

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu²⁺ 研究 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

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 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H₂S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

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

谭立敏^{1,2}, 吴昊^{1,2}, 李卉^{1,3}, 周萍¹, 李科林², 王久荣¹, 葛体达¹, 袁红朝^{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. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004; 3. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要: 应用稳定同位素¹³C-CO₂ 连续标记技术, 通过室内密闭培养试验研究不同施氮处理下(依次为 N0, N10, N20, N40, N60) 水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配特征。结果表明, 连续标记培养 18 d 后, 水稻地上部和根系的干物质累积量分别为 1.58 ~ 4.35 g·plot⁻¹ 和 1.05 ~ 2.44 g·plot⁻¹, 水稻植株生物量受施氮处理显著影响, 且随着施氮量增加而增加, 即 N60 > N40 > N20 > N10 > N0。水稻整个分蘖期内分别有 44.0 ~ 157.6 g·plot⁻¹ 和 8.3 ~ 49.4 g·plot⁻¹ 的光合碳进入水稻地上部和根系。不同施氮水平下, 种植水稻的土壤有机碳(¹³C-SOC)、可溶性有机碳(¹³C-DOC)和微生物量碳(¹³C-MBC)的分配量均显著高于 CK 处理(不种植水稻且不施 N)。种植水稻的土壤¹³C-SOC 含量范围为 11.1 ~ 23.7 g·plot⁻¹, 占总净同化量的 10.2% ~ 18.1%。对于活性碳库, CK 处理的土壤¹³C-DOC 和¹³C-MBC 含量分别为 3.50 μg·kg⁻¹ 和 88.9 μg·kg⁻¹, 种植水稻处理的土壤¹³C-DOC、¹³C-MBC 含量范围为 4.82 ~ 14.51 μg·kg⁻¹、526.1 ~ 1478.8 μg·kg⁻¹。土壤¹³C-SOC、¹³C-DOC 和¹³C-MBC 含量受施氮处理显著影响($P < 0.05$), 且与植物生物量呈显著正相关关系。因此, 水稻分蘖期光合碳的地下部输入有利于土壤有机碳的累积, 施氮能够促进水稻新鲜根际碳的沉积, 且高 N 水平下根际沉积碳量高于低 N 和中量 N 水平。

关键词: ¹³C 标记; 水稻光合碳; 分蘖期; 土壤有机碳; 施 N 水平; 土壤微生物生物量碳; 土壤可溶性有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1933-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.05.043

Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³C Labeling

TAN Li-min^{1,2}, WU Hao^{1,2}, LI Hui^{1,3}, ZHOU Ping¹, LI Ke-lin², WANG Jiu-rong¹, GE Ti-da¹, YUAN Hong-zhao¹, WU Jin-shui¹

(1. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The input of rice-photosynthesized carbon (C) into soil plays an important role in soil C cycling. A ¹³C-labelled microcosm experiment was carried out to quantify the input of photosynthesized C into soil C pools in a rice-soil system during the tillering stage. Growing rice (*Oryza sativa* L.) was continuously fed with ¹³C-labeled CO₂ (¹³C-CO₂) in a closed chamber without nitrogen (N0), or at different rates of N supply (N10, N20, N30, N40 or N60). The results showed that there were significant differences in rice shoot (1.58 g·plot⁻¹ to 4.35 g·plot⁻¹) and root (1.05 g·plot⁻¹ to 2.44 g·plot⁻¹) biomass among the N treatments after labeling for 18 days. The amounts of ¹³C in shoots and roots ranged from 44.0 g·plot⁻¹ to 157.6 g·plot⁻¹ and 8.3 g·plot⁻¹ to 49.4 g·plot⁻¹, respectively, and generally followed the order of N60 > N40 > N20 > N10 > N0. The contents of rice-planted ¹³C-SOC, ¹³C-DOC and ¹³C-MBC in soil carbon pool were much higher than those of CK (without rice and N supply). The amount of ¹³C-SOC ranged from 11.1 g·plot⁻¹ to 23.7 g·plot⁻¹, depending on the rate of N addition, accounting for 10.2% - 18.1% of the net assimilation. The amounts of ¹³C-DOC and ¹³C-MBC ranged from 4.82 - 14.51 μg·kg⁻¹ and 526.1 - 1478.8 μg·kg⁻¹, both depending on the N application rate. In addition, at 18-day of labeling, the ¹³C-SOC, ¹³C-DOC and ¹³C-MBC concentration was positively correlated with the rice biomass. Therefore, our results suggest that paddy soils can probably sequester more C from the atmosphere if more photosynthesized C enters the soils and N application can stimulate C rhizodeposition during the tillering stage.

