

谭雪明, 黄山, 熊超, 等. 不同栽培模式对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(12): 341-344.

# 不同栽培模式对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响

谭雪明, 黄山, 熊超, 石庆华, 潘晓华, 吴自明

(作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室/江西农业大学, 江西南昌 330045)

**摘要:**在构建不同栽培技术模式(高产抛栽模式、高产移栽模式、农户模式)的基础上, 监测了不同栽培模式下早稻产量及稻田甲烷和氧化亚氮排放的差异。结果表明: 高产抛栽模式和高产移栽模式水稻产量均显著高于农户模式, 增产幅度分别达到 16.4% 和 17.7%, 高产抛栽模式和高产移栽模式产量之间差异不显著。3 种模式甲烷排放对全球增温潜势贡献均在 90% 以上。高产抛栽模式全生育期甲烷排放显著低于高产移栽模式和农户模式, 而高产移栽模式和农户模式之间差异不显著, 全球增温潜势变化趋势与甲烷排放相同。高产抛栽模式温室气体强度最低, 农户模式最高, 高产移栽模式居中。因此, 在抛栽条件下, 配以合理的肥料运筹是同步实现水稻高产和温室气体减排的重要技术途径。

**关键词:**栽培模式; 早稻; 产量; 甲烷; 氧化亚氮

**中图分类号:** S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)12-0341-03

大气中温室气体浓度的增加是导致全球变暖的主要原因, 甲烷和氧化亚氮是大气中 2 种重要的温室气体, 对地球系统的气候变化产生重要影响<sup>[1]</sup>。甲烷和氧化亚氮单位质量的增温潜能分别是二氧化碳的 25 和 298 倍<sup>[2]</sup>, 浓度分别以每年约 1% 和 0.2% ~ 0.3% 的速度增长<sup>[3]</sup>。水稻是世界主要的粮食作物之一, 占粮食作物面积的 1/3, 生产过程中伴随着甲烷和氧化亚氮的排放, 是农业主要的温室气体排放源之一, 水稻种植在全球温室气体(尤其是甲烷和氧化亚氮)清单的编制中占重要位置<sup>[4]</sup>。稻田甲烷和氧化亚氮的排放是当前农田环境领域的研究热点之一。

目前, 国内外对稻田甲烷和氧化亚氮减排的研究多集中在耕作、施肥、水分管理、品种等方面<sup>[5-8]</sup>, 但对不同栽培模式下稻田温室气体排放差异的研究报道不多。且大部分研究主要集中在水稻大田生长期, 对秧田期的温室气体排放关注很少<sup>[9]</sup>。本试验通过集成旱床育秧、抛栽、人工移栽、优化施肥、间歇灌溉等技术, 构建高产低碳栽培技术模式, 比较与一般农户栽培模式稻田甲烷和氧化亚氮排放的差异, 以为双季稻区的低碳栽培技术研究和应用提供科学依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 材料

试验于 2011 年在江西省进贤县温圳镇杨溪村的水稻高产栽培示范区进行。土壤有机质 34.2 g/kg、全氮 2.7 g/kg、碱解氮 286.0 mg/kg、有效磷 31.4 mg/kg、速效钾

227.9 mg/kg, pH 值 4.9。供试品种为超级早稻淦鑫 203。

### 1.2 试验设计

试验设 3 种栽培模式处理: (1) 农户栽培模式: 施氮 150 kg/hm<sup>2</sup>、磷 67.5 kg/hm<sup>2</sup>、钾 105 kg/hm<sup>2</sup>, 栽插规格 19.8 cm × 19.8 cm, 每穴 2 株, 除中期(移栽后 30 d)烤田外, 其他时段保持淹水。(2) 高产抛栽模式: 施氮 180 kg/hm<sup>2</sup>、磷 105 kg/hm<sup>2</sup>、钾 180 kg/hm<sup>2</sup>, 浅水移栽, 浅水返青, 间歇灌溉。(3) 高产移栽模式: 施氮 180 kg/hm<sup>2</sup>、磷 105 kg/hm<sup>2</sup>、钾 180 kg/hm<sup>2</sup>, 栽插规格 13.3 cm × 23.3 cm, 每穴 2 株, 浅水移栽, 浅水返青, 间歇灌溉。

