

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0750

莫永亮, 胡荣桂, 赵劲松, 等. 2014. 冬水田转稻麦轮作对小麦生长季温室气体排放的影响[J]. 环境科学学报, 34(10): 2675-2683

Mo Y L, Hu R G, Zhao J S, et al. 2014. Effects of altering winter flooded paddy field to rice-wheat rotation on greenhouse gases emission during wheat growing season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(10): 2675-2683

冬水田转稻麦轮作对小麦生长季温室气体排放的影响

莫永亮¹, 胡荣桂^{1,*}, 赵劲松¹, 朱波², 贺冬冬¹

1. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070

2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

收稿日期: 2014-04-24

修回日期: 2014-05-21

录用日期: 2014-05-21

摘要: 用静态暗箱-气相色谱法测定了川中丘陵区典型冬水田(RF)及冬水田转稻麦轮作处理(RW)在小麦生长季的温室气体排放通量,并同步测定了土壤温度、水分和可溶态碳氮含量。结果表明,RW在小麦生长季的CH₄、生态系统呼吸CO₂和N₂O平均排放通量分别为0.05、117.01 mg·m⁻²·h⁻¹(以C计)和77.19 μg·m⁻²·h⁻¹(以N计),而RF相应通量分别为1.43、7.85 mg·m⁻²·h⁻¹和-0.61 μg·m⁻²·h⁻¹。RW施氮肥后出现N₂O的排放峰,其N₂O直接排放系数为1.28%。土壤可溶态有机碳含量与CO₂通量之间呈显著正相关关系($r = 0.342, p < 0.01$),与CH₄、N₂O的相关关系不显著;硝态氮、可溶态总氮含量与N₂O通量的关系为显著正相关,但与CH₄通量呈显著负相关。RF的综合增温潜势(以CO₂-eq计,下同)为3.03 Mg·hm⁻²,大于RW(-1.66 Mg·hm⁻²),暗示冬水田转稻麦轮作会降低生态系统的综合增温效应。

关键词: 冬水田; 稻麦轮作; 减排; 综合增温潜势; 温室气体; 影响因子; 直接排放系数

文章编号: 0253-2468(2014)10-2675-09

中图分类号: X17

文献标识码: A

Effects of altering winter flooded paddy field to rice-wheat rotation on greenhouse gases emission during wheat growing season

MO Yongliang¹, HU Ronggui^{1,*}, ZHAO Jinsong¹, ZHU Bo², HE Dongdong¹

1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041

Received 24 April 2014;

received in revised form 21 May 2014;

accepted 21 May 2014

Abstract: Field experiment were conducted in the hilly area of Central Sichuan to investigate the effects of altering rice-flooded-fallow (RF) to rice-wheat rotation (RW) on the emissions of CH₄, CO₂ and N₂O. Gas fluxes were analyzed by static opaque chamber and gas chromatography techniques. Soil samples were collected to determine dissolved organic carbon and nitrogen concentrations. Soil temperature and moisture were measured at the same time of gas sampling. Results showed that average CH₄, CO₂(ecosystem respiration) and N₂O fluxes for RW treatment were 0.05, 117.01 mg·m⁻²·h⁻¹ and 77.19 μg·m⁻²·h⁻¹, respectively, and were 1.43, 7.85 mg·m⁻²·h⁻¹ and -0.61 μg·m⁻²·h⁻¹, respectively, for RF treatment. N₂O flux peak was observed after nitrogen fertilizer application from RW, and the N₂O direct emission factor for RW was 1.28%. Soil dissolved organic carbon content was significantly correlated with CO₂ flux ($r = 0.342, p < 0.01$). Nitrate and dissolved total nitrogen was positively correlated with N₂O flux while negatively with CH₄ flux. Global warming potentials of three greenhouse gases were 3.03 Mg·hm⁻² for RF, which was higher than that for RW (-1.66 Mg·hm⁻²). Result of this study proved that converting RF to RW decreased global warming impact of the ecosystem.

Keywords: winter flooded paddy field; rice-wheat rotation; global warming potential; greenhouse gases; impact factors; direct emission factor

1 引言(Introduction)

近年来,大气中CH₄、CO₂和N₂O等温室气体的浓度上升速率加快(Forster *et al.*, 2007),使全球变

暖的形势更严峻,温室气体减排是研究的重要任务。包括稻田在内的农田生态系统是温室气体排放-吸收的活跃区(杨俊等,2009),可能有较大的温室气体减排空间(王小彬等,2011),但影响因素众多、作

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB417100);国家自然科学基金项目(No. 41171212)

Supported by the National Basic Research and Development Program of China (No. 2012CB417100) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41171212)

作者简介: 莫永亮(1988—),男,E-mail:yongliang_mo@163.com; * 通讯作者(责任作者),E-mail:rgu@mail.hzau.edu.cn

Biography: MO Yongliang (1988—), male, E-mail: yongliang_mo@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: rgu@mail.hzau.edu.cn

用机理复杂,使其成为国内外的研究热点和难点 (Snyder *et al.*, 2009; 蔡延江等, 2012; 江长胜等, 2004).

