

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1

第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM<sub>2.5</sub>成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM<sub>2.5</sub>时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O<sub>3</sub>的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM<sub>2.5</sub>传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM<sub>2.5</sub>中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO<sub>2</sub>交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca<sup>2+</sup>复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS<sub>2</sub>/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N<sub>2</sub>O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王莹燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

## 轮作方式对冬水田温室气体排放的影响

冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊\*

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716)

**摘要:** 以位于西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站内的冬水田(RF)、水稻-油菜轮作(RR)和水稻-儿菜轮作(RV)农田为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法对农田的温室气体的排放通量进行了为期一年的原位观测, 其中采用静态暗箱技术观测  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ , 静态明箱技术观测  $\text{CO}_2$ . 结果表明, 不同轮作方式下  $\text{CH}_4$  的年排放总量[以  $\text{CH}_4$  计,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ]  $\text{RF}(422.87 \pm 27.1) > \text{RR}(132.05 \pm 23.11) > \text{RV}(50.91 \pm 3.83)$ , 其中 RV 与 RR 处理较 RF 处理  $\text{CH}_4$  排放量有明显下降( $P < 0.05$ );  $\text{N}_2\text{O}$  的年排放总量[以  $\text{N}_2\text{O}$  计,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ] 依次为  $\text{RV}(21.38 \pm 6.51) > \text{RR}(20.02 \pm 5.23) > \text{RF}(0.48 \pm 0.02)$ , RV 和 RR 处理  $\text{N}_2\text{O}$  的排放总量均显著高于 RF( $P < 0.05$ );  $\text{CO}_2$  的年净排放总量[以  $\text{CO}_2$  计,  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ] 为  $\text{RR}(-55.43 \pm 5.04) > \text{RV}(-29.1 \pm 3.00) > \text{RF}(-14.08 \pm 1.81)$ , RV 和 RR 处理  $\text{CO}_2$  的吸收量显著高于 RF 处理( $P < 0.05$ ). 在 100a 时间尺度上, 全年排放的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  所引起综合 GWP(以  $\text{CO}_2$  计,  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 为  $\text{RR}(-46.43) > \text{RV}(-22.01) > \text{RF}(-2.11)$ , 表明冬水田转变为水旱轮作系统后能显著提升农田生态系统的增汇效果, 相比于 RV 处理, RR 处理增汇效果更好, 即在西南地区水稻-油菜轮作农田在生态系统增汇上是一种最有效的轮作方式.

**关键词:** 冬水田; 轮作方式; 温室气体; 排放通量; 全球增温潜势(GWP)

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0392-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805143

## Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields

FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, LI Yan-pei, HAO Qing-ju\*

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted at the Key Field Station for Monitoring Eco-environment of Purple Soil of the Ministry of Agriculture of China in the farm of Southwest University, Chongqing. The static chamber and gas chromatography method was used to study the effect of the cropping systems on greenhouse gases from rice-fallow (RF), rice-rapeseed rotation (RR), and rice-brussel mustard rotation (RV) cropland *in situ* for a year. An opaque chamber was used for  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  observations and a transparent chamber was utilized for  $\text{CO}_2$  observations. The results show that the annual cumulative  $\text{CH}_4$  emissions from different crop rotations were ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $\text{RF}(422.87 \pm 27.1) > \text{RR}(132.05 \pm 23.11) > \text{RV}(50.91 \pm 3.83)$ . The RV and RR were significantly lower than RF ( $P < 0.05$ ). The annual cumulative emissions of  $\text{N}_2\text{O}$  [ $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ] were  $\text{RV}(21.38 \pm 6.51) > \text{RR}(20.02 \pm 5.23) > \text{RF}(0.48 \pm 0.02)$ . The RV and RR were significantly higher than RF ( $P < 0.05$ ). The annual net cumulative emissions of  $\text{CO}_2$  were ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $\text{RR}(-55.43 \pm 5.04) > \text{RV}(-29.1 \pm 3.00) > \text{RF}(-14.08 \pm 1.81)$ . The RV and RR were significantly higher than RF ( $P < 0.05$ ). At the time scale of 100 a, the integrated global warming potentials (GWP) of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , and  $\text{CO}_2$  were ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $\text{RR}(-46.43) > \text{RV}(-22.01) > \text{RF}(-2.11)$ , indicating that converting flooded paddy fields to paddy-upland crop rotation systems notably increases the potential increment of carbon sinks. Compared with RV, RR has a better effect, which suggests that rice-rapeseed rotation is the most effective measure for the escalation of carbon sinks of ecosystems in the southwestern area.

**Key words:** flooded paddy field; crop rotation; greenhouse gases; flux; global warming potential(GWP)

温室气体特别是  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的排放速率持续增长<sup>[1]</sup>, 使得全球变暖的形势面临重大挑战, 如何采取有效措施减少温室气体排放是各国学者研究的热点问题. 稻田是温室气体的重要排放源, 温室气体减排有很大的空间<sup>[2]</sup>.

重庆市稻田面积 109 万  $\text{hm}^2$ , 占全市总耕地面积的 48.80%, 其中冬水田面积 52.8 万  $\text{hm}^2$  占稻田面积的 48.44%<sup>[3]</sup>. 已有大量研究表明, 冬水田  $\text{CH}_4$  排放量较高, 对温室气体的排放有重要贡献<sup>[4, 5]</sup>, 且由于冬季淹水休闲, 无农作物产出, 并不能创造很好的经济效益. 随着经济和水利技术的快速发展, 越来越多的冬水田转变为水旱轮作农

田, 提高了农作物产量和经济效益. 近年来, 在全球气候变暖的背景下, 冬水田轮作方式的转变对温室气体排放的影响也引起了学者的关注. 有研究显示, 冬水田转为水旱轮作农田后对温室气体有一定的减排作用, 但由于轮作方式的不同对温室气体减排的影响也有所差异<sup>[6]</sup>. 目前关于轮作方式对温室气体排放的影响主要集中在水稻-小麦轮作以及水稻-油菜轮作等粮油作物上<sup>[7-9]</sup>.

收稿日期: 2018-05-17; 修订日期: 2018-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013)

作者简介: 冯夕(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 707486572@qq.com

\* 通信作者, E-mail: haoqingju@163.com

蔬菜地是一种特殊的旱地农业生态系统, 具有复种指数高、灌溉频繁和施肥量大的特点, 因此容易引起氮肥利用率下降<sup>[10]</sup>、氮素淋失<sup>[11]</sup>和土壤酸化<sup>[12]</sup>等一系列环境问题, 并会导致温室气体大量排放<sup>[13]</sup>. 为此, 有学者提出了旱生蔬菜与水生作物轮作的栽培制度<sup>[14]</sup>, 且已有研究发现, 采用水稻-儿菜轮作后明显提高了氮、磷、钾化肥利用率, 减轻了菜田氮、磷过度积累, 对降低氮素面源污染有正向作用<sup>[15~17]</sup>. 但目前关于水稻-儿菜轮作对温室气体排放的影响还鲜见报道. 因此, 本试验以西南地区典型的冬水田(RF)、水稻-油菜轮作农田(RR)及水稻-儿菜轮作农田(RV)为研究对象, 探讨轮作方式对农田生态系统 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响, 以期西南地区稻田温室气体减排提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本试验地点选在西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站内, 坐标为东经 106°26', 北纬 30°26', 海拔 230 m. 土壤为紫色砂泥岩母质上发育的中性紫色水稻土, 土壤的基本理化性质为: 有机质 25.29 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮含量约 1.35 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 56.62 mg·kg<sup>-1</sup>, 总磷含量 646.00 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷 5.94 mg·kg<sup>-1</sup>, 总钾含量 9.44 g·kg<sup>-1</sup>, 有效钾 102.47 mg·kg<sup>-1</sup>, pH 6.83. 试验期间当地的日平均气温和降雨量的季节变化见图 1. 最低温度出现在 1 月, 为 1.17℃, 最高温度出现在 8 月,

为 35.47℃, 年平均温度 19.40℃. 年总降雨量为 760.03 mm, 主要集中在 4~9 月, 其中 6 月降水量最多, 达到 200.57 mm, 占全年总降水量的 26.39%. 年均日照为 1 276.7 h, 年均无霜期为 334 d.

