

西双版纳地区稻田 CO₂ 排放通量

武文明^{1, 2}, 杨光明^{1, 2}, 沙丽清^{1*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用静态暗箱-气相色谱法对云南西双版纳地区单季稻田 CO₂ 排放及氮肥、水热因子对 CO₂ 排放的影响进行田间原位观测研究。试验设 3 个氮肥水平处理: N0(0 kg N hm⁻²)、N150(150 kg N hm⁻²)和 N300(300 kg N hm⁻²)。结果表明, 受一天温度变化的影响, 西双版纳地区稻田生态系统呼吸日变化为单峰型, 其最大值出现在 11:00~13:00 之间, 最小值出现在凌晨。稻田土壤呼吸呈明显的季节变化趋势, 土壤呼吸平均速率为水稻收获后休闲季节 > 种植前休闲季节 > 水稻生长季节, 差异达到 1% 显著水平。不同季节影响土壤呼吸的环境因子不同。土壤水分含量低于 34% 时, 土壤呼吸速率与土壤含水量呈正相关, 达 5% 显著水平; 地面淹水时, 土壤呼吸速率与淹水深度呈 1% 极显著负相关; 水分含量高于 38% 时, 土壤呼吸速率与温度呈极显著指数相关。长期考虑(整个生长季节), 氮肥的施用对稻田土壤呼吸和生态系统呼吸无影响; N300 处理抑制植株呼吸作用, 单位生物量呼吸速率下降。氮肥的施用对土壤呼吸有短期影响, 氮肥用量增加, 土壤呼吸速率增加。计算得出 NQ N150 和 N300 处理年土壤呼吸量分别为 6.27、6.31 t C hm⁻² a⁻¹ 和 5.89 t C hm⁻² a⁻¹; 年净固定大气中 CO₂-C 分别为 1.41、2.22 t C hm⁻² a⁻¹ 和 1.11 t C hm⁻² a⁻¹, 表明西双版纳稻田生态系统是碳汇。

关键词: 稻田; 土壤呼吸; 生态系统呼吸; 氮肥; 西双版纳

文章编号: 1000-0933(2009)09-4983-10 中图分类号: Q142, S181, X171.1 文献标识码: A

CO₂ emission from paddy soils in Xishuangbanna Southwest China

WU Wen-Ming^{1, 2}, YANG Guang-Ming^{1, 2}, SHA Li-Qing^{1*}

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica 2009 29(9): 4983~4992

Abstract Although Xishuangbanna is within the tropics, it has large seasonal climatic variations. Paddy soil has substantial effects on carbon cycle. The CO₂ exchange between paddy soil and atmosphere, and the factors influencing this exchange have both become important issues for global carbon-cycle research. Using the static opaque chamber and gas chromatography technique, CO₂ emission from paddy soil and its affecting factors were investigated in Xishuangbanna, SW China. In this study, soils with and without rice plants at three nitrogen fertilization levels (NQ, N150 and N300) were examined.

We found that diurnal variation of ecosystem respiration could be modeled with single peak curve throughout the rice-growing season. The maximum and minimum emission rates occurred between 11:00 ~ 13:00 and at 00:00, respectively. There was a significant correlation between CO₂ emission rates and air temperature. Different nitrogen fertilizer levels had the same pattern of ecosystem or soil respiration. Soil respiration varied seasonally, significant at the 1% level. The maximum value occurred during fallow season post-harvest stage, minimum in the growing season and intermediate in the fallow season before rice transplanting. Soil moisture and temperature were the dominant factors influencing soil respiration. When the soil moisture was below 34%, there was positive linear relationship between soil moisture and soil respiration.

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目 (2004C0052M); 中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX1-SW-01)

收稿日期: 2007-12-13 修订日期: 2009-05-07

致谢: 中国科学院西双版纳热带植物园生态站提供气象资料, 生物地球化学实验室提供大力帮助, 深表谢意。

* 通讯作者 Corresponding author E-mail: shaliqing@xtbg.ac.cn

rate When soil moisture exceeded 38%, there was an exponential relationship between soil respiration and temperature significant at the 1% level Throughout the growing season, soil or ecosystem respiration rates under different nitrogen fertilizer levels did not differ, except that the N300 treatment reduced plant respiration In the short term, nitrogen level increased soil respiration rates The annual estimated soil respiration was 6.27 tC hm⁻², 6.31 tC hm⁻² and 5.89 tC hm⁻² for the N0, N150 and N300 treatments, and the annual net fixation CO₂-C from the atmosphere was 1.41 tC hm⁻², 2.22 tC hm⁻² and 1.11 tC hm⁻². Therefore paddy soil in Xishuangbanna serves as a carbon sink at all fertilizer levels

Key Words paddy soil; soil respiration; ecosystem respiration; nitrogen fertilizer; Xishuangbanna

CO₂是受人类活动影响很大的温室气体。自工业革命以来, 大气 CO₂浓度已从工业革命以前的 280 μmol mol⁻¹ 增加到 379 μmol mol⁻¹, 目前 CO₂浓度还在持续上升^[1]。土壤是大气 CO₂的主要来源^[2], 土壤碳库的微小变化都可能导致大气 CO₂浓度的显著变化^[3]。CO₂浓度的升高会加重温室效应, 通过温度升高而影响碳循环^[4]。水稻田在碳循环、温室气体吸收和排放中起着重要作用^[5], 稻田 CO₂的排放以及影响因子在全球碳循环的研究中已经成为一个热点^[6]。

