

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	《环境科学》征稿简则 (722)
信息 (748, 899, 924)	

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征

林森^{1,2}, 肖谋良², 江家彬³, 魏亮², 李科林^{1*}, 刘守龙², 祝贞科^{2*}, 葛体达², 吴金水²

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要: 作物根际沉积碳输入而引起的根际激发效应, 对农田土壤碳排放通量和碳平衡起到关键的调控作用. 在稻田生态系统中, 由于频繁的干湿交替, 土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放以及根际激发效应明显有别于其他自然生态系统. 因此, 明确稻田生态系统干湿交替过程中水稻根际激发效应的方向与强度, 对于减缓稻田温室气体排放具有重要意义. 本研究采用¹³C-CO₂ 连续标记法, 结合盆栽试验, 研究干湿交替和持续淹水条件下, 水稻生长以及根际激发效应的响应特征. 结果表明, 相对于持续淹水处理, 干湿交替处理使水稻地上部和根系生物量以及根冠比显著提高, 并增加了土壤微生物生物量. 持续淹水条件下, ¹³CO₂ 和 ¹³CH₄ 排放通量随水稻生长由 10.2 μg·(kg·h)⁻¹ 和 2.8 μg·(kg·h)⁻¹ (63 d) 增加到 16.0 μg·(kg·h)⁻¹ 和 3.2 μg·(kg·h)⁻¹ (75 d). 而在干湿交替条件下, 经过 12 d 的落干处理 ¹³CO₂ 和 ¹³CH₄ 排放通量分别降低了 57.5% 和 88.1%. 持续淹水条件下, CO₂ 和 CH₄ 的根际激发效应表现为正激发效应, 而且随水稻的生长而增加. 而干湿交替处理下, 经过 12 d 的落干处理, CO₂ 和 CH₄ 的根际激发效应分别由 0.29 mg·(kg·h)⁻¹ 和 12.3 μg·(kg·h)⁻¹ (63 d) 降低到 -0.39 mg·(kg·h)⁻¹ 和 0.07 μg·(kg·h)⁻¹ (75 d). 因此, 干湿交替处理, 能有效促进水稻生长和降低 CH₄ 的累计排放量. 合理地田间水分管理对于提高水稻产量和降低温室气体排放具有重要意义.

关键词: 稻田; 碳循环; 水分管理; 温室气体; ¹³C-CO₂ 连续标记法; 根际激发效应

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0988-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007177

Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils

LIN Sen^{1,2}, XIAO Mou-liang², JIANG Jia-bin³, WEI Liang², LI Ke-lin^{1*}, LIU Shou-long², ZHU Zhen-ke^{2*}, GE Ti-da², WU Jin-shui²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Subtropical Agro-Ecological Processes, Institute of Subtropical Agro-Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The rhizosphere priming effect (RPE) caused by carbon inputs from crop rhizodeposits plays a key role in regulating the carbon emission flux and carbon balance of farmland soils. Due to frequent alternations between dry and wet conditions, CO₂ and CH₄ emissions and the RPE in paddy field ecosystems are significantly different to those of other ecosystems. Therefore, it is of great significance to determine the direction and intensity of the rice RPE under alternations of dry and wet to limit greenhouse gas emissions. In this study, using a ¹³C-CO₂ continuous labeling method combined with a pot-based experiment, the response of rice growth and the RPE under alternating dry and wet and continuous flooding conditions was examined. The results showed that, compared with the continuous flooding treatment, the alternating dry and wet treatments significantly increased aboveground and root biomass and the root-to-root ratio, and also increased soil microbial biomass. Under continuous flooding conditions, fluxes of ¹³CO₂ and ¹³CH₄ increased with rice growth from 10.2 μg·(kg·h)⁻¹ and 2.8 μg·(kg·h)⁻¹ (63 d) to 16.0 μg·(kg·h)⁻¹ and 3.2 μg·(kg·h)⁻¹ (75 d), respectively. During the 12-day drying process, the emissions of ¹³CO₂ and ¹³CH₄ derived from rhizosphere deposited C decreased by 57.5% and 88.1%. Under continuous flooding conditions, the RPE for CO₂ and CH₄ were positive and increased with the growth of rice. Under the alternating dry and wet treatment, after 12 days of drying, the RPE for CO₂ and CH₄ was reduced from 0.29 mg·(kg·h)⁻¹ and 12.3 μg·(kg·h)⁻¹ (63 d) to -0.39 mg·(kg·h)⁻¹ and 0.07 μg·(kg·h)⁻¹ (75 d). Thus, alternating wet and dry treatment can effectively promote rice growth and reduce the cumulative emissions of CH₄. Therefore, adopting appropriate field water management is of great significance for increasing rice yields and mitigating greenhouse gas emissions.

Key words: paddy soil; carbon cycle; water management; greenhouse gas emission; ¹³C-CO₂ continuous labeling; rhizosphere priming effect

土壤有机碳是陆地碳库的重要组成部分, 其积累和分解的变化直接影响全球的碳平衡. 土壤有机碳库的大小主要受到外源有机物质输入和土壤有机质(SOM)分解过程的共同调节^[1]. 植物光合碳是土壤有机碳库的重要来源, 每年约有 40% 的植物光合碳

收稿日期: 2020-07-19; 修订日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41761134095, 41877104, 41771337)

作者简介: 林森(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态修复, E-mail: 982500950@qq.com

