

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)
《环境科学》征订启事 (65)	
《环境科学》征稿简则 (220)	
信息 (226, 270, 298, 364)	

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态

谭立敏^{1,2}, 彭佩钦¹, 李科林^{1*}, 李宝珍², 聂三安², 葛体达^{2*}, 童成立², 吴金水²

(1. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站, 农业生态系统过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 作物光合碳是“大气-植物-土壤”碳循环的重要组成部分, 是农田土壤有机碳的重要来源, 然而其在土壤碳库中的矿化和转化动态尚不清楚. 应用室内模拟培养实验, 研究水稻收获后输入土壤的光合同化碳在土壤碳库中的矿化及其转化特征. 结果表明, 100 d 的培养期内, 原有有机碳的平均矿化速率在 $4.44 \sim 17.8 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, 而光合碳(新碳)的矿化速率则在 $0.15 \sim 1.51 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 之间. 光合同化碳的输入对土壤活性碳库(DOC、MBC)的转化产生显著影响, 在培养期内, ^{14}C -DOC 的转化量为 $1.89 \sim 5.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 转化速率的变化幅度为 $0.18 \sim 0.34 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 原有 DOC 则在 $61.13 \sim 90.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 减少幅度为 $4.10 \sim 5.48 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; ^{14}C -MBC 和原有 MBC 的转化量分别为 $10.92 \sim 44.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $463.31 \sim 1153.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 转化速率变化幅度分别为 $0.80 \sim 2.87 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $41.60 \sim 74.46 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 说明水稻光合碳的输入对 MBC 的周转要大于 DOC 的周转. 而且, 与原有有机碳相比, 输入的“新碳”易被微生物矿化分解, 100 d 的培养期内, 有 $13.5\% \sim 20.2\%$ 的新碳被矿化分解, 而仅 $2.2\% \sim 3.7\%$ 的原有有机碳被矿化分解, 光合同化碳的输入对维持稻田土壤的碳汇功能具有重要作用.

关键词: 光合同化碳; 水稻土; 矿化; 转化; 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)01-0233-07

Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment

TAN Li-min^{1,2}, PENG Pei-qin¹, LI Ke-lin¹, LI Bao-zhen², NIE San-an², GE Ti-da², TONG Cheng-li², WU Jin-shui¹

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

Abstract: Photosynthesized carbon is an important part in C cycling of “atmosphere-plant-soil” and is the source of soil organic carbon (SOC), but its mineralization and transformation dynamics in paddy soils remains still unclear. Therefore, a batch incubation experiment was conducted to investigate the mineralization and transformation of rice photosynthesized carbon in paddy soils after rice harvest. The results showed that the mineralization rate of native SOC ranged from 4.44 to $17.8 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, while that of photosynthesized carbon (new carbon) was $0.15 \sim 1.51 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ during the course of 100-day-incubation span. Rice photosynthesized carbon input significantly influenced the soil active carbon (DOC, MBC) transformation. During the incubation period (100 d), the amount of ^{14}C -DOC transformation ranged from 1.89 to $5.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and that of native DOC varied from 61.13 to $90.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with the transformation rates ranged from 0.18 to $0.34 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ and from 4.10 to $5.48 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. However, the ^{14}C -MBC and native original MBC were $10.92 \sim 44.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $463.31 \sim 1153.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and their transformation rates were $0.80 \sim 2.87$, $41.60 \sim 74.46 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. It suggested that the turnover of MBC was greater than that of DOC. Furthermore, “new carbon” was easier to be mineralized and decomposed than native SOC. The mineralized portion in “new carbon” was $13.5\% \sim 20.2\%$, whereas that in native SOC was only $2.2\% \sim 3.7\%$. Therefore, we concluded that the incorporation of rice photosynthesized carbon was vital to maintain the soil carbon sink for paddy soils.

Key words: photosynthesized carbon; paddy soil; mineralization; transformation; soil microbial biomass carbon; soil dissolved carbon

植物光合作用是推动和支撑整个生态系统的动力,也是全球碳循环及其它物质循环最重要的环节,驱动着整个生物圈的物质和能量循环. 植物光合同化产物进入土体,改变土壤有机碳的组成及性质,其在地下分布的微小变化影响着全球碳循环^[1,2]. 许多学者^[3~5]研究发现,植物生长期间产生的光合产物约有 $10\% \sim 40\%$ 被分配到地下,然后用于根呼吸

消耗、转化为土壤有机碳或微生物的营养源等.

