

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO ₂ 的来源	刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)
广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映	廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性	于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)
白马泉风景区夏季大气 PM _{2.5} 中二次有机物的初步研究	代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性	乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究	王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨	薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价	郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析	黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究	崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)
春季盘溪水质日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究	肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价	郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究	徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验	王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征	李振伟, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性	李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析	张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价	敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价	刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算	姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析	赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究	潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中的随水迁移特征	邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究	田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)
新生态铁的混凝作用探索	杨雪, 张景成, 关小红 (1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究	岳婵媛, 缪恒峰, 任洪艳, 阮文权 (1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究	王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究	秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯玺 (1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物	张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)
掺氮 Ta ₂ O ₅ 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究	赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)
O ₃ /H ₂ O ₂ 降解水中扑灭通效能研究	李绍峰, 孙楚 (1260)
Pr-N 共掺杂 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿动力学	沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究	张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)
聚合铝铁对 A ² /O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响	温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响	张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响	李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究	王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析	李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)
利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌	王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究	于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)
1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究	陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)
氨氮对稀有鮕鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究	王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响	孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响	王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C连续标记法	聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析	王坚, 张旭, 李广贺 (1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究	孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究	黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响	马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)
基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究	袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式	兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化	方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析	杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)
《环境科学》征订启事 (1062) 《环境科学》征稿简则 (1107) 信息 (1135, 1215, 1396)	

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

聂三安^{1,2}, 周萍¹, 葛体达^{1*}, 童成立¹, 肖和艾¹, 吴金水¹, 张杨珠²

(1. 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; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 应用¹⁴C连续标记示踪技术,以当地主栽水稻品种“中优169”为供试作物,分别选取亚热带区4种典型稻田土壤,在密闭系统模拟研究水稻根际输入光合碳对土壤有机碳(SOC)及其组分的影响。结果表明,标记种植80 d后,水稻地上部和地下部的累积的总碳量范围分别为1.86~5.60 g·pot⁻¹和0.46~0.78 g·pot⁻¹。种植水稻后供试土壤的¹⁴C-SOC含量范围为114.3~348.2 mg·kg⁻¹,而¹⁴C-DOC、¹⁴C-MBC含量范围为4.05~8.65 mg·kg⁻¹、12.5~37.6 mg·kg⁻¹。水稻生长期间内,不同土壤条件下,土壤¹⁴C-SOC与¹⁴C-水稻碳量的比率范围为5.09%~6.62%,这说明尽管不同土壤的光合生产能力不同,但根际沉积效率相似。土壤可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)和SOC的更新率分别为6.72%~14.64%、1.70%~7.67%和0.73%~1.99%。而且,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。本研究进一步量化了水稻生长期间光合碳对土壤有机碳库各组分(SOC、DOC和MBC)的贡献,为水稻土有机质积累持续机制与固碳潜力研究提供了数据支撑。

关键词: 水稻; 光合同化碳; 根际沉积; 土壤有机碳; ¹⁴C连续标记

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1346-06

Quantifying Rice (*Oryza sativa* L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴C Labeling

NIE San-an^{1,2}, ZHOU Ping¹, GE Ti-da¹, TONG Cheng-li¹, XIAO He-ai¹, WU Jin-shui¹, ZHANG Yang-zhu²

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The microcosm experiment was carried out to quantify the input and distribution of photo-assimilated C into soil C pools by using a ¹⁴C continuous labeling technique. Destructive samplings of rice (*Oryza sativa*) were conducted after labeling for 80 days. The allocation of ¹⁴C-labeled photosynthates in plants and soil C pools such as dissolved organic C (DOC) and microbial biomass C (MBC) in rice-planted soil were examined over the ¹⁴C labeling span. The amounts of rice shoot and root biomass C was ranged from 1.86 to 5.60 g·pot⁻¹, 0.46 to 0.78 g·pot⁻¹ in different tested paddy soils after labeling for 80 days, respectively. The amount of ¹⁴C in the soil organic C (¹⁴C-SOC) was also dependent on the soils, ranged from 114.3 to 348.2 mg·kg⁻¹, accounting for 5.09% to 6.62% of the rice biomass ¹⁴C, respectively. The amounts of ¹⁴C in the dissolved organic C (¹⁴C-DOC) and in the microbial biomass C (¹⁴C-MBC), as proportions of ¹⁴C-SOC, were 2.21%-3.54% and 9.72%-17.92%, respectively. The ¹⁴C-DOC, ¹⁴C-MBC, and ¹⁴C-SOC as proportions of total DOC, MBC, and SOC, respectively, were 6.72%-14.64%, 1.70%-7.67%, and 0.73%-1.99%, respectively. Moreover, the distribution and transformation of root-derived C had a greater influence on the dynamics of DOC and MBC than on the dynamics of SOC. Further studies are required to ascertain the functional significance of soil microorganisms (such as C-sequestering bacteria and photosynthetic bacteria) in the paddy system.

