

冬季秸秆还田和土地管理对水稻生长期 CH₄ 排放的影响

张广斌^{1,2}, 马二登^{1,2}, 张晓艳^{1,2}, 马 静¹, 徐 华¹, 蔡祖聪¹

(1.中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:利用田间试验研究了冬季3种土地管理方式下(种麦、休闲和淹水)秸秆施用(4 800 kg·hm⁻²和0)对后续稻季CH₄排放的影响。结果表明,休闲混施和休闲不施处理CH₄平均排放通量显著高于种麦混施和种麦不施处理($P<0.05$),但显著低于淹水混施和淹水不施处理($P<0.05$);淹水混施处理CH₄平均排放通量显著高于淹水不施处理($P<0.05$),而休闲混施和休闲不施处理、种麦混施和种麦不施处理间无显著差异($P>0.05$)。水稻生长期CH₄排放通量与5、10 cm处土温呈极显著正相关($P<0.01$),而与土壤 E_h 无显著相关性($P>0.05$)。改冬季淹水和休闲稻田为种植小麦或在水稻移栽前对休闲稻田实施除草措施能显著减少稻田CH₄排放量,是一种既增加农作物产量又能达到减少温室气体CH₄排放的农业措施,具有很大的应用推广价值。

关键词:CH₄排放通量;秸秆还田;土地管理;土壤温度;农业措施

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2501-05

Effects of Rice Straw Incorporation and Land Management in Winter on Methane Emission During Rice-growing Season

ZHANG Guang-bin^{1,2}, MA Er-deng^{1,2}, ZHANG Xiao-yan^{1,2}, MA Jing¹, XU Hua¹, CAI Zu-cong¹

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study effects of two rice straw incorporation (Treatment S) (4 800 kg·hm⁻² and 0) and land management [planting wheat (P), fallow (f), and flooding (F)] in winter on CH₄ emission during the following rice-growing season. Results show that the mean CH₄ fluxes in Treatments f+S and f were significantly higher than in Treatments P+S and P ($P<0.05$), but significantly lower than in Treatments F+S and F ($P<0.05$). The mean CH₄ flux in Treatment F+S was significantly higher than in Treatment F ($P<0.05$), while no significant difference was observed between Treatments f+S and f, and between Treatments P+S and P ($P>0.05$). During the rice-growing season, significantly positive correlation was observed between CH₄ flux and soil temperature at 5 and 10 cm at depth ($P<0.01$), whereas little was observed between CH₄ flux and soil E_h ($P>0.05$). Planting wheat, instead of leaving the paddy fields flooded or in fallow in winter or weeding the fallow fields before transplanting rice significantly decreased CH₄ emission, which may be cited as valuable approach worth extending to increasing crop yield as well as decreasing CH₄ emission.

Keywords: CH₄ flux; rice straw incorporation; land management; soil temperature; agricultural practice

IPCC第四次评估报告指出,全球气候变暖已是不争事实,其主要原因是大气温室气体浓度的增加^[1]。CH₄是大气中仅次于CO₂的最重要温室气体,它对全球温室效应的贡献为18%,以100年影响尺度计,单位质量CH₄的增温效应是CO₂的25倍^[2]。稻田是大气

CH₄的重要排放源,其CH₄排放量为31~112 Tg·a⁻¹,占全球CH₄排放总量的5%~19%^[3]。由于稻田CH₄排放存在很大的时空变异,有关区域及全球稻田CH₄排放总量的估算存在很大的不确定性^[4-5],因此,正确评估并设法减少稻田CH₄排放量是摆在农业环境科学家面前的一大难题。

以往研究^[6-9]结果表明,冬季持续淹水稻田水稻生长期CH₄排放通量显著高于休闲和种麦稻田,并在冬季有很高的CH₄排放^[10],基于冬季持续淹水稻田观测的CH₄排放结果估算我国稻田CH₄排放总量是以往过高估计的主要原因之一^[11]。秸秆还田是我国秸秆资

