48 ~ 131.07 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别减排了 24.4% ~ 67.4% 和 42.5% ~ 66.5%; 但促进了 N_2O 排放, 早晚稻的增排量分别为 0.03 ~ 0.24 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.35 ~ 1.53 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别比淹水灌溉增加 6.2% ~ 18.3% 和 40.2% ~ 80.9%. 总体上, 间歇灌溉降低了稻田温室气体的增温潜势, 其中早稻降低了 18.8% ~ 58.6%, 晚稻降低 34.4% ~ 60.1%, 两季综合降低 2388 ~ 4151 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 CO_2 eq 计), 下降 41% ~ 54%. 通过分析发现, 土壤 CH_4 排放和土壤溶液 Eh 显著负相关, 和溶液 CH_4 浓度显著正相关. 与淹水灌溉相比间歇灌溉模式有利于减排 CH_4 , 虽增排了 N_2O , 但增温潜势显著减少. 综合来看, 间歇灌溉配施中氮更有利于双季稻种植.

关键词: 双季稻; 间歇灌溉; CH_4 ; N_2O ; 减排

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3365-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.032

Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH_4 and N_2O Emission from Double-Season Rice Paddy Field

FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, ZHONG Juan, LONG Wen-fei

(Collaborative Innovation Center of Paddy Crop and Oil Crops in Southern, Agronomy College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: To provide support for the efficient use of water and fertilizer technology to double-season rice cultivation, water and fertilizer coupling mode was applied in this research, including two irrigation methods and four N levels. The irrigation methods were flood irrigation and intermittent irrigation, while four N levels were high-N, middle-N, low-N and none-N. Field experiment was conducted to study the effect of water and fertilizer coupling mode on CH_4 and N_2O emission. The results showed that the accumulated CH_4 emissions were significantly reduced by intermittent irrigation, in comparison with flood irrigation, the reduction in early rice season were from 13.18 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to 87.90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and were from 74.48 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to 131.07 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in late rice season, with a rate of 24.4% - 67.4% and 42.5% - 66.5% respectively; whereas the accumulated N_2O emissions were increased, the increment were from 0.03 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to 0.24 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in early rice season and from 0.35 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to 1.53 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in late rice season when compared flood irrigation, increased by 6.2% - 18.3% and 40.2% - 80.9% respectively. On the whole, intermittent irrigation reduces the warming potential of greenhouse gases (GWP), which were decreased by 18.8% to 58.6% in early rice season and by 34.4% to 60.1% in late rice season, and the reduction of total GWP were from 2388 to 4151 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CO_2 eq), with a rate of 41% - 54%. Through correlation analysis it found that CH_4 emissions from soil were significantly related with soil solution Eh and solution CH_4 concentration. In comparison with the flood irrigation, the application of intermittent irrigation in double-season rice cultivation was conducive to CH_4 reduction, though the increase came in N_2O , but the GWPs were significantly reduced. Comprehensively, intermittent irrigation matching with middle-N is more benefit to double-season rice cultivation.

Key words: double-season rice; intermittent irrigation; CH_4 ; N_2O ; emission reduction

稻田是大气甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放的重要来源. 据 IPCC 第四次评估报告, 稻田 CH_4 年排放量为 31 ~ 112 Tg, 占全球总排放量的 5% ~ 19%; 农业土壤 N_2O -N 年排放量为 1.7 ~ 4.8 Tg, 占全球总排放的 10% ~ 27%^[1]. 中国稻田 CH_4 和 N_2O 年排放量分别为 6.02 ~ 7.67 Tg 和 88 ~ 169 Gg^[2~6], 是大气温室气体的重要来源. 水分管理和化肥施用是影响稻田 CH_4 和氮化亚氮产生与排放的两大重要因素^[7]. 目前已有许多关于水分管理对

稻田 CH_4 和 N_2O 排放影响的研究^[8~10], 一般认为长期淹水管理使稻田土壤处于强厌氧条件下会促进 CH_4 的排放, 但另一方面又会使 N_2O 易被还原成 N_2 减少 N_2O 的排放, 使二者处于此消彼长的状态. 具体的管理措施对温室气体的影响需通过对二者进行

收稿日期: 2015-01-11; 修订日期: 2015-04-06

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2013BAD11B02, 2011BAD16B01, 2012BAD04B10, 2013BAD07B11); 湖南省科技厅支撑计划项目 (2013SK3158)

作者简介: 傅志强 (1968 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水稻栽培、稻田碳氮循环, E-mail: zqf_cis@126.com

综合评价得出结论. 此外,施肥所引起的气态氮的排放是温室气体的重要来源,也是造成氮肥损失和环境污染的直接原因之一,而土壤水分含量与分布密切影响土壤氮素的分布,显著影响 N_2O 的排放^[11].