Key words: rice (*Oryza sativa*); photo-assimilated carbon; rhizodeposition; soil organic carbon; ¹⁴C continuous labeling

植物光合产物(通过根系沉积作用)进入土体,能够改变土壤有机碳的组成及性质,其在地下分布的微小变化都会影响全球碳循环^[1,2]。大量研究表明,稻田生态系统具有较强的固碳功能,对于缓解大气CO₂的上升有重要作用^[3]。因此研究稻田生态系统内水稻-土壤之间的碳分配和转化过程,量化水稻根际输入光合同化碳对土壤有机碳库及其组分的影响,对于深入了解稻田生态系统碳循环具有重要

意义。

碳同位素(¹⁴C和¹³C)示踪是研究植物根系分泌

收稿日期: 2011-06-03; 修订日期: 2011-08-01

基金项目: 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目(KZCX2-YW-T07, 20100491005-8); 国家自然科学基金项目(41090283, 40901124); 中国科学院海外特聘研究员项目(2009Z2-10)

作者简介: 聂三安(1984~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态环境, E-mail: nsa0804@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gtd@isa.ac.cn

碳在土壤中分解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^[4,5]. 杨兰芳等^[6]采用同位素质谱法研究了玉米生长和光合作用对土壤呼吸¹³C自然丰度值的影响,结果表明,玉米生长和光合作用显著影响土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,在玉米生长期,土壤呼吸主要来自于新近合成的光合产物. Liang 等^[7]应用¹³C示踪技术研究盆栽玉米根际新沉积碳在土壤活性炭库中的分布,发现根际碳输入的主要贡献在于改变了土壤有机碳组分的含量,特别是水溶性有机碳和土壤微生物量碳(MBC)的含量. 可见,植物光合同化碳的输入与土壤碳库之间关系密切. 已有研究表明光合同化碳的输入并不仅仅影响土壤有机碳及其组分的变化^[8],其中有部分根际分泌物又被植物根际吸收利用,维持根系的生长^[9,10],一部分供根际呼吸消耗,产生 CO_2 ^[11]. 但是目前对于这几部分植物光合同化碳去向的量化研究方面,研究结果并不一致. Högberg 等^[12]研究指出北极松树分配到土壤中的光合碳 75% 被用于根际呼吸,25% 被松树自身利用,而没有涉及到转化为土壤有机碳的比例. Nguyen^[13]指出黑麦草根际输入的光合碳被根际呼吸和土壤残留的比例为 12:5. 因此为了进一步了解地下生态过程,仍然需要对土壤-植物系统的碳过程进行深入的研究.

国内外常以玉米、小麦等旱地作物作为同位素标记材料来研究作物-土壤系统碳的迁移和转化过程,而对水稻根际输入的光合同化碳对土壤有机碳的影响报道较少. 我国是世界上水稻总产量最高的

国家,稻田面积占全球稻田面积的 15%,大部分人口又以稻米为主食. 因此,本研究选取亚热带 4 个典型稻田土壤,在微宇宙(microcosm)密闭系统内应用碳同位素(¹⁴C- CO_2)连续标记技术,探讨水稻光合同化碳的输入及其在不同碳库中的分配,量化水稻光合同化碳的分配、转化及其向地下的输入规律,以期稻田生态系统地下部碳循环过程研究提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤及前处理