* 通信作者, E-mail: csfuklli@163.com; zhuzhenke@isa.ac.cn

通过根际沉积作用输入土壤,使土壤有机碳库不断更新累积^[2]。根际沉积物中包含有碳水化合物、氨基酸和有机酸等可溶物,为土壤微生物提供有效的碳源和氮源,改变根际微环境和土壤微生物活性,并改变 SOM 在根际土和非根际土之间的分解矿化速率,即为根际激发效应(RPE)^[3,4]。植物根际激发效应导致原土壤有机质矿化有可能抵消部分土壤固碳作用。因此,研究植物生长过程中的激发效应及其主要影响因素,对于理解土壤碳矿化与平衡具有重要意义。

根际激发效应的产生是植物根系和微生物以及土壤有机质之间相互作用的结果,是由根系分泌物驱动,通过改变微生物量及其活性来实现的,同时受其他生物与非生物因子的调控^[5,6]。根际沉积和根系活性的大小取决于植物的生长,而植物的生长又反过来影响根际的物理和化学条件,如水分、氧气浓度、pH 和氧化还原电位(Eh)^[7,8]。对于农田土壤,田间管理方式包括灌溉、施氮、秸秆还田等能够通过改变土壤水分和养分条件等非生物因素而影响微生物活性及根系分泌等过程,从而直接或间接地影响根际激发效应的方向和强度^[9~12]。稻田土壤水分可以直接改变植物的生长状况、根际沉积量和微生物活性,进而影响根际的激发效应的强度,通常较高的土壤含水量会引起更强烈的根际激发效应^[13]。植物的强烈的蒸腾作用也能使根际发生干湿交替,短时间和高频率的干湿交替可以促进土壤有机质的矿化^[13~15]。Cheng^[14]的研究指出大豆的根际激发效应比小麦强烈,可能是由于大豆比小麦具有持续、更高的蒸腾速率。土壤水分还能通过影响土壤微生物和植物对氮素的竞争^[16]、根系分泌物的含量^[17]和酶活性^[10,11,18]等对根际激发效应产生影响。而水稻土中

由于长期的干湿交替过程和水稻较强的蒸腾作用,使得根际沉积作用和微生物活性会随土壤水分状况变化而显著改变。因此,探讨水分管理对于水稻根际沉积碳的输入与激发效应,对于研究水稻土固碳机制和优化田间水分管理措施起到积极的促进作用。

目前,淹水灌溉是我国水稻种植的常规灌溉方式,人们为了节水减排,开始探究不同水分管理的灌溉模式。近年来关于水分状况对水稻生长的影响与机制已有较多的报道,然而不同水分管理会影响植物光合碳在地上/地下的分布,以及根系微生物的数量和活性,而水分管理对水稻根际激发效应的方向与强度的影响特征还尚不明确。因此,本研究采用¹³C-CO₂连续标记技术,通过设置不同水分管理条件(干湿交替和持续淹水),探究根际沉积碳输入过程中,水分管理对水稻光合碳分配及其根际激发效应的影响特征。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采集自中国科学院长沙农业环境观测研究站(113°19′52″E, 28°33′04″N)连续种稻 10 年的稻田表层土壤,该地属亚热带季风湿润气候,平均气温 16~18℃,年降雨量 1 200~1 700 mm,无霜期 250~300 d。土壤采集时间为 2018 年 5 月,采集耕作层(0~20 cm)土壤,除去土壤可见植物残体(如根、茎和叶)、石块以及土壤动物等可见杂质,取 1.00 kg 原始土样在室内进行风干破碎,过 2 cm 筛,供用于测定土壤的基本理化性质(表 1)。供试作物为水稻,水稻品种为常规迟熟晚稻——华润 2 号。

表 1 供试土壤基本理化性质¹⁾
Table 1 Soil physiochemical properties

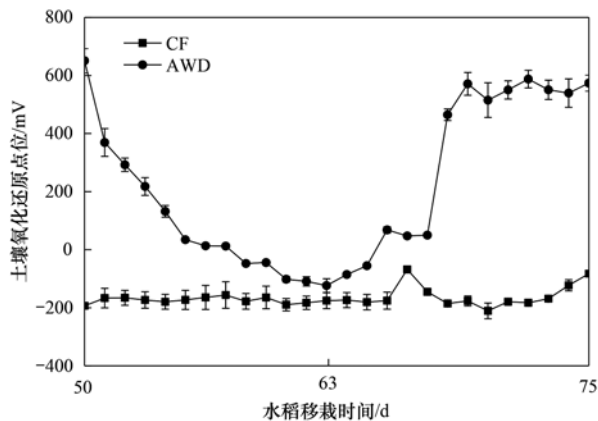
项目	pH	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	土壤有机质 /g·kg ⁻¹	碳氮比	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
数值	6.42±0.61	7.71±1.32	1.1±0.06	11.81±0.12	9.80±0.03	7.07±0.24	69.54±11.23	23.39±3.25

1) 数值表示 3 个重复的标准误差

1.2 水稻种植与¹³C-CO₂连续培养

向预培养后的土壤中施入 21 mg·kg⁻¹ 的 (NH₄)₂SO₄、30 mg·kg⁻¹ 的 KH₂PO₄ 和 122.5 mg·kg⁻¹ 的 KCl 作为基肥,其中以每千克土壤中施入的(NH₄)₂SO₄、NaH₂PO₄ 和 KCl 中的 N、P 和 K 的质量(mg)来计,并加入硝化抑制剂 DCD(25 mg·kg⁻¹),充分混匀。水稻标记组设计 2 组处理,每个处理 5 个重复:①持续淹水(CF);②干湿交替(AWD);每组包括:不种植水稻的处理、种植水稻但是不标记和种植水稻且标记。其中,持续淹水维持水位 2~3 cm,落

