

# 不同施肥技术对单季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响研究

贺 非<sup>1</sup>, 马友华<sup>1\*</sup>, 杨书运<sup>1</sup>, 江 波<sup>1</sup>, 左怀峰<sup>1</sup>, 颜晓元<sup>2</sup>, 马 静<sup>2</sup>

(1.安徽农业大学资源环境学院, 合肥 230036; 2.土壤与农业可持续发展国家重点实验室/中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要:**以麦茬稻田为对象,采用静态箱-气相色谱法对巢湖地区常规施肥、高产施肥、高产施肥+脲酶抑制剂、控失肥 4 种肥料处理下稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放进行测定,研究控失肥和脲酶抑制剂两种技术措施对单季稻 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的综合影响。结果表明:各处理间 CH<sub>4</sub> 排放的季节变化模式没有明显不同,但排放量大小有明显差异;高产施肥+脲酶抑制剂与控失肥处理的 CH<sub>4</sub> 季节累积排放量分别为 28.81 g·m<sup>-2</sup> 和 32.68 g·m<sup>-2</sup>,较常规施肥处理分别减少了 25.8%和 15.8%,而 N<sub>2</sub>O 的季节累积排放量没有明显差异。对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的综合温室效应分析表明,高产施肥+脲酶抑制剂与控失肥处理的综合温室效应比常规施肥处理分别降低了 2 581.92 kg eqCO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup> 和 1 561.96 kg eqCO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup>,单位产量的 GWP 分别减少了 29.9%和 18.9%,均达到显著性差异。对于巢湖地区单季稻,高产施肥+脲酶抑制剂和控失肥处理对于粮食增产和稻田温室气体减排具有一定的作用。

**关键词:**水稻;肥料;CH<sub>4</sub>;N<sub>2</sub>O;温室气体效应

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)10-2093-06 doi:10.11654/jaes.2013.10.028

## Effects of Different Fertilization Techniques on the Emission of Methane and Nitrous Oxide from Single Cropping Rice

HE Fei<sup>1</sup>, MA You-hua<sup>1\*</sup>, YANG Shu-yun<sup>1</sup>, JIANG Bo<sup>1</sup>, ZUO Huai-feng<sup>1</sup>, YAN Xiao-yuan<sup>2</sup>, MA Jing<sup>2</sup>

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Agricultural, Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The field experiments were carried out on the rice crop from the rotation system of rice-wheat in Chao Lake basin. The emission characteristics of methane and nitrous oxide from the rice crop farmland with regular fertilization, high-yielding fertilization, high-yielding fertilization+urease inhibitors and loss-control fertilizer were studied with static chamber-gas chromatograph technique to research the influence of the loss-control fertilizer and urease inhibitors on the single cropping rice's emissions of methane and nitrous oxide. The results showed that there was no obvious seasonal change for the emission mode of methane, but there was a great difference among the methane emission load. The accumulate emission loads of methane of rice crop treated with high-yielding fertilization + urease inhibitors and loss-control fertilizer were respectively 28.81 g·m<sup>-2</sup> and 32.68 g·m<sup>-2</sup>, which were reduced by 25.8% and 15.8% respectively, compared with the treatment of regular fertilization, while there were no obvious difference among the accumulate emission load of nitrous oxide with the same treatments. The studies suggested that the greenhouse effects of single cropping rice with high-yielding fertilization+urease inhibitors and loss-control fertilizer were respectively decreased by 2 581.92 kg eqCO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup> and 1 561.96 kg eqCO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup> than regular fertilization with the decrement by 29.9% and 18.9% of per unit output of GWP(Global Warming Potentials). High-yielding fertilization+urease inhibitors and loss-control fertilizer had a significant effect on the increase of rice yield and the reduce of greenhouse gases emission in Chao Lake basins.