Key words: ¹³C labeling; rice photosynthesized C; tillering stage; soil organic carbon; N application rates; soil microbial biomass carbon; soil dissolved carbon

收稿日期: 2013-09-12; 修订日期: 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41090283, 41301275); 中国科学院仪器功能开发项目(Y323018010); 湖南省国际与区域科技合作重点项目(2013WK4009); 湖湘青年创新创业平台入台培养对象项目

作者简介: 谭立敏(1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态环境, E-mail: gtd@isa.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: mailxz@163.com

植物光合产物(通过根系沉积的方式)进入土体,能够改变土壤有机碳的组成及性质(含量和组成),土壤有机碳的储量巨大,其在地下分布的微小变化都会影响全球 C 循环^[1,2]. 大量研究表明,稻田生态系统具有较强的固碳潜力,对于缓解大气 CO₂ 的上升有重要作用^[3,4]. 因此研究稻田生态系统内水稻-土壤整个系统的碳分配和转运过程,量化水稻根际输入光合碳对土壤有机碳及其组分的影响,对于进一步了解稻田生态系统碳循环与环境生态具有重要的意义.

氮(N)肥是作物从土壤中吸收量最多的元素,对作物的生命活动和产量形成具有重要的意义. 研究表明不合理施用不仅会严重影响水稻产量,而且过量施氮会导致氨挥发、反硝化、淋失等一系列氮素损失^[5],从而引起环境污染. 碳氮是土壤养分中的重要指标,一般情况下,有机碳和全氮之间存在显著的耦合关系^[6]. 目前对于施氮处理对植物光合碳在植株-土壤中的分配、转化及去向影响的研究结果不尽相同. 潘根兴等^[7]对太湖地区一个长期肥料试验稻田的研究表明,不同施肥对稻田土壤有机碳的含量、形态分布及温室气体的产生和释放有着重要的影响. 杨兰芳等^[8]指出施氮对土壤有机质更新有显著的影响. 齐鑫等^[9]通过室内冬小麦盆栽试验,发现不同施氮处理下低氮水平能增进植物光合碳向地下部的输入,增加土壤碳的累积. 而曾骏等^[10]的研究则指出长期施用氮肥对灌漠土的 SOC、DOC 和 MBC 无明显差异. 国内外多以玉米、小麦等旱地作物作为研究材料,研究不同施肥处理对作物-土壤系统肥利用率、碳的迁移和转化过程,但在水稻上的相关研究较少.

我国稻田面积为 340 多万 hm²,以其淹水或者干湿交替的特殊田间水分管理方式而显著区别于旱地土壤,是目前农田生态系统中受人为干扰最大,最活跃的碳库之一^[2]. 而不同的氮肥处理下,水稻光合碳在土壤碳库中分配及转化特征尚不清楚,有待进一步研究. 稳定同位素¹³C 标记示踪是研究植物根系碳沉积在土壤碳库中的分配与转化较灵敏的方法,已被广泛用于根际生态过程中土壤有机碳输入、输出的研究^[11~14]. 因此,本研究应用¹³C 标记示踪技术,密闭系统模拟研究不同施氮处理下水稻光合碳在土壤碳库中的分配及转化特征,以期为我国稻田土壤科学施肥和深入了解陆地生态系统碳循环过程提供理论依据和数据支持.