中国是重要的水稻生产国, 水稻种植面积约占世界稻田总面积的 22%, 产量约占世界水稻产量的 38%^[7]。在中国关于稻田温室气体的研究多集中在温带和亚热带地区, 研究表明土壤呼吸主要受土壤温湿度、植被类型、NER 地下和地上生物量分配^[8~12]、农业管理措施如耕作、施肥和灌溉等的影响^[13], 但对于热带地区稻田土壤呼吸的研究较少^[14], 关于西双版纳稻田土壤呼吸的研究还未见报道。西双版纳地区属于滇南稻作区的一部分, 位于热带北缘, 有其独特的气候特点和耕作制度, 水田面积为 4.27 × 10⁴ hm², 占耕地总面积的 37.20%^[15]。稻田作为一种受人类活动干扰最为频繁和严重的生态系统, 研究热带地区稻田土壤呼吸速率, 对了解热带农田生态系统对全球碳循环的作用以及估算农田生态系统碳收支有着重要意义。本研究采用静态暗箱法测定了西双版纳稻田土壤呼吸和生态系统呼吸, 研究目标是: (1)了解西双版纳稻田土壤呼吸的特征; (2)探讨土壤温度与土壤水分对土壤呼吸和生态系统呼吸的影响; (3)探讨氮肥施用对西双版纳稻田生态系统呼吸、土壤呼吸和植株呼吸的影响; (4)估算年土壤呼吸量及碳收支。

1 材料与方法

1.1 试验地区概况

试验于 2006 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 30 日在云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇水稻田进行。研究样地位于 21°55'N, 101°12'E, 海拔约为 600 m, 终年受到西南季风的控制, 属于北热带季风气候。据中国科学院西双版纳热带生态站气象站 (位于中国科学院西双版纳热带植物园内) 多年资料, 该地区年平均降水量为 1557 mm, 全年分为雾凉季 (11~翌年 2 月份)、干热季 (3~4 月份)、湿热季 (5~10 月份)。年平均相对湿度为 86%, 年平均气温为 21.3 °C。试验田土壤为潯育型水稻土, 样地基本性质见表 1。

表 1 试验样地的土壤性质
Table 1 Soil property of experimental sites

pH	有机质 (g kg ⁻¹) Organic matter	全氮 (g kg ⁻¹) Total nitrogen	全磷 (g kg ⁻¹) Total phosphorus	有效磷 (mg kg ⁻¹) Available phosphorus	有效钾 (mg kg ⁻¹) Available potassium
5.98	28.09	1.76	0.54	3.09	85.5

1.2 试验设置

本研究采用静态暗箱技术, 采样箱构造可参考相关论文^[14]。
氮肥处理 N0(施用 0 kg N hm⁻²)、N150(施用 150 kg N hm⁻²)和 N300(施用 300 kg N hm⁻²); 水稻植株处理: 有水稻植株处理和无水稻植株对照处理。
水稻生长期的各类肥料分别于 2006 年 6 月 25 日和 8 月 2 日作为分蘖肥和穗肥 (比例为 1:1)施入, 采用

表施方式, 施肥方案见表 2。每个施肥处理设 4 个重复, 在 4 块地力比较均匀的地块内, 每个重复设 1 个 10 m × 8 m 的小区, 每个小区内布置 1 个观测点, 同时在每个小区设置一个 2 m × 2 m 的小区用于无水稻植株对照处理。

表 2 各处理试验区施肥用量
Table 2 Fertilizer dosages in N0, N150 and N300 plots (kg hm⁻²)

处理 Treatments	6月 25日 June 25			8月 2日 August 2		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N0	0	37.5	37.5	0	37.5	37.5
N150	75	37.5	37.5	75	37.5	37.5
N300	150	37.5	37.5	150	37.5	37.5

试验期间, 稻田管理同当地常规管理。非水稻生长期稻田休闲, 长达 8 个月。前茬水稻收获后脱粒打谷在田中进行, 插秧前一个月稻田翻耕, 土壤表面淹水。水稻品种为杂交稻冈优 151, 单季稻。2006 年 6 月 10 日插秧, 9 月 14 日收割, 全生育期为 96d, 种植密度为 20 cm × 15 cm, 每穴 1 株。

1.3 气样采集及相关指标测量

水稻生长季节各处理每周采样 2 次; 施肥后每天采样 1 次, 连续 1 周; 非生长季节每周采样 1 次。采样时间定为 9:00~11:30, 采样时间分别为关箱后的 0、8、16、24、32min, 每次用注射器从箱内抽取 100 mL 气体样品用于分析 CO₂ 浓度。气体采样的同时用 JM624 便携式数字温度计同步测量 5 cm 土壤的温度、地表温度、箱内气温和大气温度 (只记录每个采样点的起始和结束温度)。用直尺测量稻田淹水深度; 便携式测墒仪 (MPkit) 测定土壤 (0~6 cm) 容积含水量。

日变化观测只在 N150 处理小区进行, 以了解稻田生态系统呼吸和土壤呼吸日动态。分别于水稻拔节期、抽穗开花期和水稻收获后选择晴好天气进行观测。观测时间从 9:00 开始直到下一日的 9:00 时结束 (白天每隔 2h 采样 1 次, 夜间每隔 3h 采样 1 次)。

1.4 生态系统呼吸和土壤呼吸速率的计算

气体样品用配有 CA-5 气体样品进样仪的 Agilent 4890D 气相色谱仪分析。CO₂ 检测器为氢火焰离子化检测器 (FID), 载气为高纯氮气。根据线性拟合由箱内气体浓度的变化率计算排放速率, 用公式表示为:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为被测 CO₂ 排放速率 (mg m⁻² h⁻¹)。

1.5 生物量

每 10 d 左右采集完整的水稻植株, 清洗去土, 分成地上和地下生物量。于 105℃ 杀青 2 h 后, 置于 80℃ 的烘箱中烘干至恒重。

1.6 数据处理与分析

有水稻处理 CO₂ 排放通量作为稻田生态系统呼吸, 无水稻处理 CO₂ 排放通量土壤呼吸, 植物呼吸则根据方程得到:

植物呼吸 (Plant respiration) = 生态系统呼吸 (Ecosystem respiration) - 土壤呼吸 (Soil respiration)
全年分为水稻种植前休闲季节 (1 月 1 日 ~ 6 月 9 日)、水稻生长季节 (6 月 10 日 ~ 9 月 14 日) 和水稻收割后休闲季节 (9 月 15 日 ~ 12 月 30 日)。对日变化作配对 T 检验; 各生长季节的呼吸速率与土壤含水量、温度数据建立一元回归模型; 不同氮肥处理利用单因素方差分析, 所有分析均由 SPSS 13.0 完成。

2 结果

2.1 稻田生态系统呼吸和土壤呼吸的日变化

拔节期、抽穗开花期生态系统呼吸日变化表现为单峰模式 (图 1), 最小值出现在 0:00 左右, 最大值出现

在 11: 00~ 13 00 之间; 水稻收割后生态系统呼吸日变化无特定模式。3 次日变化生态系统呼吸速率平均值分别为 628 99 579. 18 mg CO₂ m⁻² h⁻¹和 528 38 mg CO₂ m⁻² h⁻¹。

拔节期土壤呼吸速率出现 3 个峰值, 抽穗开花期土壤呼吸无明显的峰值出现; 水稻收割后, 土壤呼吸无特定日变化模式。土壤呼吸速率平均值分别为 176 44, 60 39 mg CO₂ m⁻² h⁻¹和 497. 77 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, 9 00~ 11: 00 的土壤速率接近全天的土壤呼吸速率的平均值。

对 3 次日变化分别进行 *T* 检验, 结果表明拔节期和抽穗开花期, 生态系统呼吸和土壤呼吸速率之间存在极显著差异 (*p* < 0. 01); 水稻收割后, 残茬稻田土壤呼吸和无水稻种植处理土壤呼吸速率无显著差异 (*p* > 0. 05)。

2 2 稻田生态系统呼吸和土壤呼吸的季节变化

稻田土壤呼吸和生态系统呼吸呈明显的季节性变化规律(图 2 图 3), 土壤呼吸季节变化趋势与降水和温度的变化趋势有所不同。种植前休闲季节几次降水后土壤呼吸速率增强, 但稻田从前一年的 9 月中旬开始处于休闲状态, 前茬水稻植株残渣经过几个月的分解, 残留较少, 而且此时处于西双版纳地区雾凉季后期和干热季节, 土壤相对比较干旱, 因此土壤呼吸速率未达到最高峰。水稻生长季节正值西双版纳地区湿热季节, 土壤表面淹水, 此时土壤呼吸速率最低。水稻收割后稻田处于休闲, 降雨量较少, 但此季节土壤呼吸速率为全年最高, 最高值出现在水稻收割后两周, NQ N150 和 N300 处理土壤呼吸速率分别达到 799 35, 794 19 mg CO₂ m⁻² h⁻¹和 750 00 mg CO₂ m⁻² h⁻¹。相同氮肥水平处理, 不同季节土壤呼吸速率有极显著的差异 (*p* < 0. 01) (图 2)。

水稻生长季节, 生态系统呼吸表现为“低-高-低”的变化趋势。NQ N150 和 N300 处理生态系统呼吸速率平均值分别为 640 64 724 40 mg CO₂ m⁻² h⁻¹和 642. 51 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, 较生长季节土壤呼吸速率平均值 (132 37, 163 95 mg CO₂ m⁻² h⁻¹和 146 69 mg CO₂ m⁻² h⁻¹) 分别增加了 383%、341% 和 338%。

2 3 稻田生态系统呼吸和土壤呼吸影响因素分析

2 3 1 土壤含水量对生态系统呼吸和土壤呼吸的影响

将水稻种植前和水稻收获后数据合并对土壤呼吸速率与土壤含水量进行相关分析, 结果表明两者无相关性, 故将水稻种植前和收割后数据分别分析。水稻种植前和收割后休闲季节 NQ N150 和 N300 处理平均土壤含水量分别为 34 48%、32 88%、31 74% 和 38 45%、39 13%、39 30%, 配对 *T* 检验分析表明种植前和收割

