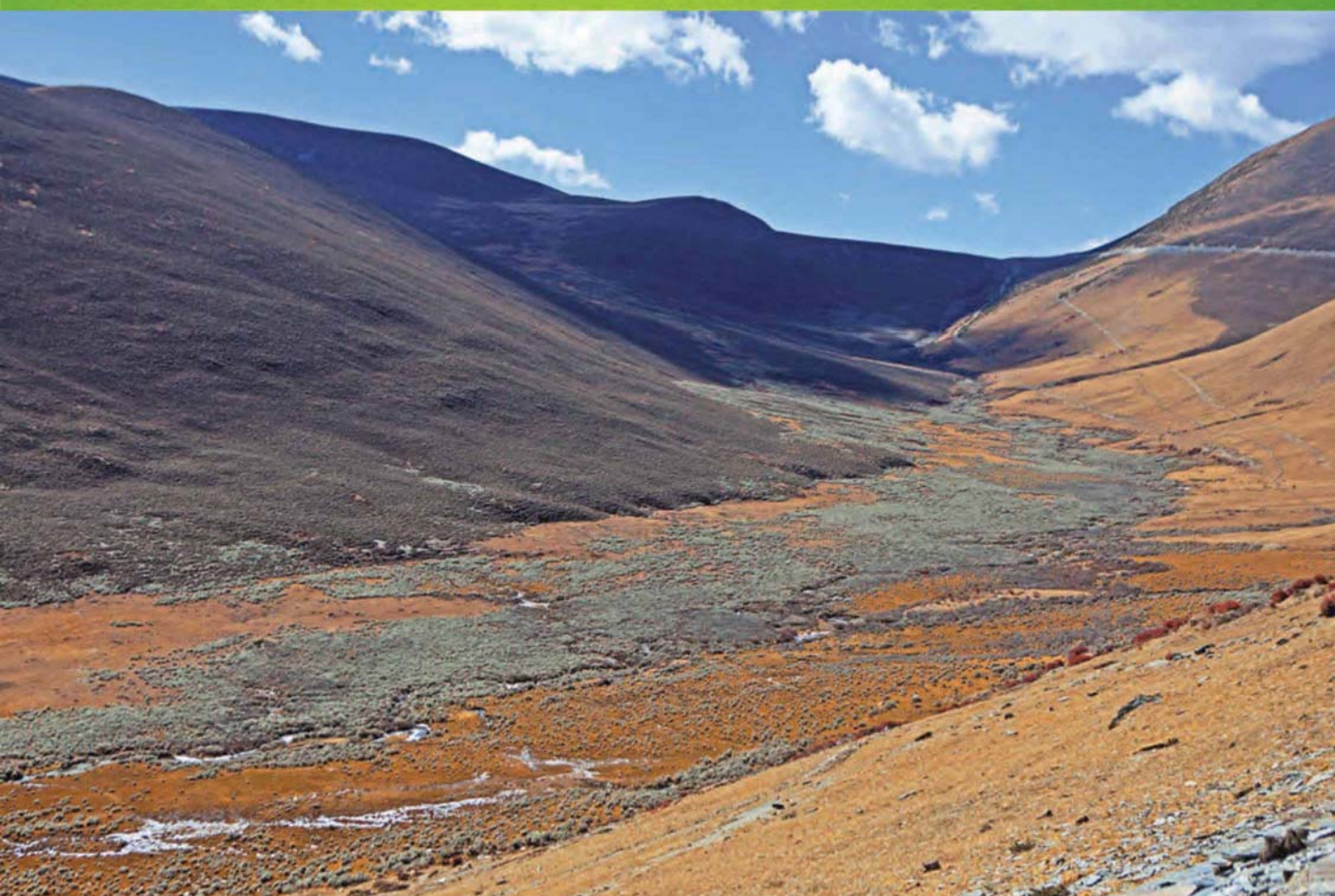


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

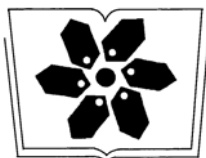
中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 18 期

2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 美国农业生态学发展综述 黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
- 水足迹研究进展 马 晶, 彭 建 (5458)
- 江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价 孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
- 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 董 蕾, 李吉跃 (5477)
- 生态化学计量学特征及其应用研究进展 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
- 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征 王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
- 城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响 付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
- 华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性 王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
- 沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性 施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
- 水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响 申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
- 珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性 吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
- 不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应 杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
- 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
- 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH_3 挥发及氮肥利用率的影响 马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
- 香梨两种树形净光合速率特征及影响因素 孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
- 沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响 赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
- 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
- 基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究 汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
- 不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响 陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
- 黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
- 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
- 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
- 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
- 基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计 黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
- 4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化 何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
- 干旱荒漠区银白杨树干液流动态 张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
- 模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响 刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
- 金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
- 温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较 张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
- 断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响 吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
- 光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响 高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
- 绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响 王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系	王文君, 杨万勤, 谭 波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响	陈 纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律	潘 影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征	姚 昕, 朱广伟, 高 光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究	王传辉, 吴 立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应	李正国, 杨 鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征	王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力	贾宝全, 王 成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化	秦纪洪 王 琴 孙 辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例	周 健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析	夏富强, 唐 宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例	魏 超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性	梁 君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例	刘耕源, 杨志峰, 陈 彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例	徐 飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿	李惠梅, 张安录, 王 珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应	李春林, 刘 淼, 胡远满, 等 (5952)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 514 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 59 * 2013-09	



封面图说: 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201304110682

秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 高清竹, 李勇, 石生伟, 廖育林, 范美蓉, 许超. 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响. 生态学报, 2013, 33(18): 5546-5555.

Qin X B, Li Y E, Wan Y F, Gao Q Z, Li Y, Shi S W, Liao Y L, Fan M R, Xu C. The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5546-5555.

土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体 排放通量的影响

秦晓波¹, 李玉娥^{1,*}, 万运帆¹, 高清竹¹, 李勇², 石生伟¹,
廖育林³, 范美蓉⁴, 许超⁵

(1. 农业部农业环境重点实验室/中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 3. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125;

4. 长沙环境保护职业技术学院, 长沙 410004;

5. 广东普通高校土壤环境与废物资源农业利用重点实验室/华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:为探讨土壤氧气可获得性(SOA)对双季稻田温室气体排放的影响,利用静态箱气相色谱法对多种管理措施影响下稻田温室气体排放通量和土壤氧化还原电位(Eh)、pH值及田间淹水深度(H)等3种SOA因子进行了观测。结果表明,甲烷(CH₄)排放最集中的Eh值、pH值和H范围分别为-100—0mV、5<pH<6和1—5cm,3个范围内分别观测到48.8%、61.1%和77.0%的CH₄排放,其中H对CH₄排放影响最明显,单独由就可解释37.8%的CH₄排放通量($P<0.0001$)。对于氧化亚氮(N₂O),观测到较多的负通量,其纯排放最密集的3种SOA因子的范围分别是:0—100mV、5<pH<6和1—5cm,而200—300mV是其排放的临界Eh范围,高于此范围N₂O排放极少。厌氧的反硝化过程是双季稻田N₂O产生的主导过程。可为水稻田温室气体排放机理研究提供基础数据。