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤为典型红壤,采自中国科学院长沙农业环境观测研究站,采样时间为 2013 年 4 月. 土壤的 pH(H₂O)为 5.56,有机碳含量 18.1 g·kg⁻¹,全氮含量 1.8 g·kg⁻¹. 供试植物为水稻(粘性常规水稻中早 39).

1.2 方法

1.2.1 水稻¹³C-CO₂ 连续培养

土壤样品除去可见植物残体,混匀分装于盆钵(直径 17.2 cm,高 16.7 cm)中,每盆装入量相当于烘干重 2.00 kg 土壤,均匀喷施 NaH₂PO₄ 和 KCl 混合溶液,施入量分别为 20 mg·kg⁻¹和 80 mg·kg⁻¹. 根据当地早稻季的推荐施肥量(以纯氮计)为 10 kg·(667 m²)⁻¹,因此,试验设置 6 个处理 CK、N0、N10、N20、N40 和 N60. CK 不种植水稻和不施 N,作为空盆对照,其它处理种植水稻,且处理 N 水平依次为 0、10、20、40 和 60 mg·kg⁻¹. N 水平用 (NH₄)₂SO₄ 调节,每个处理 3 个重复.

培养装置和方法参考肖和艾等^[15]建立的研究方法. 2013 年 4 月 28 日将培育 30 d 的水稻秧苗移栽至盆中,并将其置于阳光充足、通风良好的空地. 生长期间用去离子水浇灌,以保持盆中土壤表层以上 3 cm 的水层为准,并及时除草. 5 月 14 日将生长至 6 叶期的水稻幼苗放入¹³C-CO₂ 标记培养的封闭箱体内,箱体壁上安装 1 个高度为 50~80 cm 高的玻璃弯管式压力计,压力计一端穿过箱壁与箱内连通,另一端置于箱外与大气连通,压力计弯管内装液体石蜡,用于观察箱内压力变化来检查箱体的气密性. 标记期间,箱子置于光照充足无遮挡的户外. 箱内¹³C-CO₂ 由 1 mol·L⁻¹ 的 80 mL ¹³C-NaHCO₃ (丰度为 99% 的¹³C-NaHCO₃) 缓慢匀速滴入 85 mL 1 mol·L⁻¹ HCl(保证反应完全)反应产生,此过程在每天的 09:00~13:00 内完成,培养箱内 CO₂ 浓度控制在 (350~370) × 10⁻⁶ [二氧化碳检测系统(Shsen-QZD,青岛)],温度控制在 24~32℃(智能型精密数显温度控制器,SNT-96S,杭州). 标记期间,每隔 2 d 在傍晚(此时光合作用最弱)开箱浇水,并及时除草. 5 月 31 日标记完毕,共计标记 18 d,对水稻整个分蘖期进行标记.

与此同时,将不标记的上述不同氮素处理的水稻作为对照,并放置于离标记培养箱 10 m 以上的区

域,以用来测定植株、土壤 ^{13}C 的自然丰度。

1.2.2 测定和分析方法

土壤有机碳和植物的 ^{13}C 丰度: 试验结束后,立即剪除秧苗,并尽快将根和土分离,去除附在根上的土。根和秧苗洗净沥干后,置于烘箱中,先在 105°C 下杀青 30 min,杀青后的植物与土壤样品放置于透气性好且耐一定高温的取样袋中,在 $60\sim 70^\circ\text{C}$ 的干燥箱内干燥 24~48 h,烘干后的样品磨碎并过 0.149 mm 筛,备用。

