

网络出版时间:2015-09-09 15:41

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.10.013

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150909.1541.026.html

# 控释肥和覆草旱种对晚稻稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

刘芳<sup>1</sup>,李天安<sup>1,2</sup>,樊小林<sup>1</sup>

(1 华南农业大学 广东省高校环境友好型肥料工程技术研究中心,广东 广州 510642;

2 西安咏春生态环境有限公司,陕西 西安 710024)

**[摘要]** **【目的】**明确覆草旱种和控释肥对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量、累积排放量、温室效应及排放强度的影响,探讨稻田温室气体减排的有效措施,为水稻的科学栽培提供理论依据。**【方法】**采用田间试验,用静态箱法采集气体,研究常规水田(对照)、覆草旱种稻田和覆草旱种控释肥稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  日排放通量的变化规律及稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的累积排放量、温室效应和排放强度的变化。**【结果】**常规水田  $\text{CH}_4$  排放主要集中在苗期、分蘖初期和最大分蘖期,持续时间为 35 d;覆草旱种稻田和覆草旱种控释肥稻田  $\text{CH}_4$  排放则主要集中在苗期和分蘖初期,持续时间均为 15 d,二者的  $\text{CH}_4$  累积排放量显著低于常规水田,仅为常规水田的 20.00%和 17.98%。常规水田仅在烤田期有少量  $\text{N}_2\text{O}$  排放;覆草旱种稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放集中在最大分蘖期,持续时间为 10 d,累积排放量显著高于常规水田;覆草旱种控释肥稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放集中在分蘖初期,持续时间为 7 d,累积排放量与常规水田无显著差异,但显著低于覆草旱种稻田。覆草旱种对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的全球增温潜势和排放强度无影响,但覆草旱种结合施用控释肥能显著降低稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的增温潜势和排放强度,与常规水田相比分别减少了 77.66%和 76.47%。**【结论】**覆草旱种配施控释肥是明显减少稻田温室效应的有效措施,是一种科学的水稻种植模式。

**[关键词]** 控释肥;覆草旱种;晚稻; $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$

**[中图分类号]** S145.6;S181.3

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2015)10-0094-09

## Effects of controlled release fertilizer and straw mulching upland rice on $\text{CH}_4$ and $\text{N}_2\text{O}$ emissions from late rice field

LIU Fang<sup>1</sup>, LI Tian-an<sup>1,2</sup>, FAN Xiao-lin<sup>1</sup>

(1 Guangdong Provincial University Engineering and Technology Research Center of Environment Friendly Fertilizer,

South China Agriculture University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2 Xi'an Yongchun Ecological

Environment Construction Company Limited, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract:** **【Objective】** This study specified the effect of controlled release fertilizer (CRF) and straw mulching upland rice (MUR) on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes, cumulative emissions, greenhouse effect and emission intensity of late rice field to explore effective measures for mitigating greenhouse gas emissions and planting rice scientifically. **【Method】** Three treatments, traditional paddy rice (PR), straw mulching upland (MU), and straw mulching upland fertilized with controlled release fertilizer (MUCRF) were designed with three replicates for each treatment for the farm of South China Agriculture University. Closed-cham-

**[收稿日期]** 2014-03-17

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(39970420,30871594,31071857);国家基金与德国 DFG 合作项目;国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD11B04);广东高校工程技术研究中心建设项目(GCZX-A100)

**[作者简介]** 刘芳(1978—),女,江苏徐州人,助理研究员,硕士,主要从事植物营养与施肥研究。

E-mail:liufang-7578@scau.edu.cn

**[通信作者]** 樊小林(1958—),男,陕西咸阳人,教授,博士生导师,主要从事植物营养与施肥、肥料学研究。

E-mail:xlfan@scau.edu.cn

ber technique was conducted to collect  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from PR, MU and MUCRF treated fields every day after rice transplanting to compare their contributions to global warming. 【Result】  $\text{CH}_4$  emission of PR concentrated in seedling stage, initial tillering stage and maximum tillering stage with the duration of 35 days.  $\text{CH}_4$  emissions of MU and MUCRF concentrated in seedling stage and initial tillering stage with the duration of 15 days.  $\text{CH}_4$  cumulative emissions of MU and MUCRF were significantly lower than that of PR with ratios of 20.00% and 17.98%. Little  $\text{N}_2\text{O}$  was emitted from PR at the stage of drying paddy in sunshine. However,  $\text{N}_2\text{O}$  emission of MU concentrated in maximum tillering stage and the emission peak last for 10 days. Its  $\text{N}_2\text{O}$  cumulative emissions were higher than that of PR.  $\text{N}_2\text{O}$  emission of MUCRF concentrated in initial tillering stage and the emission peak last for 7 days. There was no difference in  $\text{N}_2\text{O}$  cumulative emissions between MUCRF and PR. However,  $\text{N}_2\text{O}$  cumulative emissions of MUCRF were lower than that of MU. MU had no significant difference on global warming potential and greenhouse gas emission intensity, but combined MU and CRF decreased global warming potential and greenhouse gas emission intensity significantly by 77.66% and 76.47%, respectively. 【Conclusion】 Straw mulching upland fertilized with CRF was an effective measure to significantly reduce the greenhouse effect of rice field and a scientific mode for rice cultivation.

**Key words:** controlled release fertilizer; straw mulching upland rice; late rice;  $\text{CH}_4$  emission;  $\text{N}_2\text{O}$  emission

甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )是两种重要的温室气体, $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的增温潜势分别为 $\text{CO}_2$ 的23和296倍<sup>[1]</sup>。全球范围内,农业生产排放的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 分别占人类活动造成的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放总量的50%和60%<sup>[2]</sup>,其中灌溉稻田 $\text{CH}_4$ 排放量占大气甲烷总来源的9%~19%<sup>[1]</sup>。中国农业源温室气体占全国温室气体排放总量的17%<sup>[3]</sup>。据统计,2007年,中国农田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量达到288.4 Gg,其中化学氮肥投入的贡献份额达77.64%<sup>[4]</sup>。

缓/控释肥料不仅可以提高作物产量及其肥料利用率<sup>[5-6]</sup>,还能影响作物生长期田间 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放。盆栽和室内培养试验表明,缓释氮肥、包膜控释肥可以显著降低无作物土壤的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量<sup>[7-9]</sup>。大田试验表明,缓释尿素/包膜尿素能显著减少黑土玉米地/夏玉米季 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放<sup>[10-11]</sup>,但增加了黑土稻田 $\text{CH}_4$ 的排放量<sup>[10]</sup>;控释肥可以有效抑制小麦生长季<sup>[12]</sup>、常规稻田<sup>[13-14]</sup> $\text{N}_2\text{O}$ 的排放量,但促进了常规稻田 $\text{CH}_4$ 排放<sup>[15]</sup>。