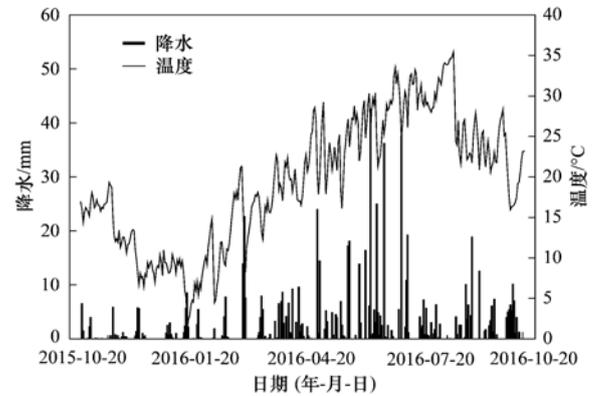


图 1 试验期间气温和日降雨量的变化

Fig. 1 Variations of the daily air temperature and precipitation during the experimental period

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

本试验共设冬水田(RF)、水稻-油菜轮作(RR)和水稻-儿菜轮作(RV)这 3 个处理. 每个处理设置成规格为 5.2 m × 2.5 m 的单个小区, 各处理分别设置 3 个重复. 试验观测从 2015 年 10 月 29 日起至 2016 年 10 月 21 日止. 具体试验处理及施肥状况见表 1. 其中有机肥为重庆市盖丰生物肥 [总养分(N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O) ≥ 5.0% 有机质 ≥ 45%, 枯草芽孢杆菌、戊糖片球菌及有效活菌数 ≥ 0.2 亿·g<sup>-1</sup>].

表 1 试验处理详情

Table 1 Description of experimental treatments

处理	管理情况	施肥情况
RF	2015 年 10 月 29 日~2016 年 5 月 11 日为休闲期, 淹水, 无施肥 2016 年 5 月 12 日水稻插秧, 5 月 24 日追肥, 8 月 24 日收获	水稻季: 尿素 195 kg·hm <sup>-2</sup> , 过磷酸钙 500 kg·hm <sup>-2</sup> , 氯化钾 60 kg·hm <sup>-2</sup> , 追肥尿素 135 kg·hm <sup>-2</sup>
RV	2015 年 10 月 25 日移栽儿菜, 2016 年 3 月 3 日收获 2016 年 5 月 12 日水稻插秧, 5 月 24 日追肥, 8 月 24 日收获	儿菜季: 有机肥 1 030 kg·hm <sup>-2</sup> , 尿素 260 kg·hm <sup>-2</sup> 水稻季: 尿素 195 kg·hm <sup>-2</sup> , 过磷酸钙 495 kg·hm <sup>-2</sup> , 氯化钾 60 kg·hm <sup>-2</sup> , 追肥尿素 135 kg·hm <sup>-2</sup>
RR	2015 年 10 月 25 日移栽油菜, 2016 年 4 月 21 日收获 2016 年 5 月 12 日水稻插秧, 8 月 21 日收获 水稻和油菜移栽前对农田进行一次性施肥	油菜季: 尿素 225 kg·hm <sup>-2</sup> , 过磷酸钙 525 kg·hm <sup>-2</sup> , 氯化钾 60 kg·hm <sup>-2</sup> 水稻季: 尿素 196 kg·hm <sup>-2</sup> , 过磷酸钙 500 kg·hm <sup>-2</sup> , 氯化钾 60 kg·hm <sup>-2</sup>

#### 1.2.2 气样采集与分析

本试验采用静态暗箱法采集 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O. 用于气体采集的暗箱设计成分节组合式标准箱, 由顶箱、延长箱和底座组成. 静态暗箱的顶箱和延长箱均由不锈钢制成, 箱体尺寸为 50 cm × 50 cm × 50 cm, 箱体外覆白色棉被, 防止在太阳辐射下箱内温度升高. 顶箱上部装有 2 个轴流扇, 用于混合箱内

气体, 侧面安装有电源插头和气体样品采集口. 采样时视作物生长情况适时增加延长箱, 将顶箱或延长箱罩在 50 cm × 50 cm × 20 cm 不锈钢底座上, 用水密封. 采样频率为每周一次, 每次采样时间控制在上午 09:00~11:00 进行. 暗箱采集 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的时长约为 30min, 间隔 10min 采样一次, 共采集 4 个气样. 本研究采用静态明箱法进行 CO<sub>2</sub> 净交换通

量的测定,明箱由聚碳酸酯制成,箱体尺寸为 50 cm × 50 cm × 100 cm,其他构造与暗箱相同.明箱采集 CO<sub>2</sub> 的时长通常控制在 6 min 左右,相隔 2 min 采集一次气体,共采集 4 个气样.该方法与 Zhang 等<sup>[18]</sup>在三江平原沼泽湿地的报道相似,并在一些已有的研究中进行了验证<sup>[19-22]</sup>.两种采样方法在同一天进行,先用暗箱法采集气体样品,30min 采样结束后,移开暗箱,待大约 10min 后,再罩上明箱采集气体样品.气样采集后立即带回实验室分析,气样分析采用安捷伦 GC-7890A 气相色谱仪进行,CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 用 FID 检测器测定浓度,N<sub>2</sub>O 用 ECD 检测器测定浓度,标准气体由中国计量科学研究院提供.气体的排放通量采用以下公式(1)计算,并通过内插累加法求得季节或全年的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放总量.

$$F = H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P}{P_0} \times \rho \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中,  $F$  为温室气体排放通量,  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ;  $H$  为采样箱高度, cm;  $T$  为采样箱内温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P$  为采样时的大气压, Pa;  $P_0$  为标准状况下的大气压, Pa;  $\rho$  为被测气体的密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $dc/dt$  为采样期间采样箱内气体的浓度变化速率.排放通量为正表示排放,反之为吸收.

