

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究 郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)

北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征 于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)

奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析 张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)

华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素 苏彬彬 (2519)

北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究 方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)

民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)

醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究 张凡, 王建华, 王小臣, 王建昕 (2539)

微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究 曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)

生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析 李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)

炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究 周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)

春季东、黄海溶解甲烷的分布和海水交换通量 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)

千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)

新安江流域土地利用结构对水质的影响 曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)

长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析 孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)

河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性 杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)

水藻暴发的影响因素定量化研究初步 张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)

深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响 卢金锁, 胡亚潘 (2611)

结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度 周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)

Subwet 模型在人工湿地设计中的应用 李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)

白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应 何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响 许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周锋 (2642)

铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究 汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)

铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究 杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)

不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响 赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)

邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H₂O₂ 降解机制研究 刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)

二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd²⁺ 离子的吸附研究 张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)

酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附 蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)

基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni²⁺ 的吸附性能 张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)

树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐 王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)

Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究 朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)

化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究 王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)

镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究 陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)

HRT 对 A²O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响 刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)

发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟 张超, 陈银广 (2741)

强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究 熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)

污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响 周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)

不同粒径铁铝泥对砷(III)的吸附效果 林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)

我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)

浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离 徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)

三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响 张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)

吉林前郭水田土壤有机碳垂向分布规律和储量研究 汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)

关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例 张晓伟, 许明祥 (2793)

三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究 黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)

土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴C 连续标记法 史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)

西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)

丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价 李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)

农药企业场地苯系物污染风险及调控对策 虎博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)

水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)

硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响 刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)

零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用 周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)

2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果 全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)

反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别 刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)

1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究 张倩, 王弘宇, 桑稳姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)

1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究 陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)

微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解 张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)

扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究 周际海, 孙向婷, 胡锋, 李辉信 (2894)

固定化 *Lysinibacillus cresolovorans* 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解 李婷, 任源, 韦朝海 (2899)

生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析 黄翔峰, 张树聪, 彭开铭, 陆卫君, 刘佳 (2906)

A²O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞微, 白志辉 (2912)

生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)

专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)

土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究：¹⁴C连续标记法

史然^{1,2}, 陈晓娟², 吴小红², 简燕², 袁红朝², 葛体达^{2*}, 隋方功^{1*}, 童成立², 吴金水²

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所农业生态系统过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 自养微生物在土壤中广泛存在, 但其 CO₂ 同化能力及其向土壤碳库的输入机制尚不明确. 应用¹⁴C连续标记示踪技术, 选取亚热带区4种典型稻田土壤在密闭系统模拟培养, 探讨了土壤自养微生物同化碳向土壤碳库的输入过程和机制及其对土壤碳库活性组分的影响. 结果表明, 土壤微生物具有客观的 CO₂ 同化能力. 标记培养 110 d 后, 供试土壤的¹⁴C-SOC 含量范围为 69.06 ~ 133.81 mg·kg⁻¹, 而¹⁴C-DOC、¹⁴C-MBC 含量范围为 2.54 ~ 8.10 mg·kg⁻¹、19.50 ~ 49.16 mg·kg⁻¹. 土壤自养微生物同化碳(¹⁴C-SOC)与其微生物截留碳(¹⁴C-MBC)呈极显著的正相关关系. 土壤可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)和SOC的更新率分别为 5.65% ~ 24.91%、4.23% ~ 20.02% 和 0.58% ~ 0.92%. 而且, 土壤自养微生物同化碳的输入对土壤活性碳组分的 DOC、MBC 含量变化影响较大, 而对 SOC 影响较小. 对微生物在土壤碳循环过程的基本功能的认识在本研究中得以丰富和加深.

