

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征

李睿, 江长胜, 郝庆菊*

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 于缙云山阳坡同一海拔高度处选择了亚热带常绿阔叶林(简称林地)、荒地、坡耕地和果园 4 种土地利用方式, 在 0 ~ 60 cm 的土壤深度内每隔 10 cm 采集一个土壤样品, 测定大团聚体(> 2 mm)、中间团聚体(0.25 ~ 2 mm)、微团聚体(0.053 ~ 0.25 mm)以及粉+黏团聚体(< 0.053 mm)这 4 种粒径团聚体内的土壤活性有机碳(labile organic carbon, LOC)的含量, 分析缙云山不同土地利用方式对团聚体 LOC 的影响。结果表明, 各粒径团聚体中 LOC 含量均随土壤深度的增加而显著降低, 呈现出明显的垂直递减性; 在 0 ~ 60 cm 土壤深度的各土层上, 基本上均表现为林地和撂荒地各粒径团聚体中 LOC 含量高于坡耕地和果园。采用土壤等质量方法计算 LOC 储量, 显示大团聚体 LOC 储量为林地(3.68 Mg·hm⁻²) > 撂荒地(1.73 Mg·hm⁻²) > 果园(1.43 Mg·hm⁻²) > 坡耕地(0.54 Mg·hm⁻²); 中间和微团聚体 LOC 储量为撂荒地(7.77 Mg·hm⁻²和 5.01 Mg·hm⁻²) > 林地(4.96 Mg·hm⁻²和 2.71 Mg·hm⁻²) > 果园(3.55 Mg·hm⁻²和 2.10 Mg·hm⁻²) > 坡耕地(1.68 Mg·hm⁻²和 1.35 Mg·hm⁻²); 粉+黏团聚体 LOC 储量为撂荒地(4.32 Mg·hm⁻²) > 果园(4.00 Mg·hm⁻²) > 林地(3.22 Mg·hm⁻²) > 坡耕地(2.37 Mg·hm⁻²)。除粉+黏团聚体 LOC 储量略低于果园外, 林地和撂荒地其他粒径团聚体 LOC 储量均高于果园和坡耕地, 表明林地开垦为果园和坡耕地会导致 LOC 的降低, 而坡耕地撂荒则会促进 LOC 的增加。林地和荒地 LOC 主要分布在中间团聚体, 而果园和坡耕地则为粉+黏团聚体内 LOC 储量最高, 表明在土地利用的转变过程中, 粒径较大的团聚体更容易积累或损失 LOC。4 种土地方式下各粒径团聚体中 LOC 分配比例随土壤深度的增加而降低, 果园和坡耕地各粒径团聚体内 LOC 分配比例略高于林地和撂荒地, 表明林地和撂荒地土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)性质更稳定, 更有利于碳在土壤中的留存, 从而减少 SOC 矿化分解向大气的释放。相关分析表明, 土壤团聚体 LOC 含量与土壤团聚体总有机碳含量呈极显著正相关关系, 表明团聚体 LOC 可以作为衡量西南地区山地土壤团聚体有机碳动态的一个敏感性指标。

关键词: 土地利用方式; 团聚体; 土壤有机碳; 活性有机碳; 缙云山

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3429-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.039

Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain

LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju*

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Four land utilization patterns were selected for this study in Jinyun mountain, including subtropical evergreen broad-leaved forest (abbreviation: forest), sloping farmland, orchard and abandoned land. Soil samples were taken every 10 cm in the depth of 60 cm soil and proportions of large macroaggregates (> 2 mm), small macroaggregates (0.25-2 mm), microaggregates (0.053-0.25 mm) and silt + clay (< 0.053 mm) were obtained by wet sieving method to measure the content of organic carbon and labile organic carbon in each aggregate fraction and analyze impacts of land uses on organic carbon and labile organic carbon of soil aggregates. LOC content of four soil aggregates were significantly reduced with the increase of soil depth; in layers of 0-60 cm soil depth, our results showed that LOC contents of forest and abandoned land were higher than orchard and sloping farmland. Reserves of labile organic carbon were estimated by the same soil quality, it revealed that forest (3.68 Mg·hm⁻²) > abandoned land (1.73 Mg·hm⁻²) > orchard (1.43 Mg·hm⁻²) > sloping farmland (0.54 Mg·hm⁻²) in large macroaggregates, abandoned land (7.77, 5.01 Mg·hm⁻²) > forest (4.96, 2.71 Mg·hm⁻²) > orchard (3.55, 2.10 Mg·hm⁻²) > sloping farmland (1.68, 1.35 Mg·hm⁻²) in small macroaggregates and microaggregates, and abandoned land (4.32 Mg·hm⁻²) > orchard (4.00 Mg·hm⁻²) > forest (3.22 Mg·hm⁻²) > sloping farmland (2.37 Mg·hm⁻²) in silt + clay, forest and abandoned land were higher than orchard and sloping farmland in other three soil aggregates except silt + clay. It was observed that the level of organic carbon and labile organic carbon were decreased when bringing forest under cultivation to orchard or farmland, and augments on organic carbon and labile organic carbon were found after exchanging

收稿日期: 2015-01-26; 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012A005, XDJK2013A009)

作者简介: 李睿(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 475385838@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: haoqingju@163.com

farmland to abandoned land. The most reverses of forest and abandoned land emerged in small macroaggregates, orchard and sloping farmland were in microaggregates. That was, during the transformations of land utilization pattern, soil aggregates with bigger size were easier to accumulate or lose labile organic carbon. Allocation ratios of labile organic carbon to soil organic carbon under four land uses were decreased as the soil depth added. Allocation ratios of orchard and sloping farmland were a bit higher than forest and abandoned land, which indicated that organic carbon of forest and abandoned land were more steady and available for soil as a carbon sink, meanwhile, the forest and abandoned land would avoid more CO_2 diffusing to the atmosphere from the decomposition of soil organic carbon.