传统的“大水大肥”管理模式不仅造成了水肥资源的浪费,利用率低,生产成本高,而且引起一系列环境污染问题. 因此,开展水稻节水节肥技术研究日益受到重视^[12~15]. 研究表明水氮肥管理的氮肥利用效率较常规施肥方法可提高 0.56~1.66 倍,同时具有较高的根系活力、水稻根系重量及各种酶^[15]. 因地制宜合理施肥,增加土壤水库容量,提高土壤水分的利用率,可实现以肥调水、以水定肥,促进水肥耦合. 目前单纯研究水分管理或施肥技术对水稻生长与产量的影响以及温室气体排放的文献较多^[16~20],然而针对具体的水肥耦合措施究竟水分管理对温室气体的作用效果大还是施肥的作用更强烈目前尚无充分研究,且针对双季稻主产区早晚两季的研究并不多. 因此,本研究综合考虑水分和氮肥两个因素构成水肥组合模式,通过对早晚稻季温室气体排放的监测,分别探讨水分和施氮量对稻田综合增温潜势的影响,以期为进一步研究水肥高效利用调控技术与水肥一体化管理技术模式提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012 年在湖南长沙县干杉镇干杉村上大屋组试验基地(28°08'18" E, 113°12'0" N)进行,海拔 42 m,年平均温度为 17.1℃,年降水量 1 500 mm,年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 5 300~6 500℃,为湖南典型的双季稻生产区. 稻田土壤类型为第四纪红壤发育而成的红黄泥土. 供试土壤理化性状为 pH 6.1,有机碳 15.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 1.55 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 147 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 7.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计

早稻品种为‘株两优 90’,晚稻为‘岳优 9113’. 试验采用裂区设计,随机区组排列,设灌溉模式(W)和施氮量(N)这 2 个因素组合,灌溉方式设 2 个水平,施肥因素设 4 个水平,以其中的不施氮为对照,共计 8 个组合处理,3 次重复. 早稻小区面积为 20 m^2 ,3 月 29 日播种,4 月 29 日移栽,7 月 17 日收获. 大田栽插密度为 3.0×10^5 穴 $\cdot\text{hm}^{-2}$,株行距为 16.5 cm $\times$ 20 cm,每穴插 2 苗;晚稻小区面积为 15

m^2 ,6 月 23 日播种,7 月 19 日移栽,10 月 20 日收获. 大田栽插密度为 2.5×10^5 穴 $\cdot\text{hm}^{-2}$,株行距为 20 cm $\times$ 20 cm,每穴插 2 苗. 每个小区之间筑埂并用塑料薄膜包埂,两边设保护行. 其他管理措施与一般高产稻田相同.

1.2.1 灌水因素

淹水灌溉(W_1):大田自移栽返青后直至成熟前一周,稻田长期维持一定水层(3~5 cm 水层);间歇灌溉(W_2):前期淹水灌溉,分蘖后期晒田,孕穗前回水后干湿交替灌溉,至收获前 1 周排水.

1.2.2 施肥因素

施肥处理共设不施 N、低、中、高这 4 个氮肥水平,即早稻施纯 N:0、90、120、150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,晚稻施纯 N:0、105、135、165 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别记为 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 . N 肥施用比例为基肥:拔节:孕穗=5:1:4,早稻拔节肥、孕穗肥分别于 5 月 25 日、6 月 8 日施入;晚稻拔节肥、孕穗肥分别于 8 月 2 日、8 月 17 日施入;钾肥(K_2O)施用量为 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥(P_2O_5)用量为 120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,均作基肥一次性施用.

1.3 观测指标与方法

1.3.1 温室气体取样与测定

田间气体采样采用圆柱体静态箱技术. 取样箱采用玻璃钢材料制成,箱体直径 55 cm,高 120 cm. 底座于移栽后即垂直插入小区中部土壤中,插入深度 3~5 cm. 从移栽返青期开始每隔 5~7 d 取样一次,直至收获. 采样时间为上午 09:00~11:00,每 10 min 抽样一次,连续抽样 4 次. 取样时,将取样箱轻放在事先倒有浅水层的圆型框底座上,底座水槽内的水确保起到隔绝箱内外气体的作用. 样品 CH_4 和 N_2O 浓度采用湖南省土壤肥料研究所提供的气相色谱(Agilent7890A,美国)测定.

1.3.2 气体累积排放量与增温潜势的计算

稻田 CH_4 、 N_2O 排放通量计算公式为: $F = \rho \times h \times \text{dc}/\text{dt} \times 273/(273 + t)$,式中, F 为排放通量 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]; ρ 为气体在标准状态下的密度,其中 CH_4 为 0.714 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, N_2O 为 1.98 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; h 为采样箱高度(m); dc/dt 为采样过程中采样箱内 CH_4 、 N_2O 浓度变化率 [CH_4 : $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, N_2O : $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]; t 为采样箱内平均温度($^\circ\text{C}$)^[21]. 排放累积排放量计算公式: $T = \sum (R_i \times D_i)$,式中, R_i 是指相邻两次测定的平均排放量, D_i 是指相邻两次测定相距天数^[22]. 排放通量均值为排放总量与天数的比值. 气体排放增温潜势(global

warming potential;GWP);以 100 a 的时间尺度为标准, CH_4 和 N_2O 气体的 GWP 计算系数分别为 25 和 298^[23].