关键词: 土壤自养微生物; CO₂ 同化; 同化碳; ¹⁴C 连续标记; 稻田土壤

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2809-06

Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴C Labeling

SHI Ran^{1,2}, CHEN Xiao-juan², WU Xiao-hong², JIAN Yan², YUAN Hong-zhao², GE Ti-da², SUI Fang-gong¹, TONG Cheng-li², WU Jin-shui²

(1. School of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: Soil autotrophic microbe has been found numerous and widespread. However, roles of microbial autotrophic processes and the mechanisms of that in the soil carbon sequestration remain poorly understood. Here, we used soils incubated for 110 days in a closed, continuously labeled ¹⁴C-CO₂ atmosphere to measure the amount of labeled C incorporated into the microbial biomass. The allocation of ¹⁴C-labeled assimilated carbon in variable soil C pools such as dissolved organic C (DOC) and microbial biomass C (MBC) were also examined over the ¹⁴C labeling span. The results showed that significant amounts of ¹⁴C-SOC were measured in paddy soils, which ranged from 69.06-133.81 mg·kg⁻¹, accounting for 0.58% to 0.92% of the total soil organic carbon (SOC). The amounts of ¹⁴C in the dissolved organic C (¹⁴C-DOC) and in the microbial biomass C (¹⁴C-MBC) were dependent on the soils, ranged from 2.54 to 8.10 mg·kg⁻¹, 19.50 to 49.16 mg·kg⁻¹, respectively. There was a significantly positive linear relationship between concentrations of ¹⁴C-SOC and ¹⁴C-MBC ($R^2 = 0.957^{**}$, $P < 0.01$). The ¹⁴C-DOC and ¹⁴C-MBC as proportions of total DOC, MBC, were 5.65% - 24.91% and 4.23% - 20.02%, respectively. Moreover, the distribution and transformation of microbes-assimilated-derived C had a greater influence on the dynamics of DOC and MBC than that on the dynamics of SOC. These data provide new insights into the importance of microorganisms in the fixation of atmospheric CO₂ and of the potentially significant contributions made by microbial autotrophy to terrestrial C cycling.

Key words: soil autotrophic microbes; CO₂ assimilation; assimilated carbon; ¹⁴C continuous labeling; paddy soil

工业革命以来, 大气中二氧化碳浓度增加, 全球变暖日益加剧, 已引起了一系列严重问题. 大气“温室效应”是全球环境问题中最重要且亟待解决的问题之一^[1,2]. 利用陆地生态系统的大气 CO₂ 同化功能(生物固碳)增强碳固定, 是目前应对气候变化最经济、有效的途径^[3]. 生物固碳是通过植物或微生物的碳同化途径, 将 CO₂ 转化成有机物质, 以提高

生态系统的碳吸收和储存能力^[4]. 同化 CO₂ 的生物

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271279; 41090283); 湖南省自然科学基金项目(11JJ4030); 中国科学院青年创新促进会会员项目(2012-2015); 中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室开放基金项目(2010-2012)

作者简介: 史然(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; fgui@qau.edu.cn

主要是植物和自养微生物。然而,在生物同化大气 CO₂ 过程的研究中,目前大部分研究都集中在植被固碳(NPP)及其对土壤有机碳累积的贡献。而自养微生物广泛分布于不同的生态系统中,具有很强的环境适应能力,可以在多种环境条件下如火山、海洋深处、极地湖泊^[5-7]等植物无法生存的生境中参与 CO₂ 的同化。因而,从整个生物圈的物质和能量流角度来研究自养微生物的 CO₂ 同化功能及其同化碳的转化对于完善碳循环理论具有重要意义。

近年来,有关湖泊^[8]、地下水^[9]、海洋^[10]和深海盆地^[11]等水生生态系统中自养微生物的碳同化能力及其多样性的研究已取得较大进展。Cannon 等^[12]指出,水体/海洋吸收固定大气 CO₂ 的 40% 是由自养微生物同化完成的,自养微生物是水体/海洋生态系统的初级生产者。自养微生物在水体/海洋碳同化过程中起着不可忽视的作用。同样地,在农田生态系统也发现了很多新的自养微生物的广泛存在^[13-15],本研究分析了不施肥(CK),氮磷钾肥(NPK)和氮磷钾肥结合秸秆还田(NPKS)这 3 种长期施肥制度对稻田土壤固碳自养菌群落结构及数量的影响,结果表明长期施肥导致土壤碳同化自养菌种群结构产生了明显差异,NPK 和 NPKS 处理中兼性自养碳同化菌群落优势增加而严格自养固碳菌生长受到抑制,而且通过分析固碳细菌 *cbbL* 基因文库发现,供试土壤 *cbbL* 含有的细菌群落以兼性自养菌为主^[15]。但这些自养微生物在土壤碳循环中所起的具体作用和贡献有待进一步研究和验证。而且,陆地生态系统碳循环的不确定性最大。因为陆地生态系统主要由植被和土壤两个碳库组成,是一个植被-土壤-气候相互作用的复杂大系统,内部各子系统之间及其与大气之间存在着复杂的相互作用和反馈机制,各种数据较难获得,对土壤固碳潜力及其关键过程的认识明显不足^[3, 16]。然而,目前有关土壤中自养微生物的碳同化能力及其向土壤有机碳库的输入研究鲜见报道。

