

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
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	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应:¹³C-CO₂ 脉冲标记

陈珊^{1,2}, 祝贞科², 袁红朝², 王久荣², 彭佩钦^{1*}, 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)

摘要: 水稻光合碳是稻田土壤有机碳的重要来源之一, 其在土壤中输入与分配特征受水稻生长状况和土壤肥力的影响. 施肥是影响水稻生长的关键因素, 为了探讨施氮对水稻拔节期光合碳的传输动态的影响, 应用稳定同位素¹³C-CO₂ 脉冲标记技术, 通过盆栽试验, 研究光合碳在水稻-(根际/非根际) 土壤系统中输入与分配的动态变化及其对施氮的响应. 结果表明, 施氮显著增加了水稻地上部和根系生物量, 降低了水稻根冠比. 随着水稻的生长, 水稻植株的¹³C丰度逐渐下降, 根际土和非根际土中¹³C丰度先减少再增加; 施氮显著增加了根际土壤中¹³C丰度, 较不施氮相比增加了 9.5% ~ 32.6%. 施氮使水稻地上部和根系中光合¹³C含量显著增加, 较不施氮处理分别增加了 24.5% ~ 134.7% 和 9.1% ~ 106%. 脉冲标记一次性输入的光合¹³C主要分配在水稻植株体内, 不施氮和施氮条件下的分配率分别为 85.5% ~ 93.2% 和 91.3% ~ 95.7%; 施氮显著影响光合碳在水稻地上部、根际土和非根际土中的分配特征 ($P < 0.01$), 标记后 26 d, 与不施氮处理相比, 施氮使光合碳在水稻地上部的分配增加了 13.4%, 在根际土和非根际土中的分配分别减少了 21.9% 和 52.2%. 因此, 施氮增加了光合碳在土壤-水稻系统中的分配, 但降低了光合碳在土壤中的累积. 本研究进一步探讨了施氮条件下水稻拔节期光合碳的分配, 为明确氮素对光合碳在水稻拔节期的动态变化以及对土壤有机碳库的影响, 和深入了解农田土壤有机质累积提供理论依据和数据支持.

关键词: 水稻光合碳; 拔节期; 施氮; ¹³C 脉冲标记; 根际; 非根际

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0331-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201702164

Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³C-CO₂ Pulse-labeling

CHEN Shan^{1,2}, ZHU Zhen-ke², YUAN Hong-zhao², WANG Jiu-rong², PENG Pei-qin^{1*}, GE Ti-da², WU Jin-shui²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: Photosynthesized carbon (C) is an important source of soil organic C in paddy fields, and its input and distribution are affected by rice growth and soil fertility. Fertilizer application plays an important role in rice growth. The ¹³C pulse-labeling method was used to quantify the dynamics and distribution of input photosynthesized C in the rice-(rhizosphere- and bulk-) soil system and its response to nitrogen fertilizer (N) application. The results suggested that N fertilization significantly increased the rice aboveground and the root biomass and decreased the rice biomass root/shoot ratio. The amount of assimilated ¹³C gradually decreased in the rice plants but gradually decreased over 0-6 days and increased over 6-26 days in the rhizosphere and bulk soil during rice growth. N fertilization significantly increased the amount of assimilated ¹³C in the rhizosphere soil by 9.5%-32.6% compared with the control. In comparison to the unfertilized treatment, the application of N fertilization resulted in higher photosynthetic ¹³C in rice aboveground and in the root by 24.5%-134.7% and 9.1%-106%, respectively. With the N fertilized and unfertilized treatments, 85.5%-93.2% and 91.3%-95.7%, respectively, of input photosynthetic ¹³C was distributed in the rice plants. The results suggested that N fertilization significantly affected the distribution of photosynthesized C in the rice-soil system ($P < 0.01$). After 26 days of pulse labeling, the distribution of photosynthetic ¹³C into rice aboveground was increased by 13.4%, while the distribution into the rhizosphere and bulk soil were decreased by 21.9% and 52.2%, respectively, in the N fertilized treatments compared with the unfertilized treatments. Therefore, the N application increased the distribution of photosynthesized carbon in the soil-rice system but decreased the accumulation in the rhizosphere and bulk soil. The findings of this study provided a theoretical basis for our understanding of the dynamic of photosynthetic C in the plant-soil system and the assimilation of the soil organic matter pool in the paddy soil ecosystem.

