

华南丘陵地区农林复合生态系统晚稻田 甲烷和氧化亚氮排放

刘惠^{1,2}, 赵平^{1*}, 林永标¹, 饶兴权¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用静态箱-气相色谱法对晚稻田甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放进行田间原位测定。结果表明,有植株参与的稻田CH₄排放通量季节变化与地下5 cm温度呈显著正相关关系。稻田CH₄和N₂O季节平均排放通量在有植株参与时分别为1.16±0.38 mg m⁻²h⁻¹和42.33±20.00 μg m⁻²h⁻¹,而无植株参与的分别为0.15±0.11 mg m⁻²h⁻¹和51.69±15.87 μg m⁻²h⁻¹。水稻种植对CH₄的排放影响较大,对N₂O的排放影响较小,有植株参与的稻田CH₄平均排放量显著高于无植株参与的稻田,N₂O的平均排放量无显著差异。

关键词:农林复合生态系统;稻田;CH₄;N₂O

中图分类号:S181

文献标识码:A

文章编号:1005-3395(2006)04-0269-06

CH₄ and N₂O Emission from Paddy Field of an Agroforestry Ecosystem in the Hilly Area of South China

LIU Hui^{1,2}, ZHAO Ping^{1*}, LIN Yong-biao¹, RAO Xing-quan¹

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To quantify the emission of greenhouse gases methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) from paddy field of an agroforestry ecosystem in the hilly area in Guangdong, measurements were made with closed static chamber and a modified gas chromatograph (HP5890 II) *in situ*. In this paper, gas samples were taken simultaneously from plot with rice and plot without rice. The seasonal emission of CH₄ from plot with rice in the second crop season was significantly correlated to soil temperature at 5 cm depth. Rice plants played a key role in CH₄ emission from paddy field. Mean seasonal emission of CH₄ and N₂O from plot with rice in the second crop season were 1.16±0.38 mg m⁻²h⁻¹ and 42.33±20.00 μg m⁻²h⁻¹, respectively. Mean seasonal emission of CH₄ and N₂O for plot without rice in the second crop season were 0.15±0.11 mg m⁻²h⁻¹ and 51.69±15.87 μg m⁻²h⁻¹, respectively. The results showed that the average seasonal emission of CH₄ in plot with rice was significantly higher than that in plot without rice, while no difference in average seasonal emission of N₂O was found.

Key words: Agroforestry ecosystem; Paddy field; CH₄; N₂O

稻田是大气CH₄排放的主要来源地,而中国是世界上水稻生产大国之一。自1987年以来,国内陆

续开展了稻田CH₄的产生、传输及排放机制的实地观测实验。研究表明全球稻田CH₄排放总量在

收稿日期:2005-12-02 接受日期:2006-04-13

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX-SW-01-01B-05, KSCX2-SW-133);国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(B类)(30428022);国家自然科学基金面上项目(30270239);广东省自然科学基金面上项目(031265);华南植物园知识创新基金项目(2002-2110)资助

* 通讯作者 Corresponding author

35–56 Tg a⁻¹ 之间, 中国稻田的 CH₄ 排放量为 9.67–12.66 Tg a⁻¹, 约占大气 CH₄ 总来源的 10%–20%^[2]。许多研究表明, 在水分落干期及烤田期, 稻田也会向大气排放大量的 N₂O^[3]。对稻田温室气体 CH₄ 和 N₂O 的排放规律与环境因素的影响研究较多, 但对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量的田间原位观测较少^[4,5]。而全面了解 CH₄ 和 N₂O 排放规律是实现稻田温室气体减排的前提和客观要求。本研究采用静态箱-气相色谱法对典型华南农林复合区稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量进行原位测定, 旨在了解典型华南农林复合区稻田中 CH₄ 和 N₂O 排放规律以及温度对其排放的影响, 这对分析温室气体的源汇分布规律和制定减排措施有重要意义。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