由于淡水资源的日益紧缺及南方的季节性干旱,水稻节水灌溉技术、旱种技术应运而生并日臻完善。水稻节水灌溉或旱种由于改变了水稻的生态环境,因此降低了稻田 $\text{CH}_4$ 排放总量<sup>[16-20]</sup>。然而,另一方面旱种稻田氮素硝化作用增强,其结果为氮素的反硝化提供了充足的氮源,因而增加了 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量<sup>[19-20]</sup>。若在旱种稻田进行地表覆盖薄膜或秸秆,则可以有效抑制 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量的增加<sup>[19]</sup>。可见,水

稻节水旱种虽可节水和减少 $\text{CH}_4$ 排放,但是却增加了 $\text{N}_2\text{O}$ 排放。

鉴于缓控释肥有减排 $\text{N}_2\text{O}$ 的作用,而覆盖旱种则有减排 $\text{CH}_4$ 的作用,故设想将2种减排措施结合共同用于种植水稻,即将覆盖旱种和控释肥同时实施于水稻种植, $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 减排效果如何,对此国内外尚少见报道。为此,本试验在华南地区研究控释肥与覆草旱种相结合的种植措施对旱种稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量的影响及其温室效应,以探讨稻田温室气体减排的有效措施,为水稻的科学栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验地设在华南农业大学试验农场。试验共设3个处理,分别为常规水田处理、覆草旱种处理、覆草旱种控释肥处理,每处理3次重复。小区面积为72 m<sup>2</sup>(12 m×6 m),随机排列。常规水田和覆草旱种2个处理的氮肥为尿素、磷肥为过磷酸、钾肥为氯化钾,N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 施用量分别为180,90和90 kg/hm<sup>2</sup>,磷钾肥以基肥一次施入。常规水田处理中,氮肥按基肥:分蘖肥:孕穗肥=4:3:3施用;覆草旱种处理中,稻田氮肥以基肥:分蘖肥:孕穗肥=3:4:3施用;覆草旱种控释肥处理中,所施肥料为释尔富包膜控释肥(17-9-8),释放期为3个月,以基肥一次施入,氮肥用量同其他2个处理,为180

kg/hm<sup>2</sup>。

供试土壤为赤红壤发育的水稻土,其基本理化性状为:有机质 27.01 g/kg,全氮 0.89 g/kg,全磷 0.97 g/kg,速效氮 29.00 g/kg,速效磷 37.48 g/kg,速效钾 29.95 g/kg,土壤饱和含水量为 33.08%,pH 为 5.70。

供试水稻为“丰华占”,生育期 110 d。水稻种植密度为 0.25 m×0.15 m。08-01 移栽,移栽后第 14 天为分蘖初期,第 28 天为最大分蘖期,第 42 天为孕穗期,第 56 天为抽穗期,第 70 天为灌浆乳熟期,第 84 天为蜡熟期,第 101 天为成熟期。08-21

施分蘖肥,09-11 追施孕穗肥,11-08 收获。

常规水田除在烤田期间(08-28—09-01)和收获前 2 周内停止灌水外,其余时间田间保持 3~5 cm 水层。在旱种稻田,通过安装在 20 cm 土层的张力计监测土壤水势,当张力计读数大于 50 kPa 时,计量灌溉井水 2~3 t/小区。当降雨致旱种稻田积水时,排水并记录排水量。水稻整个生育期日降雨量见图 1。覆草旱种稻田移栽前排水,无明水移栽,移栽后第 2 天覆盖水稻秸秆,覆盖量为 4 860 kg/hm<sup>2</sup>。

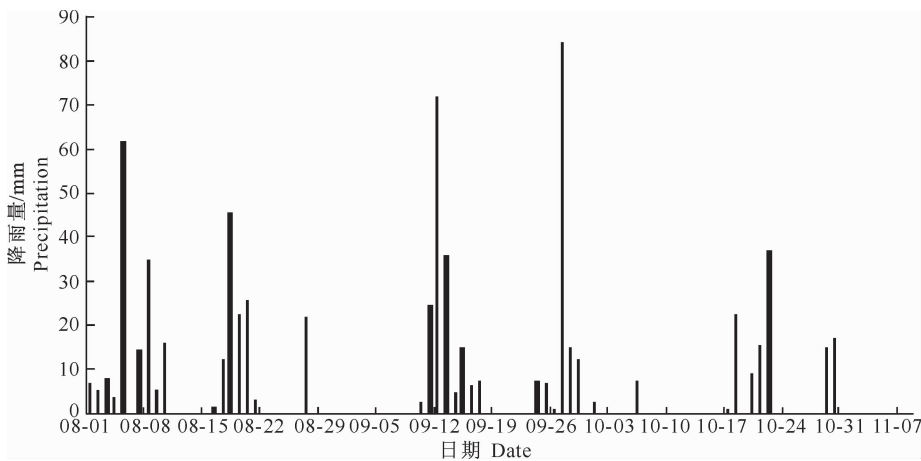


图 1 水稻整个生育期的日降雨量  
Fig. 1 Precipitation during rice growth stage

### 1.2 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的采集与测定

稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 采用静态箱法采集<sup>[21]</sup>。气体样品的采集装置是顶部安装小型电风扇的长×宽×高=50 cm×60 cm×90 cm 的有机玻璃气罩和 50 cm×60 cm×20 cm 的不锈钢底座构成的静态取样箱。底座在水稻移栽前埋入 10~15 cm 土层并固定,底座上有凹槽,采样时凹槽注水以使取样箱和底座密闭。

水稻整个生长期每天采样 1 次,在箱体与底座密闭 0,10,20 和 30 min 时,用带有三通阀的 60 mL 注射器采集气体样品。气体采集后,测定大气压强和箱内气温、水层高度。采样时间为 06:00—08:00。CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 浓度用装配十通阀和六通阀及不锈钢前置柱(Porapac Q,1.0 m)的反吹系统的气相色谱(ThermoFisher TRACE 2000)仪测定。标准气体(国家标准物质研究中心)为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 2 种气体的混合气,其中 N<sub>2</sub>O 为 0.314×10<sup>-6</sup> mol/mol,CH<sub>4</sub> 为 9.67×10<sup>-6</sup> mol/mol,填充气为 N<sub>2</sub>。气体样品采用外标一点法进行质量控制,12 h 内完成检测。