Key words: rice photosynthesized carbon; jointing stage; nitrogen application; ¹³C pulse-labeling; rhizosphere; bulk

收稿日期: 2017-02-24; 修订日期: 2017-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501321, 41301276); 湖南省自然科学基金项目(2016JJ2136); 中南林业科技大学创新基金项目

作者简介: 陈珊(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态, E-mail: 869283723@qq.com

* 通信作者, E-mail: pqpeng123@sina.com

植物光合碳是“大气-植物-土壤”系统碳循环的起点,且与土壤质量变化关系密切,光合碳由地上部向地下部转运,用作根系呼吸和根系发育,转移至根系中的光合碳以根系分泌物或植物残体形式将同化的碳水化合物输入土壤^[1],以根系分泌物形式向土壤根际环境中输入碳转化为微生物量碳中的一部分,或以有机质形式贮存于土壤碳库中^[2~4]. 光合碳在植物体内的转化非常迅速,标记后 4 h 即可检测到根系中¹³C 存在^[5,6]. 光合碳向根系及土壤中的传输与分配与茎叶相比存在一定滞后性,所以根系中光合碳含量在标记后的 24 ~ 48 h 达到峰值^[7]. 有研究表明,牧草将 30% ~ 50% 的光合产物转移到地下^[6],谷类作物(小麦和大麦)约有 20% ~ 30% 的光合碳分配到地下部^[8],水稻光合碳约有 2% ~ 10% 以根际沉积碳的形式输入土壤^[9,10]. 光合碳在植物-土壤系统中的传输与分配是陆地碳循环的重要组成过程,对维持稻田土壤的碳汇功能起到了十分重要的作用^[11].

光合碳在植物-土壤系统中的传输与分配受土壤肥力条件的影响,土壤肥力又是影响作物生长以及土壤微生物活性的重要因子,进而影响光合碳的周转过程^[12,13]. 氮素作为作物生长的必需营养元素,显著影响作物的生长和根际碳沉积过程^[11,14]. Ge 等^[15]认为较高的施氮水平提高了水稻地上部对碳的积累能力和水稻新鲜根际碳的沉积. 氮肥施用能够显著促进地上部的生长^[16,17],因而,增加了光合同化碳分配到植物茎的比例,降低了分配到根的比例^[18]. Kuzakov 等^[18]研究了施氮对光合碳在麦类作物中分配的影响,结果表明氮肥降低了光合碳向根系的转移,高氮肥施用量减少了麦类作物光合碳向地下碳库的转运. 因此,研究氮肥施用条件下光合碳的传输过程,可明确氮肥对水稻生长的影响

和光合碳对土壤碳汇功能的贡献.

¹³C 脉冲标记技术是一种研究土壤有机碳输入、输出的方法. 与连续标记相比,脉冲标记具有费用低、设备和环境条件要求简单的优点^[19],而且一次输入一定量的标记物,可用来研究植物在特定生长时期光合碳的分配情况^[1],因此,只要在植物生育期内进行一次脉冲标记,便能合理估算植物输入到地下各组分的碳量,动态监测光合碳在土壤中的去向,定量认识根际沉积碳^[20]、植物输入到根部的碳^[21]和根际呼吸强度. 本试验在水稻拔节期进行一次性¹³C-¹⁴C₂ 同位素脉冲标记,研究在不同氮肥水平下,光合碳在“水稻-土壤”系统中的传输、转化与分配动态,以期为研究水稻光合碳对土壤有机碳固持、稻田碳循环及土壤可持续利用提供理论基础和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为多年种植水稻的典型红壤,采集于中国科学院长沙农业环境观测研究站(113°19'52" E、28°33'04"N),该地属亚热带典型湿润气候,年均温度 17.5℃,降水量 1 300 mm,日照 1 663 h. 采集耕作层(0 ~ 20 cm)土壤,湿润条件(含水率为 14.8%)下过 4 mm 筛去除植物残体,测定其基本理化性质. 采用 Mettler-toledo320 pH 计测定土壤 pH(水土比为 1:2.5);碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N,德国)测定土壤全氮(TN)和有机碳(SOC)的含量;氢氧化钠熔融法-紫外分光光度计(UV-2450,日本)测定土壤全磷(TP),激光粒度仪(Mastersizer 2000,英国)测定土壤机械组成. 供试土壤基本理化性质见表 1. 供试植物为水稻(粘性常规水稻中早 39).