1.3.3 土壤溶液中 CH_4 和 N_2O 取样与浓度测定

稻田灌水前选择一个区组在每个小区将装有渗透管的 3 根 U 形 PVC 管架埋入土中,使渗透管置于土壤深度 5、10、15 cm 处,以采集各层土壤溶液,即将一个 10 mL 的真空试管与渗透管连接起来,当约有 5 mL 的土壤水溶液被吸进真空试管时,将真空试管与渗透管分开,并使真空试管中的气压与大气压平衡,然后将试管振荡 1 min,立即从试管上部取出 1 mL 空气,带回实验室用气相色谱仪测定 CH_4 和 N_2O 浓度^[24]. 土壤溶液样品于每次气体采样结束后提取,即从移栽返青期开始,每隔 5~7 d 取一次.

1.3.4 土壤氧化还原电位(Eh)的测定

早稻选择一个区组,在每个小区将 3 个容积为 200 mL 的土壤溶液采样器分别埋入 0~5、5~10 和 10~15 cm 深处,收集上述 3 个深层土壤溶液;晚稻选择一个区组,在每个小区将 1 个容积为 200 mL 的土壤溶液采样器埋入 7~13 cm 深处,只收集 7~13 cm 处的土壤溶液,立即用便携式 Eh/pH 测定仪测定溶液的氧化还原电位(Eh)值. 每次取样在采气

后进行,从移栽返青期开始每隔 5~7 d 取样一次.

1.4 数据分析

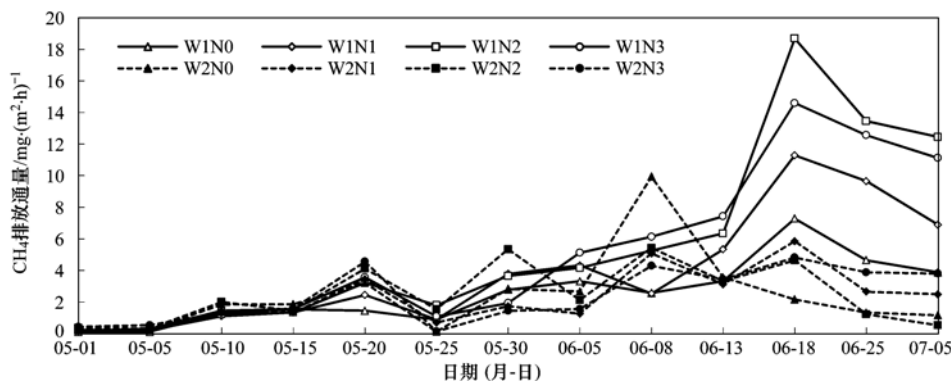
数据采用 Excel 2003 进行初步整理和分析,采用 DPS V3.01 软件进行统计分析. 多重比较采用新复极差法(LSR 法). 相关系数显著性采用 *t* 检验法.

2 结果与分析

2.1 水肥组合模式对 CH_4 和 N_2O 排放通量的影响

2.1.1 CH_4 排放通量

早稻季, CH_4 排放通量呈上升趋势(图 1). 在水稻生长前期,各处理 CH_4 排放通量均处于较低状态,处理间无明显差异. 从 6 月中旬开始, CH_4 排放通量迅速上升,处理间差异明显,其中淹水灌溉各处理的 CH_4 排放通量明显高于间歇灌溉,尤其以淹水灌溉施中氮的 CH_4 排放通量最高,达 $18.68 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 从早稻季 CH_4 的平均排放通量来看各处理依次为: $\text{W2N0} < \text{W2N2} < \text{W2N1} < \text{W2N3} < \text{W1N0} < \text{W1N1} < \text{W1N3} < \text{W1N2}$, 极差为 $4.79 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 总体上,早稻淹水灌溉的 CH_4 排放通量比间歇灌溉高出 $2.81 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,超出了 53.9%.



W1 代表淹水灌溉, W2 代表间歇灌溉; N0、N1、N2、N3 分别代表不同的施 N 水平不施 N、低 N、中 N、高 N 这 4 种施 N 措施,下同

图 1 早稻 CH_4 排放通量动态变化

Fig. 1 Dynamic of CH_4 flux in the early rice season

对于晚稻季的 CH_4 排放通量来说,总体呈下降趋势(图 2). 随着晚稻生育进程的推进,两种灌溉模式的 CH_4 排放通量差异十分明显,淹水灌溉明显高于间歇灌溉. 不同的施氮量相比,淹水灌溉模式下以 W1N1 最高,平均达 $9.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 从大到小排序依次为 W1N2、W1N3、W1N0, 极差为 $1.51 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 间歇灌溉模式下以 W2N3 最高,平均达 $4.66 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,其余依次为 W2N2、

W2N0、W2N1, 极差为 $1.60 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 总体上,晚稻季淹水灌溉的 CH_4 排放通量比间歇灌溉高出了 $4.53 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,超出了 54.3%.