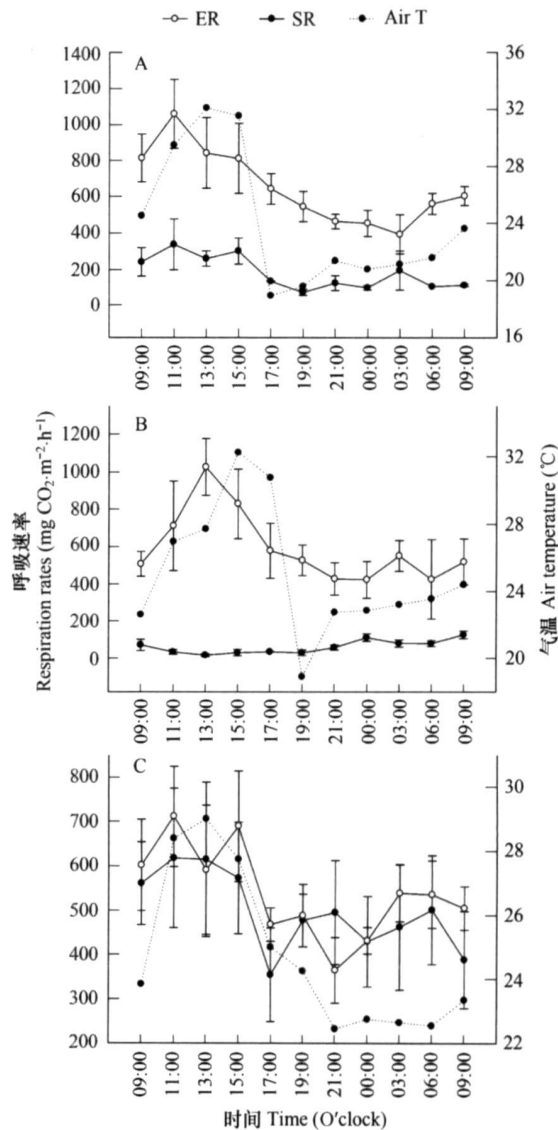


图 1 生态系统呼吸、土壤呼吸和大气温度在拔节期 (A)、抽穗开花期 (B) 和收割后 3 d (C) 的日变化
Fig 1 Diurnal patterns of ecosystem respiration, soil respiration and air temperature in heading (A), bolting and blooming (B) stage and three days after harvest (C) of rice plant
ER 生态系统呼吸 Ecosystem respiration SR 土壤呼吸 Soil respiration Air T 空气温度 Air temperature; 误差线表示呼吸速率标准误差 Error bars show the standard error of respiration

后休闲季节土壤含水量存在显著差异 ($p < 0.01$)。相关性分析结果表明, 水稻种植前休闲季节 NQ N150 和 N300 处理土壤呼吸与土壤含水量呈显著正相关 ($r^2 = 0.45 \sim 0.53, p < 0.01$)。水稻收割后土壤呼吸与土壤含水量无相关性。水稻生长季节生态系统呼吸、土壤呼吸分别与稻田淹水深度呈显著负相关 ($p < 0.01$) (表 3)。

2.3.2 温度对生态系统呼吸和土壤呼吸的影响

拔节期、抽穗开花期和水稻收割后 3d 大气温度日变化范围分别为 18.95~32.1℃、18.9~32.25℃和 22.5~29.0℃, 前两次日变化监测时正值湿热季, 天气多变, 午后均有降雨, 故温差大。对呼吸速率与温度进行相关性分析, 不同生长季节统计结果不同 (表 4)。

2.3.3 氮肥对生态系统呼吸和土壤呼吸的影响

水稻种植前各小区没有进行施肥, 为了在水稻种植前将样地固定, 人为划定了 NQ N150 和 N300 处理小区。对水稻种植前、收割后休闲季节不同氮肥水平处理的土壤呼吸进行单因素方差分析, 结果表明休闲季节不同氮肥水平处理间土壤呼吸速率无显著差异 ($p > 0.05$)。

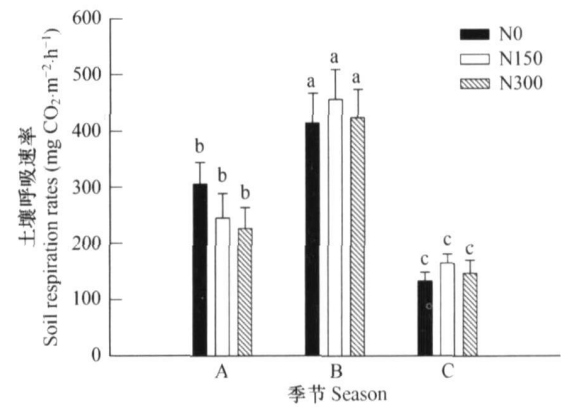


图 2 不同季节不同氮肥水平土壤呼吸速率平均值
Fig. 2 Mean soil respiration rates in different season with different nitrogen level
A: 种植前休闲季节; B 收割后休闲季节; C: 水稻生长季节; 误差线表示呼吸速率标准误 A: Fallow season before rice transplanting; B: Fallow season post harvest stage; C: Growth season of rice. Error bars show the standard error of respiration. 柱上小写字母不同表示相同氮肥水平不同季节或相同季节不同氮肥水平处理土壤呼吸速率在 $p < 0.01$ 水平上有差别。Different superscripts above bar indicate significant difference ($p < 0.01$) in respiration rates a, b, c between treatments in given seasons or between seasons in given treatments.

表 3 生态系统呼吸、土壤呼吸与淹水深度的回归方程							
Table 3 Regression equation of water depth with ecosystem respiration and soil respiration							
处理	回归方程 Regression equation						
Treatment	生态系统呼吸 Ecosystem respiration				土壤呼吸 Soil respiration		
N0	$F = -68.39M + 994.47$	$r^2 = 0.54$	$p < 0.01$	$F = -16.02M + 190.47$	$r^2 = 0.26$	$p < 0.01$	
N150	$F = -56.41M + 1024.23$	$r^2 = 0.38$	$p < 0.01$	$F = -15.76M + 201.35$	$r^2 = 0.31$	$p < 0.01$	
N300	$F = -75.75M + 1038.12$	$r^2 = 0.66$	$p < 0.01$	$F = -29.70M + 289.94$	$r^2 = 0.25$	$p < 0.01$	
F 为生态系统呼吸或土壤呼吸速率 ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), M 为稻田生长季节淹水深度 (cm) F is the ecosystem respiration or soil respiration ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), M (cm) is the depth of water in the growth season of rice							

表 4 生态系统呼吸、土壤呼吸速率与温度的相关关系						
Table 4 Correlation between ecosystem respiration or soil respiration rate and temperatures						
温度 Temperature	生态系统呼吸 Ecosystem respiration			土壤呼吸 Soil respiration		
	A	B	C	A	B	C
5cm 土壤温度 5cm soil temperature	0.62 [*]	—	—	0.80 ^{**}	0.60 [*]	—
地表温度 Surface temperature	0.66 [*]	—	0.73 [*]	0.70 [*]	—	0.64 [*]
气温 Air temperature	0.79 [*]	0.633 [*]	0.74 ^{**}	0.86 ^{**}	—	0.66 [*]
*: 0.05 水平下显著相关; **: 0.01 水平下极显著相关; —: 表示呼吸速率与温度无显著相关性; A: 拔节期; B: 抽穗开花期; C: 水稻收割后 3d *: Correlation is significant at 0.05 level (2-tailed); **: Correlation is significant at 0.01 level (2-tailed); —: No relationship between respiration rate and temperature. A: Heading stage; B: Bolting and blooming stage; C: Three days after rice harvesting						