干处理要求土壤表面无水层或是有轻微土壤裂隙即可,持续淹水和落干周期为 24 d,设置 3 次干湿交替循环,采用原位 Eh 计检测土壤氧化还原电位变化动态(图 1)。将土壤样品混匀分装于 PVC 盆(直径 17.2 cm、高 20 cm),每盆装入相当于 1.8 kg 干土的土壤,2018 年 5 月 14 日播种,待水稻秧苗长到 25 d 后,将其移栽在 PVC 盆中,每盆 2 株,每个处理 12 个重复,用称重法分别控制土壤水分为田间持水量的 105%。水稻生长期间,根据病虫害情况,喷洒必要的农药。培养装置和方法参考文献[19,20]。



CF 表示持续淹水,AWD 表示干湿交替,下同

图 1 土壤的氧化还原点位

Fig. 1 Soil redox potential

待水稻秧苗在 PVC 盆生长 20 d 左右,在每个处理 12 个重复里面各选择 10 个长势相当的秧苗作为试验材料. 选择在 2018 年 6 月 29 日对水稻进行连续标记;另设不标记组作为对照试验,盆栽放置在离标记箱 10 m 以外,以防止同位素污染. ^{13}C - CO_2 通过 ^{13}C - NaHCO_3 (99% atom ^{13}C , 100 mL、1 mol·L $^{-1}$) 和过量的 H_2SO_4 (50 mL、0.5 mol·L $^{-1}$) 反应产生,通过控制 ^{13}C - NaHCO_3 加入速度使标记箱内 CO_2 含量维持在 350~400 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$. 标记培养箱内外安置两个温度传感器(智能型精密数显温度控制器, SNT-96S, 杭州),使标记过程中培养箱内外温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$. 本试验共设计 2 次采样,分别在最后一个干湿交替循环的水稻淹水期结束(63 d)和落干期结束时(75 d)采集气体和植株与土壤样品.

CO_2 和 CH_4 采用改进的静态箱采气法(图 2)^[12]. 采气时提前 1 d,每个处理随机选取 5 盆,检查 PVC 盆中的水位,然后将采气装置的 P1(根际呼吸 CO_2 和 CH_4 收集室)固定于 PVC 盆上,水稻秸秆与 P1 盖子中间的间隙用硅胶密封严实,放置 1 d 后使其固化. 采气时调节标记箱的光照与温度,保证此后每次采样时条件基本一致,将采气装置的 P2(水稻呼吸采气室)固定于 P1 上,打开两个风扇,向采气装置内通入高纯 N_2 10 min(以排除装置内的 CO_2 和 CH_4 ,同时也保证采气起始点气体浓度一致),然后封死采气装置的所有加水口和换气口、采气口,待装置内气体累积 1 h 后,在次日的 09:00~15:00,分别抽取两个气室中的气体,并分别进行气体浓度测试和同位素丰度测试. 采气结束后,对土壤和水稻植株采用破坏性采样,先将水稻地上部分剪断,将水稻根系与土壤分离,用去离子水冲洗干净,然后将水稻地上部和及其根系置于 105℃ 的烘箱内杀青 30 min,在 60℃ 下烘干至恒量、称重. 土壤

样品一部分新鲜的土样提取可溶性有机碳氮等基本理化指标,另一部分自然风干后待测.

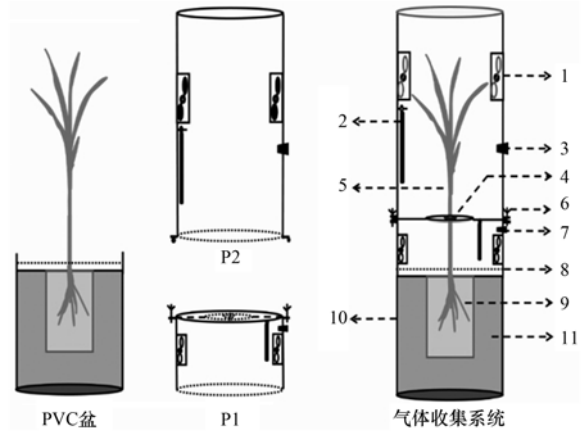


图 2 水稻根际呼吸气体(CO_2 和 CH_4) 采集装置

Fig. 2 Rice rhizosphere emitted gas (CO_2 and CH_4) trapping system

1.3 测试指标与方法

土壤 pH(土水体积比为 1:2.5)采用 pH 计(Mettler-toledo 320,瑞士)测定;土壤氧化还原电位(Eh)采用 Eh 计(PRN-41,日本)测定;土壤可溶性有机碳采用 0.05 mol·L $^{-1}$ K_2SO_4 浸提,土壤微生物量采用氯仿熏蒸,均采用 TOC 分析仪测定法(TOC-VWP,日本)^[21];土壤铵态氮(NH_4^+)采用 0.5 mol·L $^{-1}$ K_2SO_4 溶液提取,流动注射仪测定(AA3,德国). SOC 的测定采用干烧法-碳氮元素分析仪(Vario MAX C/N,德国)^[22];土壤速效磷(Olsen-P)采用 0.5 mol·L $^{-1}$ NaHCO_3 溶液浸提,钼锑抗比色-紫外分光光度计测定(UV2300,上海). CO_2 、 CH_4 用温室气体色谱仪直接测定(7890A,美国);水稻干物质质量(地上部、根系)及其根冠比测定采用 65℃ 烘干后称取干物质质量;水稻植株(地上部、根系)与土壤样品的 ^{13}C 丰度以及植物碳含量测定采用稳定性同位素质谱仪(MAT253,美国).

