

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.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系

肖志祥, 傅志强*, 徐华勤, 苏珊, 郭昱, 张浪, 唐剑武

(湖南农业大学农学院, 华中地区作物栽培科学观测实验站, 长沙 410128)

摘要:为探讨不同水稻品种间甲烷排放差异形成的机制, 选取早晚稻各6个品种为供试材料进行大田试验, 采用静态暗箱-气相色谱法测定 CH_4 气体. 结果表明, 早晚稻甲烷排放通量品种间差异显著, 全生育甲烷排放通量均值湘早籼24号最高, 株两优819最低, 相差34.6%; 晚稻种, T优15最高, 资优299最低, 相差33.9%. 不同双季稻品种间甲烷排放量、单位产量温室效应差异显著. 早稻品种的 CH_4 累计排放量介于 $198.3 \sim 303.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 排放量最低是株两优819; 单位产量温室效应介于 $0.67 \sim 1.40 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 陆两优996最低. 晚稻品种的 CH_4 累计排放量明显高于早稻, 介于 $291.93 \sim 388.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 资优299最低; 单位产量温室效应介于 $0.94 \sim 1.68 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, Y两优1号最低. 稻田甲烷排放与水稻产量、根冠比、根系孔隙度、土壤溶液 Eh 值、甲烷浓度、可溶性碳浓度及铵态氮浓度的相关性均达到显著或极显著水平. 双季稻品种甲烷排放与水稻根冠比及根孔隙度关系密切, 降低早稻品种根系孔隙度或者根冠比可减排甲烷, 而晚稻品种则与早稻相反; 根际土壤溶液碳氮浓度的降低和 Eh 值的提高也可减少甲烷的排放.

关键词:双季稻品种; 甲烷排放; 温室效应; 根系特征

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0904-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201805126

Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety

XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang*, XU Hua-qin, SU Shan, GUO Yu, ZHANG Lang, TANG Jian-wu

(Crop Cultivation Scientific Observation and Experiment Station in Central China, College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Six field varieties of early rice and late rice were selected as test materials for field experiments to explore the difference in CH_4 emissions among different rice varieties, and Static Obscure - Gas Chromatography was used to determine the CH_4 gas. The results demonstrated a significant difference in the CH_4 emissions flux between early and late rice varieties. The average yield of total fertility CH_4 emissions was highest in Xiangzaoxian 24 and lowest in Zhuliangyou 819, with a difference of 34.6%. Of the late rice varieties, Tyou 15 was the highest and the Ziyou 299 was the lowest, with a difference of 33.9%. Differences in CH_4 emissions and the greenhouse effect of unit yields between different double cropping rice varieties differed significantly. The cumulative CH_4 emissions from early rice varieties ranged from $198.3 \sim 303.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the lowest emissions were from Zhuliangyou 819. The greenhouse effect per yield ranged from 0.67 to $1.40 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and Luliangyou 996 had the lowest emission value. The late-season rice varieties exhibited significantly higher cumulative CH_4 emissions compared to early rice, ranging from 291.93 to $388.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and Ziyou 299 had the lowest emission value. The greenhouse effect of per yields rice varieties, while the late rice varieties were contrary to early rice. Reducing carbon and nitrogen concentrations in the rhizosphere and increasing Eh values could reduce CH_4 emissions.

Key words: double-cropping rice variety; methane emissions; greenhouse effect; root characteristics

温室气体 (GHG) 的大量排放以及浓度的急剧持续增加是造成全球变暖的主要原因, 当今全球气候变化很可能与人为因素引发的大气中温室气体浓度增加密切相关. 21 世纪初, CO_2 的温室效应贡献率达到 60%、 CH_4 达 20%、 N_2O 达 6%^[1~3], 而 CH_4 作为最重要的温室气体之一, 是仅次于 CO_2 的重要温室气体, 且对地球系统的能量收支和气候变化有重要影响^[4, 5]. 水稻是世界主要的粮食作物, 稻田在农业生产中是重要的农业温室气体排放源. 中国作为世界水稻生产大国, 水稻播种面积和总产量分别占世界的 18.5% 和 27.8%^[6], 来源于稻田排放的甲烷总量为 792.6 万 t, 占中国甲烷总排放量的 17.83%^[7]. 因此, 在未来有必要正确估算中国稻田

甲烷排放量^[8], 以及如何应对稻田 CH_4 排放, 缓减气候变化, 实现农田生态系统减排、可持续发展, 缓解及应对气候变化已成为了重要且急需重点研究的问题.

不同品种水稻种植, 影响甲烷产生和氧化以及排放的各个过程, 稻田 CH_4 排放存在显著差异, 甚至最大可相差 2~3 倍^[9, 10]. 许多研究表明, 不同品种水稻在产量形成的过程中对稻田甲烷排放和形

收稿日期: 2018-05-10; 修订日期: 2018-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571293); 国家科技支撑计划项目 (2013BAD07B11-02); 湖南省重点研发计划项目 (2016NK2125)

作者简介: 肖志祥 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向稻田温室气体减排, E-mail: shawzero@163.com

* 通信作者, E-mail: zqf_cis@126.com

成发挥着重要的作用^[11~13]。Zhang 等^[14]的研究发现, 水稻品种对稻田甲烷排放的影响主要来源于水稻对地下 CH₄ 产生或者氧化的不同作用, 而地上部植株性状则不能作为 CH₄ 排放的有效作用。Conrad 等^[15]的研究发现, 有 50% 左右的甲烷来源于水稻植株的光合产物。孙会峰等^[16]的研究表明, 水稻的产量与 CH₄ 排放量呈线性正相关关系, 并且粳稻品种(常规或杂交)的 CH₄ 累计排放量和产量高于籼稻品种, 杂交品种的 CH₄ 累计排放量和产量相对较高。Ma 等^[17]的研究表明, 传统水稻品种的根际土壤甲烷氧化潜力要低于超级稻品种, 而两者的甲烷产生潜力则比较类似, 因此可以说明超级稻品种的根系泌氧能力更强。通过机械振动的水稻茎部可促进水稻根系生长, 提高植株叶片气孔数量, 进而促进水稻根系泌氧和甲烷氧化能力^[18]。不同类型的土壤有机质含量等理化性质也不同, 而不同水稻品种种植, 稻田根际土壤的性质也会有所变化。有研究发现甲烷的产生量与土壤有机碳、全氮含量显著相关^[19]; 壤质和砂质土壤的 CH₄ 的平均排放通量要显著高于黏质性的土壤^[20]。稻田土壤 pH 影响产甲烷菌的活性和土壤有机质的分解速率, 土壤 pH 为中性时, 更有利于土壤甲烷的产生, 当 pH > 8.75 或 pH < 5.75 时, 产甲烷菌就会受到抑制, 稻田甲烷产生与排放就

大幅度减少甚至没有甲烷排放。当土壤处于厌氧环境且是还原状态时, 产甲烷菌才具有将土壤中的有机碳进行分解的活性, 从而产生甲烷。当土壤 Eh 为 -150 ~ -200 mV 时, 产甲烷菌开始产生 CH₄, 甲烷的排放与土壤的氧化还原电位存在显著负相关关系^[21]。

在我国南方双季稻作区, 水稻的种植品种繁多, 不同双季稻品种种植稻田甲烷排放存在一定的差异, 本研究通过比较不同双季稻品种的根系及根际土壤特性差异, 分析影响稻田甲烷排放与水稻品种关键根系特征以及根际土壤特性的关系, 以期判断水稻品种甲烷排放能力以及阐明不同双季稻品种甲烷排放差异形成的机制研究提供简易方法和基础支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

本试验地点位于浏阳市沿溪镇湖南农业大学试验基地, 试验地点属亚热带季风湿润气候, 土地肥沃, 四季分明, 热量降水充沛, 日照充足。经度 113.8°E, 纬度 28.3°N, 海拔 44.9 m, 多年平均温度为 17.2 ~ 17.6℃, 多年平均降水量约 1 647 mm, 为南方典型的双季水稻生产区, 土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土, 试验区土壤理化性状见表 1。