表 1 供试土壤理化性质

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

pH	阳离子交换量(CEC) /cmol·kg ⁻¹	C/N	含量/g·kg ⁻¹			质量分数/%		
			有机碳	全氮	全磷	黏粒	粉粒	砂粒
5.6	7.8	16.2	13.5	0.8	1.6	68.4	24.1	7.5

1.2 水稻种植与¹³C-¹⁴C₂ 脉冲标记

向土壤样品喷施 NaH₂PO₄ (20 mg·kg⁻¹) 和 KCl (80 mg·kg⁻¹) 溶液作为基肥,以每千克土壤中施入的 NaH₂PO₄、KCl 中的 P、K 的质量(mg)计,水稻标记试验设置 2 个处理,每个处理 3 个重复:①施氮,②不施氮;其中,施氮处理施加(NH₄)₂SO₄ 作为氮

源(100 mg·kg⁻¹). 将土壤样品混匀分装于 PVC 盆(直径 17.2 cm,高 16.7 cm)和根际袋(直径 4 cm,高 16 cm)中,根际袋由筛孔大小为 30 μm 的德国进口尼龙网制成,每盆装入相当于 1.60 kg 干土的土壤,作为非根际土;根际袋中装入相当于 0.32 kg 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,水稻植株种在根际袋土中. 培养装置和方法参考文献[9,21].

水稻幼苗在田间培养 20 d 后,选取长势相当的稻苗,洗净根系后移栽至盆中的根际袋中,每盆 3 株,每株水稻干重平均值为 0.16 g. 移栽后的水稻置于阳光充足、通风良好的空地进行培养,用去离子水浇灌并保持高于土壤表面 2~3 cm 的水层,并及时除草. 选择 2015 年 9 月 16 日对拔节期水稻进行脉冲标记,标记时间为光照充足的 09:00~15:00. 将水稻盆栽移入标记箱进行脉冲标记,标记时间为 6 h. 标记结束后放在距离标记箱 10 m 外,置于阳光充足、通风良好的空地进行培养. 本试验设置 6 次采样,采样时间分别为脉冲标记结束后的第 0、1、3、6、12、26 d; 其中,6 h 标记后立即进行破坏性采样记为 0 d. ^{13}C - CO_2 通过 ^{13}C - NaHCO_3 (99% atom ^{13}C , 100 mL, $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 H_2SO_4 (50 mL, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 反应自动产生,通过控制 H_2SO_4 加入速度使标记培养箱内 CO_2 浓度维持在 $270 \sim 350 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间. 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, 杭州时域电子科技有限公司),使标记过程中培养箱内外温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$. 另外每个处理设置 3 盆不进行脉冲标记的作为对照,放置于离标记培养箱 10 m 以上的区域,用来测定植株、土壤的 ^{13}C 丰度.

1.3 试验分析方法

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、茎叶、籽粒分开后,先用自来水冲洗,再用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 (pH 6.2) 浸泡 3~5 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, 60°C 下烘干至恒重. 采集根际和非根际土,分别保存、风干.

水稻植株与土壤(根际土、非根际土)样品的 ^{13}C 丰度和 $\omega(\text{TC})$ 在同位素比率质谱仪(MAT253 型,美国热电公司)中测定.

植株(籽粒、茎叶、根)和土壤(根际土、非根际土)中 ^{13}C 的含量由标记和非标记样品中 ^{13}C 的丰度来确定^[19]:

$$C_s = ({}^{13}\text{C}_i - {}^{13}\text{C}_{\text{nl}}) \times \omega(\text{TC}) / 100 \quad (1)$$

式中, C_s 为样品中 ^{13}C 含量, $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$; ${}^{13}\text{C}_i$ 和 ${}^{13}\text{C}_{\text{nl}}$ 分别表示标记和非标记样品中 ^{13}C 的丰度, %; $\omega(\text{TC})$ 表示植株(籽粒、茎叶、根)和土壤(根际土、非根际土)中总碳含量, $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$.

水稻光合碳含量(${}^{13}\text{C}_i$)是指 6 h 标记结束后,各部分同化 ^{13}C 量的总和:

$${}^{13}\text{C}_i = {}^{13}\text{C}_g + {}^{13}\text{C}_{\text{sh}} + {}^{13}\text{C}_r + {}^{13}\text{C}_{\text{RS}} + {}^{13}\text{C}_{\text{BS}} \quad (2)$$

式中, ${}^{13}\text{C}_g$ 、 ${}^{13}\text{C}_{\text{sh}}$ 、 ${}^{13}\text{C}_r$ 、 ${}^{13}\text{C}_{\text{RS}}$ 、 ${}^{13}\text{C}_{\text{BS}}$ 分别为水稻籽粒、茎叶、根、根际土和非根际土中 ^{13}C 的含量, $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$.