收稿日期: 2013-04-17; 修订日期: 2013-06-06

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); 湖南省自然科学基金项目(11JJ4030); 中国科学院海外特聘研究员项目(2009Z2-10)

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: sjtugd@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: gtd@isa.ac.cn, csfukli@163.com

不仅植物光合同化碳在土壤中的动态变化是焦点,新鲜有机碳的加入(如秸秆、根茬、有机肥等)在土壤中的变化情况也颇受关注.王娟等^[6]通过向水稻土中添加秸秆后的盆栽实验表明,秸秆能在一定程度上促进土壤碳转化,提高水稻产量.张鹏等^[7]也研究发现,采用秸秆还田对提高土壤有机碳含量和碳矿化具有明显的促进作用.张旭博等^[8]发现不同肥料施入土壤后显著提高了土壤 MBC 和 DOC 含量,进而提高了土壤有机碳的矿化速率和矿化量.根际沉积是土壤碳循环中的重要一环^[9].植物根际碳的沉积来源于植物残体的分解以及植物生育期内根际碳的释放,根际碳的沉积是土壤有机质的主要来源.根际沉积是作物物质循环、能量流动和信息传递的基础,是植物和土壤环境之间物质和能量交换最活跃的区域^[10].

水稻根部光合同化 C(根际沉积碳)的释放为土壤中微生物的活动提供了一个重要的碳源,根部沉积碳以根分泌物、黏液、根表皮的脱落和皮层细胞的衰老等过程实现^[11].不同的作物在生长期总是源源不断的向土壤输入同化碳,在作物收获以后,这些通过根际输入到土壤中的“新碳”的去向成为一个值得关注的问题.然而,由于方法的限制,通常将根系、秸秆和有机肥等输入的碳作为一个整体碳投入看待,没有将不同有机碳源类型分开考虑,因而可能对结果带来一定的误差.作为类型差异较大的 3 种碳源,根系与分泌物、秸秆残茬和有机肥在土壤中的矿化和转化特征存在显著差异^[12].因此,本实验以亚热带 4 种典型水稻土为供试材料,在¹⁴C-CO₂连续标记水稻 80 d 后,采用室内模拟培养实验,研究输入土壤的光合同化碳(新碳)在土壤碳库中的矿化动态及特征,以揭示作物收获后进入到土壤中的“新碳”在土壤碳库中的转化与分解规律,以期光合同化碳在土壤中的稳定和转化提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

实验所需的土壤(¹⁴C 标记)样品来自笔者前期的研究^[13,14].4 种供试土壤的轮作制度、施肥、耕作、前茬作物等信息参见文献^[13,14].简单的说,选取亚热带地区 4 种典型水稻土耕作层(0~20 cm)土壤(P1、P2、P3、P4),在密闭系统内采用¹⁴C-CO₂连续标记示踪技术,种植水稻 80 d 后,取出标记的土壤,用于下述土壤培养(矿化与转化)实验.

1.2 土壤培养实验

称取上述标记的 50 g(干土计)土壤样品于 50 mL 烧杯中,置于 1 000 mL 的广口密闭培养瓶中,同时在广口瓶内放一个盛有 20 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH 的 80 mL 集气瓶,在 25℃ 下进行恒温培养(底部加 10 mL 水,以维持空气的饱和湿度),每个处理 4 个重复.分别在培养的 5、10、20、30、40、60、80、100 d 取出集气瓶,同时放入新的盛有 NaOH 吸收液的集气瓶,然后继续培养.取出来的集气瓶密封保存,用于测定吸收液中的 CO₂ 和¹⁴C-CO₂.

将上述标记的剩余土壤样品(800 g,干土计)于 4 L 的塑料杯中,然后置于 50 L 密封塑料桶中,桶底加入少量的水(以维持空气的饱和湿度),在桶中放置 1 瓶 1 000 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH 的吸收液,密封塑料桶.在 25℃ 下恒温培养.每个处理 4 个重复,在培养的 10、20、30、40、60、80、100 d 取样测定土壤活性碳库含量(包括 DOC、MBC、¹⁴C-DOC、¹⁴C-MBC).培养过程中,每 5 d 通 1 次气,每 30 d 换 1 次 NaOH 溶液.

