

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征

李苗苗^{1,2}, 聂三安², 陈晓娟², 罗璐¹, 朱捍华², 石辉^{1*}, 葛体达^{2*}, 童成立², 吴金水²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 水稻生长影响土壤有机质在土壤及其各组分中的分布, 是关系土壤有机质储量的重要因子. 为量化水稻光合同化碳在土壤不同粒径和密度组分中的分布, 进而为水稻土有机质积累持续机制与固碳潜力研究提供数据支撑, 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, 通过土壤有机质物理分组方法探讨了水稻根际输入的光合碳在土壤物理组分(粒径、密度)中的含量和分配特征. 结果表明, 水稻标记种植80 d后, 250~2 000 μm粒径的SOC¹⁴含量范围为118.23~309.94 mg·kg⁻¹, SOC¹⁴/SOC的比例范围为0.52%~1.55%, 均大于20~250 μm、<20 μm这2个粒径的SOC¹⁴含量和SOC¹⁴/SOC的比例, 250~2 000 μm、20~250 μm这2个粒径的轻组组分的SOC¹⁴含量均显著大于相应的重组组分的SOC¹⁴含量, 说明稻田生态系统通过水稻的根际沉积作用将有机碳(水稻光合同化碳)主要固定在大粒径的轻组组分中, 从而提高了土壤有机碳含量. 相关分析表明, 250~2 000 μm粒径与其轻、重组组分、<20 μm粒径、20~250 μm粒径的SOC¹⁴含量之间均呈显著性正相关, 而<20 μm、20~250 μm粒径的轻组组分的SOC¹⁴含量之间呈极显著性负相关.

关键词: 水稻; 光合同化碳; 根际沉积; 粒径; 密度; 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(2013)04-1568-08

Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density

LI Miao-miao^{1,2}, NIE San-an², CHEN Xiao-juan², LUO Lu¹, ZHU Han-hua², SHI Hui¹, GE Ti-da², TONG Cheng-li², WU Jin-shui²

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: Rice growth affects the distribution of organic matter in soils and soil fractions, and is thus an important factor to control the storage of soil organic matter. The aims of our study were to quantify the photosynthesized C in soil fraction pools of different size and density during the rice growth, and also to offer data evidence not only in the mechanisms of SOC accumulation, but also in C sequestration potential in paddy soils. Therefore, the microcosm experiment was carried out to quantify the input and distribution of photo-assimilated carbon (C) in soils size and density aggregates pools by using continuous ¹⁴C labeling technique. Destructive samplings of rice (*Oryza sativa*) were conducted after labeling for 80 days. The allocation of ¹⁴C-labeled photosynthates in soil C pools was examined in rice-planted soil over the ¹⁴C labeling span using the size (250-2 000 μm, 20-250 μm, <20 μm) and density (light and heavy) fractionation procedure. The amount of ¹⁴C in the soil organic C (SOC¹⁴) in the 250-2 000 μm particle size was dependent on the soils, ranged from 118.23 mg·kg⁻¹ to 309.94 mg·kg⁻¹, accounting for 0.52%-1.55% of its SOC, respectively, which was much larger than those of aggregates with the other two sizes (20-250 μm, <20 μm). Moreover, the amounts of SOC¹⁴ in light fractions of 250-2 000 μm and 20-250 μm particle size aggregate were significantly greater than those in their heavy fractions (*P* < 0.05). The data suggested that rice photosynthesize C mainly entered into the light fraction of 250-2 000 μm particle size aggregate by rhizodeposition, which enhanced the contents of SOC. There was a significant positive correlation between the light and heavy fraction and 250-2000 μm particle size aggregate, 20-250 μm and <20 μm particle size aggregate of SOC¹⁴, although significant negative correlation between light fractions in <20 μm, 20-250 μm aggregates was observed.

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

收稿日期: 2012-07-16; 修订日期: 2012-09-10

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: 李苗苗(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态环境, E-mail: sjtugtd@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: gtd@isa.ac.cn

植物光合作用是陆地和大气间碳循环的驱动力,也是土壤有机碳的重要来源^[1]. 植物光合碳经韧皮部运输分配到地下部用于根系生长,同时以根系沉积物(根系脱落物和根系分泌物)形式向根际土壤环境中输入碳^[2],为根际微生物所利用并成为微生物量碳中的一部分,或以有机质形式储藏于土壤库中. 应用碳同位素技术能够有效地阐明植物光合碳在土壤-作物系统中的流通,揭示作物生长输入土壤的光合固定碳在土壤中的矿化与释放. 何敏毅等^[3]应用¹³C 脉冲技术研究了玉米整个生育期内同化碳在土壤中的分配,发现有近 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. Liang 等^[4]应用¹³C 示踪技术研究盆栽玉米根际新沉积碳在土壤快库碳中的分布,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,因此作物根际碳输入与土壤碳库之间关系密切.