关键词:CH₄和N₂O排放;土壤氧气可获得性;氧化还原电位;土壤pH值;土壤湿度

The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field

QIN Xiaobo¹, LI Yu'e^{1,*}, WAN Yunfan¹, GAO Qingzhu¹, LI Yong², SHI Shengwei¹, LIAO Yulin³, FAN Meirong⁴, XU Chao⁵

1 The Key Laboratory for Agro-Environment, Ministry of Agriculture/ Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

3 Soils and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China

4 Changsha Environmental Protection College, Changsha 410004, China

5 Key Laboratory of Soil Environment and Waste Reuse in Agriculture of Guangdong High Education College of Natural Resource and Environment/South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: To investigate the effect of soil oxygen availability (SOA) on greenhouse gas (GHG) emissions from a double-rice cropping field, a two-year observation of greenhouse gas emissions of seven treatments from a rice paddy field was conducted by using the static closed-chamber method. There were seven management practices (or treatments), including CWS (Conventional Tillage+Without Straw Residues+Urea), NWS (No Tillage+Without Straw Residues+Urea), SCU

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费资助(201103039);国家“973”计划项目(2012CB417106)

收稿日期:2013-04-11; **修订日期:**2013-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yueli@ami.ac.cn

(Conventional Tillage+Without Straw Residues+Controlled-Release Urea), HN (High Stubbles+No Tillage+Urea), HC (High Stubbles+Conventional Tillage+Urea), SN (Straw Cover+No Tillage+Urea) and SNF (Straw Cover+No Tillage+Urea+Continuous Flooding). Three SOA factors, i.e., soil redox potential (Eh), pH and field water level (H) of each treatment was determined simultaneously. Our results indicated that methane emissions was sensitive to all of the three SOA factors. The critical values at which the higher methane fluxes were observed, for Eh, pH and H was $-100\sim 0\text{mV}$, $5\sim 6$ and $1\sim 5\text{cm}$, respectively, and therefore the proportions of methane emitted from these three ranges were 48.8%, 61.1% and 77.0%, respectively. The determination coefficient of linear or quadratic polynomial regression models of the methane fluxes and the individual three SOA factors ranged from 0.04 to 0.38 ($P<0.05$). Among of them, H was attributed to the most important influence on methane emissions, explaining 37.8% of the variance of methane emissions from paddy field ($P<0.05$). While for nitrous oxide (N_2O), large amount of negative fluxes occurred, If only positive N_2O emissions considered, most of them were observed under conditions of $0\text{mV}<\text{Eh}<100\text{mV}$, $5<\text{pH}<6$ and $1\text{cm}<H<5\text{cm}$. We found that an Eh range of $200\sim 300\text{mV}$ was the critical Eh interval for N_2O production, over which there was almost no N_2O emissions. Moreover, the denitrification under anaerobic environment was regarded as the primary process for N_2O production. This study can provide basic data for the mechanic research of GHGs emission from paddy field.

Key Words: CH_4 and N_2O emission; soil oxygen availability; redox potential; pH value; soil humidity

水稻 (*Oryza sativa* L.) 田是大气温室气体重要排放源, 研究表明, 包括稻田在内的湿地系统贡献了全球 15%—45% 的甲烷 (CH_4) 排放^[1], 而农业土壤也贡献了全球 42% 的氧化亚氮 (N_2O) 排放^[2]。稻田温室气体排放受多种因素影响, 其中包括土壤氧气可获得性 (SOA)。土壤氧气是植物和微生物过程的关键来源物质, 在生态系统层次下的生物地球化学循环过程中, 土壤氧气发挥着举足轻重的作用^[3]。SOA 表征土壤的湿度状况和氧化还原平衡体系, 较大的 SOA (较多的氧化剂存在) 表明较强的土壤氧化状态, 反之 (较多的还原剂存在) 则表明较强的土壤还原状态。土壤氧化还原电位 (Eh 值) 和土壤酸碱度 (pH) 是 SOA 的 2 个主要表征, 而土壤湿度状况是决定 SOA 的主导因素^[4]。通过调节土壤水分状况降低 SOA 能改变土壤微生物群落的组成和活性^[5], 降低土壤 Eh 值, 以及改变养分可获得性和利用方式^[3, 6]。

土壤氧气可获得性对 CH_4 和 N_2O 产生过程具有重要影响。 CH_4 产生和消耗过程都有其一定的 SOA 适应范围, 而 N_2O 同时产生自硝化和反硝化过程, 较低 SOA 条件下的反硝化过程是 N_2O 产生的主导过程^[7]。对于湿地土壤氧气消解的过程即 SOA 演化机制, 以往已有较多研究^[5]。但同时关注多种田间管理措施影响下双季稻田温室气体排放与土壤 Eh 值、pH 值及土壤水分状况关系的综合研究较少。因此, 本研究目的在于对多种管理措施影响下双季稻田温室气体排放通量与土壤 Eh 值、pH 值及土壤水分状况的变异进行回归分析, 探讨温室气体较适 SOA 因子的变化范围, 从而揭示稻田温室气体减排的 SOA 调控途径。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验设置在湖南省长沙县干杉乡农技站 ($113^\circ 11'\text{E}$, $28^\circ 8'\text{N}$), 属中亚热带季风湿润气候区。年平均气温 17.5°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 $5450^\circ\text{C}\cdot\text{d}$, 年日照 1700 h, 全年降雨量 1 300—1 400 mm, 且集中在 4—6 月, 此间降雨量约占全年的 50%—60%。供试土壤为第四纪红壤发育的红黄泥田, 质地为砂质黏土。试验前土壤本底值如下: 全氮: 2.14g/kg , 有机质: 32.70g/kg , 水解性氮 233.30mg/kg , 有效磷 11.10mg/kg , 速效钾 122.00mg/kg , pH 5.30 (水:土 = 2.5:1)。早晚稻全部采用抛秧的方式移栽。供试早稻品种为常规稻\湘早粳 24, 晚稻为杂交稻-丰源 191, 耕作制度是早稻-晚稻-冬闲。早稻于 4 月初播种, 4 月底施基肥后移栽, 7 月中旬收获; 晚稻于 6 月初播种, 7 月中上旬施基肥后移栽, 10 月中旬收获。

试验设 7 处理 3 重复, 共 21 个小区, 小区面积 15.6m^2 , 随机区组排列。7 个处理分别为: 1) 翻耕稻草不还田 (CWS); 2) 免耕稻草不还田 (NWS); 3) 翻耕稻草不还田硫包膜控释尿素 (SCU); 4) 免耕高茬还田 (HN); 5) 翻耕高茬还田 (HC); 6) 免耕覆盖还田 (SN); 7) 免耕覆盖还田淹灌 (SNF)。除处理 7 采用淹灌外, 其它处理均为中期晒田 (MSD), 除处理 3 采用控释尿素外, 其它处理均为普通尿素。各处理设计详见表 1。