收稿日期:2009-08-10

基金项目:科技部国际科技合作项目(2008DFA21330);中国科学院知识创新重大项目(KSCX1-YW-09-08);中国科学院院长奖专项资金

作者简介:张广斌(1983—),男,湖南邵阳人,博士研究生,主要从事农田温室气体排放规律及其机理研究。E-mail:gbzhang@issas.ac.cn

通讯作者:徐 华 E-mail:hxu@issas.ac.cn

源综合利用、促进农田生态系统良性循环的一种主要方式。有研究^[12]认为稻田施用堆肥,或在稻麦轮作地区提倡麦季秸秆还田是既能增加土壤有机质含量又可减少稻田 CH₄ 排放量的有效措施,那么麦季不同土地管理方式下秸秆还田对后续稻季 CH₄ 排放的影响又是如何?笔者在江苏省句容市白兔镇实施田间试验,参照当地常规土地管理方式冬季稻田种植小麦和休闲,并对比设置淹水处理以研究冬季稻田种麦、休闲和淹水对后续稻季 CH₄ 排放的影响,旨在探索切实可行的温室气体 CH₄ 农田减排措施。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验小区位于江苏省句容市白兔镇(31°58'N, 119°18'E)。该地位于环太湖地区典型稻麦轮作区,属北亚热带季风气候。年平均气温为 15.1℃,年平均降水量为 1 018.6 mm。土壤为发育于下蜀黄土的爽水性水稻土,有机质含量为 11.2 g·kg⁻¹,全氮含量为 1.0 g·kg⁻¹,pH 为 6.9。

1.2 试验设计

试验共设计 6 个处理(表 1),各处理重复 3 次,随机区组分布。种麦小区冬季(2007 年 11 月 19 日至 2008 年 6 月 20 日)种植小麦,品种为镇麦 5 号,于 2007 年 11 月 21 号播种,2008 年 5 月 31 号收割。小麦播种前 1 d,按 4 800 kg·hm⁻² 计,将长约 10 cm 的稻秆(C/N 为 36)与稻田表层(0~15 cm)土壤均匀混合。淹水小区冬季淹水闲置;休闲小区冬季自然排水闲置。

表 1 试验设计

Table 1 Designing of the experiment

处理	冬季土地利用	冬季水分管理	稻秆施用/kg·hm ⁻²
种麦不施	种麦	自然排水	0
种麦混施	种麦	自然排水	4 800
休闲不施	休闲	自然排水	0
休闲混施	休闲	自然排水	4 800
淹水不施	休闲	持续淹水	0
淹水混施	休闲	持续淹水	4 800

稻季各试验小区施行持续淹水管理,于 2008 年 6 月 21 日淹水,10 月 8 日排水落干,期间稻田持续淹水。水稻品种为华粳 3 号,5 月 16 日播种育秧,6 月 22 日移栽,11 月 2 日收割。各试验小区施用尿素为 300 kg N·hm⁻²,按基肥:分蘖肥:穗肥为 2:1:1 施用,磷钾肥分别为 450 kg·hm⁻² 的过磷酸钙和 225 kg·hm⁻² 的氯化钾,作为基肥一次性施入。基肥、分蘖肥、穗肥

分别于 6 月 22 日、7 月 8 日、8 月 22 日施用。

1.3 样品采集与分析

CH₄ 气体样品用静态箱采集。静态箱由透明有机玻璃制成,底面积为 0.25 m²(0.5 m×0.5 m),箱高分别为 50 cm 和 100 cm,随水稻高度增加而选择不同高度采样箱。水稻生长期每隔 4~7 d 采样 1 次,采样时间为上午 8:00—12:00。采样时将静态箱罩在事先埋入田间的约 15 cm 深的塑料底座上,密封后用两通针将气体导入 18 mL 预先抽真空的玻璃瓶中,每 15 min 采样 1 次,共采 4 次。采样结束后移走采样箱。样品 CH₄ 浓度用带有氢离子火焰检测器的气相色谱(岛津 GC-12A)分析。根据瓶内 CH₄ 浓度与时间的关系曲线计算稻田 CH₄ 排放通量。