近来,国内外一些研究者应用土壤有机质物理分组结合同位素示踪(¹⁴C)方法研究了土壤有机碳在土壤碳库不同组分及其在微团聚体中的转化与稳定作用机制^[5,6]. Hassink^[6]用标记黑麦草研究了新碳在土壤的粒径分组和比重分组的团聚体中的去向. 结果表明,在初期大部分新碳在 DOC 或轻组大团聚体中,而后期标记新碳主要进入比重较大的大团聚体和微团聚体中; 2 个月培养结束时,大部分残留的¹⁴C 分布在小于 150 μm 的微团聚体中,因而他们认为新碳进入土壤后逐步趋向较细和较重的微团聚体; 同时还发现在小于 20 μm 的微团聚体中的有机碳的矿化与有机碳饱和程度呈反比. Whalen 等^[7]发现不同土壤重组微团聚体基本上未发生有机碳分解,而轻组中 3% 左右的有机碳被微生物分解,因而认为重组微团聚体是有机碳在土壤中的碳汇. Magid 等^[8]在研究¹⁴C 标记的植物物质的分解产物的土壤归宿时,将土壤有机碳库按粒径和比重分成不同组分,推断细的(黏粒级)轻腐殖物质是微生物碳的归宿,而土壤可溶性碳主要是标记¹⁴C. Gale 等^[9]采用模拟免耕培养实验,研究了标记¹⁴C 秸秆和根系物质在 1 a 培养中不同粒级微团聚体中的去向. 结果表明,1 a 后表面秸秆¹⁴C 仅 16% 残留于土壤中,而根系标记¹⁴C 则有 42% 残留(与粉砂和黏粒结合的团聚体¹⁴C 在培养 90 d 后就达到 20% ~ 25%,而颗粒态为 10% ~ 12%),因而认为免耕可将根系有机碳转移至微团聚体中而得以保存,从而提高了土壤有机碳库.

应用碳同位素技术能够有效地阐明作物同化碳

在土壤-作物系统中的流通,揭示作物生长输入土壤的光合同化碳在土壤中的转化与分配^[10]. 目前,有 3 种碳同位素标记有方法用于研究植物转移到土壤中的碳量:脉冲标记法、连续标记法和¹³C 自然丰度法^[11]. 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,植物对标记碳的同化较为一致,得到的数据比脉冲标记可靠. 因此,本研究采用了¹⁴C 连续标记.

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^[12]. 稻田生态系统是一个重要的碳汇,可能是消纳“未知碳”的主要场所之一,对减缓大气 CO₂ 浓度升高起着不可忽视的作用^[13]. 前期的研究表明,近 30 年来我国亚热带区稻田土壤有机碳含量上升趋势,具有明显的碳汇功能^[14],但是目前对稻田土壤碳积累趋势中涉及的固碳过程与作物系统过程关系的认识还严重不足,特别是量化水稻对土壤有机碳输入过程的研究还较少. 因此,本实验在 80 d 水稻生长期间,水稻光合同化碳的分配、转化及其向地下的输入规律^[12,15]的基础上展开,由于以往的研究主要集中于光合同化碳通过根际沉积作用输入土壤有机碳的量化^[3,4],或者是添加外源新鲜有机物质来定量“新碳”在土壤有机碳的分配^[16,17],很少研究水稻光合同化碳(通过根际沉积作用)在不同粒径和密度组分中的分配,因此,本研究主要应用土壤有机质物理分组(粒径、密度)方法探讨水稻根际输入的光合碳在土壤物理组分(粒径、密度)中的含量和分配特征,以为农田土壤有机碳的固定和稳定性的研究提供理论依据.

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)、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 1400 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. 剩余的土壤均匀地喷施 (NH₄)₂SO₄、NaH₂PO₄ 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, 每钵装入量相当于烘干重 1.00 kg 土壤. 实验盆钵是用 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详见文献[15].

1.2 水稻生长及 ^{14}C - CO_2 连续标记

水稻(杂交稻, 中优 169) 田间培养 25 d 后, 选取长势相同的水稻, 小心洗净根系, 移栽至栽培盆中, 每盆 3 株, 平均每株干重为 0.16 g. 然后将栽培盆转移至 ^{14}C 标记箱[箱体尺寸为 2.5 m(长) \times 0.8 m(宽) \times 1.2 m(高)] 进行密闭系统标记培养. 标记实验开始时间从 2009-06-19 ~ 2009-09-07, 共计 80 d. 温度设定为白天(31 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, 晚上(24 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, 每天光照 12 h (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, 每天两次补充去离子水以保持水稻土淹水状态. ^{14}C - CO_2 通过 ^{14}C - NaHCO_3 ($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $16.5 \times 10^3 \text{ Bq}\cdot\text{mL}^{-1}$) 和 HCl ($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 反应自动产生, ^{14}C - NaHCO_3 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 0 ~ 42 d, 每周向栽培箱中加入 300 mL $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ^{14}C - NaHCO_3 溶液, 从标记 43 ~ 80 d, 加入量增加, 每 4 d 加入 ^{14}C - NaHCO_3 溶液 400 mL, 以上各阶段需同时加入相应体积的 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 溶液. 通过控制加入量使标记箱内 CO_2 浓度维持在 $270 \sim 350 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.3 取样