**Keywords:** rice; fertilizer; methane; nitrous oxide; greenhouse effect

收稿日期:2013-02-25

基金项目:2011年公益性行业(农业)科研专项经费(201103039)

作者简介:贺 非(1987—),男,河南新乡人,硕士,主要从事农田温室气体研究。E-mail:387975033@qq.com

\*通信作者:马友华 E-mail:yhma@ahau.edu.cn

自工业革命以来,大气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体的浓度一直在逐年增加,而温室气体排放引起的全球气候变化已成为当今国际社会普遍关注的全球性问题,也是全人类面临的最严峻的全球性环境问题。CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O被认为是全球温室效应贡献较大的两种温室气体,CH<sub>4</sub>的增温效应是CO<sub>2</sub>的15~30倍,N<sub>2</sub>O的增温效应是CO<sub>2</sub>的150~200倍<sup>[1]</sup>。

稻田是大气CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的重要排放源之一,其CH<sub>4</sub>排放量占大气总来源的8%~13%左右<sup>[2]</sup>,全球人文排放N<sub>2</sub>O的60%~90%直接来源于农田施用氮肥<sup>[3-4]</sup>,而氮肥施用不仅促进了土壤N<sub>2</sub>O的排放,同时对稻田CH<sub>4</sub>有重要影响<sup>[5]</sup>。关于肥料使用的不同减排措施的排放研究已有很多,但多着重于单纯的有机无机肥料的使用研究<sup>[6-8]</sup>。控释肥料作为国内外研究的热点<sup>[9]</sup>,有研究认为<sup>[10-11]</sup>包膜型控释肥会显著增加稻田CH<sub>4</sub>的排放,同时也能显著降低稻田N<sub>2</sub>O的排放,但控失肥作为一种新型缓控释肥料<sup>[12-13]</sup>在温室气体排放上鲜有报道,而脲酶抑制剂在CH<sub>4</sub>排放上的报道也多有矛盾<sup>[7,14]</sup>。本文通过小区实验,选用控失肥与脲酶抑制剂两种减排措施,结合当地的推广技术,定量研究不同肥料减排技术对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的综合影响,为评价不同肥料减排技术对单季稻田温室气体排放的影响提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

试验于2012年在安徽省巢湖市烔炀镇唐嘴村(117°40'E,31°39'N)麦茬水稻试验田(麦秸不还田)中进行。试验地气候为北亚热带湿润季风气候区,年平均气温16.8℃,年均降水量1358.3 mm。土壤为潜育型水稻土,土壤理化特性为:pH(H<sub>2</sub>O)值6.18(玻璃电极法);有机碳23.64 g·kg<sup>-1</sup>(重铬酸钾外加热法);全氮含量1.30 g·kg<sup>-1</sup>(重铬酸钾-硫酸消化法);物理性粘粒含量(粒径<0.01 mm)490 g·kg<sup>-1</sup>(比重计法)。

### 1.2 试验设计

试验设4个处理:

(1)常规施肥(当地习惯施肥):180 kg N·hm<sup>-2</sup>,67.5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>,67.5 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>。

(2)高产施肥:225 kg N·hm<sup>-2</sup>,67.5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>,120 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>。

(3)高产施肥和脲酶抑制剂(HQ)混施:225 kg N·hm<sup>-2</sup>,67.5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>,120 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>,HQ1.47 kg·hm<sup>-2</sup>。

(4)控失肥(19-8-12):900 kg·hm<sup>-2</sup>。

每个处理重复3次,小区面积为30 m<sup>2</sup>,处理随机排列。肥料类型为尿素、普通过磷酸钙和氯化钾;控失肥由中科院合肥物质科学研究院研制,安徽帝元生物科技有限公司提供;脲酶抑制剂为氢醌(无锡市展化医药有限公司生产)。N肥以4:4:2的比例分基肥和追肥施入,控失肥直接做基肥一次施入,脲酶抑制剂以尿素的0.3%的比例混匀施入。水稻品种为超级稻0293,2012年6月22日移栽并施基肥,分别在7月1日和8月7日追肥,7月9日开始烤田,7月16日结束烤田,9月25日收获。