### 1.3 田间管理

施肥方式: 高产抛栽模式和高产移栽模式按基肥: 蘖肥: 穗肥 = 5 : 2 : 3 的比例施入, 农户栽培模式按基肥: 蘖肥: 穗肥 = 6 : 4 : 0 的比例施入, 钾肥按分蘖肥: 穗肥 = 7 : 3 施入, 磷肥作为基肥一次性施入。基肥于移栽前 1 d 施入, 分蘖肥于移栽后 7 d 施入, 穗肥于幼穗分化期(移栽后 40 d)施入, 所用氮、磷、钾肥分别为尿素、钙镁磷肥、氯化钾。试验在高产示范基地进行, 采用大田大区对比试验, 每种栽培模式面积 0.133 hm<sup>2</sup>。

农户栽培模式使用湿润育秧秧苗, 高产抛栽模式和高产移栽模式使用旱床育秧秧苗, 二者仅是灌溉水的管理方式不同。湿润育秧, 采用水整地、水做床, 湿润播种, 扎根立苗前秧田保持湿润通气以利根系生长, 扎根立苗后根据秧田缺水情况, 间歇灌水, 以湿润为主。旱床育秧即将水稻种子播种在肥沃、松软、深厚的旱地苗床上, 只保持土壤湿润, 不建立水层。备足杂交稻种子 30 kg/hm<sup>2</sup>, 同时备足 561 孔塑料秧盘 750 个/hm<sup>2</sup>。秧田施钙镁磷肥 450 kg/hm<sup>2</sup>、碳酸氢铵 225 kg/hm<sup>2</sup>、氯化钾 150 kg/hm<sup>2</sup> 作底肥, 育秧 28 d 后移栽。

### 1.4 测定项目与方法

1.4.1 稻田温室气体排放 温室气体采用静态箱-气相色谱法对样品进行测定分析。早稻育秧时, 秧田温室气体取样安排在移栽前 7、1 d, 各取 1 次样进行气体测定。大田期取样安排在水稻移栽后 7、19、26、38、47、56 d 进行, 每个田块设置

收稿日期: 2013-05-14

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(编号: 2011BAD16B04、2011BAD16B14、2012BAD14B14); 江西农业大学青年科学基金(编号: QN201102)。

作者简介: 谭雪明(1969—), 男, 江西会昌人, 高级实验师, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: txmfy@163.com。

通信作者: 吴自明, 博士, 教授, 主要从事作物生理与遗传育种研究。E-mail: wuzmjxau@163.com。

5个重复监测点。每次采样时间固定在09:00至11:00之间,同时用温度计测定采样箱内温度和土壤5 cm深度的土壤温度。采用避光密闭箱取样,气相色谱仪分析法测定稻田土壤与大气间交换的甲烷和氧化亚氮排放通量。取样箱采用组合式不锈钢取样箱,底座为塑钢材料。底座长50 cm、宽50 cm、高20 cm,底座上端有深3 cm、宽2 cm的密封水槽,采样时将顶箱或延长箱罩在底座上,用水密封。底座于移栽后埋入田中,并在整个生长期都固定在采样点上。延长箱长50 cm、宽50 cm、高50 cm,封顶箱长50 cm、宽50 cm、高50 cm,顶箱和延长箱均由不锈钢制成。延长箱内装1个12 V轴流混气扇、采样管、测温口,外覆绝热材料(海绵和铝箔纸包裹)。采样前将箱内顶部风扇打开,使箱内气体混合均匀。盖箱后分别在0、5、10、15 min采样,用50 mL注射器从箱中抽取气体,通过旋转三通阀转移到0.1 L气体采样袋,备测。

1.4.2 相关指标计算方法 气体的排放通量是指在单位时间内,单位面积上观测箱内该气体质量的变化。稻田甲烷[ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]和氧化亚氮[ $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]的排放通量分别利用下式<sup>[10]</sup>(1)和(2)求得:

$$F = 117.89 / (T + 273.2) \times H \times dc/dt \quad (1)$$

$$F = 324.1975 / (T + 273.2) \times H \times dc/dt \quad (2)$$

式中: $F$ 为排放通量[ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 或 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]; $dc/dt$ 为箱内痕量气体随时间的变化率[ $\text{mL}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 或 $\mu\text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]; $H$ 为经过水层高度调整后采样箱顶部距水面的实际高度(m); $T$ 为采样箱内的平均温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