水稻光合碳在水稻-土壤系统各部分的分配比例(P_i , %) 分别为 ${}^{13}\text{C}_g$ 、 ${}^{13}\text{C}_{\text{sh}}$ 、 ${}^{13}\text{C}_r$ 、 ${}^{13}\text{C}_{\text{RS}}$ 、 ${}^{13}\text{C}_{\text{BS}}$ 与 ${}^{13}\text{C}_i$ 的比值.

$$P_i = {}^{13}\text{C}_i / {}^{13}\text{C}_i \times 100\% \quad (3)$$

式中, ${}^{13}\text{C}_i$ 为水稻-土壤系统各部分(籽粒、茎叶、根、根际土或非根际土) ^{13}C 含量, $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$; ${}^{13}\text{C}_i$ 为水稻光合碳含量, $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$.

1.4 数据处理和统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 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 施氮对水稻生物量及根冠比的影响

随着水稻的生长,水稻地上部(包括籽粒和茎叶)生物量逐渐增加,脉冲标记后 26 d 与 0 d 相比,不施氮和施氮条件下水稻地上部生物量分别增加 15.9%~66.7%、23.5%~96.2%; 施氮处理水稻地上部生物量较不施氮处理增加 41.7%~70.7%. 施氮显著提高了水稻根系生物量,较不施氮处理相比根系生物量增加了 16.2%~104.3%. 水稻根冠比随着水稻的生长呈下降趋势,施氮降低了水稻根冠比(图 1).

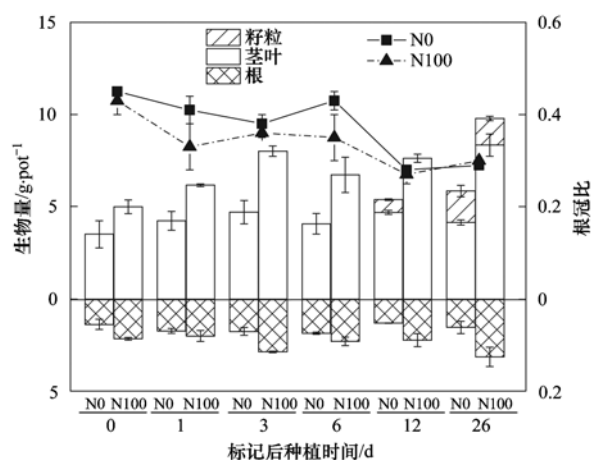


图 1 施氮对水稻生物量及根冠比的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen application on rice root, shoot biomass, and the root/shoot ratio

2.2 施氮对水稻植株和土壤中 ^{13}C 丰度的影响

水稻地上部 ^{13}C 丰度在6 h脉冲标记后达到最大值(不施氮处理,1 224.1‰;施氮处理,1 033.8‰),标记后0~3 d内随着水稻的生长快速下降,而后逐渐降低,26 d时分别降至347.6‰、346.0‰。水稻根系中 ^{13}C 丰度随着水稻生长先增加(2 d时最高)再

逐渐减少,脉冲标记后26 d,施氮较不施氮相比,水稻根系中的 ^{13}C 丰度增加了39.3%。施氮条件下水稻根际土和非根际土中 ^{13}C 丰度逐渐减少,而不施氮条件下 ^{13}C 丰度均表现为先减少再增加;施氮对土壤非根际土中 ^{13}C 丰度影响不显著,却使根际土 ^{13}C 丰度较不施氮处理增加了9.5%~32.6%(图2)。