### 1.3 采样与分析

采用密闭静态箱法定位观测气体通量。箱体用厚5 mm的透明有机玻璃制成,采样箱有50 cm×50 cm×60 cm和50 cm×50 cm×120 cm两种规格。箱顶打孔安装温度计测定箱内温度。在水稻移栽后到成熟期,每隔5 d采样1次,施肥后9 d内、烤田期间均隔1 d采样1次。采样时将取样箱轻扣在不锈钢回型底座上,回型底座上有水槽,水槽内水起隔绝箱内外气体的水封作用。每次取样从9:00开始,采样时间分别为关箱后的0、5、10、15、20 min,每次用针筒抽样60 mL。24 h内用Bruker气相色谱仪(Bruker450-GC)同时测定气体样品中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O含量。CH<sub>4</sub>用FID检测器,检测条件:柱温50℃,检测器温度250℃,氮气流量10 mL·min<sup>-1</sup>,氢气、空气流量分别为30、300 mL·min<sup>-1</sup>;N<sub>2</sub>O用NI<sup>63</sup>ECD检测器,检测条件:检测器温度300℃,氮气流量300 mL·min<sup>-1</sup>。气样中干扰水分由带有十通阀和不锈钢前置柱的反吹系统去除,主色谱柱为0.25 mm毛细管柱,长3 m,CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O标准气体均由BRUKER公司提供。N<sub>2</sub>O与CH<sub>4</sub>流通量根据下面公式计算<sup>[15]</sup>:

$$F=\rho \times h \times (dC/dt) \times 273 / (273+T)$$

式中: $F$ 是气体流通量,mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $\rho$ 是标准状态下的气体流动时密度,mg·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>; $h$ 是箱高,m; $dC/dt$ 为采样箱内的气体浓度变化率; $T$ 为采样过程中采样箱内的平均温度,℃。

### 1.4 结果分析

试验结果均以3次重复的平均值表示,采用Excel软件对数据进行处理,采用DPS软件进行分析(LSD法)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同施肥技术对稻田CH<sub>4</sub>排放季节变化的影响

从图1可以看出,水稻生育期各处理CH<sub>4</sub>排放都

为“双峰型”,最高峰在分蘖期,移栽后 18 d 左右各处理达到排放高峰,烤田后排放量逐渐降低,除控失肥处理外,其他各处理都呈先升高后降低的变化趋势,最大峰值出现时  $\text{CH}_4$  排放速率为高产>常规>控失肥>脲酶抑制剂,分别达到 64.38、62.42、42.69、36.62  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,而控失肥峰值会提前出现。 $\text{CH}_4$  排放高峰出现在水稻分蘖期,可能是由于这一时期水稻生长最旺盛,光合作用最强,光合作用产物多,向根系输送的多,且水稻田一直处于厌氧环境,这些条件有利于甲烷菌的活性提高,导致大量  $\text{CH}_4$  排放<sup>[16]</sup>。第二个排放峰出现在孕穗齐穗期,各处理均呈先升高后降低的变化趋势,当地在这一时期进行了第二次追肥, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度的增加对  $\text{CH}_4$  氧化菌有抑制作用,使土壤中  $\text{CH}_4$  浓度升高<sup>[17]</sup>,同时由于根系和腐烂物质给土壤提供了较多的产  $\text{CH}_4$  基质,此时排放通量虽然小于分蘖期,但却大于水稻生育后期<sup>[18]</sup>。

$\text{CH}_4$  的氧化作用能消耗掉稻田土壤产生  $\text{CH}_4$  总量的 50%~90%<sup>[2]</sup>,主要发生在根土界面和水土界面这两个氧气较富足的区域,而其氧化作用主要由  $\text{CH}_4$  氧

化菌和氨氧化菌完成。施用氮肥影响土壤中  $\text{CH}_4$  的氧化,这取决于氮肥种类、施用量、施肥技术及土壤的理化性质等。有文献报道<sup>[19-20]</sup>, $\text{NH}_4^+$ 抑制  $\text{CH}_4$  氧化,抑制的原因是由于  $\text{NH}_4^+$ 和  $\text{CH}_4$  具有相似的分子结构,竞争  $\text{CH}_4$  氧化菌酶系统相同的位点,降低了  $\text{CH}_4$  氧化酶的活性,从而抑制了  $\text{CH}_4$  氧化的作用,促进了  $\text{CH}_4$  的排放。脲酶抑制剂是用来减缓土壤中尿素酰胺态氮水解至铵态氮,抑制  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  至  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的氧化,减少  $\text{NH}_3$  挥发、 $\text{N}_2\text{O}$  与  $\text{N}_2$  等气态损失的元素和化合物<sup>[21]</sup>。脲酶抑制剂可以降低尿素水解的速度,减少土壤中  $\text{NH}_4^+$  的浓度,促进  $\text{CH}_4$  氧化的作用,减少  $\text{CH}_4$  的排放。