本研究的水稻田属中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站农林复合系统的一部分。鹤山站位于广东省中部的鹤山市, 东经 112°54', 北纬 22°41', 距广州市以南 80 km。试验站所在地属南亚热带粤中丘陵地区, 土壤为赤红壤(砖红壤性红壤)。属南亚热带季风常绿阔叶林气候, 年均温 21.7℃, 7 月均温 28.7℃, 极端最高温 37.5℃, 1 月均温 13.1℃, 极端最低温 0℃。年平均太阳辐射为 435.1 kJ cm², 年平均 ≥10℃ 的有效积温为 7597.2℃。年均降雨量 1 700 mm, 4–9 月为雨季。年蒸发量 1 600 mm。

1.2 试验设计

试验于 2003 年在站区内农林复合生态系统稻田中进行。供试水稻为当地常规稻种包华(*Oryza sativa* L.)。前茬为早稻, 常规耕作。晚稻于 2003 年 8 月 2 日移栽, 2003 年 11 月 8 日收割。为比较有、无水稻植株参与的稻田 CH₄ 和 N₂O 排放情况, 将试验区划为两个小区, 每区大小为 8 m×6 m。一小区无水稻植株, 另一小区正常种植水稻。所有地块的耕作、留茬及其他田间管理措施均完全相同。每小区各设置 3 个重复采样箱, 采样箱面积 50 cm×50 cm, 高度设计为 50 cm 和 100 cm 两种规格, 于水稻栽插前埋设采样箱底座, 底座四壁用不锈钢制成, 埋入土中 5 cm, 以阻止小区外的水稻根系进入采样箱内。按常规施肥。2003 年 8 月 1 日施碳铵和复合肥(N:P₂O₅:K₂O=8:8:9)各 750 kg hm⁻²; 8 月 26 日施尿素 75 kg hm⁻²。9 月 17 日施尿素 75 kg hm⁻²。按

当地常规田间水分管理。前期淹水, 分蘖后烤田, 9 月 5 日至 15 日为烤田期, 孕穗前回水后干湿交替, 收获前一周排水。

1.3 采样和分析方法

采样时间选择在上午 9 点到 11 点。实验测定参照 Wang 等的方法^[6]。温室气体通量利用静态箱式方法测定, 采样箱用不锈钢制成, 箱体外包一层优质棉保温被, 以防止在太阳辐射下采样箱壁温度升高影响观测结果。观测时将采样箱放入已插入土壤 5 cm 深处的不锈钢底座外缘四周的凹槽中(内径 2 cm), 并用蒸馏水密封, 采气时盖住箱盖, 箱盖装有空气搅拌小风扇、温度计和采气三通阀。水稻移栽后每周采集气样 2 次, 上午 9:00–11:00 同时从两小区采集, 重复间采用 3 箱体平行采样, 采样时间分别为关箱后的 0、10、20、30 min, 每次抽取 100 ml 气体样品带回实验室, 24 h 内用改装后的 HP5890II 型气相色谱分析同一气样中 CH₄ 和 N₂O 的浓度。N₂O 检测器为 ECD(电子捕获检测器), 分离柱内填充料为 80–100 目 PorpakQ, 载气为高纯 N₂, 流量为 30 ml min⁻¹, 检测器温度为 330℃, 分离柱温度为 55℃。CH₄ 检测器为 FID(氢焰离子化检测器), 载气为高纯 N₂, H₂ 为燃气, 空气为助燃气, 流速分别为 30 ml min⁻¹、30 ml min⁻¹、400 ml min⁻¹。检测器温度为 200℃, 分离柱温度为 55℃。气体排放速率由 4 个气样浓度值经线性回归分析得出。

1.4 通量的计算

气体排放通量即单位时间内单位面积土壤表面气体质量的变化计算公式如下:

