

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 ..... 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 ..... 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM<sub>2.5</sub> 中二次水溶性无机离子污染特征 ..... 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 ..... 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 ..... 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 ..... 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 ..... 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO<sub>2</sub> 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 ..... 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放因子研究 ..... 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 ..... 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N<sub>2</sub>O 的分布和海-气交换通量 ..... 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 ..... 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 ..... 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 ..... 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 ..... 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 ..... 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 ..... 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 ..... 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对底泥中汞释放及活化的影响 ..... 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 ..... 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 ..... 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王焱(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 ..... 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 ..... 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 ..... 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 ..... 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 ..... 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 ..... 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 ..... 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 ..... 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 ..... 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 ..... 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 ..... 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 ..... 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 ..... 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 ..... 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

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 ..... 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 ..... 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 ..... 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 ..... 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 ..... 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 ..... 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO<sub>2</sub> 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 ..... 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 ..... (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

# 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

李鉴霖, 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 400716)

**摘要:** 土壤团聚体对土壤肥力、质量和土壤的可持续利用等有很大的影响,是水、肥保蓄与释供功能的物质基础. 通过湿筛法,将缙云山林地、撂荒地、果园和坡耕地这 4 种土地利用方式土壤进行粒径分组,得到大团聚体 ( $>2$  mm)、中间团聚体 ( $0.25 \sim 2$  mm)、微团聚体 ( $53 \mu\text{m} \sim 0.25$  mm) 以及粉 + 黏团聚体 ( $<53 \mu\text{m}$ ) 的质量分数,测定各粒径团聚体中的有机碳含量,并计算 0~60 cm 土壤深度内各粒径土壤团聚体的有机碳储量. 结果表明,土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳具有重要影响. 林地的开垦行为会导致大团聚体的破碎化,果园及坡耕地  $>0.25$  mm 的大团聚体含量分别为 44.62% 和 32.28%, 分别比林地降低 38.58% ( $P < 0.05$ ) 和 91.52% ( $P < 0.05$ ), 土壤结构趋于恶化; 而坡耕地闲置为撂荒地后,则会促使粉 + 黏团聚体向粒径大的微团聚体及中间团聚体转化,使土壤结构趋于改善. 在 0~60 cm 土层内,果园及坡耕地土壤颗粒的 MWD(平均质量直径)和 GMD(几何平均直径)值均显著低于林地 ( $P < 0.05$ ), 而坡耕地撂荒后, MWD 和 GMD 值均显著升高 ( $P < 0.05$ ), 表明林地开垦为果园和坡耕地导致土壤团聚体的稳定性降低, 容易被水分散, 而坡耕地弃耕撂荒会增强团聚体的稳定性, 提高土壤抵抗外力破坏的能力. 4 种土地利用方式下各粒径土壤团聚体有机碳含量均随土壤深度的增加而降低. 在 0~60 cm 的土壤深度内, 不同土地利用方式下各粒径土壤团聚体有机碳储量表现为: 大团聚体有机碳储量为林地 ( $14.98 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  撂荒地 ( $8.71 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  果园 ( $5.82 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  坡耕地 ( $2.13 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 中间团聚体有机碳储量为撂荒地 ( $35.61 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  林地 ( $20.38 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  果园 ( $13.83 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  坡耕地 ( $6.77 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 微团聚体有机碳储量为撂荒地 ( $22.44 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  林地 ( $10.20 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  果园 ( $6.80 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  坡耕地 ( $5.60 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ); 粉 + 黏团聚体有机碳储量为撂荒地 ( $22.21 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  林地 ( $17.01 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  果园 ( $16.70 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  $>$  坡耕地 ( $9.85 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ). 各粒径土壤团聚体内有机碳储量均为林地和撂荒地高于果园和坡耕地, 表明将林地开垦为果园和坡耕地后, 将导致各团聚体组分内有机碳的损失, 而坡耕地撂荒则有助于土壤有机碳的恢复和截存; 林地和撂荒地土壤有机碳主要蓄积在中间团聚体内, 而果园和坡耕地则主要蓄积在粉 + 黏团聚体内, 表明在土地利用变化过程中, 粒径较大的团聚体有机碳不稳定, 更容易发生变化.

**关键词:** 土地利用方式; 土壤团聚体; 稳定性; 土壤有机碳; 缙云山

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4695-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.12.037

## Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain

LI Jian-lin, 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 400716, China)

**Abstract:** Soil aggregates have the important effect on soil fertility, soil quality and the sustainable utilization of soil, and they are the mass bases of water and fertilizer retention ability of soil and the supply or release of soil nutrients. In this paper, in order to study the impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain, we separated four land use types of soil, which are woodland, abandoned land, orchard and sloping farmland by wet sieving method, then we got the proportion of large macroaggregates ( $>2$  mm), small macroaggregates ( $0.25\text{-}2$  mm), microaggregates ( $53 \mu\text{m}\text{-}0.25$  mm) and silt + clay ( $<53 \mu\text{m}$ ) and measured the content of organic carbon in each aggregate fraction in soil depth of 0-60 cm and calculated the total content of organic carbon of all aggregates fraction in each soil. The results showed that reclamation of woodland will lead to fragmentation of macroaggregates and deterioration of soil structure, and the proportion of macroaggregates ( $>0.25$  mm) were 44.62% and 32.28% respectively in the soils of orchard and sloping farmland, which reduced 38.58% ( $P < 0.05$ ) and 91.52% ( $P < 0.05$ ) compared with woodland. While after changing the sloping farmland to abandoned land, which lead to the conversion of soil fraction from silt + clay to large macroaggregates and small macroaggregates, so it will improve the soil structure. MWD (mean weight diameter) and GMD (geometric mean diameter) are important indicators of evaluating the stability of soil aggregates. We found the MWD and GWD in soil

收稿日期: 2014-04-22; 修订日期: 2014-07-07

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: 李鉴霖(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环.