1.4 数据处理

通过添加外源 ^{13}C 于稻田土壤中,土壤原有碳和外源 ^{13}C 矿化作用产生 CO_2 气体,算式为:

$$C_{\text{root}} = \frac{(\delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{total}})}{(\delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{root}})} \times C_{\text{total}} \quad (1)$$

$$C_{\text{SOM}} = C_{\text{total}} - C_{\text{root}} \quad (2)$$

$$\text{RPE} = C_{\text{SOM,Planted}} - C_{\text{SOM,Unplanted}} \quad (3)$$

式中, C_{total} 为来源于水稻体系中总释放的 CO_2 ; $\delta^{13}\text{C}_{\text{total}}$ 为来源于水稻体系中总释放的 ^{13}C 丰度;

$\delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}}$ 为来源于土壤有机质释放的 $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 丰度;
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{root}}$ 为来源于根呼吸释放的 $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 丰度;
 $\text{C}_{\text{SOM,Planted}}$ 为来源于种植水稻土壤有机质释放的 CO_2 ; $\text{C}_{\text{SOM,Unplanted}}$ 为来源于未种植水稻土壤有机质释放的 CO_2 .

当来源于种植水稻土壤有机质释放的 CO_2 小于来源于未种植水稻土壤有机质释放的 CO_2 , 即公式(3)中 RPE 小于零则为负激发效应, 反之为正激发效应.

土壤原有碳和添加外源 ^{13}C 矿化作用的 CH_4 产生量计算原理同上.

方差分析用 SPSS 17.0 软件计算. 同一组分不同生育期的干物质累积量、根冠比、地上部占植株总质量的比例、土壤可溶性有机碳、微生物生物量碳、 CO_2 和 CH_4 激发效应与土壤环境因子间的关系显著性差异分析均设为 $P < 0.05$ 水平, 且均值比较采用最小显著差异法 (least significant difference, LSD). 制图采用 Origin 9.1 软件.

2 结果与分析

2.1 水分管理对水稻干物质质量及其根冠比的影响

水稻移栽 63 d 后, 持续淹水条件下的水稻地上部和根系的生物量分别为 $329 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而干湿交替比持续淹水条件下的水稻地上部和根系的生物量分别增加了 $22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 在经过最后一个落干周期后 (75 d), 水稻地上部生物量基本没有增加, 但是干湿交替处理的根系的生物量增加了 $14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 干湿交替处理显著增加了水稻根冠比, 而且在 75 d 时, 干湿交替相比持续淹水使水稻根冠比增加了 5% (图 3).

2.2 水分管理对土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响

土壤可溶性有机碳含量随水稻生长快速增加

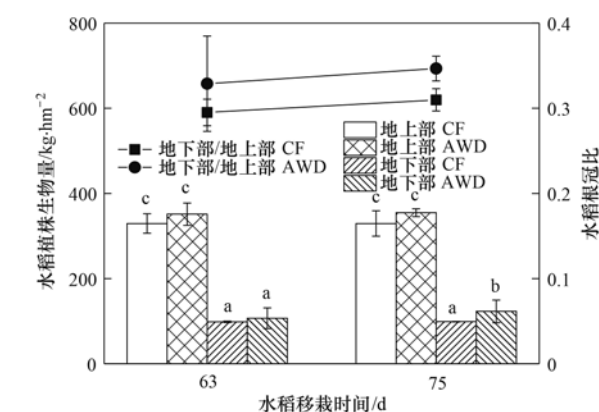
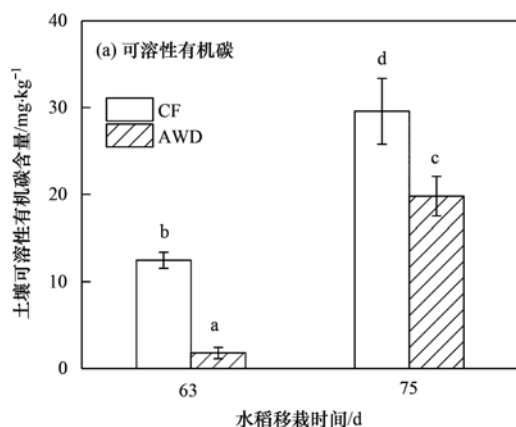


图 3 水分管理对水稻干物质质量及根冠比

Fig. 3 Rice dry biomass and the ratio of rice root to shoot

[图 4(a)]. 持续淹水条件下, 土壤可溶性有机碳由 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (63 d) 增加到 $29.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (75 d), 增加了 137%. 而干湿交替条件下土壤可溶性有机碳由 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (63 d) 快速增加到 $19.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (75 d), 增加了约 10 倍. 土壤微生物生物量碳随水稻生长的变化主要受到水分管理的影响 [图 4(b)]. 土壤微生物生物量碳受水分管理的影响与可溶性有机碳相反, 干湿交替处理增加了微生物生物量碳. 持续淹水条件下, 微生物生物量碳在两个采样点变化不大; 但是, 干湿交替处理下, 微生物生物量碳由 $332.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (63 d) 增加到 $516.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (75 d), 增加了 55%.

2.3 水分管理对 CO_2 和 CH_4 排放通量的影响

在水稻-土壤体系中, 不同水分管理方式对 CO_2 和 CH_4 排放通量有显著的影响 (图 5). 持续淹水条件下的 CO_2 和 CH_4 排放通量随水稻生长显著增加, 而干湿交替处理下, 在最后一个落干循环中 CO_2 和 CH_4 排放通量随水稻生长却显著降低. 持续淹水条件下, 来源于根际沉积碳的 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{13}\text{CH}_4$ 排放通量, 在随水稻生长由 $10.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $2.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (63 d) 增加到 $16.0 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 和