Key words: land use type; soil aggregates; soil organic carbon; labile organic carbon; Jinyun Mountain

土壤活性有机碳 (labile organic carbon, LOC) 是指土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳,虽然只占土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 总量的较小部分,却直接参与土壤生物化学转化过程^[1]. LOC 并不是一种单一的化合物, Lefroy 等^[2]将其中能被 $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 氧化的有机碳称为 LOC,这部分碳素对维持土壤肥力及土壤碳贮量变化方面具有重要的作用^[3]. LOC 在一定的时空条件下受植物、微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动较快、不稳定、易氧化、易分解、易矿化. 土壤碳库容量的变化,主要是发生在土壤 LOC 库中,有研究发现 LOC 与 SOC 之间存在显著的相关关系,可通过监测土壤 LOC 来指示 SOC 的动态变化,尤其在生态脆弱区除 LOC 外,其他有机碳组分与 SOC 均无明显相关关系,因而认为这一活性指标对衡量 SOC 的敏感性要优于其它碳组分^[4,5].

土壤团聚体是土壤的重要组成部分,是微生物活动的主要场所,土壤物质和能量的循环主要发生在团聚体内^[6],而且团聚体的形成作用也被认为是土壤碳固定的最重要机制^[7]. 国内近年来开展了大量的关于土地利用方式对土壤团聚体有机碳的研究,但主要集中在总有机碳方面^[8~10],而对 LOC 的影响研究还比较少,主要分布在贵州喀斯特山区^[11,12]以及西北黄土高原^[13,14]. 在喀斯特山区,各粒级团聚体中 LOC 的含量以乔木林最高,花椒林和火龙果园居中,而在草丛和灌丛中较低^[11];水田土壤团聚体 LOC 含量高于灌丛、旱地及退耕地,通过对比不同退耕年限草丛土壤团聚体 LOC 含量发现,喀斯特山区土地退耕初期 LOC 恢复速度相对缓慢,而随退耕时间的推移,土壤碳汇效应逐步显现^[12]. 华娟等^[13]以宁夏云雾山草原自然保护区不同植被群落为研究对象,发现随着植被的恢复,土壤团聚体 LOC 含量提高并趋于稳定,土壤碳汇效应有望增强;马瑞萍等^[14]通过对黄土丘陵区森林带和草原带不同植被群落下土壤团聚体 LOC 含量的分析发现,人工刺槐群落和人工沙棘群落土壤各粒级

团聚体 LOC 含量高于自然恢复的狼牙刺群落、达乌里胡枝子 + 茭蒿群落、铁杆蒿 + 达乌里胡枝子群落. 综上所述可以看出,土地利用方式对土壤团聚体 LOC 含量具有明显的影响,退耕可提高土壤团聚体 LOC 含量,相对于自然恢复,人工调控可加快土壤 LOC 的积累.

缙云山位于我国西南地区的重庆市,是国家级自然保护区,保护区内土地利用方式多样. 其中亚热带常绿阔叶林作为缙云山的地带性植被,分布面积最大,但除此之外,在人类活动的影响下,缙云山还分布有由自然林地开垦而来的坡耕地、果园,以及由坡耕地弃耕而形成的撂荒地等多种土地利用类型. 自然林地的垦殖及坡耕地的弃耕撂荒无疑都会对土壤团聚体碳产生一定的影响,但目前这方面的研究还比较缺乏,关于土地利用变化对土壤团聚体 LOC 的影响还不是很清楚. 本文以缙云山为研究对象,探讨不同土地利用方式对亚热带山地土壤团聚体 LOC 的影响,以期增强土壤的固碳能力提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

缙云山国家自然保护区 (以下简称缙云山) 位于重庆市西北部,东经 $106^{\circ}17'43'' \sim 106^{\circ}24'50''$,北纬 $29^{\circ}41'08'' \sim 29^{\circ}52'03''$,海拔高度为 $350 \sim 951.5 \text{ m}$,土地总面积 7600 hm^2 . 缙云山地处四川盆地平行岭谷区,属典型的亚热带温暖湿润季风气候,年均气温 13.6°C ,年均降水量为 1611.8 mm ,年均日照 1293.9 h ,年平均蒸发量 777.1 mm . 缙云山主要植被为典型的中亚热带常绿阔叶林,地质岩层由三叠纪须家河组厚层砂岩夹薄层泥页岩和煤线组成,土地类型主要以山地黄壤居多,此外还有棕黄壤以及少量水稻土.

1.2 样品采集

土壤样品于 2011 年 6 月采自缙云山阳坡海拔高度约 500 m 处,土壤为酸性黄壤. 共选择林地、坡耕地、果园和撂荒地这 4 种土地利用方式. ①林地,为亚热带常绿阔叶林,是当地亚热带季风气候下发

育的典型森林类型,主要树种为四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)和四川杨桐(*Adinandra bockiana*);②坡耕地,四季旱地,由亚热带常绿阔叶林开垦而来,约有60年的耕作历史,主要种植玉米、红薯以及蚕豆等;③果园,由亚热带常绿阔叶林开垦而来,约有60年的栽培历史,为大枣(*Ziziphus jujuba* Mill)和橘子(*Citrus reticulata*)种植园;④撂荒地,由坡耕地弃耕撂荒而形成,弃耕历史约为14年,地面植被为生长旺盛的杂草,无灌木和乔木.林地设置20 m×20 m,

果园设置10 m×10 m,坡耕地及撂荒地设置5 m×5 m的样区各3个,每个样区里设置3个采样点.利用挖剖面取样法在各采样点分层取0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm的土样,用四分法取出足够的样品,除去砾石和根系,风干后过孔径2 mm筛,用于测定土壤理化性质和有机碳组分.另于各个土层取未扰动的原状土样,用保鲜盒带回实验室.在风干过程中沿自然裂隙掰成直径为1 cm左右大小的团聚体.表1为4种土地利用方式下表层土壤的理化性质.