### 1.3 数据处理

CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量的计算公式为<sup>[9,22]</sup>:

$$F=\rho\times H\times\Delta c/\Delta t\times273/(273+T)。(1)$$

式中: $F$  为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量,mg/(m<sup>2</sup>·h); $\rho$  为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 在 0℃、1.013 3×10<sup>5</sup> Pa 大气压力下的气体密度,g/L; $H$  为采样箱的高度(90 cm)与基座内水面到基座上水槽下平面的高度( $h$ )之和,cm; $t$  为取样时间,min; $c$  为  $t$  取样时间时 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的测定浓度值,mL/m<sup>3</sup>; $\Delta c/\Delta t$  为单位时间密闭箱内 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 浓度的变化量; $T$  为不同取样时间(0,10,20,30 min)密闭箱内的温度,℃。

稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 累积排放量由实测值推算,累积排放量的计算公式<sup>[13,15,23]</sup>为:

$$Y_i=\sum_{n=1}^i F_i。(2)$$

$$F_i=F(X)_i\times24。(3)$$

式中: $Y_i$  为生长期  $i$  d 内的累计排放量,kg/hm<sup>2</sup>; $F_i$  为生长期第  $i$  天的平均排放通量  $F(X)_i$  与时间(24 h)的乘积,即当天的累积排放量。

根据每天测定的气体排放通量,用上述累积排放量的计算公式,可以计算出水稻生育期中任意一天CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量及其累积排放量,也可以用来计算水稻生长过程中某个生长阶段内CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的累积排放量。

根据各温室气体在不同时间尺度上的相对全球增温潜势(Global warming potential,GWP),按100年尺度计算,CO<sub>2</sub>换算系数为1,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O换算系数分别为23和296,可计算2种温室气体排放的CO<sub>2</sub>当量(Carbon dioxide equivalent,CDE),有:

$$TCDE=CDE_{CH_4}+CDE_{N_2O}。$$
 (4)

式中:TCDE为CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量的CO<sub>2</sub>当量,以CO<sub>2</sub>计,单位为kg/hm<sup>2</sup>;CDE<sub>CH<sub>4</sub></sub>、CDE<sub>N<sub>2</sub>O</sub>分别为CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O的CO<sub>2</sub>当量,单位均为kg/hm<sup>2</sup>。

Timothy等<sup>[24]</sup>给出稻田温室气体排放强度

(GHGI)的计算公式为:  
$$GHGI=TCDE/水稻产量。$$
 (5)

式中:GHGI为温室气体排放强度,kg/(kg·年)。

根据GHGI值的相对大小,可判断各处理的综合温室效应。

试验数据处理及图表制作采用Excel 2003,多重比较采用SAS V8进行,显著性检验采用Duncan's法。

2 结果与分析

2.1 控释肥和覆草旱种对稻田CH<sub>4</sub>排放通量的影响

2.1.1 稻田CH<sub>4</sub>的日排放通量 控释肥和覆草旱种对稻田CH<sub>4</sub>日排放通量的影响如图2所示。

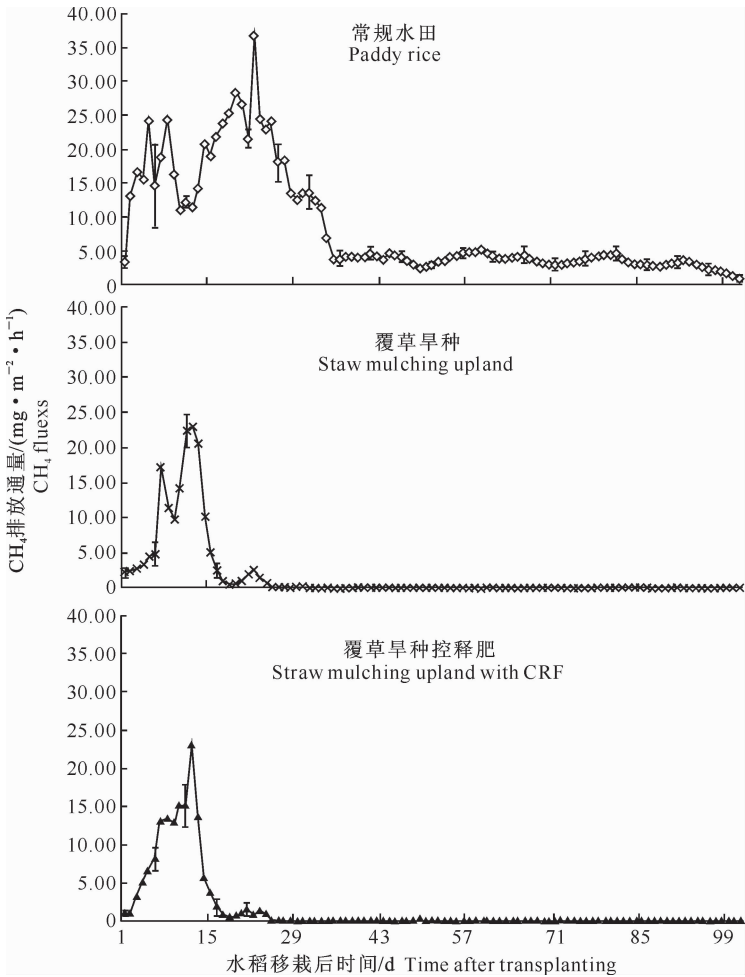


图 2 控释肥和覆草旱种对稻田CH<sub>4</sub>日排放通量的影响

Fig. 2 Effects of CRF and straw mulching upland rice on CH<sub>4</sub> fluxes

由图2可见,在水稻的整个生育期,常规水田CH<sub>4</sub>排放通量较高,且集中在移栽后的前35d;覆草旱种和覆草旱种控释肥稻田CH<sub>4</sub>排放集中在移