表 1 试验地土壤理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of soil in the site

项目	总有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	pH
参数	21.6	1.94	0.87	4.79	168.35	9.7	101.3	5.85

1.2 供试材料

供试早稻品种: 株两优 819、中早 39、陆两优 996、中嘉早 17、湘早籼 6 号、湘早籼 24 号, 生育期 108 ~ 112 d; 供试晚稻品种: 资优 299、Y 两优 1 号、玖两优 644、泰优 390、T 优 15、湘晚籼 17 号, 生育期 110 ~ 115 d。

1.3 试验设计

供试品种早晚稻各 6 个, 试验采用随机区组设计, 6 个处理, 3 次重复, 共 18 个小区, 各区组, 各小区之间相互独立, 各小区面积 36 m² (4 m × 9 m)。所有供试品种的施肥、灌溉等田间管理方式一致, 氮肥: 基肥 50%; 蘖肥 30%; 穗肥 20%。磷肥: 基肥一次性施入。钾肥: 基肥 50%; 蘖肥 50%。早稻: 尿素 261 kg·hm⁻²; 过磷酸钙 750 kg·hm⁻²; 氯化钾 201 kg·hm⁻²。晚稻: 尿素 330 kg·hm⁻²; 过磷酸钙 750 kg·hm⁻²; 氯化钾 201 kg·hm⁻²。所有供试

早稻品种于 4 月 30 日进行机插移栽, 其株行距分别为 17 cm、20 cm, 7 月 21 日收获。所有供试晚稻品种于 7 月 26 日进行机插移栽, 移栽株行距分别为 20 cm、23 cm, 10 月 25 日收获。

1.4 测定指标及方法

本试验采用静态暗箱-气相色谱法采集和测定甲烷气体, 静态箱长宽高规格为 0.55 m × 0.55 m × 1.2 m, 外部包有泡沫和铝箔纸, 防止太阳照射导致箱内温度变化过大, 底座由 PVC 材质做成, 于水稻栽插后将底座固定于每个小区中, 底座插入深度为 3 ~ 5 cm, 测定时加水注入底槽加以密封, 每隔 7 d 采集一次气体, 采气样前打开采样箱内顶部 1 个 12 V 小风扇以充分混匀箱内气体, 采气口安装在箱体的中上部, 箱内的采气管进气口在箱体中部位置。采样时间在当天上午的 09:00 ~ 11:00 进行, 分别在罩箱后的 0、10、20、30 min, 用装有三通阀的

50 mL 医用注射器先来回抽入打出数次, 然后抽取 50 mL 气体样品, 并转移到真空瓶中, 带回实验室待测. 采集的 CH_4 气体采用湖南省土壤肥料研究所提供的气相色谱 (Agilent789, 美国) 测定分析其浓度, 标准气体由国家标准物质中心提供^[12]. 甲烷气体排放通量由 4 个气样浓度值经线性回归分析得出.

稻田甲烷气体排放通量 (F) 计算公式如下^[22]:

$$F = \rho \cdot \frac{273H}{273 + T} \cdot \text{dc/dt}$$

式中, F 为排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; ρ 为标准大气压下的 CH_4 密度, $0.714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; T 为采样过程中采样箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; H 是采样箱的箱罩的净高度, m ; dc/dt 是采样箱内温室气体浓度的变化率.

CH_4 累计排放量 (T) 计算公式^[23]为:

$$T = \sum \left[\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 667 \times 15 \right]$$

式中, T 为累计排放量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; F_i 、 F_{i+1} 为第 i 、 $i+1$ 次测定时 CH_4 平均排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; t_{i+1} 、 t_i 为第 i 、 $i+1$ 次测定的时间间隔, d ; 以 100 a 为时间尺度, CH_4 的全球增温系数为 25, 即单位质量的 CH_4 引起的温室效应等对应于相同效应 CO_2 的质量^[24]. CH_4 气体的温室效应 (GWPs), 即全球增温潜势为 CH_4 排放量与增温系数的乘积. 排放通量均值为累计排放量与水稻生育期天数的比值.

于水稻生长的分蘖期、孕穗期、齐穗期、灌浆期, 分别对早晚稻各植株及土壤溶液进行取样, 测定水稻植株叶面积、地上生物量、根系生物量、根体积、根冠比和采用茎伤流法测定根系伤流量; 取样时按照每穴的平均茎蘖数, 从每小区取出 4 穴植株, 并包含完整的根系, 将地上部分与根系部分分离开, 根系部分放入网袋中用流水冲洗干净, 地上部分分为茎、叶、穗三部分, 洗干净装好, 各小区单独分开, 带回实验室. 植株叶面积用台式叶面积仪进行测定 (Li-3000, Li-cor, USA), 并计算叶面积指数 (LAI); 用量筒灌水测量根系的体积; 然后将新鲜的植株地上部样品与根系样品放入烘箱中 (105°C) 杀青 30 min, 然后在 80°C 恒温下烘干至恒重, 最后称重计算地上部生物量与根系生物量. 采用比重法测定前 3 个时期的根孔隙度. 用土壤溶液取样器采集 0 ~ 10 cm 的根际土壤溶液, 土壤溶液中的 NH_4^+ -N 浓度以及总碳浓度分别用流动分析仪 (Skalar, Netherlands) 和总碳分析仪 (Multi N/C3100, Analytikjena, German) 测定, 并计算可溶性碳 (DOC) 浓度. 在每次甲烷气体取样时, 用便携式

水质分析仪 (ODEON, PHEHT digital sensor, France PONSEL), 测定每个小区的根际土壤溶液的氧化还原电位 (Eh)、pH 以及温度. 早晚稻收获时, 每小区分别取 3 m^2 脱粒后晒干, 测定其重量, 计算每个小区的经济产量.

1.5 数据统计与分析

采用 Excel 进行数据处理, 绘图作表, 采用 Statistix 8.0 软件进行统计分析, 并作相关显著性检验 ($P < 0.05$) 及相关性分析.

2 结果与分析

2.1 双季稻品种间甲烷排放差异比较

2.1.1 不同双季稻品种甲烷排放通量季节变化差异

不同水稻品种在各生育期的甲烷平均排放通量存在显著差异 ($P < 0.05$), 如图 1 所示, 早稻分蘖期时, 湘早籼 6 号与湘早籼 24 号的甲烷平均排放通量显著高于中嘉早 17、株两优 819 以及中早 39 ($P < 0.05$), 平均排放通量的差异为 33.2%; 孕穗期时, 中嘉早 17 与湘早籼 24 号的甲烷平均排放通量显著高于陆两优 996、中早 39 及株两优 819 ($P < 0.05$), 最高与最低相差 $8.56 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 在齐穗期与灌浆期, 湘早籼 24 号的平均排放通量均显著高于其他 5 个早稻品种 ($P < 0.05$), 差异分别为 49.3% 和 60.3%; 早稻全生育期甲烷排放通量均值的变化为湘早籼 24 号 > 湘早籼 6 号 > 中嘉早 17 > 陆两优 996 > 中早 39 > 株两优 819. 晚稻分蘖期时, 甲烷平均排放通量各品种间差异变化值在 $0.73 \sim 12.6 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 湘晚籼 17 号显著高于资优 299 与 Y 两优 1 号 ($P < 0.05$); 泰优 390 与湘晚籼 17 号孕穗期的甲烷平均排放通量差异不显著 ($P > 0.05$), 但显著高于资优 299、Y 两优 1 号及玖两优 644 ($P < 0.05$), 平均极差为 $4.12 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 在齐穗期, 湘晚籼 17 号与泰优 390 及 T 优 15 差异不显著 ($P > 0.05$), 但显著高于资优 299 和 Y 两优 1 号 ($P < 0.05$). 灌浆期的甲烷排放通量变化很小, 极差为 $0.61 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 晚稻全生育期的甲烷季节排放通量均值存在显著差异 ($P < 0.05$), 排放通量均值大小顺序为: T 优 15 > 湘晚籼 17 号 > 泰优 390 > 玖两优 644 > Y 两优 1 号 > 资优 299.