表1 4种土地利用方式下表层土壤的土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties in surface soil under the four land utilization patterns				
项目	林地	撂荒地	果园	坡耕地
有机碳/g·kg ⁻¹	22.89	14.31	12.10	5.62
全氮/g·kg ⁻¹	1.67	1.14	1.19	0.95
碱解氮/mg·kg ⁻¹	171.38	82.91	48.08	41.08
全磷/mg·kg ⁻¹	140.30	280.79	261.70	309.50
有效磷/mg·kg ⁻¹	7.10	6.31	35.29	38.33
有效硫/mg·kg ⁻¹	139.04	89.65	36.44	30.57
速效钾/mg·kg ⁻¹	81.49	104.79	115.80	81.88
pH	3.95	5.06	7.66	8.19
容重/g·cm ⁻³	1.07	1.37	1.44	1.55

1.3 样品分析与数据处理

取风干后的未扰动原状土样,采用 Elliott 等^[15]的土壤团聚体湿筛法进行粒径分组:称取100 g风干土样,用大约5 mL的纯水缓慢浸润过夜,再通过一套3个筛子(2、0.25和0.053 mm),在纯水环境中进行湿筛(振幅3 cm,频率50次·min⁻¹),得到>2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm以及<0.053 mm这4个粒径组分,可分别称为大团聚体、中间团聚体、微团聚体和粉+黏团聚体^[16].得到的不同级别的团聚体土样风干后,采用重铬酸钾氧化法测定有机碳含量.

根据 Loginow 等^[17]的方法,称取约含15 mg碳的过0.25 mm筛的团聚体土壤样品,于50 mL塑料旋盖离心管中,以不加土样作为空白;加入25 mL KMnO₄,25℃下常规振荡1 h,然后在转速为2 000 r·min⁻¹下离心5 min,将上清液用去离子水以1:250稀释至250 mL容量瓶中,用分光光度计565 nm下测定稀释样品的吸光值A.由不加土壤的空白与土壤样品的吸光值之差,在KMnO₄浓度(mmol·L⁻¹)对吸光值A的标准曲线上计算出KMnO₄浓度的变化,并进而计算出被氧化的碳量.根据假设,氧化过程中高锰酸钾浓度变化1 mmol·L⁻¹消耗0.75 mmol或9 mg碳.实验中选择KMnO₄浓度为333 mmol·L⁻¹,由此测定出的为LOC含量.LOC储量采

用等质量方法进行计算^[18],计算公式如下:

$$M_{\text{soil}} = p_b \times T \times 10\,000$$
$$T_{\text{add}} = [(M_{\text{soil,equit}} - M_{\text{soil,surf}}) \times 0.000\,1] / p_{\text{b,subsurface}}$$
$$M_{\text{element}} = M_{\text{soil}} \times C_{\text{conc}} \times 0.001$$

式中, M_{soil} 为单位面积土壤质量(Mg·hm⁻²); p_b 为土壤容重(g·cm⁻³); T 为土壤深度(m); T_{add} 为要达到等质量土壤需要另加的亚表层土壤深度(m); $M_{\text{soil,equit}}$ 为最大的土壤质量(Mg·hm⁻²); $M_{\text{soil,surf}}$ 为其他质量小于 $M_{\text{soil,equit}}$ 的处理的表层土壤质量之和(Mg·hm⁻²); $p_{\text{b,subsurface}}$ 为亚表层土壤容重(g·cm⁻³),在此实验中为60~70 cm土层的土壤容重; M_{element} 为LOC储量(Mg·hm⁻²); C_{conc} 为活性有机碳在全土中的含量(g·kg⁻¹),单位面积上等质量有机碳储量等于表层LOC储量加上要达到该土壤质量需要另加的土壤深度的LOC储量.

用SPSS 19.0对各种数据进行分析,各变量之间的差异显著性采用单因素方差分析(ONE-WAY ANOVA),采用Microsoft Excel 2007作图.