土壤活性碳库(DOC、MBC)的 ^{13}C 丰度: 土壤 DOC 含量的测定如下,称取 20.00 g 新鲜土样,加入 60 mL $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液,振荡($300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)提取 30 min,提取液中有有机碳含量采用碳自动分析仪(Phoenix 8000)测定。土壤 MBC 含量采用熏蒸提取-碳自动分析法测定^[16,17]。称取新鲜土样 20.00 g,在真空干燥器内用氯仿熏蒸(24 h),然后除去氯仿并立即加入 60 mL $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液振荡($300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)30 min 后浸提(不熏蒸对照同 DOC 测定)。取 15.00 mL 提取液与 15.00 mL 2% 六偏磷酸钠混匀后用碳自动分析仪(Phoenix 8000)测定提取的有机碳。以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机碳的差值乘以转换系数 K_c (2.22) 计算土壤 MBC 含量。提取液中的 ^{13}C 含量则取 5 mL 提取液于 10 mL 离心管中,置于离心浓缩仪(Christ 2-25 CD plus)浓缩,待完全干燥后,密封备用。

上述各类样品的 ^{13}C 丰度以及植物和土壤的总碳含量分别在 MAT253 型同位素比率质谱仪(美国热电公司)中测定。

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^[11]:

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

式中, $^{13}\text{C}_{\text{样品}}$ 表示样品中 ^{13}C 含量,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;TC_{样品}表示样品中总碳的含量。

1.3 统计分析

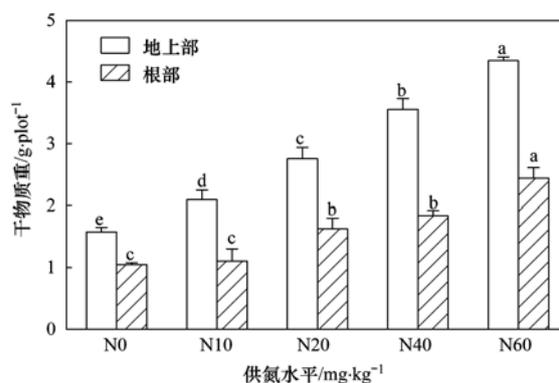
所有测定结果均为 3 次重复的平均值,所得数据采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行处理与统计分析。不同处理差异显著性用 One-way ANOVA (单因素方差分析)检验,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 水稻地上部和根系生物量

不同施氮水平下,水稻地上部和根系干物质量

随施 N 量的增加而增加(图 1)。不施氮处理的水稻根系干重 $1.05\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,地上部干重 $1.58\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$ 。与不施氮相比,在 10、20、40 和 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的施氮处理下,水稻植株呈现不同程度的增长,氮肥对植株生长的促进作用明显,且施氮量越高,促进作用越显著。33 d 的生长期,在不施氮处理下,地上部增长幅度 $0.52\sim 2.77\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,根系增长幅度为 $0.05\sim 0.94\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,在 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的高氮处理下,水稻根系和地上部干重分别达到 $2.44\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$ 和 $4.35\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,与不施氮相比,植株生长率增加了 2~3 倍。



图中误差线为 SE 值,下同

图 1 不同氮肥对水稻地上部和根部干重的影响

Fig. 1 Effect of different N application rate on rice shoot and root biomass during the tillering stage

2.2 不同施氮处理下 ^{13}C 在水稻-土壤系统中的分配

水稻植株通过光合作用合成的有机碳通过茎中的韧皮部传递至根系,通过根系沉积作用进入土壤(根际碳沉积)。在水稻-土壤系统中,植株的 ^{13}C 含量所占比例最大。18d $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 连续标记后,水稻根系中 ^{13}C 含量范围为 $8.3\sim 49.4\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,水稻地上部 ^{13}C 含量为 $44.0\sim 157.6\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,变化趋势均随着施氮量的增加而增加(表 1)。 ^{13}C -根系和 ^{13}C -地上部在水稻-土壤系统中所占比例分别为 11.8%~21.4% 和 68.0%~71.4%。