栽后的前15d,后期几乎没有CH<sub>4</sub>排放。常规水田的CH<sub>4</sub>在移栽后的第8天和第22天出现了2个明显的排放峰,排放通量分别为24.25和36.63

mg/(m<sup>2</sup> · h);从第 28 天烤田开始到水稻收获,常规水田再无明显 CH<sub>4</sub> 排放峰,但 CH<sub>4</sub> 排放通量稳定在 3~4 mg/(m<sup>2</sup> · h)。覆草早种稻田 CH<sub>4</sub> 的排放峰出现在移栽后的第 7 天和第 12 天,其排放通量分别为 17.28 和 23.02 mg/(m<sup>2</sup> · h),均低于常规水田的排放峰。覆草早种控释肥稻田 CH<sub>4</sub> 排放峰出现在移栽后的第 12 天,排放通量为 23.01 mg/(m<sup>2</sup> · h),小于常规水田的排放峰。

2.1.2 稻田 CH<sub>4</sub> 的排放峰及累积排放量 表 1 为不同处理稻田甲烷的排放峰及累积排放量。由表 1 可见,无论是常规水田还是覆草早种的 2 个处理,

CH<sub>4</sub> 的排放主要集中在水稻的营养生长期,其中常规水田为苗期、分蘖初期和最大分蘖期,排放峰持续时间为 35 d;而覆草早种和覆草早种控释肥稻田的 CH<sub>4</sub> 排放峰均出现在水稻的苗期和分蘖初期,持续时间仅为 15 d。常规水田 CH<sub>4</sub> 排放峰的持续时间显著长于覆草早种和覆草早种控释肥稻田,且 CH<sub>4</sub> 峰期排放量也显著增加,其中常规水田 CH<sub>4</sub> 的峰期排放量为 147.79 kg/hm<sup>2</sup>,覆草早种和覆草早种控释肥稻田的峰期排放量分别为 37.03 和 33.89 kg/hm<sup>2</sup>。

表 1 控释肥和覆草早种对稻田 CH<sub>4</sub> 排放峰及累积排放量的影响

Table 1 Effects of CRF and straw mulching upland rice on CH<sub>4</sub> emission peak and cumulative emission

| 处理<br>Treatment                                         | 峰持续时间/d<br>Peak duration | 峰期水稻生育期<br>Rice growing stage<br>of emission peak                                    | 峰期排放量/<br>(kg · hm <sup>-2</sup> )<br>Peak emission | 累积排放量/<br>(kg · hm <sup>-2</sup> )<br>Cumulative<br>emission | 峰期排放量的<br>贡献率/%<br>Ratio of<br>peak<br>emission |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 常规水田 Paddy rice                                         | 35 a                     | 苗期、分蘖初期、最大分蘖期<br>Seedling stage, initial tillering<br>stage, maximum tillering stage | 147.79±15.66 a                                      | 203.79±27.80 a                                               | 72.53                                           |
| 覆草早种<br>Straw mulching upland                           | 15 b                     | 苗期、分蘖初期<br>Seedling stage, initial tillering stage                                   | 37.03±9.87 b                                        | 40.75±9.53 b                                                 | 90.86                                           |
| 覆草早种控释肥<br>Straw mulching upland<br>fertilized with CRF | 15 b                     | 苗期、分蘖初期<br>Seedling stage, initial tillering<br>stage                                | 33.89±5.71 b                                        | 36.64±7.44 b                                                 | 92.48                                           |

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著(P<0.05)。下表同。

Note: Different lowercase letters in each row indicate significant difference (P<0.05). The same below.

由表 1 还可知,覆草早种和覆草早种控释肥稻田 CH<sub>4</sub> 累积排放量显著低于常规水田,仅为常规水田的 20.00%和 17.98%,控释肥施用与否对覆草早种稻田 CH<sub>4</sub> 累积排放量无明显影响。常规水田的 CH<sub>4</sub> 峰期排放量的贡献率(即占总累积排放量的比例)为 72.53%,而覆草早种和覆草早种控释肥稻田 CH<sub>4</sub> 峰期排放量的贡献率分别为 90.86%和 92.48%。可见覆盖早种可以改变稻田的水分状况,进而有效抑制 CH<sub>4</sub> 峰期排放量和累积排放量。

2.2 控释肥料和覆草早种对稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响

2.2.1 稻田 N<sub>2</sub>O 的日排放通量 控释肥和覆草早种对稻田 N<sub>2</sub>O 日排放通量的影响见图 3。由图 3 可见,覆草早种和控释肥对稻田 N<sub>2</sub>O 的日排放通量有显著影响。常规水田除在烤田期(水稻移栽后 28~34 d)有少量的 N<sub>2</sub>O 排放外,其他淹水期几乎无 N<sub>2</sub>O 排放,甚至出现 N<sub>2</sub>O 吸收现象。覆草早种稻田 N<sub>2</sub>O 在移栽第 24 天后出现了排放峰,排放通量为 7.34 mg/(m<sup>2</sup> · h),同时,在第 17、43 和 52 天也有 N<sub>2</sub>O 排放,可见稻田水环境的改变促进了 N<sub>2</sub>O 排放。但覆草早种控释肥稻田仅在移栽后的第 15 天

出现了 N<sub>2</sub>O 排放峰,且峰值远小于覆草早种稻田,仅为 0.75 mg/(m<sup>2</sup> · h)。由此可以推断,虽然水稻旱种能导致 N<sub>2</sub>O 日排放通量的增加,但是改施控释肥料后,N<sub>2</sub>O 日排放通量增幅显著小于常规肥料。

2.2.2 稻田 N<sub>2</sub>O 的排放峰及累积排放量 控释肥及覆草早种对稻田 N<sub>2</sub>O 的排放峰及累积排放量的影响见表 2。由表 2 可见,在水稻生长季中,常规水田无明显的 N<sub>2</sub>O 排放峰;覆草早种稻田在水稻最大分蘖期出现了持续 10 d 的 N<sub>2</sub>O 排放峰,N<sub>2</sub>O 峰期排放量为 6.42 kg/hm<sup>2</sup>;覆草早种控释肥稻田的 N<sub>2</sub>O 排放峰较覆草早种稻田有所提前,其排放峰出现在水稻分蘖初期,且排放时间缩短,持续时间仅为 7 d,且 N<sub>2</sub>O 峰期排放量显著降低,为 0.57 kg/hm<sup>2</sup>,仅为覆草早种峰期排放量的 8.88%。

由表 2 可知,覆草早种稻田 N<sub>2</sub>O 累积排放量为 8.65 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于常规水田(0.62 kg/hm<sup>2</sup>)及覆草早种控释肥稻田(0.83 kg/hm<sup>2</sup>),为常规水田的 14 倍及覆草早种控释肥稻田的 10 倍,而后二者之间无明显差异。覆草早种稻田峰期 N<sub>2</sub>O 排放量的贡献率(即占总累积排放量的比例)为 74.23%,覆草早种控释肥稻田峰期 N<sub>2</sub>O 排放量的贡献率为