碳同位素作为研究土壤碳循环的理想示踪剂始于 70 年代末期^[16],之后得以广泛应用。其中¹⁴C 示踪方法,能有效地阐明地下碳动态变化和土壤碳储量的微小迁移与转换,以及定量化评价新老土壤有机碳对碳储量的相对贡献,是研究土壤有机碳动态过程的强有力工具,并常被用来示踪土壤有机碳的来源和周转过程^[17,18]。因此,本研究选取亚热带典型稻田土壤,运用¹⁴C 连续示踪技术结合室内模拟培养实验,定量分析了土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库的输入及其在土壤活性碳库中的分配特征,揭示了土壤微生物对 CO₂ 的同化能力及碳同化潜力,以期深入了解陆地生态系统碳循环过程以及全球碳平衡估算提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及前处理

实验选取亚热带地区 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、P2)、常德市(P3、P4)2 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 NaH₂PO₄ 和 KCl 混合液,施入的 N、P、K 量分别为 20、20 和 80 mg·kg⁻¹土,将土壤混匀分装于 PVC 圆柱形钵(高 20 cm,直径 10 cm)中,装入量每钵相当于烘干重 1.00 kg 土壤。同时加去离子水至水层深度 1~2 cm,PVC 钵钵表面用透明穿孔塑料薄片遮盖,防止浮萍等水生植物生长。供试土壤基本理化性质见表 1,供试土壤的轮作制度、施肥、耕作、前茬作物等详细信息见文献^[19,20]。

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	全碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	碳氮比 (C:N)	pH ¹⁾	阳离子交换量 (CEC) /mol·kg ⁻¹	可溶性碳 (DOC) /mg·kg ⁻¹	微生物量碳 (MBC) /mg·kg ⁻¹
P1	21.89	2.64	9.4	6.15	11.79	56.64	616.12
P2	17.03	2.52	11.2	5.09	5.60	54.29	617.62
P3	20.93	2.81	9.4	5.66	13.16	57.67	951.17
P4	6.64	1.44	9.5	5.79	7.96	51.73	97.43

1) 土壤 pH 测定的浸提剂是水,水土比为 2.5:1

1.2 ^{14}C - CO_2 连续标记的土壤培养实验

实验设置上述 4 种稻田土壤的 4 个处理 P1、P2、P3 和 P4, 每个处理重复 5 次. 土壤培养采用同位素连续标记法进行. 连续标记法是指在整个培养期间, 在特殊的标记室中对土壤样品进行不间断的标记, 由于该法持续时间长, 碳同位素的分配代表了整个培养期间的分配, 得到的数据比较可靠. 因此, 本研究采用了 ^{14}C 连续标记. 培养装置和方法参考文献[19,20]建立的方法. 简言之, 将上述已经准备好的土壤置于封闭箱体(专利号 No. ZL2006100197402, 宽×长 70 cm×250 cm, 高 150 cm; 图 1)中, 2010 年 10 月 18 日开始标记, 连续标记 110 d. 培养箱内温度设定为白天 $31^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 晚上 $24^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 每天光照 12 h (从 08:00 ~ 20:00), 相对湿度 80% ~ 90%, 光照强度 $500 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ PAR. 标记过程中, 补充去离子水维持稻田土壤水层深度 1 ~ 2 cm 基本不变. ^{14}C - CO_2 通过 ^{14}C - NaHCO_3 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $16.5 (10^3 \text{ Bq} \cdot \text{mL}^{-1})$) 和 HCl ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 反应自动产生. 每周向培养箱加入 200 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^{14}C - NaHCO_3 溶液, 通过控制加入量使标记箱内 CO_2 摩尔分数维持在 $270 \sim 350 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1.3 测定和分析方法

标记培养实验结束, 采集 PVC 塑料盆钵中的供试土壤样品并充分混匀, 一份立即处理, 用于测定 ^{14}C -DOC 和 ^{14}C -MBC 含量; 一份室内自然风干后, 磨碎过 100 目筛, 用于 ^{14}C -SOC 含量的测定.