1.2 温室气体和土壤 Eh 值、pH 值及田间淹水深度的观测

在水稻生育期内每 4d 采集 1 次温室气体样品, 温室气体排放通量观测采用手动静态箱-气相色谱法, 采样箱设计、具体取样过程和浓度测定及通量计算方法详见有关文献^[8-9]。

在 2008—2009 年共 4 个生长季, 进行了 3 种 SOA 因子 (土壤 Eh 值、pH 值和田间淹水深度) 的连续观测, 获取了 87 次观测数据。土壤 pH 值用便携式 pH 计 (意大利 HANNA-HI991000) 测量; 土壤 Eh 值用便携式 Eh 计 (新加坡 Ecoscan-pH6) 测定; 这 2 项测量是在每次采气试验之后于每小区内随机测量 1 个点, 然后求 3 个小区平均值作为每处理每日测定值, 测量深度大约

表 1 试验处理设计

Table 1 Design of experimental treatment

处理 Treatment	N(尿素)/(kg/hm ²) Urea		P ₂ O ₅ /(kg/hm ²)		K ₂ O/(kg/hm ²)		控释尿素/(kg/hm ²) Controlled-release urea		留高茬/(kg/hm ²) High stubble		稻草覆盖/(kg/hm ²) Rice straw cover		灌溉 Irrigation	耕作 Tillage
	E	L	E	L	E	L	E	L	E	L	E	L		
翻耕稻草不还田 CWS	150	180	90	45	90	112.5							MSD	CT
免耕稻草不还田 NWS	150	180	90	45	90	112.5							MSD	NT
翻耕稻草不还田控 释肥 SCU			90	45	90	112.5	441	529					MSD	CT
免耕高茬还田 HN	97.8	127.8	76.05	31.2	32.55	54.9			4500	4500			MSD	NT
翻耕高茬还田 HC	97.8	127.8	76.05	31.2	32.55	54.9			4500	4500			MSD	CT
免耕覆盖还田 SN	97.8	127.8	76.05	31.2	32.55	54.9					4500	4500	MSD	NT
免耕覆盖还田淹灌 SNF	97.8	127.8	76.05	31.2	32.55	54.9					4500	4500	CF	NT

E: 早稻, L: 晚稻; 稻草用量是根据植株氮磷钾的含量, 换算后各处理 N、P、K 总量相同; MSD: 中期晒田, CF: 持续淹灌, CT: 翻耕, NT: 免耕; CWS: Conventional Tillage+Without Straw Residues+Urea, NWS: No Tillage+Without Straw Residues+Urea, SCU: Conventional Tillage +Without Straw Residues+Controlled-Release Urea, HN: High Stubbles+No Tillage+Urea, HC: High Stubbles+Conventional Tillage+Urea, SN: Straw Cover+No Tillage+Urea, SNF: Straw Cover+No Tillage+Urea+Continuous Flooding

5—10cm。田间淹水深度在每次取气样的同时用直尺测量。田间温度的测定使用 HOBO 自动温度记录仪 (HOBO Pro-U23003, 美国 Onset 公司, 2007), 于耕作前分别将 2 个温度记录仪埋入试验田中间一个重复的 7 个小区中, 分别用于测定 5cm 深土层温度和采样箱内贴地表气温的变化, 每季收获后取出读取数据。日降雨量数据获取自湖南省长沙县气象局。

1.3 数据和统计分析

为了探讨多种田间管理措施对稻田温室气体排放通量与 SOA 关系的综合影响, 我们对每日各处理温室气体排放通量平均值与 SOA 因子 (7 处理平均值) 进行了对比分析, 所有数据均以平均值加减标准误差的形式呈现。所有分组数据利用 R^[10] 软件进行正态性检验 (Shapiro 检验); 利用 SAS JMP (V10.0, SAS Inc., U.S.A) 软件进行平均值的 Tukey-Kramer 多重比较; 相关分析利用 R 软件 Spearman 秩相关检验 (不满足正态分布的数据) 和 Pearson 相关检验 (满足正态分布的数据); 利用 R 软件线性或非线性回归模型进行回归分析。

2 结果

2.1 稻田温室气体排放通量与 SOA 因子的季节变异

双季稻田温室气体排放通量与环境因子 (各处理日平均值) 具有显著的季节变化趋势 (图 1 和图 2)。从 2 个图中可以看出双季稻田 CH₄ 排放通量主要集中在生长季中前期, 排放峰呈前期单峰或多峰型, 前期排放峰都持续较长时间, 在晒田后 CH₄ 排放通量持续较低, 即使淹灌处理, 由于水稻植株生长特性和养分供给的差异, CH₄ 排放通量也不如生长季前期。而各处理 N₂O 平均排放通量季节变化趋势与 CH₄ 不同, 整个生育期表现为峰谷交替状态, 与 CH₄ 的主要差异表现在水稻生长季后期, 即晒田后仍能出现 2—3 个排放峰。