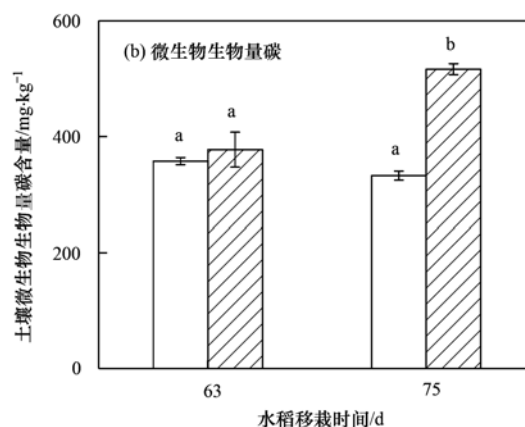


图 4 不同水分管理条件下土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳

Fig. 4 Soil dissolved C and microbial biomass C in response to water management

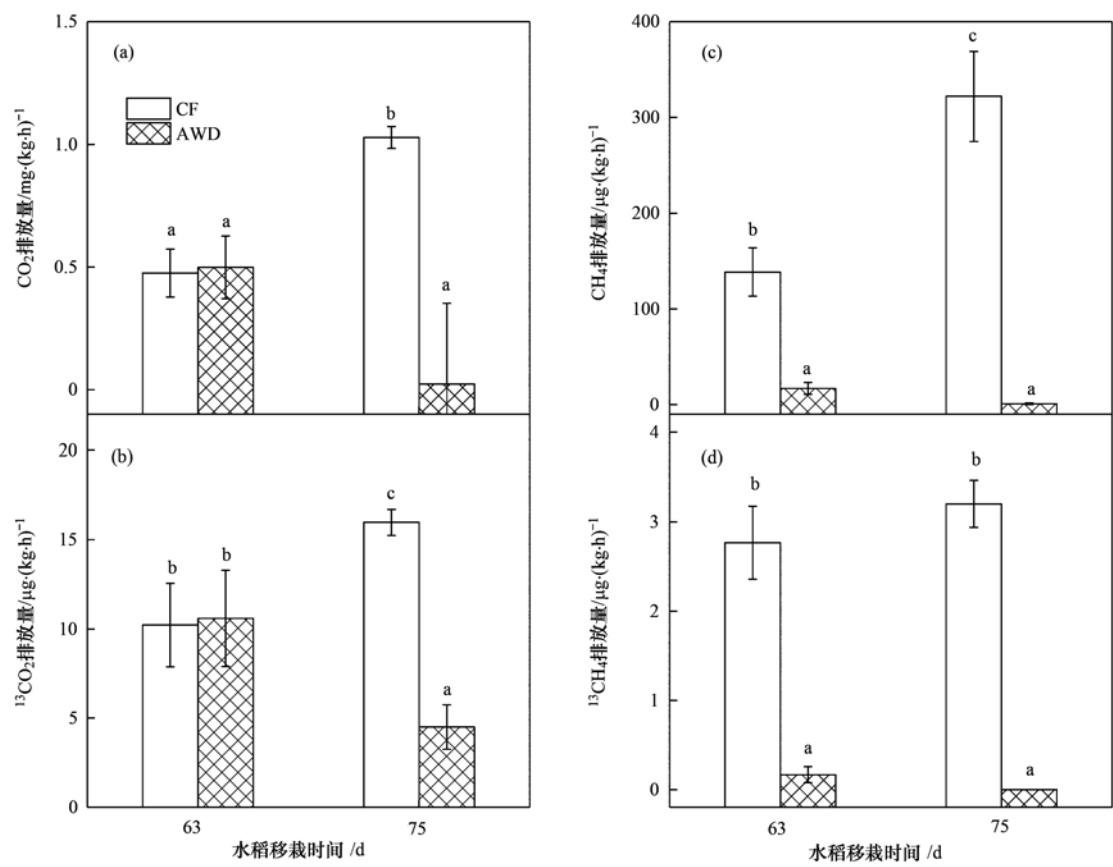


图5 CO₂ 和 CH₄ 排放通量对水分管理的响应
Fig. 5 CO₂ and CH₄ fluxes in response to water management

3.2 μg·(kg·h)⁻¹ (75 d). 而在 12 d 的落干处理过程中,来源于根际沉积碳的 ¹³CO₂ 和 ¹³CH₄ 排放通量分别降低了 57.5% 和 88.1%.

2.4 水分管理对 CO₂ 和 CH₄ 根际激发效应的影响

水稻根际沉积碳对土壤原有有机碳矿化的激发效应,因水分管理方式而差异明显. 持续淹水条件下,CO₂ 和 CH₄ 的根际激发效应表现为正激发效应,而且随水稻的生长由 0.06 mg·(kg·h)⁻¹ 和 7.7 μg·(kg·h)⁻¹ (63 d) 增加到 0.32

mg·(kg·h)⁻¹ 和 24.0 μg·(kg·h)⁻¹ (75 d). 而干湿交替处理下,经过 12 d 的落干处理(图 6),CO₂ 和 CH₄ 的根际激发效应分别由 0.29 mg·(kg·h)⁻¹ 和 12.3 μg·(kg·h)⁻¹ (63 d) 降低到 -0.39 mg·(kg·h)⁻¹ 和 0.07 μg·(kg·h)⁻¹ (75 d). 相关性分析发现,CO₂ 根际激发效应与 Fe²⁺、NH₄⁺ 和 MBN 呈显著的正相关关系; CH₄ 根际激发效应与 Fe²⁺、NH₄⁺、MBN 和 CO₂ 激发效应呈显著的正相关关系(表 2).