2.1.2 N_2O 排放通量

早稻季,各处理的 N_2O 排放通量在水稻生育前期整体较低,处理间差异不明显(图 3). 随着早稻生育进程的推进, N_2O 排放通量呈上升趋势,并在第二次追肥后达到峰值. 两种不同的灌溉方式相比,

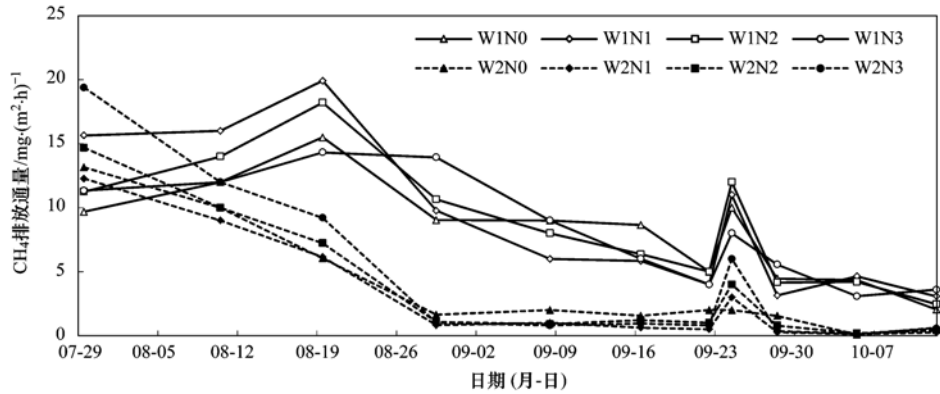


图2 晚稻 CH₄ 排放通量动态变化

Fig. 2 Dynamic of CH₄ flux in the late rice season

间歇灌溉对追肥的响应要高于淹水灌溉,表明追施 N 肥的促排效果与灌溉方式密切相关. 总体上在同一施氮水平下,间歇灌溉各处理的 N₂O 排放通量总体要大于淹水灌溉;各处理中以间歇灌溉施中氮的排放通量最高,峰值达到 231.50 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,平均达 55.78 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;以淹水灌溉不施氮最低,平均为 34.42

$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,二者相差 21.36 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 与淹水灌溉相比,间歇灌溉使 N₂O 排放通量平均增加 7.12 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

从晚稻季的 N₂O 排放通量来看(图4),总体与早稻季的相差不大. 晚稻抽穗期前 N₂O 排放通量随生育期的推进呈上升趋势,抽穗以后则呈下降趋势. 间歇灌溉模式下,以施中氮处理(W2N2)的排放通

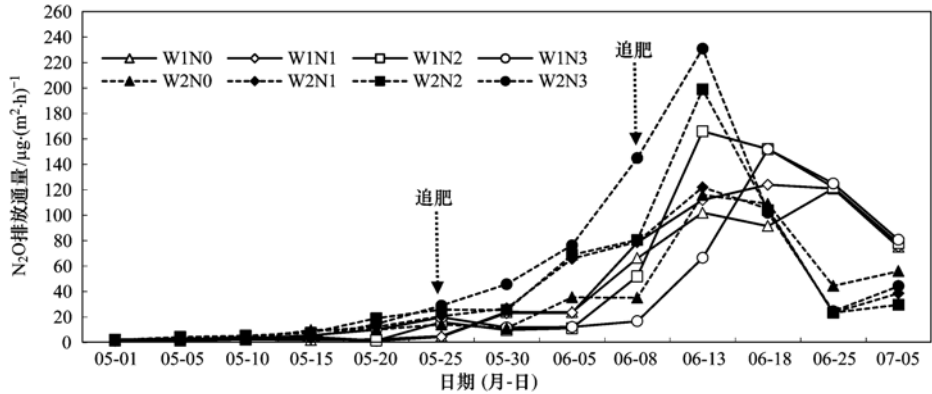


图3 早稻 N₂O 排放通量季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of early rice season N₂O emission flux

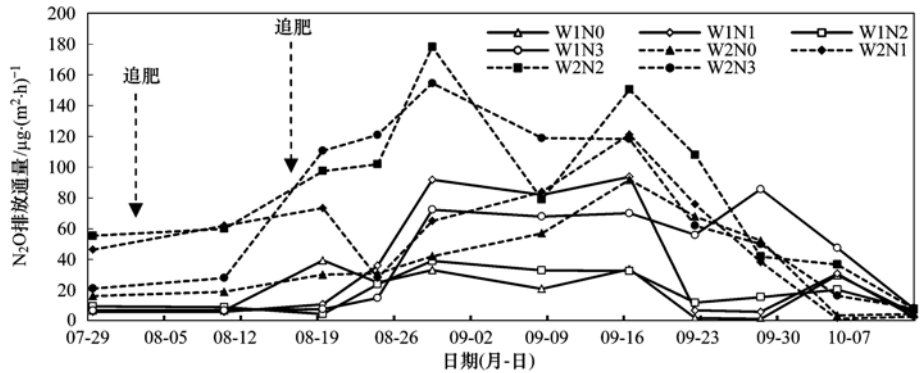


图4 晚稻季 N₂O 排放通量季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of late rice season N₂O emission flux

量最高,平均排放通量达 $87.32 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; 其次为施高氮处理(W2N3),平均排放通量为 $77.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 总体上,同一施氮水平下间歇灌溉各处理的 N_2O 排放通量仍高于淹水灌溉. 与淹水灌溉相比,间歇灌溉总体上使 N_2O 的平均排放通量增加 $36.91 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

2.2 水肥组合模式对 CH_4 和 N_2O 累积排放量和增温潜势的影响

由表 1 可知,早稻生长期间,各处理间 CH_4 排放量差异极显著. 在相同的施氮水平下,早稻间歇灌溉 CH_4 的积累排放量均要显著低于淹水灌溉,降低幅度为 $13.18 \sim 87.90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减少了 $24.4\% \sim 67.4\%$. 晚稻期间,各处理间 CH_4 排放量也存在极显著差异. 在相同的施氮水平下,晚稻间歇灌溉的 CH_4 排放积累量同样显著低于淹水灌溉,降低幅度为 $74.48 \sim 131.07 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减少了 $42.5\% \sim 66.5\%$. 总体上,与淹水灌溉相比,间歇灌溉在早稻期间的 CH_4 排放总量平均降低 $52.58 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,晚稻期间平均降低 $97.88 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 不同施氮水平相比, CH_4 排放量总体随着施氮量的上升有一定的增加,但规律并不明显.