68.69%。可见旱种导致 N<sub>2</sub>O 排放量增加,原因为旱种稻田水分下降,硝化作用增强,为氮素的反硝化作用即 N<sub>2</sub>O 排放提供了充足的氮源。而控释肥养

分释放缓慢,不会造成土壤硝态氮的积累,因而覆草旱种控释肥稻田 N<sub>2</sub>O 排放不会显著增加。

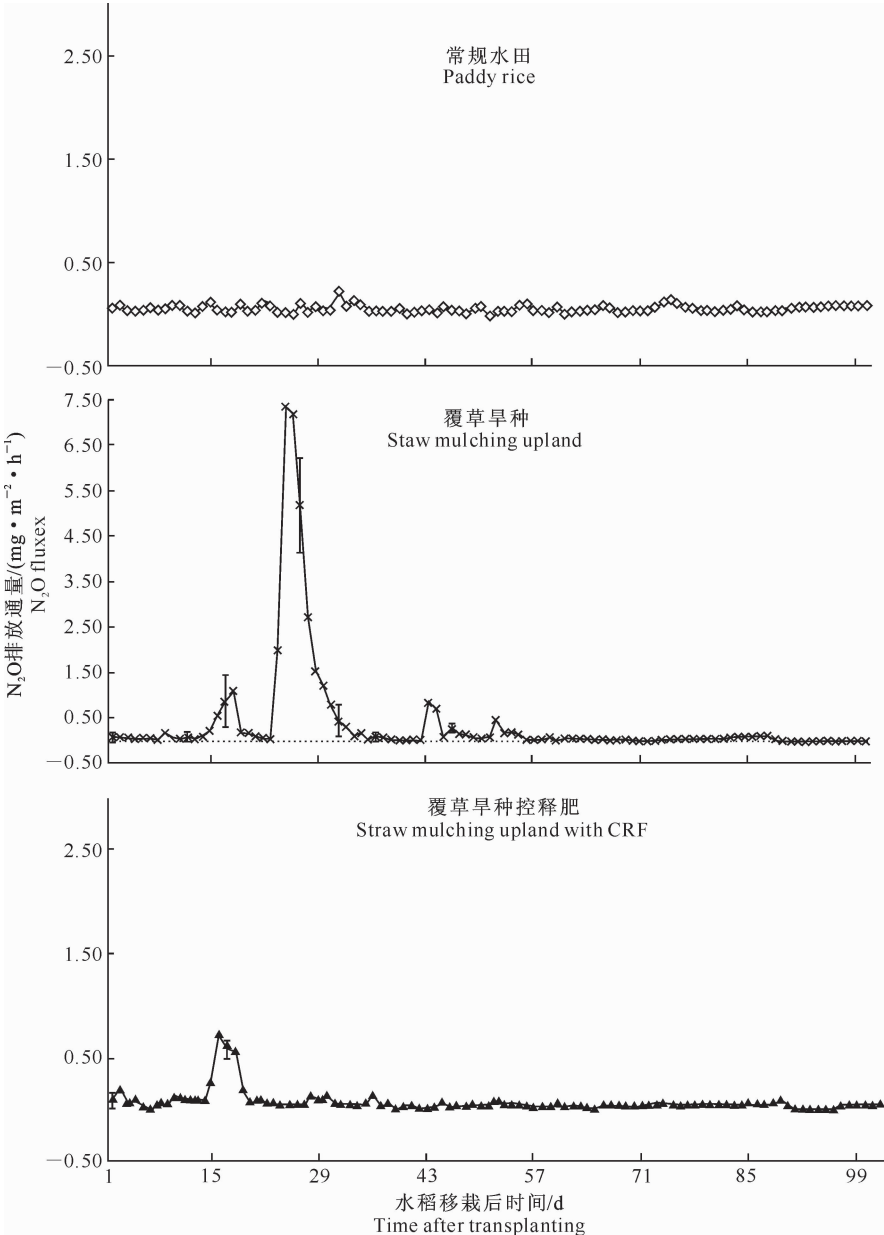


图 3 控释肥和覆草旱种对稻田 N<sub>2</sub>O 日排放通量的影响

Fig. 3 Effects of CRF and straw mulching upland rice on N<sub>2</sub>O fluxes

表 2 控释肥及覆草旱种对稻田 N<sub>2</sub>O 排放峰及累积排放量的影响

Table 2 Effects of CRF and straw mulching upland rice on N<sub>2</sub>O emission peak and cumulative emission

| 处理<br>Treatment                                         | 峰持续时间/d<br>Peak duration | 峰期水稻生育期<br>Rice growing stage of<br>emission peak | 峰期排放量/<br>(kg · hm <sup>-2</sup> )<br>Peak emission | 累积排放量/<br>(kg · hm <sup>-2</sup> )<br>Cumulative<br>emission | 峰期排放量<br>贡献率/%<br>Ratio of peak<br>emission emissions |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 常规水田 Paddy rice                                         | /                        | /                                                 | /                                                   | 0.62±0.26 b                                                  | /                                                     |
| 覆草旱种<br>Straw mulching upland                           | 10                       | 最大分蘖期<br>Maximum tillering stage                  | 6.42±1.31 a                                         | 8.65±1.34 a                                                  | 74.23                                                 |
| 覆草旱种控释肥<br>Straw mulching upland fertilized<br>with CRF | 7                        | 分蘖初期<br>Initial tillering stage                   | 0.57±0.10 b                                         | 0.83±0.22 b                                                  | 68.69                                                 |

### 2.3 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势及温室效应

全球增温潜势是评价温室气体对气候变化影响的相对能力的一个参数,是某一给定物质在一定时

间积分范围内与 CO<sub>2</sub> 相比而得到的相对辐射影响值。进一步探讨控释肥和覆草旱种对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势的影响,结果见表 3。