在百年时间尺度,以 $\text{CO}_2$ 计的全球增温潜势(GWP)( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) =  $25 \times \text{CH}_4$ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) +  $298 \times \text{N}_2\text{O}$ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) (3)

温室气体排放强度(即单位水稻生产产生的全球增温潜势) =  $\text{GWP}(\text{kg}/\text{hm}^2) / \text{产量}(\text{kg}/\text{hm}^2)$  (4)

## 1.5 数据处理

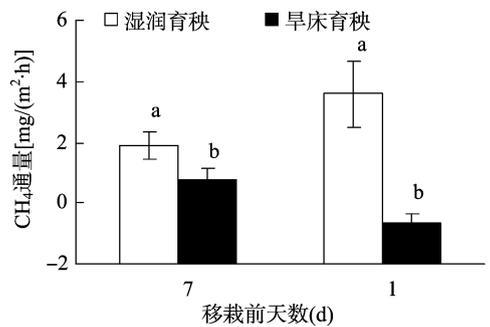
统计分析采用SPSS 11.0软件进行,采用LSD法进行多重比较,并进行统计显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同育秧方式对甲烷和氧化亚氮排放的影响

从图1可以看出,移栽前7 d,湿润育秧处理秧田甲烷的排放通量显著高于旱床育秧处理。湿润育秧处理和旱床育秧处理秧田甲烷的排放通量均为正值,说明2种育秧方式秧田与大气甲烷交换处于排放状态;移栽前1 d,湿润育秧处理秧田甲烷的排放通量显著大于旱床育秧处理。旱床育秧处理秧田甲烷的排放通量为负值,说明移栽前1 d旱床育秧处理秧田与大气甲烷交换处于吸收状态,而湿润育秧处理秧田甲烷的排放通量为正值,说明湿润育秧处理秧田与大气甲烷交换处于排放状态。

从图2可以看出,移栽前7 d,湿润育秧处理和旱床育秧处理秧田氧化亚氮的排放通量均为正值,湿润育秧处理下秧田氧化亚氮的排放通量显著小于旱床育秧处理,说明2种育秧方式下秧田与大气氧化亚氮交换处于排放状态;移栽前1 d,随着秧田断水,湿润育秧秧田氧化亚氮的排放通量增加,与旱床育秧处理排放的氧化亚氮通量差异变小,但处理间差异显著。



不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。图2同  
图1 不同育秧方式下秧田甲烷排放通量

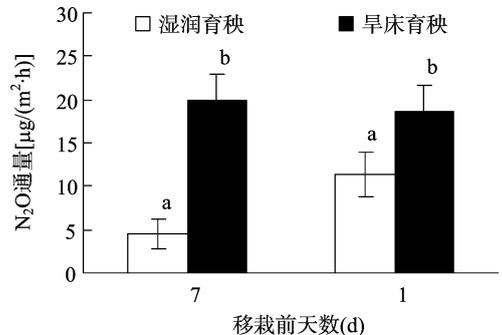


图2 不同育秧方式下秧田氧化亚氮排放通量

### 2.2 不同栽培模式对甲烷和氧化亚氮排放通量的影响

从图3可以看出,随着生育期进程推进,不同栽培模式下甲烷的排放先逐渐增加,然后迅速减小,在移栽后38 d基本不排放,部分甚至处于吸收状态。在移栽后7 d,各处理甲烷的排放通量相差不大,与大气甲烷交换处于排放状态;当稻田甲烷的排放通量达到最大值时,高产移栽模式甲烷排放通量最大,而高产抛栽模式和农户栽培模式甲烷排放通量相差不大,移栽35 d后,3种栽培模式差别不大。