土壤总有机碳中 ^{14}C 放射性强度采用文献[21]的方法测定, 土壤 DOC 采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 直接浸提, 土壤 MBC 采用氯仿熏蒸- $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 提取法, ^{14}C -DOC 和 ^{14}C -MBC 含量测定参见文献[19,20]的方法进行.

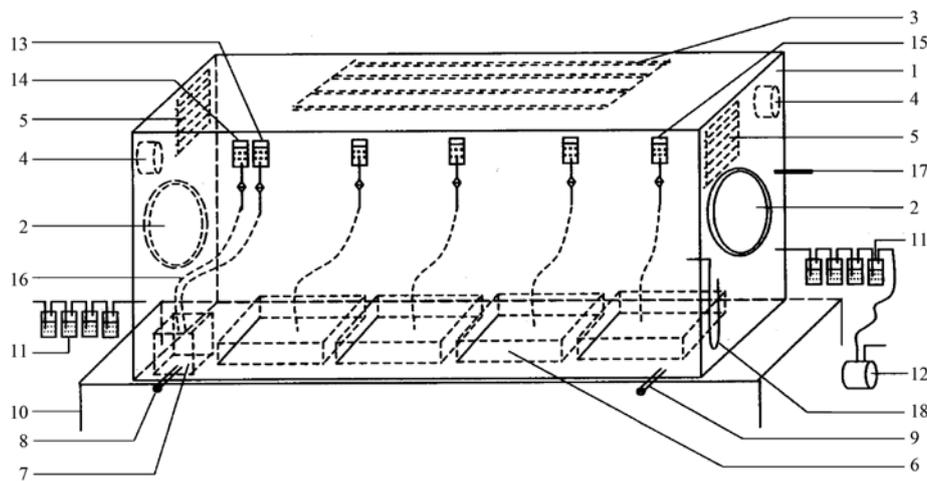
表层(0 ~ 20 cm)土壤微生物碳同化速率:

$$RS = c_{\text{soc}} ([1/(3.14 \times (D/2)^2)]/t)$$

式中, RS 是土壤碳同化速率 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], c_{soc} 是标记培养 110 d 后, 土壤 ^{14}C -SOC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), D 为实验用 PVC 管的内径 (m), t 为连续标记时间 (110 d).

土壤 MBC、DOC 和 SOC 中来源于土壤自养微生物同化作用的“新碳”(^{14}C) 占 MBC、DOC 和 SOC 的比例称为土壤 MBC、DOC 和 SOC 的更新率^[22].

数据统计分析采用 SPSS 13.0 for Windows 和 Microsoft Excel 2000 软件进行. 差异显著性用 One-way ANOVA (一维方差) 分析, 多重比较采用 Duncan 法, 相关性采用皮尔森指数 (Pearson) 分析.



1. 箱体; 2. 箱门; 3. 组合光照; 4. 电风扇; 5. 冷却管; 6. 栽培盘; 7. 反应槽; 8. 反应残液排出管; 9. 冷凝水排出管; 10. 箱架; 11. 吸附瓶; 12. 无油真空泵; 13. HCl 溶液输液瓶; 14. ^{14}C - Na_2CO_3 溶液输液瓶; 15. 水或营养液输液瓶; 16. 输液管; 17. 温度、 CO_2 和 O_2 浓度监测传感器; 18. 压力计

图 1 碳同位素连续标记装置示意

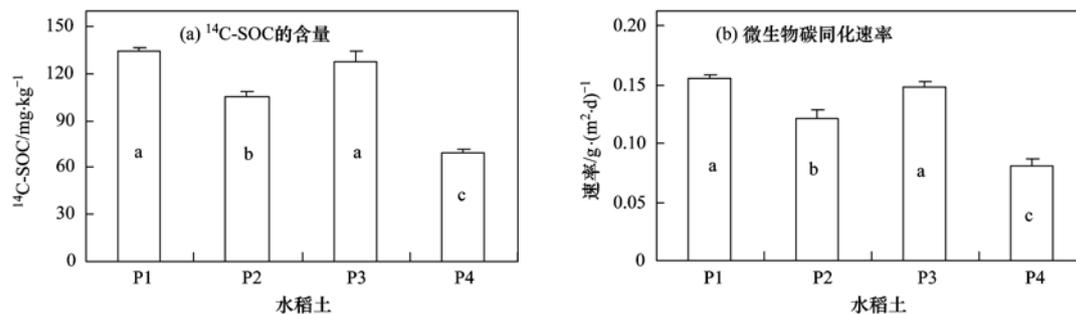
Fig. 1 Schematic diagram of the soil ^{14}C -labelling and incubation system used in this study