水稻生长过程中通过根际沉积作用将一部分光合产物分配到土壤中,影响土壤有机碳及其组分的变化。土壤中 ^{13}C 含量在整个水稻-土壤系统中约占 10%~20%,其中 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮处理的比例最高,为 18.1%,相反最大施氮量(N60)处理的比例最小,为 10.2%。18 d $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 连续标记后,不同施氮处理下种植水稻的土壤中有有机碳($^{13}\text{C}\text{-SOC}$)含量及植株中 ^{13}C 含量见表 1。种植水稻处理的 $^{13}\text{C}\text{-SOC}$ 含量范围为 $11.1\sim 23.7\text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,且随着施氮量的增加而增

加;不施氮处理的值最小,为 11.1 g·plot⁻¹;施氮处理下为最大,为 23.7 g·plot⁻¹. 与 CK 处理的土壤¹³C-SOC 含量 3.07 g·plot⁻¹比较,水稻光合碳的输入

有利于土壤有机碳的累积. 从整个水稻-土壤系统来看,¹³C含量范围 63.4 ~ 230.7 g·plot⁻¹,且随着施氮量增加而增加.

表 1 ¹³C-CO₂ 连续标记 18 d 后不同施氮量下¹³C在水稻-土壤系统中的分配/g·plot⁻¹

项目	¹³ C-SOC	¹³ C-Root	¹³ C-Shoot	各部分同化碳的分配比例/%		
				¹³ C-SOC	¹³ C-Root	¹³ C-Shoot
CK	3.07 ± 0.16e	—	—	—	—	—
N0	11.1 ± 0.5d	8.3 ± 0.8e	44.0 ± 4.1e	17.63 ± 1.53a	13.29 ± 1.76c	69.07 ± 3.05a
N10	13.4 ± 0.9c	12.8 ± 2.3d	65.5 ± 8.4d	14.75 ± 1.04b	14.06 ± 0.56c	71.19 ± 3.52a
N20	23.8 ± 0.8b	15.5 ± 1.8c	91.9 ± 9.8c	18.29 ± 1.17a	11.87 ± 1.44d	69.84 ± 2.37a
N40	25.3 ± 1.6b	26.0 ± 0.5b	107.4 ± 5.8b	15.95 ± 0.65b	16.42 ± 0.46b	67.64 ± 0.85a
N60	23.7 ± 0.3a	49.4 ± 7.1a	157.6 ± 5.5a	10.34 ± 0.46c	21.24 ± 2.11a	68.42 ± 1.64a

2.3 不同施氮处理下水稻光合碳向土壤活性碳库的输入

不同施氮处理下,水稻光合碳向土壤活性碳库的输入差异显著(图 2). CK 处理土壤¹³C-DOC 和¹³C-MBC 含量最低,为 3.5 μg·kg⁻¹和 88.9

μg·kg⁻¹,种植水稻增加了土壤活性碳库的含量. 随着施氮量的增加,¹³C-DOC 和¹³C-MBC 均增加,相对于 CK,¹³C-DOC 的增加幅度为 1.32 ~ 9.69 μg·kg⁻¹,¹³C-MBC 的增加幅度为 437.2 ~ 1 389.9 μg·kg⁻¹.