1.3 测定和分析方法

1.3.1 土壤释放的 CO₂ 总量和¹⁴C-CO₂ 总量

采用 Wu 等^[15]的方法:取 2 mL 吸收液,加 8 mL 去 CO₂ 双蒸水,采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪测定稀释液中 CO₂ 量.另取 1 mL 吸收液,加入 9 mL 闪烁液(RIA,Beckman),采用液体闪烁仪计数 5.00 min,测定溶液中¹⁴C-CO₂ 含量.

1.3.2 可溶性碳 DOC 和¹⁴C-DOC

取经预培养的土壤 2 份(每份相当于烘干基重为 20 g),加入 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 浸提剂(土水比 1:4,质量浓度),振荡浸提 30 min(300 r·min⁻¹),用中速定量滤纸过滤.浸提液中有有机碳含量采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪测定.¹⁴C-DOC 测定是取上述 1.00 mL 土壤 K₂SO₄ 浸提液加入 9 mL RIA 闪烁剂,混合液¹⁴C 放射强度采用 LS-6500 型自动液体闪烁仪(Beckman,计数效率为 14C ≥ 95%)测定计数 5.00 min,测得每分钟裂变变量(DPM).

1.3.3 微生物量碳 MBC 和¹⁴C-MBC

测定方法采用 Wu 等^[16]的方法:土壤微生物量碳(总生物量碳)测定采用熏蒸提取-碳自动分析仪法.取经预培养的土壤 2 份(每份相当于烘干基重为 20 g),其中 1 份土壤用去乙醇氯仿熏蒸 24 h,除去土壤中氯仿,加入 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 浸提剂(土水比 1:4,质量浓度),振荡浸提 30 min(300 r·min⁻¹),用中速定量滤纸过滤.另 1 份土壤不熏

蒸,浸提方法同上。浸提液中有有机碳含量采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪测定。 ^{14}C -MBC 测定是取上述 1.00 mL 土壤 K_2SO_4 浸提液加入 9 mL RIA 闪烁剂,混合液 ^{14}C 放射强度采用 LS-6500 型自动液体闪烁仪(Beckman,计数效率为 $^{14}\text{C} \geq 95\%$)测定计数 5.00 min,测得每分钟裂变量(DPM)。

1.4 计算与统计分析

^{14}C -SOC 计算公式如下:

$$\text{SOC}^{14} (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = [(C_{\text{ms}} - C_{\text{mo}}) \times (40.00/1.00)] / [W_s \times (SA)_s]$$

^{14}C -DOC、 ^{14}C -MBC 计算公式如下:

$$^{14}\text{C}\text{-DOC} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = [(C_{\text{ms}} - C_{\text{mo}}) \times (80 + W_w)] / [W_s \times (SA)_s]$$

$$^{14}\text{C}\text{-MBC} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \{[(C_{\text{ms}} - C_{\text{mo}}) \times (80 + W_w)] / [W_s \times (SA)_s]\} / K_c$$

式中, C_{ms} 和 C_{mo} 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; 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 K_2SO_4 体积;40 为氢氧化钠体积;1 为 1 mL 氢氧化钠吸收液; K_c 为转化系数,取值 0.45。

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 不同土壤中光合碳(^{14}C -SOC)和原有有机碳矿化的动态变化

在 100 d 的培养期间,土壤中新输入有机碳(^{14}C -SOC,新碳)和原有的有机碳(SOC)都发生了明显的变化,其矿化速率变化趋势显著(图 1)。对于“新碳”而言,P1 和 P2 土的 ^{14}C 矿化速率在培养初期随着时间的进行而显著增高;但随着培养时间的延长,到了培养中后期土壤碳矿化速率逐渐降低;总体呈现先增后减的趋势。P3 和 P4 土的碳矿化速率是单调递减的,培养前期降低快,培养中后期降低缓慢。4 种土壤新碳的矿化速率都在 60 ~ 100 d 的培养时间达到平稳状态(图 1)。而对于原有有机碳而言,4 种土壤的碳矿化速率均呈现递减趋势,培养初期时 P2、P3 和 P4 土的碳矿化速率降低较快,P1 较缓慢;与“新碳”一样,4 种土壤的碳矿化速率在 60 ~ 100 d 的培养时期达到平稳。新碳的矿化速率由培养初期的 $1.51 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 减小到培养末期