2 结果与分析

2.1 土壤 ^{14}C -SOC 含量及其碳同化速率

^{14}C - CO_2 连续标记 110 d 后, 不同土壤的 ^{14}C -SOC 的含量为 69.06 (P4) ~ 133.81.61 (P1) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图

2(a)]. 不同类型土壤 ^{14}C -SOC 含量差异显著 ($P < 0.05$), 表现为 $P1 > P3 > P2 > P4$. 类似地, 培养 110 d 后, 根据估算, 在本实验条件下, 表层土壤 (0 ~ 20 cm) 土壤微生物碳同化速率为 $0.08 \sim 0.15 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 4 个供试稻田土壤的平均碳同化速率



图中不同字母表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

图2 $^{14}\text{C-CO}_2$ 连续标记 110 d 后,不同处理中土壤 $^{14}\text{C-SOC}$ 的含量及其土壤微生物碳同化速率

Fig. 2 Content of $^{14}\text{C-SOC}$ and soil microbial carbon assimilated rate after 110-d $^{14}\text{C-CO}_2$ continuous labeling

为 $0.13 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ [图 2(b)].

2.2 土壤 $^{14}\text{C-DOC}$ 、 $^{14}\text{C-MBC}$ 含量

不同土壤条件下, $^{14}\text{C-CO}_2$ 连续标记 110 d 后,土壤 $^{14}\text{C-DOC}$ 、 $^{14}\text{C-MBC}$ 含量见图 3. 供试土壤的 $^{14}\text{C-DOC}$ 、 $^{14}\text{C-MBC}$ 含量分别为 2.54 (P4) ~ 8.10 (P1) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、19.50 (P4) ~ 49.16 (P1) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各处

理差异达显著水平 ($P < 0.05$), $^{14}\text{C-DOC}$ 含量表现为 $\text{P1} > \text{P2} > \text{P3} > \text{P4}$, 而 $^{14}\text{C-MBC}$ 含量则表现为 $\text{P1} > \text{P3} > \text{P2} > \text{P4}$ (图 3). 另外,相关性分析表明,土壤自养微生物同化碳 ($^{14}\text{C-SOC}$) 与其微生物截留碳 ($^{14}\text{C-MBC}$) 呈极显著的正相关关系 ($R^2 = 0.957^{**}$, $n = 4$).

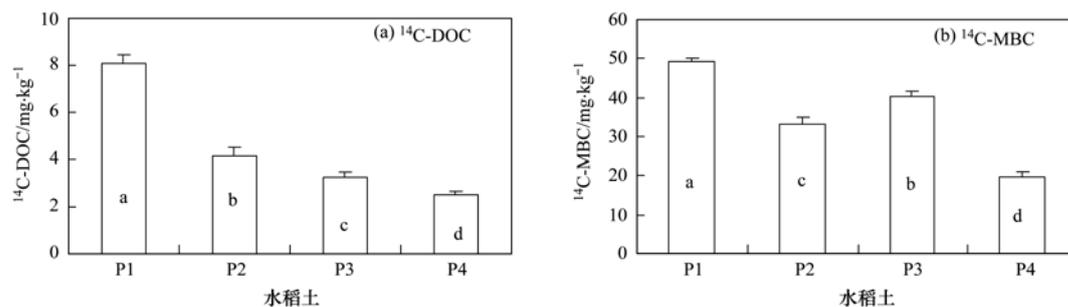


图3 $^{14}\text{C-CO}_2$ 连续标记 110 d 后,不同处理中土壤 $^{14}\text{C-DOC}$ 与 $^{14}\text{C-MBC}$ 含量

Fig. 3 Content of soil $^{14}\text{C-DOC}$ and $^{14}\text{C-MBC}$ in different paddy soils after 110-d $^{14}\text{C-CO}_2$ continuous labeling

