

UV-B 增强对稻田呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放的影响

胡正华¹, 凌慧¹, 陈书涛¹, 李琪¹, 蒋静艳², 牛传坡²

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

摘要: 于水稻生长季进行室外盆栽试验, 人工模拟 UV-B 辐射增强 20%, 采用静态箱-气相色谱法测定稻田生态系统的呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放通量, 研究 UV-B 辐射增强对稻田生态系统呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放通量的影响. 结果表明, UV-B 辐射增强没有改变稻田呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放通量的季节变化规律; 与对照相比, 平均呼吸速率经 UV-B 辐射增强处理后从 $(1\,306.83 \pm 100.21) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 降至 $(1\,266.23 \pm 147.60) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 降低 3.11%; 平均 CH₄ 排放通量从 $(2.40 \pm 0.48) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 降至 $(2.02 \pm 0.52) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 降低 15.84%. 而对照与处理的平均 N₂O 排放通量分别是 $(217.45 \pm 1.72) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(229.22 \pm 26.02) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 处理比对照增加 5.41%; 但以上指标的差异均没有达到显著水平 ($P > 0.05$). 本研究表明, UV-B 辐射增强 20% 对稻田呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放通量无显著影响.

关键词: UV-B 辐射; 稻田; 呼吸速率; CH₄; N₂O

中图分类号: X142; X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-3018-05

Impacts of Enhanced UV-B Radiation on Respiration Rate, CH₄ and N₂O Emission Fluxes from Rice Paddy

HU Zheng-hua¹, LING Hui¹, CHEN Shu-tao¹, LI Qi¹, JIANG Jing-yan², NIU Chuan-po²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To investigate the impacts of enhanced UV-B radiation on respiration rate, CH₄ and N₂O emission fluxes from soil-rice system, outdoor pot experiment was carried out during the rice growing season in 2004. The enhanced UV-B radiation treatments were simulated by a 20% increase in its intensity. The gas emission fluxes were measured by static chamber-gas chromatograph method. Results showed that enhanced UV-B radiation (T) did not change the seasonal patterns of respiration rate, CH₄ and N₂O emission. Compared to the control, mean respiration rate of T was decreased by 3.11%, from $(1\,306.83 \pm 100.21) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ to $(1\,266.23 \pm 147.60) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; Mean CH₄ fluxes was decreased by 15.84%, from $(2.40 \pm 0.48) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ to $(2.02 \pm 0.52) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; Mean N₂O emission fluxes of T was increased by 5.41%, from $(217.45 \pm 1.72) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ to $(229.22 \pm 26.02) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, while there no significant differences ($P > 0.05$). Our findings suggested that enhanced UV-B radiation had no significant effects on respiration rate, CH₄ and N₂O emission fluxes of soil-rice system.

Key words: UV-B radiation; rice paddy; respiration rate; CH₄; N₂O

全球变暖和地表紫外辐射增强是当今重大环境问题, 已引起各国政府和学术界的广泛关注. 全球变暖源于温室气体的大量排放, 农田生态系统作为人类活动最活跃的部分, 是温室气体 CH₄ 和 N₂O 的重要排放源^[1]. CO₂ 是最重要的温室气体, 其在大气中的含量已由工业革命前的 280×10^{-6} 上升到目前的 379×10^{-6} . CH₄ 是仅次于 CO₂ 的重要温室气体, 大气中 CH₄ 含量已由工业革命前的 715×10^{-9} 升至 2005 年的 $1\,774 \times 10^{-9}$, CH₄ 百年尺度增温潜势 (global warming potential, GWP) 是 CO₂ 的 25 倍, 对温室效应贡献率为 4% ~ 19% (CO₂ 占 55%)^[2]. 稻田是重要的 CH₄ 排放源, 据估算每年稻田排放的 CH₄ 达 $25.6 \text{ Tg}^{[3]}$, 占全球 CH₄ 排放总量的 8.85% ~ 18.79%^[4]. N₂O 也是重要的温室气体, 其单分子

GWP 为 CO₂ 的 298 倍, 大气中 N₂O 含量已达到 319×10^{-9} ^[2]. 大气中 N₂O 的增加还会减缓平流层臭氧空洞的修复过程^[5]. 由于大量氯氟烷烃和氮氧化物等的排放, 平流层臭氧不断变薄, 导致到达地表的 UV-B 辐射增强^[6].