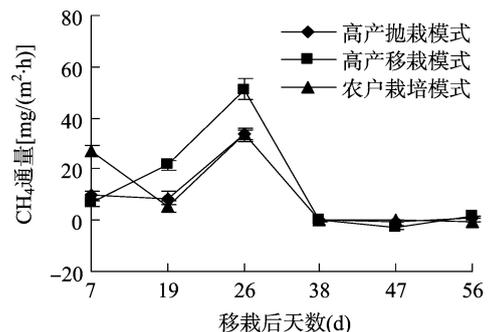


图3 不同栽培模式下秧田甲烷排放通量

从图4可以看出,随着生育期进程推进,各处理稻田氧化亚氮的排放通量先是增大,后减小再增大,最后再减小,呈现2个峰值。第一个峰值出现在移栽后19 d,农户栽培模式氧化亚氮的排放通量最大,其次是高产抛栽模式,最小的是高产移栽模式。第二个峰值出现在移栽后38 d,高产移栽模式氧化亚氮的排放通量最大,农户栽培模式和高产抛栽模式相差不大。在移栽后55 d,各处理稻田氧化亚氮的排放通量大小依次是:高产移栽模式 > 高产抛栽模式 > 农户栽培模式。

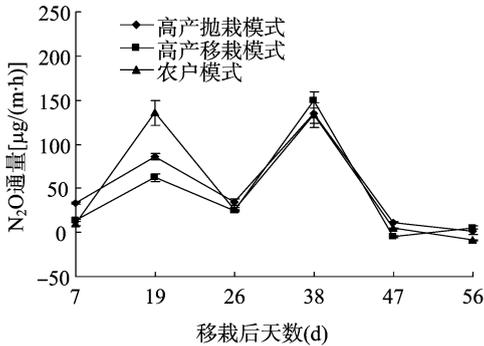


图4 不同栽培模式下秧田氧化亚氮排放通量

### 2.3 不同栽培模式下早稻产量与全生育期甲烷和氧化亚氮排放量

高产抛栽模式和高产移栽模式水稻产量均显著高于农户栽培模式,增产幅度分别达到16.4%和17.7%,而高产抛栽模式和高产移栽模式产量之间差异不显著(表1)。高产抛栽模式和高产移栽模式单位面积有效穗数显著高于农户栽培模式,而每穗粒数、结实率和千粒重3种栽培模式之间无显著差异。

表1 不同栽培模式下水稻产量及其产量结构因素

处理	有效穗 (万/hm <sup>2</sup> )	每穗粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
高产抛栽模式	420.2a	88.5a	84.3a	29.2a	9 089a
高产移栽模式	415.4a	95.9a	86.8a	28.8a	9 188a
农户栽培模式	319.2b	103.7a	89.1a	28.7a	7 806b

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

高产抛栽模式全生育期甲烷排放大幅低于高产移栽模式和农户栽培模式,而高产移栽模式和农户栽培模式之间差异不大(表2)。3种模式氧化亚氮排放差异不大。各处理全球增温潜势变化趋势与甲烷排放相似,高产移栽模式和农户栽培模式之间差异不大,二者均显著高于高产抛栽模式。高产抛栽模式温室气体排放强度最低,农户栽培模式最高,高产移栽模式居中。

表2 不同栽培模式下水稻 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量、全球增温潜势、温室气体排放强度

处理	CH <sub>4</sub> (kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O (kg/hm <sup>2</sup> )	全球增温潜势 (以 CO <sub>2</sub> 计) GWP(kg/hm <sup>2</sup> )	温室气体排放 强度(以 CO <sub>2</sub> 计) GHGI(kg/kg)
高产抛栽模式	133.2a	0.79a	3 565a	0.39a
高产移栽模式	194.7b	0.67a	5 067b	0.55b
农户栽培模式	186.2b	0.83a	4 901b	0.63b

注同表1。

### 3 讨论

土壤中甲烷的产生主要通过 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 还原和乙酸(CH<sub>3</sub>COOH)发酵而来,稻田甲烷的排放受土壤因子、温度、农田管理措施、水稻品种的综合影响<sup>[5,11]</sup>。土壤的氧化亚氮主要是由土壤微生物的硝化和反硝化过程所产生<sup>[4]</sup>。本研究湿润育秧甲烷排放通量明显大于旱床育秧,氧化亚氮排放通量小于旱床育秧,说明秧田水分管理的不同,导致温室气体