水稻生长季节施肥两次, 施用氮肥 7d 内不同氮肥水平间生态系统呼吸无显著差异 ($p > 0.05$) (表 5); 8 月 2 日施肥, 不同氮肥水平处理土壤呼吸存在显著差异 ($p < 0.05$)。对整个水稻生长阶段不同氮肥水平处理间生态系统呼吸、土壤呼吸和植株呼吸进行单因素方差分析, 结果表明不同氮肥水平处理间生态系统呼吸、土壤呼吸均无显著差异 ($p > 0.05$)。生长季节, N150 和 N300 处理间植株呼吸存在显著差异 ($p = 0.05$)。

表 5 不同水稻生长阶段施肥后 7d 内生态呼吸、土壤呼吸速率

Table 5 Mean respiration rates after fertilization in different growth stage of rice plant

处理 Treatment	呼吸速率 (mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)			处理 Treatment	呼吸速率 (mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)		
	6月 25日 June 25	8月 2日 August 2			6月 25日 June 25	8月 2日 August 2	
生态系统呼吸 Ecosystem respiration				土壤呼吸 Soil respiration			
N0	454 64 a	778 22 a		N0	96 56 a	86 16 b	
N150	477 27 a	841 19 a		N150	75 78 a	155 77 b	
N300	474 34 a	728 56 a		N300	63 39 a	209 15 a	

小写字母不同表示不同氮肥水平间生态系统呼吸或土壤呼吸在(纵向) $p < 0.05$ 水平有差别 Different superscripts indicate significant difference ($p < 0.05$) in fluxes a b c between treatment in ecosystem or soil respiration

对不同氮肥水平处理水稻植株呼吸速率与水稻生物量进行相关分析, 两者呈显著相关 ($p < 0.05$) (图 5), 相关关系表达式为:

N0 $Y = 1267.80X + 132.38 \quad r^2 = 0.66$ (2)

N150 $Y = 1760.00X + 38.02 \quad r^2 = 0.98$ (3)

N300 $Y = 658.22X + 245.49 \quad r^2 = 0.58$ (4)

式中, Y 为植株呼吸速率 (mg CO₂ m⁻² h⁻¹); X 为水稻植株生物量 (g m⁻²)

由上式可以看出, 与 N150 处理相比, N300 处理单位水稻生物量呼吸速率降低, 且低于 N0 对照处理。

2.4 稻田生态系统碳收支及年土壤呼吸量

不同季节影响土壤呼吸的环境因子不同, 故无法用模型对年土壤呼吸量进行估算, 故利用每次实测值加权平均估算年土壤呼吸排放量^[16], 计算得出 NQ、N150 和 N300 处理土壤年呼吸量分别为 6.27、6.31 t C hm⁻² a⁻¹ 和 5.89 t C hm⁻² a⁻¹。

以 $C_{[Rs]}$ 表示土壤呼吸年碳排放量, $C_{[NPP]}$ 表示植株净固定碳量, 则稻田生态系统 CO₂-C 收支 (ΔC) 即按下列公式计算:

$C_{[CH_4]} = 0.75 \times \text{CH}_4\text{排放通量}$ (5)

$NPP = 1.1 \times TAGB^{[17]}$ (6)

$C_{[NPP]} = 0.27 \times NPP / (0.68 \times 0.85) = 0.47 \times NPP^{[18]}$ (7)

$\Delta C = C_{[NPP]} - C_{[Rs]} - C_{[CH_4]}$ (8)

公式中 $C_{[NPP]}$ 表示被植株转化为 NPP 的 C 量, 0.27 表示 CO₂ 折算为 C 的系数, 0.47 为植株 C 含量; TAGB 表示水稻收获时 NQ、N150 和 N300 处理地上部分总生物量, 分别为 14.99、16.65 t hm⁻² 和 13.65 t hm⁻²; 计算得出 $C_{[NPP]}$ 分别为 7.75、8.61 t hm⁻² 和 7.06 t hm⁻²; $C_{[Rs]}$ 分别为 6.27、6.31 t C hm⁻² a⁻¹ 和 5.89 t C hm⁻² a⁻¹; $C_{[CH_4]}$ 分别为 0.07、0.08 t C hm⁻² a⁻¹ 和 0.06 t C hm⁻² a⁻¹, 因此西双版纳稻田生态系统不同氮肥水平处理 (NQ、N150 和 N300) 年净固定大气中 CO₂-C 分别为 1.41、2.22 t C hm⁻² a⁻¹ 和 1.11 t C hm⁻² a⁻¹。

3 讨论

3.1 稻田生态系统呼吸和土壤呼吸日变化模式

稻田生态系统呼吸和土壤呼吸的日动态与温度和光照有关。白天温度高, 植株的呼吸作用较强, 晚上温度低, 植株的呼吸作用降低。生态系统呼吸的高峰期比气温出现的高峰期提前 2h, 这是由于高温和强光抑制了植物的光合和呼吸作用。抽穗开花期植株冠面积比较大, 造成自遮荫现象, 土壤温度一天内变幅很小, 而气温日振幅较大, 此时生态系统呼吸主要受气温的影响。水稻生长季节田面淹水, 由于水层的阻隔, CH₄ 氧化生成的 CO₂ 以及微生物分解形成的 CO₂ 有很大一部分不能顺利排放到大气中; 水稻收割后, 残留的水稻根系及残茬在水热条件好的情况下易分解释放出 CO₂, 而且由于没有田面水层的阻碍, 土壤中闭蓄态 CO₂ 得以释放^[19], 土壤呼吸速率增大。