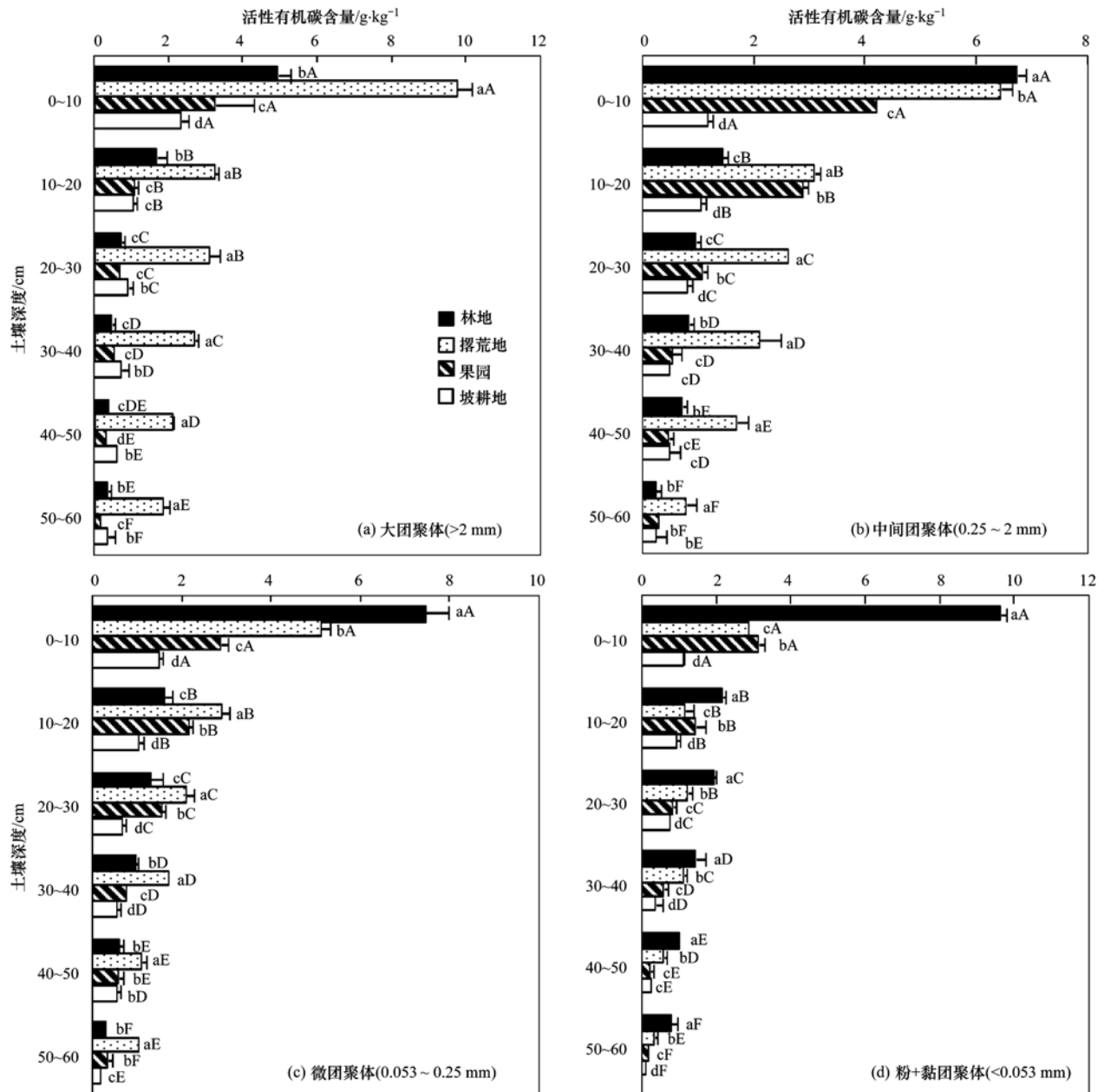
2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式对土壤团聚体LOC含量的影响

4种土地利用方式下土壤团聚体LOC的含量如

图 1 所示,方差分析表明,各粒径团聚体中 LOC 含量均随土壤深度的增加而显著降低,呈现出明显的

垂直递减性;不同土地利用方式对各粒径团聚体 LOC 含量的影响较为显著.



图中不同大写字母表示同一土地利用方式不同土壤深度同一粒径团聚体 LOC 含量的差异显著性;

不同小写字母表示同一土壤深度同一粒径团聚体 LOC 含量在不同土地利用方式间的差异显著性

图 1 不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体活性有机碳含量的剖面分布

Fig. 1 Vertical distribution of labile organic carbon in soil aggregates under the different land utilization patterns

撂荒地大团聚体 LOC 含量在所研究的 6 个土层中均显著高于其他 3 种土地利用方式;林地在 0~20 cm 土层内高于坡耕地,在 20~60 cm 土层内则低于坡耕地;除 0~10 cm 土层为坡耕地含量最低外,其余土层均为果园含量最低[图 1(a)].在整个 0~60 cm 土壤深度内,大团聚体 LOC 平均含量为撂荒地 ($3.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地 ($1.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡

耕地 ($1.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\approx$ 果园 ($1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$). 将林地转变为果园和坡耕地,大团聚体中的 LOC 含量分别降低了 30.07% 和 29.37% ($P < 0.05$),将坡耕地撂荒后,LOC 含量显著增加了 274.26% ($P < 0.05$).

不同土地利用方式下中间团聚体与微团聚体 LOC 含量分布非常相似.林地中间团聚体与微团聚

体 LOC 含量在 0 ~ 10 cm 土层最高, 但其余土层均为撂荒地最高; 坡耕地中间团聚体与微团聚体 LOC 含量在 0 ~ 60 cm 深度的所有土层上均最低 [图 1(b) 和图 1(c)]。中间团聚体 LOC 含量在整个 0 ~ 60 cm 土层的平均值为撂荒地 ($2.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地 ($1.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 果园 ($1.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡耕地 ($0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$); 微团聚体 0 ~ 60 cm 土层 LOC 平均含量为撂荒地 ($2.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地 ($2.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 果园 ($1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡耕地 ($0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$)。林地转变为果园和坡耕地, 中间团聚体 LOC 含量分别减少了 13.19% ($P > 0.05$) 和 60.99% ($P < 0.05$), 微团聚体 LOC 含量降低了 31.86% 和 63.24% ($P < 0.05$); 坡耕地撂荒后中间团聚体及微团聚体 LOC 分别升高了 294.37% 和 210.67% ($P < 0.05$)。

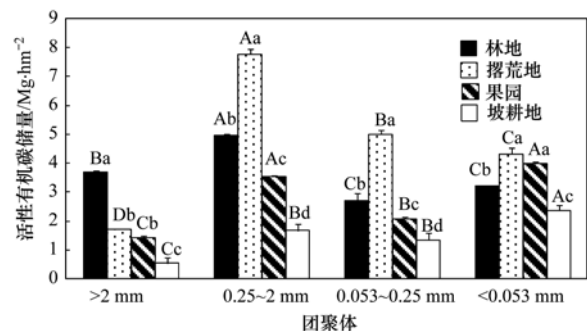
林地粉 + 黏团聚体 LOC 含量在所有土层中均最高, 而坡耕地则最低 [图 1(d)]; 在 0 ~ 20 cm 土层果园显著高于撂荒地, 而在 20 ~ 60 cm 土层则为果园显著低于撂荒地。在整个土壤剖面上, 粉 + 黏团聚体 LOC 平均含量为林地 ($2.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 撂荒地 ($1.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 果园 ($1.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡耕地 ($0.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$)。林地转变为果园和坡耕地, 粉 + 黏团聚体 LOC 含量分别降低了 62.19% 和 79.15% ($P < 0.05$); 而坡耕地撂荒后其含量增加了 108.48% ($P < 0.05$)。

