

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应

王莹莹¹, 肖谋良², 张昀^{1*}, 袁红朝², 祝贞科², 葛体达², 吴金水², 张广才¹, 高晓丹¹

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 农业部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866;

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)

摘要: 为探究稻田土壤光合碳的输入及分配对施磷的响应特征, 本研究选用粘性常规水稻品种(中早39), 在两个施磷(0 mg·kg⁻¹和80 mg·kg⁻¹; 分别记为P₀和P₈₀)条件下进行盆栽试验, 同时采用¹³C-CO₂连续标记技术量化光合碳在水稻-土壤系统中的分配。结果表明, 施磷显著增加光合碳在水稻地上部的分配, 降低其在根际土的分配($P < 0.05$); 施磷使拔节期水稻的光合碳含量增加了70%, 根系干重降低了31%。与不施磷相比, 施磷显著提高了水稻地上部全碳含量0.31 g·pot⁻¹ ($P < 0.05$), 显著降低了水稻根冠比; 施磷使进入非根际土壤微生物量的光合碳(¹³C-MBC)显著增加了0.03 mg·kg⁻¹, 但降低其在根际土壤的分配; 光合碳在非根际土壤颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MOC)的分配对施磷的响应不显著, 但在根际土壤施磷处理显著降低了其在POC中的含量。因此, 施磷增加了光合碳在水稻-土壤系统的分配, 但降低了光合碳在土壤中的积累。本研究探讨施磷对水稻光合碳在水稻-土壤系统的分配及其稳定的影响, 为缺磷土壤的合理施用磷肥及其对土壤有机碳积累的影响提供理论基础和数据支撑; 对理解稻田土壤光合碳的传输与分配特征及其固碳潜力具有重要意义。

关键词: 光合碳; 稻田; 施磷; ¹³C-CO₂连续标记

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1957-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807179

Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application

WANG Ying-ying¹, XIAO Mou-liang², ZHANG Yun^{1*}, YUAN Hong-zhao², ZHU Zhen-ke², GE Ti-da², WU Jin-shui², ZHANG Guang-cai¹, GAO Xiao-dan¹

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Key Laboratory of Arable Land Conservation and Improvement in Northeast China, Ministry of Agriculture, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: This research studied the response of the input and allocation of photosynthetic carbon (C) to phosphorus (P) in paddy soils. Two treatments were conducted in this experiment: no P application (P₀) and the application of 80 mg·kg⁻¹ of P (P₈₀). The rice cultivar was the indica Zhongzao 39. The ¹³C-CO₂ continuous labeling technique was used to identify the photosynthetic C distribution of the rice. The results showed that the application of P₈₀ significantly increased the photosynthates allocation in the rice aboveground, but reduced their allocation in the rhizosphere soil ($P < 0.05$). At the jointing stage, P₈₀ application increased the photosynthetic C content of the rice by 70%, but the root dry weight decreased 31%. Compared with P₀, the total C content of the aboveground rice was increased 0.31 g·pot⁻¹ by P₈₀. The ratio of rice roots to shoots decreased with the P₈₀ treatment. Moreover, P₈₀ application led to an increase in the photosynthetic microbial biomass in the non-rhizosphere soil C (¹³C-MBC) of 0.03 mg·kg⁻¹, but still decreased its allocation in the rhizosphere soil. The allocation of photosynthetic C to the particulate organic matter fraction (POC) and mineral fraction (MOC) in the non-rhizosphere soil showed no significant differences between P₀ and P₈₀. Additionally, the P₈₀ fertilization treatment significantly lowered the content of POC in the rhizosphere soil. In summary, P application increased the allocation of photosynthetic C in the soil-rice system, but reduced the accumulation of photosynthetic C in the soil. This research provided a theoretical basis and data supporting the rational application of P fertilizer, and was also of great significance as a study of the transportation and allocation of photosynthetic C and its sequestration potential response to the application of P to the rice soil.

Key words: photosynthates; paddy soil; phosphorus fertilization; ¹³C-CO₂ continuous labeling

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库, 有 倍^[1]。由于体量巨大, 土壤碳库的微小变动都会对 机碳碳储量相当于大气碳库和植物碳库的 2~3 大气 CO₂ 浓度和全球气候变化产生重要影响^[2]。

收稿日期: 2018-07-21; 修订日期: 2018-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771334; 41671292); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503118-10); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601230); 博士后科学基金项目(2017M611265)

作者简介: 王莹莹(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力与耕地保育, E-mail: 2391925245@qq.com