$0.15 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,减少了 90%,整个培养期的平均矿化速率为 $0.83 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$;原有有机碳的矿化速率在培养初期为 $17.76 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,培养末期为 $4.44 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,减少了 75%,培养期内的平均矿化速率为 $11.1 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ (图 1)。

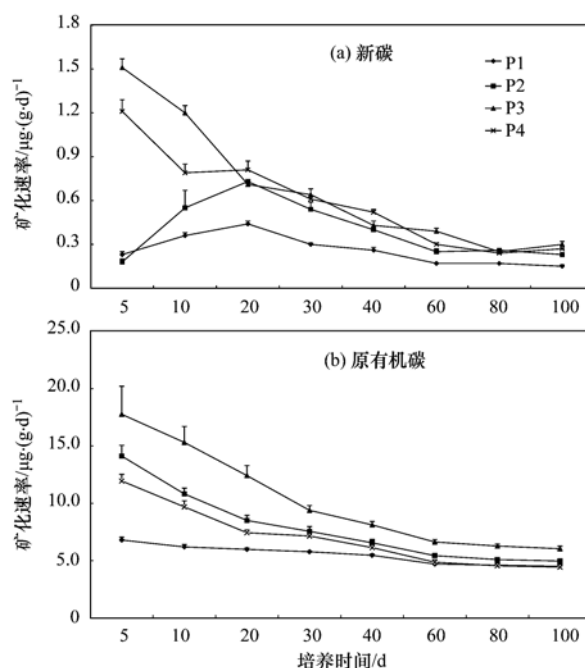


图 1 稻田土壤输入的光合碳(“新碳”)和原有有机碳在土壤中的矿化速率(100 d 培养期)

Fig. 1 Mineralization rate of photosynthesized carbon and native soil organic carbon in paddy soil during the period of 100-day-incubation

2.2 不同土壤中 ^{14}C -DOC 和 DOC 的转化动态

在 100 d 的培养期内,4 种土壤中新 DOC(^{14}C -DOC)和原有 DOC 变化明显,转化过程活跃(图 2)。 ^{14}C -DOC 的转化量为 $1.89 \sim 5.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $3.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而对于原有 DOC,其变化范围为 $61.13 \sim 90.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $72.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且在各个培养时间里 DOC 变化趋势基本表现为:P1 < P2 < P3 < P4。

将 100 d 的培养时间分成 3 个时期:初期 S1(0 ~ 20 d)、中期 S2(20 ~ 80 d)、末期 S3(80 ~ 100 d),则 ^{14}C -DOC 和原有 DOC 在土壤中的日均转化量(转化速率)趋势都是随着时期的进行逐渐减小(图 3),且二者的速率减小程度相当。 ^{14}C -DOC 从初期到中期减少了 75%,中期到末期减小了 57%;原有 DOC 从初期到中期减小了 68%,而从中期到末期的同 ^{14}C -DOC 的一样,为 57%。

2.3 不同土壤中 ^{14}C -MBC 和 MBC 的转化动态

在 100 d 的培养过程中,MBC 的转化幅度大

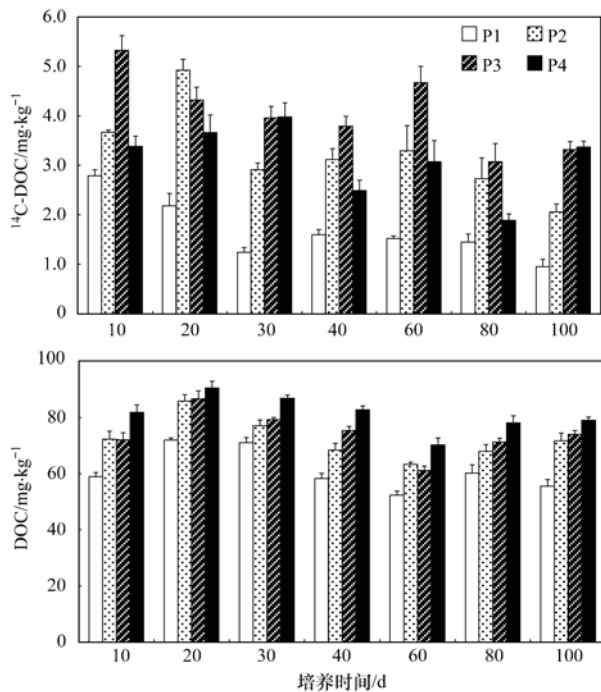


图2 稻田土壤可溶性有机碳(^{14}C -DOC, 原有的 DOC) 在土壤中的动态变化(100 d 培养期)

