

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筶笠湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭日玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

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 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

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

王婷婷^{1,2}, 祝贞科^{1*}, 朱捍华¹, 汤珍珠^{1,3}, 庞静³, 李宝珍¹, 苏以荣^{1*}, 葛体达¹, 吴金水¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062)

摘要: 施肥和水分管理是影响水稻生长的两个关键因素, 探讨水肥耦合条件下光合碳在“水稻-土壤”系统输入与分配动态, 对深入解析稻田土壤碳循环具有重要意义. 本研究通过盆栽试验, 选用粘性常规水稻品种(中早 39), 采用¹³C-CO₂ 连续标记技术, 量化研究施氮和水分管理对光合碳在“水稻-土壤”系统中分配的影响. 结果表明: 施氮增加了水稻地上部干物质重和碳、氮含量, 却显著降低了水稻根冠比; 干湿交替使施氮条件下的水稻地上部全碳、全氮含量较持续淹水处理分别提高了 22% 和 33%, 根系中全碳、全氮含量分别提高了 36%、44%, 这表明施氮有利于水稻地上部生长, 而干湿交替显著促进了水稻根系的生长. 施氮显著增加水稻地上部¹³C 含量, 与不施氮处理相比增加了 32%~83%; 施氮使光合碳在水稻地上部的回收率增加 6%~32%, 在根系的回收率减少 18%~59%. 水分管理对¹³C 分配的影响表现为: 连续标记 22 d 后, 在施氮条件下, 干湿交替使水稻地上部、根系¹³C 量均有一定量的增加; 不施氮条件下, 干湿交替与持续淹水处理相比, 地上部¹³C 量减少 10.3 mg·pot⁻¹, 回收率降低了 11%~12%; 根系¹³C 量增加 1.9 mg·pot⁻¹, 回收率提高了 24%~57%. 施氮和干湿交替都显著增加了¹³C 在根际土壤中的累积与回收率. 因此, 施氮增加了光合碳在土壤-水稻系统中的累积, 但降低了光合碳在根系中的分配, 干湿交替比持续淹水更利于光合碳向土壤中的传输与累积, 水肥耦合管理显著调控了光合碳的传输与分配. 该研究进一步量化了水肥管理条件下水稻光合碳的分配及其在土壤有机碳库中的传输特征, 为稻田水肥管理、水稻土有机质积累持续机制提供了理论依据和数据支撑.

关键词: 水稻; 根际沉积; ¹³C 连续标记; 施氮; 干湿交替

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1227-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201608068

Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization

WANG Ting-ting^{1,2}, ZHU Zhen-ke^{1*}, ZHU Han-hua¹, TANG Zhen-zhu^{1,3}, PANG Jing³, LI Bao-zhen¹, SU Yi-rong^{1*}, GE Ti-da¹, WU Jin-shui¹

(1. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Fertilizer and water management are two key factors for rice growth. A better understanding of the carbon (C) cycling in paddy soil requires investigation into the input characteristics and distribution dynamics of photosynthesized carbon in rice-soil system. We grew rice (Zhongzao 39) in PVC pots and used the ¹³C-CO₂ continuous labeling method to quantify the allocation of photosynthesized carbon in rice-soil system under two regimes (Drying-rewetting vs. continuous watering) and N fertilization (250 mg·kg⁻¹ vs. no addition). The results showed that nitrogen fertilizer application increased rice shoot biomass and the amount of C and N, but had no significant influence on rice root biomass. Thus, nitrogen fertilizer application decreased rice biomass root/shoot ratio significantly. Drying-rewetting with N fertilizer treatment resulted in higher total C and N amount by 22% and 33%, respectively, in the shoot, and by 36% and 44%, respectively in the root than continuous watering with nitrogen fertilizer treatment. These results indicated that nitrogen fertilizer application promoted the growth of rice shoot. Nitrogen fertilizer application significantly increased the ¹³C content in rice shoot by 32%-83% over the control without N addition. Nitrogen fertilizer application also increased the ¹³C recovery in rice shoot by 6%-32%, but decreased that in the root by 18%-59%. Pertaining to water effect, drying-rewetting with N application increased the amount of ¹³C in rice shoot and root. However, without N addition, the amount and the recovery of ¹³C in shoot dropped by 10.3 mg·pot⁻¹ and 12%, respectively, compared with the continuous watering treatment. The root, on the other hand, recorded increases in both the amount and the recovery of ¹³C by 1.9 mg·pot⁻¹ and 57%, respectively. Furthermore, the deposition of

收稿日期: 2016-08-10; 修订日期: 2016-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301276, 41501321); 政府间国际科技创新合作重点专项项目(S2016G0053)

作者简介: 王婷婷(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态, E-mail: gtd@isa.ac.cn

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

assimilated C into rhizosphere-soil increased by both the individual and the interactive effects of N fertilizer application and drying-rewetting treatment. Thus, combining N fertilizer and drying-rewetting water management led to more increased allocation and deposition of photosynthesized carbon in soil-rice system compared with combined continuous flooding and N application. This study was able to quantify the partitioning and allocation of rice photosynthesized carbon into different plant and soil pools under different water and N fertilizer treatments, and can serve as a useful guide for better water and nutrient management practices in paddy-rice production that can achieve both sustainable high yield and sequestration of more C within the paddy soil system.