## 2.2 不同施肥技术对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放季节变化的影响

从图 2 中看出,水稻生长期,  $\text{N}_2\text{O}$  的季节排放规律与  $\text{CH}_4$  的排放规律完全不同。 $\text{N}_2\text{O}$  在移栽后 20 d 内  $\text{N}_2\text{O}$  排放非常微弱,排放高峰出现在烤田阶段,最高峰值在烤田后第 3 d 出现,达到 226  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,是淹水期间的 5~10 倍。水稻生长前期只有少量的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,在水稻分蘖期可以看到短时间内  $\text{N}_2\text{O}$  排放有所增加,而水稻在施用穗肥后有较明显的排放峰,这可

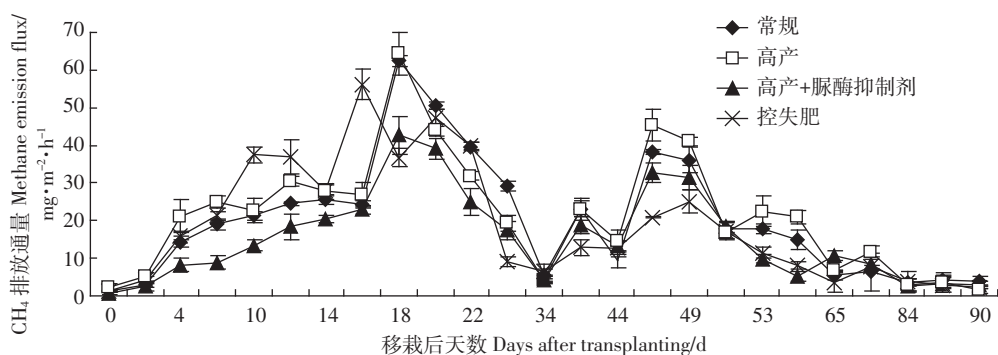


图 1 水稻生育期  $\text{CH}_4$  排放通量的季节变化

Figure 1 Seasonal variations of  $\text{CH}_4$  fluxes during rice growth period

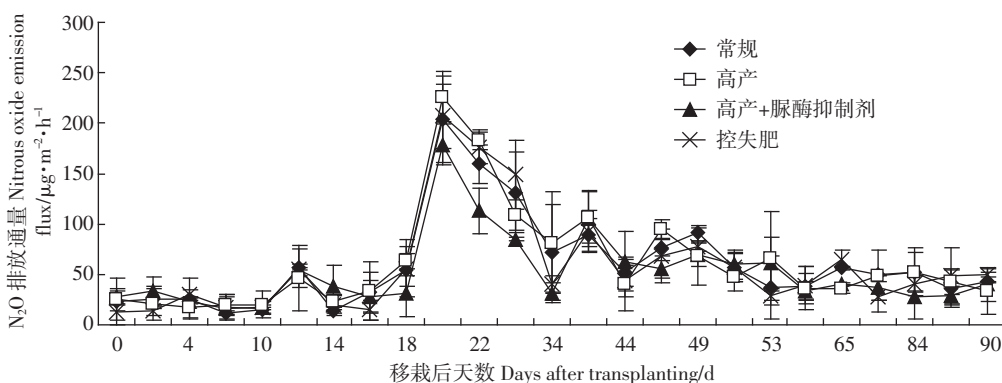


图 2 水稻生育期  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的季节变化

Figure 2 Seasonal variations of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes during rice growth period