$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta C}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot h \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中, F 为气体通量(mg m⁻²h⁻¹), ρ 为试验温度下的气体密度, Δm 和 ΔC 分别是 Δt 时间内采集箱中变化的气体质量和混合比浓度, h、A、V 分别为箱高、底面积和体积。气体通量(F)为负值时表示被观测系统从大气中吸收该气体, 正值表示被观测系统向大气排放该气体。

1.5 温度的测定

在每次采样的同时, 对于各箱的气温、地表温度、地下 5 cm 的土壤温度用 JM624 型便携式数字温度计测量, 温度计的测量范围: -30–50℃, 测量准确度为 0.5℃, 读数分辨率为 0.1℃。

2 结果和分析

2.1 稻田 CH₄ 排放的季节变化

晚稻由于前期气温高以及早稻残留物的存在,在移栽后 16 d 左右出现排放最高峰,分蘖期以后下降,从孕穗期到成熟期都很低(图 1),这与以前的研究结果较接近^[3,5,7]。稻田 CH₄ 排放是稻田土壤中 CH₄ 产生、氧化和传输不同过程的净效应,水稻植株强烈影响稻田 CH₄ 的产生、氧化和传输过程,是导致稻田 CH₄ 排放季节性变化规律的一个重要因素。稻田 CH₄ 通过 3 种途径向大气传输:冒泡的方式、稻田淹水层的扩散作用、水稻植物通气组织的传输作用^[9],其中植株对 CH₄ 的传输是稻田 CH₄ 排放的主要途径,整个水稻生长期,通过植株排放的 CH₄ 大约占 CH₄ 总排放量的 90%^[9]。田间观测实验表明,稻田 CH₄ 排放的季节变化规律常常和水稻植株的生长过程密切相关^[10]。Neue 等^[11]的研究结果表明,通常情况下,水稻植株的干生物量以及产量和植株根系分泌物中有机碳含量、稻田土壤产 CH₄ 潜力与稻田 CH₄ 排放通量都呈正相关。随着植株的生长,根系分泌物和脱落物逐渐增加,稻田产 CH₄ 能力不断提高,从而导致高 CH₄ 排放通量。本实验中成熟期尽管有较多的根脱落物和腐败物进入土壤,但由于此时气温较低,稻田也因排水使土壤逐渐干涸,破坏了淹水厌氧环境,即使有较多的 CH₄ 产生也被再氧化而不能排放出来,因此 CH₄ 排放量很小。晚稻移栽后的前几天,由于水稻尚未成活,输送路径不畅,因此尽管气温高,土壤有机养充足,CH₄ 排放量却很低,这充分说明了水稻植株对稻田 CH₄ 排放的重要性。Yang 等^[7]认为晚稻在移植和分蘖期 CH₄ 排放量较高是由于高温和土壤低氧化还原电位的缘故,开花期和成熟期低是由于低温和土壤高氧化还原电位的缘故。但影响 CH₄ 排放的因素很复杂。CH₄ 排放受温度、有机物含量、pH、湿度、土壤的氧化还原电位等多种因素的影响^[12-14]。

无植株参与稻田的 CH₄ 排放季节变化与有植株参与的有所不同(图 1)。移栽后(前期)比较低,这是由于缺少有机残留物的缘故。有植株参与的 CH₄ 排放,在烤田初期有所增加。晚稻无植株参与的稻田 CH₄ 排放峰出现在烤田初期。这是由于烤田能促进土壤闭蓄态 CH₄ 的排放^[15]。烤田后排放量很低。烤田时土壤微孔被空气充满,一方面增加了