* 通信作者, E-mail: 33783628@qq.com

Wu^[3]的研究表明,在1980~2000年,我国耕层土壤有机碳量平均每年增加 $5.78 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中稻田土壤贡献了70%的增量.近年30来,我国南方稻田土壤有机碳含量明显升高^[4],但相关机制仍不清楚.水稻光合碳是土壤有机碳库的最主要的来源之一.通过根际沉积作用,水稻将约2%~10%的光合碳输入到土壤中^[5,6].作为高活性的有机碳组分,根际沉积碳对微生物生长代谢有显著的促进作用,直接影响土壤碳库周转过程.光合碳进入土壤碳库后,以存在形态的不同可分为颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MOC).POC是以游离态存在的有机碳组分,粒度较大($>53 \mu\text{m}$),易被微生物矿化,周转速度较快,一般为几年到几十年^[7].MOC是土壤矿物吸附或包埋的有机碳组分,粒度小($<53 \mu\text{m}$),生物可接触性差,周转慢^[8].光合碳在POC和MOC间的分配对光合碳在土壤中的稳定有决定性作用,进而通过调节微生物活动对土壤原有碳库的周转产生重要影响.研究光合碳在水稻植株-土壤间及土壤不同碳库间的分配对土壤有机碳固持与稳定有重要意义.然而其相关研究仍较少,限制了对稻田土壤碳库累积机制的认识.

磷是水稻生长的必需营养元素,对水稻光合作用和光合碳在地上部、根部的分配有重要调控作用,是影响根际沉积碳数量和成分的最主要因素之一^[9].热带、亚热带地区是水稻的主产区,由于长期风化作用,该区域土壤磷含量普遍较低^[10].为了维持较高的作物产量,磷肥在该区域大量施用.研究发现,施磷有利于提高叶片中 CO_2 同化率,增加光合碳在水稻植株中的积累.与不施磷相比,磷肥(P_2O_5)施用量在 $42.0 \sim 126.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,分蘖期和抽穗期增施磷肥叶片净光合速率分别增加15.17%~29.88%和6.03%~22.38%^[10].缺磷胁迫能促进根系发育,使光合碳向根部的分配比例增大,提高水稻根冠比^[11].施磷条件下,光合碳向土壤的输送比例下降,然而由于总光合作用强度的增加,光合碳向土壤输入的绝对量可能会升高.同时,与缺磷条件相比,施磷后,根系分泌物中对土壤矿物有强吸附性的有机酸含量降低,对光合碳在土壤碳库中的分配产生潜在影响^[12].然而,到目前为止,施磷对光合碳在水稻-土壤体系分配影响的系统研究仍很缺乏,不同磷水平下光合碳在土壤碳库中分配情况的差异鲜见报道.

本文在前人研究的基础上选择低磷红壤水稻土,采用 ^{13}C 连续标记技术来区分光合碳和土壤原有有机碳,探究施磷对水稻生长过程中光合碳在植株-土壤体系中的分配及其稳定性的影响,通过进

一步揭示稻田生态系统光合碳分配规律,以期为进一步认识农田土壤有机碳累积机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为长期种植水稻的典型水稻土,由第四纪红色黏土母质发育而成,有效磷含量 $<5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根据中国土壤养分分类标准判定为缺磷土壤.土样采自中国科学院长沙农业环境观测研究站($28^\circ 33' 04'' \text{N}$, $113^\circ 19' 52'' \text{E}$),该区海拔92.2~125.3 m,降雨量1300 mm,年平均气温 17.5°C ,日照时长1663 h,属典型亚热带湿润气候.土样采集时间为2015年4月,使用不锈钢土钻(直径为5 cm)采集0~20 cm耕作层土壤(^{13}C 自然丰度为 -29.11‰).将采回的土壤样品运回实验室后,取1.0 kg土样在室内进行风干,人工剔除残根和大颗粒物质,分别过0.250 mm和0.149 mm筛,用于测定土壤基本理化性质:pH为5.43,土壤有机质(SOC) $14.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N为9.80,全氮(TN)为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷(TP) $0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可溶性磷(Olsen-P) $4.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,黏粒(Clay)6.80%,粉粒(Silt)65.50%,砂粒(Sand)27.80%;阳离子交换量(CEC)为 $7.71 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$.取剩余土样过2.00 mm筛,加超纯水(ddH_2O)淹水2~3 cm,在 25°C 下预培养14 d,备用.供试品种为籼型常规双季早稻中早39.

1.2 试验方案

盆栽试验采用直径17.2 cm、高20 cm的PVC盆.向预培养后的土壤中加入 $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的KCl(以K计)和 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (以N计)作为基肥,并加入硝化抑制剂DCD($25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),充分混匀后平均分为两份,一份加入 NaH_2PO_4 溶液,添加量以P计为 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (施磷处理, P_{80}),另一份加入等量蒸馏水(对照, P_0),分别混匀.将网孔孔径为 $25 \mu\text{m}$ 的尼龙根际袋($15 \text{ cm} \times 17 \text{ cm}$)置于PCV盆中心,均匀地加入0.5 kg干土当量的 P_0 或 P_{80} 土壤,并将另外1.0 kg相同土壤均匀填充在根际袋周围,作为非根际土.取秧龄20d的水稻幼苗移栽在根际袋中央,每盆3株,每个处理4个重复,在人工气候箱中培养.培养装置和方法参考文献[13,14],水稻生长期间用去离子水浇灌,并及时除草.培养20 d后,于2015年6月29日将盆栽移入标记箱($80 \text{ cm} \times 250 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$)进行标记. $^{13}\text{CO}_2$ 通过 ^{13}C - NaHCO_3 (50% atom ^{13}C , $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)在 CO_2 发生器中与过量的 H_2SO_4 ($0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)反应产生.通过控制 ^{13}C - NaHCO_3 加入速度