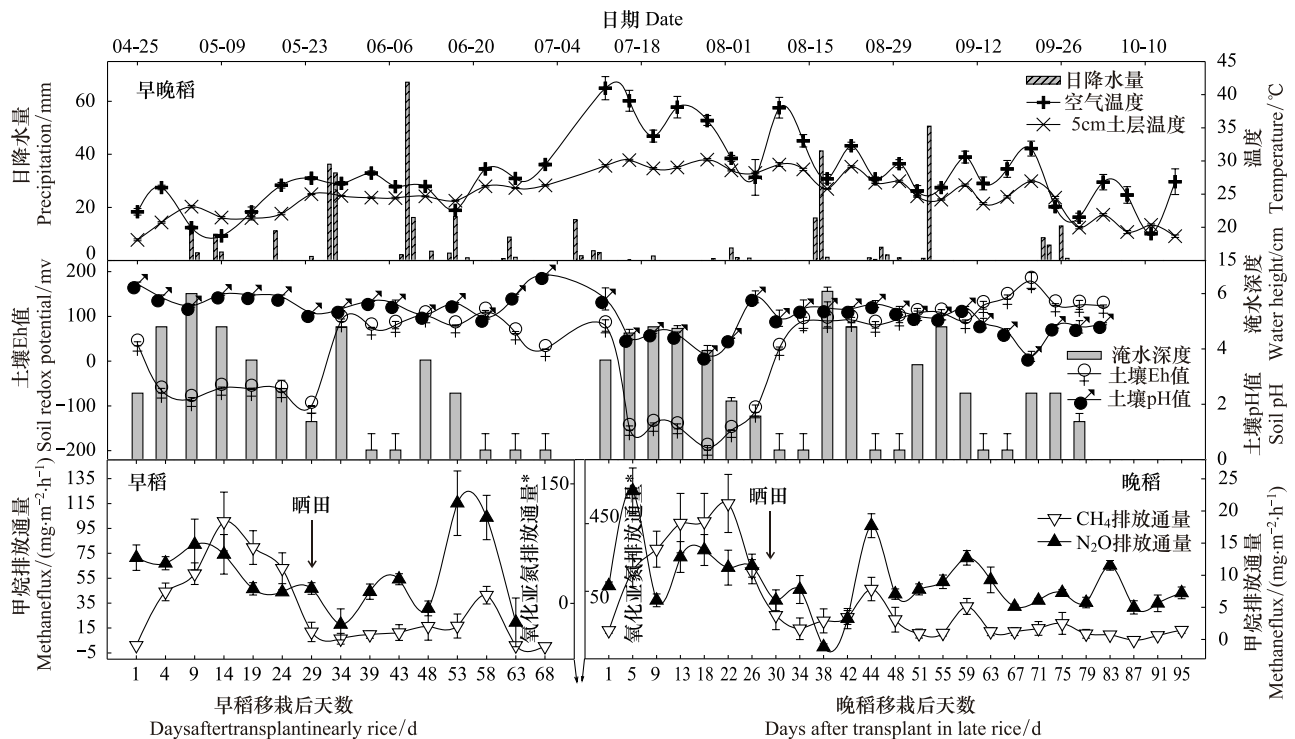


图 1 2008 年早晚稻田温室气体平均排放通量与环境因子的季节变化趋势

Fig.1 Seasonal variation of mean of GHGs flux and environmental factors from double rice in 2008

图中数据为取样日 7 个处理的均值; * Nitrous oxide flux/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)

对于 3 种 SOA 因子, 土壤 Eh 值与 pH 值间具有相反的季节变化趋势, 而与田间淹水深度则呈正相关关系 (图 1 和图 2)。在每个生长季泡田开始后的生长季早期, 土壤 Eh 值均较低, 持续到晒田, 复水后即使土壤中部分氧化剂得以再生, 但 Eh 值总体较高, 直到收获。值得注意的是, 在泡田开始后的第 1 个观测日, 土壤 Eh 值往往呈正值 (除 2009 年早稻, 当天田间淹水深度最大), 这说明土壤孔隙中的氧气是随着水分含量的增加逐渐消耗掉的, 土壤也渐渐进入还原状态, 直到中期晒田。土壤 pH 值的变化趋势与 Eh 值正好相反, 其与田间淹水深度的季节变化也呈正相关关系。实际上, 田间淹水深度控制了 Eh 值和 pH 值的季节变化趋势。

受不同处理的影响, 各生长季各处理温室气体排放有不同响应。各处理 CH₄ 排放量差异显著 ($P < 0.05$), 且明显高于 N₂O ($P > 0.05$) (表 2)。早稻 CH₄ 最大排放量出现在 2008 年早稻 SNF, 其值达到 675.02 kg C/hm², 最小值出现在 2009 年早稻 NWS,

值为 95.65 kg C/hm^2 。晚稻 CH_4 排放量低于早稻,最大排放量出现在 2009 年晚稻 SNF, 值为 253.29 kg C/hm^2 , 而最小值仅为 2007 年晚稻 HN 的 9.37 kg C/hm^2 。相比 CH_4 , N_2O 排放量早稻小于晚稻,最大排放量出现于 2008 年早稻 SNF, 值为 0.08 kg N/hm^2 , 最大值则为 2008 年晚稻 HN 的 0.55 kg N/hm^2 , 晚稻 N_2O 排放量最大值出现在 2008 年晚稻 HN 的 2.26 kg N/hm^2 , 观测到的最小值则是 2009 年晚稻 SNF 的 0.17 kg N/hm^2 。

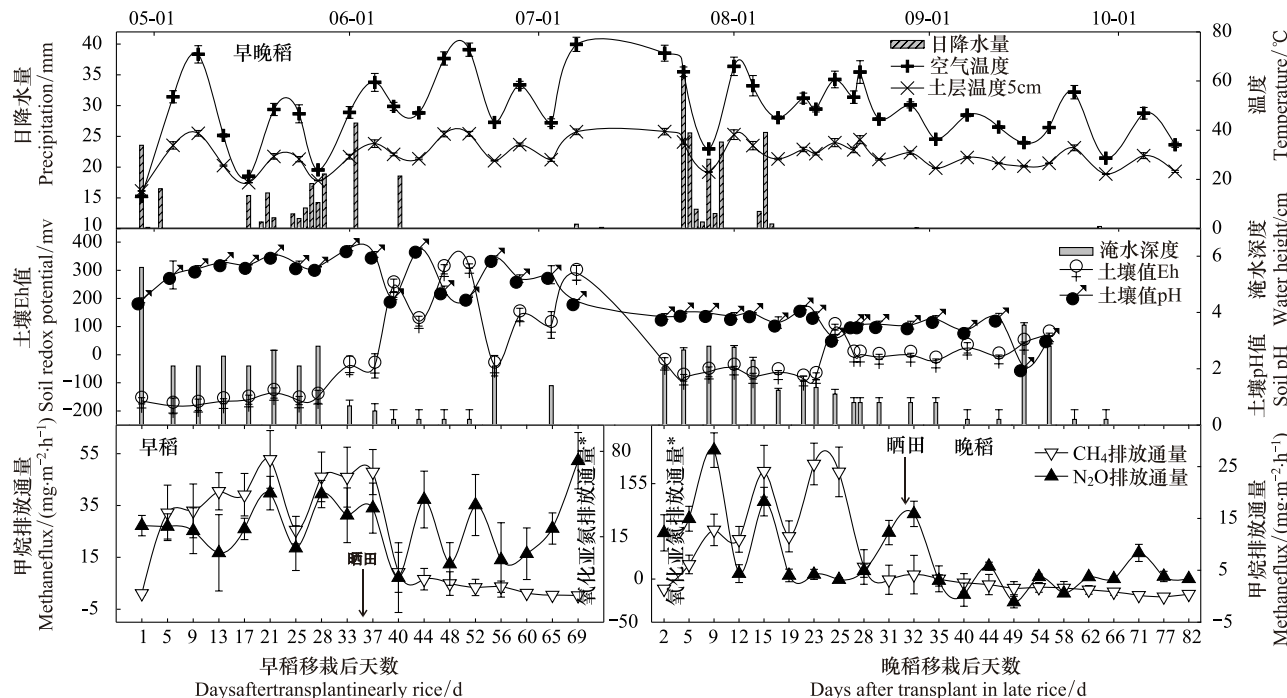


图 2 2009 年早晚稻田温室气体平均排放通量与环境因子的季节变化趋势

Fig.2 Seasonal variation of mean of GHGs flux and environmental factors from double rice in 2009

2.2 土壤氧气可获得性对稻田温室气体排放通量的影响

受不同田间管理的影响,温室气体排放通量对稻田土壤氧气可获得性也有不同的响应(图 3)。各处理甲烷排放与 Eh 值呈极显著负相关关系,其中高茬翻耕还田处理 HC 二者相关性最强($r=-0.56^{***}$),SNF 处理相关性最弱($r=-0.30^{**}$)。与 Eh 值相反,各处理甲烷排放与 pH 值呈显著正相关关系,但二者相关性比 Eh 值弱,其中 NWS、CWS 和 SN 处理相关性最弱($r=0.29^*$),相关性最强的为 SNF 处理($r=0.37^{***}$),由于 SNF 处理为淹灌,足可见水分条件对稻田土壤特性及温室气体排放的控制。对于各处理田间土壤淹水深度,其与甲烷排放均呈正相关关系,显著性最小的为 SCU 和 SN 处理($r=0.22^*$),相关性最强的为 HC 处理($r=0.32^{**}$)。