CH₄ 由土壤向大气传输的速率,另一方面,土壤微孔中的空气能导致土壤 CH₄ 的氧化,所以这时土壤 CH₄ 排放通量取决于 CH₄ 由土壤向大气传输速率的大幅度增加和土壤氧化量的增加哪一个占主导地位。徐华等^[15]观察结果表明土壤中产生和闭蓄 CH₄ 相当一部分在由土壤向大气的传输过程中避免了土壤的氧化。Denier 等^[16]观察菲律宾稻田烤田时 CH₄ 的排放通量,同时测量了烤田前土壤闭蓄的 CH₄ 总量,发现 64% 的土壤闭蓄态 CH₄ 在烤田期间避免了土壤氧化而排向大气。烤田后重新复水,即使土壤温度较高,CH₄ 排放通量仍然很小,短时间内不能恢复。这与土壤活性铁含量高有关。排水晒田后,大量的低价铁被氧化成高价铁,重新灌水后的干湿交替使土壤氧化还原电位(Eh)很难降低至产生 CH₄ 所需的还原环境,而影响有机物的厌氧分解,使乙酸、CH₄ 的产生受到抑制^[17]。

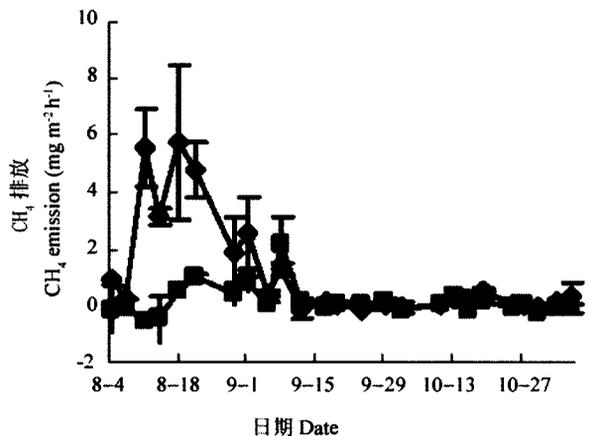


图 1 稻田 CH₄ 排放的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of CH₄ emission in paddy field

◆有植株参与 Field with rice; ■无植株参与 Field without rice

2.2 稻田 N₂O 排放的季节变化

有、无植株参与稻田的 N₂O 排放通量的季节变化趋势基本一致(图 2)。在施用尿素以后, N₂O 排放有所增加。Suratno 等^[18]的研究表明施用尿素的稻田 N₂O 排放量比不施尿素的要高。土壤水分状况对稻田 N₂O 季节排放影响较大,淹水期几乎检测不到 N₂O 的排放,烤田期间随着稻田水分的排干, N₂O 排放通量增大。黄树辉等对烤田期 N₂O 排放的观察结果也表明,在水稻分蘖期间烤田, N₂O 有一个排放高峰,在排放高峰后,即使继续烤田, N₂O 的排放

值也将降低,土壤中的硝态氮含量与 N_2O 排放通量之间呈显著正线性关系,土壤铵态氮含量与 N_2O 排放通量之间呈显著负线性关系^[19]。稻田排放的 N_2O 主要来源于硝化和反硝化土壤微生物产生过程,前者是好氧过程,后者是厌氧过程。只有当 O_2 供应部分地受到限制时,才促进硝化过程形成 N_2O ,同样,只有存在适量的 O_2 分压时,才能促进反硝化产生 N_2O ,而较严格的厌氧环境则会使反硝化作用的中间产物 N_2O 被进一步还原成 N ,从而抑制 N_2O 排放,这就是淹水时几乎检测不到 N_2O 排放通量,有时甚至观测到负通量的原因。排水晒田时,较适宜的土壤湿度同时适宜硝化和反硝化过程产生 N_2O 的 O_2 供给状况,因而引起显著的 N_2O 排放^[20]。Yan 等^[21]认为稻田水分管理决定着 N_2O 排放路径,淹水期以水稻植株排放为主,而落干期主要通过土壤表面排放。郑循华等^[22]认为,在旱地阶段,温度是影响 N_2O 排放季节变化的关键因子,而在水田阶段则不然。由于产生 N_2O 的硝化过程和反硝化过程均受土壤水分的影响,故当土壤含水量既能促进硝化作用又能促进反硝化作用时,会导致最多的 N_2O 生成与排放。试验表明,当土壤水分含量为饱和和持水量的 45%–75% 时,硝化细菌和反硝化细菌都可能成为 N_2O 的主要制造者^[23]。当土壤含水量大于阈值 60% 时,反硝化作用与土壤含水量呈明显的线性关系^[24]。