试验选取亚热带地区 4 种典型水稻土耕作层(0~20 cm)土壤,分别采自湖南省长沙市城郊(P1)、常德市(P2)、宁乡县(P3)和长沙县(P4)4 个地区(29°10'~29°18'N-111°28'~111°35'E). 该地区属典型亚热带典型湿润气候,年均气温 16.8℃,降水量 1 400 mm. 土壤均用直径为 5 cm 的不锈钢土钻采集. 运回实验室后的土壤样品取 1 kg 室内风干,分别过 0.25 mm 和 0.149 mm 筛,用于测定土壤基本理化性质. 另取 1 kg 新鲜土置于 4℃ 冰箱中,用于测定可溶性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC). 剩余土壤均匀地喷施 NaH_2PO_4 和 KCl 混合液,施入的 N、P、K 量分别为 20、20 和 80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,然后用蒸馏水调节含水量至饱和田间持水量,将土壤混匀分装于 PVC 盆钵中,装入量每钵相当于烘干重 1.00 kg 的土壤. 试验盆钵是用 PVC 材料做成的高 20 cm,直径 10 cm 的圆柱形盆钵. 供试土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Characteristics of the paddy soil used in this study

土壤	土壤质地	全碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碳氮比 (C:N)	pH ¹⁾	阳离子交换量 (CEC) / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	可溶性碳 (DOC) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	微生物量碳 (MBC) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
P1	壤土	14.6	1.6	9.4	5.21	6.2	30.8	1 229.5
P2	粉黏壤	22.7	2.0	11.2	5.98	10.6	21.2	865.4
P3	粉土	16.3	1.7	9.4	5.14	12.2	28.5	878.9
P4	粉壤	15.6	1.6	9.5	4.74	7.2	20.6	638.0

1) 土壤 pH 测定的浸提剂是水,水土比为 2.5:1

1.2 水稻生长及¹⁴C- CO_2 连续标记

试验设置上述 4 种水稻土分别种植水稻的 4 个处理 P1、P2、P3 和 P4,每个处理重复 5 次. 连续标记法是指在植物生长的某个生育时期,甚至是整个生育期内,在特殊的标记室中对植物进行不间断标记,由于该法持续时间长,碳同位素的分配代表了植物全部光合碳的分配,得到的数据比较可靠. 因此,本研究就采用了¹⁴C连续标记. 培养装置和方法参考文

献[5]建立的研究方法. 采用的水稻品种为二系杂交稻中优 169. 稻苗在田间培养 20 d 后,选取长势一致的稻苗,小心洗净根系后,移栽至 PVC 盆钵中,每盆 3 株,平均每株干重为 0.16 g. 然后将其转移至¹⁴C 标记箱进行密闭系统标记培养. 标记试验开始时间从 2009-06-19~2009-09-07,共计 80 d,此段时期为水稻的生长旺盛期,在生育期上为拔节灌浆期. 温度设定为白天 31℃±1℃,晚上 24℃±1℃,每天光

照12 h(从08:00~20:00),相对湿度80%~90%,光照强度500 mmol·(m²·s)⁻¹ PAR. 标记过程中,每天两次补充去离子水以保持水稻土淹水状态.¹⁴C-CO₂通过¹⁴C-NaHCO₃(1 mol·L⁻¹, 16.5 × 10³ Bq·mL⁻¹)和HCl(1 mol·L⁻¹)反应自动产生,¹⁴C-NaCO₃和HCl溶液的加入量和加入次数根据植物生长情况确定.在标记开始的0~42 d,每周向栽培箱中加入300 mL 1 mol·L⁻¹的¹⁴C-NaHCO₃溶液,从标记43~80 d,加入量增加,每4 d加入¹⁴C-NaHCO₃溶液400 mL,以上各阶段需同时加入相应体积的1 mol·L⁻¹ HCl溶液.通过控制加入量使标记箱内CO₂浓度维持在270~350 μmol·L⁻¹.