2.1.2 不同双季稻品种甲烷累计排放量及温室效应差异

由图 2 可知, 不同早稻品种全生育期甲烷累计排放量 $198 \sim 304 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 且株两优 819 的甲烷排放量最低, 为 $198.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与中早 39、陆

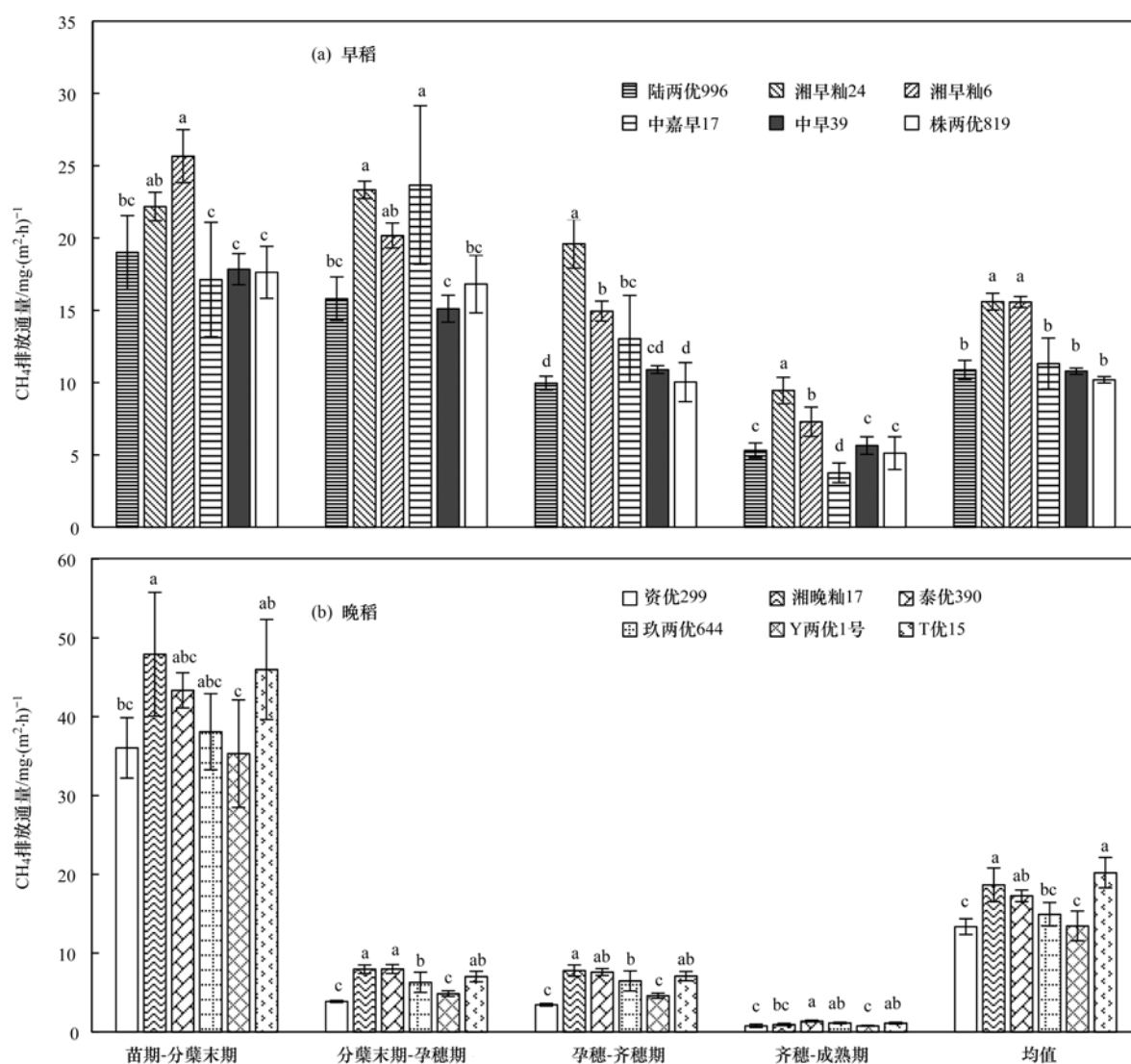


图1 不同双季稻品种生育期甲烷平均排放通量比较

Fig. 1 Comparison of methane average fluxes for different double-season rice varieties in the growth stage

两优 996、中嘉早 17 差异不显著($P > 0.05$), 但显著低于湘早籼 6 号和湘早籼 24 号($P < 0.05$); 而湘早籼 6 号与湘早籼 24 号差异不显著($P > 0.05$); 各品种处理甲烷累计排放量大小依次为: 湘早籼 24 号 > 湘早籼 6 号 > 中嘉早 17 > 陆两优 996 > 中早 39 > 株两优 819, 甲烷排放量最低的株两优 819 比最高的湘早籼 24 号 ($303.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 减少排放 $105.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 达到 53%。晚稻生长季的甲烷累计排放量, 湘晚籼 17 号和 T 优 15 最高, 达到了 $407.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $388.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 且显著高于玖两优 644、Y 两优 1 号和资优 299 ($P < 0.05$)。甲烷累计排放量从小到大排序均为资优 299 < Y 两优 1 号 < 玖两优 644 < 泰优 390 < T 优 15 < 湘晚籼 17 号, 极差达到了 $116.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (资优 299 与湘晚籼 17 号), 最低品种比最高品种减少排放达到 62.2%。不同温室气体对温室效应增强的相对辐射效应由全球增温潜势反应, 而单位产量温室效应大

小由水稻经济产量与甲烷温室效应共同作用决定。各早稻品种的单位产量温室效应极差值为 0.73 (湘早籼 6 号与株两优 819), 陆两优 996、株两优 819、中早 39, 中嘉早 17 显著低于湘早籼 6 号、湘早籼 24 号 ($P < 0.05$)。其大小顺序表现为湘早籼 6 号 > 湘早籼 24 号 > 中嘉早 17 > 中早 39 > 陆两优 996 > 株两优 819。晚稻各品种单位产量温室效应极差值为 0.74 (湘晚籼 17 号与 Y 两优 1 号), Y 两优 1 号、资优 299、玖两优 644 显著低于湘晚籼 17 号与 T 优 15 ($P < 0.05$), 各品种的大小顺序为 Y 两优 1 号 < 资优 299 < 玖两优 644 < 泰优 390 < T 优 15 < 湘晚籼 17 号。