Key words: rice; rhizodeposition; ^{13}C - CO_2 continuous labeling; N application; drying-rewetting

光合碳是“大气-植物-土壤”系统碳循环的重要组成部分,也是土壤有机碳的重要来源^[1,2]. 大量研究表明,土壤类型^[3]、作物品种^[4]、作物生育期^[5]、 CO_2 浓度^[6]、标记方法^[7,8]、农艺措施如施肥、水分管理^[9]等因素,均会影响光合碳在“作物-土壤”系统中的固定、转化运输和分配. 马田等^[10]通过研究不同 CO_2 浓度下光合碳在“土壤-春小麦”系统的分配动态表明,在常规 CO_2 浓度条件下,经过一个生长季后土壤有机碳的更新率约为 0.42%. 杨兰芳等^[11]采用 ^{13}C 自然丰度法测定不同生长期玉米植株和土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,算得玉米根际沉积碳对土壤有机碳的贡献为 4%~25%. Kuzyakov 等^[12]应用 ^{14}C 脉冲标记技术研究了黑麦草光合产物的分配和转化,得到 0.8%~3.2%的光合新碳进入土壤微生物中,而输入土壤的光合碳中约有 50%为活性有机成分. 但是,来源于根系分泌物及其脱落物的根际沉积碳,由于其代谢周转快,具有复杂性和多变性,因此,这部分碳在水稻土中的周转及其分配特征还需要进一步探究^[2].

稻田是我国典型的农田生态系统,现有稻田面积 340 多万 hm^2 ,稻田生态系统具有较强的固碳功能,大量研究表明,近 30 年来,我国南方稻田土壤的有机碳含量明显升高^[13,14],表明稻田生态系统对于缓解大气 CO_2 的上升有重要作用. 前期研究表明,通过碳同位素连续标记技术发现,在水稻拔节灌浆期内,通过根际沉积作用,有 4%~6%的光合碳进入土壤有机碳库,这部分新碳对土壤可溶性有机碳的贡献为 2%~4%,对土壤微生物生物量碳的贡献为 9%~18%^[15]. 因此,水稻光合碳(通过根际沉积作用)的输入对维持稻田土壤的碳汇功能具有十分重要的作用.

影响水稻光合碳在土壤-作物系统中分配动态的因素很多,其中,水分和施肥(如施氮)是两个重要的因素. Tian 等^[16]通过 ^{14}C 脉冲标记法研究发现,旱作和干湿交替种植较持续淹水增加了水稻根际 C 淀积的绝对含量和相对比例,淹水、旱作和干湿交替管理模式下根际 C 淀积含量分别占地下部全部

转移 C 含量的 16%、41% 和 30%. Watanabe 等^[17]报道在水稻最大分蘖期,淹水水稻在标记 14 d 后转移到土壤中的含量为 4.3%. 对于施氮,Ge 等^[2]研究发现在较高的施 N 水平下,水稻地上部对碳的积累能力相对较强,水稻光合碳通过根际沉积作用输入到土壤中的 ^{14}C -SOC 的含量亦相对较高,施 N 水平明显影响了水稻新鲜根际碳的沉积,且高氮水平下根际沉积的碳量高于低氮与中量氮水平. 那么水分管理和施氮是如何共同影响水稻光合碳的输入和分配,这两个因素是否会进而影响土壤 SOC 的变化呢? 迄今为止,大量研究仅关注于单一管理措施或环境条件下水稻光合碳的输入和分配^[2,15,18,19],缺乏施肥和水分两个因素共同作用对光合碳向地下部转移量和根际碳沉积影响的报道. 因此有待加强水分管理和施氮对水稻光合碳输入与分配方面的研究,尤其是水稻光合碳通过根际沉积作用在土壤碳库中的分配更是有待加强.

碳(^{13}C - CO_2)稳定同位素标记技术是研究植物光合碳在土壤碳库中的分配与转化较灵敏的方法,因此,本研究运用 ^{13}C - CO_2 同位素连续标记法,采用淹水和干湿交替两种水分管理方法,研究在不同施肥水平下,模拟田间淹水与落干过程中光合碳在“水稻-土壤”系统输入特征,探讨光合碳在地下部的分配动态,以期深入解析稻田碳循环及水稻土的可持续管理提供理论基础和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤样品采自中科院长沙农业环境观测研究站(113°19'52"E,28°33'04"N),该地区属典型亚热带典型湿润气候,海拔 92.2~125.3 m,年均气温 17.5°C,降水量 1300 mm,采样时间为 2015 年 4 月. 所采土壤属于亚热带地区土壤母质一致(第四纪红土)、熟化程度基本相近的典型长期种植水稻耕作层(0~20 cm)土壤,土壤 ^{13}C 自然丰度为 -29.11‰. 土壤均用直径为 5 cm 的不锈钢土钻采集. 运回实验室后的土壤样品取 1 kg 室内风干,分

别过 0.250 mm 和 0.149 mm 筛,用于测定土壤基本理化性质. 剩余土样风干后过 2.00 mm 筛,淹水 2~3 cm 于 25℃ 预培养 14 d,备用. 采用 Mettler-toledo 320 pH 计测定土壤 pH(水土比为 2.5:1); 采

用碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N,德国)测定(干烧法)土壤 TN(全氮)和 SOC(有机碳);采用氢氧化钠熔融法-紫外分光光度计(UV-2450,日本)测定土壤 TP(全磷). 供试土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil used in this study

pH	阳离子交换量 (CEC) /cmol·kg ⁻¹	碳氮比 (C/N)	有机碳 (SOC) /g·kg ⁻¹	全氮 (TN) /g·kg ⁻¹	全磷 (TP) /g·kg ⁻¹	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%
5.43 ± 0.61	7.706 ± 1.32	9.8:1	14.26 ± 0.09	1.45 ± 0.06	0.75 ± 0.18	6.80 ± 0.42	65.5 ± 15.27	27.8 ± 3.96

1.2 水稻种植与¹³C-CO₂ 连续标记

向预培养后的土壤施入 KCl(160 mg·kg⁻¹) 作为基肥,并加入硝化抑制剂 DCD(25 mg·kg⁻¹),土壤混匀分装于 PVC 盆(直径 17.2 cm,高 16.7 cm)中,每盆装入量相当于 1.00 kg 烘干的土壤,作为非根际土;根际袋中装入相当于 0.50 kg 烘干土的土壤,作为根际土. 将根际袋置于 PVC 盆中的非根际土中,水稻(粘性常规水稻,中早 39)植株种在根际袋土中. 水稻标记试验设置 4 个处理,每个处理 4 个重复:①持续淹水施氮,②持续淹水不施氮,③干湿交替施氮,④干湿交替不施氮. 其中,施氮处理施加(NH₄)₂SO₄,施氮量为 250 mg·kg⁻¹;持续淹水处理是使盆栽中土壤表层保持 2~3 cm 水层;干湿交替处理的淹水与落干循环的一个周期为 8 d,前 4 d 使盆栽中土壤淹水 2~3 cm,第 5 d 开始使土壤自然落干,以此交替重复 5 个周期. 水稻连续标记在第 3 个干湿交替周期开始,即水分管理的第 17 d 开始标记,连续标记 14 d 和 22 d 后采样,采样时间是在干湿循环周期的落干期.

培养装置和方法参考 Ge 等^[15, 20] 建立的研究方法. 稻苗在田间培养 20 d 后,选取长势一致的稻苗,小心洗净根系后,移栽至钵钵中的根际袋中,每盆 3 株. 移栽后的稻苗置于阳光充足、通风良好的空地. 生长期间用去离子水浇灌,并及时除草. 于 2015 年 6 月 29 日将水稻盆栽移入标记箱进行标记. ¹³C-CO₂ 通过 ¹³C-NaHCO₃ (50% atom ¹³C, 100 mL, 1 mol·L⁻¹) 和 H₂SO₄ (50 mL, 0.5 mol·L⁻¹) 反应自动产生. 通过控制 H₂SO₄ 加入速度使标记箱内 CO₂ 浓度维持在 270~350 μmol·mol⁻¹. 标记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),箱内安置控温空调,使标记过程中标记箱内外温度控制在 ±1℃. 在连续标记开始后的第 14 d 和 22 d 进行破坏性采样.

与此同时,作为对照,上述 4 个处理种植水稻但不进行¹³C-CO₂ 标记,每个处理 4 个重复,放置于离标记培养箱 10 m 以上的区域,以用来测定水稻植株、土壤¹³C 的自然丰度.

1.3 测定和分析方法

试验结束后,轻轻从 PVC 盆土壤中取出完整植株,把收获的水稻植株按根系、地上部分开后,根系先用自来水冲洗,再用 0.5 mol·L⁻¹ CaCl₂ (pH 6.2) 浸泡 1 min,最后用去离子水冲洗,以去除吸附在植株表面的土壤,然后在 105℃ 杀青 30 min,在 60℃ 下烘干至恒重. 采集根际袋中的土壤作为根际土,根际袋外的土壤作为非根际土,土壤样品按照根际土和非根际土分别收集、保存、风干.

水稻植株与土壤(根际土、非根际土)样品的¹³C 丰度以及植物和土壤的碳含量分别在同位素比率质谱仪(MAT253 型,美国热电公司)中测定.

植株(根系和地上部)和土壤(根际土、非根际土)中¹³C 含量的测定由标记样和非标记样中¹³C 的丰度来确定^[21]:

$$^{13}C_s = [atom\ ^{13}C\%]_i - (atom\ ^{13}C\%)_{nl}] \times w(TC) \times 100 \quad (1)$$

式中,¹³C_s 为样品中¹³C 的量,mg; (atom ¹³C%)_i 和 (atom ¹³C%)_{nl} 分别表示标记和非标记样品中¹³C 的丰度; w(TC) 表示植株(根系和地上部)和土壤(根际土、非根际土)中总碳的量,mg.

各采样期水稻¹³C 的净同化量(¹³C_{全部})是标记结束时立即采样,各部分同化¹³C 量的总和:

$$^{13}C_t = ^{13}C_{sh} + ^{13}C_r + ^{13}C_{RS} + ^{13}C_{BS} \quad (2)$$

式中,¹³C_{sh}、¹³C_r、¹³C_{RS}、¹³C_{BS} 分别为水稻茎叶、根、根际土和非根际土中的¹³C 量,mg.