1.3 测定和分析方法

试验结束后,轻轻从钵钵土壤中取出完整植株,把收获的水稻植株按根、地上部分开后,先用自来水冲洗,再用0.5 mol·L⁻¹ CaCl₂(pH 6.2)浸泡1 min,最后用去离子水冲洗,以去除吸附在植株表面的¹⁴C,然后在105℃杀青30 min,在30℃下烘干至恒重.

土壤有机碳和全氮采用碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N,德国)测定(干烧法).土壤DOC含量的测定参照文献[14]的方法,称取10.00 g新鲜土样,按1:4的土水比加入0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄溶液,振荡(300 r·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^[15].称取4份新鲜土样,每一份土壤25.00 g(烘干基),其中2份直接用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄,振荡(300 r·min⁻¹)提取30 min.另2份在真空干燥器内用氯仿熏蒸(24 h),熏蒸的土样除去氯仿后立即提取.取10.00 mL提取液与10.00 mL 2%六偏磷酸钠混后以碳自动分析仪(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¹⁴C放射性强度采用液体闪烁仪(LS-6500, Beckman)测定.取1.00 mL吸收液加入9.00 mL闪烁液(RIA,美国),混匀,静置1 d,计数5 min.土壤中¹⁴C-DOC、¹⁴C-MBC计算公式如下:

$$^{14}\text{C-DOC} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = [(C_{\text{ms}} - C_{\text{m0}}) \times (80 + W_{\text{w}})] / [W_{\text{s}} \times (\text{SA})_{\text{s}}]$$

$$^{14}\text{C-MBC} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \{[(C_{\text{ms}} - C_{\text{m0}}) \times (80 + W_{\text{w}})] / [W_{\text{s}} \times (\text{SA})_{\text{s}}]\} / K_{\text{c}}$$

式中,C_{ms}和C_{m0}代表样品和空白的每min裂变量(DPM)的值;(SA)_s表示标记底物的DPM浓度;W_s表示被提取土壤样品的干土重;W_w表示被提取土壤样品的含水量;80为K₂SO₄体积;K_c为转化系数,取值0.45.

土壤总有机碳中¹⁴C放射性强度采用文献[16]的方法测定,具体操作:称取5.00 g过0.149 mm筛土壤样品于双颈烧瓶,在密闭条件下加入20 mL 0.2 mol·L⁻¹重铬酸钾溶液和30 mL浓硫酸+浓磷酸混合液(5:1,体积比)作为氧化剂,在165℃下消化8 min,然后通入氧气继续消化10 min;消化过程中产生的CO₂经冷凝器和缓冲瓶分离纯化后,用40 mL 0.4 mol·L⁻¹氢氧化钠溶液吸收.混合液¹⁴C放射性强度采用液体闪烁仪(LS-6500, Beckman)测定.取1 mL吸收液加入9 mL闪烁液(RIA,美国),混匀,静置1 d,计数5 min.土壤中¹⁴C-SOC计算公式如下:

$$^{14}\text{C-SOC} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = [(C_{\text{s}} - C_0) \times (40.00/1.00)] / [W_{\text{s}} \times (\text{SA})_{\text{s}}]$$

式中,C_s和C₀代表样品和空白的每分钟裂变量(DPM)的值;(SA)_s表示标记底物的DPM浓度;40为氢氧化钠体积;1为1 mL氢氧化钠吸收液;W_s表示被提取土壤样品的干土重.

数据处理和统计分析采用Microsoft Excel 2003和SPSS 13.0.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 水稻地上部和根系含碳量

不同土壤条件下,水稻植株地上部、根系累积的总碳量见表2.不同土壤条件下,水稻植株地上部累积的碳量表现为P3>P2>P4>P1,而根系累积的碳量则表现为P3>P1>P2>P4.这可能与不同土壤的

表2 ¹⁴C-CO₂连续标记80 d后,不同土壤条件下水稻地上部、地下部累积的总碳量¹⁾/g·pot⁻¹

Table 2 Rice shoots and roots carbon content in different paddy soils after 80-d ¹⁴C-CO₂ continuous labeling/g·pot⁻¹