冬水田是一类特殊的稻田,广泛分布在我国西南及南方地区,面积达 $2.7 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (李庆逵, 1992). 已有研究表明,冬水田在长期淹水的条件下,产生大量 CH_4 (江长胜等, 2005), 亦有 CO_2 的排放 (马秀梅等, 2006). 且冬水田冬季闲置,无农作物产出. 稻麦轮作也是南方常见的稻田利用方式,在水稻收割后不蓄水,种植冬小麦. 有研究指出,将旱地改为稻田会增加 CH_4 排放 (Eusufzai *et al.*, 2010), 则水田转为水旱轮作可能会减少 CH_4 排放. 虽然有研究提出冬水田转水旱轮作可能减少温室气体排放这一展望 (韩广轩等, 2005), 但鲜见冬水田转旱作对温室气体排放影响的报道.

将冬水田转为稻麦轮作后,稻田由常年淹水转为水旱轮作,土壤的理化环境发生变化,但这些改变是否会影响温室气体排放及其影响机理仍然不是很清楚. 为此,本研究以川中丘陵地区冬水田为对象,测定其温室气体排放通量,旨在确定冬水田转稻麦轮作是否具有减排效应以及转变过程中温室气体排放的影响因子,以期对相关研究提供参考.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区域概况

试验点位于四川省盐亭县林山乡 ($31^\circ 16.2' \text{ N}$, $105^\circ 16.8' \text{ E}$, 海拔约 420 m), 研究依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站进行. 该区域为典型的丘陵地貌,属中亚热带季风气候,多年平均降水量 836 mm,年平均气温 17.3°C . 且该地区稻田土地利用方式中,水稻-冬小麦轮作、冬水田占的比例较大. 供试稻田土壤为侏罗纪蓬莱镇组紫色砂页岩风化物上发育的潜育水稻土,耕作层土壤的基本理化性质如下:有机碳 $22.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $9.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $77.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 8.20,粘:粉:砂 = 39.7%:59.5%:0.8% (质量比).

2.2 实验方法

2.2.1 实验处理 实验地原为冬水田,在小麦播种前半月左右,用优质农膜隔水,将同一块田一分为二,一半仍为冬水田 (RF),在试验期间处于淹水休耕状态;另一半排水后种植冬小麦 (RW),2012 年 11 月 3 日翻耕,2012 年 11 月 6 日施肥、播种小麦,2013 年 5 月 2 日收获小麦.

RW 常规施肥量为: NH_4HCO_3 , $130 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计); 过磷酸钙, P_2O_5 , $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 氯化钾, K_2O , $36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 在小麦地设无氮肥处理用于计算 N_2O 直接排放系数,设无植株 (裸地) 用于测定土壤异养呼吸.

2.2.2 气样采集与分析 气样采集及分析用静态暗箱-气相色谱法完成 (Zheng *et al.*, 2008). 采气箱为不锈钢材料,顶部有气压平衡管,箱内有温度探头. 采样时间为上午 8:30—11:30,扣箱后立即采集第一个样品,以后每隔 10 min 采 1 次,每个箱子共采样 5 次,立即带回实验室分析. 采样频率为每周 2~3 次,施肥和田间水分变化剧烈时采样加密.

气体样品用 HP 5890 和 Agilent 7890 气相色谱仪分析, CH_4 、 CO_2 使用 FID 检测器 (温度为 220°C), N_2O 使用 ECD 检测器 (330°C),柱温为 55°C .

2.2.3 温度、土壤水分测定 在气样采集开始和结束时,用便携式温度计 (JM 624) 测定箱内和土壤温度 (5 cm). 稻麦轮作处理的土壤体积含水率用土壤水分测定仪 (MPM-160B, 杭州汇尔仪器设备有限公司) 在采样间歇测定. 采样结束后,直接用直尺量得冬水田的水深.

2.2.4 土壤碳氮指标测定 在采集气样的同时,采集土壤样品,带回实验室分析. 测定步骤为:称取土样,加入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$ (液土比为 5 mL:1 g),振荡、离心、过滤,取滤液测定 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 DOC. DTN (可溶态总氮) 则需另取滤液加碱性过硫酸钾,放入高压灭菌锅, 126°C 下消解 80 min,冷却定容后测定. 以上碳氮指标均用 AA3 流动分析仪测定 (SEAL Auto Analyzer 3, 德国).

2.2.5 植物生物量测定 在小麦季结束时,通过样方采样法采集小麦的地上、地下部分生物量,分离茎叶、籽粒和根系,洗净、烘干、称重,用于测定最大生物量和产量.

2.3 数据处理

2.3.1 气体排放通量计算 气体排放通量的计算如下:

$$F = a \times \frac{V}{A} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times c \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); a 为气体浓度随时间的变化率 ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); V 为采样箱体积 (m^3); A 为采样箱底面积 (m^2); M 为气体摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$); V_0 为标准状态下气体的摩尔体积 ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$); P 为采样时的气压 (Pa); P_0 为标准状态下气体的压力 ($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$); T_0 为标准状态下气

体的温度(273 K); T 为采样时的气温(K); c 为量纲转换系数.采用通量线性外推法插补缺失值,用通量和时间的乘积计算气体的累积排放量.

2.3.2 CO_2 净交换量估算 生态系统 CO_2 净交换量估算参考以下公式(Huang *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2010; 宋利娜等, 2013):

$$f_{\text{CO}_2} = C_R - 0.42 \times \text{NPP} \quad (2)$$

式中, f_{CO_2} 为 CO_2 的净交换量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); C_R 为土壤异养呼吸释放的碳量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);0.42为净初级生产力的碳量换算系数($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$);NPP为收获后小麦的生物量(包括地下和地上部分)生物量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).以 $0.42 \times \text{NPP}$ 为生态系统中植物固定的净 CO_2 -C,由于土壤异养呼吸释放 CO_2 -C(C_R),因此在考虑碳收支的时候需要从净固定的碳中扣除 C_R .