早稻期间,各处理间的 N_2O 累积排放量存在显著差异(表 1). 在相同的灌溉条件下,随着施氮量的增加, N_2O 排放积累量有增加的趋势. 在相同的施氮水平下,间歇灌溉条件下的 N_2O 排放积累量要高于淹水灌溉,增排量为 $0.03 \sim 0.24 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增排幅度达 $6.2\% \sim 18.3\%$. 晚稻期间,各处理间 N_2O

累积排放量仍存在显著性差异. 在相同的施氮水平下,间歇灌溉条件下的 N_2O 排放累积量均要显著高于淹水灌溉,增排幅度为 $0.35 \sim 1.53 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增排了 $40.2\% \sim 80.9\%$. 与淹水灌溉相比,间歇灌溉在早稻期间的 N_2O 排放总量增加 $0.13 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,晚稻期间则增加了 $1.42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

晚稻排放的 CH_4 与 N_2O 增温潜势高于早稻(表 1). 早稻季各处理间的增温潜势相比较,以淹水灌溉施中氮(W1N2)最高,以间歇灌溉不施氮(W2N0)最低,相差 $2\,259.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 $\text{CO}_2 \text{ eq}$ 计,下同),各施氮处理均要高于不施氮处理. 相同灌溉条件下,增温潜势随着施氮量增加而增加;相同的施氮水平下,间歇灌溉均要低于淹水灌溉,总体降低了 $308.6 \sim 2\,113.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,降幅为 $19.1\% \sim 59.2\%$. 晚稻期间,各处理增温潜势以淹水灌溉施低氮(W1N1)最高,以间歇灌溉施低氮(W2N1)最低,两者相差 $3\,124.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 在相同的施氮水平下,间歇灌溉均要低于淹水灌溉,总体降低了 $1\,622.7 \sim 3\,124.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减少了 $34.9\% \sim 60.6\%$. 从两季综合的增温潜势来看,相同施氮量下间歇灌溉的增温潜势比淹水灌溉降低 $41\% \sim 54\%$,其中以 W2N1 和 W2N2 的降低幅度最大,两季综合下降 $4\,151 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $4\,125 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 淹水灌溉下,施低氮增温潜势比不施氮增加 29% 、施中氮增加 39% 、施高氮增加 35% ; 间歇灌溉下,与不施氮相比,施低氮的综合增温潜势降低 1% 、施中氮增加 16% 、施高氮增加 33% .

表 1 早晚两季 CH_4 与 N_2O 排放总量与增温潜势¹⁾

Table 1 Cumulative emissions and the warming potential of CH_4 and N_2O in early and late rice seasons

处理	早稻排放总量			晚稻排放总量			合计排放总量		
	CH_4 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	增温潜势 ($\text{CO}_2 \text{ eq}$) / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	CH_4 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	增温潜势 ($\text{CO}_2 \text{ eq}$) / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	CH_4 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	增温潜势 ($\text{CO}_2 \text{ eq}$) / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
W1N0	53.96 d	0.91 c	1 619.2	164.64 d	0.50 e	4 264.0	218.6d	1.41a	5 883.2
W1N1	86.50 c	1.00 bc	2 461.4	197.18 a	0.76 d	5 157.0	283.68c	1.76a	7 618.4
W1N2	130.49 a	1.03 bc	3 569.3	180.69 b	0.36 e	4 624.4	311.18a	1.39a	8 193.7
W1N3	118.81 b	1.07 c	3 288.1	175.24 c	0.86 d	4 637.3	294.05b	1.93a	7 925.4
W2N0	40.78 f	0.97 c	1 309.6	77.32 f	0.85 d	2 185.3	118.1g	1.82a	3 494.9
W2N1	45.17ce	1.03 bc	1 435.2	66.11 g	1.27 c	2 032.2	111.28h	2.3a	3 467.4
W2N2	42.59 ef	1.31 a	1 456.2	82.03 f	1.89 a	2 613.0	124.62f	3.2a	4 069.2
W2N3	50.91 d	1.23 ab	1 638.4	100.76 e	1.66 b	3 014.6	151.67e	2.89a	4 653.0

1) W1 代表淹水灌溉 Flooding irrigation, W2 代表间歇灌溉 Intermittent irrigation; N0、N1、N2、N3 分别代表不同的施 N 水平:不施 N、低 N、中 N、高 N 这 4 种施 N 措施; 表中同一列不同小写、大写字母分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异达到显著