使标记箱内 CO_2 浓度维持在 $350 \sim 400 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$. 标记箱内外分别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, 维持标记过程中标记箱内外温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ [15]. 与此同时, 另设置 2 个施肥处理的盆栽水稻在离标记培养箱 10 m 以外的区域培养, 作为 ^{13}C 的自然丰度对照.

1.3 样品采集

在持续淹水条件下(2~3 cm)连续标记 14 d, 标记结束后进行破坏性采样: 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、地上部分分开后, 根系先用自来水冲洗, 再用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 (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°C 杀青 30 min, 在 60°C 下烘干至恒重. 采集根际袋和根际袋外的土壤分别混匀作为根际土和非根际土, 其余自然风干, 室温保存.

1.4 指标测定

土壤基本理化性质: 可溶性有机碳(DOC)采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 浸提 [16], TOC 分析仪测定; 微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸-TOC 分析仪测定法 [17]. 以上指标的测定均使用鲜土. 全氮(TN)和有机碳(SOC)的测定采用干烧法-碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N, 德国); 土壤 pH 值采用 Mettler-toledo 320 pH 计测定(水土比为 2.5:1). 以上指标的测定使用风干土样.

土壤有机质采用 Canarini 等 [18] 的分级方法, 将土壤有机质分为颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MOC). 称取 10 g 风干土于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸钠, 置于摇床中转速 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 振荡 15 h, 过 $53 \mu\text{m}$ 的筛子, 用少量去离子水反复冲洗(4~6 次)筛子, 留在筛子上的即为颗粒有机质($> 53 \mu\text{m}$, POC); 筛子下方的泥浆 300 g 离心后沉淀, 即为矿物态有机物($< 53 \mu\text{m}$, MOC). 将两种有机质组分 60°C 烘干, 称重, 计算各组分的比例, 测定全碳和 ^{13}C .

水稻植株(地上部、根系)与土壤(根际土、非根际土)样品的 ^{13}C 丰度以及植物碳含量测定采用同位素比率质谱仪(MAT253 型, 美国热电公司).

1.5 计算公式

植株(根系和地上部)和土壤中 ^{13}C 含量的测定由标记样和非标记样中 ^{13}C 的丰度来确定 [4]:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{R_{\text{sq}}}{R_{\text{st}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sq} 表示样品的同位素比值; R_{st} 表示标准物质(PDB)的同位素比值.

$$^{13}\text{C}_s = \left[\left(\text{At}^{13}\text{C}\% \right)_1 - \left(\text{At}^{13}\text{C}\% \right)_{\text{nl}} \right]_s \times \text{TC}_s \times 100\% \quad (2)$$

式中, $^{13}\text{C}_s$ 表示样品中 ^{13}C 含量; $\text{At}^{13}\text{C}\%$ 表示样品中含 ^{13}C 的丰度; 1 和 nl 分别表示标记和非标记样品; TC_s 表示样品中总碳含量.

生育期水稻光合 ^{13}C 的分配比例计算公式:

$$^{13}\text{C}_p = ^{13}\text{C}_a / (^{13}\text{C}_a + ^{13}\text{C}_r + ^{13}\text{C}_s) \times 100\% \quad (3)$$

式中, $^{13}\text{C}_p$ 是指水稻地上部光合 ^{13}C 在水稻-土壤系统中的分配比例(%); $^{13}\text{C}_a$ 、 $^{13}\text{C}_r$ 和 $^{13}\text{C}_s$ 分别指地上部、地下部和土壤中的 ^{13}C 含量. 其他部分的分配比例计算方法类似.

水稻光合 ^{13}C 各部分光合 ^{13}C 含量的总和($^{13}\text{C}_a + ^{13}\text{C}_r + ^{13}\text{C}_s$), 假设同位素分馏效应可以忽视, 用 ^{13}C 光合碳的分配情况代表总光合碳的分配.

1.6 数据处理

数据处理和统计分析采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 20 软件. 绘图采用 Origin8.5 软件. 不同处理差异显著性用单因素方差分析(One-way ANOVA)、*t* 检验.