标记培养 80 d 后取出各个处理的土壤, 在自然状态下风干, 过 2 mm 筛, 备用.

1.4 测定和分析方法

土壤粒径分级^[18]: 称过 2 mm 筛 50 g 风干土, 按照水土比 5:1 的比例加水, 搅拌, 放置在超声波清洗仪(300 W) 中处理 15 min, 取出后依次过 250 μm 和 20 μm 筛, 用水洗到水清为止, 砂粒(250 ~ 2000 μm)、细砂(20 ~ 250 μm)、粉黏粒(<20 μm) 通过离心获得, 然后在 60°C 烘干、称重、磨细, 分别测定各级的 SOC^{14} 和 SOC .

土壤密度分级^[19]: 分别称取 250 ~ 2000 μm 和 20 ~ 250 μm 的土壤 50 g 加入密度为 $1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的 NaI 重液, 在往复振荡机上振荡 15 min, 然后以 3000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min, 将上层液体倾倒入抽滤装置中, 进行抽滤, 如此重复两次, 然后用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液清洗滤纸 3 次, 然后用蒸馏水冲洗 3 次, 最后将滤纸上的轻组组分用蒸馏水冲洗到烧杯中,

留在离心管中的为重组组分, 重组用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 反复冲洗, 然后再用蒸馏水冲洗, 直至 NaI 重液被完全冲洗掉为止, 最后在 55°C 烘干, 分别测定轻重组分的 SOC^{14} 和 SOC .

土壤有机碳采用碳氮元素分析仪 (VARIO MAX C/N, 德国) 测定(干烧法).

土壤 SOC^{14} 的测定采用文献[20]的方法: 称取 1.5000 g 土壤样品(烘干重, <100 目) 置于 250 mL 双颈烧瓶中; 分别加入 20 mL 浓度为 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的重铬酸钾和 30 mL 浓硫酸-浓磷酸混合液(体积比为 5:1) 于梨型漏斗中; 加入 5 ~ 10 mL 蒸馏水于缓冲管中; 加入 40 mL $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液于凯氏管中, 将镶嵌于玻璃管上的软泡沫塑料移至 NaOH 溶液中, 使凯氏管中形成气相相位, 保证 CO_2 能被 NaOH 溶液充分吸收. 开启冷凝器上的冷凝水开关; 打开梨型漏斗下部活塞, 挤压塑料瓶使梨型漏斗中的氧化剂缓慢滴入双颈烧瓶中. 加热双颈烧瓶使植物和土壤样品在 165°C 下回流消化, 产生的酸和水蒸气经冷凝管回到双颈烧瓶中, CO_2 气体通过缓冲管进一步纯化后, 进入凯氏管中被 NaOH 溶液充分吸收. 当排入凯氏管中的 CO_2 气体停止约 2 min 时, 打开 O_2 管阀门, 向双颈烧瓶中输入 O_2 , 进一步消化 18 min, 停止加热, 继续通 O_2 约 5 min. 然后停止输入 O_2 , 取下双颈烧瓶和凯氏管. 混合液 ^{14}C 放射性强度采用液体闪烁仪 (LS-6500, Beckman) 测定. 取 1 mL NaOH 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 ^{14}C - CO_2 含量. 土壤中 SOC^{14} 计算公式如下:

$$\text{SOC}^{14} (\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = [(C_s - C_0) \times (40.00/1.00)] / [W_s \times S_{A_s}]$$

式中, C_s 和 C_0 代表样品和空白的每 min 裂变量 (DPM) 的值; S_{A_s} 表示标记底物的 DPM 浓度; 40 为氢氧化钠体积; 1.00 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.