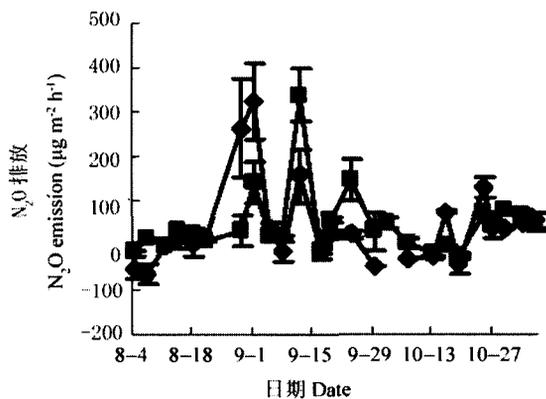


图 2 稻田 N_2O 排放的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of N_2O emission in paddy field

◆有植株参与 Field with rice; ■无植株参与 Field without rice

2.3 温度对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

很多实验表明温度对 CH_4 的产生有明显影响^[25,26]。稻田温度的季节变化见图 3。分析稻田 CH_4 排放与气温、地表温度和 5 cm 温度的关系,表明仅

在有植株参与的稻田 CH_4 排放与地下 5 cm 温度呈显著正相关关系 ($R=0.43, P<0.05$)。Yang 等的室内实验结果表明,在 15–37°C 之间 CH_4 的产生率与温度呈正线性关系,在 37–50°C 之间呈负线性关系^[27]。高温促进有机物的降解,从而提高了 CH_4 的产生与排放。徐华等^[28,29]认为,种稻土壤中产 CH_4 细菌的活性、土壤有机质分解速率及土壤 CH_4 产生和向大气传输速率皆随土壤温度的升高而增加,稻田 CH_4 排放的昼夜变化与土壤温度昼夜变化之间存在显著正相关;然而,从整个水稻生长季节的角度来看,土壤温度与稻田 CH_4 排放通量之间并没有显著的相关性。其他许多研究者也得出了类似的结果^[10]。土壤温度对稻田 CH_4 排放的作用并不是孤立的,它和其他许多环境因子发生复杂的交互作用^[30,31]。稻田 CH_4 排放通量与土壤温度的显著正相关关系一般出现在水稻生长季节土壤温度变幅较大的持续淹水条件下,且有机质供应比较充足^[7,8]。因此,在大的时间尺度上(如整个水稻生长季节)可能就无法得出土壤温度和稻田 CH_4 排放的显著相关性规律。

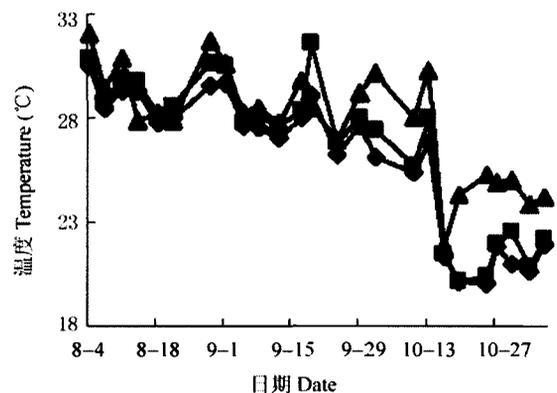


图 3 稻田温度的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of temperatures in paddy field

◆地下 5 cm 土壤温度 Soil temperature at a depth of 5 cm;
■地表温度 Soil surface temperature; ▲气温 Air temperature

分析稻田 N_2O 排放与气温、地表温度和 5 cm 温度的关系,皆无明显相关关系。土壤水分状况是稻田 N_2O 季节排放的主要驱动因子,在土壤淹水条件下除施用化学肥料外,几乎无 N_2O 的排放。郑循华等^[26]对华东太湖地区水稻田的观测结果表明,水稻生长期,即使在适宜的温度下, N_2O 排放的季节变化与温度的关系不明显,影响 N_2O 排放的关键因素是土壤湿度或养分状况,而不是温度,只有在