3.2 西双版纳稻田土壤呼吸的影响因素

土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程, 受到很多因素的影响, 其中最主要的是土壤温度和土壤含水量的

影响^[10, 20, 21]。在亚热带稻田研究表明, 土壤温度是影响土壤呼吸的主要因子, 而土壤水分的影响不大^[5]; 也有研究表明水分含量是影响稻田土壤呼吸的主要因素^[10]。沙丽清, 房秋兰^[11, 22]在西双版纳热带季节雨林、橡胶林的土壤呼吸观测表明, 受西双版纳地区特殊气候特点(干热季、湿热季及雾凉季)的影响, 土壤呼吸与温度、土壤含水量均有显著的相关性。

本研究表明不同季节影响土壤呼吸的环境因子不同。土壤含水量低于 34% 的种植前休闲季节, 土壤呼吸与土壤含水量呈正相关。土壤含水量过低会限制微生物呼吸作用^[9], 土壤含水量增大, 微生物活动增强, 土壤呼吸速率增大。土壤表面淹水时, 阻塞土壤孔隙, 土壤中 O₂ 含量降低, 微生物活性受到抑制, 而且水层阻碍 CO₂ 向大气中的释放^[23, 24]; 同时由于水的热容量较大, 淹水状态下, 土壤温度变化幅度较小, 此时土壤呼吸速率与淹水深度呈线性负相关。水稻收割后的休闲季节, 雾凉季节雾日占整个雾凉季节 2/3 以上, 对地表水分有一定的补给作用^[26], 受历史土壤含水量的影响, 此时土壤含水量较高, 土壤呼吸主要受温度影响。西双版纳地区稻田土壤呼吸的季节动态及其影响因子与此地区独特的耕作方式(6~9 月份种植单季稻、其余时间休闲)是吻合的。以上分析表明建立土壤呼吸模型时, 应该分不同季节分别分析温度和土壤含水量对土壤呼吸的影响。

3.3 氮肥对稻田生态系统呼吸、土壤呼吸和植株呼吸的影响

氮素对土壤呼吸的影响研究结果并不一致。施氮与未施氮土壤呼吸无显著差异^[25]; 当氮肥用量差异达到 400 kg N hm⁻² 时, 土壤呼吸有差异^[27]; 实验室内培养试验表明, 氮输入可以抑制休闲农田土壤的 CO₂ 释放速度, 降低微生物活性, 但在野外实地测定却发现两种处理间的差距不显著^[28]。本研究表明氮肥的施用对土壤呼吸存在短期影响, 氮肥用量增加, 土壤呼吸增大。西双版纳稻田 C/N 比大约为 9.26, 土壤本身氮含量能够满足有机质矿化的需要, 氮肥的施用短期内可能促进了微生物的活动, 提高土壤中有机质的分解速率, 激发了土壤呼吸速率^[26, 29~31], 但很快又下降。长期考虑, 外源氮素的输入有可能造成土壤 C/N 比下降, 土壤中微生物量减小^[29]; 而且尿素表施氮挥发损失达 20%~50%^[32], 氮肥的施用对土壤呼吸影响不明显; 氮肥用量较大, 可能造成植株盐类毒害, 抑制植株的生长, 呼吸速率降低, 这与孙文娟^[33] 在南京研究结果不同。氮肥施用对生态系统呼吸无影响, 这可能是氮肥对构成生态系统呼吸的各个分量(如土壤、植物以及微生物)的影响不同, 造成抵消现象。研究氮肥对土壤呼吸、植株呼吸和生态系统呼吸主要体现在氮肥对 CO₂ 排放速率的影响, 由于影响 CO₂ 排放的因素还很多, 如土壤水分、土壤温度、有机质、植物根系的分泌以及土壤微生物等, 因此还需进行室内培养试验同步观测。

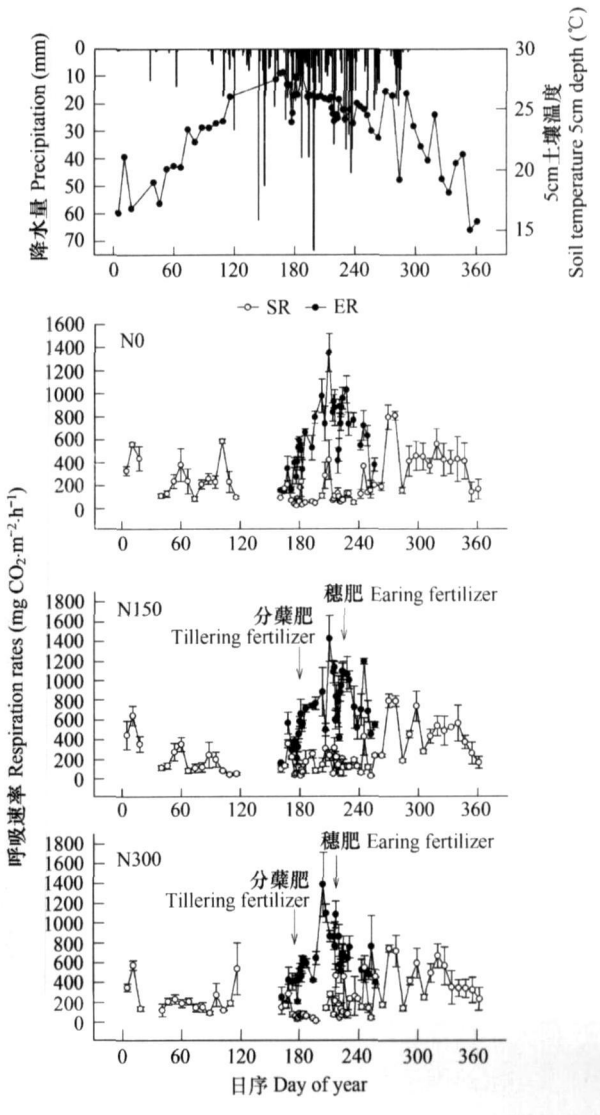


图 3 降水量和不同氮肥水平生态系统呼吸、土壤呼吸的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of precipitation, ecosystem respiration and soil respiration with different nitrogen level