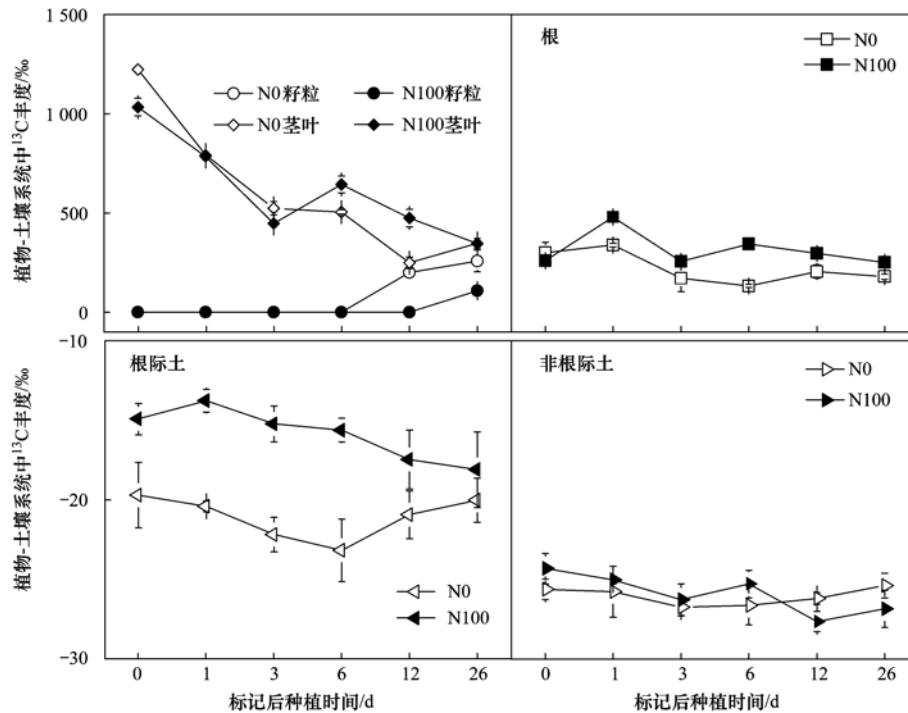


图2 施氮对水稻-土壤系统中 ^{13}C 丰度的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen application on the abundance of ^{13}C in rice-soil systems

2.3 施氮对水稻植株和土壤中光合 ^{13}C 含量的影响

水稻地上部光合 ^{13}C 含量随着水稻的生长逐渐降低。施氮显著增加了水稻地上部和根系 ^{13}C 含量,与不施氮处理相比,施氮使水稻地上部和根系光合 ^{13}C 含量分别增加24.5%~134.7%和9.1%~106%。氮肥处理影响水稻非根际土壤中 ^{13}C 含量的变化特征,脉冲标记后26 d较0 d相比,不施氮处理非根际土 ^{13}C 含量增加了13.4%,而施氮处理 ^{13}C 含量减少了40.7%;施氮对根际土 ^{13}C 含量影响不显著,脉冲标记后26 d时,施氮与不施氮相比使根际土中光合 ^{13}C 含量增加23.1%(图3)。

2.4 施氮对水稻-土壤系统中光合 ^{13}C 分配率的影响

脉冲标记一次性输入的光合 ^{13}C 主要分配在水稻植株体内(图4)。施氮显著影响光合碳在水稻地上部的分配率($P < 0.01$),见表2,标记后26 d,水稻地上部 ^{13}C 分配比例较不施氮处理增加了13.4%。施氮条件下, ^{13}C 在水稻根系中的分配表现为先增加后减少的趋势。随着水稻的生长,光合 ^{13}C 逐渐向地

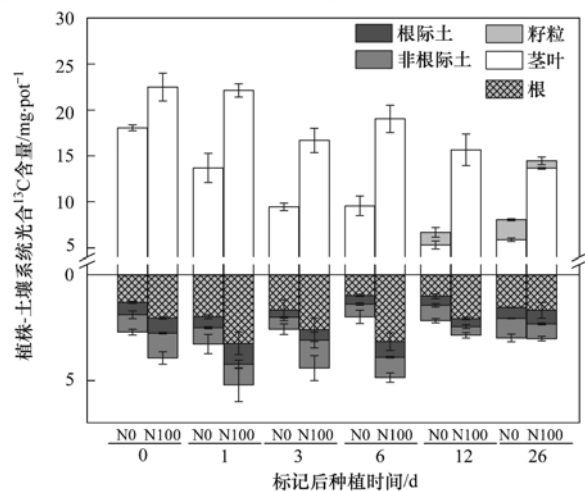


图3 施氮对水稻-土壤系统中 ^{13}C 含量的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen application on the content of photosynthetic ^{13}C in rice-plant systems

下部传输,所以水稻根际和非根际土壤中 ^{13}C 分配比例基本呈现逐渐增加的趋势,与脉冲标记后0 d相比,26 d后不施氮处理的根际土和非根际土中 ^{13}C 分

配率分别增加 66.7% 和 112.2%；同时,施氮降低了¹³C在根际和非根际土壤中的分配($P < 0.01$),见表 2,标记后 26 d,与不施氮处理相比,根际土和非根际土分别减少了 21.9% 和 52.2%.