2.2 不同双季稻品种植株根系特征差异比较

2.2.1 不同早稻品种根系特征差异变化

水稻的根系是直接与土壤环境接触的重要部位, 也是土壤中与众多甲烷排放有关的微生物之间直接联系的重要桥梁; 为水稻植株吸收水分和营养

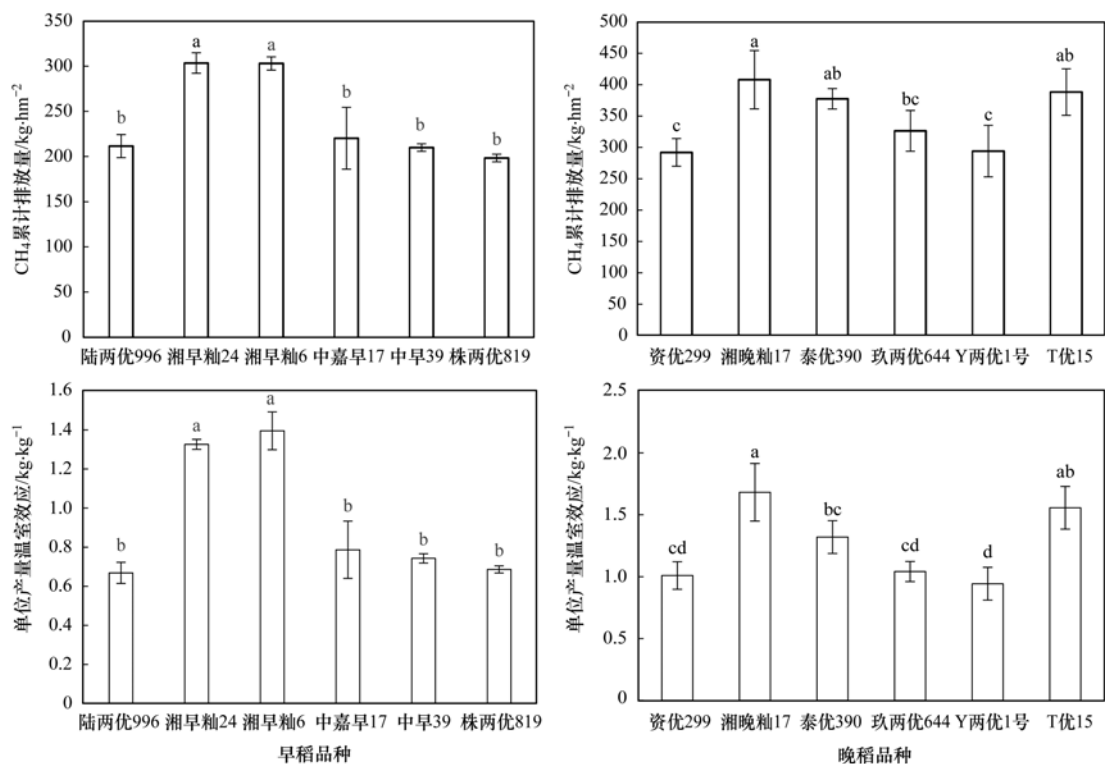


图2 不同早晚稻品种 CH₄ 累计排放量及单位产量温室效应变化

Fig. 2 Change in greenhouse effect of cumulative CH₄ emissions and the greenhouse effect of per yield of different early and late rice varieties

物质,对水稻的生长与生殖起着重要的作用.由图3可以看出,大部分早稻品种的根冠比在不同时期存在显著差异($P<0.05$),总体呈现逐步降低的趋势,水稻生育前期,根冠比大,生育后期小,原因是因为在生长后期,水稻光合产物形成,地上部生

物量不断增加;根系体积在孕穗至齐穗时期达到最大,中早39的根体积在齐穗期达到最大,且显著高于其他5个品种($P<0.05$).根系伤流量体现根系的吸收与传输能力,基本呈现先增后减的趋势.在齐穗期各个品种间根系伤流量差异不显著($P>$

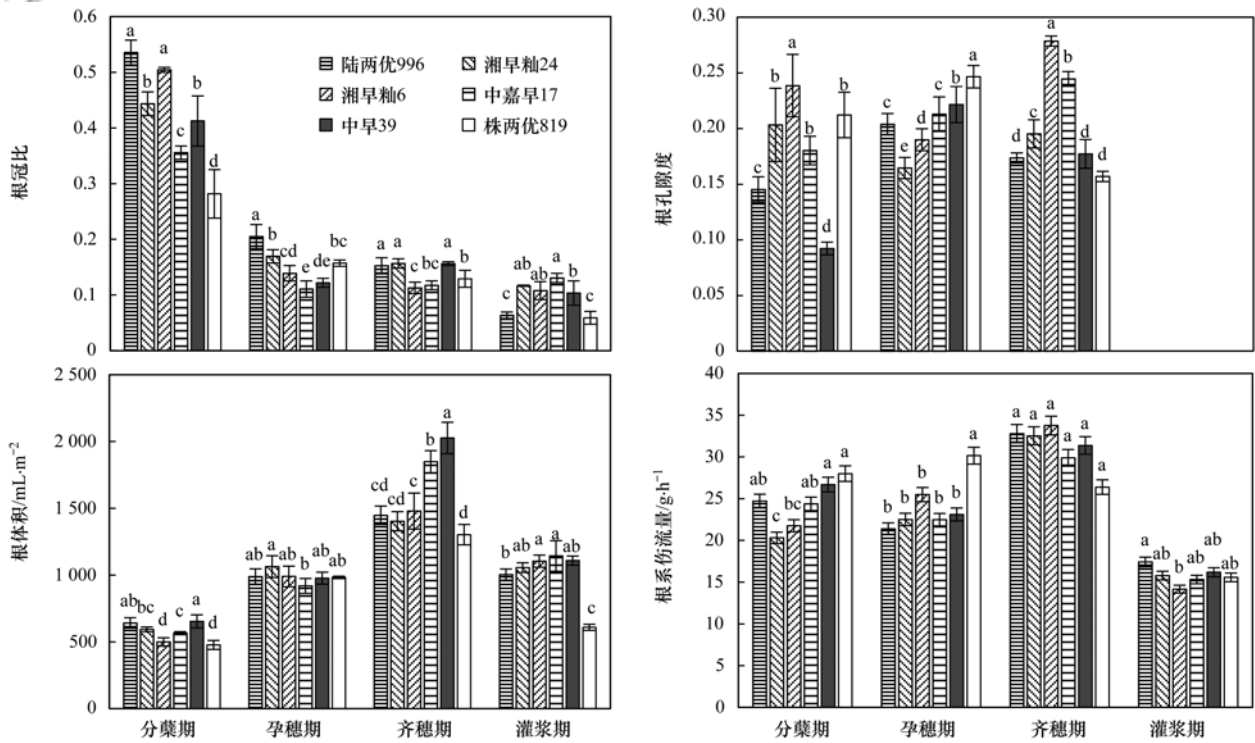


图3 不同早稻品种根系特征比较

Fig. 3 Root characteristics of different early rice varieties

0.05), 在其他 3 个时期差异显著 ($P < 0.05$), 但不明显. 根孔隙度在各个时期差异显著明显 ($P < 0.05$), 分蘖期时: 湘早籼 6 号显著高于其他 5 个品种 ($P < 0.05$), 最高与最低差值为 0.147, 中早 39 显著低于其他 5 个品种 ($P < 0.05$); 孕穗期时, 株两优 819 显著高于其他 5 个品种 ($P < 0.05$), 为 0.247, 湘早籼 24 号最低, 为 0.165; 齐穗期时, 湘早籼 6 号显著高于其他 5 个品种 ($P < 0.05$), 株两优 819 最低为 0.157, 与中早 39, 陆两优 996 之间差异不显著 ($P > 0.05$).

2.2.2 不同晚稻品种根系特征差异变化

由图 4 可以看出, 不同晚稻品种的根冠比也基本呈现逐渐降低的趋势. 其中湘晚籼 17 号与资优 299 的根冠比在分蘖期时要显著低于泰优 390、玖两优 644 与 Y 两优 1 号 ($P < 0.05$), 两者根冠比分别为 0.168、0.217; 在孕穗期时, 泰优 390 显著高于 T 优 15 与湘晚籼 17 号 ($P < 0.05$), 为 0.271; 齐穗期时湘晚籼 17 号、玖两优 644 与 T 优 15 要显著

低于其他 3 个品种 ($P < 0.05$); 泰优 390 在灌浆期要显著高于其他 5 个品种 ($P < 0.05$), 根冠比为 0.095. 各晚稻品种中, 根系体积在孕穗至齐穗时期达到最大, Y 两优 1 号与泰优 390 的根体积在分蘖期最大, 分别为 $540.9 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $530.6 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2}$, 均显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.05$), 各品种的根体积在 4 个时期差异显著明显; 不同晚稻品种的根系伤流量在各个时期也基本呈现先增后减的变化. 在水稻分蘖期与孕穗期各个品种间根系伤流量差异显著不明显, 在齐穗期与灌浆期差异显著明显; 不同晚稻品种根孔隙度在各个时期差异显著明显, 分蘖期时, 资优 299 显著高于湘晚籼 17 号、T 优 15 与泰优 390, 且 T 优 15 最低; 孕穗期时, 资优 299 与 Y 两优 1 号显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.05$), 湘晚籼 17 号最低; 齐穗期时, T 优 15 最低, 资优 299 与 Y 两优 1 号、玖两优 644 差异不显著 ($P > 0.05$), 但均显著高于其他湘晚籼 17 号与 T 优 15 ($P < 0.05$).