2.3 CH_4 、 N_2O 排放与土壤溶液特性相关性

2.3.1 与土壤溶液 Eh 相关性

通过 CH_4 、 N_2O 排放通量与分蘖盛期、孕穗期

和抽穗期土壤 Eh 的相关分析表明,土壤溶液 Eh 值与 CH_4 排放能量呈负相关关系(表 2). 其中,早稻季土壤 5 cm 和 10 cm 处溶液 Eh 值与 CH_4 排放通量

呈极显著负相关关系。

晚稻孕穗期,7~13 cm 处土壤溶液 Eh 值与 CH₄ 排放通量呈负相关关系 ($R^2 = 0.5469, n = 8$), 经显著性检验,达到显著相关水平 ($P < 0.05$); 在抽穗期,土壤 7~13 cm 处溶液 Eh 值与 CH₄ 排放通

量呈负相关 ($R^2 = 0.8379, n = 8$), 达到极显著相关水平 ($P < 0.01$)。齐穗期土壤溶液 Eh 值与 CH₄ 排放通量也呈负相关,但不显著。而 N₂O 的排放通量与土壤的 Eh 值均无显著相关关系,表明 N₂O 排放受土壤 Eh 影响不大。

表 2 土壤溶液 Eh 值与温室气体排放通量相关性¹⁾

Table 2 Correlation of Eh values in soil solution and greenhouse gas emission flux					
土壤 Eh 值		CH ₄ /mg·(m ² ·h) ⁻¹		N ₂ O/μg·(m ² ·h) ⁻¹	
		r 值	拟合函数	r 值	拟合函数
早稻	5 cm 深层土壤	-0.907 8 **	$y = -0.0324x + 0.2787 (n = 24)$	-0.221 5	—
	10 cm 深层土壤	-0.650 5 **	$y = -0.0345x - 0.9581 (n = 24)$	-0.263 2	—
	15 cm 深层土壤	-0.195 3	—	-0.244 2	—
晚稻 7~13 cm 处	孕穗期	-0.739 6 *	$y = -0.1488x - 0.7729 (n = 8)$	0.094 8	—
	抽穗期	-0.915 4 **	$y = -0.1179x + 1.8985 (n = 8)$	-0.158 6	—
	齐穗期	-0.563 2	—	0.135 7	—

1) 表中数值为相关系数(r 值),相关系数的显著性通过 F 值检验,* 和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平下差异显著,下同

2.3.2 与土壤溶液中 CH₄ 和 N₂O 浓度相关性

通过相关分析发现 CH₄ 排放通量与土壤溶液中 CH₄ 浓度呈显著正相关关系,N₂O 排放通量则与土壤溶液中 N₂O 浓度无显著相关关系(表 3)。早稻季,在分蘖盛期土壤 10 cm 处溶液中的 CH₄ 浓度与 CH₄ 排放通量呈显著相关 ($R^2 = 0.6689, n = 8, P < 0.05$); 在拔节期,二者达到极显著相关水平 ($R^2 = 0.8241, n = 8, P < 0.01$); 到抽穗期,二者仍具有显

著相关关系 ($R^2 = 0.6925, n = 8, P < 0.05$)。到晚稻季,土壤 7~13 cm 处溶液中 CH₄ 浓度与 CH₄ 排放通量在孕穗期、抽穗期和齐穗期均呈极显著相关(表 3),可见土壤溶液中的 CH₄ 是最后排放到大气的主要来源,其浓度决定了 CH₄ 的排放通量。而 N₂O 排放通量虽与土壤溶液中的 N₂O 浓度表现为正相关,但未达到显著水平,表明土壤溶液中的 N₂O 浓度不是 N₂O 排放的决定因素。

表 3 土壤溶液温室气体浓度与排放通量相关性

Table 3 Correlation between soil solution concentrations of greenhouse gases and emission flux (sample size $n = 8$)					
土壤溶液温室气体浓度		CH ₄ /mg·(m ² ·h) ⁻¹		N ₂ O/μg·(m ² ·h) ⁻¹	
		r 值	拟合函数	r 值	拟合函数
早稻 10 cm	分蘖期	0.817 8 *	$y = 0.1573x - 3.9812 (n = 8)$	0.492 7	—
	拔节期	0.907 8 **	$y = 0.015x - 0.0847 (n = 8)$	0.483 2	—
	抽穗期	0.832 2 *	$y = 0.0877x + 1.5905 (n = 8)$	0.591 8	—
晚稻 7~13 cm	孕穗期	0.988 3 **	$y = 0.0314x - 4.0329 (n = 8)$	0.039 2	—
	抽穗期	0.930 9 **	$y = 0.003x + 1.9763 (n = 8)$	0.124 8	—
	齐穗期	0.968 6 **	$y = 0.0034x - 1.3461 (n = 8)$	0.635 1	—

3 讨论

3.1 水氮组合模式对稻田 CH₄ 排放的影响

本研究结果表明与淹水灌溉相比,间歇灌溉显著降低了 CH₄ 的排放,这与前人研究结果一致^[8]。许多研究表明 CH₄ 是极端厌氧条件下产 CH₄ 菌作用于产 CH₄ 基质的产物,受水分变化影响明显^[8]。淹水稻田阻碍了空气流通,使土壤长期处于厌氧环境中,为产 CH₄ 细菌的生存提供了良好的条件,促进了 CH₄ 的产生与排放。而相对于持续淹水,间歇灌溉因中期烤田,增加土壤通透性、提高土壤氧化还原电位,抑制了产 CH₄ 细菌活性,增强了 CH₄ 氧