2.2 不同土地利用方式对土壤团聚体 LOC 储量的影响

4 种土地利用方式下土壤容重、土壤质量以及要达到等质量土壤需要另加的亚表层土壤深度的数据请参见文献[19]。如图 2 所示, 大团聚体 LOC 储量为林地 ($3.68 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 撂荒地 ($1.73 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 果园 ($1.43 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 坡耕地 ($0.54 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ($P < 0.05$); 中间和微团聚体 LOC 储量为撂荒地 ($7.77 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.01 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 林地 ($4.96 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.71 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 果园 ($3.55 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.10 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 坡耕地 ($1.68 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.35 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ($P < 0.05$); 粉 + 黏团聚体 LOC 储量为撂荒地 ($4.32 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 果园 ($4.00 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 林地 ($3.22 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 坡耕地 ($2.37 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ($P < 0.05$)。林地和撂荒地各粒径团聚体 LOC 储量均高于坡耕地, 除粉 + 黏团聚体 LOC 储量低于果园外, 其他粒径团聚体 LOC 储量均为林地高于果园。表明林地垦殖会造成团聚体内 LOC 的损失, 而坡耕地撂荒则会促进土壤各粒径团

聚体 LOC 的增加。

由图 2 可以看出, 同一土地利用方式下不同粒径团聚体内 LOC 储量差异显著。林地和荒地 LOC 主要分布在中间团聚体内, 果园和坡耕地则为粉 + 黏团聚体内 LOC 储量最高; 荒地、果园和坡耕地大团聚体 LOC 储量最低, 林地则为微团聚体 LOC 储量最低。林地转变为果园后, 除粉 + 黏团聚体 LOC 储量增加了 $0.78 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 外, 大团聚体、中间团聚体、微团聚体 LOC 储量均表现为程度不同的降低, 损失量分别为 2.25、1.41 和 $0.61 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 转变为坡耕地后损失量分别为 3.14、3.28、1.36 和 $0.85 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表现为随团聚体粒径的增大损失量增加。坡耕地撂荒后, 大团聚体、中间团聚体、微团聚体以及粉 + 黏团聚体的增加量分别为 1.19、6.09、3.66 和 $0.85 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 虽然各粒径团聚体内的 LOC 储量均显著增加, 但相比之下, $>0.25 \text{ mm}$ 的大团聚体比 $<0.25 \text{ mm}$ 的微团聚体增加更快, 说明粒径较大的团聚体能截存更多 LOC。因此, 在土地利用转变过程中, 粒径较大的团聚体更容易积累或损失 LOC。



图中不同大写字母表示同一土地利用方式不同粒径团聚体 LOC 储量的差异显著性; 不同小写字母表示同一粒径团聚体 LOC 储量在不同土地利用方式间的差异显著性

图 2 不同土地利用方式下 0 ~ 60 cm 土层土壤各粒径团聚体内活性有机碳储量

Fig. 2 Storage of labile organic carbon in soil aggregates for different land utilization patterns

2.3 不同土地利用方式下活性有机碳的分配比例

土壤 LOC 与总有机碳的比率为 LOC 的分配比例, 它是反映土壤碳稳定性的指标, 从 SOC 自身分解特征方面指示有机碳活性强度, LOC 分配比例大小表明土壤有机质的质量, 尤其是土壤有机质的潜在分解性质, 比例越高, 说明 SOC 活性越强, SOC 被分解矿化的潜力越大, 稳定性越差。如表 2 所示, 4 种利用方式下, 各粒径团聚体内 LOC 分配比例大致表现为随土壤深度的增加而降低; 果园和坡耕地各

粒径团聚体内 LOC 分配比例略高于林地和撂荒地. 林地转变为果园时,微团聚体中 LOC 分配比例明显增大($P < 0.05$);林地转变为坡耕地时,LOC 分配比例的增大主要出现在大团聚体中,在微团聚体中

则出现了减小($P < 0.05$);坡耕地撂荒后,各粒径团聚体 LOC 分配比例都略有减小($P > 0.05$),说明土地利用方式的转变会影响土壤团聚体有机碳的活性.

表 2 不同土地利用方式下土壤各团聚体中 LOC 占总有机碳的分配比例¹⁾/%

Table 2 Proportions of labile organic carbon to soil organic carbon in soil aggregates for different land utilization patterns/%								
类型	团聚体	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 50 cm	50 ~ 60 cm	平均值
林地	大团聚体	27.91a	26.08ab	24.19a	17.31ab	11.98a	12.10a	19.93b
	中间团聚体	31.00b	24.52ab	25.20a	18.39a	13.36a	17.56a	21.67a
	微团聚体	28.25a	28.47a	25.76ab	26.57ab	25.70ab	18.86a	25.60b
	粉 + 黏团聚体	27.89a	27.42a	18.75b	18.37a	12.71a	12.22b	19.56a
撂荒地	大团聚体	31.79a	21.99b	20.48a	15.20b	14.38a	16.78a	20.10ab
	中间团聚体	37.35a	22.38b	18.67a	17.80a	18.22a	12.89a	21.22a
	微团聚体	26.36a	22.15b	20.77b	20.45b	18.78b	20.81a	21.55d
	粉 + 黏团聚体	26.69a	21.63a	16.14b	14.92a	13.50a	14.45ab	17.89a
果园	大团聚体	24.79a	23.54ab	24.29a	29.48a	24.15a	17.29a	23.92a
	中间团聚体	28.28b	24.65ab	24.14a	25.70a	22.95a	22.30a	24.67a
	微团聚体	32.21a	31.09a	28.98a	29.99a	31.14a	28.21a	30.27a
	粉 + 黏团聚体	27.30a	21.12a	23.38ab	23.00a	21.03a	17.59a	22.24a
坡耕地	大团聚体	30.64a	26.32a	24.53a	24.56a	19.86a	17.87a	23.96a
	中间团聚体	29.11b	28.08a	25.98a	26.48a	20.67a	15.61a	24.32a
	微团聚体	26.96a	27.45ab	24.78ab	23.98ab	17.14b	18.62a	23.16c
	粉 + 黏团聚体	26.61a	22.63a	25.46a	25.89a	19.60a	12.85ab	22.17a