\* 通讯联系人, E-mail: haoqingju@163.com

depth of 0-60 cm in orchards and sloping farmland were significantly lower than those in woodland ( $P < 0.05$ ), while after changing the sloping farmland to abandoned land, the MWD and GWD increased significantly ( $P < 0.05$ ), which indicated that reclamation of woodland will lead to the decrease of stability of soil aggregates, and they will be separated more easily by water. However, after changing the sloping farmland to abandoned land will enhance the stability of soil aggregates, and improve the ability of soil to resist external damage. The organic carbon content in each soil aggregate of four land use types decreased with the increase of soil depth. In soil depth of 0-60 cm, the storage of organic carbon of large macroaggregates in each soil are in orders of woodland ( $14.98 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > abandoned land ( $8.71 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > orchard ( $5.82 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > sloping farmland ( $2.13 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), and abandoned land ( $35.61 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > woodland ( $20.38 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > orchard ( $13.83 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > sloping farmland ( $6.77 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) in small macroaggregates, and abandoned land ( $22.44 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > woodland ( $10.20 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > orchard ( $6.80 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > sloping farmland ( $5.60 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) in microaggregates, and abandoned land ( $22.21 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > woodland ( $17.01 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > orchard ( $16.70 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > sloping farmland ( $9.85 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) in silt and clay fraction. Storage of organic carbon in each aggregate in the soils of woodland and abandoned land were higher than those in the soils of orchard and sloping farmland, which indicated that reclamation of woodland will lead to a loss of organic carbon in each soil aggregate fraction, while after changing the sloping farmland to abandoned land will contribute to restore and sequester the soil organic carbon. In addition, it showed that most organic carbon accumulated in small macroaggregate in soils of woodland and abandoned land, while they are in silt and clay in soils of orchard and sloping farmland, indicating that organic carbon in larger aggregates is unstable and is easier to convert during the land use change.

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

土壤团聚体作为土壤的重要组成部分,一方面通过稳定土壤结构,减少土壤的水土流失;另一方面,通过保护土壤中的有机质,提高土壤肥力与质量<sup>[1]</sup>. 因此,土壤团聚体对土壤有着重要的作用,土壤团聚体稳定性已被广泛认为是土壤质量或土壤健康的一个关键指标<sup>[2]</sup>,因为土壤团聚体稳定性与生态系统许多功能和过程有着密切的联系,如土壤有机质的构成与质量<sup>[3]</sup>、土壤生物活性<sup>[4]</sup>、渗透率<sup>[5]</sup>和抗侵蚀能力等<sup>[6]</sup>. 对于土壤团聚体的分类,现在大多以湿筛法进行,一般以  $250 \mu\text{m}$  为界线将团聚体分为大团聚体 (macroaggregates) 和微团聚体 (microaggregates) 类,其中前者可分为  $> 2 \text{ mm}$  和  $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ ,后者可分为  $53 \mu\text{m} \sim 0.25 \text{ mm}$  及  $< 53 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>. 不同级别的团聚体对于协调土壤养分的保持与供应、改善孔隙组成、水力学性质和生物学性质具有不同的作用<sup>[8]</sup>.

近年来国内对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究开展得较多,但主要集中于农田管理措施,包括耕作方式<sup>[9, 10]</sup>、施肥<sup>[11, 12]</sup>以及秸秆还田<sup>[13]</sup>等,而关于土地利用变化对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究报道还相对较少,在已开展的此类研究中,主要集中于亚热带红壤地区<sup>[14, 15]</sup>及西北黄土高原地区<sup>[16, 17]</sup>,已有的研究表明,土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳具有重要影响. 人为活动和农机具使用将导致大水稳性团聚体向小水稳性团聚体的转化,从而使得团聚体稳定性降低. 在我国红壤地区,  $> 0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体含量为林地  $>$  旱地  $>$  荒地  $>$  茶园  $>$  果园<sup>[18]</sup>; 在桂林毛村岩溶区与碎屑岩区自然土壤(灌丛和林地)的团聚体稳定性要显著高于农田(旱地和水田)<sup>[19]</sup>. 另外,林地开垦

也会导致土壤团聚体有机碳的损失,亚热带山地红壤内林地开垦为农业用地导致富含碳的土壤大团聚体有机碳含量大幅度下降<sup>[20]</sup>; 在贵州省关岭县石漠化地区,相比于旱地和水田,花椒林和火龙果林可增加土壤中大团聚体含量,同时增强大团聚体对有机碳的保护作用<sup>[21]</sup>.