处理	植株累积的总碳量	地上部累积的碳量	根系累积的碳量	根冠比
P1	2.46 ± 0.41c	1.86 ± 0.23c	0.60 ± 0.26b	0.13a
P2	5.86 ± 0.46a	5.29 ± 1.72a	0.57 ± 0.09b	0.11a
P3	6.38 ± 0.23a	5.60 ± 0.88a	0.78 ± 0.26a	0.12a
P4	3.96 ± 0.29b	3.50 ± 0.73b	0.46 ± 0.15c	0.11a

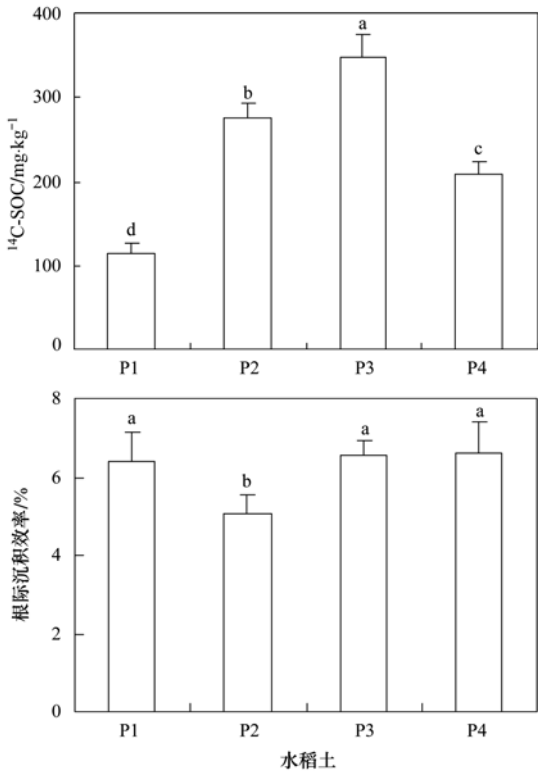
1)表中不同字母表示处理间差异达到显著水平(P<0.05)

水稻光合生产能力不同有关. 然而, 4 种土壤条件下, 其根冠比差异不显著.

2.2 ¹⁴C在土壤中的分配(¹⁴C-SOC)及与水稻含碳量的关系

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. 不同土壤处理下, 标记培养 80 d 后, 种植水稻的土壤¹⁴C-SOC 含量见图 1. 水稻生长 80 d 后, 土壤¹⁴C-SOC 含量范围为 114.3 ~ 348.2 mg·kg⁻¹, 各个处理差异达显著水平 ($P < 0.05$), 表现出与土壤水稻光合生产能力相一致的趋势, 即 $P3 > P2 > P4 > P1$ (图 1 和表 2). 另外, 相关分析表明, 水稻“新碳”(¹⁴C-SOC)在土壤中的含量与其地上部生物量呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.949^{**}$, $n = 4$).

培养期间, 水稻通过根际沉积作用将光合碳同化碳转化为土壤有机碳的效率用土壤¹⁴C-SOC 与¹⁴C-水稻碳量的比率来表示. 不同土壤条件下, 其比率范围为 5.09% ~ 6.62% (图 1), 除 P2 外, 其他 3 个处理的根际沉积效率较为接近, 为 6% 左右, 这说明尽



图中不同字母表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 下同

图 1 ¹⁴C-CO₂ 连续标记 80 d 后, 不同处理中土壤¹⁴C-SOC 的含量及其根际沉积效率

Fig. 1 Content of ¹⁴C-SOC and rhizodeposition efficiency after 80-d ¹⁴C-CO₂ continuous labeling

管不同土壤的水稻光合生产能力不同, 但根际沉积效率相似.

2.3 土壤¹⁴C-MBC、¹⁴C-DOC 含量

种植水稻 80 d 后, ¹⁴C-DOC、¹⁴C-MBC 的含量范围为 4.05 ~ 8.65 mg·kg⁻¹、12.5 ~ 37.6 mg·kg⁻¹ 之间 (图 2). P1 处理的¹⁴C-DOC、¹⁴C-MBC 含量均为最低, 与其他处理相比, 可能是由于 P1 根部生物量小, 根系分泌物不足, 加之自身微生物量高, 微生物与根系养分竞争激烈, 微生物只有利用土壤中原有的有机质进行代谢. 尤其需要指出的是, P4 土壤中¹⁴C-DOC 含量较 P1、P3 低, 而¹⁴C-MBC 含量则较 P1、P3 高 (图 2), 造成这种差异的原因, 还有待于进一步研究.