Fig. 2 Dynamics of dissolved organic carbon (^{14}C -DOC, DOC) in paddy soil during the period of 100-day incubation

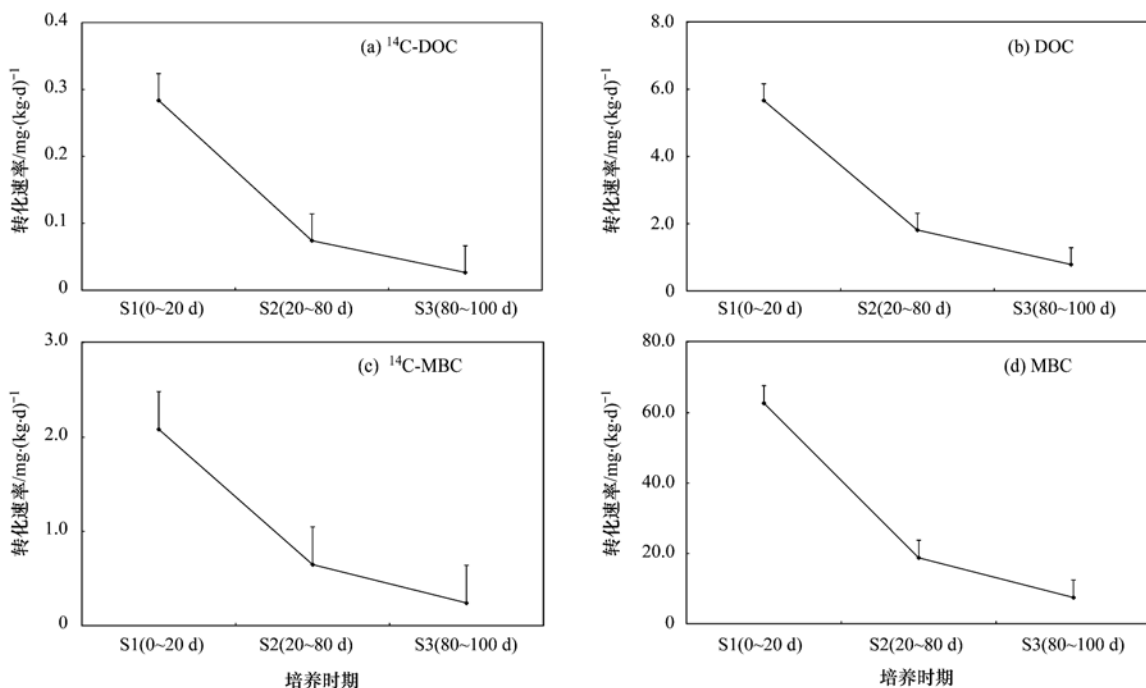


图3 ^{14}C -DOC、DOC、 ^{14}C -MBC 和 MBC 在培养中 3 个时期的动态

Fig. 3 Dynamics of ^{14}C -DOC, DOC, ^{14}C -MBC and MBC in three periods of incubation

土壤中有有机碳的矿化过程是在微生物的参与下进行的,受诸多因素如温度条件、水分状况、土壤性质等的影响^[17]。李忠佩等^[18]指出土壤碳的矿化

于 ^{14}C -MBC(图4)。培养过程中, ^{14}C -MBC 含量变化范围为 $10.92 \sim 44.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $25.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相同时间内, ^{14}C -MBC 的变化趋势表现为: $\text{P1} < \text{P2} < \text{P3} < \text{P4}$ 。而原有 MBC 含量则在 $463.31 \sim 1153.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内变化, 平均为 $749.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 整个培养过程中, P1 的 MBC 含量最高, P2 的最小。从转化速率在 3 个培养时期的变化趋势来看, ^{14}C -MBC 和原有 MBC 的转化量均是随初期-中期-末期的进行而逐渐减小(图3)。 ^{14}C -MBC 的呈匀速减小, 初期-中期减小 69%, 中期-末期减小 63%。原有 MBC 的减小过程则是前半段为 69%, 后半段 60%(图3)。