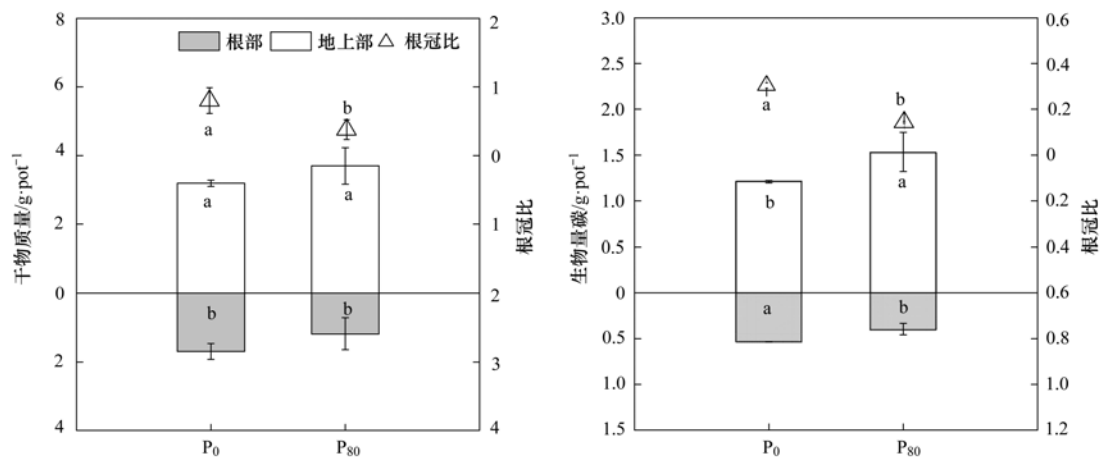
2 结果与分析

2.1 水稻生物量和根冠比

施磷对水稻地上部和根系的生物量无显著影响, 但在连续标记 14 d 后, 不施磷的水稻总生物量($3.19 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)显著高于施磷处理($3.70 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$), 施磷显著降低了水稻生物量的根冠比, 降幅达 34% ($P < 0.05$, 图 1). 不施磷的水稻植株全碳含量为 $1.22 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 施磷的全碳含量为 $1.53 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 施磷使水稻地上部全碳含量, 增幅为 25%; 不施磷的根系全碳含量为 $0.55 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 施磷的根系全碳含量为 $0.40 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 施磷显著降低了根系的全碳含量, 降幅为 27%. 因此, 施磷显著增加了地上部的生物量和全碳含量, 减少了地下部的全碳含量, 显著降低了水稻根冠比(图 1).

2.2 光合碳在土壤-水稻系统中分配

施磷显著增加水稻地上部 ^{13}C 的分配, 降低 ^{13}C 在水稻根系和根际土壤的比例, 但对非根际土壤的 ^{13}C 分配无显著影响. 施磷处理光合碳向地上部 ^{13}C 分配与不施磷相比增加了 39%, 从而使根际 ^{13}C 分配降低了 32% ($P < 0.05$, 图 2). 与不施磷相比, 施磷使 ^{13}C 向地上部的分配比例增加了 24%; 向根系和根际土壤的分配比例分别减少了 42% 和 43% ($P < 0.05$, 图 2). 综上, 施磷促进光合碳在地上部的分配, 而降低光合碳向根系和根际土壤的传输 ($P < 0.05$, 图 2), 但对其在非根际土壤的分配无显著性影响.