各采样期水稻同化¹³C 在“水稻-土壤”系统各部分中的回收率(P¹³C_i,%) 分别为¹³C_{sh}、¹³C_r、¹³C_{RS}、¹³C_{BS} 与¹³C_t 的比值.

$$P^{13}C_i = [^{13}C_f / ^{13}C_i] \times 100 \quad (3)$$

式中, $^{13}C_f$ 为两采样期水稻-土壤系统各部分(茎叶、根、根际土或非根际土)最终固定的 ^{13}C 含量; $^{13}C_i$ 为水稻对光合碳的净同化量.

1.4 数据处理和统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 16.0 进行数据处理和统计分析,采用 One-way ANOVA 进行单因素方差分析检验,采用 Duncan 法进行多重比较,方差分析采用单变量一般线性模型.

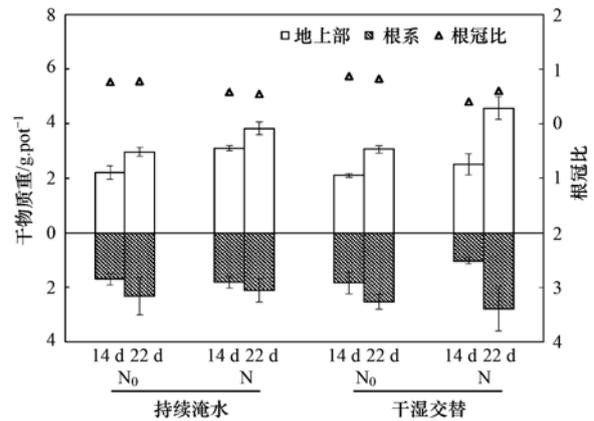
2 结果与分析

2.1 施氮和水管理对水稻干物质重及根冠比的影响

持续淹水条件下,施氮极显著提高了水稻地上部干物质重($P < 0.01$),连续标记 14 d 和 22 d 后,水稻地上部干物质重分别增加了 $0.90 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $0.87 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$; 而在干湿交替条件下,施氮处理水稻地上部干物质重较不施氮处理分别增加 $0.40 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ (14 d) 和 $1.51 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ (22 d). 施氮对水稻根系干物质质量无显著影响,但极显著降低了水稻根冠比($P < 0.01$). 22 d 标记结束后,不施氮条件下,干湿交替较持续淹水处理促使水稻地上部和根系干物质重分别增加 3% 和 10%; 而在施氮条件下,干湿交替使水稻地上部和根系干物质重分别增加 20% 和 32% (图 1).

2.2 施氮和水管理对水稻碳氮量及根冠比的影响

施氮有效促进了水稻地上部全碳含量的增加(图 2); 连续标记 22 d 后,施氮也使水稻地上部全氮含量增加了 1 倍; 却显著($P < 0.01$)降低了全碳、



N_0 : 不施氮, N : 施氮, 下同

图 1 水管理管理和施氮对水稻干物质重及根冠比的影响

Fig. 1 Effect of water management and nitrogen fertilizer on rice dry biomass and its root/shoot ratio

全氮含量在水稻根系与地上部的比值. 水管理措施对不施氮条件下的水稻地上部和根系碳氮含量的影响不显著; 但是, 在施氮条件下, 连续标记 22 d 后, 干湿交替处理使水稻地上部全碳、全氮含量较持续淹水处理分别提高了 22% 和 33%, 根系全碳和全氮含量分别提高了 36% 和 44%.

2.3 施氮和水管理对土壤-水稻系统 ^{13}C 量分配的影响

施氮能显著增加水稻地上部 ^{13}C 量($P < 0.01$, 表 2), 与不施氮处理相比增加 32% ~ 83%. 水管理对 ^{13}C 分配的影响表现为: 连续标记 22 d 后, 在施氮条件下, 干湿交替使水稻地上部、根系 ^{13}C 量均有一定的增加; 不施氮条件下, 干湿交替与持续淹水处理相比, 地上部 ^{13}C 量减少 $10.3 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$, 根系 ^{13}C 量增加 $1.9 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ ($P < 0.05$, 表 2).