土地利用是人类干预土壤肥力最重要、最直接的活动,通过改变土地利用方式,可以改变土壤营养循环强度、总量及路径,从而使土壤供应作物的营养水平发生变化,进而导致土壤肥力发生变化<sup>[22]</sup>. 我国西南地区山地分布面积较广,人类活动强烈,但关于这方面的研究还很欠缺. 缙云山位于我国西南地区的重庆市,是国家级自然保护区,也是许多国家级珍稀濒危保护植物的生长地,保护区内土地利用方式多样. 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有机碳的影响,以期有效的土地管理措施提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

缙云山位于重庆市境内,东经  $106^{\circ}22'$ ,北纬  $29^{\circ}49'$ ,海拔高度为  $350 \sim 951.5 \text{ m}$ ,属于亚热带季风湿润性气候,年均气温  $13.6^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量为  $1611.8 \text{ mm}$ . 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人为利用的水稻土. 林地表层  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土壤有机碳含量为  $22.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为  $1.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮为  $171.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,硝态氮为  $16.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,铵态氮为  $6.13$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全磷为  $140.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效磷为  $7.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效硫为  $139.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾为  $81.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pH 为 3.95, 土壤容重为  $1.07 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

## 1.2 样品采集与测定

土壤样品于 2011 年 5 月采集自缙云山阳坡的山地黄壤。其中林地为亚热带常绿阔叶林, 优势种为大头茶、马尾松、小叶栲等, 坡耕地为玉米地, 果园为枣树、桔子种植园, 撂荒地已荒废 14 a 以上的坡耕地。在林地、果园、坡耕地和撂荒地上分别选择 3 个地貌特征相似的样地, 其中林地每个样地的面积为  $20 \times 20 \text{ m}^2$ , 果园为  $10 \times 10 \text{ m}^2$ , 坡耕地和撂荒地均为  $5 \times 5 \text{ m}^2$ 。每个样地 3 个重复, 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 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。风干后采用 Elliot 的土壤团聚体湿筛法<sup>[23]</sup>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 mm、0.25 mm 和 53  $\mu\text{m}$ ), 在纯水环境中进行湿筛 (振幅 3 cm, 频率 50 次  $\cdot \text{min}^{-1}$ ), 得到 >2 mm、0.25~2 mm、53  $\mu\text{m}$ ~0.25 mm 以及 <53  $\mu\text{m}$  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<sup>[24]</sup>。得到的不同级别的团聚体一部分烘干称重, 用于计算各组分的质量分数。另一部分风干后, 用于测定团聚体组分的有机碳含量。

采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量<sup>[25]</sup>; 凯氏定氮法测定全氮<sup>[25]</sup>, 硝态氮和铵态氮采用流动注射分析仪 (FIAstar 5000) 方法盒所提供的分析方法测定; 硫酸-高氯酸消解法测定全磷<sup>[25]</sup>, 碳酸氢钠法测定速效磷<sup>[25]</sup>; 火焰光度法测定速效钾<sup>[25]</sup>; pHSJ-4A 型酸度计测定 pH, 其土水比为 1:2<sup>[25]</sup>; 土壤有效硫采用磷酸盐-乙酸浸提-硫酸钡比浊法测定<sup>[25]</sup>; 土壤容重采用环刀法测定<sup>[25]</sup>。

## 1.3 数据处理

选取平均质量直径 (mean weight diameter, MWD) 和几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 作为土壤团聚体稳定性的评价指标<sup>[26]</sup>。其计算公式如下:

$$\text{平均质量直径 (MWD)} = \sum_i^n \bar{X}_i W_i \quad (1)$$

$$\text{几何平均直径 (GMD)} = \exp\left[\sum_i W_i \ln \bar{X}_i\right] \quad (2)$$

式中,  $n$  为粒径分组的组数;  $X_i$  为这一粒径组分的

平均直径;  $W_i$  为这一粒径团聚体的质量分数。

各团聚体组分的有机碳储量采用等质量方法进行计算<sup>[27]</sup>, 计算公式如下:

$$M_{\text{soil}} = p_b \cdot T \times 10\,000 \quad (3)$$

$$T_{\text{add}} = [(M_{\text{soil, equit}} - M_{\text{soil, surf}}) \times 0.000\,1] / p_{b, \text{subsurface}} \quad (4)$$

$$M_{\text{element}} = M_{\text{soil}} \cdot C_{\text{conc}} \times 0.001 \quad (5)$$

式中,  $M_{\text{soil}}$  为单位面积土壤质量 ( $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $p_b$  为土壤容重 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $T$  为土壤深度 (m);  $T_{\text{add}}$  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 ( $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $M_{\text{soil, surf}}$  为其他质量小于  $M_{\text{soil, equit}}$  的处理的表层土壤质量之和 ( $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $p_{b, \text{subsurface}}$  为亚表层土壤容重 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 在此实验中为 60~70 cm 土层的土壤容重;  $M_{\text{element}}$  为 SOC 储量 ( $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $C_{\text{conc}}$  为有机碳占全土的含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 即为某一粒径组分的有机碳含量乘上该粒径组分占全土的质量分数。有机碳单位面积上等质量有机碳储量等于表层土壤有机碳储量加上要达到该土壤质量需要另加的土壤深度的有机碳储量。