近年来, 关于 UV-B 增强对农田生态系统温室气体排放的研究主要集中在冬小麦和大豆田, 认为 UV-B 增强会显著降低冬小麦、大豆系统的 N₂O 排放和土壤呼吸^[7-10]. 关于稻田温室气体排放的环境影

收稿日期: 2010-11-17; 修订日期: 2011-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40605029); 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放基金项目 (AMF 200901); 江苏省“青蓝工程”项目

作者简介: 胡正华 (1973 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为陆地-大气碳氮交换与气候变化, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

响因素也有较多研究,如氮肥施用、CO₂ 增加和秸秆还田等^[11~14],但有关 UV-B 增强对稻田温室气体排放的研究尚不多见. 本研究通过人工模拟增强 UV-B 辐射,测定稻田呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放通量,分析了 UV-B 增强对稻田温室气体排放的影响规律,以期为气候变化背景下预测区域农田温室气体排放趋势提供基础数据和科学依据.

1 材料与方法

1.1 盆栽试验与管理

室外盆栽试验于 2004 年水稻生长季在南京信息工程大学农业气象与生态试验站(32.0°N, 118.8°E)进行. 所用盆钵钵高和内圆直径均为 20 cm 左右,盆钵上口有 1.5 cm 深的凹槽,已在采样时注水与采样箱密封. 每盆钵装风干土壤约 4 kg. 为使盆钵土壤温度与大田土壤温度一致并减小盆钵间的温度差异,将盆钵高度的 4/5 埋入大田. 供试土壤为潯育型水稻土、灰马肝土属,土壤的黏粒含量为 24.26%,土壤 pH(H₂O) 值为 5.72,有机碳和全氮的含量分别为 13.55 g·kg⁻¹ 和 1.10 g·kg⁻¹. 水稻品种为武育梗 7 号,主要生育期与肥料管理见表 1.

表 1 水稻主要生长期与田间管理

Table 1 Developmental stage of rice and management	
日期	生育期与肥料管理
2004-05-20	播种
2004-05-24	出苗
2004-06-20	移栽,每盆基肥施用量为:尿素 1.29 g, KH ₂ PO ₄ 0.76 g, K ₂ SO ₄ 0.89 g
2004-07-10	施肥,每盆施肥用量为:尿素 0.32 g, KH ₂ PO ₄ 0.19 g, K ₂ SO ₄ 0.22 g
2004-07-28 ~ 30	烤田
2004-08-10	施肥,施用量同 2004-07-10
2004-08-16	孕穗
2004-08-20	施肥,施用量同 2004-07-10
2004-08-25	抽穗
2004-10-22	收获

1.2 试验设计

试验设对照(CK,自然光 UV-B 强度)和处理(T,UV-B 辐射强度比 CK 增强 20%)2 个水平,CK 与 T 各 4 重复. 采用人工增强紫外辐射方法,将 UV-B 灯管(40 W,峰值 313 nm,上海华德电光源厂)悬挂于 CK 与 T 的作物上方,但 CK 的灯管包裹 Mylar 膜(厚度 125 μm,美国杜邦公司),以滤掉 320 nm 以下的波段,使 T 与 CK 相比仅仅是 UV-B 辐射增强,而其他环境条件(自然光、UV-A 和 PAR)相同^[15]. Mylar 膜每周更换 1 次,以避免因 Mylar 膜光分解而

导致的 UV-B 过滤不均. 用 UV-B 辐射探头(SKU430,光谱范围 280 ~ 315 nm,英国 Skye 公司)和自动数字采集器(Skye-Dataglog,英国 Skye 公司)自动记录 CK 和 T 的 UV-B 辐射强度,并通过调节灯管高度使 T 比 CK 的 UV-B 辐射增强 20%. 于水稻移栽次日(2004-06-21)即进行 UV-B 增强处理,直至收获. 每天辐照时间为 08:00 ~ 16:00,阴雨天则停止处理.

1.3 气体样品采集与分析

气体样品的采集与分析采用静态箱-气相色谱法^[16]. 采样箱为 1 m 高的 PVC 圆筒,箱体直径与盆钵凹槽直径一致,外侧包有海绵和铝箔,以隔绝外部太阳辐射,减少箱内温度变化. 采集气样时将采样箱套在盆钵凹型槽内,向凹槽注水密封. 气样用带有三通阀开关的 60 mL 医用塑料针筒采集,每盆钵采样 3 个,分别于关箱后 0、10、20 min 采集,样品量为 50 mL. 每次采样时间保持一致,在 08:00 ~ 10:00 完成.