全球增温潜势(GWP)可用于定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响,以 CO<sub>2</sub> 当量值表示.在 100 a 时间尺度上,单位质量 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的 GWP 分别为 CO<sub>2</sub> 的 28 倍和 265 倍<sup>[1]</sup>.GWP 的计算如下:

$$\text{GWP} = f(\text{CO}_2) + 28 \cdot f(\text{CH}_4) + 265 \cdot f(\text{N}_2\text{O}) \quad (2)$$

式中,  $f(\text{CO}_2)$  为 CO<sub>2</sub> 净排放量(kg),  $f(\text{CH}_4)$  为 CH<sub>4</sub> 排放量(kg),  $f(\text{N}_2\text{O})$  为 N<sub>2</sub>O 排放量(kg).

### 1.2.3 其他影响因子测定

在气体样品采集的同时,观测箱内外气温、土壤表层及地下 5 cm 温度,由 JM624 型便携式测温计测定.

在每次采集气体后,用多点采样法(3 个点)分别采集各处理 0 ~ 20 cm 深土样,样品带回实验室一部分放入 4 $^{\circ}\text{C}$  冰箱保存,另一部分风干过筛.采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳(SOC)含量;半微量凯氏定氮法测定土壤总氮(TN)含量;靛酚蓝比色法测定铵态氮、硝态氮;烘干法(105 $^{\circ}\text{C}$  ± 2 $^{\circ}\text{C}$ )测定土壤含水率;碱解扩散法(40 $^{\circ}\text{C}$ , 恒温培养 24 h)测定碱解氮<sup>[23]</sup>.

### 1.2.4 数据处理

采用 Origin 8.5 软件进行作图,运用 SPSS 19.0

软件对各种数据进行统计分析,用最小显著差数法(LSD)比较各处理间差异显著性( $P < 0.05$ ). 相关关系采用 Pearson 相关统计进行分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 CH<sub>4</sub> 排放通量

图 2 为整个观测期内不同处理下农田 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化.从中可以看出,3 种处理下,CH<sub>4</sub> 排放集中在水稻生长季,且均呈双峰型排放.各处理在淹水移栽水稻后 CH<sub>4</sub> 排放都逐渐增大,在水稻移栽后第 36 d 左右出现第一次排放峰值,RF、RV、RR 处理的排放通量分别为(20.07 ± 1.62)、(3.63 ± 0.18)、(10.38 ± 1.03)  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ;然后在移栽后第 64 d 左右出现第二次排放峰值,排放通量分别为(16.09 ± 0.90)、(5.96 ± 0.61)、(10.05 ± 1.23)  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .随后各处理 CH<sub>4</sub> 排放逐渐下降,在生长季末期 CH<sub>4</sub> 排放通量趋于零,且无明显波动.

在非水稻季,RF 处理的 CH<sub>4</sub> 排放整体呈现出先降低再升高的趋势,排放集中在 2 ~ 5 月,平均排放通量为(2.70 ± 0.13)  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .而 RV 与 RR 处理的 CH<sub>4</sub> 排放规律与 RF 处理有明显不同,它们在非水稻季的排放量变化很小,且长期维持在较低水平.

### 2.2 N<sub>2</sub>O 排放通量

图 3 为整个观测期内 3 种不同处理下农田 N<sub>2</sub>O 排放通量的季节变化.从中可以看出,3 种处理下 N<sub>2</sub>O 排放的季节变化趋势存在明显差异.RF 处理的 N<sub>2</sub>O 排放集中在水稻种植期,呈单峰型变化,变化范围为 -3.47 ~ 77.32  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .而在非水稻季,特别是水稻种植前期,N<sub>2</sub>O 排放通量很低,且多次出现 N<sub>2</sub>O 吸收的情况,最强烈的两次吸收值出现在 3 月 5 日和 4 月 23 日,此时 N<sub>2</sub>O 排放通量分别为(-47.45 ± 7.96)  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和 (-47.37 ± 7.65)  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .

与 RF 处理不同,RV 处理的 N<sub>2</sub>O 排放主要集中在非水稻季.在儿菜种植期间 N<sub>2</sub>O 排放通量先上升后短暂下降再上升,在 1 月 30 日后维持较高排放,呈单峰型,排放峰值为(1246.78 ± 525.55)  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .在儿菜收获后,N<sub>2</sub>O 仍维持较高排放,并在收获后的第 23 d 又出现了一个 N<sub>2</sub>O 排放峰,峰值为(1230.68 ± 81.76)  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .进入水稻季,N<sub>2</sub>O 排放量明显下降,只在水稻施肥一周后出现了一个排放峰值,之后 N<sub>2</sub>O 排放通量降低,偶有负值出现,水稻季 N<sub>2</sub>O 通量变化范围为 -44.15 ~ 515.95  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .

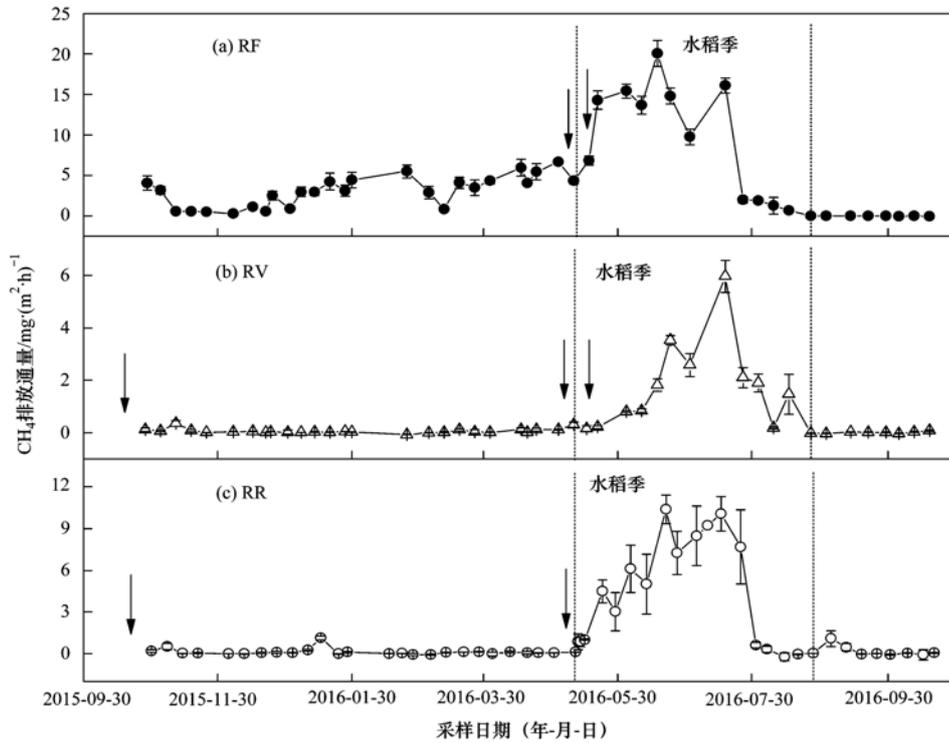


图2 2015~2016年3种不同处理CH<sub>4</sub>排放通量

Fig. 2 CH<sub>4</sub> emission fluxes based on three different treatments from 2015 to 2016