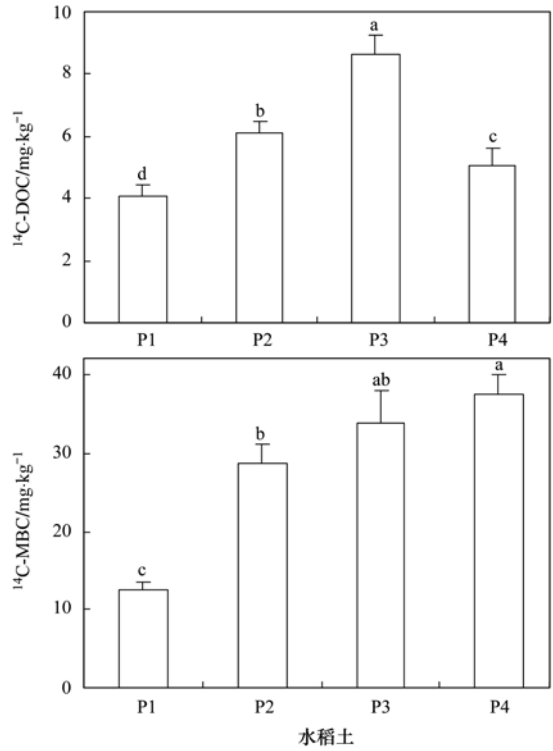


图 2 土壤¹⁴C-DOC 与¹⁴C-MBC 含量

Fig. 2 Content of soil ¹⁴C-DOC and ¹⁴C-MBC in different paddy soils

2.4 水稻光合同化碳在土壤 DOC、MBC 和 SOC 的更新率

土壤 DOC、MBC 和 SOC 中来源于水稻根际沉积的部分占总量 DOC、MBC 和 SOC 的比例也称为土壤 DOC、MBC 和 SOC 的更新率 (表 3). 水稻种植 80 d 后, 不同土壤条件下 DOC 的更新率为 6.7% ~ 14.6%, 处理间水稻根际沉积对土壤 DOC 的贡献大小为 $P3 > P2 > P4 > P1$; 土壤 MBC 的更新率为 1.7% ~ 7.7%; 土壤 SOC 的更新率为 0.7% ~ 1.9%, 可见

在水稻生长旺盛的标记阶段,根际沉积的新鲜土壤有机碳含量非常少.由表3还可以看出,相同土壤条件下,土壤DOC的更新率均大于土壤MBC,表明水稻根际输入光合碳对土壤DOC的周转影响比MBC大,这可能与水稻大部分根际分泌物首先进入DOC库,然后被根际微生物利用有关.

表3 不同土壤条件下水稻光合碳在土壤DOC、MBC和SOC的更新率/%

Table 3 Renewal rates of soil DOC, MBC and SOC in different paddy soils/%

处理	^{14}C -MBC/MBC	^{14}C -DOC/DOC	^{14}C -SOC/SOC
P1	1.70 ± 0.15 b	6.72 ± 0.65 c	0.73 ± 0.09 c
P2	6.63 ± 0.51 a	9.23 ± 0.92 b	1.18 ± 0.18 b
P3	7.19 ± 0.64 a	14.64 ± 1.11 a	1.99 ± 0.17 a
P4	7.67 ± 0.46 a	7.73 ± 0.83 c	1.43 ± 0.09 b