利用 SPSS 19.0 对不同土地利用方式之间和同一土地利用方式不同土壤深度之间各粒径土壤团聚体质量分数、MWD 和 GMD、SOC 含量及储量进行方差分析 (ANOVA), 当其通过方差齐次性检验时 ( $P > 0.05$ ), 则进行均值间最小差异显著性 (LSD) 检验; 若其不能通过方差齐次性检验 ( $P < 0.05$ ), 则采用 Tamhane's T2 进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

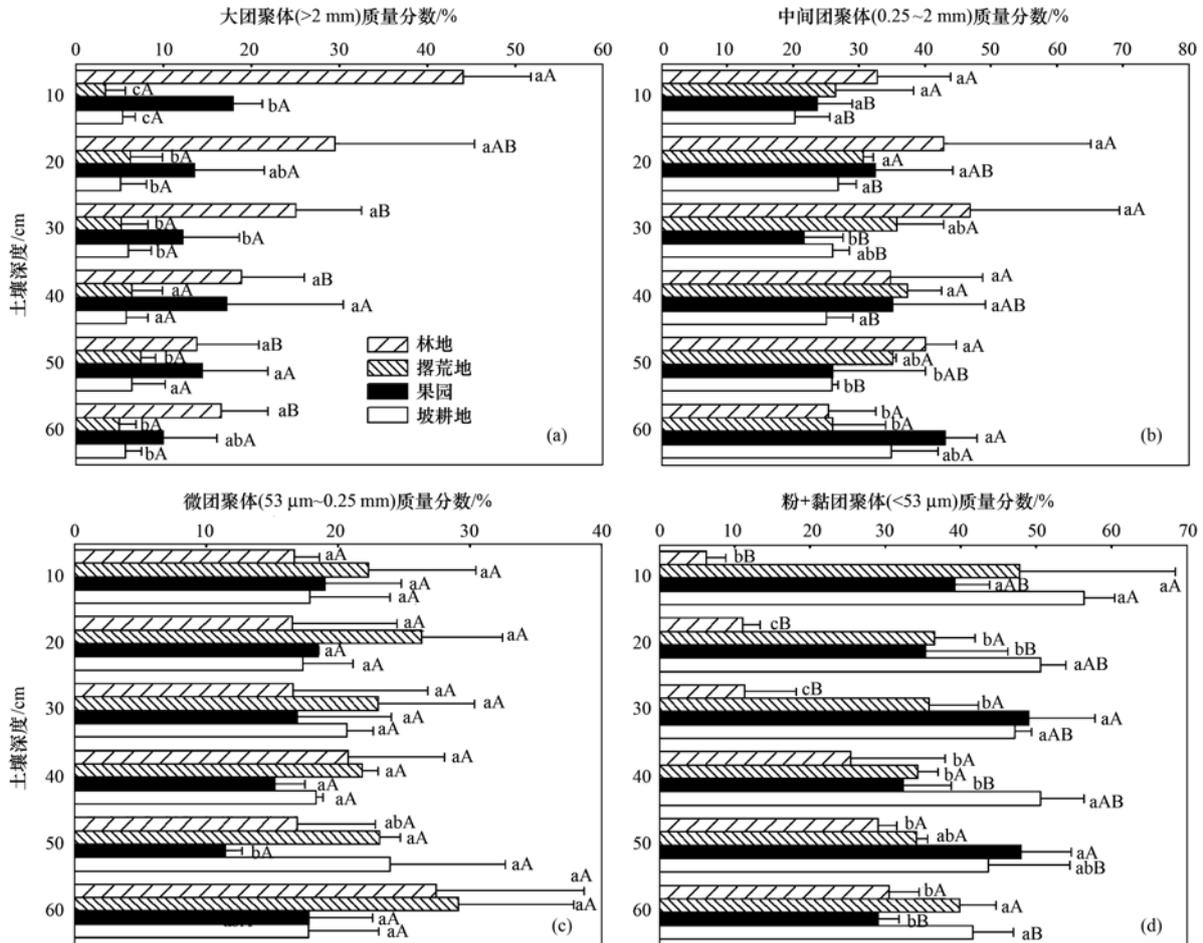
### 2.1 不同土地利用方式对土壤团聚体组成的影响

不同土地利用方式下土壤各团聚体组成的含量参见图 1。通过湿筛得到的 4 种土地利用方式的土壤大团聚体 (>2 mm) 含量之间存在一定的差异 [图 1(a)]。在 0~60 cm 土壤深度内, 表现为林地 (26.47%) > 果园 (14.24%) > 坡耕地 (5.74%) > 撂荒地 (5.62%), 与林地相比, 果园和坡耕地土壤中大团聚体含量分别降低了 46.20% 和 78.32% ( $P < 0.05$ ), 但是与坡耕地相比, 撂荒地土壤中大团聚体含量并未有显著地升高 ( $P > 0.05$ )。从土壤剖面上看, 除林地大团聚体含量随土壤深度的增加而显著降低外, 其它 3 种土地利用方式并无明显变化。

通过图 1(b) 和图 1(c) 可以看出, 不同土地利用方式对土壤中间团聚体 (0.25~2 mm) 和微团聚体

(53  $\mu\text{m}$  ~0.25 mm) 含量的影响并不明显,各土层上的中间团聚体和微团聚体含量在 4 种土地利用方式间均未表现出显著性差异. 在整个 0 ~ 60 cm 土层,林地、果园、坡耕地和撂荒地中间团聚体含量分别为 37.16%、30.37%、26.54%、31.93%,微团聚体含量

分别为 19.17%、16.50%、19.34%、24.31%. 在土壤剖面上,除果园及坡耕地中间团聚体含量呈现为随土壤深度的增加而升高的趋势外,林地和撂荒地中间团聚体含量以及 4 种土地利用方式下土壤微团聚体含量在土壤剖面上均无显著性变化.