表 3 控释肥和覆草旱种对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 温室效应的影响

Table 3 Effects of CRF and straw mulching upland rice on greenhouse effect of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O

| 处理<br>Treatments                                        | CDE <sub>CH<sub>4</sub></sub> /<br>(kg · hm <sup>-2</sup> ) | CDE <sub>N<sub>2</sub>O</sub> /<br>(kg · hm <sup>-2</sup> ) | TCDE /<br>(kg · hm <sup>-2</sup> ) | TCDE 较<br>常规水田<br>减少率 / % | GHGI /<br>(kg · kg <sup>-1</sup> ·<br>年 <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| 常规水田 Paddy rice                                         | 4 687.19±639.42 a                                           | 182.61±44.48 b                                              | 4 869.81±644.35 a                  | /                         | 0.85±0.12 a                                             |
| 覆草旱种 Straw mulching upland                              | 937.36±219.20 b                                             | 2 559.69±396.35 a                                           | 3 497.05±457.02 a                  | 28.19                     | 0.64±0.10 a                                             |
| 覆草旱种控释肥<br>Straw mulching upland fertilized with<br>CRF | 842.74±171.11 b                                             | 245.36±65.64 b                                              | 1 088.10±234.07 b                  | 77.66                     | 0.20±0.04 b                                             |

由表 3 可知,覆草旱种和控释肥处理对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 增温潜势的影响并不相同。无论是覆草旱种稻田还是覆草旱种控释肥稻田,CH<sub>4</sub> 全球增温潜势均显著下降。与常规水田相比,覆草旱种稻田 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势显著增加,而覆草旱种控释肥稻田则无明显变化。与常规水田相比,覆草旱种稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势无显著差异,而覆草旱种控释肥稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势和气体排放量强度则显著降低,其 TCDE 和 GHGI 较常规水田分别减少 77.66%和 76.47%。由此可见,常规水田改为覆草旱种后,虽然 N<sub>2</sub>O 排放产生的温室效应有所增加,但由于 CH<sub>4</sub> 排放产生的温室效应明显降低,所以覆草旱种稻田总温室效应与常规水田相比无显著差异。若覆草旱种稻田施用控释肥后,由于其排放 N<sub>2</sub>O 的温室效应接近于常规水田,因此其全球增温潜势总体上显著降低。

## 3 讨 论

### 3.1 稻田 CH<sub>4</sub> 排放的影响因素及覆草旱种控释肥稻田的 CH<sub>4</sub> 排放

CH<sub>4</sub> 是厌氧条件下土壤有机物在甲烷细菌作用下的产物。稻田 CH<sub>4</sub> 的排放是 CH<sub>4</sub> 产生和 CH<sub>4</sub> 氧化综合作用的结果,取决于 CH<sub>4</sub> 的产生及其氧化作用的相对强弱。土壤水分<sup>[17]</sup>、土壤有机物<sup>[25]</sup>和土壤温度<sup>[26]</sup>等因素均影响 CH<sub>4</sub> 的排放。在同一类型土壤中,土壤水分、温度和肥料是 CH<sub>4</sub> 产生和排放的关键影响因素。水稻节水灌溉,土壤通透性增加,产生的 CH<sub>4</sub> 被大量氧化,故 CH<sub>4</sub> 排放量降低<sup>[20,26-29]</sup>。稻田覆草一方面可以降低稻田土壤温度,减少 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[23]</sup>;另一方面覆盖的稻草可能分解成为土壤有机质,增加了 CH<sub>4</sub> 产生的底物,从而促进 CH<sub>4</sub> 的产生和排放。秦晓波等<sup>[30]</sup>在早晚稻上 2 年的研究表明,免耕条件下覆草稻田 CH<sub>4</sub> 的排放较不覆草略有增加或显著增加。本研究结果表

明,旱种结合覆草处理稻田的 CH<sub>4</sub> 累积排放量较常规水田显著降低 80%。李曼莉等<sup>[19]</sup>、Kreye 等<sup>[20]</sup>的研究结果也有相同的结论,其可能原因是覆盖的稻草降解较慢,稻草降解增加的 CH<sub>4</sub> 排放量远低于旱种及覆草时温度下降导致的 CH<sub>4</sub> 的减排量。

关于施用缓/控释肥或抑制剂对稻田甲烷排放影响的研究结果尚存在一定差异。梁巍等<sup>[10]</sup>、李方敏等<sup>[15]</sup>研究发现,稻田施用控释肥或长效尿素后,CH<sub>4</sub> 排放增加。Li 等<sup>[31]</sup>发现,在基肥、分蘖肥和孕穗肥中施加氰脲和双氰胺均可减少 CH<sub>4</sub> 的排放。而周礼恺等<sup>[32]</sup>研究发现,在未施麦秸粉即碳源不足时,施用脲酶抑制剂氢脲与硝化抑制剂双氰胺可使 CH<sub>4</sub> 排放总量减少 1/2,而施用麦秸粉即碳源充足时,二者对 CH<sub>4</sub> 排放无影响。本研究结果表明,覆草旱种控释肥稻田与覆草旱种稻田 CH<sub>4</sub> 累积排放量无显著差异,与周礼恺等<sup>[32]</sup>施用抑制剂的研究结果一致,但两者的 CH<sub>4</sub> 累积排放量显著小于常规水田。究其原因是覆草旱种显著降低了 CH<sub>4</sub> 的排放量所致<sup>[19-20]</sup>,而在本研究条件下,覆草旱种稻田 CH<sub>4</sub> 排放与是否施用控释肥无关。

### 3.2 稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响因素及覆草旱种控释肥稻田的 N<sub>2</sub>O 排放

N<sub>2</sub>O 是稻田氮素硝化与反硝化作用的中间产物,水分是其重要影响因素之一。灌溉方式影响稻田土壤水分状况及微生物的硝化反硝化作用,进而间接导致稻田 N<sub>2</sub>O 排放量的差异。已有研究表明,水稻节水灌溉或旱种会增加 N<sub>2</sub>O 的排放量<sup>[19-20,26,29,33]</sup>,而在旱种稻田地表覆盖薄膜或秸秆,却可以有效抑制 N<sub>2</sub>O 的产生<sup>[27]</sup>,但排放量仍显著大于水田<sup>[19-20]</sup>。本研究结果也得到了同样的结果,即覆草旱种稻田在水稻分蘖期的 N<sub>2</sub>O 排放量显著增加,N<sub>2</sub>O 累积排放量显著大于常规水田。