3 讨论

在通常自然植被条件下,土壤有机碳绝大部分直接来源于土壤上生长的植物残体和根际分泌物.研究发现一般情况下在植物生长期间,其净光合产物的10%~40%通过根际分泌作用进入土体^[11,17],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^[18]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%的经土壤微生物呼吸损失了,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(分蘖旺期)进行标记80 d后,水稻生长显著影响土壤 ^{14}C -SOC的含量,其含量范围114.3~348.2 mg·kg⁻¹(图1),其根际沉积效率(占水稻含碳量)的范围为5.09%~6.62%(图1),比Lu等^[19]研究水稻生长期净光合产物转化为土壤有机碳的比例(1%~5%)要高.何敏毅等^[20]应用 ^{13}C 脉冲技术研究了玉米整个生育期内光合碳在土壤中的分配,得到有近38%的玉米净吸收碳分配到了地下,而其中又有约7%转化为土壤有机碳.Kuzyakov等^[21]分析了前人研究结果得到种植小麦和牧草根际新鲜沉积的土壤有机碳占植株含碳量的比例分别为4%和7%.造成不同研究者之间的这种差异可能与供试作物种类、标记方式(脉冲、连续)以及示踪期长短等因素有关.需要指出的是,本研究采取的是 ^{14}C 连续标记法,由于标记的时间较长, ^{14}C 的分配代表了水稻全部光合碳的分配,而脉冲标记得到的碳同位素分配信息,不能代表植物整个生育期全部光合碳分配.

本研究中标记水稻生长80 d后,不同土壤条件

下,土壤有机碳的更新率在0.7%~1.9%(表3).而杨兰芳等^[22]采用同位素质谱法研究了玉米植株生长和施N水平对土壤有机碳更新的影响,发现土壤有机碳的更新率在4%~25%,随玉米生长时间的延长,玉米根际碳沉积对土壤有机碳的贡献增大.Liang等^[7]研究发现盆栽玉米28 d后土壤有机碳的更新率为3%,67 d后土壤有机碳的更新率为12%.可见旱地作物(玉米)的土壤有机碳更新率大于水田(水稻),而旱地土壤有机碳含量水平普遍低于水田^[23],表明旱地作物转移到土壤中的新鲜沉积碳稳定性不如水稻根际沉积碳,这是因为根际输入的有机碳可能与水稻土中活跃的氧化铁络合,形成较为稳定的络合物^[24];也可能根际输入的有机碳参与形成了土壤团聚体,而稻田土壤的团聚体有机碳物理保护能力高于旱地土壤^[25,26].因此,整体来说,旱地土壤有机碳要远比水田周转的快.

土壤DOC和土壤MBC是土壤活性炭库中新碳的主要归宿,与土壤呼吸释放CO₂、CH₄有着密切的关系^[7].Kuzyakov等^[21]应用 ^{14}C 脉冲标记技术研究了黑麦草光合产物的分配和转化,得到输入土壤的光合碳约有50%为活性有机组分.Lu等^[27]研究指出种植水稻影响土壤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,并且伴随着水稻的生长DOC含量逐渐增大,与根际生物量具有很好的正相关关系.本研究中,80 d的水稻生长期土壤DOC与MBC的更新率分别高达14.6%和7.6%,比土壤有机碳更新率大得多(表3),表明水稻根际输入光合碳对土壤DOC、MBC含量变化影响较大,这与前人研究基本一致^[28,29].在水稻生长过程中,其根际分泌物是土壤DOC的一个重要来源,也是土壤微生物生长利用的原料,从而影响土壤DOC和MBC含量的动态变化.此外,本研究还发现水稻生长将显著影响土壤 ^{14}C -DOC和 ^{14}C -MBC的含量(图2),表明水稻生长过程中,较高的光合生产能力和根系生物量,土壤微生物可利用的碳源增加,使得土壤微生物可利用的碳源增加,从而改变根际沉积碳的含量以及土壤微生物的种群和数量^[1,30].

最后,需要指出的是,本试验仅就一种作物(水稻)展开研究,并且标记的时间只是水稻生长旺盛期,仍需要观测整个水稻生育期内的土壤与水稻之间碳交换动态变化过程,以求全面了解水稻生长季内土壤有机碳的动态变化.此外,对水田、旱地这2种土地利用类型之间的差异仍不清楚;对旱地作物(如玉米、小麦等)和水稻在相同气候条件下,对土