田间停止灌水的水稻生长后期,当气温明显下降到10℃左右或5 cm土壤温度降到15℃左右时,N₂O才明显地受日平均温度变化的影响。在本实验中,温度都在20℃以上,影响N₂O排放的主要因素不是温度,而可能是土壤水分及养分,这还有待于进一步研究。

2.4 水稻作物对稻田CH₄和N₂O排放的影响

对晚稻生长季节温室气体排放平均值作了比较。从表1可以看出,有植株参与的稻田CH₄排放平均排放量显著高于无植株参与的,而N₂O的排放量无显著差异,这表明就整个生长季节来说,水稻植株的参与对稻田N₂O的排放通量无显著影响。这与邹建文等^[9]的研究相反,他们对南京水稻田的研究表明有植株参与稻田N₂O的排放量比无植株参与的增加37%。在整个生长季节中,有植株参与稻田CH₄季节平均排放量比无植株参与稻田增加了773%。植株对稻田CH₄的传输具有十分重要的意义,水稻植株的参与增加了CH₄的排放,是由于水稻植株能强烈影响稻田CH₄的产生、氧化和传输过程^[32],在未扰动的稻田中,有90%的CH₄是通过水稻植株的通气组织释放的^[11]。而对稻麦轮作系统的研究表明,水稻植株本身的N₂O排放量仅为土壤和植株总排放量的1%~3%^[33],然而,水稻植株对N₂O排放影响的研究尚少,有关机理仍需进一步研究。

表1 稻田CH₄和N₂O的季节平均排放通量

Table 1 Average seasonal emission of CH₄ and N₂O in paddy field

| 稻田 Field | CH ₄ (mg m ⁻² h ⁻¹) | N ₂ O (μg m ⁻² h ⁻¹) |
|-----------------|--|---|
| 有植株With rice | 1.16±0.38* | 42.33±20.00 |
| 无植株Without rice | 0.15±0.11* | 51.69±15.87 |

* P<0.05

2.5 农林复合区水稻田与其它稻田温室气体排放的比较

水稻田中CH₄和N₂O排放通量均受诸多因素的影响,不同时间和地点的测定通量值存在很大的差异。在相似的管理措施下进行比较,有植株的稻田晚稻生长季节N₂O平均排放量(42.33.80±20.00 μg m⁻²h⁻¹)略高出卢维盛等^[17]的结果(11.69 μg m⁻²h⁻¹),比扬军等^[34]的测定结果要低(226.2 μg m⁻²h⁻¹),也低于邹建文等^[9]的结果(231.48±35.09 μg m⁻²h⁻¹)。无植株参与的稻田N₂O平均排

量(51.69±15.87 μg m⁻²h⁻¹)也低于邹建文等^[9]的结果(169.57±75.30 μg m⁻²h⁻¹)。

有植株参与的稻田晚稻CH₄季节平均排放量(1.16±0.38 mg m⁻²h⁻¹)比卢维盛等^[17]的结果低(2.84 mg m⁻²h⁻¹),也低于扬军等^[34]的测定结果(7.8 mg m⁻²h⁻¹),而与邹建文等结果接近(1.39±0.20 mg m⁻²h⁻¹);无植株参与的稻田CH₄季节平均排放量(0.15±0.11 mg m⁻²h⁻¹)低于邹建文等^[9]的结果(0.63±0.29 mg m⁻²h⁻¹)。从这些比较可以看出,丘陵地区农林复合系统水稻田温室气体的排放量比一般农田区水稻田的排放量要低,这可能与水稻品种有关^[32]。沈壬兴等^[2]认为广州地区稻田CH₄排放比全国其他地区要低,并认为耕作制度和施用少量甚至不施有机肥是造成广州地区CH₄排放量低的原因。本研究对农林复合区稻田温室气体排放的初步研究表明,其温室气体排放量比普通农田要低,但其减少机理有待进一步探讨。