图中小写字母表示同一土壤深度下不同土地利用类型在 5% 水平上的差异性; 大写字母表示同一土地利用类型下不同土壤深度在 5% 水平上的差异性,下同

图 1 不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体质量分数

Fig. Proportion of each size soil aggregate under different land uses

土地利用方式的变化对土壤粉 + 黏团聚体 (< 53  $\mu\text{m}$ ) 含量的影响较为显著[图 1(d)],在土壤剖面的各个土层上,坡耕地的粉 + 黏团聚体含量显著高于其它 3 种土地利用方式,而林地最低. 在 0 ~ 60 cm 土壤深度内,土壤粉 + 黏团聚体的含量为坡耕地 (48.38%) > 果园 (38.88%) > 撂荒地 (38.14%) > 林地 (19.00%),将林地垦殖为果园和坡耕地后,土壤粉 + 黏团聚体含量分别增加了 104.63% ( $P < 0.05$ ) 和 154.63% ( $P < 0.05$ ),而将坡耕地闲置为撂荒地后,粉 + 黏团聚体含量则显著下降了 21.17% ( $P < 0.05$ ). 从土壤剖面上看,林地土壤粉 + 黏团

团聚体含量随土壤深度的增加而升高,而坡耕地则恰恰相反,随着土壤深度的增加而降低.

实验数据表明,不同土地利用方式对土壤团聚体组成的影响较为显著. 如图 2 所示,在 0 ~ 60 cm 的土壤深度内,在土壤的各粒径团聚体中,林地以 > 0.25 mm 的大团聚体为主,占粒径总组成的 61.83%; 撂荒地和果园以中间团聚体和粉 + 黏团聚体为主,分别占粒径总组成的 70.07% 和 69.25%; 而坡耕地则以粉 + 黏团聚体为主,约占粒径总组成的 50%. > 0.25 mm 团聚体被认为是土壤中最 好的结构体,称为土壤团粒结构体,是维持土壤

结构稳定的基础,其含量越高,土壤结构的稳定性越大. 林地的开垦行为会导致大团聚体的破碎化,果园及坡耕地 > 0.25 mm 的大团聚体含量分别为 44. 62% 和 32. 28%, 与林地相比,下降幅度分别达到 38. 58% ( $P < 0. 05$ ) 和 91. 52% ( $P < 0. 05$ ),说明林地转化为坡耕地和果园后土壤结构恶化; 而坡耕地闲置为撂荒地后,则会促使粉 + 黏团聚体向粒径大的微团聚体及中间团聚体转化,使土壤结构趋于改善.

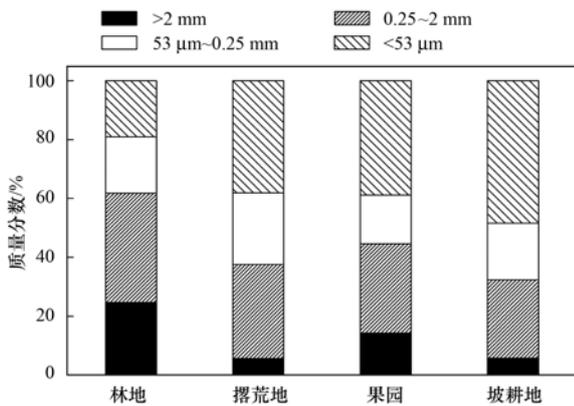


图 2 不同土地利用方式土壤 0~60 cm 土层各粒径团聚体质量分数平均值

Fig. 2 Mean proportion of each size soil aggregate in 0-60 cm soil depth under different land uses

2.2 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体稳定性表示土壤结构的稳定性,直接或间接影响土壤其它物理化学属性. 团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD 和 GMD 值越大表示团聚体平均直径团聚度越高,稳定性越强<sup>[28]</sup>. 不同土地利用方式下 MWD 和 GMD 参见图 3. 从中可以看出,随土壤深度的增加,林地土壤团聚体的稳

定性逐渐减弱,而坡耕地和撂荒地则逐渐增强,果园在 0~20 cm 的土壤表层稳定性先有所减弱,而在 20~60 cm 土层则开始增强. 在 0~30 cm 土壤深度的各土层上,林地团聚体 MWD 和 GMD 值均明显高于其它 3 种土地利用方式,而在 30~60 cm 土层,这种差异变小,说明人类活动对土壤团聚体稳定的影响主要集中在 0~30cm 的土壤表层. 在 0~60 cm 土壤深度内,MWD 为林地(0.95 mm) > 果园(0.67 mm) > 撂荒地(0.53 mm) > 坡耕地(0.47 mm), GMD 为林地(0.54 mm) > 果园(0.28 mm) > 撂荒地(0.23 mm) > 坡耕地(0.18 mm). 与林地相比,果园及坡耕地的 MWD 和 GMD 值均有显著降低( $P < 0. 05$ ); 而将坡耕地闲置为撂荒地后,MWD 和 GMD 值均有升高,但差异并不明显( $P > 0. 05$ ),表明林地开垦为果园和坡耕地导致土壤团聚体的稳定性降低,容易被水分散,而坡耕地弃耕撂荒会增强团聚体的稳定性,提高土壤抵抗外力破坏的能力.