化细菌氧化 CH₄ 的能力,从而大幅度降低稻田 CH₄ 排放^[25~27]。另外,土壤氧化还原电位与土壤水分状况关系密切,稻田淹水后土壤 Eh 迅速下降,甲烷排放量也急剧增加^[28]。这与本研究中 CH₄ 排放通量与土壤 Eh 呈显著负相关的结果一致。同时本研究得出,CH₄ 排放通量与土壤溶液中 CH₄ 浓度呈显著正相关关系。已有研究表明稻田生成的 CH₄ 一部分在排放前已被氧化消耗,排出稻田的 CH₄ 占生成量的 20%^[28]。土壤溶液的 CH₄ 浓度越高,表明 CH₄ 的生成量也越高,导致排出稻田的 CH₄ 也越多,此结果与杨文燕等的研究相一致^[29]。

关于氮肥施用对 CH₄ 排放的影响有不同的结

论^[20,30,31]. 本研究表明总体上 CH_4 排放随着施氮量的增加而增加,在未施氮肥的处理中,排放量明显较少. 造成此结果的原因可能为:一是随着施氮量的增加,水稻植株生长更加旺盛,促进了水稻根系的生长,改善了根系通气状况^[32]. 土壤中的 CH_4 向大气排放通过三条途径实现,包括冒气泡、水中液相扩散和水稻植株的通气组织,其中绝大部分是通过水稻植株传输^[33]. 因此,水稻根系通气组织的发达有利于 CH_4 的排放. 其次,植株的旺盛生长增加了根系分泌物,为产 CH_4 菌提供了充足的碳源和氮源,提高产 CH_4 菌的活性^[8,32]. 另外有学者认为尿素可以提高土壤 pH 值,大多数酸性壤中施入尿素后土壤 pH 值变得有利于 CH_4 形成^[34]. 也有研究认为 NH_4^+-N 或产 NH_4^+ 的氮肥对 CH_4 氧化具有抑制作用,使之促进 CH_4 排放^[32]. 总之,氮肥是通过土壤和植株间接影响 CH_4 排放的.

3.2 水氮组合模式对稻田 N_2O 排放的影响

水和肥是影响稻田 N_2O 排放两大主控因子. 水分状况不仅影响稻田土壤中 N_2O 的生成量,也极大地影响着 N_2O 向大气传输^[28]. 本研究中与淹水灌溉相比,间歇灌溉增加了 N_2O 排放,尤其是晚稻季. N_2O 是土壤微生物硝化与反硝化作用的中间产物,一般认为稻田土壤 N_2O 排放峰值出现在 75% ~ 85% 的土壤孔隙含水率之间^[35]. 当土壤孔隙含水率在 30% ~ 70% 时以硝化作用为主;当土壤孔隙含水率高于 60% 时,土壤反硝化作用随水分含量增加而迅速提高并占主导作用^[36]. 许多研究表明大量的 N_2O 排放主要出现在土壤干湿交替阶段^[8,28,37]. 土壤孔隙含水率过高时,空气传播受阻, N_2O 被进一步还原成 N_2 , 导致反硝化作用的产物以 N_2 为主^[28]. 因此稻田处于淹水状态时使土壤处于极端还原状态反而降低 N_2O 的排放,此结果也与其他研究相一致^[9,38]. 在本研究中土壤溶液中 N_2O 浓度与 N_2O 排放通量呈正相关,但相关性并不显著. 这也由于受到土壤水分条件的影响,土壤溶液中的部分 N_2O 被还原成 N_2 而不是直接排出稻田,而本研究中间歇灌溉的土壤水分状况处于不断变化中,使被还原的土壤溶液 N_2O 量也处于变化中. 本研究表明相同的灌溉条件下,施氮处理较之不施氮增加了 N_2O 的排放量,特别是在间歇灌溉条件下, N_2O 排放量随施氮量增加而增加,这与代光照等^[32]、徐华等^[38] 研究结果一致. 本研究采用尿素作为氮肥,尿素进入土壤后很快会水解成 NH_4^+-N , 为硝化作用提供底

物,促进 NO_3^- 的形成进而促进反硝化作用,增加 N_2O 排放^[28]. 尤其是在间歇灌溉条件下,土壤通透性增强,更能促进土壤硝化与反硝化细菌的活性,有利于 N_2O 产生与排放.