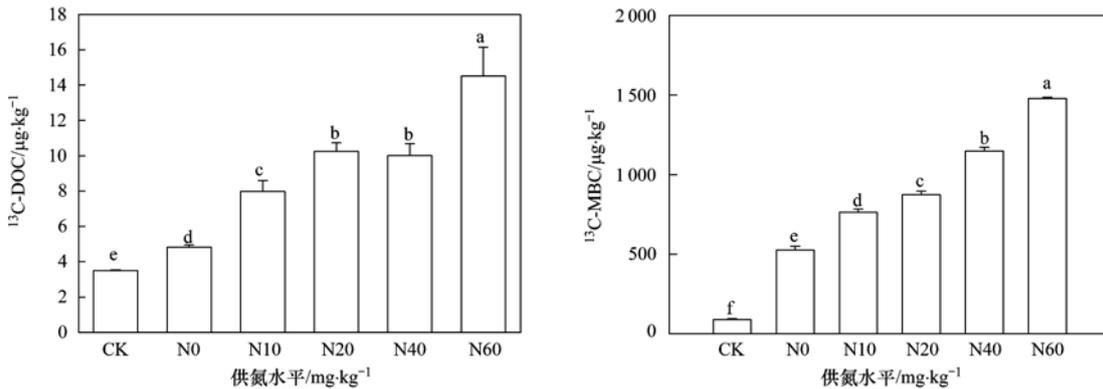


图 2 ¹³C-CO₂ 连续标记 18 d 后不同施氮量下水稻光合碳向土壤活性碳库的输入

Fig. 2 Input of rice photosynthesized carbon to soil activated carbon pool under different N application amounts after ¹³C-CO₂ 18-day-labeling

2.4 水稻生物量与土壤¹³C-SOC、¹³C-DOC、¹³C-MBC 含量的关系

不同施氮处理下,水稻生物量与土壤有机碳含量和土壤活性碳库的含量存在显著的线性相关关系(表 2),其对土壤活性碳库的影响要比对土壤有机碳的影响较大,水稻生物量和¹³C-SOC 之间的关系为

0.852,其斜率为 3.54,而和¹³C-DOC、¹³C-MBC 的关系分别为 0.950 和 0.985,其斜率分别为 4.01,432.5. 且其对土壤活性碳库的影响要比对土壤有机碳的影响大. 同时土壤有机碳含量与土壤活性碳库的¹³C-DOC、¹³C-MBC 也存在着显著的线性相关关系.

表 2 水稻生物量与土壤¹³C-SOC、¹³C-DOC、¹³C-MBC 含量的相关关系

Table 2 Relationship among rice biomass and the contents of ¹³ C-SOC, ¹³ C-DOC and ¹³ C-MBC				
	生物量	¹³ C-SOC	¹³ C-DOC	¹³ C-MBC
生物量	1			
¹³ C-SOC	0.852 **	1		
¹³ C-DOC	0.950 **	0.805 **	1	
¹³ C-MBC	0.989 **	0.795 **	0.954 **	1

3 讨论

3.1 水稻生物量与土壤有机碳的累积和输入

在整个水稻培养期内,植株生物量随着施氮量的增加而增加(图 1),这表明氮肥促进了植株生长,增加了植株的生长速率. 水稻生长加快,其叶片扩大,根系扩张,使得植株的光合作用加强、从土壤中吸收的养分增多,氮肥的利用效率增高,这与韦正

宝^[18]的研究结果一致,水稻的分蘖中后期,水稻的株高和苗数均随着施氮量的增加而增加。

在本试验中,不施氮处理下,种植水稻后¹³C-SOC 比不种植水稻的¹³C-SOC 增加了 $8.03 \text{ g}\cdot\text{plot}^{-1}$,说明植物光合碳地下输入能显著增加土壤有机碳的累积。在通常自然植被条件下,土壤有机碳主要来源于土壤地上部生长的植物残体和根际分泌物。有研究发现一般情况下在植物生长期间,其光合产物的 10%~40% 通过根际分泌作用进入土体^[19,20],但是只有一部分通过根际沉积作用转化为土壤有机碳。Hütsch 等^[21]在总结前人研究的基础上,指出不同植物在生长期向地下分配的光合碳量不同,最高的可达 20%,其中又有近 64%~86% 的被土壤呼吸了,而仅有 2%~5% 被转化为稳定的土壤有机碳。本研究发现在对水稻生长旺盛阶段进行标记 18 d 后,施氮量显著影响了¹³C 在水稻-土壤系统中的输入和分配特征,与 CK 相比,¹³C 在土壤-根系-地上部中的量随着施氮量的增加而增加,这表明氮肥不仅促进植株的生长,还促进了光合同化碳的向地下部转运。这和李银坤等^[22]的研究相符,他们指出施氮能增加夏玉米农田的净光合碳输入,且此值随施氮量增大而增大。Lawlor 等^[23]研究表明在氮素充足的情况下,植物基因蛋白较丰富,每单位氮素能够吸收同化更多的碳,从而增加植株生物量及碳在植株体内的积累。另外,水稻地上部的¹³C 含量均显著大于地下部和土壤,而且,土壤、根系和地上部中的¹³C 含量分别在水稻-土壤系统中占的比例基本一致,均为 15%、15% 和 70%,这和 Lu 等^[11]的水稻生长初期标记的多数的同化¹³C 保留在地上部分,小部分的同化¹³C 出现在地下的结果一致,这可能是由于水稻幼苗具有较快的生长速率,从而具有较强的 C 汇能力。