2.3 不同土地利用方式对土壤团聚体有机碳的影响

图 4 为不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体内的有机碳含量. 4 种土地利用方式下土壤 > 2 mm 大团聚体内有机碳含量均随土壤深度的增加而降低[图 4(a)]. 不同土地利用方式对土壤大团聚体内有机碳含量的影响较为显著[图 4(a)],尤其是在 0~10 cm 土层,不同土地利用方式间的差异最为显著; 撂荒地各个土层大团聚体的有机碳含量均显著高于其他 3 种土地利用方式,随着土壤深度的增加,其他 3 种土地利用方式间的差异减小. 在整个 0~60 cm 土层,4 种土地利用方式下大团聚体内有机碳含量为撂荒地(17.29 g·kg<sup>-1</sup>) > 林地(6.06 g·kg<sup>-1</sup>) > 果园(4.09 g·kg<sup>-1</sup>) > 坡耕地(3.94 g·kg<sup>-1</sup>). 与林地相比,果园与坡耕地大团聚体有机

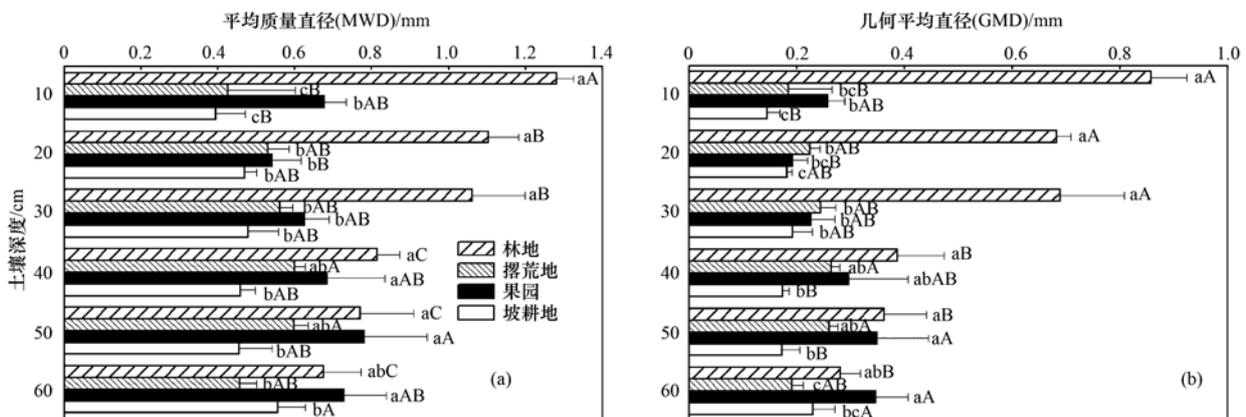


图 3 不同土地利用方式土壤团聚体平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)

Fig. 3 Mean weight diameter and geometric mean diameter of soil aggregates under different land uses