气样用经改装的 Agilent-4890D 气相色谱仪同步检测 CO₂、CH₄、N₂O 的混合比. 通过对每组 3 个样品的目标气体混合比与相应的采样间隔时间(0、10、20 min)进行线性回归,求得目标气体的排放速率. 再根据大气压、平均气温、普适气体常数、采样箱有效高度、目标气体分子量等,求得单位面积的排放量^[17]. 通过积分求得生育期目标气体累积排放量. 呼吸速率用 CO₂ 的平均排放通量表示.

1.4 环境因子测定

每次采集气样开始和结束时分别记录箱内气温.

1.5 数据分析

数据分析利用 SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 和 Office Excel 2003 软件完成.

2 结果与分析

2.1 UV-B 辐射增强对稻田呼吸速率的影响

图 1 是土壤-水稻系统的呼吸速率. CK 和 T 的呼吸速率变化规律相似,UV-B 增强处理没有改变呼吸速率的季节性变化规律,生长前期呼吸速率呈现单峰变化,08-10 施肥使呼吸速率暂时升高,生长中后期呼吸速率随着气温波动呈波浪式变化. 整个水稻生长季,CK 和 T 的平均呼吸速率分别为 (1 306.83 ± 100.21) mg·(m²·h)⁻¹ 和 (1 266.23 ± 147.60) mg·(m²·h)⁻¹. 同 CK 相比,T 处理使稻田系统平均呼吸速率降低 3.11%,但其差异不显著

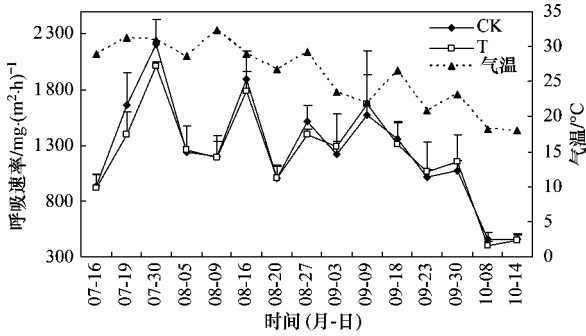


图1 UV-B 辐射增强对稻田呼吸速率的影响

Fig. 1 Impacts of enhanced UV-B radiation on respiration rate of rice paddy

($P=0.665$).

2.2 UV-B 辐射增强对稻田 CH₄ 排放的影响

CK 与 T 的稻田 CH₄ 排放通量如图 2 所示,CK 和 T 的 CH₄ 排放通量变化规律基本相似,T 处理没有改变 CH₄ 排放通量的季节变化特征,生长前期 CH₄ 排放通量数值较低,随着淹水时间延长,促进了 CH₄ 的排放,但呈不规则变化. 整个水稻生长季,CK 和 T 的 CH₄ 平均排放通量分别为 $(2.40 \pm 0.48) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(2.02 \pm 0.52) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 同 CK 相比,T 处理使稻田系统 CH₄ 平均排放通量降低了 15.84%;图 3 是水稻生长季 CH₄ 累积排放量,CK 与 T 的 CH₄ 累积排放量分别为 $(5.24 \pm 1.05) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $(4.41 \pm 1.13) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,T 处理降低了 CH₄ 累积排放量,但差异没有达到显著水平 ($P=0.324$). UV-B 辐射增强对稻田 CH₄ 的排放通量和累积排放量的影响不显著.