采集气样的同时,用氧化还原电位计(ToaPRN-41, Hirose Rika Co. Ltd., Japan)测定 10 cm 深处土壤氧化还原电位(*Eh*),用数字温度计(Model 2455, Yokogawa, Japan)记录箱温及 5、10 cm 深处土温。

2 结果

2.1 CH₄ 排放通量

水稻全生育期内各处理 CH₄ 排放通量呈现很明显的季节变化(图 1)。种麦不施和种麦混施处理水稻生长初期 CH₄ 排放通量较小,然后逐渐增大,水稻移栽后 35 d 出现最大排放值,分别为 7.6 和 13.4 mg CH₄·m⁻²·h⁻¹,移栽后 46 d 均出现第二排放峰,随后逐渐减小直到水稻收获(图 1),其水稻生长期 CH₄ 平均排放通量分别为 3.2 和 4.5 mg CH₄·m⁻²·h⁻¹(表 2)。休闲不施和休闲混施处理水稻移栽后不久 CH₄ 排放通量便迅速上升,并在移栽后 14 d 和 19 d 达到最大,分别为 26.8 和 31.7 mg CH₄·m⁻²·h⁻¹,移栽后 35 d 出现第二排放峰,随后逐渐下降直到水稻收获(图 1),其 CH₄ 季节平均排放通量分别为 9.7 和 10.8 mg CH₄·m⁻²·h⁻¹(表 2)。淹水不施和淹水混施处理在水稻生长初期即

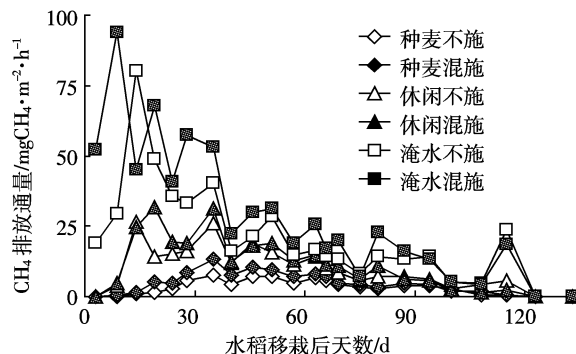


图 1 CH₄ 排放通量的季节变化

Figure 1 Seasonal variation of CH₄ flux

有大量 CH_4 排放,在水稻移栽后 14 d 和 9 d 就出现最大排放峰,分别为 80.3 和 $93.8 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,随后逐渐降低。水稻全生育期内淹水不施和淹水混施处理 CH_4 排放始终维持较高的水平(图 1),平均排放通量分别为 20.3 和 $26.7 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,显著高于其他 4 个处理(表 2)。水稻生长末期淹水不施和淹水混施处理出现一个较大的 CH_4 排放峰(图 1),这可能是由于水稻收割前稻田排水落干,大量闭蓄态 CH_4 从土壤释放到大气。

种麦不施和种麦混施处理 CH_4 排放主要发生在水稻生长中期(图 1),水稻移栽后 28~63 d CH_4 排放量分别高达 130 d 观测期总排放量的 51.9% 和 55.3%,而休闲不施、休闲混施、淹水不施和淹水混施处理 CH_4 排放主要发生在水稻生长前期(图 1),水稻移栽后 3~35 d CH_4 排放量分别高达 130 d 观测期总排放量的 37.7%、43.2%、51.1% 和 55.4%。

表 2 CH_4 平均排放通量和土壤平均 E_h
Table 2 Mean CH_4 flux, and mean soil E_h

处理	CH_4 平均排放通量/ $\text{mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	土壤平均 E_h/mV
种麦不施	$3.2 \pm 1.0 \text{ a}$	$-79 \pm 12 \text{ a}$
种麦混施	$4.5 \pm 0.9 \text{ a}$	$-79 \pm 27 \text{ a}$
休闲不施	$9.7 \pm 3.0 \text{ b}$	$-88 \pm 26 \text{ a}$
休闲混施	$10.8 \pm 5.5 \text{ b}$	$-136 \pm 21 \text{ b}$
淹水不施	$20.3 \pm 2.7 \text{ c}$	$-155 \pm 24 \text{ bc}$
淹水混施	$26.7 \pm 1.9 \text{ d}$	$-183 \pm 20 \text{ c}$