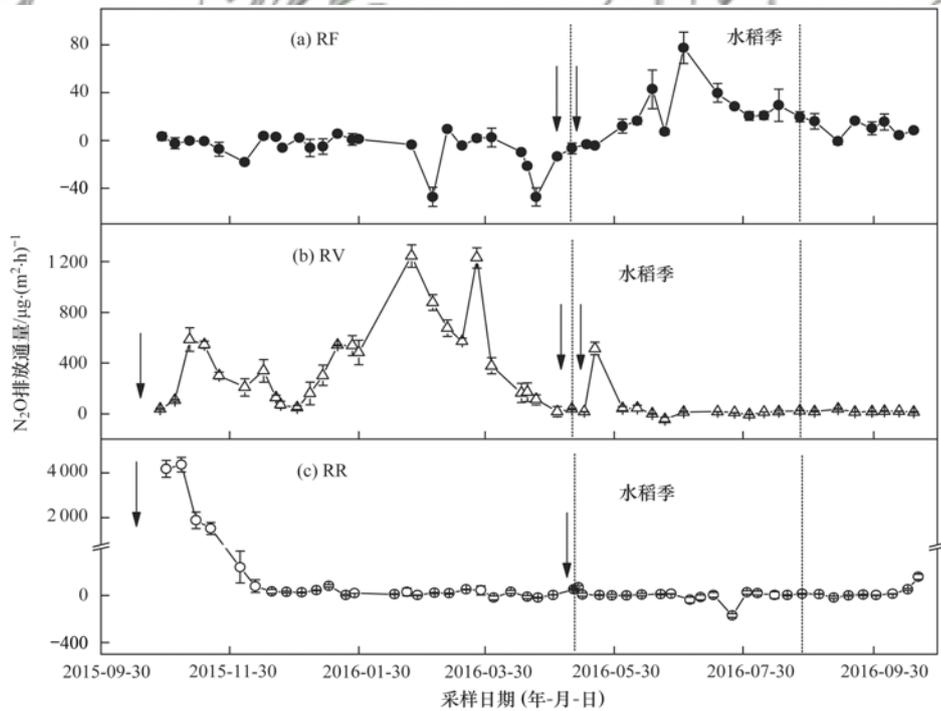


图3 2015~2016年3种不同处理N<sub>2</sub>O排放通量

Fig. 3 N<sub>2</sub>O emission fluxes based on three different treatments from 2015 to 2016

RR 处理N<sub>2</sub>O排放也主要集中在非水稻季，但N<sub>2</sub>O排放规律却与RV处理有明显差异。RR处理在油菜种植初期施肥后就出现了一个非常高的N<sub>2</sub>O的排放峰值(4 362.32 ± 329.45) µg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>，之后迅速降低，12月之后N<sub>2</sub>O排放量小且无明显波动。

进入水稻季，RR处理的N<sub>2</sub>O排放量仍保持在较低水平，在7月出现了一个较大的N<sub>2</sub>O吸收值(-170.97 ± 32.45) µg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 排放通量

图4为整个观测期内3种不同处理下农田CO<sub>2</sub>

排放通量的季节变化. 在非水稻生长季, RF 处理总体表现为  $\text{CO}_2$  的弱排放源, 只在 11 月前和 2 月下旬出现了  $\text{CO}_2$  吸收的情况, 平均排放通量为  $(32.33 \pm 14.64) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . RV 与 RR 处理在非水稻季平均排放通量为  $(-63.21 \pm 26.85) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $(-529.78 \pm 63.25) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 表现为  $\text{CO}_2$  吸收. RV 与 RR 处理在非水稻季  $\text{CO}_2$  吸收集集中在作物生长期, 呈多波谷排放.

在水稻季, 3 种处理都表现为对  $\text{CO}_2$  的净吸收, 且变化规律相似. 在水稻插秧后就开始表现为  $\text{CO}_2$  吸收, 随着植物的不断生长,  $\text{CO}_2$  吸收逐渐加强. 3 种处理都在 6 月出现了最大的  $\text{CO}_2$  净吸收值, RF、RV 和 RR 分别为  $(-1\,165.82 \pm 106.57)$ 、 $(-1\,480.37 \pm 245.58)$  和  $(-1\,464.87 \pm 448.99) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 随后  $\text{CO}_2$  吸收量开始减弱, 在水稻收获后有微弱的  $\text{CO}_2$  排放.

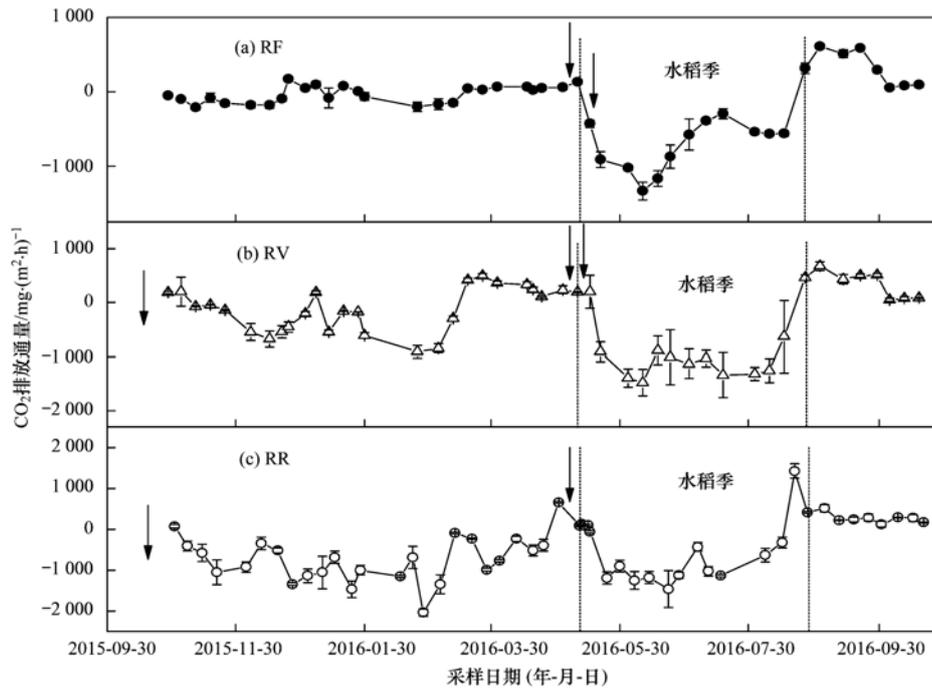


图 4 2015~2016 年 3 种不同处理  $\text{CO}_2$  排放通量

Fig. 4  $\text{CO}_2$  emission fluxes based on three different treatments from 2015 to 2016

#### 2.4 不同轮作方式下 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的年排放量和全球增温潜势 GWP

表 2 是对全年 3 种处理下农田  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量的计算结果. 从中可以看出, 3 种处理均表现为  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放源及  $\text{CO}_2$  的吸收汇. 对于  $\text{CH}_4$  排放量, 3 种轮作方式在水稻季、非水稻季以及全年上均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 均表

现为 RF 最高, RR 次之, RV 最低. 相比于 RF, RV 处理水稻季、非水稻季及全年  $\text{CH}_4$  排放量分别降低了 82%、98% 和 88%, RR 处理分别降低了 52%、95% 和 69%. 对于  $\text{N}_2\text{O}$  排放量, 不同处理之间在水稻季、非水稻季以及全年上差异均达到显著性水平 ( $P < 0.05$ ), 水稻季 RV 处理显著高于其他 2 种轮作方式 ( $P < 0.05$ ), 而非水稻季和全年则 RV 和 RR