P₀:不施磷, P₈₀:施磷 80 mg·kg⁻¹, 下同

图1 水稻干物质质量和生物量碳

Fig. 1 Dry weight and biomass carbon of rice

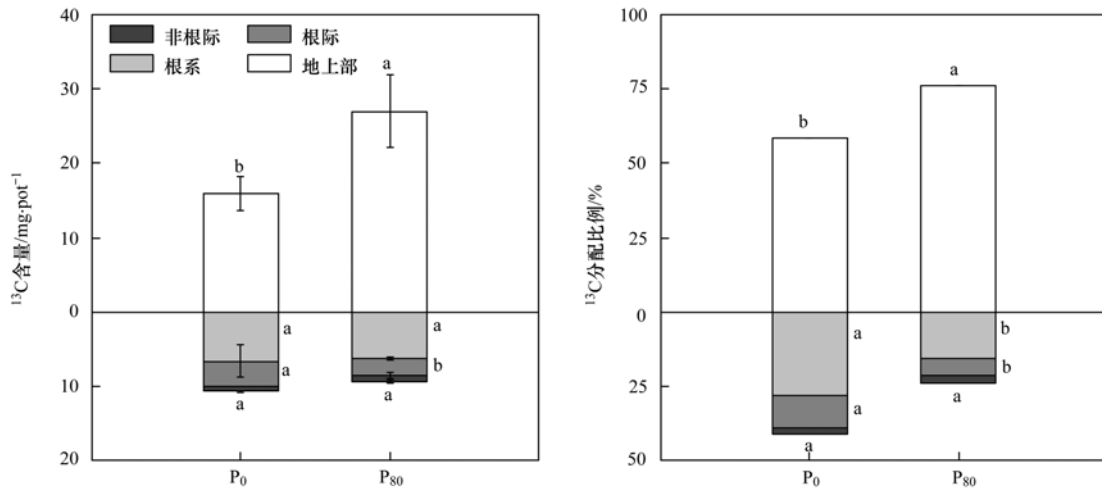
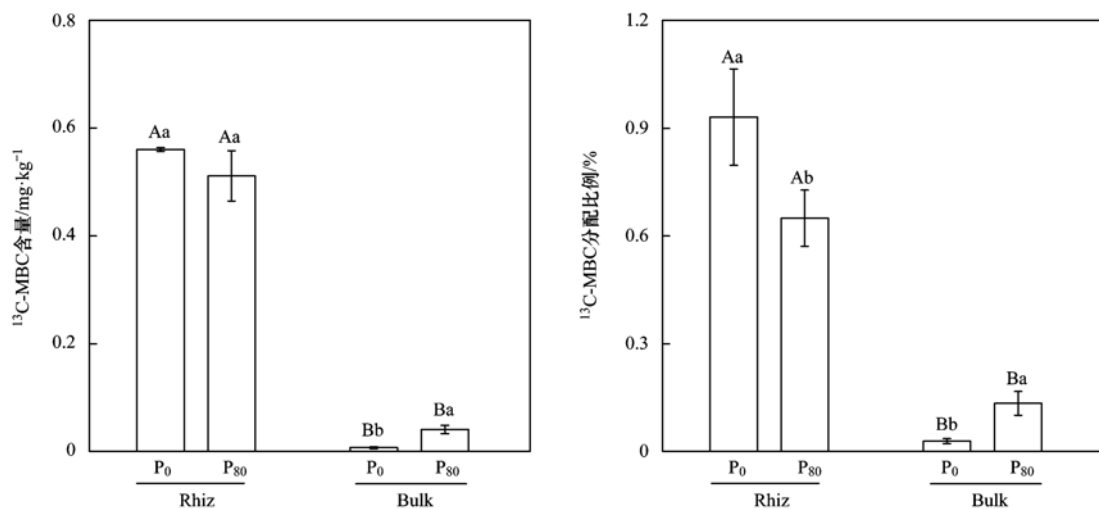


图2 ¹³C在水稻-土壤系统中的含量及分配比例

Fig. 2 Amount and proportion of ¹³C in the rice-soil system

如图3所示,在连续标记14 d后,施磷对根际土壤¹³C-MBC含量无显著影响,但使光合碳在根际

土壤MBC分配比例显著降低了30% ($P < 0.05$).另外,施磷条件下,根际土壤¹³C-MBC含量和分配



Rhiz:根际土壤, Bulk:非根际土壤, 下同

图3 根际和非根际土壤中¹³C-MBC的含量及其分配比例

Fig. 3 Amount and proportion of ¹³C-MBC in the rhizosphere and non-rhizosphere soil

比例均显著高于非根际土壤,增幅达 $0.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 79% ($P<0.05$). 在非根际土壤中,施磷使 ^{13}C -MBC 含量显著提高了 78% ($P<0.05$);而在根际土壤中,施磷处理显著降低了 ^{13}C -MBC 的含量 $0.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分配比例降低了 30% ($P<0.05$).

2.3 光合同化碳在不同有机碳组分中分配

施磷对根际和非根际土壤的 ^{13}C -MOC 含量和分配比例均无显著影响. 施磷显著降低根际土壤 ^{13}C -POC 含量和分配比例,分别降低了 $1.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 52% ($P<0.01$,图 4),但对非根际土壤的 ^{13}C -POC 含量和分配比例无显著性差异. 在施磷条件下,根

际土壤的 ^{13}C -MOC 含量和分配比例比非根际土壤分别提高了 $0.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 230% ,不施磷处理分别提高了 $0.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 200% . 在施磷条件下,根际土壤 ^{13}C -POC 含量和分配比例与 ^{13}C -MOC 相比显著性提高 $1.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 110% ,不施磷处理分别提高了 $2.46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 240% ($P<0.01$,图 4). 相关性分析表明, ^{13}C 在土壤的各碳库 (SOC、POC、MOC 和 MBC) 中的分配具有显著相关性(表 1). 方差分析结果表明,施磷和根际/非根际的效应 (R/B) 显著影响 ^{13}C 在 SOC、POC 和 MBC 中的分配比例(表 2).