排放量的差异。因此,秧田期甲烷的减排也是降低水稻全生育期温室效应的重要途径。研究表明,水稻植株是稻田甲烷排放的主要通道<sup>[12]</sup>,施用氮肥增加稻田氧化亚氮的排放,但水分落干期间的稻田氧化亚氮排放量占水稻生长期氧化亚氮排放总量的87.5%~98.6%<sup>[13-15]</sup>。在适宜的水分条件下,水稻生长期氧化亚氮排放主要受土壤中有效氮含量的影响。施肥与随后烤田的时间间隔越短,作物对氮肥的吸收相对较少,土壤中可用来转化为氧化亚氮的氮源越多,氮素转化为氧化亚氮的比率越大<sup>[12]</sup>。本研究中,3种栽培模式的稻田甲烷排放高峰均出现在分蘖盛期,表明稻田甲烷排放受植株数量的影响,表现为随着茎蘖数的增加而增加<sup>[11]</sup>。高产移栽模式甲烷排放峰值最高,推测与其无效分蘖数最多有关<sup>[14]</sup>。是否因为高密度水稻所具有高密度的水稻通气孔,将更多的 O<sub>2</sub> 输送到根际,导致甲烷氧化的增加,有待于进一步研究。3种栽培模式氧化亚氮第一个排放高峰出现在施氮肥后,第二个排放高峰出现在烤田期间。而农户栽培模式氧化亚氮第一个高峰值高于高产抛栽与移栽方式,很可能与分蘖肥施用量过大有关。土壤中氮素转化为氧化亚氮的多少受水分条件限制,烤田期间水分落干改善了土壤的供氧状况,利于硝化反硝化过程同时进行,使氧化亚氮成为这2个反应的主要产物,这是导致3种栽培模式出现稻田氧化亚氮排放的第二个高峰。

高产抛栽模式和高产移栽模式单位面积有效穗数显著高于农户栽培模式,其他产量构成因子均无显著差异。主要是农户往往栽插过稀,导致最终产量较低,因此,适当增加密度是大幅度提高农户产量的关键<sup>[16]</sup>。同时,适当增加施肥量和优化施肥方式也是获得高产的有效措施<sup>[17]</sup>。甲烷排放是稻田全球增温潜势的主要贡献者,3种栽培模式甲烷对全球增温潜势的贡献均在90%以上。因此,稻田温室效应减排的关键在降低甲烷的排放<sup>[18-19]</sup>。高产抛栽模式水稻产量较高,全球增温潜势低,能同步实现水稻高产和温室气体减排,抛栽大幅减少了劳动力消耗,可作为低碳高产栽培推广应用。

### 4 结论

对高产抛栽模式、高产移栽模式、农户栽培模式下早稻的产量、稻田甲烷和氧化亚氮排放的同步监测表明,高产抛栽模式和高产移栽模式水稻产量均显著高于农户栽培模式。早育秧能显著降低秧田期甲烷。3种栽培模式下甲烷排放均是稻田全球增温潜势的绝对贡献者,高产抛栽模式的全球增温潜势低于高产移栽模式及农户栽培模式。从温室气体排放强度来看,高产抛栽模式最低,农户栽培模式最高,高产移栽模式居中。因此,在抛栽条件下,配以合理的肥水管理可以同步实现水稻高产和温室气体减排。稻田温室气体减排需重视秧田期间的监测及管理。

### 参考文献:

- [1] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(3):181-195.
- [2] Bhatia A, Pathak H, Jain N, et al. Global warming potential of manure amended soils under rice-wheat system in the IndoGangetic plains [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(37):6976-6984.

展漫军,李婧,徐慧,等. 菇渣应用于生物堆修复有机污染土壤的研究[J]. 江苏农业科学,2013,41(12):344-347.