注:同列不同英文小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 土壤 E_h

淹水不施和淹水混施处理土壤 E_h 在淹水初期就为负值,且水稻全生育期内都处于很低的、适宜 CH_4 产生的水平(图 2)。休闲不施和休闲混施处理土壤 E_h 下降较快,分别在水稻移栽后 9 d 和 3 d 即出现负值,可能是由于水稻移栽前两处理试验小区杂草充当新鲜有机肥原位还田,有机肥的快速分解加速了淹水土壤 E_h 的下降^[13](图 2)。种麦不施和种麦混施处理土壤 E_h 在水稻生长初期处于很高的水平,直到移栽后 14 d 才出现负值(图 2),且水稻全生育期内其土壤平均 E_h 明显低于其他 4 个处理(表 2)。相关分析表明,水稻生长期各处理土壤 E_h 与 CH_4 排放通量无显著相关性(表 3),但土壤平均 E_h 与 CH_4 平均排放通量存在显著负相关($R^2 = -0.765$, $P < 0.01$)。

2.3 土壤温度

水稻全生育期内,5、10 cm 处土温季节变化趋势一致,经历了一个短暂的上升过程然后逐渐下降(图 3),整体在 $16 \sim 31.3^\circ\text{C}$ 范围内波动,平均为 24.6°C 。相

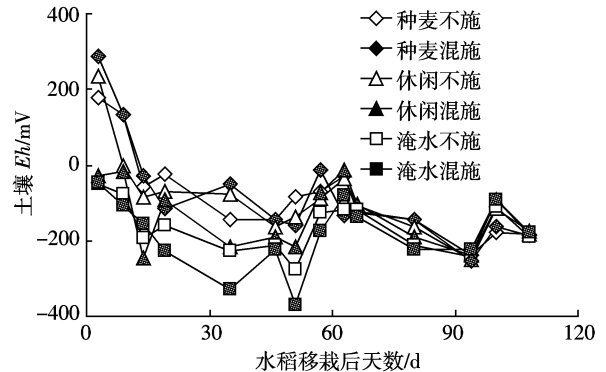


图 2 土壤 E_h 的季节变化

Figure 2 Seasonal variation of soil E_h

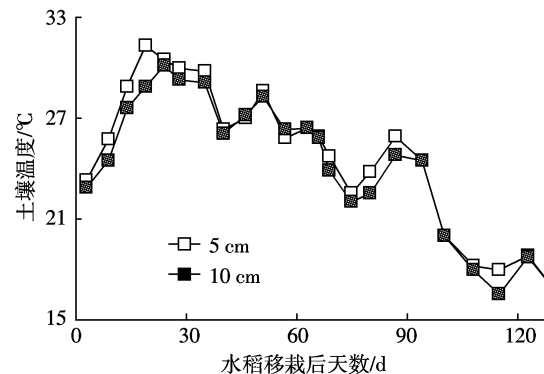


图 3 土壤温度的季节变化

Figure 3 Seasonal variation of soil temperature

关分析表明,水稻生长期 5、10 cm 处土温与 CH_4 排放通量呈极显著正相关(表 3)。

表 3 水稻生长期 CH_4 排放通量与土壤 E_h 、土壤温度的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between CH_4 flux and soil E_h and soil temperature during the rice-growing season

处理	相关系数		
	CH_4 排放通量- E_h	CH_4 排放通量- 土温(5 cm)	CH_4 排放通量- 土温(10 cm)
种麦不施	-0.380	0.567**	0.636**
种麦混施	-0.338	0.666**	0.717**
休闲不施	-0.219	0.782**	0.780**
休闲混施	-0.346	0.865**	0.837**
淹水不施	-0.078	0.699**	0.632**
淹水混施	0.018	0.659**	0.594**