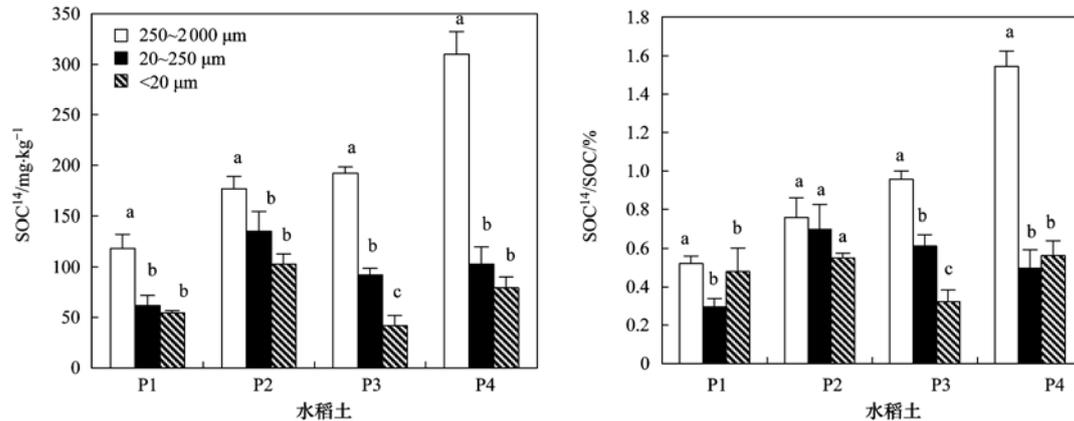
2 结果与分析

2.1 水稻光合同化碳在不同粒径中的分配及其对土壤有机碳的贡献

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. 水稻经过 ^{14}C 标记培养 80 d 后, 250 ~ 2 000 μm 粒径的 SOC^{14} 含量范围为 118.23 ~ 309.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 大于 20 ~ 250 μm 和 < 20 μm 这 2 个粒径的 SOC^{14} 含量, 并且与这 2 个粒径的 SOC^{14} 含量之间的差异达显著水平 ($P < 0.05$) (图 1), 这说明水稻光合同化碳主要分配于 250 ~ 2 000 μm 粒径中.

各粒径固定的光合同化碳对土壤有机碳的贡献用各粒径的 SOC^{14} 与对应粒径的 SOC 比值来表示.



图中误差线为 SD, 不同字母表示同一土壤不同粒径间差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 下同

图 1 $^{14}\text{CO}_2$ 连续标记 80 d 后, 土壤不同粒径的 SOC^{14} 的含量及其光合同化碳对土壤有机碳的贡献

Fig. 1 Content of SOC^{14} and the $\text{SOC}^{14}/\text{SOC}$ ratio in different soil particle sizes after 80 d continuous $^{14}\text{CO}_2$ labeling

2.2 水稻光合同化碳在不同密度组分中的分配及其对土壤有机碳的贡献

水稻经过 ^{14}C 标记培养 80 d 后, 同一粒径的轻组组分的 SOC^{14} 含量均高于重组组分的 SOC^{14} 含量, 并且与重组组分的 SOC^{14} 含量之间的差异达显著水平 ($P < 0.05$), 说明光合同化碳主要分配于土壤的轻组组分中 (图 2). 对比大小粒径的轻组的 SOC^{14} 含量, 250 ~ 2 000 μm 粒径的轻组组分的 SOC^{14} 范围为 157.08 ~ 601.66 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 20 ~ 250 μm 粒径的轻组组分的 SOC^{14} 范围为 90.40 ~ 157.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明水稻光合同化碳主要分配于 250 ~ 2 000 μm 粒径的轻组组分中 [图 2].

各粒径轻重组分固定的光合同化碳对土壤有机碳的贡献同理用轻重组的 SOC^{14} 与对应轻重组 SOC 的比值来表示. 250 ~ 2 000 μm 的轻组组分的比例范围为 0.45% ~ 0.99%, 而 20 ~ 250 μm 的轻组组分的比例范围为 0.24% ~ 0.70% (图 2), 说明 250 ~ 2 000 μm 粒径的轻组组分固定的光合同化碳对土壤有机碳的贡献大于 20 ~ 250 μm 粒径的轻组组分的贡献.

2.3 不同粒径和密度组分中的光合同化碳的相关性分析

250 ~ 2 000 μm 粒径固定的光合同化碳占土壤有机碳的比例范围为 0.52% ~ 1.55%, 大于其他两个粒径的分配比例, 说明 250 ~ 2 000 μm 粒径固定的光合同化碳对土壤有机碳的贡献大于 20 ~ 250 μm 和 < 20 μm 这 2 个粒径的贡献. P1、P3、P4 这 3 个处理中 250 ~ 2 000 μm 粒径与其他粒径的分配比例之间的差异达显著水平, 但 P2 中的这种差异性不显著 (图 1).