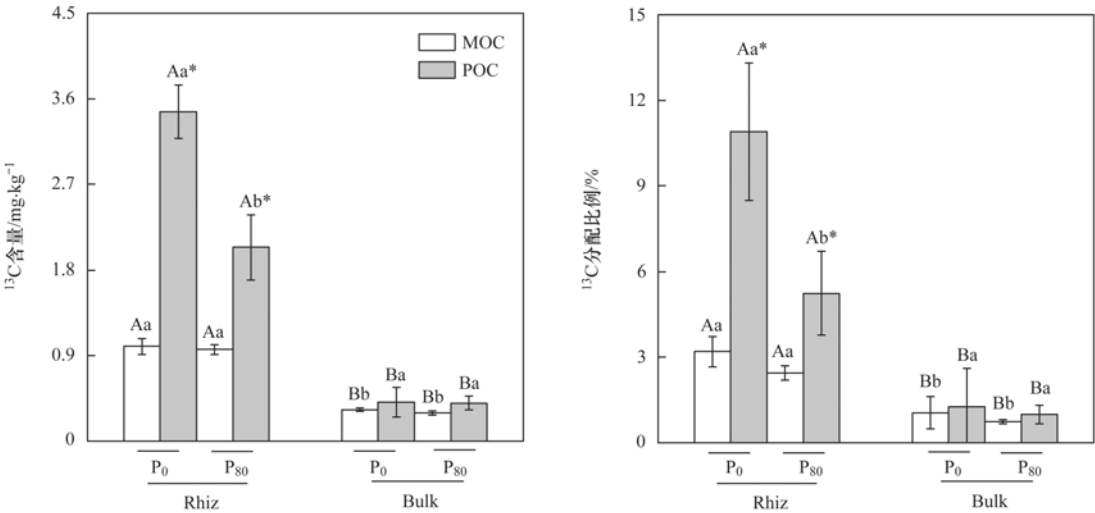


图 4 ^{13}C 在颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳中的含量及其分配比例

Fig. 4 Content of ^{13}C in the POC and MOC and its distribution ratio

表 1 ^{13}C -MOC、 ^{13}C -POC、 ^{13}C -SOC 和 ^{13}C -MBC 含量间的相关相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analyses of the ^{13}C -MOC, ^{13}C -POC, ^{13}C -SOC, and ^{13}C -MBC content

	^{13}C -MOC	^{13}C -POC	^{13}C -SOC	^{13}C -MBC	SOC
^{13}C -MOC	1				
^{13}C -POC	0.918 **	1			
^{13}C -SOC	0.934 **	0.919 **	1		
^{13}C -MBC	0.842 **	0.620 *	0.829 **	1	
SOC	-0.236	-0.124	-0.189	-0.207	1

1) * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

表 2 施磷及根际与非根际 (R/B) 对 ^{13}C 在土壤各碳库中的分配影响的方差分析¹⁾

Table 2 ANOVA analyses for P fertilization and the rhizosphere effect for the incorporation of assimilated ^{13}C in the soil C pools

项目	df	^{13}C -MOC		^{13}C -POC		^{13}C -SOC		^{13}C -MBC		SOC	
		F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
R/B	1	154.140	0.350	50.980	0.011 *	680.900	9.663	26.470	0.011 *	1.320	0.011 *
施磷	1	0.110	0.370	3.970	0.001 **	25.570	55.987	0.340	0.001 **	0.360	<0.001 **
(R/B) × 施磷	1	0.010	0.023 *	3.810	0.001 **	33.320	0.023 *	0.040	<0.001 **	3.940	<0.001 **

1) * 表示在 0.05 水平上差异显著, ** 表示在 0.01 水平上差异显著; df: 自由度, R: 根际土, B: 非根际土, (R/B) × 施磷: 根际与非根际土与施磷交互作用

3 讨论

3.1 水稻生物量及其根冠比对施磷的响应

磷素是水稻生长必需的大量元素,水稻的生长

发育受到磷供给的限制,土壤磷素供应量的变化通常可引起水稻生物量的变化,并影响植物体内光合碳的分配格局^[19]. 本研究发现,在水稻拔节期,施磷处理的植株全碳含量显著高于不施磷组,说明施

磷有利于水稻光合碳的累积。然而,施磷条件下光合碳的累积主要集中在地上部,根部全碳含量显著下降。光合碳在根部和地上部的分配情况对土壤磷水平的响应是水稻应对缺磷胁迫的重要手段之一。土壤是植物磷素的唯一来源,根系是土壤磷素进入植物体内的唯一途径。缺磷条件下,植株将大量的光合碳分配到地下部,用于根尖伸长和细根发育,有效增大了根系与土壤的接触面积,有利于提高对磷素的获取能力。与本研究结果相似,Mehra 等^[20]发现施用磷肥对根系生长有抑制作用,另外与缺磷条件相比,磷素供应充足时,水稻根冠比显著降低。