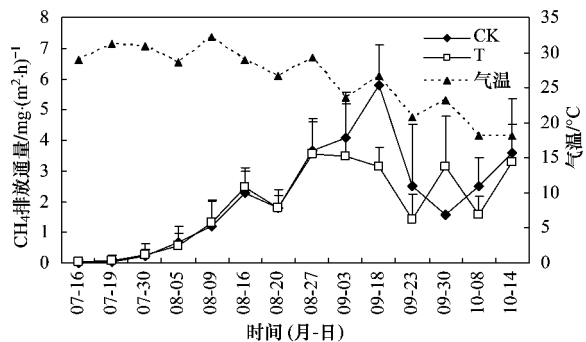


图2 UV-B 辐射增强对稻田 CH₄ 排放通量的影响

Fig. 2 Impacts of enhanced UV-B radiation on CH₄ emissions fluxes of rice paddy

2.3 UV-B 辐射增强对稻田 N₂O 排放的影响

UV-B 辐射增强对稻田 N₂O 排放通量的影响见

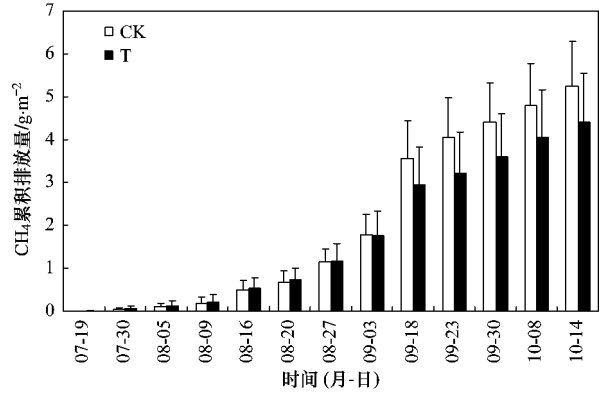


图3 UV-B 辐射增强对稻田 CH₄ 累积排放量的影响

Fig. 3 Impacts of enhanced UV-B radiation on accumulative amount of CH₄ of rice paddy

图 4,CK 和 T 的 N₂O 排放通量变化规律相似,T 处理没有改变 N₂O 排放通量的季节变化特征. 07-28 ~ 07-30 为烤田时期,CK 与 T 的 N₂O 排放通量都很高,随后淹水, N₂O 排放通量显著降低. 在水稻生长季,CK 和 T 的 N₂O 平均排放通量分别为 $(217.45 \pm 1.72) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(229.22 \pm 26.02) \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 同 CK 相比,T 处理使稻田系统 N₂O 平均排放通量增加了 5.41%; CK 和 T 的 N₂O 累积排放量分别为 $(474.91 \pm 3.76) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $(500.61 \pm 56.83) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 5),T 处理提高了 N₂O 累积排放量,但其差异不显著 ($P=0.402$).

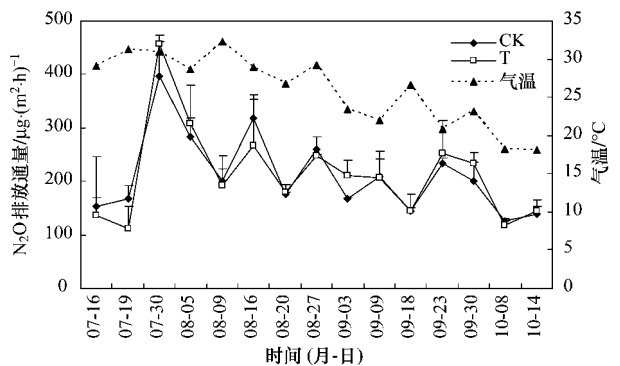


图4 UV-B 辐射增强对稻田 N₂O 排放通量的影响

Fig. 4 Impacts of enhanced UV-B radiation on N₂O emissions fluxes of rice paddy

3 讨论

3.1 UV-B 增强对稻田呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放的影响

3.1.1 UV-B 增强对稻田呼吸速率影响

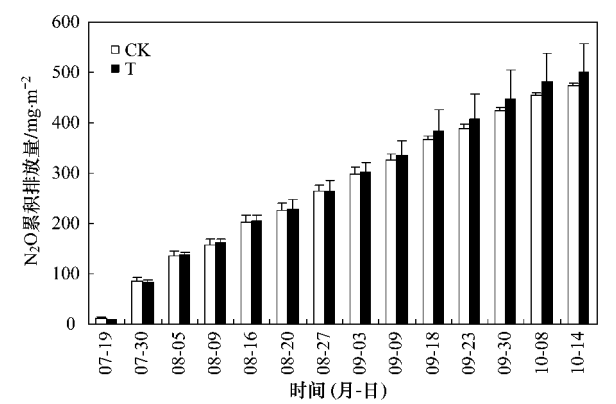


图5 UV-B 辐射增强对稻田N₂O累积排放量的影响

Fig. 5 Impacts of enhanced UV-B radiation on accumulative amount of N₂O of rice paddy

农田生态系统与大气之间通过光合作用和呼吸作用进行着快速的CO₂交换,农田系统呼吸包括植物呼吸和土壤呼吸2个部分,受多种因素的综合影响.研究表明,UV-B辐射增强会破坏植株叶片光合系统、抑制植物光合作用^[18],通过影响植物生长状况间接影响植物和土壤呼吸速率^[19,20];而稻田土壤呼吸速率显著受到土气温度和根系生物量的影响^[21,22].本研究结果表明,UV-B辐射增强处理没有明显影响水稻的生长状况,CK和T的收获生物量无显著差异(表2),且CK和T的土气温度一致,这可能是稻田呼吸速率没有因UV-B辐射增强而发生显著变化的主要原因.