利用 R 软件逐步回归模型进行了各处理温室气体排放通量与土壤 SOA 因子的回归分析(表 3),发现二元或三元回归效果明显好于一元回归,并且甲烷的回归方程拟合度明显高于氧化亚氮。甲烷与 SOA 因子的关系主要可由 Eh 和 pH 的二元二次模型回归(SCU, HC, HN, SN 和 SNF 处理),平均拟合决定系数 R^2 达到 0.4, CWS 和 NWS 两处理分别为 Eh 和 pH 的二元一次和二元线性与指数混合模型,平均拟合决定系数 R^2 较低,也达到 0.37,说明甲烷排放通量与 SOA 因子的密切关系。可见,对于稻田甲烷排放,田间淹水深度控制下的 Eh 和 pH 值的变异才是其变异的决定因素。对于氧化亚氮,只发现其与土壤 pH 的一元一次及混合回归模型和(CWS, HN 和 SN 处理),但拟合决定系数 R^2 较低,最大仅为 0.18,这也说明了水稻田氧化亚氮排放的较大变异性。

2.2.1 土壤氧化还原电位对稻田温室气体排放通量的影响

为了探讨多种田间管理措施对稻田温室气体排放通量与 SOA 关系的综合影响,对每日各处理温室气体排放通量平均值与 SOA 因子(7 处理平均值)进行了对比分析,以期确定稻田温室气体排放与土壤 SOA 因子的平均关系的临界响应区间。

观测到的 CH_4 排放通量范围在 $0-100.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,而土壤 Eh 值范围为 $-193.93-315.07 \text{ mV}$ 。分析显示,当 $\text{Eh} \leq 0 \text{ mV}$ 时, CH_4 平均排放通量为 $24.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 远大于 $\text{Eh} > 0 \text{ mV}$ 时的 CH_4 平均排放通量: $3.63 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。就百分比而言, 86.3% 的 CH_4 排放通量来自 $\text{Eh} \leq 0 \text{ mV}$, 只有 13.8% 的 CH_4 排放来自 $\text{Eh} > 0 \text{ mV}$ 的环境。当土壤 Eh 值在 $-100-0 \text{ mV}$ 之间时, CH_4 排放最密集, 有 48.8% 的 CH_4 排放产生自这一范围, 另外, 有 20.1% 的 CH_4 排放出现在 $-150-100 \text{ mV}$ 之间, 当 $\text{Eh} < -150 \text{ mV}$ 时, 仍有 17.5% 的 CH_4 排放。当土壤 $\text{Eh} > 0 \text{ mV}$ 时, CH_4 排放较低, 只有 13.3% 的 CH_4 排放来自 $0-200 \text{ mV}$ 之间, 而只有 0.4% 的 CH_4 排放出现于土壤 $\text{Eh} > 200 \text{ mV}$ 的环境下。

表 2 各生长季不同处理温室气体平均排放量
Table 2 Seasonal average flux of GHGs from different treatments

温室气体 GHG	处理 Treatment	早稻 Early rice				晚稻 Late rice							
		2008	$\alpha_{0.05}$	$\alpha_{0.01}$	2009	$\alpha_{0.05}$	$\alpha_{0.01}$	2008	$\alpha_{0.05}$	$\alpha_{0.01}$	2009	$\alpha_{0.05}$	$\alpha_{0.01}$
甲烷 CH ₄ /(kgC/hm ²)	翻耕稻草不还田 CWS	369.76±49.30	c	BC	309.94±32.99	b	BC	59.27±9.18	cd	BC	62.4±6.94	bc	B
	免耕稻草不还田 NWS	168.33±31.54	e	D	95.65±15.90	d	D	26.92±5.29	d	C	49.22±6.87	c	B
	翻耕稻草不还田控释肥 SCU	480.16±64.64	b	B	302.29±36.83	bc	BC	100.13±16.21	bc	B	82.26±7.2	bc	B
	免耕高茬不还田 HN	431.27±30.17	bc	B	245.58±29.55	c	C	68.04±8.09	bcd	BC	69.41±12.43	bc	B
	翻耕高茬不还田 HC	272.62±49.30	d	CD	330.46±32.48	b	B	108.55±14.23	b	B	103.85±8.2	b	B
	免耕覆盖不还田 SN	241.70±27.46	de	D	150.42±25.18	d	D	59.52±11.43	cd	BC	60.63±13.72	bc	B
氧化亚氮 N ₂ O /(kgC/hm ²)	免耕覆盖不还田淹灌 SNF	675.02±43.79	a	A	467.14±53.18	a	A	220.88±28.96	a	A	253.29±73.85	a	A
	翻耕稻草不还田 CWS	0.36±0.49	a	A	0.22±0.39	a	A	1.28±1.46	ab	A	0.42±0.38	a	A
	免耕稻草不还田 NWS	0.45±0.39	a	A	0.45±0.52	a	A	1.64±1.73	ab	A	0.65±0.47	a	A
	翻耕稻草不还田控释肥 SCU	0.24±0.17	a	A	0.16±0.49	a	A	0.71±1.24	ab	A	0.24±0.24	a	A
	免耕高茬不还田 HN	0.55±0.40	a	A	0.32±0.19	a	A	2.26±0.97	a	A	0.55±0.42	a	A
	翻耕高茬不还田 HC	0.52±0.16	a	A	0.25±0.29	a	A	1.80±1.68	ab	A	0.42±0.43	a	A
	免耕覆盖不还田 SN	0.48±0.28	a	A	0.18±0.55	a	A	2.11±2.54	a	A	0.40±0.39	a	A
	免耕覆盖不还田淹灌 SNF	0.08±0.28	a	A	0.10±0.58	a	A	0.31±1.01	b	A	0.17±0.34	a	A

α 为进行 Tukey-Kramer 多重比较的显著水平;同一列中标记相同字母的处理间在对应显著水平上差异不显著; CWS: Conventional Tillage+Without Straw Residues+Urea, NWS: No Tillage+Without Straw Residues+Urea, SCU: Conventional Tillage +Without Straw Residues+Controlled-Release Urea, HN: High Stubbles+No Tillage+Urea, HC: High Stubbles+Conventional Tillage+Urea, SN: Straw Cover+No Tillage+Urea, SNF: Straw Cover+No Tillage+Urea+Continuous Flooding