2.3.3 N_2O -N直接排放系数计算 N_2O -N的直接排放系数(EF_d)采用IPCC推荐的方法,即:

$$\text{EF}_d = \frac{N_N - N_0}{N_f} \quad (3)$$

式中, N_N 为常规施氮肥处理的 N_2O -N排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N_0 为当季不施氮肥处理的 N_2O -N排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N_f 为当季施氮肥的量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

2.3.4 全球增温效应计算 3种温室气体在100年尺度的综合增温效应采用IPCC推荐的综合增温潜势计算(IPCC, 2007), CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放量分别乘以1、25和298再相加,得到 CO_2 排放当量($\text{CO}_2\text{-eq}$),即为3种气体的综合增温潜势(GWP),计算公式如下:

$$\text{GWP} = f_{\text{CO}_2} \times \frac{44}{12} + f_{\text{CH}_4} \times \frac{16}{12} \times 25 + f_{\text{N}_2\text{O}} \times \frac{44}{28} \times 298 \quad (4)$$

式中, f_{CO_2} 为 CO_2 净排放量(kg), f_{CH_4} 为 CH_4 净排放量(kg), $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 净排放量(kg).

2.3.5 统计分析 用Pearson相关分析法分析土壤温度、湿度、可溶态碳氮含量与气体通量的关系,用配对样本 t 检测比较RF和RW指标差异的显著性,以上分析均用SPSS 16.0进行.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 CH_4 排放

小麦生长季稻麦轮作处理(RW)的 CH_4 排放通量很小(图1),变化范围为 $-0.35 \sim 410.49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均通量为 $54.60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,表现为 CH_4 的弱排放源,累积排放量为 $2.52 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. CH_4 排放通量在播种后的一个月内较高,最大排放通量也出现在此段时期,此后多维持在低于 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的水平.可能原因是播种时排水不久,又有降水的影响(图2a),土壤温度也在 12°C 以上(图2b),使 CH_4 的排放通量维持在较高的水平.虽然此时地下5 cm处土壤体积含水率在45%左右(见图2c),与此后的湿度差别不大,但稍深的土壤层仍处于淹水状态,利于 CH_4 产生,不利于 CH_4 氧化消耗,出现排放峰.此后,随着土壤水分进一步减少,温度降低, CH_4 的产生量减少,而土壤通气状况进一步改善,促进了 CH_4 的氧化消耗, CH_4 排放通量降低.即使气温后回升, CH_4 排放量也没有较大变化,一直维持较低通量.

在稻麦轮作模式下,小麦生长季的 CH_4 通量普遍较低,但本研究结果高于其他研究.张岳芳等(2012)在江苏苏州的研究表明,稻麦轮作处理在麦季 CH_4 的平均排放通量为 $6.94 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,远低于

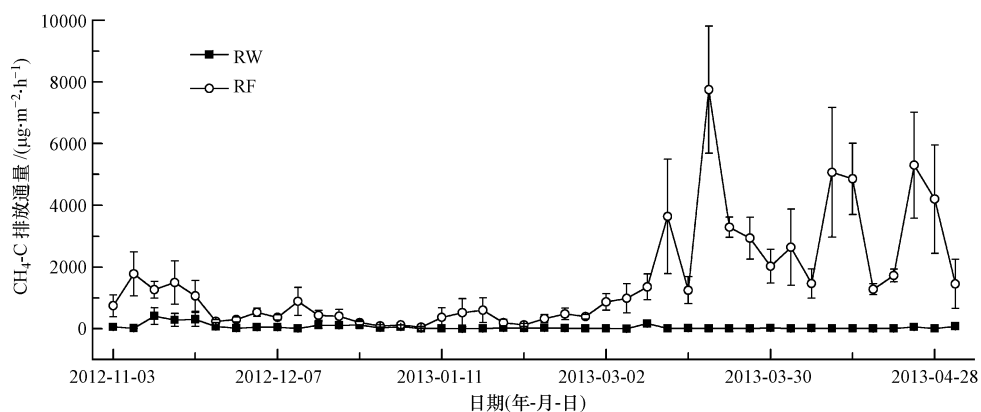


图1 稻麦轮作(RW)和冬水田处理(RF) CH_4 排放通量变化对比($n=3$)

Fig.1 CH_4 flux from rice wheat (RW) and rice flooded fallow rotation (RF) treatment ($n=3$)