2.3 土壤自养微生物同化碳在土壤 DOC、MBC 和 SOC 的更新率

土壤 $^{14}\text{C-CO}_2$ 连续标记培养 110 d 后,不同土壤条件下 MBC 的更新率 ($^{14}\text{C-MBC}/\text{MBC}$) 为 4.23% ~ 20.02%, 处理间土壤自养微生物同化碳对土壤 MBC 的贡献大小为 $\text{P4} > \text{P1} > \text{P2} > \text{P3}$; 土壤 DOC 的更新率 ($^{14}\text{C-DOC}/\text{DOC}$) 为 5.65% ~ 24.91%; 而土壤 SOC 的更新率 ($^{14}\text{C-SOC}/\text{SOC}$) 为 0.58% ~ 0.92% (表 2), 可见,在 110 d 的标记培养期内,来源于土壤自养微生物同化碳的新鲜土壤有机碳含量非常少. 由表 2 还可以看出,相同土壤条件下,土壤 DOC 的更新率均大于 MBC 的更新率,表明土壤自养微生物同化碳对土壤 DOC 的周转影响比 MBC 大,这可能与土壤自养微生物同化碳首先进入 DOC 库,然后被土壤微生物利用有关.

表 2 不同土壤条件下水稻光合同化碳在土壤 DOC、MBC 和 SOC 的更新率¹⁾/%

Table 2 Renewal rates of soil DOC, MBC and SOC in different paddy soils/%

处理	$^{14}\text{C-MBC}/\text{MBC}$	$^{14}\text{C-DOC}/\text{DOC}$	$^{14}\text{C-SOC}/\text{SOC}$
P1	7.98 ± 0.19 b	14.30 ± 0.29a	0.64 ± 0.01 b
P2	5.39 ± 0.41 c	7.70 ± 0.61b	0.58 ± 0.02 b
P3	4.23 ± 0.31 c	5.65 ± 0.27c	0.62 ± 0.05 b
P4	20.02 ± 1.32 a	24.91 ± 0.46c	0.92 ± 0.03 a

1) 表中不同字母表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

3 讨论

土壤微生物具有吸收同化二氧化碳的巨大潜力. Dong 等^[23] 发现豆科植物根瘤附近 CO_2 浓度呈现负增长趋势,推测可能根瘤菌参与了 CO_2 同化过程,而这种固碳作用超过了微生物的呼吸作用,相似的现象被 Steind 等^[24] 在高 H_2 浓度的根际土壤中观

察到,而这种主要固碳细菌类群为氢氧化化能自养菌. Miltner 等^[14]通过 ^{14}C - CO_2 示踪实验发现,黑暗条件下,培养 6 周后,土壤中 ^{14}C -SOC 占在培养前土壤总 SOC 的 0.05% 左右,并推测土壤(黑暗条件下)非光合碳同化过程主要是由于好氧异养微生物主导^[14]. 然而,本研究通过 110 d 的 ^{14}C - CO_2 连续标记,发现供试土壤的 ^{14}C -SOC 含量范围为 69.06 ~ 133.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{14}C -SOC 占土壤总 SOC 的 0.58% ~ 0.92% 之间(图 2,表 2). 笔者以往的研究表明在黑暗培养条件下,土壤中几乎无 ^{14}C 标记碳被土壤微生物同化, ^{14}C 标记的碳仅在光照土壤中检测到^[15]. 而且相关性分析结果表明,连续 110 d 的 ^{14}C - CO_2 标记的光照土壤 ^{14}C -MBC 与 ^{14}C -SOC 之间存在极显著正相关关系($R^2 = 0.957^{**}$, $P < 0.01$). 因此,在本实验条件下(光照条件),土壤微生物碳同化主要为自养过程,而参与该过程的微生物包括光能和化能自养菌及藻类,而非异养微生物. 而且,笔者在以往的研究通过 PCR 克隆测序, T-RFLP 及实时荧光定量 PCR 等分子生物学技术表明,农田土壤碳同化细菌主要为兼性自养菌,包括蓝细菌、红螺菌、红环菌、红假单胞菌等光合细菌及慢生根瘤菌,产碱杆菌和劳尔氏菌等兼性化能自养菌,而严格化能自养菌所占比例较少,主要细菌类群为亚硝化螺菌、硫氧化菌、硫杆菌、硝化杆菌^[15].