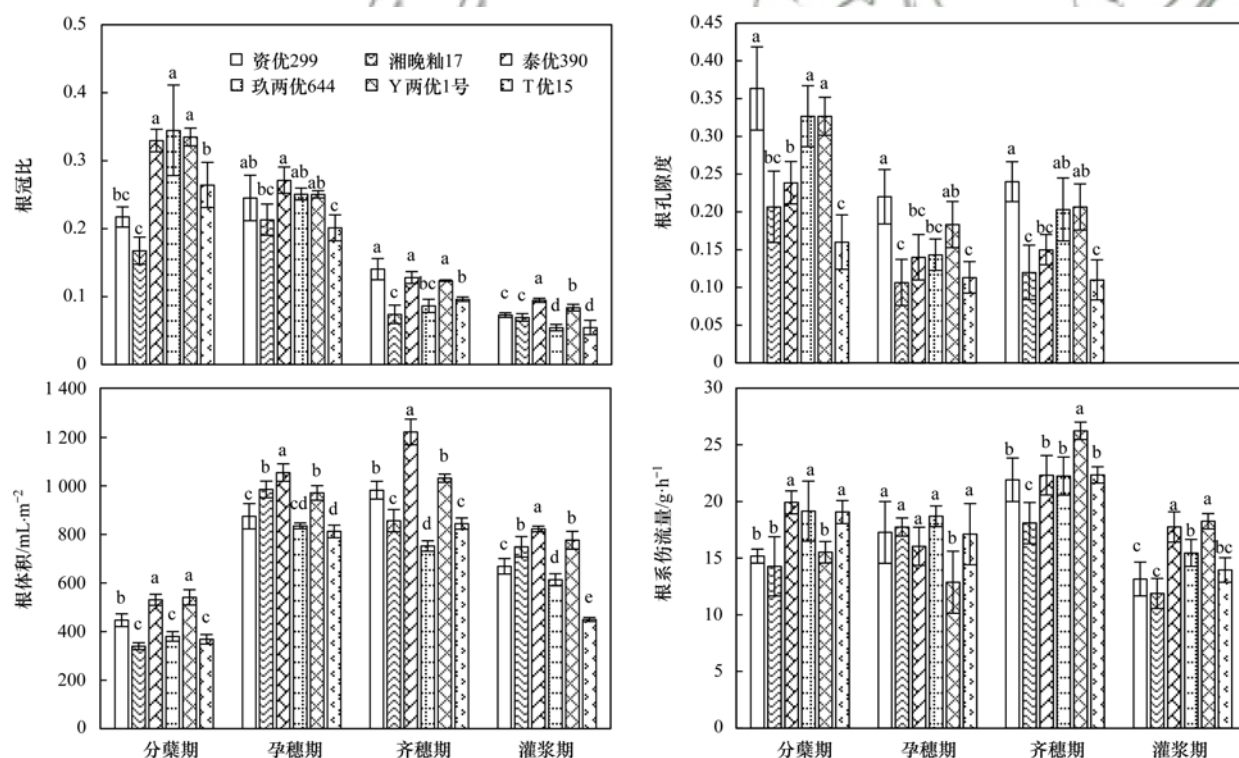


图 4 不同晚稻品种根系特征比较

Fig. 4 Root characteristics of different late rice varieties

2.3 不同双季稻品种稻田土壤溶液碳氮浓度差异比较

随着水稻的生长发育, 水稻根系存在差异性的同时也会影根际土壤的变化. 由图 5 可以看出, 不同早稻品种土壤溶液可溶性碳 (DOC) 浓度在分蘖期至灌浆期总体呈现先增后减的变化, 在孕穗期前后达到最大, 且显著高于其他时期的可溶性碳浓度

(DOC, $P < 0.05$), 全生育期的平均可溶性碳浓度 (DOC) 湘早籼 24 号最高, 且显著高于 DOC 浓度最低的中早 39 ($P < 0.05$), 相差 25.3%. 土壤溶液铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 浓度变化总体呈不断降低的趋势. 在分蘖期, 各品种的铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 浓度达到最大, 且显著高于其他 3 个时期 ($P < 0.05$); 全生育期的根际土壤溶液平均铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 浓度湘早

粳 6 号最高, 且显著高于最低的中早 39 ($P < 0.05$), 两者相差 19.7%.

晚稻品种各生育时期的根际土壤溶液可溶性碳(DOC)在孕穗期达到最高, 且显著高于其他时期的 DOC 浓度($P < 0.05$), 峰值的极差为 $7.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (T 优 15 与资优 299); 全生育期平均 DOC 浓度大小顺序为 T 优 15 > 泰优 390 > 湘晚粳 17 号 > 玖两优 644 > 资优 299 > Y 两优 1 号, 最高与最低相差 21.3%. 铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)

浓度在孕穗期差异显著明显, 在分蘖期、灌浆期差异显著不明显, 在齐穗期差异不显著 ($P > 0.05$). 各品种的铵态氮浓度在分蘖期达到最高, 最高与最低相差 $2.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (湘晚粳 17 号与 Y 两优 1 号), 且资优 299 与 Y 两优 1 号显著低于其他 4 个品种. 全生育期的平均铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 浓度, 大小顺序为 T 优 15 > 湘晚粳 17 号 > 泰优 390 > 玖两优 644 > 资优 299 > Y 两优 1 号, 最高与最低相差 17.9%.