能与施肥前灌水有关。田间水分状况和施肥是最主要的两个影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放的因素<sup>[22-23]</sup>, 土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的产生要经历一个复杂的物理、化学和生物学过程, 主要是在微生物的参与下, 通过硝化和反硝化作用完成的。尿素会对  $\text{N}_2\text{O}$  的排放有明显促进作用, 施入的尿素只有在脲酶的作用下转化成  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , 才能参与硝化作用, 而脲酶抑制剂抑制土壤中脲酶的活性, 使尿素减少转化成  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , 对  $\text{N}_2\text{O}$  的排放有明显减少的作用<sup>[14, 24]</sup>。

### 2.3 不同施肥技术对稻田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的季节累积排放量的影响

从表 1 可以看出, 常规施肥和高产施肥两种处理  $\text{CH}_4$  季节累积排放量显著高于高产+脲酶抑制剂和控失肥两种处理。水稻整个生育期内各处理间以高产处理的  $\text{CH}_4$  季节累积排放量最高, 达到了  $40.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 但与常规处理差异不明显, 而高产+脲酶抑制剂处理季节累积排放量为  $28.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 较常规处理减少了 25.8%, 这可能是由于脲酶抑制剂与尿素配施, 减少了土壤中脲酶与尿素结合的机会, 延缓尿素向  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的转化, 促进了土壤中  $\text{CH}_4$  氧化菌的活性, 抑制了  $\text{CH}_4$  的排放。

表 1 不同施肥技术对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的累积排放量

Table 1 Total  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in rice fields under different fertilization techniques

| 处理       | $\text{CH}_4$ 排放                                         |                           | $\text{N}_2\text{O}$ 排放                   |           |
|----------|----------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-----------|
|          | 累积排放量 <sup>(1)</sup> /<br>$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ | 增减率 <sup>(2)</sup> /<br>% | 累积排放量/<br>$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ | 增减率/<br>% |
| 常规       | 38.83±1.76a                                              |                           | 141.19±21.86a                             |           |
| 高产       | 40.51±2.48a                                              | 4.3                       | 143.50±31.18a                             | 1.63      |
| 高产+脲酶抑制剂 | 28.80±0.96c                                              | -25.8                     | 115.85±10.00a                             | -17.9     |
| 控失肥      | 32.68±1.39b                                              | -15.8                     | 132.92±30.15a                             | -5.9      |

注: (1) 季节累积排放量为平均值 ± 标准误差 (SE); (2) 增减率为其他处理与常规处理相比同期排放总量增加或减少的百分数。同列数值不同小写字母代表处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

控失肥处理的季节累积排放量达到  $32.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 较常规处理减少了 15.8%, 达到了显著性差异, 控失肥处理在水稻中后期  $\text{CH}_4$  排放明显较其他施肥处理减少, 这可能是因为水稻前期控失肥料施用量较大且不易流失, 高浓度的  $\text{CH}_4$  和铵态氮的存在促进了甲烷氧化菌的生长, 随着时间的延长, 铵态氮会逐渐消失, 被促进的甲烷氧化菌会氧化更多的  $\text{CH}_4$ , 从而降低稻田后期  $\text{CH}_4$  的排放量。

相对于常规处理, 高产+脲酶抑制剂与控失肥处理的  $\text{N}_2\text{O}$  减排效果都不显著, 这可能与监测点距离

巢湖较近, 地下水位只有 0.5 m 左右, 土壤中含水量较丰富且当地习惯晒田时间较短, 尤其是在水稻生长后期田间干湿交替中连续降雨导致单季稻期间  $\text{N}_2\text{O}$  整体排放量较低有关。但高产+脲酶抑制剂处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放减少 17.9%, 与大部分研究结果一致<sup>[7, 25]</sup>。而控失肥处理与常规处理相比  $\text{N}_2\text{O}$  排放减少 5.9%, 与其他包膜型控释肥研究<sup>[10]</sup>相比, 有一定的减少, 这可能是因为添加肥效调节剂的控失肥料施入土壤后, 控失肥的养分被固定在土壤中, 减少氮素通过淋溶、径流及挥发 3 种途径的流失, 总体上增大了尿素转化为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , 进而参与硝化反应, 排放  $\text{N}_2\text{O}$ 。HOU 等<sup>[26]</sup>的培养试验证明包膜缓释氮肥处理的  $\text{N}_2\text{O}$  释放量仅在早期低于传统尿素, 在大时间尺度上两者并无显著差异。而在本研究中控失肥处理在水稻前期并没有明显低于常规处理, 在大尺度上两者也没有显著差异。有研究认为<sup>[27]</sup>, 只有在肥料的氮素释放速率符合作物对氮素的吸收速率、氮素的利用效率得到提高时, 氮素的  $\text{N}_2\text{O}$  排放损失才会减少, 否则将很难减少硝化过程产生的  $\text{N}_2\text{O}$ , 而控失肥处理并未验证这一点。因此对于控失肥是否能够减少稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放仍有待进一步研究。