表 1 表明, 250 ~ 2 000 μm 粒径的 SOC^{14} 含量与该粒径的轻组组分的 SOC^{14} 含量呈显著性正相关, 同时与其重组组分的 SOC^{14} 含量呈极显著性正相关, 20 ~ 250 μm 粒径的 SOC^{14} 含量与 < 20 μm 粒径的 SOC^{14} 含量呈极显著性正相关, < 20 μm 粒径的 SOC^{14} 含量与 20 ~ 250 μm 粒径的轻组组分的 SOC^{14} 含量呈极显著性负相关, 250 ~ 2 000 μm 粒径的轻组组分的 SOC^{14} 含量与重组组分的 SOC^{14} 含量呈显著性正相关, 20 ~ 250 μm 粒径的轻组成分的 SOC^{14} 含量与重组组分的 SOC^{14} 含量呈显著性正相关.

3 讨论

3.1 水稻光合同化碳在土壤不同粒径及密度组分中的分配特征

作物生长 (主要通过根际沉积作用) 显著影响土壤 SOC^{14} 及其在土壤物理组分 (粒径和密度) 中的分配 [6,7]. 李恋卿等 [21,22] 对稻田土壤团聚体颗粒组有机碳分布及其与土壤生境的关系的研究表明 [23~25], 稻田土壤积累的新碳主要分配于粗团聚体中. 李恋卿等 [21,22] 对退化红壤和太湖地区黄泥土的研究、张旭辉 [26] 对白浆土的研究均表明, 新固定的有机碳主要分布于 250 ~ 2 000 μm 粗团聚体颗粒组

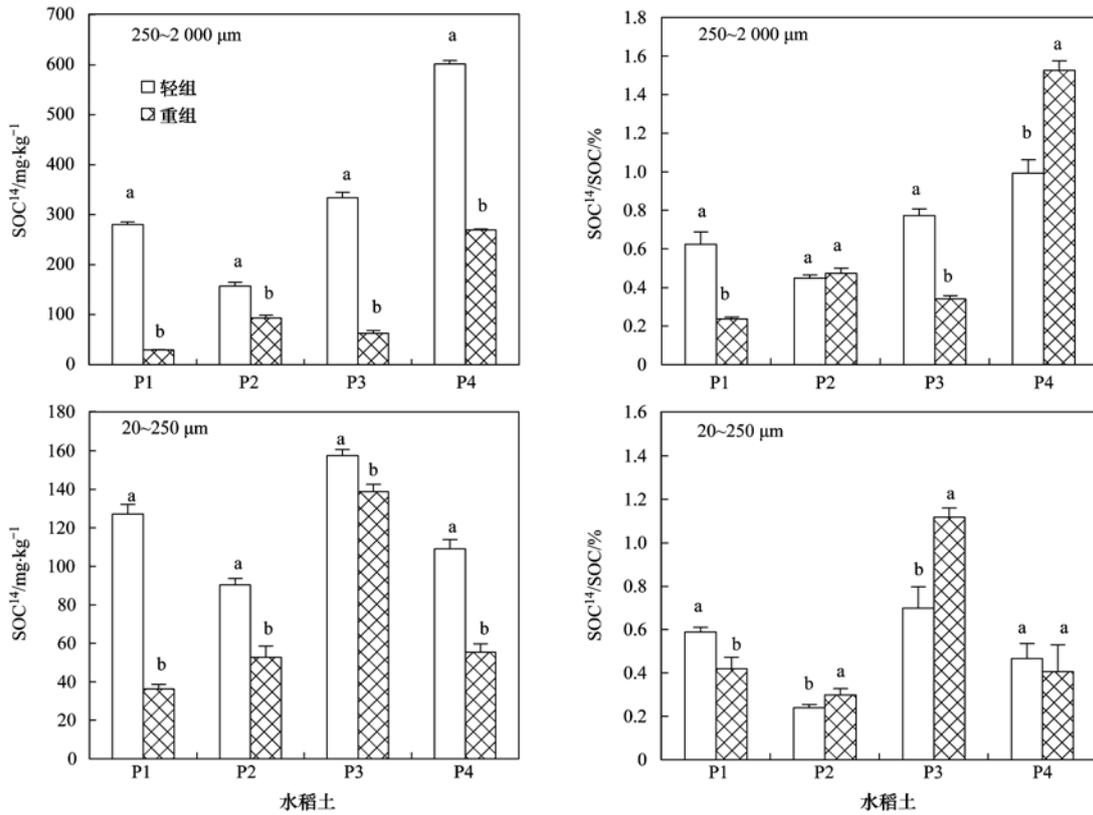


图 2 ¹⁴CO₂ 连续标记 80 d 后, 土壤不同密度组分的 SOC¹⁴ 的含量及其光合同化碳对土壤有机碳的贡献

Fig. 2 Content of SOC¹⁴ and the SOC¹⁴/SOC ratio in different density (light and heavy fraction) after 80 d continuous ¹⁴CO₂ labeling