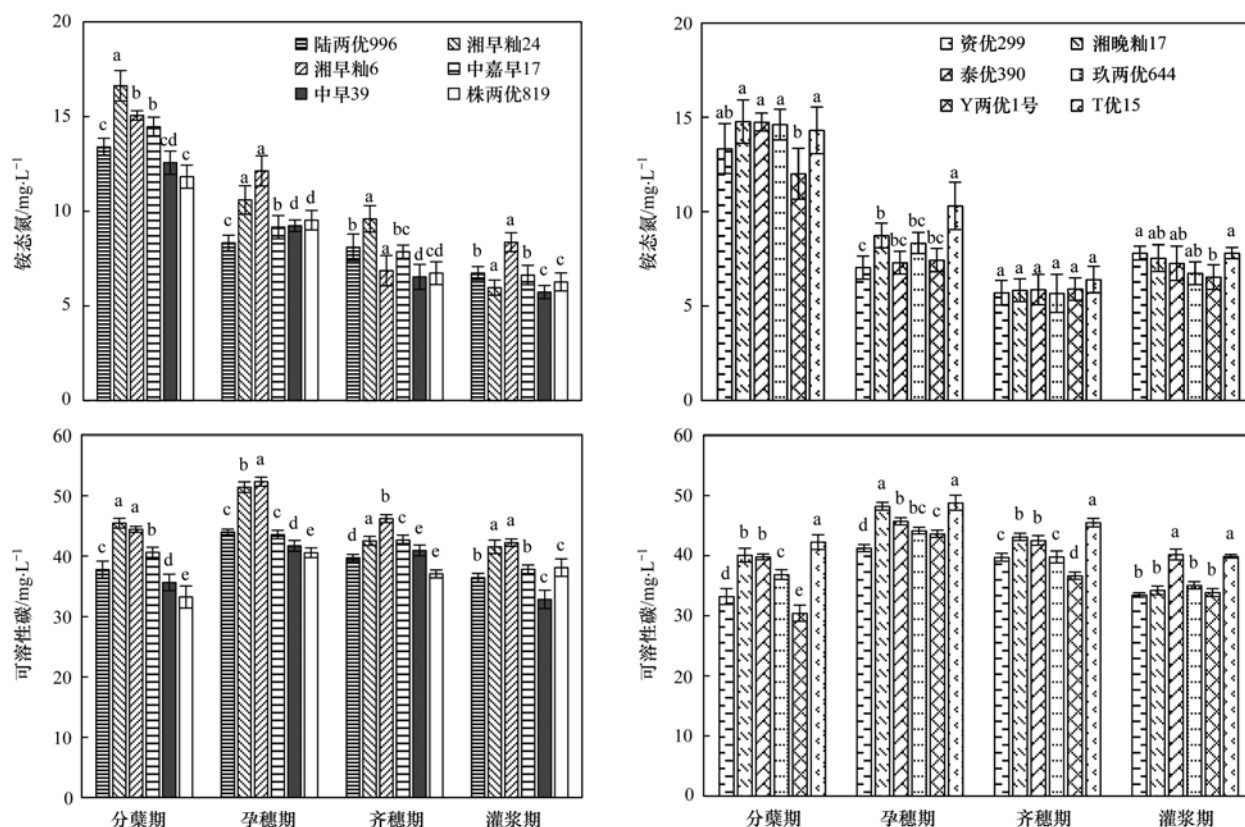


图 5 早晚稻品种在不同生育期可溶性碳(DOC)及铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 浓度差异

Fig. 5 Differences in soluble carbon (DOC) and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) in early rice and late varieties at different growth stages

2.4 水稻甲烷排放的相关性分析

2.4.1 早稻甲烷累计排放量与各指标的相关系数

将甲烷累计排放量与各水稻品种植株形态指标、根系特征、土壤溶液性质全生育期平均值作相关性分析, 得到相关系数如表 2 所示. 早稻甲烷季节累计排放量与各水稻品种平均产量 ($r = -0.859^{**}$)、土壤溶液 Eh 值 ($r = -0.774^{**}$) 均存在极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 表明早稻产量越高甲烷排放量越低, 土壤溶液氧化还原电位 (Eh) 越高越有利于减少甲烷排放. 同时甲烷排放量与土壤溶液甲烷浓度 ($r = 0.591^{**}$)、DOC 浓度 (0.695^{**}) 存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 浓度 (0.578^{*})、根冠比 ($r = 0.567^{*}$) 以及根孔隙度 ($r = 0.571^{*}$) 存在显著正相关

关系 ($P < 0.05$). 甲烷浓度及 DOC 浓度越高, 甲烷排放越高. 根伤流量及叶面积指数与甲烷排放量存在负相关关系, 但不显著; 土壤溶液温度及根体积与甲烷排放量存在正相关关系, 但不显著. 综合以上可以得出, 水稻根系关键指标根冠比、根孔隙度与土壤溶液关键指标甲烷浓度、氧化还原电位 (Eh)、可溶性碳(DOC)浓度及铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 浓度是影响稻田甲烷排放的关键所在.

2.4.2 晚稻甲烷累计排放量与各指标的相关系数

由表 3 可以看出, 晚稻甲烷累计排放量与产量 ($r = -0.662^{**}$)、水稻根系孔隙度 ($r = -0.772^{**}$) 均存在极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与可溶性碳 (DOC) 浓度 ($r = 0.715^{**}$) 存在极显著正相关关系, 表明晚稻产量越高甲烷排

放量越低, 晚稻根系孔隙度越大越有利于减少甲烷排放, DOC 浓度越高, 甲烷排放越强. 同时甲烷排放量与土壤溶液氧化还原电位 Eh ($r = -0.533^*$)、根冠比($r = -0.466^*$)呈显著负相关($P < 0.05$), 与土壤溶液甲烷浓度($r = 0.584^*$)及铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)浓度($r = 0.532^*$)呈显著正相关关

系($P < 0.05$), 与叶面积指数及根系伤流量存在负相关关系, 但不显著. 土壤溶液温度及根体积与甲烷排放量存在正相关关系, 但不显著. 影响晚稻稻田甲烷排放的根系关键指标是水稻根冠比、根系孔隙度; 土壤溶液关键指标是 Eh 值、甲烷浓度、DOC 浓度及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度.

表 2 早稻 CH_4 累计排放量与各指标的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient of cumulative CH_4 emissions and indicators for early rice

	FT	GR	Eh	pH	CC	TT	BB	VV	SS	KK	DOC
GR	-0.859 **										
Eh	-0.774 **	0.629ns									
pH	0.171ns	-0.09ns	-0.203ns								
CC	0.591 **	-0.372ns	-0.692 **	-0.08ns							
TT	0.314ns	-0.345ns	-0.32ns	-0.025ns	0.474 *						
BB	0.567 *	-0.287ns	-0.7 **	0.393ns	0.685 **	0.338ns					
VV	0.022ns	-0.026ns	-0.05ns	0.562 *	0.302ns	0.515 *	0.347ns				
SS	-0.285ns	0.245ns	0.343ns	-0.312ns	-0.181ns	-0.108ns	-0.285ns	-0.18ns			
KK	0.571 *	-0.678 **	-0.418ns	-0.417ns	0.309ns	0.241ns	-0.124ns	-0.411ns	-0.186ns		
DOC	0.695 **	-0.806 **	-0.914 **	0.182ns	0.703 **	0.424ns	0.617 **	0.082ns	-0.438ns	0.629 **	
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.578 *	-0.777 **	-0.932 **	0.141ns	0.676 **	0.487 *	0.627 **	0.06ns	-0.373ns	0.583 *	0.972 **

1) 表中数值为相关系数(r)值, 相关系数的显著性通过 F 检验, * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平差异显著; 标记 ns 则表示差异不显著, $N = 18$; 表中数值为平均值 $\pm$ 标准差; FT 指甲烷累计排放量、GR 指经济产量、CC 指土壤溶液甲烷浓度、TT 指土壤溶液温度、BB 指根冠比、VV 指根体积、SS 指根系伤流量、KK 根孔隙度, 下同

表 3 晚稻 CH_4 累计排放量与各指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of cumulative CH_4 emissions and indicators for late rice

	FT	GR	Eh	pH	CC	TT	BB	VV	SS	KK	DOC
GR	-0.662 **										
Eh	-0.533 *	0.262ns									
pH	-0.241ns	0.228ns	0.595 **								
CC	0.584 *	-0.302ns	-0.325ns	-0.302ns							
TT	0.334ns	-0.204ns	-0.357ns	-0.207ns	0.029ns						
BB	-0.466 *	0.698 **	0.057ns	0.187ns	-0.057ns	-0.051ns					
VV	-0.078ns	0.255ns	-0.102ns	0.261ns	0.176ns	0.042ns	0.601 **				
SS	-0.167ns	0.521 *	-0.159ns	-0.237ns	0.135ns	0.17ns	0.676 **	0.093ns			
KK	-0.772 **	0.761 **	0.61 **	0.609 **	-0.576 *	-0.197ns	0.478 *	0.195ns	0.174ns		
DOC	0.715 **	-0.699 **	-0.463ns	-0.401ns	0.55 *	0.133ns	-0.392ns	-0.238ns	-0.028ns	-0.892 **	
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.532 *	-0.656 **	-0.23ns	-0.199ns	0.408ns	0.141ns	-0.512 *	-0.458ns	-0.137ns	-0.672 **	0.718 **