1) 表中不同小写字母表示同一土壤深度同一粒径团聚体 LOC 分配比例在不同土地利用方式间的差异显著性

2.4 土壤团聚体中 LOC 与总有机碳的关系

图 3 为各土地利用方式下土壤团聚体中 LOC 与总有机碳的相关关系. 从中可以看出,土壤团聚体内 LOC 含量随总有机碳含量的增加而升高,二者呈极显著正相关($P < 0.01$). 说明土壤团聚体 LOC 含量与团聚体总有机碳含量的关系密切,

团聚体 LOC 含量的增加在很大程度上有赖于团聚体总有机碳含量的增加. 另外,二者之间的这种极显著正相关关系也可以说明团聚体 LOC 含量可以作为衡量土壤团聚体有机碳动态的一个敏感性指标,对于研究土壤团聚体有机碳转化具有重要作用.

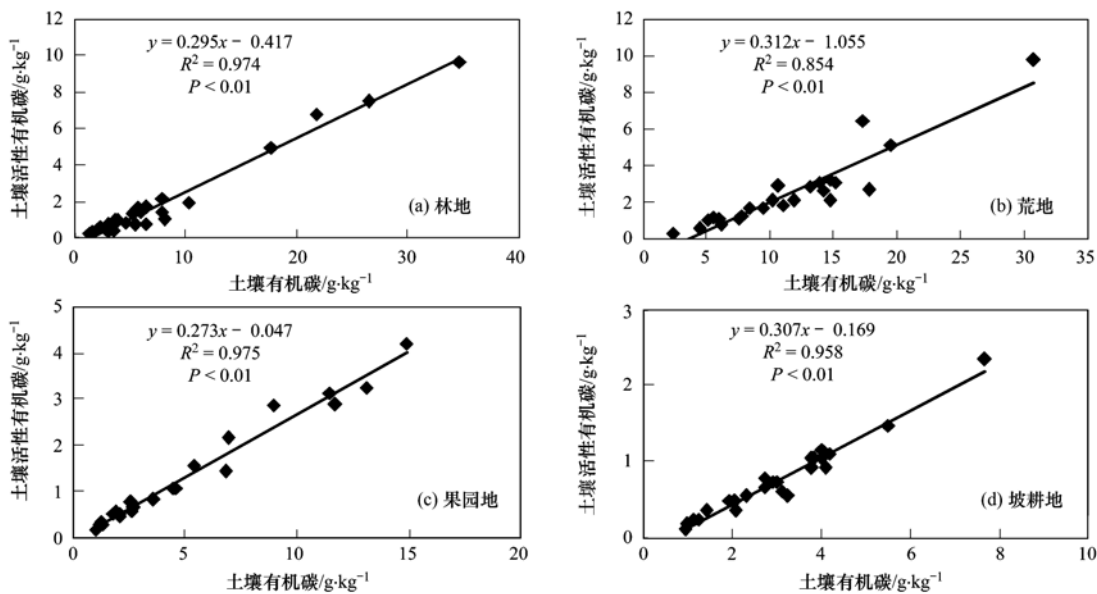


图 3 不同土地利用方式土壤团聚体中 LOC 与 SOC 的关系

Fig. 3 Relationships between LOC and SOC in soil aggregates under the different land utilization patterns

3 讨论

土壤 LOC 含量是土壤、气候、植被覆盖和人为干扰等多重因素的综合作用下 LOC 输入与输出的动态平衡的结果^[20], 本研究中林地和撂荒地 LOC 主要来源于动植物残体、根系分泌物、土壤微生物本身及其代谢产物, 果园和坡耕地还包括人为施加绿肥和粪肥等外源有机质。本研究发现不同土地利用方式下各团聚体中 LOC 的含量均随土层深度的增加而降低, 虽然不同土地利用类型不同土层的不同团聚体植被土壤环境、根系分布、生物活动、人工扰动等影响因子各有不同, 但动植物残体及施肥等来源的碳补给基本都发生在表层土壤, 随着土壤深度的增加, 各利用方式下各团聚体的碳源补给越来越少, LOC 的含量便逐渐降低。这与廖洪凯等^[12]以及华娟等^[13]的研究结果一致。

林地和撂荒地各粒径团聚体中 LOC 含量均高于果园和坡耕地, 除果园的粉 + 黏团聚体 LOC 储量高于林地外, 林地其它粒径团聚体以及撂荒地各粒径团聚体中 LOC 含量均高于果园和坡耕地。林地和撂荒地地表植被丰富, 生长旺盛, 光合作用强烈, 植物根系发达, 根系分泌物旺盛, 尤其是撂荒地细根发育, 根系的腐解转化快, 因而为土壤提供了丰富的碳源^[21], 并为刺激微生物活性发挥了重要的营养作用^[22]; 而且林地和撂荒地没有人为活动的干扰, 堆积在地表的枯枝落叶及植物残体的腐烂分解也为土壤提供了丰富的碳源。而果园和坡耕地虽有绿肥和粪肥等外源有机质的加入, 但坡耕地因为频繁的耕作, 一是提高了土壤的通气性, 加速了土壤中碳的矿化分解; 二是耕作扰动使土壤颗粒的保护作用变差, 降低土壤团聚体内有机碳含量^[4, 23, 24]; 三是土表疏松, 使土壤中的碳易于随水土流失; 四是农作物相对而言根系不发达, 根系生物量弱小, 为土壤提供的碳源有限。另外, 粮食的收获以及秸秆的清理等, 都使得农作物中的碳不能归还到土壤中去; 果园因为果实的采摘以及剪枝活动等, 也会导致大量储存在植物体中的碳难以还田, 而且果园由于人为干扰, 难以在土表形成比较深厚的枯枝落叶层。