2.4 水稻同化碳的矿化对输入土壤有机碳的影响

通过矿化累积量与各自的有机碳的比值可以看出, 在 100 d 的培养期内, 有 2.2% ~ 3.7% 的原有有机碳被土壤微生物矿化分解了, 其平均量为原有有机碳的 3%; 而新碳被矿化的比例则有 13.5% ~ 20.2%, 其平均累计矿化量为新碳的 16%(图5)。

3 讨论

3.1 不同土壤有机碳矿化的动态变化

率与土壤黏粒含量呈负相关关系。有研究表明, 不同植物群落凋落物以及根系分泌物不同使输入到土壤中的有机碳的质量和数量也随之改变, 导致土

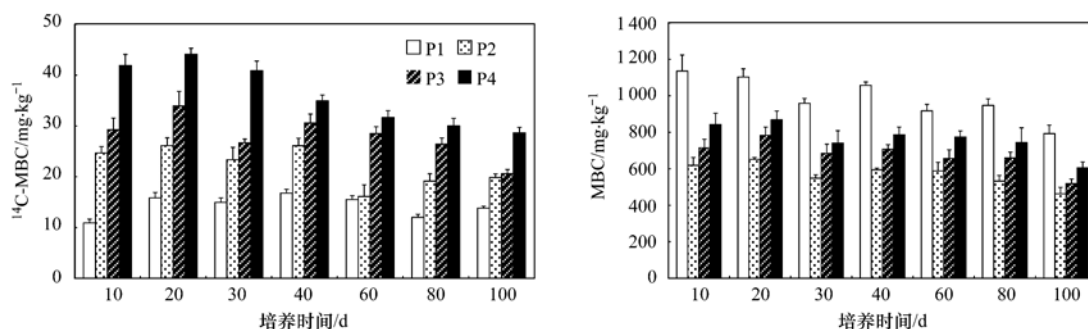


图4 稻田土壤微生物量碳(^{14}C -MBC, 原有的 MBC)在土壤中的动态变化(100 d 培养期)

Fig. 4 Dynamics of microbial biomass carbon (^{14}C -MBC, MBC) in paddy soil during the period of 100-day incubation

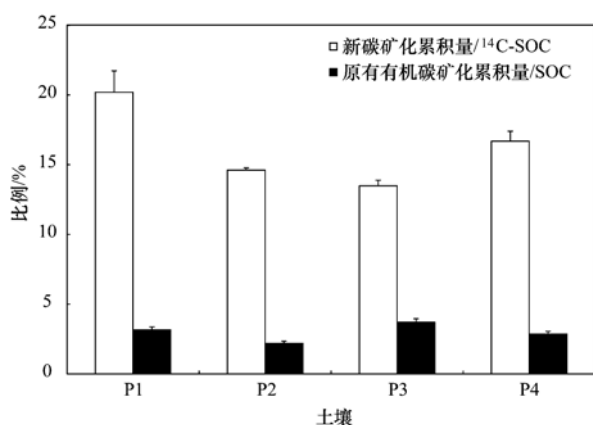


图5 100 d 的培养期内, 土壤中“新碳”和原有有机碳的矿化累积量占各自的有机碳的比值

Fig. 5 Percentage of “new” carbon and native organic carbon mineralization in their SOC after the 100-day-incubation-period