3.2 水稻光合碳向土壤活性碳库的输入

土壤 DOC 和土壤 MBC 是土壤活性碳库中新碳的主要归宿,与土壤呼吸释放 CO_2 、 CH_4 有着密切的关系^[14,24]。Kuzyakov 等^[25]应用¹⁴C 脉冲标记技术研究了黑麦草光合产物的分配和转化,得到输入土壤的光合碳约有 50% 为活性有机组分。本试验中不施氮处理下,种植水稻的土壤 DOC 含量比不种植的高出 1.4 倍,这和 Lu 等^[26]研究一致,他们指出水稻种植影响土壤 DOC 含量,在种植水稻的土壤中,DOC 含量高于没有种植水稻土壤 3 倍。这可能是由于土壤种植后,可溶性根分泌物增加,从而使 DOC 增加。而在施氮处理下,¹³C-DOC 相对于不施氮处理

的增加幅度为 $1.32 \sim 9.69 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2),这说明土壤中的 DOC 含量不仅与种植水稻与否有关,还受氮肥施用量的影响。有研究指出^[27,28]施肥能增加耕作层土壤活性有机碳库的含量。分析可能有两原因导致:一是由于氮肥促进作物的生长和光合作用,根系活跃,根系输入到土壤的有机碳增多,土壤的 DOC 被根部释放的有机碳丰富;二是耕作层的土壤呼吸增强,使得可溶性有机碳在土壤溶液中有更多的溶出。对于 MBC,种植水稻和施氮对其的影响程度要比 DOC 的更加明显。研究中,不施氮处理下种植水稻土壤的¹³C-MBC 含量相对于 CK 增加了 5 倍;施加氮肥后,N10 和 N0 相比增加不甚明显,而 N60 相对于 N0 则增加了 $952.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。种植水稻后,水稻的根系分泌物包括高分子多聚糖(黏胶物质)、各种蛋白酶、低分子有机酸及糖、酚类、维生素等^[29,30]为根际微生物的生长提供了所需的碳源和能源,促进了微生物的活性,从而影响土壤微生物生物量碳的含量。而施氮则是相当于为土壤中自养微生物(如硝化细菌)提供更多的 N 源,促使其合成腐殖质和转化营养物质的活动加快,被利用的光合同化¹³C 增多。另外,研究中施低量氮肥 ($10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 后,土壤 MBC 的增加不显著,而在施氮量达到 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后,MBC 显著增加,为不施氮处理下的 2 倍。罗兰芳等^[31]研究表明,控释氮肥下水稻生育中期的土壤微生物量碳呈下降趋势,这可能与土壤性质、标记时期等因素有关。此外,不同施氮水平下,水稻生物量与土壤有机碳、活性碳有显著的相关关系,且水稻生物量对土壤活性碳库的影响最大,这与聂三安等^[32]的研究结果一致,水稻光合碳的分配和转化对土壤活性碳组分的 DOC、MBC 含量变化影响较大,而对土壤有机碳影响较小。