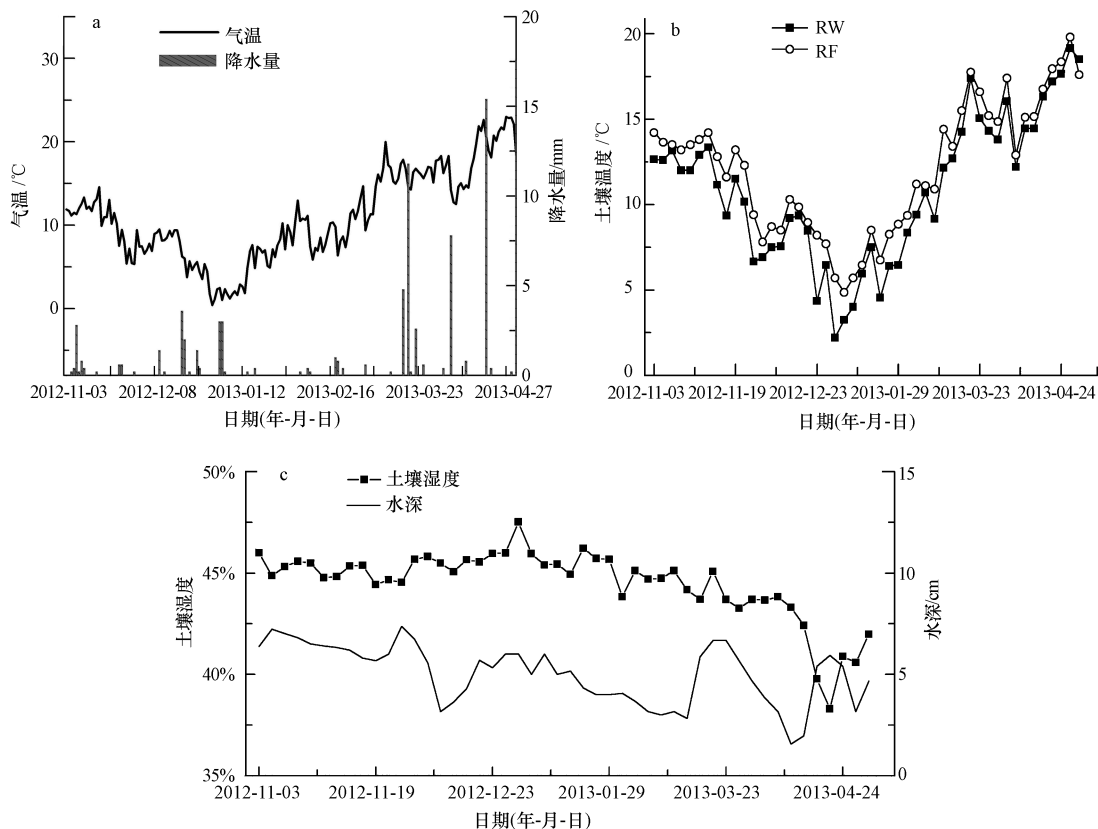


图2 试验期间气温及降水(a)、土壤温度(b)和水分变化(c)

Fig.2 Variations of (a) air temperature and precipitation, (b) soil temperature and (c) soil water

本研究的结果.Yao等(2013)研究了江苏北部的稻麦轮作处理在小麦生长季的 CH_4 排放,累积排放量也低于本研究结果.产生差异的原因可能是本研究对象为冬水田,转变为稻麦轮作后排水不畅且仍有丰富的有机物,土壤状况仍然利于甲烷产生,使其在小麦播种后一个月内仍持续较高排放水平.因此,前期土地利用方式不同对 CH_4 排放通量有较大的影响.

与稻麦轮作处理不同,同期冬闲水田(RF)的 CH_4 排放通量较高,并表现出冬季低、春夏高的季节特征.其通量变化范围为 $0.05 \sim 7.75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均排放通量是稻麦轮作处理的26倍,为强甲烷排放源.这一结果与江长胜等(2005)在川中丘陵地区得出休闲田的 CH_4 平均排放通量为 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的结果接近,也与魏朝富等(2000)在重庆冬水田休闲期得到的结果相近.

对比冬水田和稻麦轮作处理的 CH_4 排放通量可知,冬水田显著大于稻麦轮作($p < 0.01$).但在2013年1月前后,二者的排放通量大小相当.这是因为冬季气温低,冬水田出现结冰,小麦地也被霜冻,地下

5 cm土壤温度低于 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (图2b)从而抑制微生物(产甲烷菌)活性,也减缓了有机质的降解,导致 CH_4 排放通量均较低.冬水田 CH_4 排放与稻麦轮作处理明显不同,其高通量排放主要发生在3—4月,且通量的波动较大,而同期稻麦轮作处理的 CH_4 排放通量较低,波动幅度也相对较小.这是因为3—4月气温较高,留在水田中的水稻残茬降解加速,可用的碳氮物质增多,且为厌氧环境,甲烷菌的活性高.对江西冬闲田的 CH_4 排放的研究,也得到类似的结果(余佳等,2012).刘惠等(2008)指出不淹水稻田是大气 CH_4 的汇,这也证明了由水田转旱作会减少土壤 CH_4 排放量,但由于冬水田的特殊性质,转变过程仍有 CH_4 排放,而不是表现为大气 CH_4 的汇.

3.2 CO_2 排放 图3为小麦地和冬水田的 CO_2 排放通量变化特征.由图可知,稻麦轮作处理生态系统呼吸的 CO_2 通量在从小麦播种至次年收获期间,呈现先降低后升高的趋势,变化范围在 $28.17 \sim 263.55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均排放通量 $117.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.冬水田生态系统呼吸 CO_2 排放通量则维持在相对稳定的状态($0.35 \sim 27.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),平均排放通量为

7.85 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

从生态系统总呼吸的角度看,稻麦轮作处理的 CO_2 排放通量远大于冬水田 ($p < 0.01$). 因为小麦植株呼吸作用释放 CO_2 , 这是最主要的原因; 另一方面, 种植小麦的土壤处于氧化状态, 利于有机质的氧化分解并释放最终产物 CO_2 . 马秀梅等 (2006) 在

这一地区得出的 CO_2 排放通量高于本研究, 主要原因是马秀梅等从 9 月开始测定, 而 9 月的气温和土壤温度也高于 11 月, 此外, 在马秀梅的研究中还有再生稻呼吸作用的贡献, 这会对 CO_2 排放通量有较大的影响.