表 2 CO₂ 和 CH₄ 激发效应与土壤环境因子间的相关性分析¹⁾

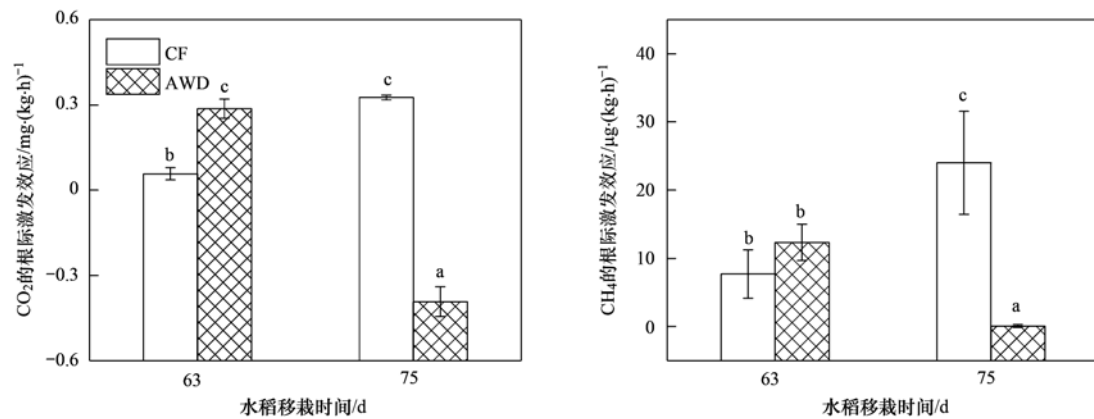
	土壤环境因子						碳矿化指标	
	pH	Fe ²⁺	NH ₄ ⁺ -N	DOC	MBC	MBN	PE(CO ₂)	PE(CH ₄)
pH	1							
Fe ²⁺	0.48 **	1						
NH ₄ ⁺ -N	0.40 *	0.90 **	1					
DOC	0.51 **	0.72 **	0.64 **	1				
MBC	0.50 **	0.60 **	0.55 **	0.83 **	1			
MBN	0.01	0.08	0.14	-0.10	-0.04 **	1		
PE(CO ₂)	0.03	0.45 *	0.53 **	0.09	-0.14	0.64 **	1	
PE(CH ₄)	0.16	0.59 **	0.56 **	0.33	0.00	0.80 **	0.8 **	1

1) * 表示 P < 0.05, ** 表示 P < 0.01

3 讨论

3.1 水分管理对水稻植株干生物量及根冠比的影响
水分在作物的生长发育过程中起着重要作用,

它通过水稻植株本身复杂的生理过程而影响植物的生长状况^[23]. 与传统农业灌溉方式相比,干湿交替灌溉对作物产量的影响结果将会产生差异^[24],但是结果也不尽相同,可能是因为土壤和气候条件,以及

图 6 CO₂ 和 CH₄ 根际激发效应对水分管理的响应Fig. 6 Response of CO₂ and CH₄ rhizosphere priming effects to water management

水稻品种特性等,干湿交替灌溉会降低作物生长和产量^[25,26],或是促进作物生长和产量提升^[27]. 本研究结果表明干湿交替水分管理能显著提高水稻的地上部和地下部生物量以及根冠比,促进了水稻的生长. 这主要是因为干湿交替处理下改变了水稻土壤的通气性和氧化还原条件,一方面促进水稻根尖伸长和细根发育,增加根系与土壤的接触面积,促进根系对养分的吸收能力,加快植物的生长发育;另一方面是增加了土壤微生物数量和活性,促进了土壤养分的活化与供给,进而加快了对养分的吸收和有机质分解^[28~30]. 而持续淹水会导致土壤通气性差、水稻根系发育不良、无效分蘖增加而抑制水稻的生长^[31,32]. 因此,相对于淹水处理,干湿交替更易加快根系生长和土壤养分活化,从而促进水稻植株的生长发育.

3.2 水分管理对水稻根际 CO₂ 激发效应的影响

不同的水分管理方式通过改变土壤的水分条件而影响土壤氧化还原电位、土壤含氧量、硝化与反硝化作用强度以及气体传输途径影响温室气体的产生与释放量^[28]. 干湿交替的淹水周期结束时(63 d),干湿交替条件下 CO₂ 的排放量高于持续淹水下的 CO₂ 的排放量[图 5(a)和图 5(b)]. 这主要是因为干湿交替处理,促进了水稻的生长,增加了根冠比,提高了根系活力(图 1). 根系的生长也会促进根系分泌物的增加以及微生物的生长[图 4(b)],从而促进了微生物呼吸产生更多的 CO₂^[12]. 但在落干周期结束时(75 d),干湿交替下 CO₂ 的排放量显著降低,而低于持续淹水下的 CO₂ 的排放量. 研究表明随落干和复水次数的增加,土壤 CO₂ 释放速率会随之减少^[33],可能的原因是水稻管理方式将会影响土壤中微生物呼吸作用,使其强度减弱,因而导致 CO₂ 释放量减少^[34]. 此外,土壤落干过程中,由于土壤中会形成新的弱结晶态矿物,增加了土壤可溶

性有机碳的吸附,降低了微生物的可接触性,进而减少了 CO₂ 的排放量^[35,36].

CO₂ 根际激发效应的规律与 CO₂ 排放通量的规律一致;即持续淹水过程中,随着水稻的生长 CO₂ 根际激发效应逐渐增加,而干湿交替处理中,在落干期 CO₂ 根际激发效应由正降低为负. 在持续淹水过程中,水稻的生长增加了土壤可溶性有机碳的含量,促进微生物的生长,增加了对根系分泌物和土壤原有有机碳的分解矿化^[12,37]. 而且,厌氧条件下土壤矿物还原溶解过程中会促进土壤原有有机质的溶出,使得易于被微生物利用,因而表现出逐渐增加的正激发效应^[38]. 而土壤在由淹水逐渐落干的过程中,土壤含水率急剧降低,分泌物难以快速扩散以供应土壤微生物利用,使微生物活性降低,抑制了其对土壤原有有机质的分解速率^[38,39]. 而落干过程中,新形成的土壤矿物对有机碳的封存作用进一步降低了微生物对原有有机碳的矿化,因而导致了在落干结束时 CO₂ 根际激发效应表现为负值^[40~42].