ER, SR 见图 1 误差线表示呼吸速率标准误差 Error bars show the standard error of respiration

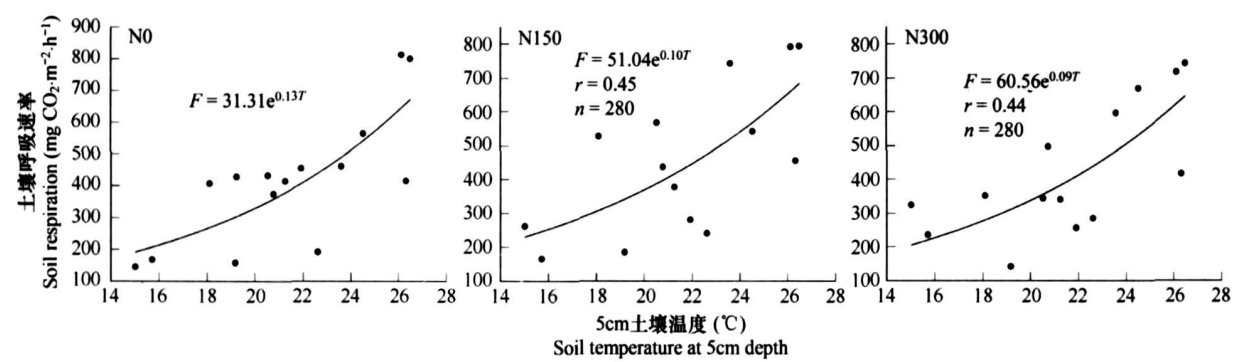


图 4 水稻收割后氮肥水平处理土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig 4 Relationship between 5 cm soil temperature and soil respiration in fallow season post harvest stage

3 4 西双版纳稻田 CO₂排放与其他稻田的比较

本研究中稻田生态系统呼吸速率低于邹建文^[34]和孙文娟^[35]在南京研究结果, 高于在广东^[36, 37]的研究结果。年土壤呼吸量高于在我国湖南地区利用涡度相关法的研究结果 4.21~6.16 tC hm⁻² a⁻¹^[5], 小于在中亚热带利用静态暗箱法测得的农田土壤呼吸年排放量 7.37 tC hm⁻² a⁻¹^[10]以及在西双版纳季节雨林、橡胶林土壤呼吸年排放量^[11, 22]。这大概是由于西双版纳地区水稻生长季节, 稻田表面淹水, 土壤呼吸量较低; 也可能与土壤有机质、不同植被类型下根系呼吸对土壤呼吸的贡献不同、海拔高度、研究及估算方法等因素有关。

研究了西双版纳稻田生态系统呼吸和土壤呼吸的特征及与水热因子和氮肥施用量的关系, 估算了年土壤呼吸量以及年 CO₂-C 净固定量。由于本研究为大田操作试验, 试验受到很大限制。因此, 欲深入的研究土壤呼吸的变化、影响因素、氮肥的施入对呼吸作用的影响, 还需进行室内微生物、植株培养以及长期的定位观测研究。

4 结论

(1) 西双版纳稻田生态系统呼吸日变化表现为单峰模式; 不同季节土壤呼吸日变化模式不同。稻田土壤呼吸具有明显的季节变化趋势, 表现为收割后休闲季节最高、种植前休闲季节次之、水稻生长季节最低。不同季节影响土壤呼吸的环境因素不同。土壤水分含量低于 34% 时, 土壤呼吸速率与土壤含水量呈显著正相关; 地面淹水时, 土壤呼吸速率与淹水深度呈显著负相关; 水分含量高于 38% 时, 土壤呼吸速率与温度呈指数相关。

(2) 氮肥的施用短期内促进土壤呼吸; 长期考虑氮肥的施用对稻田土壤呼吸和生态系统呼吸无影响, 但较高的氮肥用量抑制植株呼吸作用。

(3) 稻田 NQ N150 和 N300 处理土壤年呼吸量分别为 6.27、6.31 tC hm⁻² a⁻¹ 和 5.89 tC hm⁻² a⁻¹; 稻田生态系统年净固定大气中 CO₂-C 量分别为 1.41、2.22 tC hm⁻² a⁻¹ 和 1.11 tC hm⁻² a⁻¹。

References

[1] IPCC. Climate Change: Summary for Policymakers. WG I Fourth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

[2] Jerkinson D S, Adams D E, Winkl A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. Nature, 1991, 35: 304–306

[3] Wang M, Ji L Z, Li Q R, et al. Effects of temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain. Chinese

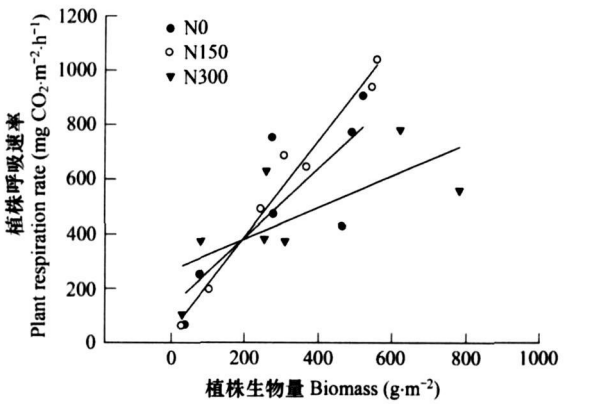


图 5 不同氮肥水平处理植株呼吸与植株生物量的关系

Fig 5 Relationship between plant respiration rates and plant biomass at different nitrogen level