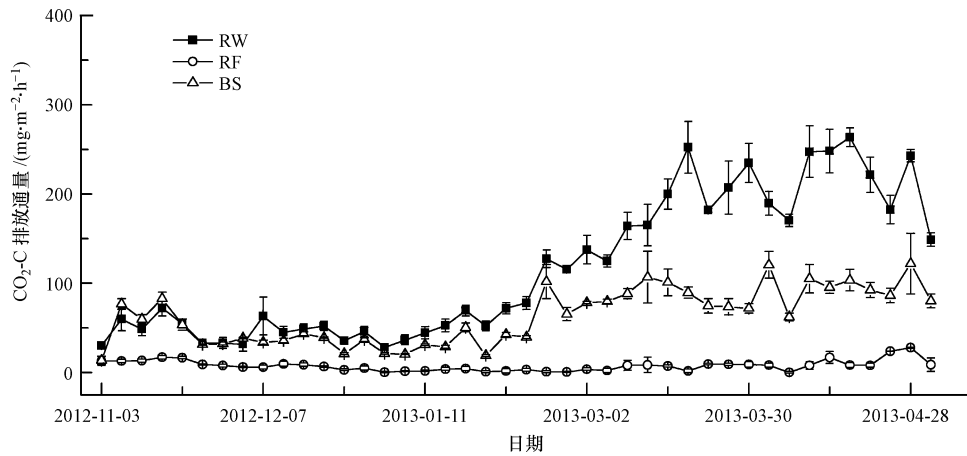


图 3 稻麦轮作 (RW)、冬水田 (RF) 生态系统总呼吸及小麦裸地 (BS) CO_2 排放通量变化对比 ($n = 3$)

Fig.3 CO_2 flux from rice wheat (RW), rice flooded fallow rotation (RF) and bare soil treatment of the wheat field (BS) ($n = 3$)

若综合考虑光合作用固定的碳和植株地上、地下部分呼吸作用以及土壤呼吸作用消耗的碳, 两个生态系统呈现不同的规律. 冬水田在冬季几乎没有植株, 光合作用固定的碳可以忽略不计, 试验中所测得 CO_2 排放通量值就近似等于 CO_2 净交换量. 而在稻麦轮作处理中, 光合作用固定的碳就比较可观. 在稻麦轮作处理中设置的无植株处理的结果显示 (图 3), 土壤呼吸作用释放 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的通量为 $63.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 整个小麦季土壤呼吸释放的碳为 $2.17 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 小麦植株地上、地下部分生物量为 $6.88 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 即光合作用固定的碳与植株及其根系呼吸碳之差为 $2.89 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, (计算方法见公式(2)), 最后得出稻麦轮作处理表现为净吸收 $\text{CO}_2\text{-C}$, 大小为 $0.72 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 冬水田是 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的净排放源, 大小为 $0.31 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 但有研究指出 (尹春梅等, 2007), 冬闲田为大气 $\text{CO}_2\text{-C}$ 汇 (从大气中吸收 CO_2), 这是因为落干水田的杂草生物量大, 且用静态明箱法采样, 田间杂草在采样时可以进行光合作用吸收 CO_2 , 而本研究中的冬水田处于淹水状态, 不适合杂草生长, 因而表现为碳排放源.

3.3 N_2O 排放

稻麦轮作处理在小麦播种、施肥后, N_2O 排放通量迅速上升, 在一周左右的时间达到最大排放峰,

之后缓慢下降, 排放峰持续时间约为 2 个月 (图 4). 在整个生长小麦季, 稻麦轮作处理的 N_2O 排放通量变幅较大, 在前期排放通量高, 后期较低, 甚至出现从大气吸收 N_2O 的现象, 季平均排放通量为 $77.19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 为 N_2O 较强的排放源, 大小为 $1.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 在江苏的稻麦轮作麦季 N_2O 排放研究中 (Ma *et al.*, 2013), 也观测到在施氮肥后出现 N_2O 排放峰值的现象. 刘平丽等 (2011) 对稻麦轮作生态系统的观测中也注意到施用氮肥后, 土壤 N_2O 浓度上升并出现排放峰值. 这是因为氮肥是激发 N_2O 排放的关键因子 (Butterbach *et al.*, 2013), 它不仅为小麦提供养分, 也为微生物直接提供矿质氮 (铵态氮或硝态氮), 刺激了硝化-反硝化菌群的生长, 使硝化-反硝化活动加剧, 产生和排放大量 N_2O (马二登等, 2009).

小麦生长季氮肥施用量为 $130 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 我们测得无氮肥处理 N_2O 的累积排放量为 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 参考公式(3)的方法计算出氮肥 N_2O 直接排放系数为 1.28%, 与 IPCC 推荐的 1.25% 接近. Ma 等 (2013) 研究得出的稻麦轮作小麦生长季 N_2O 排放系数为 2.16%, 比本研究高, 可能是氮肥种类不同造成的. Liu 等 (2010) 等的研究指出, 在稻麦轮作制度下, 前期处于持续淹水状态的稻田, 其 N_2O 排放系数低于

中期烤田处理.

同期冬水田与大气的 N_2O 交换通量变幅较平稳,且在零排放附近波动(波动范围为 $-4.92 \sim 5.60 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$),总体表现为从大气中吸收 N_2O (平均通量为 $-0.61 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,大小为 $0.03 kg \cdot hm^{-2}$).这

与黄太庆等(2010)报道的现象类似.有研究指出休闲期稻田排放 N_2O 与其水田的淹水状态有关(Liang *et al.*, 2007).在本研究中,冬水田的 N_2O 排放多次出现负值,可能与淹水有关,其具体原因有待进一步研究.