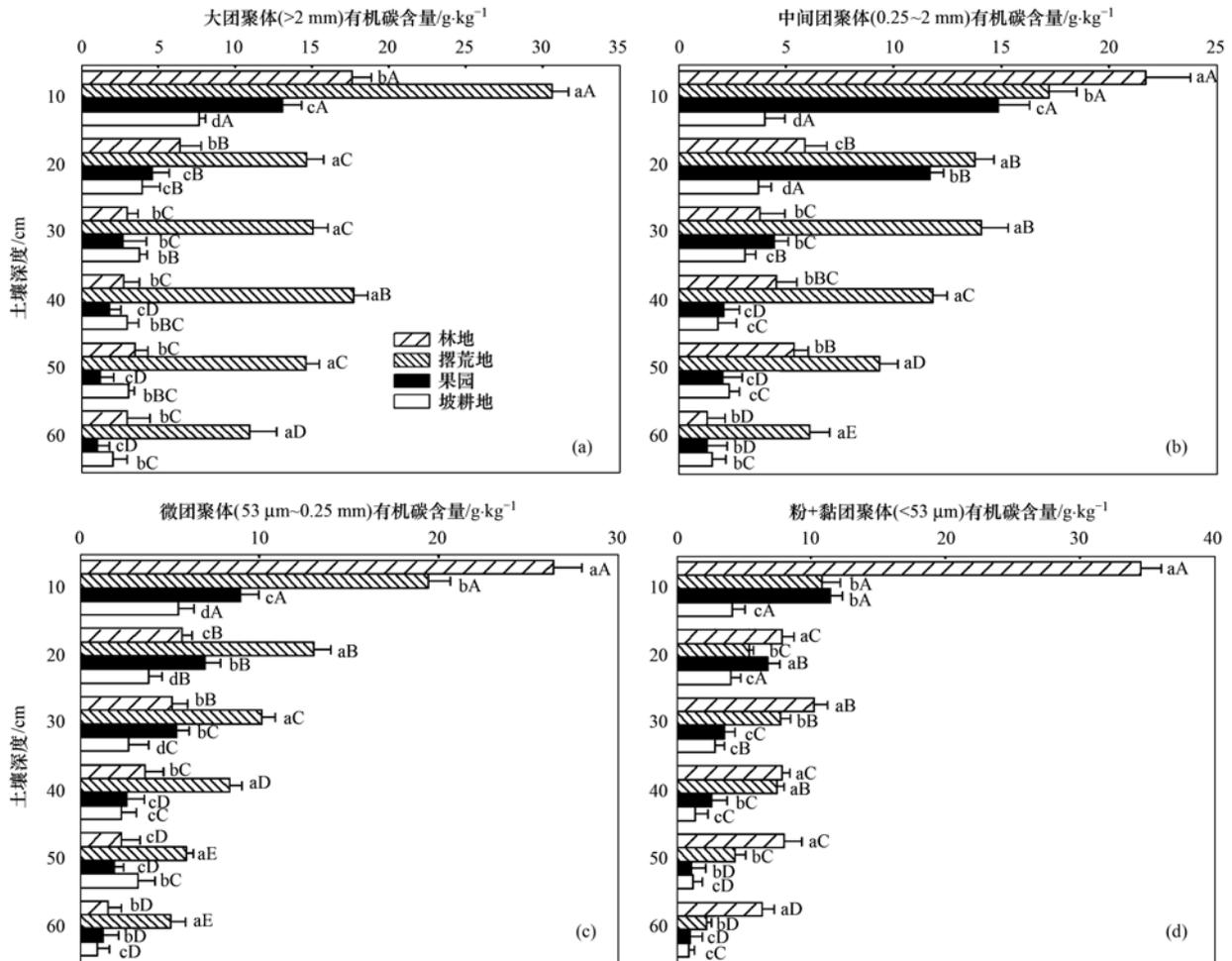


图 4 不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体有机碳含量

Fig. 4 Contents of soil organic carbon of each size soil aggregate under different land uses

碳含量分别减少了 32.51% ( $P < 0.05$ ) 和 34.98% ( $P < 0.05$ ), 说明将林地转变为果园和坡耕地后会 导致大团聚体内的有机碳含量的降低; 而将坡耕地 转变为撂荒地后, 土壤中大团聚体内的有机碳含量 则提高了 3.39 倍 ( $P < 0.05$ ).

中间团聚体和微团聚体有机碳含量的土壤剖面 分布趋势相似[图 4(b)和图 4(c)]. 有机碳含量均 随土壤深度的增加而降低, 其中撂荒地的剖面分布 差异最明显. 在 0~10 cm 土层林地中间团聚体及 微团聚体有机碳含量最高, 而其余土层则均为撂荒地 最高; 在 0~20 cm 土层土地利用方式间的差异 最显著, 随土壤深度的增加差异逐渐降低. 在 0~60 cm 土层, 中间团聚体有机碳含量为撂荒地 ( $12.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 林地 ( $7.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 果园 ( $6.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 坡耕地 ( $2.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 微团聚体的有机 碳含量则为撂荒地 ( $10.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 林地 ( $7.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 果园 ( $4.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 坡耕地 ( $3.11$

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 与林地相比, 果园中间团聚体和微团聚体 的有机碳含量分别降低了 14.31% 和 39.49%, 坡耕 地分别降低了 60.87% 和 58.37% ( $P < 0.05$ ). 而坡 耕地撂荒后, 两种粒径团聚体有机碳含量分别增加 了 332.97% 和 232.15% ( $P < 0.05$ ).

粉+黏团聚体内的有机碳含量也表现出由上到 下逐渐降低的趋势[图 4(d)], 土地利用方式对粉 + 黏团聚体有机碳含量的影响较为显著, 基本上在 0~60 cm 的所有土层上均为林地粉+黏团聚体内的 有机碳含量最高, 撂荒地和果园次之, 坡耕地最 低, 整个土壤深度的平均值为林地 ( $12.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 撂荒地 ( $6.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 果园 ( $4.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 坡 耕地 ( $2.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 果园和坡耕地粉+黏团聚体 有机碳含量比林地分别减少了 64.40% 和 80.16% ( $P < 0.05$ ), 而撂荒地则比坡耕地高出 1.57 倍.