3.2 施磷对光合碳在土壤-水稻系统分配的影响

水稻植株主要通过叶片进行光合作用将¹³C固定在植物体内,并在水稻-土壤系统中进行再分配^[21,22],植株和土壤¹³C含量的变化清晰地反映了光合碳的转移路径。光合碳的分配受到作物生长环境的影响,而施磷作为水稻生长的重要调控因子,对光合碳在水稻-土壤系统中的分配有重要意义。本研究发现施磷显著提高了光合碳在水稻植株中的分配比例,降低了其向土壤的转移(图2)。有研究表明,水稻根际沉积碳的输入与根系生物量显著正相关^[23]。本研究中,施用磷肥后使根系生物量减少,从而显著降低了水稻光合碳向根际土壤的输入。根际沉积作用是植物实现土壤磷活化的主要的机制之一。磷素供应不足时,根系柠檬酸、乙酸、琥珀酸等小分子有机酸和磷酸酶的分泌量显著增加^[24],以促进对无机磷的溶出和有机磷的矿化,提高土壤磷素的生物有效性^[25]。除了少量光合碳通过真菌根毛等传输外^[26],根际土壤是光合碳向土壤释放的主要场所。从而使施磷和不施磷处理中根际土¹³C含量均显著高于非根际土¹³C含量。¹³C在根际土壤 MBC 中施磷带来的影响并不显著,然而在非根际土壤中,施磷后的¹³C-MBC 显著高于不施磷处理(图3),这可能与微生物代谢底物的有效性有关。根系分泌物多数是一些易利用态的小分子物质,优先被微生物利用。在土壤养分不易于被根系吸收的非根际土壤中,微生物通将光合碳同化自身物质保存于土壤中。然而当养分缺乏时,微生物偏向于通过降解、矿化光合碳,以获得维持生长所需能量^[27]。从而不利于光合碳在非根际土壤的固持。

3.3 光合碳在土壤中的稳定及其对施磷的响应

土壤有机碳与矿物结合是使其稳定化的重要机制^[28],提高土壤中 MOC 比例被认为是抑制土壤有机碳分解、缓解大气 CO₂ 浓度上升的重要途径^[29]。光合碳在根际土壤中主要以 POC 形态存在,而非

根际土中,POC 和 MOC 的¹³C含量差异较小。这主要由根际沉积物的传输性所致,尤其是粒径较大的颗粒有机物,在土壤中的传输受限,造成其含量在根际和非根际土壤中显著的差异。施磷后,光合碳在根际土壤 POC 的分配显著降低,这与王玲莉等^[30]和刘骅等^[31]的研究结果一致。该现象可能由两方面原因导致:其一,施磷后根际沉积碳总量减少,向 POC 的分配随之减少;其二,施肥使根系分泌物的组分发生改变^[32],使其更利于被微生物降解。特别是在根际热区,微生物与根系对于养分的竞争尤为激烈^[33]。本试验施肥是通过基肥一次加入,在养分后续不足的情况下,通过激发效应,前期被激活的微生物大量降解土壤有机质以获取养分,此过程也包括来源于光合碳的已被利用的 POC。佟小刚等^[34]和樊廷录等^[35]报道长期施有机肥条件下红壤、黑垆土矿物结合态有机碳含量有所增加,原因在于施有机肥为微生物提供了营养,微生物代谢分泌物增多,这些分泌物可以直接转移至细黏粒,导致土壤矿物结合态有机碳积累。这表明微生物在 POC 转化为 MOC 的过程中发挥重要的作用,有利于光合碳在土壤中的稳定。

4 结论

缺磷稻田土壤施磷后显著促进水稻地上部分生物量的增加,却限制了根系的生长,降低了水稻根冠比,使水稻光合碳向地下部(根系+土壤)的分配显著减小。可见,虽然施磷提高了水稻植株,尤其是地上部的生长,但降低了光合碳在土壤中的积累。光合碳在根际土壤微生物生物量碳(MBC)、颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MOC)的分配均显著高于非根际土壤,表明水稻根际土壤是光合碳输入、周转和积累的主要区域。此外,施磷对光合碳向非根际土壤 POC 和 MOC 的分配无显著影响,却显著降低其在根际土壤 POC 中的分配,表明磷肥的施用降低了根际沉积碳的周转潜力,有利于水稻光合碳在土壤中的稳定。

参考文献:

- [1] Pan G X, Li L Q, Wu L S, *et al.* Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(1): 79-92.
- [2] 陈春梅,谢祖彬,朱建国. 大气 CO₂ 浓度升高对土壤碳库的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, **16**(1): 217-222.
Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, **16**(1): 217-222.
- [3] Wu J. Carbon accumulation in paddy ecosystems in subtropical China: evidence from landscape studies[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, **62**(1): 29-34.
- [4] 任逸文,肖谋良,袁红朝,等. 水稻光合碳在植物-土壤系统