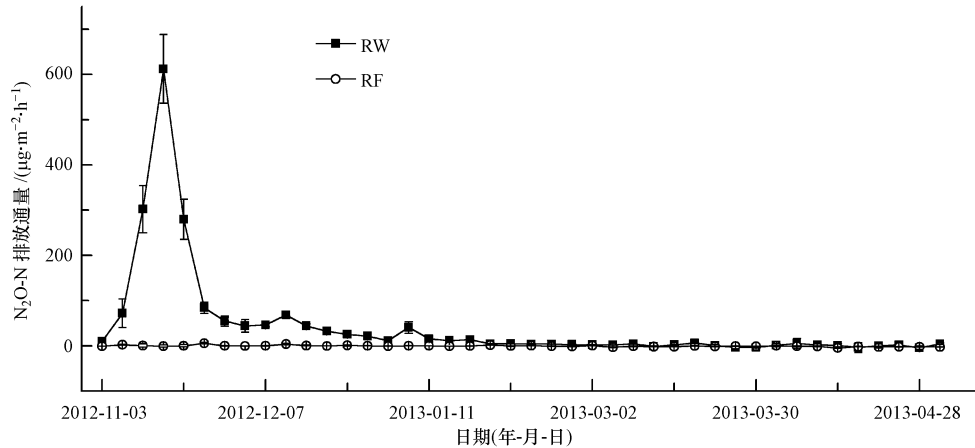


图4 稻麦轮作(RW)和冬水田(RF)处理的 N_2O 排放变化对比($n=3$)

Fig.4 N_2O flux from rice wheat (RW) and rice flooded fallow rotation treatment (RF) ($n=3$)

3.4 冬水田与稻麦轮作系统综合温室效应对比

由公式(4)计算出冬水田 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 3种温室气体的综合温室潜势为 $3.03 Mg$ (见表1),为正值,即从土壤输出 CO_2 -eq 到大气环境,对温室效应的贡献为正效应.而稻麦轮作处理的综合增温潜势为 $-1.66 Mg$,从大气吸收 CO_2 -eq,对全球温室效应的贡献为负效应.

表1 冬水田与稻麦轮作处理综合增温潜势对比

Table 1 Global warming potentials of RW and RF

实验处理	CH_4 排放量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	CO_2 排放量/ ($Mg \cdot hm^{-2}$)	N_2O 排放量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	综合增温潜势/ Mg
冬水田	57.32	0.31	-0.03	3.03
稻麦轮作	2.52	-0.72	1.91	-1.66

在稻麦轮作处理中,光合作用固定的 CO_2 占重要作用,不仅抵消了 CH_4 和 N_2O 的增温效应,还有碳盈余.这一结果与宋利娜等(2013)的报道较一致,即在未扣除灌溉、机械和肥料等农业生产过程及投入产生的 CO_2 -eq 前,小麦农田系统是大气碳汇.在冬水田处理中, CH_4 对增温效应的贡献大于 60%.以上结果表明,从温室气体排放及其增温效应的角度来看,冬水田转稻麦轮作是对环境有益的.

用样方采样法,得出小麦籽粒产量为 $(4.87 \pm 0.06) Mg \cdot hm^{-2}$ (烘干重).相比之下,冬水田闲置,

产量为零.因此,从农作物产出的角度出发,冬水田转稻麦轮作是对农户有利的.

3.5 环境因子与温室气体排放通量的相关关系

施加氮肥(碳酸氢铵)后,稻麦轮作处理土壤铵态氮未出现大幅度上升,与冬水田处理一样呈现出下降的趋势,二者差别不明显(图5a).而稻麦轮作处理的DTN和硝态氮含量迅速上升,之后DTN呈总体下降趋势,硝态氮呈现的总体趋势是先上升后下降(图5b,5c).与稻麦轮作相比,冬水田处理的DTN和硝态氮含量较低,未出现大幅度波动.以上现象可能与该地土壤为钙质紫色土有关,紫色土呈碱性, $pH > 8$,这会使得氮素难以以 NH_4^+ 的形态存在;施加碳酸氢铵的方式是表施,而不是深施.这些因素极大地促进了碳铵水解和硝化反应(李永梅等,2003;徐佑贤等,1982),因此,试验中可以观察到DTN和硝态氮上升迅速,而铵态氮含量低.在1月前,各处理的DTN都出现上升现象,铵态氮也有总体上升的趋势,而硝态氮含量则呈下降趋势.通过比较冬水田处理和无氮肥处理的硝态氮变化,可看出无氮肥处理的波动幅度大于冬水田处理.这是因为冬水田处理持续淹水,来自外界的影响因素少,可以基本维持硝态氮浓度稳定,而无氮肥处理的小麦对降水、气温等外来因素的扰动更为敏感.