表 2 不同处理下 3 种温室气体的季节及年累积排放量<sup>1)</sup>

Table 2 Annual total emission of the three greenhouse gases based on different treatments

气体	时期	RF	RV	RR
$\text{CH}_4/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	非水稻季	$164.74 \pm 13.27\text{Ca}$	$4.02 \pm 1.37\text{Bb}$	$8.89 \pm 2.64\text{Bb}$
	水稻季	$258.13 \pm 14.74\text{Ba}$	$46.89 \pm 4.24\text{Ac}$	$123.16 \pm 22.79\text{Ab}$
	全年	$422.87 \pm 27.18\text{Aa}$	$50.91 \pm 3.83\text{Ac}$	$132.05 \pm 23.11\text{Ab}$
$\text{N}_2\text{O}/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	非水稻季	$-0.19 \pm 0.11\text{Bb}$	$20.03 \pm 6.79\text{Aa}$	$20.62 \pm 6.07\text{Aa}$
	水稻季	$0.68 \pm 0.13\text{Ab}$	$1.35 \pm 0.62\text{Ba}$	$-0.60 \pm 0.96\text{Bc}$
	全年	$0.48 \pm 0.02\text{Ab}$	$21.38 \pm 6.51\text{Aa}$	$20.02 \pm 5.23\text{Aa}$
$\text{CO}_2/\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	非水稻季	$2.05 \pm 0.93\text{Aa}$	$-4.00 \pm 1.70\text{Ab}$	$-33.57 \pm 4.01\text{Bc}$
	水稻季	$-16.13 \pm 0.89\text{Ba}$	$-25.10 \pm 1.81\text{Bb}$	$-21.86 \pm 1.30\text{Ab}$
	全年	$-14.08 \pm 1.81\text{Ba}$	$-29.10 \pm 3.00\text{Bb}$	$-55.43 \pm 5.04\text{Cc}$

1) 同行不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著, 同列不同大写字母表示同一处理不同时期间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

处理显著高于 RF ( $P < 0.05$ ); RV 和 RR 处理  $N_2O$  年排放量比 RF 分别增加了 44 和 41 倍. 对于  $CO_2$  排放量, 不同处理在水稻季、非水稻季以及全年上差异显著 ( $P < 0.05$ ), 表现为冬水田转变为水旱轮作后, 由非水稻季的排放源转变为吸收汇, 而水稻季的吸收汇则更强, RV 与 RR 处理对  $CO_2$  的年吸收量分别是 RF 处理的 2.07 倍和 3.94 倍.

表 3 为 3 种处理下农田温室气体排放量的全球增温潜势. 从中可以看出, 3 种处理下的 GWP 主要取决于  $CO_2$ . RF、RV 和 RR 年 GWP(以  $CO_2$  计)分别为 -2.11、-22.01 和 -46.43  $t \cdot hm^{-2}$ , 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 表明 3 种轮作系统都是大气温室气体的吸收汇, 且冬水田转变为水旱轮作后, 对温室气体的吸收量大大增强, 尤其是 RR 处理, 对温室气体的吸收作用最强.

表 3 不同处理 3 种温室气体的全球增温潜势 (GWP)

Table 3 Corresponding  $CO_2$  equivalents of the three greenhouse gases based on different treatments

气体	时期	GWP/ $t \cdot hm^{-2}$		
		RF	RV	RR
$CH_4$	非水稻季	4.61Ba	0.11Bb	0.25Bb
	水稻季	7.22Aa	1.31Ac	3.45Ab
	全年	11.84Aa	1.42Ac	3.70Ab
$N_2O$	非水稻季	-0.05Cb	5.31Aa	5.46Aa
	水稻季	0.18Ab	0.36Ba	-0.16Bc
	全年	0.12Bb	5.67Aa	5.30Aa
$CO_2$	非水稻季	2.05Aa	-4.00Ab	-33.57Bc
	水稻季	-16.13Ba	-25.10Bb	-21.86Ab
	全年	-14.08Ba	-29.10Bb	-55.43Cc
$CH_4 + N_2O + CO_2$	全年	-2.11a	-22.01b	-46.43c

### 3 讨论

#### 3.1 不同轮作方式对 $CH_4$ 排放的影响

本试验中 RF 处理的  $CH_4$  主要排放集中在水稻季, 排放通量介于  $-0.01 \sim 20.07 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 与大多数研究结果相近<sup>[5, 7]</sup>. 在水稻季  $CH_4$  的变化规律呈双峰型, 两个排放峰值分别出现在水稻分蘖盛期和抽穗期, 这与郑土英等<sup>[24]</sup>的研究结果一致. 这是由于在分蘖盛期水稻根系分泌速率增加和稻茬的分解发酵为产甲烷菌提供了底物导致  $CH_4$  的排放加剧<sup>[25]</sup>. 在抽穗期, 由于死根增多, 甲烷氧化作用减弱, 植物运输能力强,  $CH_4$  通量较高. 在非水稻季,  $CH_4$  排放通量较水稻季偏低, 累积排放量为  $(164.74 \pm 13.27) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 与张怡等<sup>[26]</sup>在川中丘陵得出的结果相近, 原因如下: 一是非水稻季的温度低, 低温会降低产甲烷菌活性. 另外, 温度低时  $CH_4$  在水中的扩散很慢,  $CH_4$  在传输过程中会进行再氧化<sup>[27]</sup>. 二是非水稻季没有种植作物, 相比有植

株情况下,  $CH_4$  排放速率低. 大量研究显示水稻植株以根系分泌物和凋落物的形式为产甲烷菌提供了碳源<sup>[28, 29]</sup>; 其次, 水稻植株能够利用自身通气组织向根际泌氧为产甲烷菌创造有氧环境<sup>[30, 31]</sup>; 另外, 水稻植株也是甲烷的主要传输通道, 稻田土壤中产生的  $CH_4$  主要通过植株排放<sup>[32, 33]</sup>.

与 RF 处理相比, RV 与 RR 处理全年的  $CH_4$  排放总量显著地降低了 ( $P < 0.05$ ). 这与大多数研究结果一致<sup>[7, 8]</sup>, 因为 RV 与 RR 处理在非水稻季排水种植作物, 此时土壤暴露在空气中, 土壤氧化还原电位提高, 还原物质通过各种氧化过程而被转化为氧化态, 导致在此时期的  $CH_4$  排放量很低. 在水稻季, RF 处理一直保持淹水状态, 土壤 Eh 一直维持在适合  $CH_4$  生产的水平上, 而 RV 与 RR 处理重新淹水种植水稻, 使得还原物质和土壤 Eh 下降到适合产甲烷活动的范围的时间增加, 从而降低了  $CH_4$  的排放<sup>[34]</sup>. 另外, RV 与 RR 处理  $CH_4$  排放量在水稻生长季差异显著, 可能是由于 RR 处理下 SOC 含量较高所致. 观测结果表明, 在水稻季 RV 与 RR 处理下 SOC 含量分别为  $11.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $15.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有研究显示  $CH_4$  排放与 SOC 含量之间存在显著的线性正相关关系<sup>[35]</sup>. SOC 含量越高, 就为产甲烷菌厌氧分解提供越多的底物,  $CH_4$  排放量就越大.