壤有机碳存在差异^[19]。一般认为, 有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件, 有机碳在转化为 CO_2 、 CH_4 前必须先进入溶液中^[20]。本研究中, 100 d 的培养期内, 新输入有机碳和原有有机碳的矿化速率都因土壤不同而各有差别(图1), 这主要是因为不同的土壤具有不同的属性, 其理化性质、其中的根系分泌物和根茬以及纳入的有机碳量都不同, 这说明土壤有机碳的矿化过程受土壤属性和特质的影响。新碳的矿化速率波动大, 变化快, 100 d 的培养期间初期到末期矿化速率减小了90%; 原有有机碳的矿化速率减小75%, 相对新碳稍显平缓(图1)。出现这种现象的可能原因有三: 一是土壤有机碳的矿化与土壤养分直接相关^[21]; 二是土壤中新鲜残渣中易降解有机碳的出现; 三是新碳组分的活性较强, 容易在土壤溶液发生解聚和溶解, 从而更容易矿化, 而土壤原有有机碳由于存在时间久, 形态稳定, 并与土壤中不同粒径的团聚体以及不同密度组分相结合, 相对较难发生转化。原有有机碳的矿化

速率比新碳的快了1倍, 这与它们各自在土壤中的含量有关, 相比于新碳纳入时间短、含量少来说, 原有有机碳积累时间长, 含量大, 其参与矿化过程组分多、过程丰富, 速率相对较快。在培养前期, 供试土壤的矿化速率较快, 这主要是因为前期土壤中易分解组分快速分解, 大量养分迅速释放, 促进了微生物活性, 所以土壤中碳的矿化速率增长迅速, 但随着培养时间的延长, 土壤中易分解组分被微生物利用完后, 开始转向较难分解的组分, 矿化速率随之减缓, 这与张鹏等^[7]的研究结论相似。然而, “新碳”和原有有机碳在土壤中矿化动态差异的微生物机制还有待于进一步研究。

3.2 不同土壤 DOC、MBC 的转化动态

DOC、MBC 虽然只占有机碳的一部分, 但其对外界环境变化的响应非常敏感, 直接参与土壤有机碳的生物地球化学转化过程, DOC 作为土壤有机碳中最活跃的部分, 参与土壤有机碳的降解和积累过程^[22]。结果表明, 土壤原有 DOC 和新 DOC 在培养期间都发生了不同程度的转化, 其转化量是随着培养时期的进行而逐渐减小的(图2、3), 这和有机碳的矿化速率的变化趋势一样(图1), 两者之间呈正相关, 说明可溶性有机碳的含量动态和周转与土壤有机碳的矿化有密切关系^[17]。在培养初期, DOC 的转化量和有机碳的矿化速率都大, 转化程度强, 可能是由于在土壤进行培养之前, 土壤从淹没80 d 的盆中取出, 被曝气, 使得好氧微生物由于 O_2 的进入活性增强, 从而导致土壤中残渣和 SOC 矿化加剧。4种土属间的 DOC 的转化量差异明显, 这可能与土壤黏性程度, 土壤水分的含量有关。水分是影响土壤有机质分解转化和积累的主要环境因子之一^[23]。较低水分条件下, DOC 溶出可能较少, 不能为驱动有机碳矿化过程的微生物提供足够的能源。

MBC 仅占土壤有机碳的1%~5%, 但微生物生

物量的大小反映了微生物的活性以及有机质和养分周转的速率,微生物生物量可通过对输入有机物质的分解转化来控制有机碳的积累或损失^[24]。而有关土壤微生物生物量对土壤有机碳库的贡献,目前还缺乏充分足够的证据。水稻同化碳输入土壤,在作物收获后,由于土壤中微生物的活性仍处于活跃阶段,土壤中微生物量碳部分相对其他组分较易发生转化,且变化量较大,其在土壤中发生转化最为明显(图2、3)。100 d 的培养期间,4 种土壤中新 MBC 和原始 MBC 含量在培养初期,矿化量都比较大,随着培养时间的进行,到后期逐渐减少(图3、4),其转化趋势和 DOC、有机碳矿化速率的一样,这是由于在培养初期,水分、O₂、营养物质的含量丰富,转化过程活跃,到了后期,这些物质逐渐被消耗减少,转化过程变得缓慢甚至停止。另一个原因是微生物底物,在后期随着微生物底物被逐渐利用,培养系统中的营养受到限制,微生物活性稳定下来,转化过程趋于平稳^[25]。不同土属的微生物量碳转化差异显著,这可能是由于不同的土壤具有不同微生物群落,从而导致不同的底物利用能力和能量转化效率,再加上深层环境条件的制约^[26],最终导致微生物量转化量之间的差异。