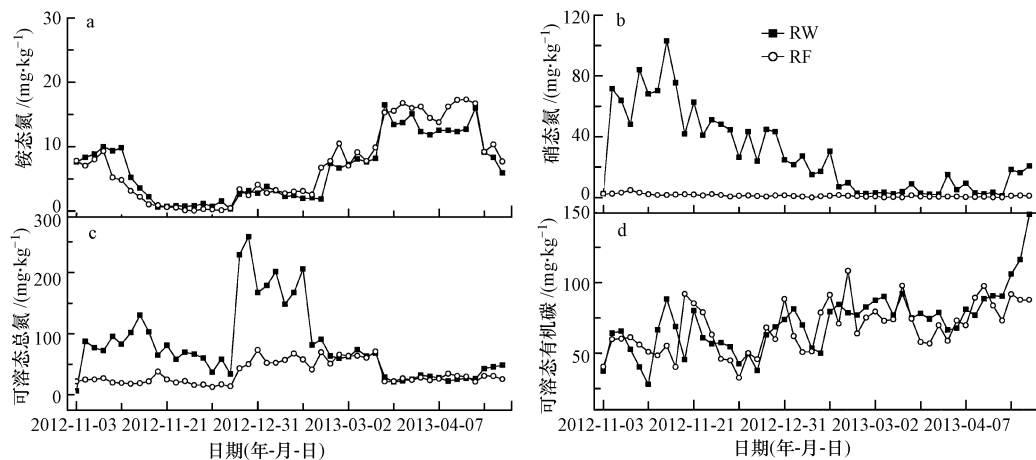


图5 土壤 NH_4^+ 、 NO_3^- 、DTN 和 DOC 含量(RW 为稻麦轮作,RF 为冬水田)

Fig.5 Variations of ammonium, nitrate, dissolved total nitrogen and dissolved organic carbon concentrations in soils (RW for rice wheat rotation, RF for rice flooded fallow rotation)

对温室气体排放通量和环境因子进行了 Pearson 相关分析,结果如表 2 所示.可以看出,土壤硝态氮含量与 N_2O 排放通量存在显著正相关关系 ($r = 0.800$, $p < 0.01$, $n = 123$),这说明土壤硝态氮和土壤 N_2O 排放通量存在某种联系.由于施加的氮肥是铵态氮,在田间条件下,一部分铵态氮很快转化为硝态氮,该过程会释放 N_2O ,同时也造成土壤

硝态氮累积(Canfield *et al.*, 2010).比较图 4 的 N_2O 排放通量和图 5 的土壤硝态氮含量,发现二者的变化趋势基本一致.很多文献对矿质氮(铵态氮与硝态氮之和)促进 N_2O 排放这一结果进行了报道,从我们的研究结果可以看出,矿质氮中对 N_2O 排放起关键作用的是硝态氮.

表 2 土壤气体排放通量与环境因子的 Pearson 相关分析结果

Table 2 Pearson correlation analysis between soil gases flux and environmental factors

	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	DOC-C	DTN-N	温度	湿度
CH_4	-0.224 *	0.422 **	0.096	-0.197 *	0.477 **	-0.103
CO_2	-0.025	0.441 **	0.342 **	0.112	0.342 **	-0.550 **
N_2O	0.800 **	-0.072	-0.190	0.236 **	-0.013	0.081

注: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

图 5d 中,不同处理 DOC 含量的季节变化规律不明显.但翻耕后,稻麦轮作和无氮肥处理的 DOC 含量略有下降,很快又恢复到以前的水平,同期冬水田变化不明显.这可能是翻耕向土壤引入更多 O_2 ,导致土壤活性碳以 CO_2 等形式损失,DOC 含量稍有下降.冬水田转旱作,相当于富含碳氮的淹水土壤排水,可以刺激微生物生长(Fenner and Freeman, 2011),降解有机质,进一步促进微生物活动,释放 CO_2 .从图 3 中也可以看出,翻耕后的稻麦轮作处理 CO_2 排放通量有上升趋势,而冬水田的 CO_2 排放通量变化不明显.前人的研究也注意到不同耕作处理的 DOC 含量差异不显著的现象(Hao *et al.*, 2013),这可能是 DOC 与土壤碳库之间存在动态平衡,可以在一定的条件下相互转换,对外界变化有缓冲能

力,维持着这一体系的平衡.相关分析显示,土壤 DOC 含量与 CO_2 排放通量呈极显著正相关关系($p < 0.01$),而与 CH_4 排放通量的相关关系不显著($p > 0.05$).Iqbal 等(2008)的研究也得到 DOC 与 CO_2 排放通量呈显著相关关系.在土壤中,DOC 是 CH_4 、 CO_2 产生的必要条件,它的大小表征土壤中的生物可利用态碳的多少,是微生物生长必需的碳源,又是微生物代谢的产物,其含量可能影响 CH_4 、 CO_2 排放通量.但同时,影响 DOC 的因素很多,特别是在田间状态下,也有研究得出含碳气体排放通量与土壤 DOC 含量没有显著相关关系.

土壤温度与 CH_4 、 CO_2 排放通量之间存在显著正相关关系($p < 0.01$),但与 N_2O 排放通量的相关关系不显著($p > 0.05$).而土壤湿度与 CO_2 排放通量

之间有显著负相关关系,但对 N_2O 和 CH_4 通量的影响不显著.很多研究报道了土壤温度、湿度影响气体排放通量的事实 (Smith *et al.*, 1998; Yang *et al.*, 1998; 邹建文等, 2003). 本研究未得到湿度与气体通量存在显著相关关系,可能是因为本研究的对象为冬水田,田间湿度变化幅度不大(图 2c)且不受控制,因而不能在较大湿度区间研究土壤湿度与气体通量的相关关系.