- Journal of Applied Ecology, 2003, 14: 1234–1238
- [4] Tom as S M, Whitehead D, Adams J A, *et al*. Seasonal root distribution and soil surface carbon fluxes for one-year-old *Pinus radiata* trees growing at ambient and elevated carbon dioxide concentration. *Tree Physiology*, 1996, 16: 1015–1021
- [5] Ren X E, Wang Q X, Tong C L, *et al*. Estimation of soil respiration in a paddy ecosystem in the subtropical region of China. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(19): 2722–2730.
- [6] Campbell C S, Heilman J L, McInnes K J, *et al*. Diel and seasonal variation in CO₂ flux of irrigated rice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 15–27.
- [7] Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, *et al*. Advances in the research on methane emission from paddy fields and its affecting factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5): 663–669.
- [8] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: implication for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 1–6.
- [9] Pangle R E, Seiler J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 85–96.
- [10] Lou Y S, Li Z P, Zhang T L. CO₂ emissions from upland and paddy red soils in mid-subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 978–983.
- [11] Sha L Q, Zheng Z, Tang J W, *et al*. Soil respiration of tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, SW China. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2004, 34 (Suppl.): 189–197.
- [12] Han G X, Zhu B, Jiang C S. Soil respiration and its controlling factors in rice fields in the hill region of the central Sichuan basin. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(3): 450–456.
- [13] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53: 29–39.
- [14] Yang G M, Wu W M, Sha L Q. CH₄ emission from paddy fields in Xishuangbanna, SW China. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(4): 461–468.
- [16] IPCC. Climate Change The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1992.
- [17] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. Methane emission from Texas rice paddy soils. I. Quantitative multi-year dependence of CH₄ emission on soil cultivar and grain yield. *Global Change Biology*, 1997, 3: 479–489.
- [18] Huang Y, Gao L Z, Jin Z Q, *et al*. Simulating the optimal growing season of rice in the Yangtze River Valley and its adjacent area. *China Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 251–262.
- [19] Miyata A, Leuning R, Denmead O T, *et al*. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102: 287–303.
- [20] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 22: 153–160.
- [21] Werner C, Zheng X H, Tang J W, *et al*. N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. *Plant and Soil*, 2006, 289: 335–353.
- [22] Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(1): 97–103.
- [23] Bouma T J, Nielsen K L, Eissenstat D M, *et al*. Estimating respiration of root in soils: interaction with soil CO₂, soil temperature, and soil water content. *Plant and Soil*, 1997, 195: 221–232.
- [24] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: interactions with soil moisture contents and soil CO₂ concentrations. *Plant and Soil*, 2000, 227: 215–221.
- [25] Chen S Y, Li J, Lu P L, *et al*. Soil respiration characteristic in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1552–1560.
- [26] Davidson E A, Ishida F Y, Nepstad D C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, 2004, 10: 718–730.
- [27] Zhang Q Z, Wu W L, Wang M X, *et al*. The effect of crop residue amendment and N rate on soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883–2887.
- [28] Kowalenko C G, Ivarson K C, Cameron D R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, 10: 417–423.
- [29] Zhang Y L, Zhang J, Shen Q R, *et al*. Effects of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1575–1578.

- [30] Gallardo A, Schlesinger W H. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest. *Soil Biochemistry*, 1994, 26: 1409–1415.
- [31] Hart S C, Stark J M. Nitrogen limitation of the microbial biomass in an old-growth forest soil. *Ecoscience*, 1997, 4: 91–98.
- [32] Wang X B, Barley L D, Grant C A, *et al*. The acting conditions of some urease inhibitors in soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(3): 211–218.
- [33] Sun W J, Huang Y, Chen S T, *et al*. Dependence of wheat and rice respiration on tissue nitrogen and the corresponding net carbon fixation efficiency under different rates of nitrogen application. *Advances in Atmosphere Sciences*, 2007, 24(1): 55–64.
- [34] Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al*. A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758–764.
- [35] Sun W J, Huang Y, Chen S T, *et al*. CO_2 emission from soil-crop system as influenced by crop growth and tissue N content. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 1–6.
- [36] Liu H, Zhao P, Wang Y S, *et al*. CO_2 emission and its affecting factors in paddy field of agroforestry ecosystem in South China hilly area. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 471–476.

参考文献:

- [3] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1235~1238.
- [7] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展. *土壤通报*, 2004, 35(5): 663~669.
- [10] 娄运生, 李忠佩, 张桃林. 不同利用方式对红壤 CO_2 排放的影响. *生态学报*, 2004, 24(5): 978~983.
- [12] 韩广轩, 朱波, 汪长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 450~456.
- [14] 杨光明, 武文明, 沙丽清. 西双版纳地区稻田甲烷的排放通量. *山地学报*, 2007, 25(4): 461~468.
- [15] 云南省统计局, 云南省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [22] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97~103.
- [25] 陈述悦, 李俊, 陈佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1552~1560.
- [27] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2005, 25(11): 2883~2887.
- [29] 张亚丽, 张娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1575~1578.
- [32] 王小彬, Barley L D, Grant C A, 等. 关于几种土壤脲酶抑制剂的作用条件. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 211~218.
- [34] 邹建文, 黄耀, 宗良刚, 等. 稻田 CO_2 , CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 758~764.
- [35] 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO_2 排放的影响. *环境科学*, 2004, 25(3): 1~6.
- [36] 刘惠, 赵平, 王跃思, 等. 华南丘陵区农林复合生态系统稻田二氧化碳排放及其影响因素. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 471~476.
- [37] 宋文质, 王少彬, 苏维瀚. 我国农田的主要温室气体 CO_2 , CH_4 和 N_2O 排放研究. *环境科学*, 1996, 17(1): 85~88.