3.3 输入土壤的水稻同化碳对土壤有机碳的影响

在新碳和原有机碳的矿化、转化过程的对比中发现,两种碳的矿化之间存在激发效应^[27],即外源有机质的输入能促进或抑制土壤原有有机碳的矿化,引起正的或负的激发效应。一般认为,加入有机物料促进或者抑制土壤原有有机质的分解是由于微生物活性、数量和组成的改变而引起的,与外源物料的生化组成、C/N 比、施用数量以及土壤性质等有关,但其中的机制尚不清楚^[28]。在本实验中,水稻光合同化碳输入到土壤后,不仅由于其高活性而自身发生转化。新碳的矿化比例比土壤原有有机碳的矿化比例要大得多,而且新碳在矿化结束后,有 80%~90% 被累积固定到土壤中,这说明作物光合同化碳的输入对稻田土壤的碳积累和固定有积极的作用。

4 结论

综上所述,水稻收获后,通过根际沉积作用,输入土壤中的“新碳”组分由于活性较高容易发生矿化。不同土壤类型中,其各组分的矿化速率和矿化量差异显著。在整个培养过程中(100 d),有 13.5%~20.2% 的新碳被矿化分解,而原有有机碳仅有

3% 被矿化分解,这说明新碳的输入对提高土壤的碳汇具有相当大的作用。因此,水稻光合同化碳的输入,有利于 SOC 的积累,这对提高稻田土壤生产力、维护大气碳平衡有重要作用。但是,本实验仅仅是在室内模拟条件下进行的,野外的大田试验还需要作更深入的研究。

参考文献:

- [1] Sagar S, Hedley C, Mackay A D. Partitioning and translocation of photosynthetically fixed ¹⁴C 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] Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls[J]. *Agronomie*, 2003, **23**(5-6): 375-396.
- [4] 何敏毅,孟凡乔,史雅娟. 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.
- [5] 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.
- [6] 王娟,张丽君,姚槐应. 添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及土壤微生物代谢图谱的影响[J]. *中国水稻科学*, 2013, **27**(1): 97-104.
- [7] 张鹏,李涵,贾至宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(12): 2518-2525.
- [8] 张旭博,徐明岗,林昌虎,等. 施肥对红壤有机碳矿化特征的影响[J]. *贵州农业科学*, 2011, **39**(6): 99-102, 106.
- [9] Huetsch 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.
- [10] 李小丽. 根际沉积碳研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2008, (6): 171-173.
- [11] 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.
- [12] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, **164**: 80-99.
- [13] 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 & Biochemistry*, 2012, **48**: 39-46.
- [14] 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.
- [15] Wu J S, 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.
- [16] Wu J S, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: An

- automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [17] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(4): 544-552.
- [18] 李忠佩, 林心雄. 田间条件下红壤水稻土有机碳的矿化量研究[J]. *土壤*, 2002, **34**(6): 310-314.
- [19] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后枯落物对土壤的影响[J]. *林业科学*, 2007, **43**(7): 112-119.
- [20] Ellert B H, Gregoirch E G. Management-induced changes in the actively cycling fractions of soil organic matter[A]. In: Mcfee W W, Kelly JM(eds). *Carbon Forms and Functions in Forest Soils* [C]. Wisconsin, Madison, USA: Soil Science Society of America, Inc, 1995. 119-138.
- [21] Cepeda C T, Leirós C, Sotres F G, *et al.* Towards a biochemical quality index for soils: an expression relating several biological and biochemical properties[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **26**(2): 100-106.
- [22] Sanderman J, Amundson R. A comparative study of dissolved organic carbon transport and stabilization in California forest and grassland soils[J]. *Biogeochemistry*, 2009, **92**(1-2): 41-59.
- [23] 童成立, 张文菊, 王洪庆, 等. 三江平原湿地沉积物有机碳与水分的关系[J]. *环境科学*, 2005, **26**(6): 38-42.
- [24] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós MC, *et al.* Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, **37**(5): 877-887.
- [25] Six J, Frey S D, Thiet R K, *et al.* Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in Agroecosystems[J]. *Soil Science of Society America Journal*, 2006, **70**(2): 555-569.
- [26] Blume E, Bischoff M, Reichert J M, *et al.* Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, **20**(3): 171-181.
- [27] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, **163**(4): 421-431.
- [28] Hamer U, Marschner B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(3): 445-454.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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