3.3 水分管理对水稻根际 CH₄ 激发效应的影响

CH₄ 的产生是厌氧分解的最后一步,其产生速率与土壤氧化还原电位密切相关,较低的氧化还原电位可以促进甲烷产生;在持续淹水的水稻土中由于较低的氧气含量使得土壤氧化还原电位较低(图 1)^[43,44],因而产甲烷量和甲烷的激发效应都高于干湿交替处理的土壤[图 5(c)、图 5(d)和图 6]. 而且,持续淹水处理中,随着水稻的生长,铁还原速率增加,促进了甲烷的产生. 但是干湿交替处理中,落干过程中由于土壤氧气含量增加,抑制了甲烷产生. 持续淹水处理的 CH₄ 根际激发效应始终表现为正激发效应. 这与之前的研究结果一致,根系分泌物是厌氧条件下微生物基质的重要来源^[45]. 相对于干湿交替,持续淹水来源于土壤原有有机质的 CH₄ 的释放和来源于水稻新输入的根际沉积碳的

CH₄ 的释放都显著高于干湿交替下 CH₄ 的释放. 这可能是: ① 持续淹水条件下形成的缺氧环境, 有利于土壤中还原型微生物的生长, 可促进水稻土中铁还原过程, 加快土壤矿物固定的养分元素释放到土壤, 使产甲烷菌活性得以提高, 因此提高了微生物对土壤有机质的分解矿化作用, 增强了 CH₄ 释放的根际激发效应^[38,40,42]. ② CH₄ 排放是由土壤中 CH₄ 产生、氧化及向大气传输 3 个过程相互作用的结果. CH₄ 产生是土壤厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果, 但在干湿交替条件下, 充足的氧分会使甲烷氧化菌对多数的 CH₄ 进行氧化, 就造成了稻田土壤中生成的 CH₄ 在排放到大气前约 80%~94% 被氧化^[46,47]. Yagi 等^[48] 研究了持续淹水及水分排干对稻田 CH₄ 排放的影响, 结果表明水稻生长期几次短时间的水分排干大大降低了 CH₄ 排放量. 蔡祖聪^[49] 通过培养试验研究淹水、好气 (70% WHC) 和淹水好气交替的不同水分类型对土壤温室气体排放的影响, 结果表明连续淹水条件下土壤排放出大量的 CH₄, 好气条件下土壤不排放 CH₄, 淹水好气交替处理的土壤排放的 CH₄ 在好气和连续淹水之间. 因此, 干湿交替水分管理可以抑制甲烷产生并降低根际激发效应.

4 结论

(1) 干湿交替相对于持续淹水增加了水稻植株干物质量和根冠比. 干湿交替过程增加了 CO₂ 排放通量, 却降低了 CH₄ 排放通量.

(2) 持续淹水条件下, CO₂ 的根际激发效应, 表现为持续的正激发效应, 而在土壤落干处理后表现为持续的负激发效应. CO₂ 根际激发效应主要受 Fe²⁺、NH₄⁺ 和 MBN 的影响.

(3) 干湿交替条件下, 水稻土产 CH₄ 显著低于持续淹水处理, 而且落干处理过程中降低了 CH₄ 的根际激发效应. 持续淹水条件下, CH₄ 的根际激发效应表现出了较强的正激发效应.

致谢: 本研究的实施场所以及样品测定工作由中国科学院亚热带农业研究所提供, 谨表感谢.

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, **123**(1-2): 1-22.
- [2] Gleixner G, Poirier N, Bol R, *et al.* Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(3): 357-366.
- [3] Kuzyakov Y. Review: factors affecting rhizosphere priming effects[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, **165**(4): 382-396.
- [4] Philippot L, Raaijmakers J M, Lemanceau P, *et al.* Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, **11**(11): 789-799.
- [5] Kemmitt S J, Lanyon C V, Waite I S, *et al.* Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass—a new perspective[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(1): 61-73.
- [6] Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(9): 1363-1371.
- [7] Cheng W X, Johnson D W, Fu S L. Rhizosphere effects on decomposition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(5): 1418-1427.
- [8] Yuan Q, Pump J, Conrad R. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2013, **10**(8): 14169-14193.
- [9] Soon Y K. Crop residue and fertilizer management effects on some biological and chemical properties of a Dark Grey Solod[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, **78**(4): 707-713.
- [10] Geisseler D, Horwath W R, Scow K M. Soil moisture and plant residue addition interact in their effect on extracellular enzyme activity[J]. *Pedobiologia*, 2011, **54**(2): 71-78.
- [11] Burns R G, Deforest J L, Marxsen J, *et al.* Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 216-234.
- [12] Zhu Z K, Ge T D, Liu S L, *et al.* Rice rhizodeposits affect organic matter priming in paddy soil: the role of N fertilization and plant growth for enzyme activities, CO₂ and CH₄ emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 369-377.
- [13] Dijkstra F A, Cheng W X. Interactions between soil and tree roots accelerate long-term soil carbon decomposition[J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(11): 1046-1053.
- [14] Cheng W X. Rhizosphere priming effect: its functional relationships with microbial turnover, evapotranspiration, and C-N budgets[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(9): 1795-1801.
- [15] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(3): 798-805.
- [16] Liljeroth E, Kuikman P, van Veen J A. Carbon translocation to the rhizosphere of maize and wheat and influence on the turnover of native soil organic matter at different soil nitrogen levels[J]. *Plant and Soil*, 1994, **161**(2): 233-240.
- [17] Gorissen A, Tietema A, Joosten N N, *et al.* Climate change affects carbon allocation to the soil in shrublands[J]. *Ecosystems*, 2004, **7**(6): 650-661.
- [18] Bell T H, Henry H A L. Fine scale variability in soil extracellular enzyme activity is insensitive to rain events and temperature in a mesic system[J]. *Pedobiologia*, 2011, **54**(2): 141-146.
- [19] Ge T D, Chen X J, Yuan H Z, *et al.* Microbial biomass, activity, and community structure in horticultural soils under conventional and organic management strategies[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **58**: 122-128.
- [20] Ge T D, Wu X M, Chen X J, *et al.* Microbial phototrophic fixation of atmospheric CO₂ in China subtropical upland and paddy soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **113**: 70-78.
- [21] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005.