#### 3.2 不同轮作方式对 $N_2O$ 排放的影响

本试验中 RF 处理在非水稻季表现为  $N_2O$  的弱汇, 已有研究发生过类似状况<sup>[36]</sup>, 可能是由于在非水稻季没有施肥, 土壤中  $NO_3^-$  含量低, 加上冬水田长期处于淹水状态使得水稻土的还原环境很强,  $N_2O$  产生后被还原成  $N_2$ , 从而表现为对  $N_2O$  的吸收<sup>[37]</sup>. 此外, 在非水稻季 RF、RV 和 RR 处理下 SOC 含量分别为 23.02、12.56 和 13.31  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , RF 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ). 土壤有机碳是控制反硝化菌群落的主要因素之一, 且土壤  $N_2$  产量与土壤有机碳的可利用率紧密相关, 高浓度的可用有机碳能够强化土壤的厌氧环境, 故有机碳含量高时可能导致  $N_2O$  吸收<sup>[38]</sup>. 在水稻季, RF 处理为  $N_2O$  排放源, 累积排放通量为  $(0.68 \pm 0.13) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 与张岳芳等<sup>[39]</sup>的研究结果  $0.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  相近.

两种水旱轮作处理在非水稻季的  $N_2O$  排放较高, 主要是由于土壤干湿交替, 以及施肥引起的. 在本试验中 RV 与 RR 处理在非水稻季的  $N_2O$  累计排放通量无明显差异, 但  $N_2O$  排放规律却有明显不同. 出现这种差异是由于 RR 处理在油菜季施化学肥, 3 种肥料混合作为底肥一次性均匀播撒. 由于在种植前期油菜的植株较小, 对施入农田中的化肥

利用极为有限,此时若碰上降雨,就会刺激产生大量的 $N_2O$ ,导致稻油轮作刚开始就出现了较大的 $N_2O$ 排放峰值.而RV处理采用的是有机无机肥配施,由于蔬菜生长周期短,生长发育前期对氮素的需求量比较大,所以在施肥后相比油菜植株对肥料的吸收效率高,导致初期并未出现整个生长期的 $N_2O$ 排放峰值.且有机肥肥效缓长,前期氮素供应能力不及化学氮肥<sup>[40]</sup>,所以在前期儿菜植株吸收的氮素主要来自于化学氮肥,减少了 $N_2O$ 前期的排放量.而到了儿菜生长末期,随着温度升高,微生物活性增强,土壤中丰富的有机物质激发土壤中硝化反硝化作用导致此时 $N_2O$ 的排放加剧<sup>[41]</sup>.

在水稻季RV处理整体表现为 $N_2O$ 排放,且RV处理的 $N_2O$ 排放显著高于RF处理( $P < 0.05$ ).这是由于RV处理前茬作物为儿菜,施肥量大,儿菜收获后残留于土壤中的肥料氮会增加水稻季的 $N_2O$ 排放.在水稻季RF、RV和RR处理铵态氮与硝态氮的总含量分别为45.52、71.03和38.15  $mg \cdot kg^{-1}$ ,RV显著高于RF与RR处理( $P < 0.05$ ),为 $N_2O$ 排放提供了充足的氮源,促进了 $N_2O$ 的排放.

与RF和RV处理不同,RR处理在水稻季的 $N_2O$ 排放较低,且在7月出现了几次较强的 $N_2O$ 吸收的情况,故在水稻季整体表现为 $N_2O$ 弱汇.这在其他研究中也发现过类似状况<sup>[7, 42]</sup>. $N_2O$ 在稻季出现吸收情况的影响因素很多,本试验中可能主要是由田间淹水深度和土壤含N量导致的.在水稻季3种处理的平均淹水深度都在10cm左右.有研究指出,淹水深度会影响 $N_2O$ 在土壤中的扩散,当 $N_2O$ 在水中的传输减慢时,其在水中溶解的可能性很高,溶解后的 $N_2O$ 可能进一步反应转化为 $N_2$ ,导致 $N_2O$ 吸收<sup>[43]</sup>.在本试验中,RR处理相比RV与RF处理在稻季出现的 $N_2O$ 吸收值高,这可能是由于RF与RV处理在水稻季进行了追肥处理.有研究表明,氮肥水平提高增加了稻田细菌群落多样性,促进了稻田 $N_2O$ 排放<sup>[44]</sup>.而RR处理是一次性施肥且没有进行追肥处理,土壤中硝态氮和铵态氮的总量低于RF与RV处理.硝态氮和铵态氮本身能以底物形式参与反硝化或硝化作用,通过影响微生物反硝化酶系统和群落分布而影响 $N_2O$ 排放,所以当土壤中N素含量低时,会出现 $N_2O$ 吸收的现象<sup>[45]</sup>.

### 3.3 不同轮作方式对 $CO_2$ 排放的影响

$CO_2$ 通过植物的光合作用变为有机碳进入土壤,稳定和增加土壤碳库,是农田生态系统中固碳的重要过程<sup>[2]</sup>.RF处理在非水稻季的排放量不大且无明显波动,是因为在此期间没有施肥和另外种植作物,只有在再生稻生长和春季回暖后表现为微

弱的 $CO_2$ 吸收,其余时间以土壤呼吸释放 $CO_2$ 为主,且冬水田长期淹水,土壤湿度大,不利于 $CO_2$ 产生<sup>[46]</sup>.而RV和RR处理,由于在冬季种植作物,表现为对 $CO_2$ 的净吸收,这与吴东星等<sup>[47]</sup>的研究结果一致.其中RR处理在非水稻季的 $CO_2$ 净吸收量显著大于RV处理( $P < 0.05$ ),这主要是由于不同植物地上地下总生物量的不同,即不同植被提供的基质数量与质量不同,光合作用吸收空气中 $CO_2$ 进行固碳的能力不同<sup>[48]</sup>导致的.油菜相比儿菜植株大,种植时间长,所以在非水稻季RR处理的 $CO_2$ 净吸收通量显著大于RV处理.

进入水稻季,3种处理的 $CO_2$ 排放通量变化相似,都表现为对 $CO_2$ 的净吸收.这是因为在水稻种植期间,随着水稻植株的生长农田 $CO_2$ 的吸收速率增加,在生长的中期达到峰值,随后逐渐减少,变化趋势与苏荣瑞等<sup>[49]</sup>的研究结果一致.水稻生长过程中,由于田间长期处于淹水状态,土壤呼吸作用较弱,农田中 $CO_2$ 的排放主要来自植物呼吸和光合作用,因此,植物的生长情况和气温变化都会影响水稻田 $CO_2$ 排放通量<sup>[50]</sup>.植物长势越好,光合作用越强,吸收的 $CO_2$ 多.RV处理在蔬菜种植季采用有机无机肥配施,相较油菜只施无机肥,施肥量大.且儿菜生长周期短,土壤中累积养分多,进入水稻季土壤淹水,能消耗累积的土壤养分,从而使得RV处理的养分充足,促进水稻生长,对 $CO_2$ 的净吸收通量大.