3 讨论

3.1 不同水稻品种稻田 CH_4 排放的差异

不同水稻品种 CH_4 排放通量在不同的生育时期存在显著差异, 在水稻生育前期, CH_4 排放出现高峰, 在水稻生长后期(齐穗-成熟期)排放通量最低. 本研究结果表明, 双季稻各品种中, 在生育前期 CH_4 排放通量最高, 峰值出现在分蘖期至孕穗期, 在生育后期排放通量最低, 并且晚稻 CH_4 排放要比早稻排放高, 其中晚稻分蘖期的平均排放通量要比早稻 CH_4 高出 2 倍左右, 早稻全生育期的排放通量均值在 $10.2 \sim 15.6 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 晚稻在 $13.36 \sim 20.21 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 其原因在于早晚稻品种在分蘖期至孕穗期的水体环境及水稻植株的生长

能力不一样, 在晚稻分蘖期气温较高, 稻田中需不断地回水促进生长, 这为产甲烷菌提供了有利的条件, 从而促使甲烷排放增加. 相关研究表明, 在稻田中期排水晒田时甲烷排放通量会急剧下降, 回水之后, 水稻进入孕穗及抽穗期, 土壤中的有机物质会不断增多通过水稻根系的释放, 因此甲烷排放通量会有一个小的高峰值^[25]. 在本研究中早晚稻的甲烷排放通量变化也有相似的趋势, 特别是在晚稻各品种中. 排水晒田期间, 土壤的水位减少, 空气中的氧气就会进入土壤, 从而使甲烷氧化菌的活性增强, 促进甲烷的氧化, 进而减少了甲烷的排放. 早稻品种中, 湘早籼 24 号与湘早籼 6 号的甲烷排放量要显著高于其他 4 个品种, 这是由于其植株生物量, 根际土壤溶液可溶性碳、Eh 等差异显著造

成;而晚稻各品种的甲烷排放量差异显著明显,晚稻品种平均 CH_4 累计排放量显著高于早稻品种,早稻介于 $198.30 \sim 303.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,晚稻在 $291.93 \sim 388.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,相差 $22\% \sim 31\%$ 左右,原因在于晚稻品种在生长发育过程中,其生物量的分配以及根系孔隙度、土壤溶液的甲烷浓度差异造成,根据相关统计分析^[26],中国双季稻的甲烷排放规律是早稻排放要低于晚稻排放[早稻(234.3 ± 16.8) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,晚稻(361.8 ± 25.0) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$].单位产量温室效应,取决于稻田 CH_4 累计排放量与水稻产量的大小.在本研究结果中,早稻品种中早陆两优 996($0.67 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的单位产量温室效应最低,说明具有较高的产量和一定的 CH_4 排放量,相对较低的还有株两优 819、中早 39 以及中嘉早 17,介于 $0.69 \sim 0.79 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,最高与最低相差越 2 倍.傅志强等^[27,28]的研究表明,在早、晚稻季中,杂交稻 CH_4 排放量及单位产量温室效应都要比常规稻低,杂交稻品种 CH_4 排放量要比常规稻分别减少了 29.8% 和 6.9% . Su 等^[29]的研究发现,不同水稻品种光合产物的分配也会影响到 CH_4 的排放.因此,早晚稻甲烷排放的差异,原因主要在于水稻根系的营养分配,光合产物分配到地下部根及根系分泌物中的光合产物比例较小,主要倾向于分配到地上部,使得产量增加,叶片、茎秆中淀粉的含量增多,从而减少 CH_4 的形成.

3.2 影响稻田 CH_4 排放的根际特性

不同水稻品种通过自身的生长发育过程来影响稻田甲烷的产生与排放.本研究结果得出,稻田甲烷的排放量与水稻植株的根系生物量、根冠比、根系孔隙度以及根际土壤溶液的 Eh、甲烷浓度、可溶性碳(DOC)浓度、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)浓度均有显著相关性.因此,水稻植株生理及形态上的差异以及植株根际土壤的差异能对稻田甲烷排放产生一定的影响.相关的研究表明^[30],水稻植株的株高、分蘖数以及叶面积被认为是直接参与甲烷运输的,这些特性的差异直接关系到对甲烷的运输效果,将更有助于将土壤总的甲烷释放稻大气中.如 Aulakh 等^[31,32]研究了十几种水稻地上部分生物量与分蘖数与甲烷的排放关系,然而这些特性无法直接推断出有助于甲烷的排放,尽管不同水稻品种甲烷排放显著差异.在本研究中,植株地上部分形态指标也与甲烷排放没有显著相关性,这些结果表明地上植株性状可能不是甲烷排放的主要因素,尽管它们对甲烷的运输有潜在的影响.因此,水稻品种之间 CH_4 排放的差异应该主要源于水稻植物地下部位的影响过程(CH_4 在土壤中的产生或氧化)^[33].

相对于地上植物性状对 CH_4 排放的间接影响,水稻根在与 CH_4 排放有关的过程中发挥重要作用,直接影响 CH_4 的排放,用根特性来揭示水稻对甲烷排放产生的多种影响. Conrad 等^[34]和 Ye 等^[35]的研究表明,水稻根系生物量与 CH_4 排放存在负相关关系,土壤氧化还原电位存在负相关关系, CH_4 生产是厌氧分解的最后一步, CH_4 产生的底物来源于 SOM、根 C、醋酸盐(来自根和微生物)和 CO_2 . 水稻根提供可用的 C 为产甲烷菌,其丰度和活性增加,因此,它们利用更活跃的 SOM 生产更多的 CH_4 , CH_4 排放量还取决于 CH_4 产生和氧化平衡造成的消耗^[36]. 傅志强等^[37]的研究结果表明, CH_4 的排放与土壤溶液的 Eh 密切相关,且受土壤溶液中 CH_4 浓度的显著影响.在本研究中,甲烷排放与根际土壤甲烷浓度、Eh、DOC 浓度以及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度有显著正相关关系,甲烷的排放与土壤有机碳及土壤氮呈正相关,这与前者研究者结果一致.土壤 C 和 N 浓度与甲烷细菌呈正相关^[38]. 相关的研究表明, CH_4 排放在水稻生长季节随着 C 的加入量与最高温度相吻合,并且 CH_4 产量受到 C 底物量的限制^[39]. 土壤氮浓度的增加会增加 CH_4 的产生和排放量,造成这种情况也可能是因为 N 的限制^[40]. N 的投入通过影响光合左右衍生的 C 转化为土壤有机碳库,从而促进甲烷的排放,因为氮可以促进微生物活动和种群大小,增加根分解速率和 C 向土壤中的释放.同时也将提高水稻植物生长发育,通过增加根生物量将碳增加到 SOC 库^[41]. 从根部渗出到根际水稻土产生甲烷,从而促进 CH_4 的产生和土壤排放^[42]. 相关的研究表明,施肥刺激了甲烷营养细菌并增加了土壤中 CH_4 的吸收. NH_4^+ 可以刺激 CH_4 氧化,提高 CH_4 浓度;这可能意味着施肥可能最终减少稻田土壤中 CH_4 的产生和排放. CH_4 的产生也受到电子受体的影响^[43]. 不同水稻品种甲烷排放存在一定的差异,然而水稻地上部性状可能不是甲烷排放评估的良好指标,在未来的研究中会进一步关注水稻品种地下部根系方面的指标,以及本研究根际土壤方面的重要指标.