### 2.4 不同施肥技术对稻田综合温室效应、经济效益的影响

据 IPCC 的统计, 在过去的 100 年,  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的温室效应系数分别是 25 和 298<sup>[28]</sup>, 可根据各处理  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的释放量, 计算不同处理所排放的温室气体的综合温室效应 (100 年)。

从表 2 可以看出,  $\text{CH}_4$  是稻田温室气体效应的主要贡献者, 这一点与陈冠雄等<sup>[29]</sup>的研究结果一致, 而  $\text{N}_2\text{O}$  对温室效应的贡献率小于 5%, 高产+脲酶抑制剂处理的综合温室效应分别比常规处理和高产处理降低了  $2\,581.92 \text{ kg eqCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $3\,008.13 \text{ kg eqCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 而控失肥处理的综合温室效应分别比常规处理和高产处理降低了  $1\,561.96 \text{ kg eqCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $1\,988.17 \text{ kg eqCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 两种施肥减排措施的减排效果均达到了显著性差异。而高产施肥较常规施肥综合温室效应有所提高。

高产+脲酶抑制剂处理和控失肥处理与常规处理相比较, 作物产量分别提高了  $781.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $632.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 均达到显著性差异; 为了考察不同处理对作物产量和温室气体排放的综合效应差异, 在研究过程中, 采用各处理温室气体排放净通量的综合增温潜势与经济产量的比值“单位产量的 GWP”来评估不同农

表 2 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的温室效应及其作物产量Table 2 Greenhouse effect of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission and their crop yield

| 处理       | 温室效应                                                    |                                                         | 综合温室效应/<br>kg eqCO <sub>2</sub> ·hm <sup>-2</sup> | 作物产量/<br>kg·hm <sup>-2</sup> | 单位产量的 GWP<br>(以 CO <sub>2</sub> 计) |
|----------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|          | CH <sub>4</sub> /kg eqCO <sub>2</sub> ·hm <sup>-2</sup> | N <sub>2</sub> O/kg eqCO <sub>2</sub> ·hm <sup>-2</sup> |                                                   |                              |                                    |
| 常规       | 9 708.18a                                               | 420.77a                                                 | 10 128.95a                                        | 7 666.65b                    | 1.32a                              |
| 高产       | 10 127.52a                                              | 427.64a                                                 | 10 555.16a                                        | 8 287.35ab                   | 1.27a                              |
| 高产+脲酶抑制剂 | 7 201.78c                                               | 345.25a                                                 | 7 547.03b                                         | 8 448.3a                     | 0.89b                              |
| 控失肥      | 8 170.88b                                               | 396.1a                                                  | 8 566.99b                                         | 8 298.9a                     | 1.03b                              |

业措施对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的综合影响<sup>[8,18]</sup>。从表 2 看出,常规处理和高产处理的单位产量的 GWP 明显大于其他两种处理,其中常规处理最大,其次是高产处理和控失肥处理,高产+脲酶抑制剂处理最小,高产+脲酶抑制剂和控失肥处理的单位产量的 GWP 分别为 0.89 和 1.03,相比常规处理分别减少了 29.9% 和 18.9%,均达到差异性显著。由此表明,高产+脲酶抑制剂处理和控失肥处理都是可以在高产基础上减少温室气体排放的较优施肥措施。