廖洪凯等^[12]在贵州喀斯特山区的研究发现, 山地退耕初期(3 a)土壤团聚体 LOC 恢复速度相对缓慢, 而随退耕时间的推移(15 a), 土壤碳汇效应显现。许明祥等^[25]通过在黄土丘陵区退耕还林草对 SOC 固存的响应时指出, 10 a 以下, 退耕还林草的土壤碳汇效应并不明显, 而 10 a 以上才会逐渐明显;

汪青等^[26]根据土壤碳库的变化曲线, 发现经过 13a 的自然恢复, 土壤质量达到了对照水平。本研究中, 坡耕地弃耕撂荒后在无人为干扰的情况下次生为草地, 经过 14 a 的发展, 土壤各粒径团聚体 LOC 含量及储量均远远高出坡耕地的水平, 而且除大团聚体外, 其他粒径团聚体中的 LOC 储量甚至高出了林地, 表明坡耕地弃耕撂荒有助于土壤团聚体内 LOC 的恢复和截存, 土壤碳的增汇效应明显。因此, 认为在西南山区, 应该积极实施退耕还草(林)政策, 减少人为干扰, 实现自然恢复以增加土壤碳汇。

土壤团聚体粒径会对土壤的水力特性、土壤肥力状况及土壤侵蚀等产生影响, 其中大团聚体($> 0.25\text{ mm}$)对土壤团粒结构的形成和稳定具有积极作用, 认为土壤碳流失与该种团聚体的破坏密切相关, 对土地利用和耕作管理的相应变化也更为显著^[20]。本研究的观测结果表明, 各粒径团聚体在土地利用转变过程中均会发生变化, 但相比之下粒径较大的团聚体更容易积累或损失 LOC, 也就是说, 分布在大粒径团聚体内的 LOC 更容易受到土地利用变化的影响, 与之前研究的因土地利用变化而导致的不同粒径团聚体有机碳储量的变化现象相一致^[27]。另外, 华娟等^[13]通过对宁夏云雾山草原自然保护区不同植被群落的研究后发现, 植被恢复主要影响大团聚体($> 0.25\text{ mm}$)的 LOC, 与本研究的结果一致。这种变化符合 Tisdall 等^[28]以及 Six 等^[29]学者关于团聚体形成的经典模型, 他们认为新鲜输入的有机碳进入土壤后, 首先与土壤中粒径较小的微团聚体胶结形成大团聚体, 微团聚体再形成于其内部, 或有机质分解, 大团聚体破碎后直接形成微团聚体^[30], 然后微团聚体在耕作扰动等作用下从大团聚体中释放, 而存在于微团聚体中的碳由于受到物理保护, 其稳定性比大团聚体中的新鲜有机质更高^[31]。Elliott 等的研究也表明^[32], 与大团聚体相联系的有机碳比微团聚体中的有机碳更易矿化, 大团聚体中的有机碳比较年轻, 一般不足 10 ~ 20 a。而与微团聚体结合的有机质大部分是由高度腐殖化的惰性组分组成, 且受到物理保护, 因而微团聚体有机碳的周转时间显著高于大团聚体。另外 Golchin 等^[33]发现, 新鲜不稳定的大团聚体破碎形成的微团聚体中含有颗粒态有机质, 这部分团聚体中的颗粒态有机质因受微团聚体的物理保护而减少了矿化分解, 从而导致微团聚体中碳的变化较小。

土壤 LOC 是 SOC 中较活跃的部分, 在土地利用变化过程中, SOC 含量和 LOC 含量都将受到不同程

度的影响,由于受到影响的程度不同,这些差异表现在不同土地利用方式下土壤 LOC 的分配比例方面. 4 种土地利用方式下,各土壤团聚体内 LOC 分配比例总体上随土层加深而递减,与已有的研究结果一致^[14,35]. 本研究及之前的研究结果都表明^[27],各粒径团聚体内 LOC 和 SOC 含量均随土壤深度的增大而减少,土壤深度越大,植物根系分布越稀疏,土壤微生物的种类和数量也越少,土壤缺少活性有机质来源,导致土壤深层有机碳化学性质更加稳定,因而 LOC 分配比例也就越低. 本研究中果园和坡耕地各粒径团聚体内 LOC 分配比例略高于林地和撂荒地,这可能是由于当地果园和坡耕地有施加绿肥和粪肥的习惯所致. 绿肥和粪肥含有丰富的养分,施入土壤后,增加了新鲜有机能源物质,使微生物迅速繁殖,活动增强,李辉信等^[31]研究表明,有机肥(猪粪+紫云英绿肥)可提高土壤团聚体 LOC 含量,这与前文果园及坡耕地土壤团聚体 LOC 含量低于林地和撂荒地并不矛盾,林地垦殖导致环境因素发生变化以及收获等原因造成土壤团聚体 LOC 含量降低,虽然施加有机肥会提升土壤团聚体 LOC 的含量,但这种提升并不能全面弥补因垦殖造成的降低,而且有机肥作为一种活性有机质的来源,其对土壤 LOC 含量的提升作用强于对 SOC 的提升作用,因此使得 LOC 分配比例升高. 在土地利用变化过程中, SOC 的质量和数量以及稳定性会发生变化,从而影响 LOC 与非 LOC 之间的转变^[35],这些转变表现在不同土地利用方式下土壤 LOC 的分配比例上^[36]. 果园和坡耕地 LOC 分配比例增大使得 SOC 的活性增加,一方面提高了土壤的供肥潜力,但另一方面, SOC 活性高,导致 SOC 更容易分解矿化为 CO₂ 排入大气,加速全球变暖趋势,不利于实现土壤的碳汇效应;相比之下,林地和撂荒地 LOC 分配比例低,表明 SOC 性质稳定,不易矿化分解,因而能更好地保存在土壤中,充当大气碳库的作用.