同时,笔者根据估算,供试土壤的碳同化速率约为 0.08 ~ 0.15 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ (图 2),可以看出土壤微生物碳同化量在全球陆地生态碳平衡研究中是不可忽视的,对提高生态系统的碳吸收和储存能力有着重要意义. 该结果改变了对微生物在陆地生态系统碳循环中仅担负有机质分解、矿化功能的长期认识,丰富了微生物的基本功能及其在土壤碳循环中作用的认识. 但是,由于目前土壤自养微生物的 CO_2 同化功能及其固碳潜力尚未被纳入陆地生态系统碳循环过程,因此有关土壤自养微生物的碳同化功能研究对于阐明“迷失的碳汇”、“土壤固碳过程与机制”等科学问题非常重要.

土壤 DOC 和 MBC 是土壤快库碳中新碳的主要归宿,与土壤呼吸释放 CO_2 、 CH_4 有着密切的关系^[25]. 进入土壤的同化碳(新碳)在土壤碳库中的矿化、转化与其稳定性有关,因此在固碳中有十分重要的作用. Liang 等^[25]采用盆栽方法通过 ^{13}C 稳定性同位素技术研究了玉米新碳在碳库中的分布,认为水溶性有机碳(DOC)和微生物碳(MBC)是新碳的主要去向. DOC 是易被土壤微生物吸收利用的

有机碳组分,10% ~ 56% 的土壤 DOC 具有生物有效性^[26],外源有机底物所含的 DOC 生物有效性更高,30% ~ 95% 的 DOC 组分可在 3 个月内被土壤微生物消耗掉^[27]. 土壤微生物对 DOC 作用的持续时间不长,其中小分子 DOC 的周转时间只有数十小时^[28]. 本研究中,110 d 的标记培养期内土壤 DOC 与 MBC 的更新率分别 5.65% ~ 24.91%、4.23% ~ 20.02%,比土壤有机碳更新率大得多(表 2),表明自养微生物同化碳的输入对土壤 DOC、MBC 含量变化影响较大,这与前人研究基本一致^[29,30]. 然而,Ge 等^[20]对 ^{14}C 连续标记 80 d 后,裸土对照处理的 ^{14}C -DOC/DOC、 ^{14}C -MBC/MBC 比值分别为 0.45% ~ 8.87% 和 0.59% ~ 8.94%,造成这种差异可能与供试土壤类型、示踪期长短等因素有关.

土壤微生物对大气 CO_2 的同化过程作为碳循环的一个重要环节,是由土壤中具有碳同化能力的自养微生物所调控的生物化学过程. 然而,本研究仅对 4 种不同类型的稻田土壤微生物碳同化能力展开了一些研究,而土壤微生物分布具有明显的地带性,因此选择更多具有代表性的土壤,继续深入研究不同类型土壤微生物碳同化能力,以便深入理解土壤自养微生物 CO_2 同化功能是否具有普遍性,其对陆地生态系统碳同化的贡献如何? 环境条件又是如何影响自养微生物 CO_2 同化速率的? 这些问题都需要做进一步的研究.

4 结论

(1) 土壤自养微生物具有可观的 CO_2 同化能力. ^{14}C - CO_2 连续标记 110 d 后,供试土壤的 ^{14}C -SOC 含量范围为 69.06 ~ 133.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 据估算,土壤微生物碳同化速率为 0.08 ~ 0.15 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

(2) 新输入的自养微生物同化碳参与土壤碳循环,影响土壤活性碳组分的变化. ^{14}C - CO_2 连续标记 110 d 后,供试土壤的 ^{14}C -DOC、 ^{14}C -MBC 含量范围为 2.54 ~ 8.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、19.50 ~ 49.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(3) 土壤 DOC、MBC 和 SOC 的更新率分别为 5.65% ~ 24.91%、4.23% ~ 20.02% 和 0.58% ~ 0.92%. 自养微生物同化碳的输入对土壤活性碳组分的 DOC、MBC 含量变化影响较大,而对 SOC 影响较小.

参考文献:

- [1] Booth B B B, Jones C D, Collin M, *et al.* Global warming uncertainties due to carbon cycle feedbacks exceed those due to CO_2 emissions[J]. *Nature*, 2009, **11**: 4179.