## 4 结论

(1)2种水旱轮作方式相比冬水田都能有效降低 $CH_4$ 排放量,同时明显地促进了 $N_2O$ 的排放及 $CO_2$ 的吸收量,其中RV处理全年的 $CH_4$ 排放量最低,RR处理全年的 $CO_2$ 吸收量最高.

(2)相比于冬水田,2种水旱轮作方式对大气温室气体都有明显的增汇作用,其中RR处理的增汇效果更好.

### 参考文献:

- [1] IPCC. Special report on emissions scenarios: a special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.农田土壤主要温室气体( $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ )的源/汇强度及其温室效应研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(4):966-975.  
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of  $CO_2$ ,  $CH_4$  and  $N_2O$  in agricultural soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975.
- [3] 唐晓东,陈燕霞,詹林庆,等.重庆市冬闲田现状及开发利用建议[J].南方农业,2015,9(4):45-47.
- [4] 江长胜,王跃思,郑循华,等.耕作制度对川中丘陵区冬灌

- 田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 207-213.
- Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, *et al.* Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of southwest China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(2): 207-213.
- [ 5 ] 贺冬冬, 周维, 陈霖, 等. 川中丘陵地区冬水田甲烷排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(6): 2281-2287.
- He D D, Zhou W, Chen L, *et al.* Characteristics of methane emission from winter flooded paddy field in the hilly area of central Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(6): 2281-2287.
- [ 6 ] 周炜, 张岳芳, 朱普平, 等. 种植制度对长江下游稻田温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, **33**(2): 340-345.
- Zhou W, Zhang Y F, Zhu P P, *et al.* Effects of different cropping patterns on greenhouse gases emissions from rice fields in the lower reaches of Yangtze River [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **33**(2): 340-345.
- [ 7 ] Hao Q J, Jiang C S, Chai X S, *et al.* Drainage, no-tillage and crop rotation decreases annual cumulative emissions of methane and nitrous oxide from a rice field in Southwest China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **233**: 270-281.
- [ 8 ] Xia L L, Xia Y Q, Li B L, *et al.* Integrating agronomic practices to reduce greenhouse gas emissions while increasing the economic return in a rice-based cropping system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **231**: 24-33.
- [ 9 ] 孙小静, 侯玉兰, 王东启, 等. 崇明岛稻麦轮作生态系统主要温室气体排放特征及影响因素分析[J]. 环境化学, 2015, **34**(5): 832-841.
- Sun X J, Hou Y L, Wang D Q, *et al.* Emission characteristics and effect factors of major greenhouse gases from rice-wheat rotation system in Chongming Island [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 832-841.
- [ 10 ] Ju X T, Kou C L, Christie P, *et al.* Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145**(2): 497-506.
- [ 11 ] Ren T, Christie P, Wang J G, *et al.* Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, **125**(1): 25-33.
- [ 12 ] Qu Z, Wang J G, Almøy T, *et al.* Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high N<sub>2</sub>O/(N<sub>2</sub>O + N<sub>2</sub>) product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(5): 1685-1698.
- [ 13 ] Wang J Y, Xiong Z Q, Yan X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N<sub>2</sub>O from vegetable fields in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(38): 6923-6929.
- [ 14 ] 江解增, 缪旻珉, 曾晓萍, 等. 设施内蔬菜水旱轮作新模式[J]. 中国蔬菜, 2011, (9): 46-49.
- [ 15 ] 王强, 徐建明, 姜丽娜, 等. 平衡施肥对大棚茄子-水稻轮作土壤中作物生产和土壤养分的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, **38**(2): 197-203.
- Wang Q, Xu J M, Jiang L N, *et al.* Effects of balanced fertilization on crop production and soil nutrient status under long-term greenhouse eggplant-rice rotation system [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2012, **38**(2): 197-203.
- [ 16 ] 章婧虹, 章明清, 张群林, 等. 蔬菜经济施肥模式对菜稻轮作土柱渗漏水氮磷浓度的影响[J]. 福建农业学报, 2012, **27**(2): 181-186.
- Zhang J H, Zhang M Q, Zhang Q L, *et al.* Effect of rotational planting of vegetables and rice with economic vegetable fertilization on N and P in leached water of soil pillar [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, **27**(2): 181-186.
- [ 17 ] 沈明星, 吴彤东, 谢正荣, 等. 大棚作物-水稻种植模式对稻谷产量和氮素面源污染的影响[J]. 上海农业学报, 2009, **25**(3): 79-81.
- Shen M X, Wu T D, Xie Z R, *et al.* The effects of greenhouse crops-rice cropping pattern on rice yield and non-point source pollution of nitrogen [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2009, **25**(3): 79-81.
- [ 18 ] Zhang L H, Song C C, Nkrumah P N. Responses of ecosystem carbon dioxide exchange to nitrogen addition in a freshwater marshland in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **180**: 55-62.
- [ 19 ] Suyker A E, Verma S B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie [J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(3): 279-289.
- [ 20 ] Wilsey B J, Parent G, Roulet N T, *et al.* Tropical pasture carbon cycling: relationships between C source/sink strength, above-ground biomass and grazing [J]. *Ecology Letters*, 2002, **5**(3): 367-376.
- [ 21 ] Aeschlimann U, Nösberger J, Edwards P J, *et al.* Responses of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in managed grassland to long-term CO<sub>2</sub> enrichment, N fertilization and plant species [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2005, **28**(7): 823-833.
- [ 22 ] Wang K, Liu C, Zheng X, *et al.* Comparison between eddy covariance and automatic chamber techniques for measuring net ecosystem exchange of carbon dioxide in cotton and wheat fields [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(11): 6865-6877.
- [ 23 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 157-160.
- [ 24 ] 郑土英, 杨彩玲, 徐世宏, 等. 耕作方式和氮肥对稻田 CH<sub>4</sub> 排放的影响及与土壤还原物质间的关系[J]. 广东农业科学, 2014, **41**(13): 49-53.
- Zheng T Y, Yang C L, Xu S H, *et al.* Effect of tillage pattern & nitrogen fertilizer on CH<sub>4</sub> emission from rice fields and relationship with reducing substance in soil [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, **41**(13): 49-53.
- [ 25 ] Singh S K, Bharadwaj V, Thakur T C, *et al.* Influence of crop establishment methods on methane emission from rice fields [J]. *Current Science*, 2009, **97**(1): 84-89.
- [ 26 ] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 冬季水分管理和水稻覆膜栽培对川中丘陵地区冬水田 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(4): 1095-1103.
- Zhang Y, Lü S H, Ma J, *et al.* Effects of water management in winter and of plastic film mulching during rice cultivation on CH<sub>4</sub> emission from paddy field in a hilly region of Central Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(4): 1095-1103.
- [ 27 ] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(4): 604-608.
- Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(4): 604-608.
- [ 28 ] Watanabe A, Takeda T, Kimura M. Evaluation of origins of CH<sub>4</sub> carbon emitted from rice paddies [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D19): 23623-23629.
- [ 29 ] Tokida T, Adachi M, Cheng W G, *et al.* Methane and soil CO<sub>2</sub>