# 菇渣应用于生物堆修复有机污染土壤的研究

展漫军,李婧,徐慧,张磊,杭静

(南京市环境保护科学研究院,江苏南京 210013)

**摘要:**以南京市某化工废料堆场的有机污染土壤为研究对象,以甲苯、硝基苯、萘、菲为模型污染物,应用生物堆修复技术修复有机污染土壤,研究不同工艺下生物堆对土壤有机污染物的降解效果。结果表明:加入2%菇渣作为土壤结构及理化性质改良剂,能有效改善土壤通气能力和持水能力,增加土壤有机质含量,显著提高有机污染物降解率。加入2%厩肥,增加了微生物碳源,促进微生物新陈代谢,有助于提高堆体温度和有机污染物降解率。本示范工程中,2%菇渣+主动曝气+被动曝气+自然通风的堆体运行工艺的环境效果和经济效益最佳。

**关键词:**土壤修复;生物堆;有机污染物;菇渣;厩肥

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2013)12-0344-04

近年来,随着工农业的快速发展以及城市化建设的推进,我国土壤污染问题日益严重,对人群健康构成威胁<sup>[1-2]</sup>。Sufita 等于 20 世纪 80 年代针对有机污染土壤提出了生物修复技术,即利用微生物的新陈代谢过程,直接以有机污染物作为代谢底物,或者利用共代谢途径将有机污染物降解为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 或其他无毒、低毒产物,从而实现有机污染土壤的修

复<sup>[3-4]</sup>。生物修复方法是目前最有应用前景的技术之一,限制有机污染物降解率的因素通常有土壤通气状态、pH 值以及碳、氮、磷等营养物质含量、微生物种类、种群数量和污染物与土壤的结合状态等<sup>[5-11]</sup>。一般通过生物刺激和生物强化 2 种方式来提高有机污染物降解率。生物刺激即通过一定的措施优化土壤微生态环境,主要包括提供电子受体、调节土壤含水率及 pH 值、投加适量的营养物质等;生物强化则是指向土壤中投加菌剂,以增加土壤中具有特定降解能力菌类的种群数量<sup>[12-17]</sup>。

菇渣是食用菌培养采收后废弃的培养基质,是一种农业生产的废弃物<sup>[18]</sup>。随着食用菌生产规模的扩大,菇渣的产生量也越来越大。如果不对其充分利用,将对生态环境构成很大的压力。此外,菇渣含有丰富的粗蛋白、氨基酸、菌体蛋白、

收稿日期:2013-05-12

基金项目:江苏省南京市市属公益类科研院所科学事业费专项(编号:2010305S)。

作者简介:展漫军(1970—),女,江苏南京人,博士,高级工程师,研究方向为环境保护技术咨询以及土壤、地下水修复技术研发。  
E-mail:manjunzhan2007@163.com。

[3] Vergé X C, De Kimpe C, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2/4): 255-269.

[4] 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.

[5] 任万辉,许黎,王振会. 中国稻田甲烷产生和排放研究[J]. *气象*, 2004, 30(6): 3-7.

[6] 马秀梅,朱波,杜泽林,等. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1199-1202.

[7] 唐海明,肖小平,帅细强,等. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(5): 1481-1489.

[8] 李勇先. 稻田土壤中氧化亚氮的释放机制及控制[D]. 杭州:浙江大学, 2003: 62.

[9] Liu S, Zhang L, Jiang J, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice seedling nurseries under flooding and moist irrigation regimes in Southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 426: 166-171.

[10] 秦晓波. 减缓华中典型双季稻田温室气体排放强度措施的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2011.

[11] Zou J, Huang Y, Jiang J, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China:

Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): 1-9.

[12] 白小琳,张海林,陈阜,等. 耕作措施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 282-289.

[13] 徐华,邢光喜,蔡祖聪,等. 土壤水分状况和质地对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, 37(4): 499-505.

[14] 王智平,曾江海,张玉铭. 农田土壤氧化亚氮排放的影响因素[J]. *农业环境保护*, 1994, 13(1): 40-42.

[15] 熊超. 不同栽培模式下双季稻产量形成特点与温室气体排放差异的初步研究[D]. 南昌:江西农业大学, 2012.

[16] 林洪鑫,潘晓华,石庆华,等. 施氮量与栽插密度对超级早稻中早 22 产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 22-28.

[17] 石生伟,李玉娥,万运帆,等. 不同氮、磷肥用量下双季稻田的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1899-1907.

[18] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 2196-2210.

[19] Jean L M, Pierre R. Production oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37: 25-50.