4 结论

不同早晚稻品种甲烷排放通量、单位面积排放量、单位产量排放量以及温室效应间均存在显著差异;晚稻品种甲烷排放量明显高于早稻品种;筛选出早稻低排放品种有杂交稻株两优 819、陆两优 996 和常规稻中早 39,低排晚稻品种有杂交稻资优 299 和 Y 两优 1 号.影响水稻品种甲烷排放的根际

特性主要是根冠比、根系孔隙度、根际土壤溶液 Eh 值、甲烷浓度、DOC 浓度及 NH_4^+ -N 浓度, 但根系孔隙度与根冠比对早晚稻甲烷排放的影响存在相反的影响, 为建立水稻品种甲烷排放能力评价指标体系提供了依据。

参考文献:

- [1] Lai R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, **123**(1-2): 1-22.
- [2] Mosier A R, Delgado J A, Keller M. Methane and nitrous oxide fluxes in an acid oxisol in western Puerto Rico: effects of tillage, liming and fertilization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(14): 2087-2098.
- [3] Baggs E M, Blum H. CH_4 oxidation and emissions of CH_4 and N_2O from *Lolium perenne* swards under elevated atmospheric CO_2 [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(4): 713-723.
- [4] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 181-195.
- [5] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, **248**(4960): 1217-1219.
- [6] FAO. Statistical databases, Food and Agriculture Organization of the United Nations[EB/OL]. 2014. <http://faostat.fao.org/>.
- [7] 国家发展和改革委员会应对国家气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013: 28-30.
- [8] 王平, 黄耀, 张稳. 1955-2005 年中国稻田甲烷排放估算[J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(5): 291-297.
Wang P, Huang Y, Zhang W. Estimation of methane emissions from rice fields in China from 1955 to 2005[J]. *Climate Change Research*, 2009, **5**(5): 291-297.
- [9] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响[J]. *作物学报*, 1999, **25**(4): 441-446.
Wang Z Y, Xu Y C, Li Z, *et al.* Effects of rice varieties on methane emission from paddy fields [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, **25**(4): 441-446.
- [10] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. *第四纪研究*, 2006, **26**(5): 722-732.
Huang Y. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy [J]. *Quaternary Research*, 2006, **26**(5): 722-732.
- [11] Gogoi N, Baruah K K, Gupta P K. Selection of rice genotypes for lower methane emission [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, **28**(2): 181-186.
- [12] Bhullar G S, Irvani M, Edwards P J, *et al.* Methane transport and emissions from soil as affected by water table and vascular plants[J]. *BMC Ecology*, 2013, **13**: 32.
- [13] Cheung F. Yield: The search for the rice of the future [J]. *Nature*, 2014, **514**(7524): S60-S61.
- [14] Zhang Y, Jiang Y, Li Z J, *et al.* Aboveground morphological traits do not predict rice variety effects on CH_4 emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **208**: 86-93.
- [15] Conrad R, Klose M, Lu Y H, *et al.* Methanogenic pathway and archaeal communities in three different anoxic soils amended with rice straw and maize straw[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, **3**: 4.
- [16] 孙会峰, 周胜, 陈桂发, 等. 水稻品种对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(8): 1595-1602.
Sun H F, Zhou S, Chen G F, *et al.* Effects of rice cultivars on CH_4 and N_2O emissions from rice fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(8): 1595-1602.
- [17] 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.
- [18] Zhao B, Zhang J, Lv X, *et al.* Methane oxidation enhancement of rice roots with stimulus to its shoots [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, **59**(4): 143-149.
- [19] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [20] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对稻田 CH_4 排放的影响[J]. *环境科学*, 2002, **23**(5): 1-7.
Jiao Y, Huang Y, Zong L G, *et al.* Methane emission from rice paddy soils as influenced by soil physico chemical properties[J]. *Environmental Science*, 2002, **23**(5): 1-7.
- [21] Wang Z P, Delaune R D, Patrick W H Jr, *et al.* Soil Redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(2): 382-385.
- [22] Liebig M A, Tanaka D L, Gross J R. Fallow effects on soil carbon and greenhouse gas flux in central North Dakota[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, **74**(2): 358-365.
- [23] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜力的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3120-3127.
Wang C, Shen J L, Zheng L, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3120-3127.
- [24] Bhatia A, Pathak H, Jain N, *et al.* Global warming potential of manure amended soils under rice-wheat system in the Indo-Gangetic plains[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(37): 6976-6984.
- [25] Li X L, Yuan W P, Xu H, *et al.* Effect of timing and duration of midseason aeration on CH_4 and N_2O emissions from irrigated lowland rice paddies in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **91**(3): 293-305.
- [26] 魏海苹, 孙文娟, 黄耀. 中国稻田甲烷排放及其影响因素的统计分析[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(17): 3531-3540.
Wei H P, Sun W J, Huang Y, *et al.* Statistical analysis of methane emission from rice fields in China and the driving factors [J]. *Science Agricultura Sinica*, 2012, **45**(17): 3531-3540.
- [27] 傅志强, 黄璜, 何保良, 等. 水稻植株通气系统与稻田 CH_4 排放相关性研究[J]. *作物学报*, 2007, **33**(9): 1458-1467.
Fu Z Q, Huang H, He B L, *et al.* Correlation between rice plant aeration system and methane emission from paddy field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, **33**(9): 1458-1467.
- [28] 傅志强, 黄璜, 朱华武, 等. 水稻 CH_4 和 N_2O 的排放及其与植株特性的相关性[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2011, **37**(4): 356-360.
Fu Z Q, Huang H, Zhu H W, *et al.* Relativity between CH_4 and N_2O emission and rice plant characteristics[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2011, **37**(4): 356-360.
- [29] Su J, Hu C, Yan X, *et al.* Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice [J]. *Nature*, 2015, **523**(7562): 602-606.
- [30] Ding A, Wills C R, Sass R L, *et al.* Methane emissions from rice fields: effect of plant height among several rice cultivars[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**(4): 1045-1052.
- [31] Aulakh M S, Bodenbender J, Wassmann R, *et al.* Methane

- transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, **58**(1-3): 367-375.
- [32] Aulakh M S, Wassmann R, Rennenberg H. Methane transport capacity of twenty-two rice cultivars from five major Asian rice-growing countries [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **91**(1-3): 59-71.
- [33] Lee H J, Sang Y K, Kim P J, *et al.* Methane emission and dynamics of methanotrophic and methanogenic communities in a flooded rice field ecosystem [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, **88**(1): 195-212.
- [34] Conrad R, Klose M, Yuan Q, *et al.* Stable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **49**: 193-199.
- [35] Ye R Z, Doane T, Morris J, *et al.* The effect of rice straw on the priming of soil organic matter and methane production in peat soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry* 2015, **81**: 98-107.
- [36] Dorodnikov M, Knorr K H, Kuzyakov Y, *et al.* Plant-mediated CH₄ transport and contribution of photosynthates to methanogenesis at a boreal mire: a ¹⁴C pulse-labeling study [J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(8): 2365-2375.
- [37] 傅志强, 龙攀, 刘依依, 等. 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- Fu Z Q, Long P, Liu Y Y, *et al.* Effects of water and nitrogenous fertilizer coupling on CH₄ and N₂O emission from double-season rice paddy field [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- [38] Zu Q H, Zhong L H, Deng Y, *et al.* Geographical distribution of methanogenic Archaea in nine representative paddy soils in China [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 1447.
- [39] Wang W Q, Lai D Y F, Sardans J, *et al.* Rice straw incorporation affects global warming potential differently in early vs. late cropping seasons in Southeastern China [J]. *Field Crops Research*. 2015, **181**: 42-51.
- [40] Wang W Q, Min Q W, Sardans J, *et al.* Organic cultivation of jasmine and tea increases carbon sequestration by changing plant and soil stoichiometry [J]. *Agronomy Journal*, 2016, **108**(4): 1636-1648.
- [41] Ge T D, Liu C, Yuan H Z, *et al.* Tracking the photosynthesized carbon input into soil organic carbon pools in a rice soil fertilized with nitrogen [J]. *Plant and Soil*, 2015, **392**(1-2): 17-25.
- [42] Lai D Y F, Roulet N T, Moore T R. The spatial and temporal relationships between CO₂ and CH₄ exchange in a temperate ombrotrophic bog [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 249-259.
- [43] Shrestha M, Shrestha P M, Frenzel P, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on methane oxidation, abundance, community structure, and gene expression of methanotrophs in the rice rhizosphere [J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(12): 1545-1556.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)