水稻光合碳通过根际沉积作用进入土壤, 本研究

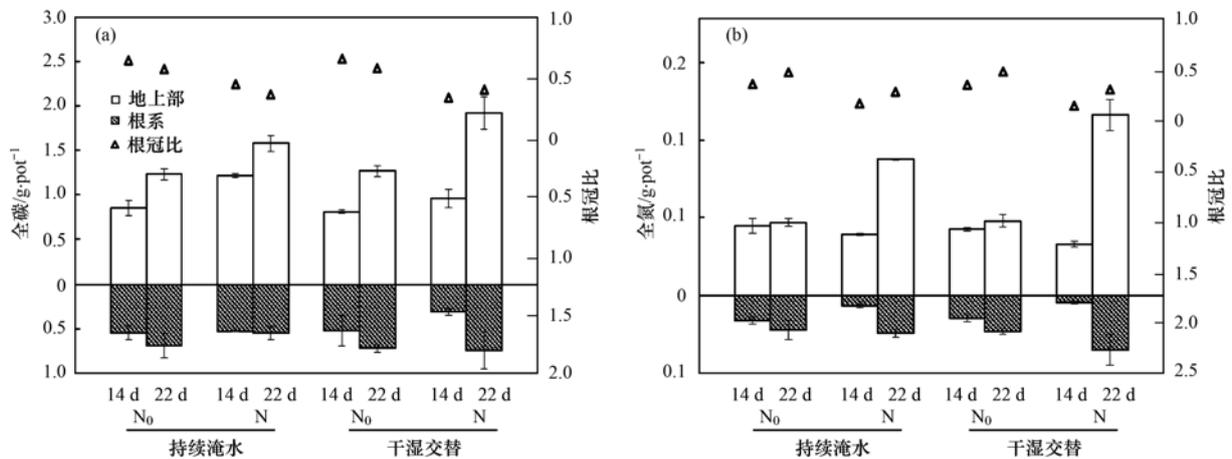


图 2 水管理管理和施氮对水稻碳氮含量及根冠比的影响

Fig. 2 Effect of water management and nitrogen fertilizer on the content of rice carbon and nitrogen and its root/shoot ratio

中,进入土壤的 ^{13}C 量为 $2.3 \sim 8.9 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$. 由于根际效应,水稻根际土 ^{13}C 量显著大于非根际土 ^{13}C 量,而且施氮和干湿交替都显著增加了 ^{13}C 在土壤中的累积,水肥耦合显著增加了 ^{13}C 在土壤中的分配($P < 0.01$,图3和表2). 相同水管理条件下,根际土 ^{13}C 量表现为施

氮处理($3.4 \sim 7.1 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)大于不施氮处理($1.4 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$),非根际土 ^{13}C 量表现为施氮处理($0.9 \sim 2.8 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)小于不施氮处理($0.7 \sim 1.8 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$). 相同施氮条件下,干湿交替增加了水稻光合碳在根际土和非根际土中的累积(图3).

表2 水管理和施氮对土壤-水稻系统 ^{13}C 量分配的影响(P 值)¹⁾

Table 2 Effect of water management and nitrogen fertilizer on the distribution of photosynthesized carbon in soil-rice system (P value)

项目	df	地上部 ^{13}C		根系 ^{13}C		根际土 ^{13}C -SOC		非根际土 ^{13}C -SOC	
		14 d	22 d	14 d	22 d	14 d	22 d	14 d	22 d
W	1	0.02 *	0.55	0.04 *	0.01 *	0.47	0.01 *	0.01 **	0.30
N	1	<0.01 **	<0.01 **	0.27	0.04 *	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **
W × N	1	0.26	0.07	0.05 *	0.06	0.95	0.02 *	0.05	0.94

1) df: 自由度, W: 水管理, N: 施氮, W × N: 水分与施氮交互作用; * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关, 下同

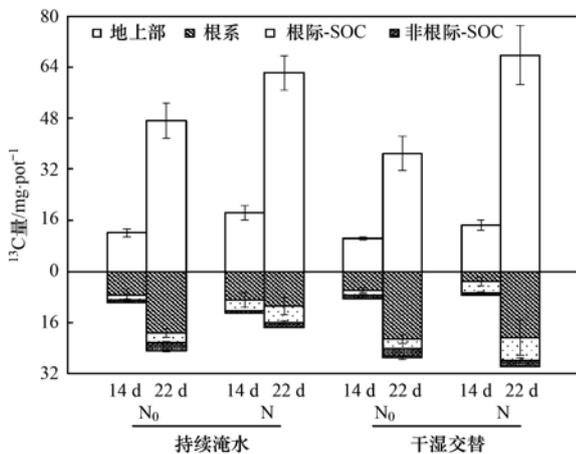


图3 水管理与施氮对土壤-水稻系统 ^{13}C 量分配的影响

Fig. 3 Effect of water management and nitrogen fertilizer on the distribution of photosynthesized carbon in soil-rice system

表3 水管理和施氮对土壤-水稻系统 ^{13}C 回收率的影响(P 值)

Table 3 Effect of water management and nitrogen fertilizer on the recovery of photosynthesized carbon in soil-rice system (P value)

项目	df	地上部回收率		根系回收率		根际土回收率		非根际土回收率	
		14 d	22 d	14 d	22 d	14 d	22 d	14 d	22 d
W	1	0.28	<0.01 **	0.09	0.01 *	0.22	0.05	<0.01 **	0.32
N	1	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **	0.01 *	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **
W × N	1	0.02 *	0.87	0.05	0.75	0.52	0.77	0.61	0.15

3 讨论

3.1 施氮和水管理对水稻生物量与碳氮及根冠比的影响

养分和水对作物的综合效应是通过植物体本身复杂的生理过程而起作用,进而影响植物的生长状况^[21,22]. 在不同的水管理条件下,施肥对作物生长的效果差别较大. 本研究中,连续标记22 d后,施氮使水稻地上部干物质及碳氮量明显高于不施氮处理,但却降低了根冠比(图1). 这表明氮素是水稻生长的关键养分因素;在氮素相对不足