表2 UV-B辐射增强对水稻生物量的影响/g·盆⁻¹

Table 2 Effects of enhanced UV-B radiation on biomass of rice/g·pot⁻¹

项目	CK	T	P
籽粒生物量	35.72 ± 4.91	32.90 ± 6.58	0.518
秸秆生物量	31.60 ± 4.15	35.55 ± 8.87	0.450

3.1.2 UV-B 辐增强对稻田CH₄和N₂O排放的影响

稻田CH₄的产生是在厌氧条件下,由产甲烷菌还原CO₂/H₂和CH₃COO⁻这2种基质生成的^[23].稻田CH₄排放受多方面因素影响,如植株生长状况、土壤性质、田间水肥管理以及环境中CO₂浓度等^[11-14].N₂O排放主要来源于土壤系统中微生物的硝化-反硝化过程,稻田在淹水条件下N₂O排放量很低,烤田期间(07-28~07-30)稻田N₂O排放量增加,这与以往研究相一致^[24,25].稻田N₂O排放主要受作物生长状况、土壤N代谢过程以及水肥管理等因素影响^[26-28].

UV-B辐射增强通过影响植物光合作用而影响植株生长,改变根系生长和根系分泌物,进而影响到

根际土壤微生物^[29,30].底物和微生物是CH₄(N₂O)产生的重要因素.本研究中CK和T处理的土壤理化性质相同、田间水肥管理一致,而T处理没有明显改变水稻的生长状况,因此CK和T处理的产CH₄(N₂O)底物及微生物组成没有明显差异,表现出UV-B增强对稻田CH₄(N₂O)的排放没有显著影响.

3.2 不同作物-土壤系统温室气体排放受UV-B影响的差异

UV-B辐射增强对不同作物-土壤系统温室气体排放的影响各异.相关研究表明:UV-B辐射增强20%显著降低大豆-土壤系统的呼吸速率和N₂O的排放,同时显著抑制大豆生长、降低大豆生物量^[7,8].在冬小麦拔节-孕穗期等敏感生育期,UV-B辐射增强降低了冬小麦-土壤系统以及植株的呼吸速率和N₂O排放^[9,10].比较大豆、冬小麦和水稻三类作物,从受UV-B辐射影响的程度来看,大豆最为明显,冬小麦次之,而水稻则几乎没受影响.其原因可能是:不同种类作物对UV-B辐射的敏感性不同,大豆最敏感,冬小麦次之,而水稻因叶片具有蜡质、硅质和角质,可形成“角质-双硅层”,对UV-B辐射起到防御作用,使得水稻对UV-B辐射敏感性最小.有研究认为UV-B增强会抑制水稻生长并降低最终产量^[31].而张文会等^[32]发现:UV-B对水稻生长及最后产量的影响因水稻品种而不同,2a的重复试验均表明,对UV-B抗性强的水稻品种,穗数、穗粒数、结实率和产量都不受UV-B影响.本试验选用的武育粳7号可能就是UV-B抗性强的水稻品种.

4 结论

UV-B辐射增强没有改变稻田生态系统呼吸速率、CH₄和N₂O排放通量的季节性变化规律;在一定程度上降低了平均呼吸速率、CH₄平均排放通量和累积排放量,提高了N₂O平均排放通量和累积排放量,但差异均不显著. UV-B辐射增强没有显著改变水稻植株的生物量.

参考文献:

[1] Koponen H T, Flojt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: a laboratory microcosm study [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36 (5): 757-766.

[2] IPCC. Climate Change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>.