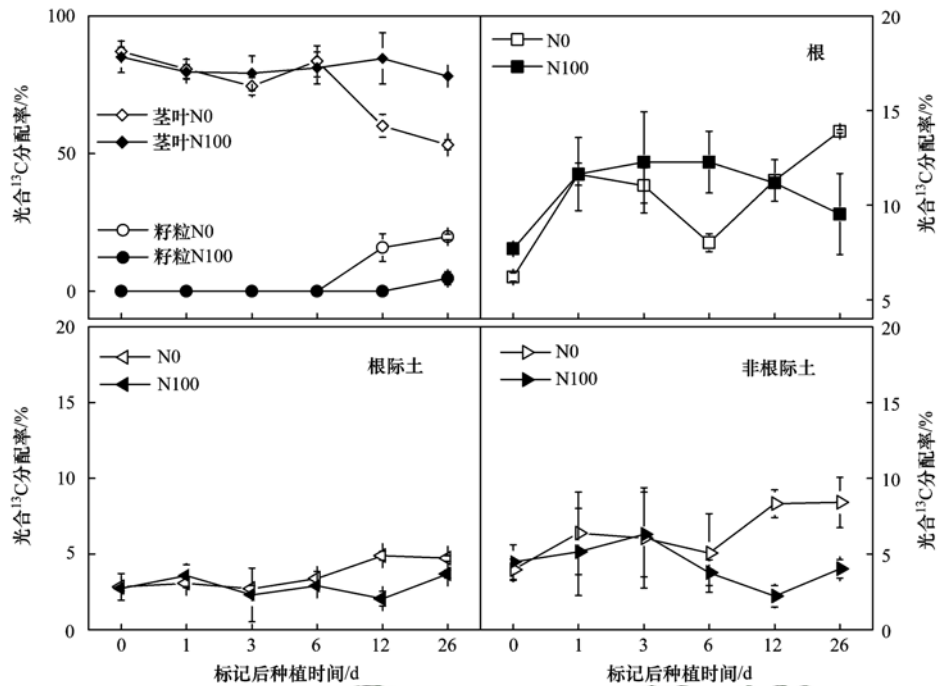


图 4 施氮对水稻-土壤系统中¹³C分配率的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen application on the distribution ratio of photosynthetic ¹³C in rice-plant systems

表 2 施氮对土壤-水稻系统¹³C分配率的影响(P 值)

Table 2 Effect of nitrogen application on the distribution ratio of photosynthesized ¹³C in the soil-rice systems (P value)

项目	df	籽粒分配率	茎叶分配率	根系分配率	根际土分配率	非根际土分配率
T	5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
N	1	<0.01	<0.01	0.473	<0.01	<0.01
T×N	5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

1) df: 自由度, T: 种植时间, N: 施氮, T×N: 时间与施氮交互作用

3 讨论

3.1 施氮对水稻生物量及根冠比的影响

施氮是调控作物生长、群体发育,提高同化能力和水分利用的重要措施,对作物的根冠关系有重要影响^[22]. 本研究发现,在整个水稻培养期内,施氮显著增加了植株生物量,脉冲标记后 60 d,施氮使水稻地上部生物量明显高于不施氮处理,降低了水稻根冠比(图 1),王婷婷等^[23]的研究结果也表明,氮肥可促使水稻生长加快,降低根冠比. 而本研究中施氮并没有显著地降低水稻根冠比,可能是本试验开始时施氮量为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,由于 N 挥发等原因,使土壤 N 含量低于前人试验研究施氮量 ($250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),使 N 素对根系生长的促进作用不显著^[24];而且研究是在控制条件下的盆栽试验,作物根系受栽培条件所限,导致地下部生物量又相对较

少^[25]. 另一方面,本试验维持稳定的 CO₂ 含量,氮肥提高了水稻对 CO₂ 的固定,促使水稻地上部生物量增加幅度显著高于不施氮处理,但氮肥并没有显著促进地下部生长,因此,导致水稻根冠比降低,这表明氮素是限制水稻生长的关键养分因素.

3.2 光合碳在水稻-土壤系统中的传输与分配

水稻植株主要依靠叶片的光合作用将¹³C固定在植物体内,并在植物-土壤系统中进行再分配^[5,6]. 植株和土壤各部分¹³C丰度的变化特征,清晰地反映了光合碳的转移路径,水稻地上部¹³C丰度在 6 h 脉冲标记后达到最大值(不施氮处理,1 224.1‰;施氮处理,1 033.8‰),标记后 0~3 d 内随着水稻的生长快速下降,而后逐渐降低至 26 d(不施氮处理,347.6‰;施氮处理,346.0‰);水稻根系中¹³C丰度随着水稻生长先增加再逐渐减少,并逐渐向根际土壤中输入,使根际土壤中的¹³C丰度高于非根际土

壤. 这表明标记后的光合碳逐渐转移分配到地下部用于根系生长, 不断以根际沉积物的形式输入根际土壤^[26]. $\delta^{13}\text{C}$ 值的下降可能是由于水稻植株和土壤呼吸损失 ^{13}C , 同时水稻植株的不断生长, 生物量继续增加, 未标记部分同化 ^{13}C , 故而稀释了水稻光合固定的 ^{13}C . 26 d 的试验过程中, 一次脉冲标记输入的光合 ^{13}C 在水稻地上部含量随着水稻的生长降低了30%~50%, 根系中 ^{13}C 含量增加了约1倍(图3), 根际和非根际土壤中 ^{13}C 分配比例逐渐增加(图4), 这表明植物光合同化碳最终以根际沉积物的形式输入土壤, 包括根系分泌物(小分子物质例如单糖、氨基酸或有机酸等)、根毛脱落物、死亡根系等有机物质, 在土壤微生物的作用下进行代谢周转, 进而与土壤矿物作用形成稳定的土壤有机质, 促进土壤有机质的累积^[9,20,27,28].