3 结论

稻田温室气体CH₄排放的季节变化比较明显。有植株参与的稻田CH₄排放与地下5 cm温度呈显著正相关关系。地下5 cm温度是影响有植株参与的稻田CH₄排放的重要因素。水稻作物对CH₄的排放影响较大。就晚稻整个生长季节而言,有植株参与的稻田CH₄平均排放量显著高于无植株参与的,前者比后者增加了773%,而N₂O的平均排放量无显著差异。

参考文献

- [1] Wang M X(王明星), Li J(李晶), Zheng X H(郑循华). Methane emission and mechanisms of methane production oxidation, transportation in the rice fields [J]. *Sci Atm Sin(大气科学)*, 1998, 22(4):600-612.(in Chinese)
- [2] Sheng R X(沈壬兴), Shangguang X J(上官行健), Wang M X(王明星), et al. Methane emission from rice fields in Guangzhou region and the spatial variation of methane emission in China [J]. *Adv Earth Sci(地球科学进展)*, 1995, 10(4):387-392. (in Chinese)
- [3] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management [J]. *Plant Soil*, 1997, 196(1):7-14.
- [4] Khaiil M A K, Rasmussen R A, Wang M Y, et al. Emissions of trace gases from Chinese rice fields and biogas generators: CH₄, N₂O, CO, CO₂, chlorocarbons and hidrocarbons [J]. *Chemosphere*, 1990, 20:207-226.
- [5] Zou J W(邹建文), Huang Y(黄耀), Zong L G(宗良纲), et al. A