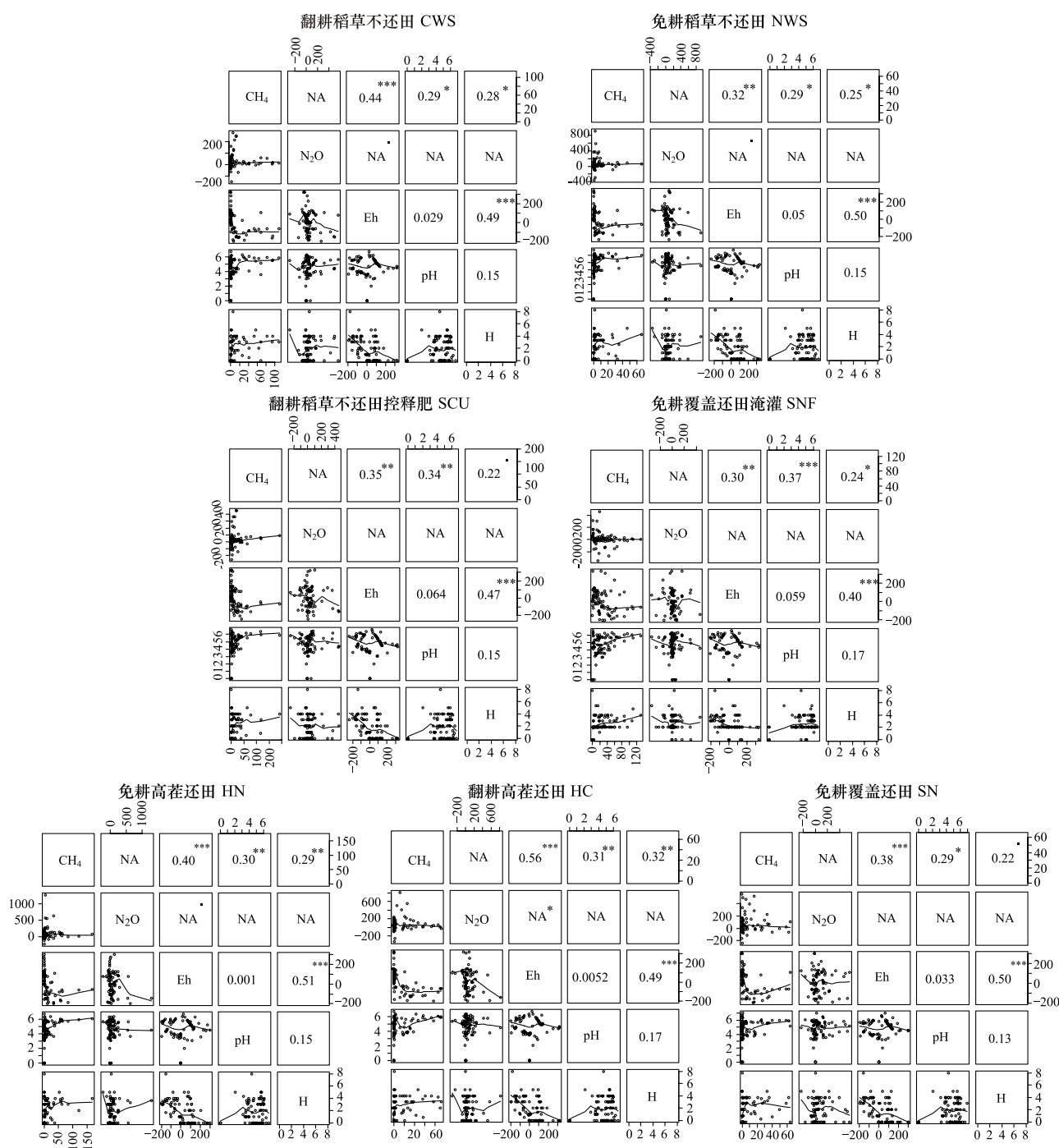


图3 各处理温室气体排放通量与 SOA 因子的散点图及相关系数图

Fig.3 Scatterplot and coefficient of correlation between GHGs flux and SOA factors from different field practices

各处理字母意义参见表1;数据自由度 $df=75$; ***, **, * 和 · 分别代表 0.001, 0.01 和 0.05 的统计显著水平

观测的 N₂O 排放通量范围在 $-280.09 \sim 610.67 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间;同时发现 N₂O 排放通量出现较多的负值(图1和图2),如果排除其负通量,则范围为 $0.41 \sim 610.67 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。分析表明,当 $Eh \leq 0\text{mV}$ 时, N₂O 平均排放通量为 $61.23 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 而 $Eh > 0\text{mV}$ 时,此值仅为 $38.87 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;如果排除土壤 N₂O 负通量,这2个值相差不大,分别为 $96.33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $83.72 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 可见,更多的 N₂O 来自 $Eh < 0\text{mV}$ 的环境,厌氧的反硝化过程是其主导产生过程。就全部数据百分比而言,有 59.5% 的 N₂O 排放来自 $Eh \leq 0\text{mV}$ 的环境。排除负通量,单就 N₂O 排放来讲,70.1% 的 N₂O 排放来自 Eh 在 $-150 \sim 100\text{mV}$ 之间;大于或小于这个范围, N₂O 排放通量均减少。在 $Eh > 100\text{mV}$ 和 $< -150\text{mV}$ 时,分别只有 16.3% 和 14.8% 的 N₂O 排放。而当 $Eh > 200\text{mV}$ 之后,只有极少 N₂O 排放,大约占全部排放量的 2.0%;当 $Eh > 300\text{mV}$ 时,也只有 0.7% 的 N₂O 排放。可见 $200 \sim 300\text{mV}$ 是 N₂O 产生的临界 Eh

值范围,如果 Eh 值大于此范围,反硝化过程停止发生,N₂O 产生量下降。数据还表明,当 Eh 值低于这个范围时,在 0—100mV 之间,N₂O 产生量最大,占全部排放的 26.0%,说明此范围内硝化和反硝化同时达到最适宜程度,而如果 Eh 值低于此范围,反硝化过程虽然得到加强,但产物中 N₂O:N₂比值会减小,更多的 N₂O 则被还原为氮气。

表 3 各处理温室气体排放通量与 SOA 因子的回归模型
Table 3 Regression model of GHGs flux and SOA factors of different treatments

处理 Treatment	回归模型 Regression model	R ²	P
翻耕稻草不还田 CWS	FC = -0.10039×EH+3.48383×pH	0.4282	2.95×10 ⁻¹⁰
	FN = 11.865×pH	0.1438	0.000395
免耕稻草不还田 NWS	FC = -0.02730×EH+0.78885×pH+0.01427×e ^{pH}	0.331	3.38×10 ⁻⁷
翻耕稻草不还田控释肥 SCU	FC = -0.0814×EH+0.78381×pH ²	0.4016	1.62×10 ⁻⁹
免耕高茬还田 HC	FC = -0.09656×EH+0.68132×pH ²	0.3992	1.88×10 ⁻⁹
翻耕高茬还田 HN	FC = -0.11451×EH+0.71072×pH ²	0.5716	5.83×10 ⁻¹⁵
	FN = -0.4242×EH+20.7213×pH+15.0674×H	0.1755	0.000662
免耕覆盖还田 SN	FC = -0.05155×EH+0.41107×pH ²	0.4227	4.21×10 ⁻¹⁰
	FN = 14.36×pH	0.1758	8.71×10 ⁻⁵
免耕覆盖还田淹灌 SNF	FC = -0.0612×EH+1.14118×pH ²	0.5883	1.31×10 ⁻¹⁵