注:** 表示在 $P < 0.01$ 水平上的显著相关。

3 讨论

3.1 冬季秸秆还田和土地管理对水稻生长期 CH_4 排放的影响

种麦不施和种麦混施处理 CH_4 平均排放量显著小于休闲不施和休闲混施处理(表 2)。有研究^[9,12,14]表明有机肥在水稻移栽前施用比在冬季作物播种前施

用显著增加稻田 CH₄ 排放量。一方面,按照当地耕种习惯种植小麦前喷洒除草剂,导致种麦不施和种麦混施处理试验小区整个冬季杂草很少,使得水稻移栽前原位还田的有机肥很少;另一方面,经过冬季的好氧分解,种麦混施处理试验小区剩余下来可供产 CH₄ 的秸秆大大减少^[12]。而休闲不施和休闲混施处理在水稻移栽前杂草原位还田,为 CH₄ 产生提供大量的新鲜前体基质,从而显著促进稻田 CH₄ 排放(图 1,表 2)。

淹水不施和淹水混施处理 CH₄ 平均排放量显著高于其他 4 个处理(表 2)。大量试验^[6-9]发现冬季持续淹水稻田的 CH₄ 排放量远高于冬季排水稻田的 CH₄ 排放量。产甲烷细菌是严格的厌氧细菌,低浓度的氧气就足以杀死产甲烷菌^[15]。稻田持续淹水使得土壤长期保持极端厌氧环境(图 2),有利于产甲烷细菌的生长,从而促进 CH₄ 的产生,显著增加稻田 CH₄ 排放量(图 1,表 2)。

与不施用秸秆处理相比,排水施用秸秆能增加稻田 CH₄ 排放量,但无显著差异,而淹水施用秸秆则显著增加稻田 CH₄ 排放量(表 2)。CH₄ 是在严格厌氧条件下产甲烷细菌作用于产甲烷底物的结果,充足的产甲烷基质和适宜的产甲烷环境是 CH₄ 大量产生的前提条件。因此,土壤持续淹水且施用秸秆其 CH₄ 排放量显著增加,明显高于淹水不施等其他 5 个处理(表 2)。

综上所述,改冬季淹水和休闲稻田为种植小麦或在水稻移栽前对休闲稻田实施除草措施能显著减少稻田 CH₄ 排放量,是一种既增加农作物产量又能达到减少 CH₄ 排放的可靠措施,具有很大的推广价值。

3.2 冬季秸秆还田和土地管理对水稻生长期土壤 Eh 的影响

土壤 Eh 及其变异趋势受土壤中还原物质(电子供体)和氧化物质(电子受体)的相对丰度控制。淹水后土壤中氧气逐渐耗尽,迫使土壤兼性细菌和厌氧细菌依次利用 NO₃⁻、Mn⁴⁺、Fe³⁺、SO₄²⁻和 CO₂ 作为电子受体来进行有机质分解和呼吸作用^[16]。种麦不施和种麦混施处理、休闲不施和休闲混施处理整个冬季土壤自然排水,土壤中一些还原性物质因暴露于空气而被氧化,从而有可能使土壤呈强氧化状态,且冬季秸秆还田,大部分被好秸秆氧分解,使得剩余下来可供水稻生长期产 CH₄ 的秸秆大大减少^[12]。淹水种稻后,随着土壤中氧的减少,大量氧化态物质 NO₃⁻、Mn⁴⁺、Fe³⁺和 SO₄²⁻依次被还原,从而延缓土壤 Eh 的下降^[7],所以水稻生长初期上述 4 个处理土壤 Eh 下降的相对缓慢。