3.3 双季稻田减排温室气体的水肥组合模式最优选择

如何提高水稻生产水资源利用效率,同时又减少稻田 CH_4 和 N_2O 排放是发展低碳农业必须解决的一个关键问题. 本研究表明与长期淹水灌溉相比,间歇灌溉使 N_2O 的排放增加了 29% ~ 130%;但相比间歇灌溉,淹水灌溉却增加了 85% ~ 155% 的 CH_4 排放. 因此间歇灌溉虽然增排了 N_2O , 却减少水稻全生育期 CH_4 排放,使其综合增温潜势显著减少. 其次,本研究结果表明虽然温室气体排放随着施氮量的增加而增加,但就两季综合增温潜势来看,灌溉模式对增温潜势的作用幅度在 41% ~ 54%, 而施氮量对综合增温潜势的作用幅度在 1% ~ 39%. 可见相比施氮量,灌溉模式对温室气体的作用更加强烈. 在水稻生产中必须遵守的重要前提是保障产量不受影响,同为间歇灌溉条件下,施中氮的综合增温潜势虽比施低氮高,但其产量较高,同时氮素利用率也要高于其他施氮水平,是增产不增排的最优组合模式. 另外,南方双季稻区一般雨热同期,且降雨集中在 5 ~ 9 月,这段时间也是水稻生长需水量最大的季节,利用稻田蓄水及山塘水库等设施蓄水,有利于间歇灌溉模式的推广应用. 综合来看间歇灌溉施中氮是最适合在南方双季稻区推行的模式.

4 结论

(1) 在相同的施氮水平下,间歇灌溉有利于减少 CH_4 排放,但促进 N_2O 排放,最终有利于气体增温潜势的降低,减少温室效应,这种效果犹以晚稻季更为明显. 因而晚稻的间歇灌溉更有利于温室气体减排. 在相同的灌溉条件下,施氮越高,气体增温潜势越高.

(2) CH_4 的排放与土壤溶液的氧化还原电位 (Eh) 密切相关,且受土壤溶液中温室气体浓度的显著影响. N_2O 排放则与土壤溶液的氧化还原电位以及溶液中温室气体浓度无直接相关关系,其排放主要受施 N 量的影响. 施 N 量增加一定程度上促进 N_2O 的排放,但不影响 CH_4 的排放.

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2007: Couplings between changes in the

- climate system and Biogeochemistry [R/OL]. http://www.uwpcc.washington.edu/documents/PCC/si2007_summary.pdf, 2008-8-15.
- [2] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. 土壤, 1999, (5): 266-269.
- [3] 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.
- [4] Yan X Y, Akimoto H, Ohara T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia[J]. Global Chang Biology, 2003, 9(7): 1080-1096.
- [5] Xing G X. N₂O emission from cropland in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52(2-3): 249-254.
- [6] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, *et al.* Direct emission factor for N₂O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(26): 4755-4765.
- [7] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management [J]. Plant and Soil, 1997, 196(1): 7-14.
- [8] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4294-4300.
- [9] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 节水灌溉对稻田 N₂O 季节排放特征的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 14-18.
- [10] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 499-505.
- [11] Han K, Zhang J T, Shangguan Y X, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling on soil gaseous nitrogen emission under alternate irrigation & N placement [J]. Environmental Science, 2011, 32(6): 1557-1563.
- [12] Jiang Y, Wang L L, Yan X J, *et al.* Super rice cropping will enhance rice yield and reduce CH₄ emission: a case study in Nanjing, China[J]. Rice Science, 2013, 20(6): 427-433.
- [13] 吴家梅, 纪雄辉, 霍连杰, 等. 稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4599-4607.
- [14] 齐玉春, 董云社, 章申. 农业微环境对土壤温室气体排放的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 45-48.
- [15] Ming H, Zhao Y H, Chen M C, *et al.* Methanogens in paddy rice soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49(1): 163-169.
- [16] 李香兰, 马静, 徐华, 等. 水分管理对水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 排放季节变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 535-541.
- [17] 李茂柏, 曹黎明, 程灿, 等. 水稻节水灌溉技术对甲烷排放影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2010, (6): 98-102.
- [18] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1): 1-7.
- [19] 李琳, 胡立峰, 陈卓, 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(增刊): 707-710.
- [20] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1432-1437.
- [21] 傅志强, 朱华武, 陈灿, 等. 水稻根系生物特性与稻田温室气体排放相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 30(12): 2416-2421.
- [22] Singh S, Singh J S, Kashyap A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(9): 1219-1228.
- [23] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis [A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* (Eds.). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [24] 傅志强, 朱华武, 陈灿, 等. 晚稻根际土壤特性对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 热带作物学报, 2012, 33(1): 5-10.
- [25] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 69-76.
- [26] 曹金留, 任立涛, 陈国庆, 等. 水稻田烤田期间甲烷排放规律研究[J]. 农村生态环境, 1998, 14(4): 1-4.
- [27] 李香兰, 徐华, 曹金留, 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.
- [28] 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.
- [29] 杨文燕, 宋长春, 张金波. 沼泽湿地孔隙水中溶解有机碳、氮浓度季节动态及与甲烷排放的关系 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1745-1750.
- [30] 石英尧, 石扬娟, 申广勤, 等. 氮肥施用量和节水灌溉对稻田甲烷排放量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(2): 471-472.
- [31] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH₄ 排放的影响[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 21-24.
- [32] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2166-2172.
- [33] 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.
- [34] Wang Z P, Ronald D D, Lindau C W, *et al.* Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizers [J]. Fertilizer Research, 1992, 33(2): 115-121.
- [35] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.
- [36] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N₂O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(11): 2037-2045.
- [37] 康新立, 华银锋, 田光明, 等. 土壤水分管理对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2013, 23(2): 43-46.
- [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.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行