表 1 不同粒径和轻重组 SOC¹⁴ 含量的相关系数 (r)

Table 1 Spearman rank correlation between SOC¹⁴ in different size and density aggregates

	250~2 000 μm	20~250 μm	<20 μm	250~2 000 μm 轻组	20~250 μm 轻组	250~2 000 μm 重组	20~250 μm 重组
250~2 000 μm							
20~250 μm	0.439 (0.078)						
<20 μm	0.249 (0.318)	0.631 ** (0.005)					
250~2 000 μm 轻组	0.790 * (0.020)	0.166 (0.695)	-0.226 (0.590)				
20~250 μm 轻组	-0.263 (0.529)	-0.593 (0.121)	-0.964 ** (0.000)	0.121 (0.776)			
250~2 000 μm 重组	0.962 ** (0.000)	0.591 (0.123)	0.318 (0.442)	0.826 * (0.012)	-0.391 (0.338)		
20~250 μm 重组	0.067 (0.874)	-0.086 (0.840)	-0.652 (0.080)	0.032 (0.941)	0.750 * (0.032)	-0.173 (0.681)	

1) * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

中. Hassink^[6] 用标记黑麦草追踪新碳在土壤粒径分组和比重分组的团聚体中去向的研究表明, 在施用的初期, 大部分新碳在轻组大团聚体中. Tian 等^[27] 对不同水管理理系统下的水稻土同化碳分配和动力学的研究表明, 水稻在¹⁴C 脉冲标记下培养 45 d 后, 同化碳主要分配于大团聚体 > 2 mm 中, 值得强调的是该实验团聚体的分级为 > 2 000 μm、250~2 000 μm、< 250 μm. 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, 本研究采用的是¹⁴C 连续标记法, 由于标记的时间较长, ¹⁴C 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.

水稻在¹⁴C 标记培养 80 d 后, 光合同化碳主要分配于 250~2 000 μm 粒径中, 该结果与以往研究结果一致. 这可能是因为根系和真菌菌丝是大团聚体 (250~2 000 μm) 的主要胶结剂^[28], 植物根系和菌丝通过分泌物的粘结和土壤颗粒的缠绕, 促进大团聚体的形成^[29]. 同时植物根系的分泌物能为微生物的生长活动提供有效的能源和养分, 使根际能维持庞大的微生物种群数量, 产生更多的微生物代

谢产物,如多糖等物质,有利于土壤团聚体的形成. Six 等^[30]指出植物根系对土壤团聚体的形成除了根系穿插切割和缠绕的物理作用和根系分泌物的胶结作用之外,根系和凋落物分解后的有机残体的粘合作用有利于大团聚体的形成. 也就是说,水稻生长促进了微团聚体胶结形成粗粒径的团聚体.

水稻在¹⁴C 标记培养 80 d 后,光合同化碳主要分配于土壤中 250 ~ 2 000 μm 粒径的轻组分中. 这表明,大多数新形成的大团聚体都不稳定容易被崩解破坏,导致新根系分泌物释放的颗粒有机质进入轻组分. 需要指出的是,本实验培养时间较短(80 d),大粒径的稳定性还没有得到破坏,而大粒径的轻组是短期培养时根系分泌¹⁴C 的主要聚集地,所以出现光合同化碳主要分配于 250 ~ 2 000 μm 粒径轻组组分中的现象.

3.2 不同粒径和密度组分的光合同化碳对土壤有机碳的贡献

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系分泌物. Kaštovská 等^[31]的研究表明,在植物生长期间,其光合产物的 10% ~ 40% 通过根系分泌作用进入土体,但是

只有一部分通过根系沉积作用转化为土壤有机碳. Hütsch 等^[32]在总结前人研究的基础上,指出不同植物在生长期向地下分配的光合碳量不同,最高的可达 20%,其中又有近 64% ~ 86% 的被土壤呼吸了,而仅有 2% ~ 5% 被转化为稳定的土壤有机碳. Amos 等^[33]对玉米根际沉积作用的研究表明,玉米净根际沉积碳占输入地下碳的 5% ~ 62%.

水稻土各个粒级和轻重组固定的光合同化碳(通过根际沉积进入土壤)占输入地下土壤有机碳的比例(图 3)、光合同化碳占输入地下有机碳的比例与前人的研究结果相近,并且大粒径和大粒径轻组组分固定的光合同化碳占输入地下有机碳的比例分别大于小粒径和小粒径轻组组分的比例,这可能与它们本身所固定的光合同化碳含量有关. 可以看出根际沉积占输入地下碳的比例都很小,是因为当不稳定性的根系沉积物优先被微生物消耗后,根际沉积作用对植物残体和土壤有机质的分解能力就会随之减弱^[34],从而在一定程度上又会造成根际沉积效率的减少. 需要注意的是,在与前人研究结果进行比较时,各研究使用材料品种和培养环境的差异,以及示踪元素和示踪期长短也不尽相同.