4 结论 (Conclusions)

将冬水田转为稻麦轮作可降低小麦生长季农田的 CH_4 排放量,增加光合作用固碳量,而 N_2O 的排放量则会升高.冬水田转稻麦轮作温室气体排放差异的驱动因子为氮肥、土壤水分和土壤温度.若考虑三种温室气体的综合增温效应,则稻麦轮作在减排上更加有优势.

致谢:中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站为本试验提供了分析条件,李锡鹏、罗有才等在采样和分析过程中提供了帮助,特此致谢.

责任作者简介:胡荣桂(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为陆地生态系统碳氮循环.E-mail: rghu@mail.hzau.edu.cn.

参考文献 (References):

- Butterbach B K, Baggs E M, Dannenmann M, *et al.* 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society (B: Biological Sciences)*, 368(1621): 20130122
- 蔡延江, 丁维新, 项剑. 2012. 土壤 N_2O 和 NO 产生机制研究进展 [J]. *土壤*, 44(5): 712-718
- Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. 2010. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle [J]. *Science*, 330(6001): 192-196
- Eusufzai M K, Tokida T, Okada M, *et al.* 2010. Methane emission from rice fields as affected by land use change [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4): 742-748
- Fenner N, Freeman C. 2011. Drought-induced carbon loss in peatlands [J]. *Nature Geoscience*, 4(12): 895-900
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [R]. Cambridge: Cambridge University Press. 211-214
- 韩广轩, 朱波, 江长胜, 等. 2005. 川中丘陵区稻田甲烷排放及其影响因素 [J]. *农村生态环境*, 21(1): 1-6
- Hao Q, Cheng B, Jiang C. 2013. Long-term tillage effects on soil organic carbon and dissolved organic carbon in a purple paddy soil of Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(5): 260-265
- 黄大庆, 马煜春, 熊正琴, 等. 2010. 不同种植制度对稻田旱作季节 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 26(6): 519-523
- Huang Y, Zhang W, Sun W, *et al.* 2007. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999 [J]. *Ecological Applications*, 17(3): 692-701
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC* [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 211-213
- Iqbal J, Hu R G, Du L J, *et al.* 2008. Differences in soil CO_2 flux between different land use types in mid-subtropical China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9): 2324-2333
- 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 2004. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展 [J]. *土壤通报*, 35(5): 663-669
- 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 2005. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮排放研究 [J]. *应用生态学报*, 16(3): 539-544
- 李庆逵. 1992. *中国水稻土* [M]. 北京: 科学出版社. 99-115
- 李永梅, 杜彩琼, 林春苗, 等. 2003. 铵态氮肥施入土壤中的转化 [J]. *云南农业大学学报*, 18(1): 26-29
- Liang W, Shi Y, Zhang H, *et al.* 2007. Greenhouse gas emissions from northeast China rice fields in fallow season [J]. *Pedosphere*, 17(5): 630-638
- 刘惠, 赵平, 王跃思, 等. 2008. 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 [J]. *生态学杂志*, 25(5): 471-476
- 刘平丽, 张啸林, 熊正琴, 等. 2011. 不同水旱轮作体系稻田土壤剖面 N_2O 的分布特征 [J]. *应用生态学报*, 22(9): 2363-2369
- Liu S W, Qin Y M, Zou J W, *et al.* 2010. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 408(4): 906-913
- 马二登, 马静, 徐华, 等. 2009. 施肥对稻田 N_2O 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 28(12): 2453-2458
- 马秀梅, 朱波, 杜泽林, 等. 2006. 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*, 24(6): 1199-1202
- Ma Y C, Kong X M, Yang B, *et al.* 2013. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice-wheat rotations with integrated soil-crop system management [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164: 209-219
- Smith K, Thomson P, Clayton H, *et al.* 1998. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils [J]. *Atmospheric Environment*, 32(19): 3301-3309
- Smith P, Lanigan G, Kutsch W L, *et al.* 2010. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(3): 302-315
- Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, *et al.* 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133(3/4): 247-266
- 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 2013. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应 [J]. *中国生态农业学报*, 21(3): 297-307
- 王小彬, 武雪萍, 赵全胜, 等. 2011. 中国农业土地利用管理对土壤固碳减排潜力的影响 [J]. *中国农业科学*, 44(11): 2284-2293

- 魏朝富, 高明, 黄勤, 等. 2000. 耕种制度对西南地区冬水田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 37(2): 157-165
- 徐佑贤, 黄钰, 李延芳. 1982. 碳酸氢铵肥料的水解反应[J]. 土壤肥料, (3): 35-36
- 杨俊, 韩圣慧, 李富春, 等. 2009. 川渝地区农业生态系统氧化亚氮排放[J]. 环境科学, 30(9): 2684-2693
- Yang S S, Chang H L. 1998. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 69(1): 69-80
- Yao Z S, Zheng X H, Wang R, *et al.* 2013. Greenhouse gas fluxes and NO release from a Chinese subtropical rice-winter wheat rotation system under nitrogen fertilizer management [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 118(2): 623-638
- 尹春梅, 谢小立, 王凯荣. 2007. 稻田冬闲期 CO₂ 气体排放的观测研究[J]. 生态环境, 16(1): 71-76
- 余佳, 刘刚, 马静, 等. 2012. 红壤丘陵区冬闲稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量的研究[J]. 生态环境学报, 21(1): 55-58
- 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 2012. 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 21(9): 1521-1526
- Zheng X H, Mei B L, Wang Y H, *et al.* 2008. Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology [J]. Plant and Soil, 311 (1/2): 211-234
- 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 2003. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 23(6): 758-764