回归自由度(df)为 75;FC 为 CH₄排放通量(mg m⁻² h⁻¹);FN 为 N₂O 排放通量(μg m⁻² h⁻¹);EH 为土壤 Eh 值,pH 为土壤 pH 值;H 为田间淹水深度;CWS: Conventional Tillage+Without Straw Residues+Urea, NWS: No Tillage+Without Straw Residues+Urea, SCU: Conventional Tillage + Without Straw Residues+Controlled-Release Urea, HN: High Stubbles+No Tillage+Urea, HC: High Stubbles+Conventional Tillage+Urea, SN: Straw Cover+No Tillage+Urea,SNF: Straw Cover+No Tillage+Urea+Continuous Flooding

2.2.2 土壤 pH 值对稻田温室气体排放通量的影响

观测到的土壤 pH 值范围在 3.09—6.68 之间,而且土壤 pH 值与稻田 CH₄排放通量呈正相关变化关系($r>0$,图 3)。数据分析表明,在 pH 值 ≥ 5 时,CH₄平均排放通量为 18.42mg·m⁻²·h⁻¹,而土壤 pH 值 <5 时,CH₄平均排放通量较低,只有 6.44 mg·m⁻²·h⁻¹。就百分比而言,pH 值 ≥ 5 时,稻田排放了 81.7%的 CH₄。在土壤 pH >6 时,CH₄平均排放通量也较低,只有 20.6% 的 CH₄排放,稻田 CH₄排放量最集中的 pH 值范围为 5 $<$ pH <6 ,此范围内,观测到 61.1%的稻田 CH₄排放通量。

N₂O 排放通量与土壤 pH 值也呈正相关关系(图 3),但相关性较弱。考虑全部观测数据,在 pH 值 <5 的条件下,N₂O 平均排放通量较高,达 59.69μg·m⁻²·h⁻¹,而当 pH 值 ≥ 5 时,N₂O 平均排放通量较低,为 43.23μg·m⁻²·h⁻¹。如果排除负通量,2 种 pH 值范围内 N₂O 平均排放通量近乎相同,分别为 90.18μg·m⁻²·h⁻¹和 91.06μg·m⁻²·h⁻¹。就全部数据百分比而言,有 62.1%的 N₂O 排放来自土壤 pH 值 ≥ 5 的情况下。土壤 N₂O 排放集中于 5 $<$ pH <6 的范围内,有 56.4%的 N₂O 排放来自此范围。一元回归分析没有找到稻田 N₂O 排放通量与土壤 pH 值之间的显著拟合模型。

2.2.3 田间淹水深度对稻田温室气体排放通量的影响

田间淹水深度与稻田 CH₄排放通量呈显著正相关($r>0$, $P<0.05$,图 3)。观测到的淹水深度(H)范围在 0—8cm 之间。数据分析表明,当 H >0 时,CH₄平均排放通量较大,值为 15.97mg·m⁻²·h⁻¹,而当田间土壤无水层存在(湿润或干燥)时,CH₄平均排放通量较低,只有 4.26mg·m⁻²·h⁻¹。就百分比而言,有 92.2%的 CH₄排放来自 H >0 cm 的情况。H 处于 1—5cm 之间是 CH₄排放最集中的范围,有 77.0%的 CH₄排放来自这个范围,当 H 继续升高,在 5—8cm 范围内,CH₄排放通量下降,只占全部排放的 0.3%。

稻田 N₂O 排放与田间淹水深度也呈正相关关系($r>0$,图 3)。分析表明,如果只考虑 N₂O 纯排放通量,H >0 cm 和 H=0cm 时 N₂O 平均排放通量分别为 87.08μg·m⁻²·h⁻¹和 87.85μg·m⁻²·h⁻¹,二者几乎相同。就全部数据百分比而言,有 77.1%的 N₂O 排放来自 H >0 cm 时。在 H 处于 0—1cm 之间时,有 12.1%的 N₂O 排放,与 CH₄相同,N₂O 排放最集中的 H 范围是 1—5cm,共有 77.5%的 N₂O 排放来自这一范围,同样当 H 过高时,在 5—8cm 之间,只有 0.4%的 N₂O 纯排放,如果考虑 N₂O 负通量,则在这个 H 范围内,N₂O 呈净吸收状态。

另外,N₂O 负通量占排放总量的 24.3%。当 H >0 cm 时,N₂O 平均负通量为 -70.20μg·m⁻²·h⁻¹,而在 H=0cm 时,此值只有 -25.95μg·m⁻²·h⁻¹,就总量而言,有 85.4%的 N₂O 负通量发生在田间有水层的时期,另外 14.6%的负通量发生在田间土壤湿润或干燥时期。

3 讨论

3.1 CH₄与土壤氧气可获得性

土壤 Eh 值、pH 值及淹水深度是关系土壤氧气可获得性的土壤湿度状况的表征。以往研究认为 CH₄产生的 Eh 临界值为 -215—-150mV^[11-12],针对此临界值的研究多为实验室培养实验,然而田间状况较为复杂,有的田间试验发现 Eh 低于 -110mV

时稻田土壤就有 CH_4 产生^[13]。但 CH_4 并不只产生于较低的 Eh 值条件下,在 Eh 值较高条件下也观测到较多的 CH_4 排放^[14],本试验也得出了与上述研究一致的结论。对于 CH_4 排放通量与 Eh 值间的关系,Yagi 等^[15] 得出了线性拟合模型($\text{FCH}_4 = -0.0285 \times \text{eh} + 9.874$),笔者认为,二者间二次多项式模型决定系数明显高于线性模型,二者间关系不能简单由线性方程拟合^[14]。

土壤 pH 值与 CH_4 排放通量的关系也非常密切。有研究认为产 CH_4 菌具有适应酸性环境的能力^[16],而嗜 CH_4 菌在较低 pH 值条件下适应能力不如产 CH_4 菌^[17],因此酸性条件下可能出现较多的 CH_4 排放,研究结果证明了这一点。对温带和亚寒带地区泥炭土的研究发现, CH_4 产生环境中对产 CH_4 菌适宜的 pH 值范围是 5.5—7.0,这与研究结果一致。另一个在湖南稻田的试验^[9] 也发现稻田 CH_4 排放通量集中于 pH 值 5—6.8 之间,进而得出 CH_4 排放通量与土壤 pH 值间呈极显著指数拟合关系($\text{FCH}_4 = 0.000033e^{2.2273\text{pH}}$),这也是 CH_4 排放通量与土壤 pH 值间相关关系的不同表现形式,不同研究条件是这种差异形式产生的原因。

田间淹水深度直接控制着土壤的湿度状况。本文没有观测土壤含水量的变化,只以田间淹水深度作为宏观条件进行了分析, CH_4 排放通量与淹水深度的密切关系说明产 CH_4 菌的活性与土壤含水量的正相关关系,其实在土壤含水量较高时,好氧的嗜 CH_4 菌活性自然会下降,这使 CH_4 氧化过程受抑制,继而导致 CH_4 排放的增加。但当田间水层过高时(>5cm),水层又会成为阻碍 CH_4 向大气传输的因素。