本研究结果表明各土地利用方式下土壤团聚体中 LOC 含量与总有机碳含量呈极显著正相关关系,表明团聚体 LOC 含量可以作为衡量土壤团聚体有机碳动态的一个敏感性指标,与大多数研究结果保持一致^[11,13]. 动力学研究指出^[37],土壤有机质的短暂波动主要发生在易氧化分解部分,土壤碳库容量的变化主要发生在土壤 LOC 库中,这一活性指标对衡量土壤有机质的敏感性要优于其它 LOC 变量,可以指示土壤有机质的动态变化. 尤其是在生态脆弱地区,不是所有 LOC 组分含量的变化都可以指示

SOC 动态,只有 LOC 含量变化可以敏感地反映 SOC 动态^[38].

4 结论

(1)在 0~60 cm 土壤深度内,林地和撂荒地各粒径团聚体中 LOC 含量都显著高于果园和坡耕地;除粉+黏团聚体 LOC 储量略低于果园外,林地和撂荒地其他粒径团聚体 LOC 储量均高于果园和坡耕地,表明林地开垦为果园和坡耕地会导致 LOC 的降低,而坡耕地撂荒则会促进 LOC 的增加.

(2)在土地利用方式的转变过程中,>0.25 mm 的大团聚体 LOC 储量变化量高于<0.25 mm 的小团聚体,说明粒径较大的团聚体更容易积累或损失 LOC.

(3)各粒径团聚体内 LOC 分配比例大致随土壤深度的增加而降低;果园和坡耕地各粒径团聚体内 LOC 分配比例略高于林地和撂荒地,表明林地和撂荒地 SOC 性质更稳定,有利于充当土壤碳库的作用.

(4)相关分析表明,土壤团聚体 LOC 含量与土壤团聚体 SOC 含量呈极显著正相关关系,表明团聚体 LOC 可以作为衡量西南地区山地土壤团聚体有机碳动态的一个敏感性指标.

参考文献:

- [1] 钟春棋,曾茂盛,全川. 不同土地利用方式对闽江口湿地土壤活性有机碳的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(4): 64-70.
- [2] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155-156(1): 399-402.
- [3] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.
- [4] 谭文峰,朱志锋,刘凡,等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 973-980.
- [5] 莫彬,曹建华,徐祥明,等. 岩溶山区不同土地利用方式对土壤活性有机碳动态的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1224-1230.
- [6] 文倩,赵小蓉,陈焕伟,等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量碳的分布特征[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1504-1509.
- [7] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [8] 毛艳玲,杨玉盛,邹双全,等. 土地利用变化对亚热带山地红壤团聚体有机碳的影响[J]. 山地学报, 2007, 25(6):

- 706-713.
- [9] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(8): 1703-1711.
- [10] 何淑勤, 郑子成. 不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(2): 7-10.
- [11] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(7): 2147-2156.
- [12] 廖洪凯, 李娟, 龙健, 等. 土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 240-247.
- [13] 华娟, 赵世伟, 张扬, 等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2009, **29**(9): 4613-4619.
- [14] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的分布[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(3): 324-332.
- [15] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1991, **34**(1-4): 407-419.
- [16] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(1): 123-130.
- [17] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. Polish Journal of Soil Science, 1987, **20**(1): 47-52.
- [18] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, **75**(4): 529-538.
- [19] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤有机碳及全氮的影响[J]. 西北农林科技大学(自然科学版), 2013, **41**(11): 137-145.
- [20] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(5): 228-232.
- [21] Swinnen J, van Venn J A, Merckx R. Carbon fluxes in the rhizosphere of winter wheat and spring barley with conventional vs integrated farming[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(6): 811-820.
- [22] Sanchez J E, Paul E A, Willson T C, *et al.* Corn root effects on the nitrogen-supplying capacity of a conditioned soil[J]. Agronomy Journal, 2002, **94**(3): 391-396.
- [23] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(3): 343-347.
- [24] Cambardella C A, Elliott E T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions[J]. Geoderma, 1993, **56**(1-4): 449-457.
- [25] 许明祥, 王征, 张金, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. 生态学报, 2012, **32**(17): 5405-5415.
- [26] 汪青, 张平究, 孟向东. 不同退耕年限对菜子湖湿地表土有机碳组分与质量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(8): 2038-2043.
- [27] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- [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] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(5): 1350-1358.
- [30] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management[J]. Plant and Soil, 1984, **76**(1-3): 319-337.
- [31] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2008, **45**(2): 259-266.
- [32] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, **50**(3): 627-633.
- [33] Golchin A, Baldock J A, Oades J M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics[A]. In: Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* (Eds.). Soil Processes and the Carbon Cycle[C]. Boca Raton: CRC Press, 1998. 245-266.
- [34] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(5): 657-664.
- [35] 王国兵, 赵小龙, 王明慧, 等. 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 921-926.
- [36] Blair G J, Crocker G J. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, **38**(1): 71-84.
- [37] 郑红. 土壤活性有机碳的研究进展[J]. 中国林副特产, 2011, (6): 90-94.
- [38] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1365-1371.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行