3.3 施氮对光合碳在根际、非根际土中分配的影响

氮素是植物叶绿素、蛋白质、光合酶等的组成部分^[29], 是调控土壤碳源供给和微生物活性的关键因子^[30]. 施氮可以改善根际微环境, 加快土壤养分循环, 保证作物生长的营养所需, 进而促进作物光合作用^[31]. 本研究发现施氮促进水稻光合作用, 增加水稻植株中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 ^{13}C 的分配, 表明施氮促进了植株对光合碳的同化作用. 与本研究类似, 谭立敏等^[14]的研究发现, 施氮量显著影响了 ^{13}C 在水稻-土壤系统中的输入和分配特征, 氮肥促进光合碳向地下部转运, 李银坤等^[32]也指出施氮能增加夏玉米农田的净光合碳输入, 并随施氮量增加而增大.

光合碳在水稻根际和非根际土壤中的分配与固持特征与土壤养分含量水平密切相关, 根系分泌物为根际微生物提供所需的能源, 根际沉积碳是微生物代谢的有效碳源, 而氮素的添加, 有效地缓解了土壤微生物氮素限制, 极大促进了微生物代谢活跃^[33], 因此, 本研究中脉冲标记后0~6 d, 施氮增加了土壤中 ^{13}C 含量. 但标记后6~26 d, 施氮处理的根际和非根际土壤中 ^{13}C 的含量和分配比例都低于不施氮处理, 这表明施氮降低了光合碳在土壤中的固持. 魏亮等^[34]的研究指出施氮影响土壤微生物胞外酶活性, 增加微生物对土壤碳的分解, 进而影响了土壤对光合碳的固定. 但齐鑫等^[17]通过室内冬小麦盆栽试验发现低氮处理($150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)能增进植物光合碳向地下部的输入, 增加土壤碳的累积, 这可能与作物的品种有关. 因此, 氮肥对于光合碳的稳定和土壤有机碳累积起着非常重要的作用.

4 结 论

(1) 水稻光合碳主要分配在水稻地上部, 随着水稻生长光合碳逐渐向水稻地下部和土壤传输.

(2) 施氮促进了水稻地上部生物量的累积, 减弱根系的生长, 使光合碳在水稻地上部的累积与分配增加, 根际土和非根际土中的积累与分配降低. 说明施氮能促进水稻光合作用, 增加土壤中新碳的分解, 降低光合碳在土壤中的累积.

参考文献:

- [1] 王智平, 陈全胜. 植物近期光合碳分配及转化[J]. 植物生态学报, 2005, **29**(5): 845-850.
Wang Z P, Chen Q S. Recently photosynthesized carbon allocation and turnover: a minor review of the literature[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, **29**(5): 845-850.
- [2] 连腾祥, 王光华, 于镇华, 等. 植物光合碳在根际土壤中的微生物转化与 SIP 技术[J]. 土壤与作物, 2013, **2**(2): 77-83.
Lian T X, Wang G H, Yu Z H, et al. Microbial turnover of photosynthetic carbon in the rhizosphere and SIP technology-a review[J]. Soil and Crop, 2013, **2**(2): 77-83.
- [3] 李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 等. 水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1568-1575.
Li M M, Nie S A, Chen X J, et al. Distribution characteristics of rice photosynthesized carbon in soil aggregates of different size and density[J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1568-1575.
- [4] 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.
- [5] Johnson D, Leake J R, Ostle N, et al. In situ $^{13}\text{C}\text{O}_2$ 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.
- [6] 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.
- [7] Ostle N, Ineson P, Benham D, et al. Carbon assimilation and turnover in grassland vegetation using an *in situ* $^{13}\text{C}\text{O}_2$ pulse labelling system [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2000, **14**(15): 1345-1350.
- [8] 何敏毅, 孟凡乔, 史雅娟, 等. 用 ^{13}C 脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 446-453.
He M Y, Meng F Q, Shi Y J, et al. Estimating photosynthesized carbon distribution and inputs into belowground in a maize soil following ^{13}C pulse-labeling [J]. Environmental Science, 2008, **29**(2): 446-453.
- [9] 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.
- [10] 王群艳, 祝贞科, 袁红朝, 等. 不同生育期光合碳在水稻-土壤系统中的分配及输入效率[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(10): 1471-1478.
- Wang Q Y, Zhu Z K, Yuan H Z, *et al.* Allocation and input efficiency of assimilated carbon in rice-soil systems at different growth stages[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(10): 1471-1478.
- [11] Atere C T, Ge T D, Zhu Z K, *et al.* Rice rhizodeposition and carbon stabilisation in paddy soil are regulated via drying-rewetting cycles and nitrogen fertilisation [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, **53**(4): 407-417.
- [12] Jin J, Wang G H, Liu J D, *et al.* Seasonal allocation of photosynthetically fixed carbon to the soybean-grown Mollisols in Northeast China[J]. *Crop and Pasture Science*, 2011, **62**(7): 563-570.
- [13] 乔云发, 韩晓增, 赵兰坡. 长期定量施肥对玉米光合碳分配的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(4): 208-212.
- Qiao Y F, Han X Z, Zhao L P. The respond of photosynthetic carbon allocation of maize to long-term fertilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(4): 208-212.
- [14] 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: ^{13}C 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 ^{13}C labeling [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1933-1938.
- [15] 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**: 17-25.
- [16] Wang Z P, Li L H, Han X G, *et al.* Dynamics and allocation of recently photo-assimilated carbon in an Inner Mongolia temperate steppe[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **59**(1): 1-10.
- [17] 齐鑫, 王敬国. 应用 ^{13}C 脉冲标记方法研究不同施氮量对冬小麦净光合碳分配及其向地下输入的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(6): 2524-2530.
- Qi X, Wang J G. Distribution and translocation of assimilated C pulse-labeled with ^{13}C for winter wheat (*Triticum aestivum* L.), as Affected by nitrogen supply[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(6): 2524-2530.
- [18] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, **163**: 421-431.
- [19] 刘萍, 江春玉, 李忠佩. ^{13}C 脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(3): 567-575.
- Liu P, Jiang C Y, Li Z P. Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using ^{13}C pulse labeling technique[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(3): 567-575.
- [20] Kuzyakov Y, Schneckenberger K. Review of estimation of plant rhizodeposition and their contribution to soil organic matter formation[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2004, **50**(1): 115-132.
- [21] 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): 32-1-32-8.
- [22] 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.
- [23] 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 等. 施氮和水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.
- [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] 臧华栋, 钱欣, 杨学超, 等. 作物根际沉积氮研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2014, **16**(4): 120-126.
- Zang H D, Qian X, Yang X C, *et al.* Progress and perspectives of nitrogen rhizodeposition in crops[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, **16**(4): 120-126.
- [26] 尹云峰, 杨玉盛, 高人, 等. 植物富集 ^{13}C 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 ^{13}C labeling technique[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(4): 790-793.
- [27] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant-derived carbon to soil microbial biomass dynamics in a paddy rice microcosm[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **36**(2): 136-142.
- [28] Liang B C, Wang X L, Ma B L. Maize root-induced change in soil organic carbon pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(3): 845-847.
- [29] 张林海, 曾从盛, 胡伟芳. 氮输入对植物光合固碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2017, **37**(1): 147-155.
- Zhang L H, Zeng C S, Hu W F. Reviews on effects of nitrogen addition on plant photosynthetic carbon fixation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(1): 147-155.
- [30] 陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 等. 秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1613-1621.
- Chen S, Ding X Q, Zhu Z K, *et al.* Effect of straw application on the dynamic of exogenous nitrogen and microbial activity in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1613-1621.
- [31] 梁国鹏, Houssou A A, 吴会军, 等. 施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(6): 1917-1924.
- Liang G P, Houssou A A, Wu H J, *et al.* Soil nitrogen content

- and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere of summer maize under different nitrogen application rates [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27** (6): 1917-1924.
- [32] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22** (1): 18-24.
- Li Y K, Chen M P, Xia X, *et al.* Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22** (1): 18-24.
- [33] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 等. 作物生育期内光合碳在地下部的分配及转化[J]. 生态学杂志, 2008, **27** (8): 1393-1399.
- Jin J, Wang G H, Liu X B, *et al.* Allocation and transformation of photosynthetic carbon in belowground part of crops during their growth period: a review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, **27** (8): 1393-1399.
- [34] 魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 等. 水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应[J]. 环境科学, 2017, **38** (8): 3489-3496.
- Wei L, Tang Z Z, Zhu Z K, *et al.* Responses of extracellular enzymes to nitrogen application in rice of various ages with rhizosphere and bulk soil [J]. Environmental Science, 2017, **38** (8): 3489-3496.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017年10月31日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2016年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次10 024,影响因子1.878,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

环境科学

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)