2.4 施氮和水管理对土壤-水稻系统 ^{13}C 回收率的影响

水稻光合碳主要分配于植株体内,如图4所示,光合碳在水稻地上部、根系的回收率分别为 $57.6\% \sim 77.9\%$ 、 $13.7\% \sim 33.2\%$;而在根际和非根际土壤中的回收率为 $8\% \sim 18\%$. 相同水管理条件下,施氮处理显著影响光合碳在水稻地上部和根系中的回收率($P < 0.01$,表3),施氮使光合碳在水稻地上部的回收率增加 $6\% \sim 32\%$,在根系的回收率减少 $18\% \sim 59\%$. 水管理显著影响了光合碳在土壤-水稻系统中的回收率($P < 0.05$,表3),标记22 d后,光合碳在干湿交替处理的水稻地上部回收率降低了 $11\% \sim 12\%$,在根系回收率提高了 $24\% \sim 57\%$,在根际土中的回收率增加1.2倍.

条件下,刺激了水稻根系的生长以获取养分供水稻生长^[23]. 在干湿交替条件下,施氮使水稻地上部和根系的生物量分别增加了 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$,显著大于持续淹水条件下的量(地上部 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$,根系 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$),这可能是因为干湿交替过程可以改善土壤的通气性,促进水稻根系向深层土壤生根,保持根系活力,从而促进水稻对氮素的吸收,增加水稻生物量尤其是根系的生长和光合碳的累积^[24]. 而持续淹水无效分蘖过多,水稻生长受阻,对水稻干物质的积累造成不利影响^[25].

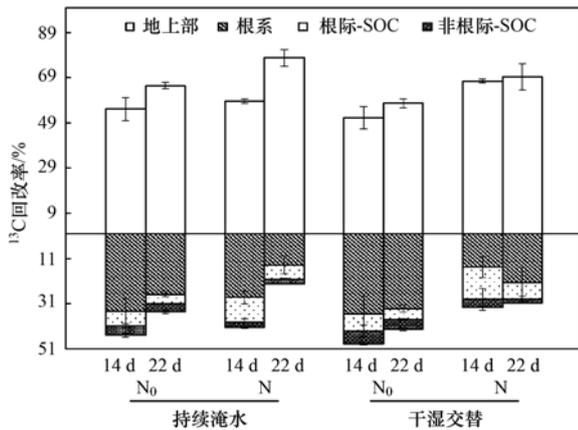


图4 水分管理与施氮对土壤-水稻系统 ^{13}C 回收率的影响

Fig. 4 Effect of water management and nitrogen fertilizer on the recovery of photosynthesized carbon in soil-rice system

3.2 施氮和水分管理对光合碳在水稻植株中分配的影响

光合碳在“植物-土壤”系统中的累积与分配是作物生长状况和潜在碳固定能力的重要指标^[26],受到作物生长环境的影响,而养分和水分管理作为水稻生长的重要调控因子,显著影响着光合碳在水稻-土壤系统中的分配.有些研究发现氮肥能显著降低光合碳向根系分配,增加地上部C的输入量^[27].本研究发现施氮提高了光合碳在水稻植株和土壤中的绝对含量,但是降低了光合碳在水稻根系中的回收率(图3和图4),这可能是由于氮肥的输入,降低了氮素胁迫,从而减缓了水稻根系的生长和新碳向根系中的分配^[28].

稻田不同的水分管理对水稻的生长产生重要影响^[29,30].水肥耦合在施氮处理中表现出了显著的调控效应(图3和图4、表2和表3).22 d连续标记结束后,光合碳在水稻地上部和根系中的累积量与回收率表现出了显著的差异性.氮肥供给条件下,干湿交替促进了光合碳在水稻根系中的累积,增加了光合碳向水稻根系中的分配.这是因为淹水条件下土壤氮素主要为 NH_4^+-N ,而落干时通气好氧的土壤中会有更多的氮素以 NO_3^--N 的形式存在,而干湿交替条件下,同时提供 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 作氮源较单独提供等量的 NH_4^+-N 或 NO_3^--N 作氮源,水稻可以增产40%~70%^[21,31].因此,干湿交替能够通过促进土壤通气性,刺激根系生长,增加光合碳在地下部的分配.

3.3 施氮和水分管理对光合碳在根际、非根际土中分配的影响

稻田生态系统中, CO_2 通过水稻光合作用流向

土壤是稻田土壤固碳的重要环节.植物净光合固定的50%的光合产物会被转移到地下部,用于维持根系生长和构建,根际呼吸或保存在土壤中^[32,33].Lu等^[34,35]通过对水稻进行标记,发现在整个水稻的生长期中,约有 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的光合碳进入土壤,并在水稻成熟期后以胡敏酸类物质存在.然而,光合碳向土壤碳库的传输受施肥和水分因素影响强烈;本研究发现,施氮显著增加了光合碳在土壤的累积,尤其是增加了光合碳向根际土中的分配,这表明在氮素供应条件下,刺激水稻根系生长旺盛,更新速率加快,使更多的光合碳以根际沉积碳、根毛脱落物、死亡根系等形式输入到根际土壤中.Zagal等^[36]研究发现氮肥能够促进根系 ^{14}C 的淀积.Ge等^[2]也发现施加氮肥可以增强植株的光合能力,并且促使根系分泌物增加.同时,干湿交替也促进了水稻光合碳向土壤中的分配,这可能是由于持续淹水条件下,促进了甲烷和一些有毒物质如亚铁离子、有机酸、硫化氢的产生^[37],进而影响水稻光合碳的累积和分配,从而影响土壤有机质的固定;同时,厌氧条件下养分的缺乏(如N、P、K)可能会影响微生物的生长,反过来会影响有机质的固定.而干湿交替增加了土壤通气性,有利于水稻根系以及土壤微生物的生长,促进水稻根际沉积碳的累积与微生物对新碳的固定^[21].