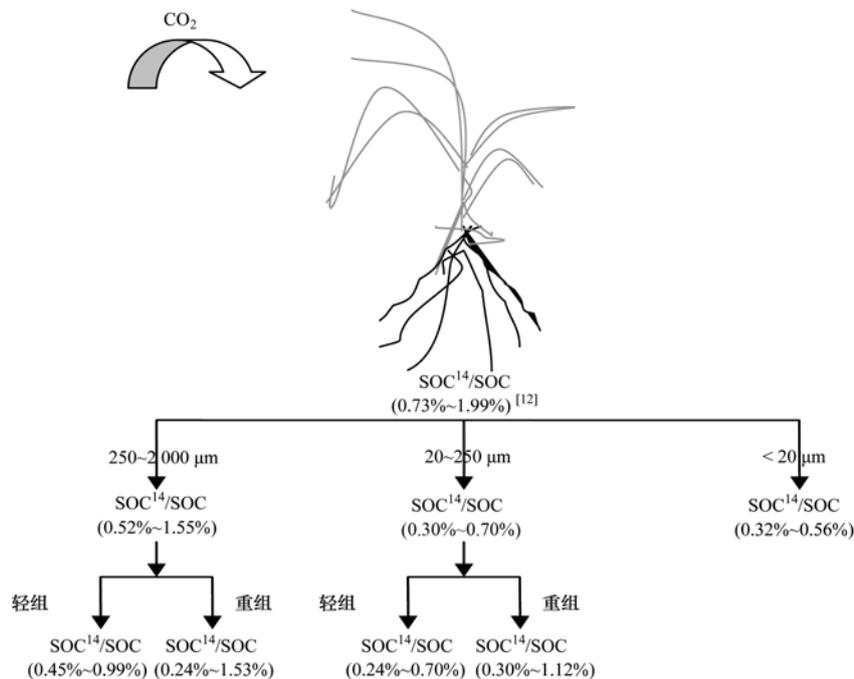


图 3 水稻光合同化碳在土壤粒径和密度组分中的分配特征

Fig. 3 Distribution of the rice photosynthesized carbon in the soil size and density fractions of the aggregates

3.3 土壤不同粒径和密度组分中 SOC¹⁴ 含量的相关性

250 ~ 2 000 μm 粒径的 SOC¹⁴ 含量与该粒径轻组组分的 SOC¹⁴ 含量呈显著性正相关,同时与该粒径重

组组分的 SOC¹⁴ 含量呈极显著性正相关,说明重组固定的光合同化碳多少对大粒径固定光合同化碳的影响较之轻组成分的影响更大,说明矿物结合态的物质对光合同化碳的固定起着至关重要的作用.

20 ~ 250 μm 粒径的 SOC^{14} 含量与 < 20 μm 粒径的 SOC^{14} 含量呈极显著性正相关,这可能与大团聚体相比于小粒径能够固定更多的有机碳,并且通过与有机物和土壤环境相互作用促进了微团聚体的形成,从而为微团聚体对有机碳的长期保护提供了条件有关^[30,35,36].

< 20 μm 粒径的 SOC^{14} 含量与 20 ~ 250 μm 粒径的轻组组分呈极显著性负相关,这也间接地证明了光合同化碳主要分配于 20 ~ 250 μm 粒径的轻组组分中,而并非分配于 < 20 μm 粒径中,与前人和该实验的结果吻合^[37]. 可见,水稻生长增加了土壤有机碳在大团聚体中的储量,对土壤有机碳有一定的保护作用,从而促进了稻田的碳汇功能.

最后需要指出的是,水稻不同生育时期,其地上部和地下部的生长规律都发生显著的变化,而且根系分泌物的量和种类也存在明显的差异,光合碳在地下部分配的去向和命运也势必因生育期的进展而发生变化,因此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.

4 结论

(1) 水稻在¹⁴C 标记培养下生长 80 d 后,水稻的根系分泌(通过根际沉积)将光合同化碳输入到土壤,土壤的各个粒径和密度分组的团聚体中均检测到¹⁴C 的存在,因此,水稻光合同化碳均不同程度地进入了土壤各个粒径和密度组分中,表现出了一定的碳汇功能.

(2) 通过土壤有机质物理分组(粒径、密度)方法发现,新碳(水稻光合同化碳)主要固定在 250 ~ 2 000 μm 粒径的轻组组分中.

(3) 250 ~ 2 000 μm 粒径固定的光合同化碳对土壤有机碳的贡献大于 20 ~ 250 μm 、< 20 μm 这 2 个粒径的贡献,250 ~ 2 000 μm 粒径的轻组组分固定的光合同化碳对土壤有机碳的贡献大于 20 ~ 250 μm 粒径轻组组分的贡献.