从表 3 可以看出,在水稻产量上,每公顷高产施肥、高产施肥+脲酶抑制剂、控失肥分别较常规处理提高了 620.70、781.65、632.25 kg。结合 2012 年水稻收购价和化肥成本,与常规处理相比,每公顷纯收入高产+脲酶抑制剂处理增加了 1 689.9 元,控失肥处理增加 1 452.1 元,高产施肥处理增加综合经济效益上均有较大提高。结合表 2 可以看出,高产+脲酶抑制剂处理和控失肥处理不仅能降低稻田温室效应,而且可以增大水稻产量,增加经济收入。

### 3 结论

(1)不同施肥技术处理对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的季节变化趋势无明显影响,但影响其排放量,与常

规处理相比,高产施肥的季节累积排放量最高,其次是控失肥处理,高产+脲酶抑制剂处理最低,高产+脲酶抑制剂和控失肥均明显降低 CH<sub>4</sub> 排放,且达到显著性差异,而 N<sub>2</sub>O 排放减少并不明显。

(2)CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放综合温室效应分析结果表明,高产+脲酶抑制剂和控失肥处理明显低于常规处理,高产施肥略有升高。单位产量的 GWP 以常规处理最大,高产施肥次之,然后是控失肥处理,高产+脲酶抑制剂最小。

(3)高产施肥、高产+脲酶抑制剂、控失肥 3 种处理经济效益均较常规处理有很大提高,其中高产+脲酶抑制剂处理经济效益增加最大。

综上所述,高产+脲酶抑制剂和控失肥处理对于实现单季稻经济效益和环境效益协调发展具有一定作用。

### 参考文献:

- [1] 黄 耀. 地气系统碳氮交换:从实验到模型[M]. 北京:气象出版社, 2003:1.  
HUANG Yao. Carbon and nitrogen exchange to enrage system:From the experiment to the model[M]. Beijing:China Meteorological Press, 2003:1.
- [2] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京:科学出版社, 2001:83-172.  
WANG Ming-xing. Methane emission from rice fields in China[M]. Beijing:Science Press, 2001:83-172.
- [3] IPCC. The initial core projects[R]. Bracknell UK:International Geosphere and Biosphere Program, 1990.
- [4] FAO & IAEA. Measurement of methane and nitrous oxide emission from agriculture[R]. Vienna:International Atomic Energy Agency, 1992.
- [5] CAI Z C, XU H. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196:7-14.
- [6] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的综合影响[J]. *环境科学*, 2003, 24(4):7-12.  
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4):7-12.
- [7] 李香兰, 徐 华, 蔡祖聪, 等. 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放消长关系及其减排措施[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6):2123-2130.  
LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Trade-off relation ship and

表 3 不同施肥技术对稻田经济效益的影响

Table 3 Effect of different fertilization technique on paddy economic benefit

| 处理       | 产量/<br>kg·hm <sup>-2</sup> | 水稻价格 <sup>(1)</sup> /<br>元·kg <sup>-1</sup> | 化肥成本/<br>元·hm <sup>-2</sup> | 肥料增效 <sup>(2)</sup> /<br>元·hm <sup>-2</sup> |
|----------|----------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| 常规       | 7 666.65                   | 2.7                                         | 1 428.0                     |                                             |
| 高产       | 8 287.35                   | 2.7                                         | 1 809.0                     | 1 294.89                                    |
| 高产+脲酶抑制剂 | 8 448.30                   | 2.7                                         | 1 848.6                     | 1 689.86                                    |
| 控失肥      | 8 298.90                   | 2.7                                         | 1 683.0                     | 1 452.08                                    |

注:(1)水稻价格为 2012 年巢湖流域超级稻的国家收购价,化肥成本由 2012 年当地实际肥料价格计算。(2)肥料增效指单一化肥因素变化情况下与常规处理相比水稻收入增加的部分。

- mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2123-2130.
- [8] Zou J W, Liu S W, Qin Y M, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in Southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129:516-522.
- [9] Fu J R. Effects of controlled release fertilizer in rice yield and N recovery[J]. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2001, 7(2):145-152.
- [10] 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 Fang-min, FAN Xiao-lin, LIU Fang, et al. Effect of controlled release fertilizers on nitrous oxide emission in paddy field[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(11):2170-2174.
- [11] 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 Fang-min, FAN Xiao-lin. Effect of controlled release fertilizer on methane emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2005, 11(4):408-411.
- [12] 王小明, 谢迎新, 张亚楠, 等. 新型肥料施用对玉米季土壤硝态氮累积的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5):231-236.  
WANG Xiao-ming, XIE Ying-xin, ZHANG Ya-nan, et al. Effect of new type fertilizers application on accumulation of soil nitrate nitrogen in the maize season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5):231-236.
- [13] 荆小船. 控失型复混肥的控失机理与特点[J]. *磷肥与复肥*, 2009, 24(3):57-58.  
JING Xiao-chuan. The nutrient loss-controlling mechanism and features of loss-controlled compound fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2009, 24(3):57-58.
- [14] Boeckx P, XU Xing-kai, Van Cleemput O. Mitigation of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emission from rice and wheat cropping systems using dicyandiamide and hydroquinone[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72:41-49.
- [15] ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, 15:569-579.
- [16] 闵航, 陈美慈, 钱泽澍. 水稻田的甲烷释放及其生物学机理[J]. *土壤学报*, 1993, 30(2):125-129.  
MIN Hang, CHEN Mei-ci, QIAN Ze-shu. Release of methane in paddy soil and its biological mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(2):125-129.
- [17] Jugsujinda A, Delaune R D, Lindau C W. Influence of nitrate on methane production and oxidation in flooded soil[J]. *Com Soil Sci Plant Anal*, 1995, 26:2449-2459.
- [18] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田  $\text{CH}_4$  的排放[J]. *生态学报*, 2008, 28(6):2878-2886.  
LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2878-2886.
- [19] Cai Z C, Mosier A R. Effect of  $\text{NH}_4\text{Cl}$  addition on methane oxidation by paddy soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32:1537-1545.
- [20] Gullledge J, Doyle A P, Schimel J P. Different  $\text{NH}_4^+$  inhibition patterns of soil methane consumption: A result of distinct methane oxidizer populations across sites[J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, 29:13-21.
- [21] 郑福丽, 李彬, 李晓云, 等. 脲酶抑制剂的作用机理与效应[J]. *吉林农业科学*, 2006, 31(6):25-28.  
ZHENG Fu-li, LI Bin, LI Xiao-yun, et al. Application effect and mechanism of urease inhibitor[J]. *Journal of Jilin Agriculture Science*, 2006, 31(6):25-28.
- [22] Schuster M, Conrad R. Metabolism of nitric oxide and nitrous oxide during nitrification and denitrification in soil at different incubation conditions[J]. *FEMS Microbial Ecol*, 1992, 101:133-143.
- [23] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[C]//中国土壤学会. 迈向21世纪的土壤科学:中国土壤学会第九次全国会员代表大会论文集综合卷. 1999:139-142.  
CAI Zu-cong. Research progress of methane emissions on the rice fields in China[C]//Chinese soil society. Towards soil science in the 21st century: Member of Chinese soil to the ninth national congress on comprehensive volume. 1999:139-142.
- [24] XU Xing-kai, Boeckx P, Van Cleemput O. Urease and nitrification inhibitors to reduce emissions of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in rice production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64:203-211.
- [25] 周礼凯, 徐星凯, 陈利军, 等. 氢醌和双氰胺对种稻土壤  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(2):189-192.  
ZHOU Li-kai, XU Xing-kai, CHEN Li-jun, et al. Effect of hydroquinone and dicyandiamide on  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emissions from lowland rice soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2):189-192.
- [26] Hou A, Akiyama H, Nakajima Y, et al. Effects of urea form and soil moisture on  $\text{N}_2\text{O}$  and NO emissions from Japanese Andosols[J]. *Chemosphere Global Change Science*, 2000, 2(3/4):321-327.
- [27] Akiyama H, Yan X, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for  $\text{N}_2\text{O}$  and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(6):1837-1846.
- [28] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis//Solomon S, Qin D, Manning, et al. eds. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [29] 陈冠雄, 黄国宏, 黄斌, 等. 稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放及养萍和施肥的影响[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(4):378-382.  
CHEN Guan-xiong, HUANG Guo-hong, HUANG Bin, et al.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from a rice field and effect of *Azolla* and fertilization on them[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4):378-382.