本研究发现水稻根际土 ^{13}C 量显著大于非根际土 ^{13}C 量,而且施氮和干湿交替都显著增加了 ^{13}C 在根际土壤中的累积与回收率($P < 0.01$,图3和表2),这表明在水肥耦合条件下水稻光合碳向土壤中的分配表现出了显著的根际效应.根际沉积碳主要来源于植物残体的分解以及植物生育期内根际碳的释放,主要通过根毛脱落、根系分泌物和根尖黏液层及衰老的根表皮细胞等机制实现^[38,39],因此根际沉积碳在根际土和非根际土中的分配会因与根的距离不同而有差异^[40,41].本研究采用根际袋法区分根际与非根际土壤,水稻根系部分基本都生长在根际袋中,所以根际沉积对根际土壤有机质的贡献显著大于非根际土壤,而由于土壤可溶性有机碳在根际与非根际土壤间的交换,或是通过土壤微生物的传递等过程,非根际土壤中也会有一定量的光合碳富集;而水稻光合碳在根际土壤中分配大于非根际土,可能是由于根际土中水稻根系多,根际沉积碳量相对较多,同时,根际沉积碳提高了土壤微生物活性,通过微生物的周转进而增加光合碳在根际区的累积,使得水稻光合碳对非根际土壤有机质的贡献远小于

根际土^[40,42]。然而, 尽管非根际土中光合碳的分配比例较低, 但是非根际土的量远大于根际土, 对于光合碳的稳定和土壤有机质累积也起着非常重要的作用。

4 结论

(1) 施氮和干湿交替增加了水稻地上部干物质重及其碳、氮含量, 却显著降低了水稻根冠比。

(2) 干湿交替促进水稻根系生长, 增加了水稻根系¹³C含量和分配比例。

(3) 施氮和干湿交替都显著增加了光合碳在根际土壤中的累积量与回收率。干湿交替比持续淹水更利于光合碳向土壤中分配, 水肥协调管理能够优化光合碳在土壤中的传输、分配与累积。

参考文献:

- [1] 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 等. 水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 233-239.
Tan L M, Peng P Q, Li K L, *et al.* Dynamics of the mineralization and transformation of rice photosynthesized carbon in paddy soils—a batch incubation experiment[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 233-239.
- [2] 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.
- [3] 聂三安, 周萍, 葛体达, 等. 水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴C连续标记法[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1346-1351.
Nie S A, Zhou P, Ge T D, *et al.* Quantifying rice (*Oryza sativa* L.) photo-assimilated carbon input into soil organic carbon pools following continuous ¹⁴C labeling[J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1346-1351.
- [4] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, **163**(4): 421-431.
- [5] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. ¹⁴C pulse-labelling of field-grown spring wheat: an evaluation of its use in rhizosphere carbon budget estimations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, **26**(2): 161-170.
- [6] 张凯, 冯起, 王润元, 等. CO₂ 浓度升高对春小麦灌浆特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, **30**(3): 189-195.
Zhang K, Feng Q, Wang R Y, *et al.* Effects of air CO₂ enrichment on grain filling characteristics and yield of spring wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, **30**(3): 189-195.
- [7] Kuzyakov Y, Domanski G. Model for rhizodeposition and CO₂ efflux from planted soil and its validation by ¹⁴C pulse labelling of ryegrass[J]. Plant and Soil, 2002, **239**(1): 87-102.
- [8] 尹云锋, 杨玉盛, 高人, 等. 植物富集¹³C标记技术的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(4): 790-793.
Yin Y F, Yang Y S, Gao R, *et al.* A Preliminary study on phyto-enrichment ¹³C labeling technique[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(4): 790-793.
- [9] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, **66**: 1930-1946.
- [10] 马田, 刘肖, 李骏, 等. CO₂ 浓度升高对土壤-植物(春小麦)系统光合碳分配和积累的影响[J]. 核农学报, 2014, **28**(12): 2238-2246.
Ma T, Liu X, Li J, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ on the distribution and accumulation of photosynthetic carbon in soil-plant (spring wheat) system[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, **28**(12): 2238-2246.
- [11] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(2): 280-286.
Yang L F, Cai Z C. Effects of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(2): 280-286.
- [12] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne* [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(1): 61-74.
- [13] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, **44**(2): 327-336.
Pan G X, Zhou P, Li L Q, *et al.* Core issues and research progresses of soil science of c sequestration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(2): 327-336.
- [14] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, **17**(2): 1048.
- [15] Ge T D, Yuan H Z, Zhu H H, *et al.* Biological carbon assimilation and dynamics in a flooded rice-soil system[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **48**: 39-46.
- [16] Tian J, Pausch J, Fan M S, *et al.* Allocation and dynamics of assimilated carbon in rice-soil system depending on water management[J]. Plant and Soil, 2013, **363**(1-2): 273-285.
- [17] Watanabe A, Machida N, Takahashi K, *et al.* Flow of photosynthesized carbon from rice plants into the paddy soil ecosystem at different stages of rice growth [J]. Plant and Soil, 2004, **258**(1): 151-160.
- [18] Tian J, Dippold M, Pausch J, *et al.* Microbial response to rhizodeposition depending on water regimes in paddy soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **65**: 195-203.
- [19] Yuan H Z, Zhu Z K, Liu S L, *et al.* Microbial utilization of rice root exudates: ¹³C labeling and PLFA composition [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, **52**(5): 615-627.
- [20] Ge T D, Wu X H, 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] 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.
- [22] 谭立敏, 吴昊, 李卉, 等. 不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C连续标记法[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1933-1938.
Tan L M, Wu H, Li H, *et al.* Input and distribution of rice photosynthesized carbon in the tillering stage under different nitrogen application following continuous ¹³C labeling [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1933-1938.