壤输入有机碳的影响差异也不清楚;以及作物生育期结束后来源于根系输入的新鲜土壤有机碳与原有有机碳之间矿化的差异机制如何等,在今后的研究中仍然需要被关注。

4 结论

(1)水稻生长 80 d 后,供试土壤的 ^{14}C -SOC 含量范围为 $114.3 \sim 348.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 ^{14}C -DOC、 ^{14}C -MBC 含量范围为 $4.05 \sim 8.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $12.5 \sim 37.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2)水稻生长期间内,不同土壤条件下,土壤 ^{14}C -SOC 与水稻 ^{14}C 累积量的比率范围为 $5.09\% \sim 6.62\%$,这说明尽管不同土壤的光合生产能力不同,但根际沉积效率相似,即与生物量相关,生物量越大,进入土壤的 ^{14}C 就越多。

(3)土壤可溶解性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)和SOC的更新率分别为 $6.72\% \sim 14.64\%$ 和 $1.70\% \sim 7.67\%$ 和 $0.73\% \sim 1.99\%$ 。而且,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。

参考文献:

- [1] Sagar S, Hedley C, Mackay A D. Partitioning and translocation of photosynthetically fixed ^{14}C in grazed hill pastures [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, **25**(2): 152-158.
- [2] 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.
- [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**(5): 1785-1803.
- [4] 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.
- [5] 肖和艾,吴金水,李玲,等. 采用 ^{14}C 同位素标记植物的装置与方法[J]. 核农学报, 2007, **21**(6): 630-632.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, et al. Carbon input to soil may decrease soil carbon content [J]. Ecology Letters, 2004, **7**(4): 314-320.
- [9] Farrar J, Hawes M, Jones D, et al. How roots control the flux of carbon to the rhizosphere [J]. Ecology, 2003, **84**(4): 827-837.
- [10] Kuzyakov Y, Jones D L. Glucose uptake by maize roots and its transformation in the rhizosphere [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, **38**(5): 851-860.
- [11] Kaštovská E, Šantrůčková H. Fate and dynamics of recently fixed C in pasture plant-soil system under field conditions [J]. Plant Soil, 2007, **300**(1-2): 61-69.
- [12] Höglberg P, Nordgren A, Ågren G I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest [J]. Oecologia, 2002, **132**(4): 579-581.
- [13] Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls [J]. Agronomie, 2003, **23**(5-6): 375-396.
- [14] Bolan N S, Baskaran S, Thiagarajan S. An evaluation of the methods of measurement of dissolved organic carbon in soils, manures, sludges, and stream water [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1996, **27**(13-14): 2723-2737.
- [15] 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.
- [16] Wu J, O'Donnell A G. Procedure for the simultaneous analysis of total and radioactive carbon in soil and plant materials [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1997, **29**(2): 199-202.
- [17] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere [J]. Plant and Soil, 1990, **129**(1): 1-10.
- [18] 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.
- [19] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded rice soil [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, **16**: 1085.
- [20] 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.
- [21] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne* [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, **33**(1): 61-74.
- [22] 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.
- [23] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation [J]. Biogeochemistry, 2005, **74**(1): 47-62.
- [24] 潘根兴,李恋卿,郑聚峰,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报, 2008, **45**(5): 901-914.
- [25] 谭文峰,朱志峰,刘凡,等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. 自然资源学报, 2006, **21**(6): 973-980.
- [26] Pan G X, Wu L S, Li L Q, et al. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(4): 456-463.
- [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] 王良梅,周立祥,占新华,等. 水田土壤中水溶性有机物的产生动态及对土壤中重金属活性的影响: 田间微区试验[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(5): 858-864.
- [29] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant photosynthates to dissolved organic carbon in a flooded rice soil [J]. Biogeochemistry, 2004, **71**(1): 1-15.
- [30] Zhang N L, Wan S Q, Li L H, et al. Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi-arid temperate steppe in northern China [J]. Plant Soil, 2008, **311**(1-2): 19-28.

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO ₂ by Carbon Isotope Composition	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM _{2.5} Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ ¹⁵ N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River	 CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period	 GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area	 WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta	 LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment	 WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta ₂ O ₅	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O ₃ /H ₂ O ₂	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO ₂ Photocatalyst	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A ² /O System	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (<i>nosZ</i>)	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow	WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

《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)

2012年4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 15, 2012

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人