- 中的分配及其对 CO_2 升高和施氮的响应[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(5): 1397-1404.
- Ren Y W, Xiao M L, Yuan H C, *et al.* Allocation of rice photosynthates in plant-soil system in response to elevated CO_2 and nitrogen fertilization [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(5): 1397-1404.
- [5] 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**(4): 39-46.
- [6] 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 等. 拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ^{13}C - CO_2 脉冲标记[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 331-338.
- Chen S, Zhu Z K, Yuan H Z, *et al.* Dynamics of rice photosynthesized carbon input and its response to nitrogen fertilization at the jointing stage: ^{13}C - CO_2 Pulse-labeling [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 331-338.
- [7] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, **57**(4): 1071-1076.
- [8] Watson J R, Parsons J W. Studies of soil organo-mineral fractions: I. Isolation by ultrasonic dispersion[J]. Journal of Soil Science, 1974, **25**(1): 1-8.
- [9] 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 等. 添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响[J]. 环境科学, 2018, (12): 1-12.
- Bai J, Li Y F, Liu S L, *et al.* Effect of phosphorus addition on the abundance of autotrophic CO_2 fixation microorganisms in the rhizospheric soil from a phosphorus limited paddy field [J]. Environmental Science, 2018, (12): 1-12.
- [10] 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.
- [11] 刘玉槐, 魏晓梦, 魏亮, 等. 水稻根际和非根际土磷酸酶活性对碳、磷添加的响应[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(9): 1653-1663.
- Liu Y H, Wei X M, Wei L, *et al.* Responses of extracellular enzymes to carbon and phosphorus additions in rice rhizosphere and bulk soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(9): 1653-1663.
- [12] Pinheiro, érika Flávia Machado, *et al.* Tillage systems effects on soil carbon stock and physical fractions of soil organic matter[J]. Agricultural Systems, 2015, **132**: 35-39.
- [13] Ge T, Chen X, Yuan H, *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.
- [14] Ge T D, Wu X H, Chen X J, *et al.* Microbial phototrophic fixation of atmospheric CO_2 in China subtropical upland and paddy soils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, **113**: 70-78.
- [15] Chapin III F S, Bloom A J, Field C B, *et al.* Plant responses to multiple environmental factors: physiological ecology provides tools for studying how interacting environmental resources control plant growth[J]. Bioscience, 1987, **37**(1): 49-57.
- [16] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 277-282.
- Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y, *et al.* Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon [J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 277-282.
- [17] Yang J, Kang Y, Sakurai K, *et al.* Fixation of carbon dioxide by chemoautotrophic bacteria in grassland soil under dark conditions [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2017, **67**(4): 362-371.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Mehra P, Pandey B K, Giri J. Comparative morphophysiological analyses and molecular profiling reveal pi-efficient strategies of a traditional rice genotype[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, **6**: 1184.
- [21] Johnson D, Leake J R, Ostle N P, *et al.* *In situ* ^{13}C pulse-labelling of upland grassland demonstrates a rapid pathway of carbon flux from arbuscular mycorrhizal mycelia to the soil [J]. New Phytologist, 2002, **153**(2): 327-334.
- [22] Kuzyakov Y, Domanski G. Model for rhizodeposition and CO_2 efflux from planted soil and its validation by ^{14}C pulse labelling of ryegrass[J]. Plant and Soil, 2002, **239**(1): 87-102.
- [23] 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.
- [24] Richardson A E, Barea J, McNeill A M, *et al.* Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. Plant and Soil, 2009, **321**(1-2): 305-339.
- [25] Nuruzzaman M, Lambers H, Bolland M D A, *et al.* Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes[J]. Plant and Soil, 2006, **281**(1-2): 109-120.
- [26] Hafner S, Wiesenberger G L B, Stolnikova E, *et al.* Spatial distribution and turnover of root-derived carbon in alfalfa rhizosphere depending on top-and subsoil properties and mycorrhization[J]. Plant and Soil, 2014, **380**(1-2): 101-115.
- [27] Yin L M, Dijkstra F A, Wang P, *et al.* Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen dynamics among tree species with and without intraspecific competition[J]. New Phytologist, 2018, **218**(3): 1036-1048.
- [28] 马欣, 魏亮, 唐美玲, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 环境科学, 2018 (12): 1-12.
- Ma X, Wei L, Tang M L, *et al.* Effects of different long-term fertilization on organic carbon mineralization and priming effect of paddy soil [J]. Environmental Science, 2018(12): 1-12.
- [29] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响[J]. 生态学报, 2004, **24**(12): 2961-2966.
- Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, *et al.* Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, **24**(12): 2961-2966.
- [30] 王玲莉, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(1): 79-83.
- Wang L L, Han X R, Yang J F, *et al.* Effect of long-term

- fertilization on organic carbon fractions in a brown soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, **14**(1): 79-83.
- [31] 刘骅, 佟小刚, 马兴旺, 等. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合有机碳的含量及其演变特征[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(1): 84-90.
- Liu H, Tong X G, Ma X W, *et al.* Content and evolution characteristics of organic carbon associated with particle-size fractions of grey desert soil under long-term fertilization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(1): 84-90.
- [32] Kaštovská E, Edwards K, Šantrůčková H. Rhizodeposition flux of competitive versus conservative graminoid: contribution of exudates and root lysates as affected by N loading[J]. *Plant and Soil*, 2017, **412**(1-2): 331-344.
- [33] Kuzyakov Y, Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **83**: 184-199.
- [34] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, **41**(11): 3664-3671.
- Tong X G, Xu M G, Zhang W J, *et al.* Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41**(11): 3664-3671.
- [35] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(2): 300-309.
- Fan T L, Wang S Y, Zhou G Y, *et al.* Effects of long-term fertilizer application on soil organic carbon change and fraction in cumelic haplustoll of loess plateau in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(2): 300-309.



CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)