- field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors [J]. *Acta Sci Circum*(环境科学学报), 2003, 23(6): 758-764.(in Chinese)
- [6] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Adv Atm Sci*, 2003, 20(5):842-844.
- [7] Yang S S, Chang H L. Diurnal variation of methane emission from paddy fields at different growth stages of rice cultivation in Taiwan [J]. *Agri Ecosyst Environ*, 1999, 76:75-84
- [8] Nouchil. Mechanisms of methane transport through rice plants [A]. In: Minami K, Mosier A, Sass R. CH₄ and N₂O: Global Emissions and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources[M]. Tokyo, Japan: Yokendo Publishers, 1994. 87-104.
- [9] Minami K, Neue H U. Rice paddies as a methane source [J]. *Clim Chang*, 1994, 27:13-26.
- [10] Sass R L, Fisher F M. Methane emission from rice paddies: a process study summary [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 1997, 48: 119-127.
- [11] Neue H U, Lantin R S, Wassmann R, et al. Methane emission from rice soils of the Philippines [A]. In: Minami K, Mosier A, Sass R. CH₄ and N₂O: Global Emissions and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources, NIAES Series 2 [C]. Tokyo: Yokendo Publishers, 1994. 55-77.
- [12] Sass R L, Fisher F M, Tuner F T, et al. Methane emission from rice fields as influence by solar radiation, temperature and straw incorporation [J]. *Glob Biogeochem Cycl*, 1991, 5:335-350.
- [13] Moore T R, Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emission from laboratory columns of peatland soils [J]. *J Soil Sci*, 1993, 44: 651-664.
- [14] Yang S S, Lin C C, Chang E H, et al. Effect of fertilizer, soil type, growth season on methane production and emission in the paddy soils of Taiwan [J]. *J Biom Energy Soc China*, 1994, 13:68-87.
- [15] Xu H(徐华), Cai Z C(蔡祖聪), Li X P(李小平). Effect of soil drying on CH₄ flux from rice paddy soil [J]. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2000, 37(1):69-76. (in Chinese).
- [16] Denier van der Gon H A C, Van Breemen N, Neue H U, et al. Release of entrapped methane from wetland rice fields upon soil drying [J]. *Glob Biogeochem Cycl*, 1996, 10:1-9.
- [17] Lu W S(卢维盛), Zhang J G(张建国), Liao Z W(廖宗文). CH₄ and N₂O fluxes from late-rice fields in Guangzhou region and their affecting factors [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1997, 8(3):275-278.(in Chinese)
- [18] Suratnoa W, Murdiyarsob D, Suratmoc F G, et al. Nitrous oxide flux from irrigated rice fields in West Java [J]. *Environ Pollu*, 1998, 102(S1):159-166
- [19] Huang S H(黄树辉), Lu J(吕军), Zeng G H(曾光辉). Nitrous oxide emissions and impact factors in paddy soil drying [J]. *Acta Sci Circum* (环境科学学报), 2004, 24(6):1084-1090. (in Chinese)
- [20] Zheng X H(郑循华), Wang M X(王明星), Wang Y S(王跃思), et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in Southeast China [J]. *Sci Atm Sin* (大气科学), 1997, 21(2):321-237. (in Chinese)
- [21] Yan X, Shi S, Du L, et al. Pathways of N₂O emission from rice paddy soil [J]. *Soil Bio Biochem*, 2000, 32(3):437-440.
- [22] Zheng X H(郑循华), Wang M X(王明星), Wang Y S(王跃思), et al. Temperature effect on N₂O produce and emission from agricultural field [J]. *Environ Sci*(环境科学), 1997, 18(5):1-5.(in Chinese)
- [23] Feng K(封克), Yin S X(殷士学). Soil factors affecting the production and emission of nitrous oxide [J]. *Prog Soil Sci*(土壤学进展), 1995, 23(6):35-41.(in Chinese)
- [24] Daniel R S, Ali M S, Gregory W M. Effect of soil water content on denitrification during cover crop decomposition [J]. *Soil Sci*, 2000, 165(4):365-371.
- [25] Priemer A, Christensen S. Seasonal and spatial variation of methane emission oxidation in a Danish Spruce forest [J]. *Soil Bio Biochem*, 1997, 29:1165-1172.
- [26] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, et al. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates [J]. *Plant Soil*, 1998, 203:227-237.
- [27] Yang S S, Chang H L. Effect of environmental conditions on methane production and emission of paddy soil [J]. *Agri Ecosyst Environ*, 1998, 69:69-80.
- [28] Xu H(徐华), Cai Z C(蔡祖聪), Li X P(李小平). Effect of soil Eh and temperature on seasonal variation of CH₄ emission from rice field [J]. *Agro-environ Protect* (农业环境保护), 1999, 18(4): 145-149. (in Chinese)
- [29] Xu H(徐华), Cai Z C(蔡祖聪), Li X P(李小平), et al. Effect of land management in winter crop season on seasonal variations of CH₄ emissions from rice paddy soils [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2000, 11(2):215-218. (in Chinese)
- [30] Cai Z C, Xing G X, Shen G Y, et al. Measurements of CH₄ and N₂O emissions from rice field in Fengqiu, China [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1999, 45(1):1-13.
- [31] Huang Y, Jiang J Y, Sass R L, et al. Comparison of field measurements of CH₄ emission from rice cultivation in Nanjing, China and in Texas, USA [J]. *Adv Atm Sci*, 2001, 18(6):1121-1130.
- [32] Jia Z J(贾仲君), Cai Z C(蔡祖聪). Effects of rice plants on methane emission from paddy fields [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2003, 14:2049-2053.(in Chinese)
- [33] Zheng X H(郑循华), Wang M X(王明星), Wang Y S(王跃思), et al. Impact of soil humidity on N₂O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1996, 7(3):273-279. (in Chinese)
- [34] Yang J(杨军), He L P(贺丽萍), Yang C(杨崇), et al. CH₄ and N₂O fluxes from late-rice fields in Guangzhou region [J]. *J South China Agri Univ* (华南农业大学学报), 1997, 18(3):62-66. (in Chinese)