- [23] 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(3): 282-289.
Wang Y Z, Liu X W, Sun H Y, *et al.* Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(3): 282-289.
- [24] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(10): 132-141.
Xu G W, Wang H Z, Zhai Z H, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(10): 132-141.
- [25] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. 作物学报, 2014, **40**(5): 859-870.
Peng Y, Sun Y J, Jiang M J, *et al.* Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, **40**(5): 859-870.
- [26] Chapin F S, Bloom A J, Field C B, *et al.* Plant responses to multiple environmental factors[J]. BioScience, 1987, **37**(1): 49-57.
- [27] Kuzyakov Y, Siniakina S V, Ruehlmann J, *et al.* Effect of nitrogen fertilisation on below-ground carbon allocation in lettuce [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, **82**(13): 1432-1441.
- [28] Van Der Krift T A J, Kuikman P J, Möller F, *et al.* Plant species and nutritional-mediated control over rhizodeposition and root decomposition[J]. Plant and Soil, 2001, **228**(2): 191-200.
- [29] Lu J, Ookawa T, Hirasawa T. The effects of irrigation regimes on the water use, dry matter production and physiological responses of paddy rice [J]. Plant and Soil, 2000, **223**(1-2): 209-218.
- [30] Yao H Y, Bowman D, Shi W. Seasonal variations of soil microbial biomass and activity in warm- and cool- season turfgrass systems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(7): 1536-1543.
- [31] Kronzucker H J, Siddiqi M Y, Glass A D M, *et al.* Nitrate-ammonium synergism in rice. a subcellular flux analysis [J]. Plant Physiology, 1999, **119**(3): 1041-1045.
- [32] Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls[J]. Agronomie, 2003, **23**(5-6): 375-396.
- [33] Rees R M, Parker J P. Filtration increases the correlation between water extractable organic carbon and soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(12): 2240-2248.
- [34] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded rice soil [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, **16**(4): 1085.
- [35] Lu Y F, Allen H E. Characterization of copper complexation with natural dissolved organic matter (DOM)-link to acidic moieties of DOM and competition by Ca and Mg [J]. Water Research, 2002, **36**(20): 5083-5101.
- [36] Zagal E. Carbon distribution and nitrogen partitioning in a soil-plant system with barley (*Hordeum vulgare* L.), ryegrass (*Lolium perenne*) and rape (*Brassica napus* L.) grown in a ¹⁴C O₂-atmosphere[J]. Plant and Soil, 1994, **166**(1): 63-74.
- [37] Jayakumar B, Subathra C, Velu V, *et al.* Effect of integrated crop management practices on rice (*Oryza sativa* L.) root volume and rhizosphere redox potential[J]. Journal of Agronomy, 2005, **4**(4): 311-314.
- [38] Wichern F, Mayer J, Joergensen R G, *et al.* Rhizodeposition of C and N in peas and oats after ¹³C-¹⁵N double labelling under field conditions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(10): 2527-2537.
- [39] De Graaff M A, Van Kessel C, Six J. Rhizodeposition-induced decomposition increases N availability to wild and cultivated wheat genotypes under elevated CO₂ [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(6): 1094-1103.
- [40] Zu Schweinsberg-Mickan M S, Joergensen R G, Müller T. Fate of ¹³C-and ¹⁵N-labelled rhizodeposition of *Lolium perenne* as function of the distance to the root surface [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(6): 910-918.
- [41] Marx M, Buegger F, Gatteringer A, *et al.* Determination of the fate of ¹³C labelled maize and wheat rhizodeposit-C in two agricultural soils in a greenhouse experiment under ¹³C-CO₂-enriched atmosphere [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(12): 3043-3055.
- [42] 祝贞科, 沈冰洁, 葛体达, 等. 农田作物同化碳输入与周转的生物地球化学过程[J]. 生态学报, 2016, **36**(19): 5987-5997.
Zhu Z K, Shen B J, Ge T D, *et al.* Biogeochemical processes underlying the input and turnover of crop assimilative carbon in farmland ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(19): 5987-5997.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ³⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)