因此,通过上述的¹³C 同位素连续标记技术,基本明确了水稻分蘖期光合碳在地上与地下不同碳库分配的量化特征;量化了水稻光合碳对土壤活性碳库(DOC, MBC)的贡献;该研究为全面理解水稻光合碳在“作物-土壤-微生物”系统碳分配和转化过程提供了理论基础。

4 结论

施氮能促进水稻植株生长并促进根际碳沉积,且高 N 水平 ($60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 下根际沉积碳量高于低 N ($10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和中量 N ($20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 水平,从而进一步影响了光合同化碳在土壤碳库各组分中的转化和分配。然而,本试验仅选取了水稻分蘖期一个

生育期,故对于水稻全生育期内光合碳在水稻-土壤系统的中的输入和分配及其对施氮量的响应有待进一步的研究.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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**: 39-49.
- [3] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(15): 1785-1803.
- [4] 刘守龙,童成立,吴金水,等. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SCNC 模型检验[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(5): 1228-1233.
- [5] 徐明岗,孙小丰,邹长明,等. 稻田控释氮肥的施用效果与合理施用技术[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(4): 487-493.
- [6] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [7] 潘根兴,周萍,张旭辉,等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响——以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. 生态学报, 2006, **26**(11): 3704-3710.
- [8] 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.
- [9] 齐鑫,王敬国. 应用¹³C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.
- [10] 曾骏,董博,张东伟,等. 不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳、无机碳和微生物量碳的影响[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(2): 35-38.
- [11] 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): 321-328.
- [12] 何敏毅,孟凡乔,史雅娟,等. 用¹³C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.
- [13] 杨兰芳,蔡祖聪,祁玉华. 玉米生长和光合作用对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(3): 1072-1078.
- [14] 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.
- [15] 肖和艾,吴金水,李玲,等. 采用¹⁴C 同位素标记植物的装置与方法[J]. 核农学报, 2007, **21**(6): 630-632.
- [16] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction--an automated procedure [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [17] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006. 57-60.
- [18] 韦正宝. 不同控释氮肥用量对早稻生长性状及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2011, **42**(4): 388-390.
- [19] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere [J]. Plant and Soil, 1990, **129**(1): 1-10.
- [20] Kaštovská E, Šantrůčková H. Fate and dynamics of recently fixed C in pasture plant-soil system under field conditions [J]. Plant and Soil, 2007, **300**(1-2): 61-69.
- [21] Hütsch B W, Augustin J, Merbach W. Plant rhizodeposition-an important source for carbon turnover in soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, **165**(4): 397-407.
- [22] 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.
- [23] Lawlor D W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production systems [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, **53**(370): 773-787.
- [24] Amiotte-Suchet P, Linglois N, Leveque J, *et al.* ¹³C composition of dissolved organic carbon in upland forested catchments of the Morvan Mountains (France): Influence of coniferous and deciduous vegetation [J]. Journal of Hydrology, 2007, **335**(3): 354-363.
- [25] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne* [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, **33**(1): 61-74.
- [26] 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.
- [27] 袁颖红,李辉信,黄欠如,等. 长期施肥对红壤性水稻土活性碳的影响[J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 554-559.
- [28] 曾骏,郭天文,于显枫,等. 长期施肥对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2011, **42**(4): 812-815.
- [29] Kumar R, Pandey S, Pandey A. Plant roots and carbon sequestration [J]. Current Science, 2006, **91**: 885-890.
- [30] Jones D L, Nguyen C, Finlay R D. Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface [J]. Plant and Soil, 2009, **321**(1-2): 5-33.
- [31] 罗兰芳,聂军,郑圣先. 施用控释氮肥对稻田土壤微生物生物量碳、氮的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(11): 2925-2932.
- [32] 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.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seafood from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行