[3] 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 Biogeochemistry Cycles*, 2009, **23**(GB2002): 1-15.
- [4] 李香兰, 徐华, 李小平, 等. 水分管理影响稻田甲烷排放研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(2): 221-227.
- [5] Weatherhead E C, Reinsel G C, Tiao G C, *et al.* Detecting the recovery of total column ozone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D17): 22201-22210.
- [6] Scotto J, Cotton G, Urbach F, *et al.* Biologically effective ultraviolet; surface measurements in the United States 1974 to 1985 [J]. *Science*, 1988, **239**(4841): 762-764.
- [7] 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 等. UV-B 辐射增强与秸秆施用对大豆田土壤呼吸的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1638-1642.
- [8] 胡正华, 蒋静艳, 牛传坡, 等. UV-B 增强对土壤-大豆系统 CO₂ 排放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(4): 425-430.
- [9] Hu Z H, Jiang J Y, Chen S T, *et al.* Effects of enhanced UV-B radiation on N₂O emission in a soil-winter wheat system [J]. *Water Air Soil Pollution*, 2010, **213**(1-4): 493-499.
- [10] 陈书涛, 胡正华, 李涵茂, 等. 紫外 (UV-B) 辐射增强对拔节-孕穗期小麦植株呼吸和土壤呼吸的温度敏感性影响 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1249-1254.
- [11] Xie B H, Zheng X H, Zhou Z X, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on CH₄ emission from rice fields: multi-site field observations [J]. *Plant and Soil*, 2010, **326**(1-2): 393-401.
- [12] Xie B H, Zhou Z X, Zheng X H, *et al.* Modeling methane emissions from paddy rice fields under elevated atmospheric carbon dioxide conditions [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, **27**(1): 100-114.
- [13] Ma J, Xu H, Yagi K, *et al.* Methane emission from paddy soils as affected by wheat straw returning mode [J]. *Plant and Soil*, 2008, **313**(1-2): 167-174.
- [14] Zhang G B, Zhang X Y, Ma J, *et al.* Effect of drainage in the fallow season on reduction of CH₄ production and emission from permanently flooded rice fields [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **89**(1): 81-91.
- [15] 胡正华, 蒋静艳, 牛传坡, 等. 地表 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 449-454.
- [16] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [17] 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. 81-83.
- [18] Chapin F S III, Ruess R W. Carbon cycle: The roots of the matter [J]. *Nature*, 2001, **411**(6839): 749-752.
- [19] 吴杏春, 林文雄, 黄忠良. UV-B 辐射增强对两种不同抗性水稻叶片光合生理及超显微结构的影响 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(2): 554-564.
- [20] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Static opaque chamber-based technique for determination of net exchange of CO₂ between terrestrial ecosystem and atmosphere [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(4): 381-388.
- [21] 武文明, 杨光明, 沙丽清. 西双版纳地区稻田 CO₂ 排放通量 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(9): 4983-4992.
- [22] 韩广轩, 朱波, 江长胜. 川中丘陵地区水稻田土壤呼吸及其影响因素 [J]. *植物生态学报*, 2006, **30**(3): 450-456.
- [23] 上官行健, 王明星, 沈任兴. 稻田甲烷的排放规律 [J]. *地球科学进展*, 1993, **8**(5): 23-36.
- [24] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 种植不同作物对农田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响及其驱动因子 [J]. *气候与环境研究*, 2007, **12**(2): 147-155.
- [25] Kreye C, Dittert K, Zheng X H, *et al.* Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, **77**(3): 293-304.
- [26] Li X L, Zhang X Y, Xu H, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy soil as influenced by timing of application of hydroquinone and dicyandiamide [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, **85**(1): 31-40.
- [27] Cheng W G, Yagik K, Sakai H, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: an experiment in controlled-environment chambers [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **77**(3): 351-373.
- [28] 卢燕宇, 黄耀, 郑循华. 农田氧化亚氮排放系数的研究 [J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(7): 1299-1302.
- [29] 张文会, 刘立科, 苗秀莲, 等. CO₂ 倍增及 UV-B 增强对大豆植株生长和根际微生物的影响 [J]. *西北植物学报*, 2009, **29**(4): 724-732.
- [30] Zepp R G, Erickson D J, Paul N D, *et al.* Interactive effects of solar UV radiation and climate change on biogeochemical cycling [J]. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2007, **6**(3): 286-300.
- [31] 唐莉娜, 林文雄, 吴杏春, 等. UV-B 辐射增强对水稻生长发育及产量形成的影响 [J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(10): 1278-1282.
- [32] 张文会, 孙传清, 佐藤雅克, 等. 紫外线 (UV-B) 照射对水稻产量及稻米蛋白质含量的影响 [J]. *作物学报*, 2003, **29**(6): 908-912.