- production from current-season photosynthates in a rice paddy exposed to elevated CO<sub>2</sub> concentration and soil temperature[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(11): 3327-3337.
- [30] Ma K, Qiu Q F, Lu Y H. Microbial mechanism for rice variety control on methane emission from rice field soil [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(11): 3085-3095.
- [31] Jiang Y, van Groenigen K J, Huang S, *et al.* Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(11): 4728-4738.
- [32] Tokida T, Cheng W G, Adachi M, *et al.* The contribution of entrapped gas bubbles to the soil methane pool and their role in methane emission from rice paddy soil in free-air [CO<sub>2</sub>] enrichment and soil warming experiments [J]. *Plant and Soil*, 2013, **364**(1-2): 131-143.
- [33] Zhang G B, Yu H Y, Fan X F, *et al.* Carbon isotope fractionation reveals distinct process of CH<sub>4</sub> emission from different compartments of paddy ecosystem [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 27065.
- [34] Zhang G B, Zhang X Y, Ma J, *et al.* Effect of drainage in the fallow season on reduction of CH<sub>4</sub> production and emission from permanently flooded rice fields [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **89**(1): 81-91.
- [35] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, *et al.* Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(6): 2196-2210.
- [36] 黄太庆, 马煜春, 熊正琴, 等. 不同种植制度对稻田旱作季节 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(6): 519-523.
- Huang T Q, Ma Y C, Xiong Z Q, *et al.* CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy field during the upland crop growing season in relation to cropping pattern [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(6): 519-523.
- [37] 王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 等. 淹水水稻土消耗 N<sub>2</sub>O 能力及机制[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1633-1639.
- Wang L, Xing X Y, Qin H L, *et al.* N<sub>2</sub>O consumption ability of submerged paddy soil and the regulatory mechanism [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1633-1639.
- [38] Mathieu O, Lévêque J, Hénault C, *et al.* Emissions and spatial variability of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> and nitrous oxide mole fraction at the field scale, revealed with <sup>15</sup>N isotopic techniques [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(5): 941-951.
- [39] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(3): 290-296.
- Zhang Y F, Zhou W, Chen L G, *et al.* Methane and nitrous oxide emission under different paddy-upland crop rotation systems during rice growth season in Taihu Lake Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(3): 290-296.
- [40] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(2): 290-296.
- Meng L, Zhang X L, Jiang X F, *et al.* Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, **15**(2): 290-296.
- [41] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤—蔬菜系统 N<sub>2</sub>O 排放特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(4): 313-318.
- Yu Y J, Zhu B, Jing G J. N<sub>2</sub>O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(4): 313-318.
- [42] Zhou M H, Zhu B, Brüggemann N, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from a subtropical rice-rapeseed rotation system in China; a 3-year field case study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **212**: 297-309.
- [43] Blicher-Mathiesen G, Hoffmann C C. Denitrification as a sink for dissolved nitrous oxide in a freshwater riparian fen [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, **28**(1): 257-262.
- [44] 宋亚娜, 林艳, 陈子强. 氮肥水平对稻田细菌群落及 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(9): 1266-1275.
- Song Y N, Lin Y, Chen Z Q. Effect of nitrogen fertilizer level on bacterial community and N<sub>2</sub>O emission in paddy soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(9): 1266-1275.
- [45] Wu D, Dong W X, Oenema O, *et al.* N<sub>2</sub>O consumption by low-nitrogen soil and its regulation by water and oxygen [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **60**: 165-172.
- [46] Iqbal J, Hu R G, Lin S, *et al.* Carbon dioxide emissions from Ultisol under different land uses in mid-subtropical China [J]. *Geoderma*, 2009, **152**(1-2): 63-73.
- [47] 吴东星, 李国栋, 亢琼琼, 等. 华北平原冬小麦农田生态系统 CO<sub>2</sub> 通量特征及其影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(3): 827-838.
- Wu D X, Li G D, Kang Q Q, *et al.* Characteristics of CO<sub>2</sub> flux and its influence factors over winter wheat agroecosystem in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(3): 827-838.
- [48] 袁蓓, 刘长红, 戴晓琴, 等. 中国南方双季稻田转菜地对 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 147-154.
- Yuan Y, Liu C H, Dai X Q, *et al.* Effects of land-use conversion from double rice cropping to vegetables on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in southern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 147-154.
- [49] 苏荣瑞, 刘凯文, 耿一风, 等. 江汉平原稻田冠层 CO<sub>2</sub> 通量变化特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(9): 1214-1220.
- Su R R, Liu K W, Geng Y F, *et al.* Characteristics of canopy CO<sub>2</sub> flux over paddy ecosystem in Jiangnan Plain and its influence factors analysis [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(9): 1214-1220.
- [50] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 1-8.
- Zhang L H, Song C C, Wang D X, *et al.* Relationship of ecosystem respiration with temperature, nitrogen and plant in freshwater marshes [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(1): 1-8.

## CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM <sub>2.5</sub> During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016 .....	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> ( 1 )
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Yangtze River Delta .....	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> ( 11 )
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai .....	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> ( 24 )
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM <sub>2.5</sub> Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing .....	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> ( 33 )
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> ( 44 )
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong .....	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> ( 55 )
Transport Characteristics of PAN and O <sub>3</sub> in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer .....	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> ( 67 )
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Chemical Components in Chengdu in Winter .....	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> ( 76 )
Transport Pathways and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Zhengzhou .....	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> ( 86 )
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> During Spring in Changzhou .....	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> ( 94 )
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel .....	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> ( 104 )
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles .....	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> ( 114 )
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP .....	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> ( 121 )
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant .....	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> ( 126 )
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing .....	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> ( 135 )
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment .....	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> ( 143 )
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin .....	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> ( 149 )
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer .....	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> ( 157 )
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary .....	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> ( 164 )
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs .....	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 172 )
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir .....	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 185 )
Water-Air Interface CO <sub>2</sub> Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors .....	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue ( 192 )
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application .....	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> ( 200 )
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin .....	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> ( 211 )
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu .....	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> ( 219 )
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section) .....	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> ( 228 )
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City .....	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan ( 239 )
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin .....	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> ( 248 )
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing .....	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> ( 256 )
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics .....	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> ( 263 )
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water .....	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> ( 273 )
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS <sub>2</sub> /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities .....	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> ( 281 )
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water .....	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> ( 293 )
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings .....	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> ( 300 )
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water .....	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> ( 310 )
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese .....	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> ( 318 )
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage .....	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 327 )
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode .....	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> ( 336 )
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System .....	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 343 )
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System .....	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> ( 352 )
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process .....	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> ( 360 )
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules .....	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> ( 369 )
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature .....	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> ( 376 )
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest .....	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> ( 383 )
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields .....	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> ( 392 )
Response of the Soil N <sub>2</sub> O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil .....	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> ( 401 )
Community Structure of CO <sub>2</sub> -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas .....	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> ( 412 )
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China .....	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> ( 421 )
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria .....	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> ( 430 )
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter .....	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> ( 437 )
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang .....	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping ( 445 )
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin .....	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 453 )
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake .....	XU Yi-yuan, HE Tian-rong ( 461 )
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i> .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> ( 470 )
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress .....	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> ( 480 )
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region .....	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> ( 488 )
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity .....	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> ( 496 )
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation .....	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> ( 504 )