- [2] Zevenhoven R, Eloneva S, Teir S. Chemical fixation of CO₂ in carbonates: Routes to valuable products and long-term storage [J]. *Catalysis Today*, 2006, **115**(1-4): 73-79.
- [3] IPCC. In *Climate change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability* [C]. Working Group II. Geneva, Switzerland, 2007.
- [4] Boyle N R, Morgan J A. Computation of metabolic fluxes and efficiencies for biological carbon dioxide fixation [J]. *Metabolic Engineering*, 2011, **13**(2): 150-158.
- [5] Nanba K, King G M, Dunfield K. Analysis of facultative lithotrophic distribution and diversity on volcanic deposits by use of the large subunit of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(4): 2245-2253.
- [6] Tourova T P, Kovaleva O L, Sorokin D Y, *et al.* Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase genes as a functional marker for chemolithoautotrophic halophilic sulfur-oxidizing bacteria in hypersaline habitats [J]. *Microbiology*, 2010, **156**(7): 2016-2025.
- [7] Kong W D, Ream D C, Priscu J C, *et al.* Diversity and expression of RubisCO genes in a perennially ice-covered Antarctic lake during the polar night transition [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(12): 4358-4366.
- [8] Nigro L M, King G M. Disparate distributions of chemolithotrophs containing form IA or IC large subunit genes for ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in intertidal marine and littoral lake sediments [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **60**(1): 113-125.
- [9] Alfreider A, Vogt C, Geiger-Kaiser M, *et al.* Distribution and diversity of autotrophic bacteria in groundwater systems based on the analysis of RubisCO genotypes [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2009, **32**(2): 140-150.
- [10] Elsaied H E, Kaneko R, Naganuma T. Molecular characterization of a deep-sea methanotrophic mussel symbiont that carries a RuBisCO gene [J]. *Marine Biotechnology*, 2006, **8**(5): 511-520.
- [11] Van der Wielen P W. Diversity of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large-subunit genes in the MgCl₂-dominated deep hypersaline anoxic basin discovery [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, **259**(2): 326-331.
- [12] Cannon G C, Bradburne C E, Aldrich H C, *et al.* Microcompartments in prokaryotes: carboxysomes and related polyhedra [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(12): 5351-5361.
- [13] Selesi D, Schmid M, Hartmann A. Diversity of green-like and red-like ribulose 1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large-subunit genes (*cbbL*) in differently managed agricultural soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **17**(1): 175-184.
- [14] Miltner A, Kopinke F D, Kindler R, *et al.* Non-photosynthetic CO₂ fixation by soil microorganisms [J]. *Plant and Soil*, 2005, **269**(1-2): 193-203.
- [15] Yuan H Z, Ge T D, Chen C Y, *et al.* Significant role for Microbial autotrophy in the sequestration of soil carbon [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(7): 2328-2336.
- [16] Del Galdo I, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(8): 1204-1213.
- [17] Trumbore S E, Vogel J S, Southon J R. AMS (super 14) C measurements of fractionated soil organic matter; an approach to deciphering the soil carbon cycle [J]. *Radiocarbon*, 2006, **31**(3): 644-654.
- [18] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, *et al.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(2): 210-219.
- [19] 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.
- [20] 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**: 39-49.
- [21] 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.
- [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] Dong Z, Layzell D. H₂ oxidation, O₂ uptake and CO₂ fixation in hydrogen treated soils [J]. *Plant and Soil*, 2001, **229**(1): 1-12.
- [24] Stein S, Selesi D, Schilling R, *et al.* Microbial activity and bacterial composition of H₂-treated soils with net CO₂ fixation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(10): 1938-1945.
- [25] 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.
- [26] McDowell W H, Zsolnay A, Aitkenhead-Peterson J A, *et al.* A comparison of methods to determine the biodegradable dissolved organic carbon from different terrestrial sources [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(7): 1933-1942.
- [27] Don A, Kalbitz K. Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(12): 2171-2179.
- [28] Ge T D, Huang D F, Roberts P, *et al.* Dynamics of nitrogen speciation in horticultural soils in suburbs of Shanghai, China [J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(2): 261-272.
- [29] 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.
- [30] 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.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophytic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yu, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qiangou, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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