而淹水不施和淹水混施处理土壤持续淹水,土壤始终呈强还原状态,使得土壤 Eh 始终保持很低的水平(图 2),并显著低于其他 4 个处理(表 2)。

3.3 土壤 Eh 对 CH₄ 排放的影响

CH₄ 是极端厌氧条件下产甲烷细菌作用于产甲烷基质的结果,土壤 Eh 无疑是影响稻田 CH₄ 排放量的最重要因素之一。对照图 1 和图 2 可知,稻田 CH₄ 排放通量受土壤 Eh 强烈影响,特别是在水稻生长初期,种麦不施和种麦混施处理土壤 Eh 下降慢,稻田 CH₄ 排放通量增加缓慢(图 1)。随着水稻生长,一方面土壤 Eh 逐渐降至适宜 CH₄ 产生的水平,加上土温较高(图 3),土壤有机质易分解;另一方面正值水稻分蘖期和拔节期,水稻根系及通气组织发达,有利于产生的 CH₄ 从土壤向大气释放,此时 CH₄ 排放通量逐渐达到最大,并在一定时期内(水稻移栽后 28~63 d)保持较大的排放(图 1)。休闲不施和休闲混施处理由于移栽水稻前杂草原位还田,一方面为土壤微生物的活动提供大量的碳源和能源,促进土壤微生物的生长,使土壤中氧迅速被消耗,加速土壤 Eh 的下降,为产甲烷菌生长创造了适宜的环境条件^[13];另一方面,大量碳源的存在还为产甲烷菌提供充足的基质^[12]。因此休闲不施和休闲混施处理有较高的 CH₄ 排放量,并在移栽后不久就出现最大 CH₄ 排放峰值(图 1)。淹水不施和淹水混施处理土壤 Eh 在水稻生长初期就处于很低水平且水稻全生育期内土壤平均 Eh 最小(表 2),所以其 CH₄ 排放通量在水稻生长初期就很大且水稻全生育期内有很高的排放(图 1)。

土壤平均 Eh 越低,稻田 CH₄ 平均排放通量越大(表 2),说明土壤平均 Eh 是稻田 CH₄ 排放的限制因素,相关分析亦表明水稻生长期土壤平均 Eh 和 CH₄ 平均排放通量呈极显著负相关($R^2=-0.765, P<0.01$)。

3.4 土壤温度对 CH₄ 排放的影响

土温通过影响土壤中有机质的分解速率、产甲烷细菌的数量和活性、CH₄ 的氧化以及 CH₄ 由土壤向大气传输的效率来影响 CH₄ 的排放^[13]。目前,关于土温对稻田 CH₄ 排放通量季节变化影响的报道观点不一。Khalil 等^[17]研究发现,在 18~31 °C 范围内,稻田 CH₄ 排放通量随土温的升高而迅速增加;蔡祖聪等^[18]则并未观测到土温与稻田 CH₄ 排放通量的相关性;Xu 等^[9]研究认为土温对稻田 CH₄ 排放通量的影响程度因是否存在其他制约因子而异:当不存在稻田 CH₄ 排放的其他限制因子时,土温与 CH₄ 排放通量显著相关;如果存在其他限制因子(如较高的土壤 Eh、烤田等),土温

对 CH_4 排放通量则无显著影响。

本试验各处理稻季持续淹水,土壤 E_h 大部分时间处于很低或较低的适宜 CH_4 产生的水平(表2),此时土壤 E_h 已不是 CH_4 产生的限制因素, CH_4 排放通量则可能主要随水稻生长和土温的变化而呈现一定的季节变化^[7]。所以没有发现 CH_4 排放通量与土壤 E_h 间的显著相关性,却观测到 CH_4 排放通量与相应土温(5、10 cm)间的极显著相关性(表3)。可见,土温是稻田 CH_4 排放的重要影响因素。

4 结论

种麦不施和种麦混施处理 CH_4 排放主要发生在水稻生长中期,而其他4个处理则主要发生在水稻生长前期。休闲不施和休闲混施处理 CH_4 平均排放通量显著高于种麦不施和种麦混施处理($P<0.05$),但显著低于淹水不施和淹水混施处理($P<0.05$)。休闲不施和休闲混施处理水稻移栽前杂草原位还田是其 CH_4 平均排放通量显著高于种麦混施和种麦不施处理的主要原因。淹水混施处理 CH_4 平均排放通量显著高于淹水不施处理($P<0.05$),而休闲混施和休闲不施处理、种麦混施和种麦不施处理间无显著差异($P>0.05$)。