本研究中,覆草旱种稻田在移栽后第 24 天(08-

25)出现了  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰,其可能原因是 08-16—08-21 的持续降雨,使深层土壤生产并累积了大量的  $\text{N}_2\text{O}$ ,08-22 后随着降雨的结束,土壤水分含量逐渐降低,土层中闭蓄的  $\text{N}_2\text{O}$  便从土壤缝隙中大量释放出来,于 08-25 达到最大排放量。基肥和孕穗期追肥处理无明显的排放峰出现,这与李方敏等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。 $\text{N}_2\text{O}$  的排放与土壤溶液中的  $\text{NO}_3^-$  浓度密切相关,控释肥料或长效肥氮素缓慢释放,减少了土壤溶液中  $\text{NO}_3^-$  的累积,显著地降低了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[10,13]</sup>。有研究发现,施用硝化抑制剂和脲酶抑制剂也有相同的  $\text{N}_2\text{O}$  减排效果<sup>[32]</sup>。本研究结果也表明,在覆草早种稻田,施用控释肥可以显著减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量,这与前人研究结果<sup>[10,13]</sup>一致。

### 3.3 覆草早种控释肥稻田的温室效应

水稻覆草早种时,灌溉用水量显著减少,节水率可达 22.8%<sup>[34]</sup>。本研究结果表明,虽然覆草早种稻田的  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量有所增加,但  $\text{CH}_4$  累积排放量却明显降低,故其增温潜势和排放强度与常规水田无显著差异。可见从节水和温室效应两方面考虑,水稻覆草早种是较理想的水稻栽培模式之一。而常规水稻栽培过程施用的是水溶性肥料,养分损失率大,肥料利用率低,在一定程度上会污染水体和大气。相比之下,控释肥料养分释放缓慢,肥料利用率高,特别是反硝化作用产生的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量明显降低,因此覆草早种控释肥稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的增温潜势和排放强度均显著降低。综上所述,水稻覆草早种施用控释肥料是明显减少稻田温室效应的有效措施,是一种科学的水稻种植模式。

## 4 结 论

覆草早作和施用控释肥料均可显著降低稻田  $\text{CH}_4$  的排放峰及累积排放量,其累积排放量仅为常规水田的 20.00%和 17.98%。覆草早种促进了稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, $\text{N}_2\text{O}$  峰期排放量和累积排放量均显著增加,其中累积排放量为常规水田的 14 倍;若覆草早种结合施用控释肥,则可显著抑制覆草早种导致的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的增加, $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量接近常规水田水平。覆草早种对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的总增温潜势和排放强度无显著影响,但覆草早种结合施用控释肥则能显著降低其全球增温潜势和排放强度,二者较常规水田分别减少 77.66%和 76.47%。综合考虑灌溉用水、温室效应,水稻覆草早种结合施用控释肥料是明显减少稻田温室效应的有效措施,是一种理想的水稻种植模式。

## 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Mitigation of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273.  
Dong H M, Li Y E, Tao X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 269-273. (in Chinese)
- [4] 张强,巨晓棠,张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量重新估算 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 7-13.  
Zhang Q, Ju X T, Zhang F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC 2006 guideline method [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 7-13. (in Chinese)
- [5] 李方敏,樊小林,陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 494-500.  
Li F M, Fan X L, Chen W D. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 494-500. (in Chinese)
- [6] 陈贤友,吴良欢,李金先,等. 新型控释肥对水稻产量与氮肥利用率的影响探讨 [J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 133-137.  
Chen X Y, Wu L H, Li J X, et al. Effects of new controlled release fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(1): 133-137. (in Chinese)
- [7] 王丽艳,荆瑞勇. 改性尿素对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响 [J]. 贵州农业科学, 2008, 36(1): 108-109.  
Wang L Y, Jing R Y. The effect of modified urea on  $\text{N}_2\text{O}$  release from soils [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2008, 36(1): 108-109. (in Chinese)
- [8] 黄斌,陈冠雄, Oswald Van Cleemput. 长效碳酸氢铵对土壤硝化反硝化过程和  $\text{NO}$  与  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 74-78.  
Huang B, Chen G X, Oswald Van Cleemput. Effect of modified ammonium bicarbonate on nitrification denitrification process and  $\text{NO}$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1): 74-78. (in Chinese)
- [9] 杜亚琴,郑丽行,樊小林. 三种控释肥在赤红壤中的氧化亚氮排放 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2370-2376.  
Du Y Q, Zheng L X, Fan X L. Effects of applying controlled release fertilizers on  $\text{N}_2\text{O}$  emission from a lateritic red soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2370-2376. (in Chinese)
- [10] 梁巍,张颖,岳进,等. 长效氮肥施用对黑土水旱田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 44-48.  
Liang W, Zhang Y, Yue J, et al. Effect of slow releasing nitro-