3.2 N_2O 与土壤氧气可获得性

稻田温室效应主要由 CH_4 贡献,观测到的 N_2O 排放通量较低且存在较多负通量,许多研究甚至认为水稻田 N_2O 排放可以忽略不计^[18]。笔者认为:土壤 Eh 值与 N_2O 产生和排放的关系较复杂,因为土壤 N_2O 来自 2 个互为可逆的过程,土壤大量产生 N_2O 的 Eh 值有其临界范围。本文研究表明厌氧的反硝化过程是 N_2O 的主导产生过程。许多室内培养实验也对土壤 N_2O 产生的临界 Eh 值进行了研究^[12-13],但由于土壤属性和地域差异,目前还没有较统一的结果,特别是对于水稻田,复杂的土壤水分特性决定了更多的研究有待开展以明确这一问题。

土壤 pH 值是影响硝化过程的首要因素和反硝化过程的次要因素^[19]。研究也发现了 N_2O 排放通量与 pH 值的密切关系,实际上, N_2O 易产生于弱酸性条件下。多数研究认为土壤温湿度是主导 N_2O 排放的最重要因素之一^[20]。研究发现田间存在水层时 N_2O 排放通量均值高于无水层时,而且有水层存在时 N_2O 负通量明显高于无水层时,这说明 N_2O 负通量多发生于反硝化过程充分进行的极度厌氧状态下,以往研究也发现了这种水分含量过高状态下 N_2O 排放减少的现象^[21]。

4 结论

(1) 3 种土壤氧气可获得性因子对 CH_4 排放通量均具有极显著的影响。 CH_4 排放通量与土壤 SOA 因子的关系可由 Eh 值和 pH 值的二元二次多项式回归拟合。 N_2O 排放通量与土壤氧气可获得性因子的相关性较弱,但其产生过程和排放也受土壤氧气可获得性的重要影响,较低土壤氧气可获得性水平下的反硝化过程是其主导产生过程。

(2) 土壤氧气可获得性决定的土壤氧化还原状态的强弱是土壤温室气体产生过程的直接主导因素,进而间接影响温室气体的排放。土壤氧气可获得性与温室气体排放通量间的关系不能简单由线性方程拟合,非线性回归拟合研究更能客观揭示温室气体对土壤氧气可获得性因子的临界响应区间。

References:

- [1] Prather M, Derwent R, Ehhalt D, Fraser P, Sanhueza E, Zhou X. Other trace gases and atmospheric chemistry // Houghton J T, Meira Filho L G, Bruce J, et al, eds. Climate change 1994. Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 73-126.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report. The fourth assessment report of IPCC. Contribution of work group I II and III// Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A, eds. IPCC, Switzerland, Geneva, 2007: 104-104.
- [3] Crawford R. Oxygen availability as an ecological limit to plant distribution. Advances in Ecological Research, 1992, 23: 93-185.
- [4] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, Shen R X, Gou J, Li J, Jin J S, Li L T. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. Chemosphere-Global Change Science, 2000, 2(2): 207-224.
- [5] Magnusson T. Studies of the soil atmosphere and related physical characteristics in peat forest soils. Forest Ecology and Management, 1994, 67(1/3): 203-224.
- [6] Silver W L, Scatena F N, Johnson A H, Siccama T G, Sanchez M J. Nutrient availability in a montane wet tropical forest: Spatial patterns and methodological considerations. Plant and Soil, 1994, 164(1): 129-145.
- [7] Zheng J C, Zhang Y F, Chen L G, Wang Z C. Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6138-6146.
- [8] Qin X B, Li Y E, Wan Y F, Shi S W, Li Y, Wang H, Gao Q Z, Ma X, Liu S, Liu Y T, Xu C. Relationships between methane emissions and soil microorganisms in a double-rice field in southern subtropical China. Journal of Integrative Environmental Sciences, 2012, 9(Sup 1): 97-111.
- [9] Qin X B, Li Y E, Shi S W, Wan Y F, Ji X H, Liao Y L, Wang H, Liu Y T, Li Y. Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions

- associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1811-1819.
- [10] R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2012, ISBN 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org/>.
- [11] Wang Z P, DeLaune R D, Patrick W H Jr, Masscheleyn P H. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(2): 382-385.
- [12] Mou C C, Liu X, Sun X X, Shi L Y, Feng D J, Cheng W, Wu Y X. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from broad-leaved forested swamp soils in Xiaoxing Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4598-4608.
- [13] Masscheleyn P H, DeLaune R D, Patrick Jr W H. Methane and nitrous oxide emissions from laboratory measurements of rice soil suspension: Effect of soil oxidation-reduction status. *Chemosphere*, 1993, 26(1/4): 251-260.
- [14] Yao H, Conrad R. Thermodynamics of methane production in different rice paddy soils from China, the Philippines and Italy. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 463-473.
- [15] Yagi K, Kumagai K, Tsuruta H, Minami K. Emission, production, and oxidation of methane in a Japanese rice paddy field // Lal R, Kimble J, Levine E, eds. *Soil Management and Greenhouse Effect*. Boca Raton; CRC Press, Inc., 1995: 231-243.
- [16] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [17] Yan C, Xu J, Zhong W H, Lin Y, Lin X G, Zhu J G, Jia Z J. Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1881-1888.
- [18] Liu S W, Qin Y M, Zou J W, Liu Q H. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4): 906-913.
- [19] Dalal R C, Wang W J, Robertson G P, Parton W J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: A review. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(2): 165-195.
- [20] Toma Y, Hatano R. Effect of crop residue C: N ratio on N₂O emissions from Gray Lowland soil in Mikasa, Hokkaido, Japan. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 198-205.
- [21] Cai Z C. Effects of water regime on CO₂, CH₄ and N₂O emissions and overall potential for greenhouse effect caused by emitted gases. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4): 484-491.

参考文献:

- [2] IPCC. 2007: 气候变化 2007: 综合报告. 政府间气候变化专门委员会第四次评估报告第一、第二和第三工作组的报告//核心撰写组, Pachauri R K, Reisinger A. IPCC, 瑞士, 日内瓦, 2007: 104-104.
- [7] 郑建初, 张岳芳, 陈留根, 王子臣. 稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响. *生态学报*, 2012, 32(19): 6138-6146.
- [9] 秦晓波, 李玉娥, 石生伟, 万运帆, 纪雄辉, 廖育林, Wang H, 刘运通, 李勇. 稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析. *生态学报*, 2012, 32(6): 1811-1819.
- [12] 牟长城, 刘霞, 孙晓新, 石兰英, 冯登军, 程伟, 吴云霞. N₂O 排放规律及其影响因子. *生态学报*, 2010, 30(17): 4598-4608.
- [17] 严陈, 许静, 钟文辉, 林毅, 林先贵, 朱建国, 贾仲君. 大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响. *生态学报*, 2013, 33(6): 1881-1888.
- [21] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响. *土壤学报*, 1999, 36(4): 484-491.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Development of agroecology in USA	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae)	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i>	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO ₂ concentrations	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH ₃ volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jiangui, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar:nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i>	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i>	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi WEN Yuanguang, LEI Liquan, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huaqun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元