水稻生长期 CH_4 排放通量与土壤 E_h 无显著相关性($P>0.05$),但与5、10 cm处土温呈极显著正相关($P<0.01$)。水稻生长期 CH_4 平均排放通量与土壤平均 E_h 存在极显著负相关($P<0.01$)。改冬季淹水和休闲稻田为种植小麦或在水稻移栽前对休闲稻田施除草措施是减少稻田 CH_4 排放的有利举措。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Understanding and attributing climate change [R/OL]. [2009-3-12]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter9.pdf>.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [R/OL]. [2009-3-12]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>.
- [3] IPCC. Climate change 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry [R/OL]. [2009-3-12]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf>.
- [4] Yan X Y, Cai Z C, Ohara T, et al. Methane emission from rice fields in mainland china: amount and seasonal spatial distribution[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D16), 4505, doi:10. 1029/2002JD003182.
- [5] Yan X Y, Akiyama H, Yagi K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23, GB2002, doi: 10. 1029/2008GB003299.
- [6] 蔡祖聪, 徐 华, 卢维盛, 等. 冬季水分管理方式对稻田 CH_4 排放量的影响[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(2): 171-175.
CAI Zu-cong, XU Hua, LU Wei-sheng, et al. Influence of water management in winter crop season on CH_4 emission during rice growing season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(2): 171-175.
- [7] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平, 等. 冬作季节土壤水分状况对稻田 CH_4 排放的影响[J]. *农村生态环境*, 1999, 15(4): 22-23.
XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping, et al. Effects of soil water regime in winter cropping on CH_4 flux from rice field[J]. *Rural Eco-Environment*, 1999, 15(4): 22-23.
- [8] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平, 等. 冬作季节土地管理对水稻土 CH_4 排放季节变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 215-218.
XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping, et al. Effect of land management in winter crop season on seasonal variation of CH_4 emission from rice paddy soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 215-218.
- [9] Xu H, Cai Z C, Jia Z J, et al. Effect of land management in winter crop season on methane emission during the following flooded and rice-growing period[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 327-332.
- [10] Cai Z C, Tsuruta H, Gao M, et al. Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 37-45.
- [11] Khalil M A K, Rasmussen R A, Wang M X. Methane emission from rice fields in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 1991, 25: 979-981.
- [12] 徐 华, 蔡祖聪, 贾仲君, 等. 前茬季节稻草还田时间对稻田 CH_4 排放的影响[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(5): 289-292.
XU Hua, CAI Zu-cong, JIA Zhong-jun, et al. Effect of rice straw application time in previous crop season on CH_4 emission from rice paddy field[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(5): 289-292.
- [13] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平. 土壤 E_h 和温度对稻田甲烷排放季节变化的影响[J]. *农业环境保护*, 1999, 18(4): 145-149.
XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of soil E_h and temperature on seasonal variation of CH_4 emission from rice field[J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(4): 145-149.
- [14] Yagi K, Tsuruta H, Minami K. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 213-220.
- [15] 李香兰, 徐 华, 曹金留, 等. 水分管理对水稻生长期 CH_4 排放的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(2): 238-242.
LI Xiang-lan, XU Hua, CAO Jin-liu, et al. Effect of water management on CH_4 emission during rice-growing season[J]. *Soils*, 2007, 39(2): 238-242.
- [16] Neue H U. Methane emission from rice fields[J]. *Bioscience*, 1993, 43: 39-54.
- [17] Khalil M A K, Rasmussen R A, Wang M X, et al. Methane emissions from rice fields in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 1991, 25: 979-981.
- [18] 蔡祖聪, 颜晓元, 徐 华, 等. 氮肥品种对稻田甲烷排放的影响[J]. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 136-142.
CAI Zu-cong, YUAN Xiao-yuan, Tsuruta H, et al. Effect of N-fertilizers variety on methane emission from rice field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(Suppl.): 136-142.