- [23] 谭立敏. 施氮对光合碳在水稻-土壤-微生物系统中分配的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
Tan L M. Allocation of photosynthesized carbon to rice-soil-microbial community system under nitrogen application [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [24] Mishra H S, Rathore T R, Pant R C. Effect of intermittent irrigation on groundwater table contribution, irrigation requirement and yield of rice in Mullisols of the Tarai region[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, **18**(3): 231-241.
- [25] Won J G, Choi J S, Lee S P, *et al.* Water saving by shallow intermittent irrigation and growth of rice[J]. *Plant Production Science*, 2005, **8**(4): 487-492.
- [26] Yao F X, Huang J L, Cui K H, *et al.* Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2012, **126**: 16-22.
- [27] Tabbal D F, Bouman B A M, Bhuiyan S I, *et al.* On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, **56**(2): 93-112.
- [28] 张静, 刘娟, 陈浩, 等. 干湿交替条件下稻田土壤氧气和水分变化规律研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, **22**(4): 408-413.
Zhang J, Liu J, Chen H, *et al.* Change in soil oxygen and water contents under alternate wetting and drying in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, **22**(4): 408-413.
- [29] 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 等. 施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1227-1234.
Wang T T, Zhu Z K, Zhu H H, *et al.* Input and distribution of photosynthesized carbon in soil-rice system affected by water management and nitrogen fertilization [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1227-1234.
- [30] 侯海军, 张文钊, 沈建林, 等. 水分管理对稻田细菌丰度与群落结构的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(9): 1431-1438.
Hou H J, Zhang W Z, Shen J L, *et al.* Effect of water management on soil bacterial abundance and community in the rice paddy field [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(9): 1431-1438.
- [31] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, *et al.* Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use [J]. *Field Crops Research*, 2013, **144**: 212-224.
- [32] 姜萍, 袁永坤, 朱日恒, 等. 节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(8): 1592-1596.
Jiang P, Yuan Y K, Zhu R H, *et al.* Study on the nitrogen loss from paddy fields on different water management[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(8): 1592-1596.
- [33] Schimel J, Balser T C, Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function [J]. *Ecology*, 2007, **88**(6): 1386-1394.
- [34] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderón F J, *et al.* Response of microbial community composition and activity in agricultural and grassland soils after a simulated rainfall[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(12): 2249-2262.
- [35] ThomasArrigo L K, Byrne J M, Kappler A, *et al.* Impact of organic matter on iron(II)-catalyzed mineral transformations in ferrihydrite-organic matter coprecipitates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(21): 12316-12326.
- [36] Wei X M, Zhu Z K, Wei L, *et al.* Biogeochemical cycles of key elements in the paddy-rice rhizosphere: Microbial mechanisms and coupling processes[J]. *Rhizosphere*, 2019, **10**, doi: 10.1016/j.rhisph.2019.100145.
- [37] Liu X J A, Finley B K, Mau R L, *et al.* The soil priming effect: consistent across ecosystems, elusive mechanisms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **140**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107617.
- [38] Pan W N, Kan J J, Inamdar S, *et al.* Dissimilatory microbial iron reduction release DOC (dissolved organic carbon) from carbon-ferrihydrite association [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **103**: 232-240.
- [39] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(2): 302-311.
- [40] Canarini A, Dijkstra F A. Dry-rewetting cycles regulate wheat carbon rhizodeposition, stabilization and nitrogen cycling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 195-203.
- [41] Atere C T, Ge T D, Zhu Z K, *et al.* Assimilate allocation by rice and carbon stabilisation in soil: effect of water management and phosphorus fertilisation[J]. *Plant and Soil*, 2019, **445**(1-2): 153-167.
- [42] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(2): 339-347.
- [43] 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.
- [44] Ye R Z, Doane T A, 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.
- [45] 杨智仙, 汤利, 郑毅, 等. 不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病发生、根系分泌物和根际微生物群落功能多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(3): 570-579.
Yang Z X, Tang L, Zheng Y, *et al.* Effects of different wheat cultivars intercropped with faba bean on faba bean Fusarium wilt, root exudates and rhizosphere microbial community functional diversity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, **20**(3): 570-579.
- [46] Wu X, Yao Z, Brüggemann N, *et al.* Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(5): 773-787.
- [47] Fechner E J, Hemond H F. Methane transport and oxidation in the unsaturated zone of a *Sphagnum* peatland [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1992, **6**(1): 33-34.
- [48] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K I, *et al.* Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: automated methane monitoring[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(2): 255-267.
- [49] 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[J]. *土壤学报*, 1999, **36**(4): 484-491.
Cai Z C. Effects of water regime on CO₂, CH₄ and N₂O emissions and overall potential for greenhouse effect caused by emitted gases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(4): 484-491.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)