(4) 250 ~ 2 000 μm 粒径与其轻重组组分的 SOC^{14} 含量之间均呈显著性正相关,20 ~ 250 μm 与 < 20 μm 这 2 个粒径的 SOC^{14} 含量之间呈极显著性正相关,< 20 μm 粒径与 20 ~ 250 μm 粒径的轻组成分的 SOC^{14} 含量之间呈极显著性负相关.

参考文献:

[1] Dannenberg S, Conrad R. Effect of rice plants on methane production and rhizospheric metabolism in paddy soil [J].

Biogeochemistry, 1999, **45**(1): 53-71.

- [2] 申建波, 张福锁, 毛达如. 根际微生态系统中的碳循环[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, **7**(2): 232-240.
- [3] 何敏毅, 孟凡乔, 史雅娟, 等. 用¹³C 脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 446-453.
- [4] 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.
- [5] Gale W J, Cambardella C A, Bailey T B. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(1): 201-207.
- [6] Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**(3): 487-491.
- [7] Walen J K, Bottomley P J, Myrold D D. Carbon and nitrogen mineralization from light-and heavy-fraction additions to soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, **32**(10): 1345-1352.
- [8] Magid J, Kjaegaard C, Gorissen A, *et al.* Drying and rewetting of a loamy sand soil did not increase the turnover of native organic matter, but retarded the decomposition of added ¹⁴C-labelled plant material[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**(4): 595-602.
- [9] Gale W J, Cambardella C A. Carbon dynamics of surface residue-and root-derived organic matter under simulated no-till [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(1): 190-195.
- [10] Nie S A, Ge T D, Liu C, *et al.* Crop-assimilative carbon in the farmland ecosystem-an important source for carbon turnover in soil [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 2011, **61**(2): 105-111.
- [11] 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.
- [12] 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**(1): 39-49.
- [13] IPCC 2007 Climate change 2007. Climate change impacts, adaptation and vulnerability [M]. IPCC Working Group II. Geneva, Switzerland.
- [14] Wu J H. Carbon accumulation in paddy ecosystems in subtropical China: evidence from landscape studies[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, **62**(1): 29-34.
- [15] 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.
- [16] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响[J]. 生态学报, 2004, **24**(12): 2962-2966.
- [17] 徐小逊, 张世熔, 丁平天, 等. 秸秆还田下化肥配施对水稻生育期内土壤养分变化的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, **40**(4): 332-335.

- [18] Feller C, Beare M H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics[J]. *Geoderma*, 1997, **79**(1-4): 69-116.
- [19] Roscoe R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol [J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, **70**(2): 107-119.
- [20] 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.
- [21] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. *土壤通报*, 2000, **31**(5): 193-195.
- [22] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉, 等. 土壤团聚体有机碳稳定性同位素组成[J]. *南京农业大学学报*, 2000, **23**(1): 114-116.
- [23] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Storage and sequestration of organic carbon in major paddy soils of China: mechanism, stability and the impact on global change-A key project funded by the National Natural Science Foundation of China (2003-2005) [J]. *Journal of Environment Society*, 2005, **17**(1): 7-7.
- [24] Zhang W, Yu Y Q, Sun W J, *et al.* Simulation of soil organic carbon dynamics in Chinese rice Paddies from 1980 to 2000[J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(1): 1-10.
- [25] Pan G X, Li L Q, Wu L S, *et al.* Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, **10**(1): 79-92.
- [26] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2001, **20**(2): 16-19.
- [27] Tian J, Pausch J, Fan M S, *et al.* Allocation and dynamics of assimilated carbon in rice-soil system depending on water management[J]. *Plant and Soil*, 2012, doi: 10.1007/s11104-012-1327-z.
- [28] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [29] Bronick C J, Lar R. Soil structure and management: a review [J]. *Geoderma*, 2005, **124**(1-2): 3-22.
- [30] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, **79**(1): 7-31.
- [31] 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**(): 61-69.
- [32] 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.
- [33] Amos M, Walters D T. Maize root biomass and net rhizodeposited carbon [J]. *Soil Science Society of America Journa*, 2006, **70**(5): 1489-1503.
- [34] Johnson J M F, Allmaras R R, Reicosky D C. Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizodeposits using the national grain-yield database [J]. *Agronomy Journal*, 2006, **98**(3): 622-636.
- [35] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, **23**(6): 481-504.
- [36] Balabane M, Plante A F. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques[J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, **55**(2): 415-427.
- [37] 孟远夺, 潘根兴. 连续种植超级稻对土壤有机碳及团聚体稳定性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(9): 1822-1829.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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