- gen fertilizers on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission in maize and rice fields in black earth soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(3): 44-48. (in Chinese)
- [11] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 等. 氮肥管理对夏玉米土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响 [J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(1): 117-128. Hu X K, Huang B X, Su F, et al. Effects of nitrogen management on methane and nitrous oxide emissions from summer maize soil in North China Plain [J]. Science China: Chemistry, 2011, 41(1): 117-128. (in Chinese)
- [12] 纪洋, 刘刚, 马静, 等. 控释肥施用对小麦生长期  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响 [J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 526-534. Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effect of controlled-release fertilizer (CRF) on nitrous oxide emission during the wheat growing period [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 526-534. (in Chinese)
- [13] 李方敏, 樊小林, 刘芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2170-2174. Li F M, Fan X L, Liu F, et al. Effects of controlled release fertilizers on  $\text{N}_2\text{O}$  emission from paddy field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2170-2174. (in Chinese)
- [14] 纪洋, 张晓艳, 马静, 等. 控释肥及其与尿素配合施用对水稻生长期  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2031-2037. Ji Y, Zhang X Y, Ma J, et al. Effects of applying controlled-release fertilizer and its combination with urea on nitrous oxide emission during rice growth period [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2031-2037. (in Chinese)
- [15] 李方敏, 樊小林. 控释肥对稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4): 408-411. Li F M, Fan X L. Effect of controlled release fertilizers on methane emission from paddy field [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2005, 11(4): 408-411. (in Chinese)
- [16] Bellisario L M, Bubier J L, Moore T R. Controls on  $\text{CH}_4$  emissions from a northern peatland [J]. Global Biogeochemistry Cycles, 1999, 13(1): 81-91.
- [17] 彭世彰, 李道西, 缴锡云, 等. 节水灌溉模式下稻田甲烷排放的季节变化 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2006, 32(5): 546-550. Peng S Z, Li D X, Jiao X Y, et al. Effect of water-saving irrigation on the seasonal emission of  $\text{CH}_4$  from paddy field [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Science, 2006, 32(5): 546-550. (in Chinese)
- [18] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Field experiments on greenhouse gas emissions and nitrogen and phosphorus losses from rice paddy with efficient irrigation and drainage management [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1581-1587.
- [19] 李曼莉, 徐阳春, 沈其荣, 等. 旱作及水作条件下稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的观察研究 [J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 864-869. Li M L, Xu Y C, Shen Q R, et al. Methane and nitrous oxide fluxes in aerobic and waterlogged production systems of rice crop [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 864-869. (in Chinese)
- [20] Kreye C, Dittert K, Zheng X H, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China [J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2007, 77: 293-304.
- [21] Wang M X, Shanguan X J, Shen R X, et al. Methane production, emission and possible control measures in the rice agriculture [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1993, 10(3): 307-314.
- [22] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统冬小麦田  $\text{NO}$  排放观测研究 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 577-581. Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al.  $\text{NO}$  emission from winter wheat fields of rice-wheat rotation ecosystem in south-east China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 577-581. (in Chinese)
- [23] 李天安. 覆盖旱种稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及其对全球增温潜力的影响 [D]. 广州: 华南农业大学, 2003. Li T A.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission and their influence on global warming potential in Ground Cover Rice Production System [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [24] Timothy H, Jonathan P, Kevin B. Target-intensity: An analysis of greenhouse gas intensity targets [M]. Washington D C, USA: World Resources Institute, 2006: 37.
- [25] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 [J]. 生态学报, 2002, 22(10): 1672-1678. Ding W X, Cai Z C. Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10): 1672-1678. (in Chinese)
- [26] 刘芳, 李天安, 樊小林. 华南地区覆膜旱种稻田甲烷排放及其与土壤水分和温度的关系 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 110-116. Liu F, Li T A, Fan X L. Methane flux and its relationship with soil temperature and moisture during rice growth in film mulching upland rice field in south China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2): 110-116. (in Chinese)
- [27] Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, et al. Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2012, 53/54: 30-37.
- [28] Qin Y M, Liu S W, Guo Y Q, et al. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China [J]. Biol Fertil Soils, 2010, 46: 825-834.
- [29] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及温室效应评估 [J]. 中国农业科学, 2008, 38(12): 4294-4300. Yuan W L, Cao C G, Cheng J P, et al.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 38(12): 4294-4300. (in Chinese)

- [J]. *Int Biodeter Biodegr*, 2011, 65(7): 1024-1034.
- [79] Yemashova N A, Kotova I B, Netrusov A I, et al. Special traits of decomposition of azo dyes by anaerobic microbial communities [J]. *Appl Biochem Microbiol*, 2009, 45: 176-181.
- [80] Qu Y, Shi S, Ma F, et al. Decolorization of Reactive Dark Blue K-R by the synergism of fungus and bacterium using response surface methodology [J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101: 8016-8023.
- [81] Saratale R G, Saratale G D, Chang J S, et al. Decolorization and biodegradation of reactive dyes and dye wastewater by a developed bacterial consortium [J]. *Biodegradation*, 2010, 21: 999-1015.
- [82] Dafale N, Rao N N, Meshram S U, et al. Decolorization of azo dyes and simulated dye bath wastewater using acclimatized microbial consortium; Biostimulation and halo tolerance [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(7): 2552-2558.
- [83] Levin I, Malignani E, Ramos A M. Effect of nitrogen sources and vitamins on ligninolytic enzyme production by some white-rot fungi, dye decolorization by selected culture filtrates [J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101: 4554-4563.
- [84] Chang J S, Lin Y C. Fed-Batch bioreactor strategies for microbial decolorization of azo dye using a *Pseudomonas luteola* strain [J]. *Biotechnol Prog*, 2000, 16(6): 979-985.
- [85] Jadhav U U, Dawkar V V, Ghodake G S, et al. Biodegradation of Direct Red 5B, a textile dye by newly isolated *Comamonas* sp. UVS [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 158(2/3): 507-516.
- [86] Pearce C I, Lloyd J R, Guthrie J T. The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells; A review of azo dyes pigments [J]. 2003, 58(3): 179-196.
- [87] Wang H J, Su Q, Zheng X W, et al. Bacterial decolorization and degradation of the reactive dye reactive red 180 by *Citrobacter* sp. CK3 [J]. *Int Biodeter Biodegr*, 2009, 63(4): 395-399.
- [88] Myrna S, Aida S, Hermminial I P, et al. Microbial decolouration of azo dyes; A review [J]. *Process Biochemistry*, 2012, 47: 1723-1748.
- [89] Telke A A, Kalyani D C, Dawkar V V, et al. Influence of organic and inorganic compounds on oxidoreductive decolorization of sulfonated azo dye C. I. Reactive Orange 16 [J]. *Hazard Mater*, 2009, 172(1): 298-309.
- [90] Hong Y, Chen X, Guo J, et al. Effects of electron donors and acceptors on anaerobic reduction of azo dyes by *Shewanella decolorationis* S12 [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2007, 74(1): 23-28.
- [91] Saratale R G, Saratale G D, Chang J S, et al. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes; A review [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2011, 42: 138-157.
- [92] Komal S, Sindhu S, Suddhasatwa B. Microbial fuel cells for azo dye treatment with electricity generation; A review [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 131: 564-571.

(上接第 102 页)

- [30] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 210-216.
- Qin X B, Li Y E, Wan Y F, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 210-216. (in Chinese)
- [31] Li X L, Zhang X Y, Xu H, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy soil as influenced by timing of application of hydroquinone and dicyandiamide [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2009, 85: 31-40.
- [32] 周礼恺, 徐星凯, 陈利军, 等. 氰醌和双氰胺对种稻土壤  $N_2O$  和  $CH_4$  排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 1999, 10(2): 189-192.
- Zhou L K, Xu X K, Chen L J, et al. Effect of hydroquinone and dicyandiamide on  $N_2O$  and  $CH_4$  emissions from lowland rice soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2): 189-192. (in Chinese)
- [33] Peng S Z, Hou H J, Xu J Z, et al. Lasting effects of controlled irrigation during rice-growing season on nitrous oxide emissions from winter heat croplands in Southeast China [J]. *Paddy Water Environ*, 2013, 11: 583-591.
- [34] 汪 强. 旱作水稻节水及其产量效应机理的研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2004.
- Wang Q. Study on water-saving and mechanism of yield response of paddy rice to upland condition [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2004. (in Chinese)