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

据参见文献[29]. 图5展示了4种土地利用方式下0~60 cm土壤深度内各粒径团聚体内有机碳的储量. 大团聚体有机碳储量为林地(14.98 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 撂荒地(8.71 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 果园(5.82 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 坡耕地(2.13 Mg·hm<sup>-2</sup>); 中间团聚体有机碳储量为撂荒地(35.61 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 林地(20.38 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 果园(13.83 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 坡耕地(6.77 Mg·hm<sup>-2</sup>); 微团聚体有机碳储量为撂荒地(22.44 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 林地(10.20 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 果园(6.80 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 坡耕地(5.60 Mg·hm<sup>-2</sup>); 粉+黏团聚体有机碳储量为撂荒地(22.21 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 林地(17.01 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 果园(16.70 Mg·hm<sup>-2</sup>) > 坡耕地(9.85 Mg·hm<sup>-2</sup>). 可以看出,林地与撂荒地各粒径团聚体内的有机碳含量及储量均显著高于果园和坡耕地,表明将林地开垦为果园和坡耕地后,将导致各团聚体组分内有机碳的损失,不利于土壤有机碳的积累;而坡耕地撂荒则能有效促进土壤各团聚体组分内有机碳的增加,有助于土壤有机碳的恢复和截存.

由图5可以看出,同一土地利用方式下不同粒径团聚体内有机碳储量差异显著. 林地和撂荒地土壤有机碳主要分布在中间团聚体内,而果园和坡耕地则均为粉+黏团聚体内有机碳储量最高,大团聚体内最低. 表明林地转变为果园和坡耕地后,有机碳损失量随着团聚体粒径的增大而升高;转变为果园后大团聚体、中间团聚体、微团聚体以及粉+黏团聚体的损失量分别为9.16、6.55、3.40和0.31 Mg·hm<sup>-2</sup>,转变为坡耕地后分别为12.85、13.61、4.60和7.16 Mg·hm<sup>-2</sup>. 坡耕地撂荒后,大团聚体、

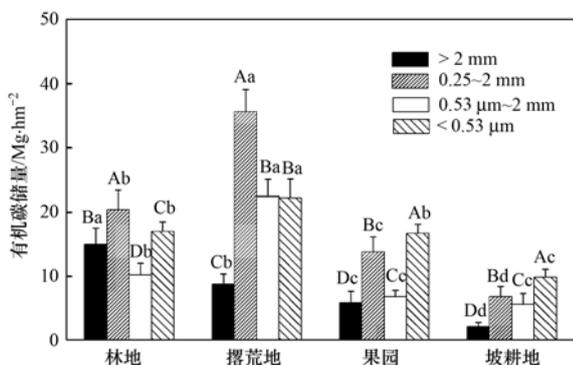


图5 不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体有机碳储量  
Fig. 5 Storage of soil organic carbon of each size soil aggregate under different land uses

中间团聚体、微团聚体以及粉+黏团聚体的增加量分别为6.58、28.84、16.80和12.36 Mg·hm<sup>-2</sup>,虽然各粒径团聚体内的有机碳储量均显著增加,但相比之下,>0.25 mm的大团聚体比<0.25 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的碳. 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有机碳.

### 3 讨论

#### 3.1 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

土壤有机质是形成土壤团聚体的重要胶结物质,在土壤团聚体的形成过程中发挥着重要作用. 不同土地利用方式显著影响土壤有机质含量,进而对土壤团聚体稳定性产生间接影响. 本研究实验测定发现在0~60 cm的深度内土壤有机质的平均含量为撂荒地(19.71 g·kg<sup>-1</sup>) > 林地(13.19 g·kg<sup>-1</sup>) > 果园(10.35 g·kg<sup>-1</sup>) > 坡耕地(5.82 g·kg<sup>-1</sup>). 与林地相比,坡耕地土壤有机质减少了55.90% ( $P < 0.05$ ),果园减少了21.56% ( $P > 0.05$ );与坡耕地相比,撂荒地土壤有机质增加238.86% ( $P < 0.05$ ). 林地转变为坡耕地后,>0.25 mm的大团聚体含量降低了91.52% ( $P < 0.05$ ),MWD和GMD值也均有显著降低( $P < 0.05$ ),林地开垦利用后,土壤有机质含量减少,导致土壤大团聚体分散,从而降低了土壤团聚体的稳定性. Elliott等<sup>[30]</sup>以及Sodhi等<sup>[31]</sup>研究同样认为土壤耕作后大团聚体更容易破裂,耕作优先降低了>2 mm的大团聚体含量. 将坡耕地弃耕后,土壤中粉+黏团聚体(<53 μm)的含量有所减少,黏合形成了粒径更大的团聚体——微团聚体(53 μm~0.25 mm)和中间团聚体(0.25~2 mm),由此使得土壤团聚体的稳定性得到了提高和增强,这与李阳兵等<sup>[32]</sup>的研究结果一致,这主要是由于坡耕地撂荒后土壤有机质含量的显著增加所致. 因此,坡耕地在耕种管理过程中需要进行土壤有机质的改善和保护,比如在单施化肥的基础上配施有机肥<sup>[33]</sup>、秸秆还田<sup>[34]</sup>以及采取保护性耕作措施<sup>[35]</sup>等,从而提高土壤中大团聚体含量,增强土壤结构的稳定性.

相对于林地,果园土壤中有有机质含量的下降并未达到显著水平,但>0.25 mm的大团聚体含量以及MWD和GMD值却均显著降低,可能还受根系分泌物的影响. 果园作为经济林,地表植被密度小于林地,而且栽培年限也远低于林地,因此其地下根系的数量可能也小于林地. 植物通过释放根系分泌物

和生长活动对土壤物理性质和微生物产生影响,进而影响土壤团聚化作用<sup>[36]</sup>,并且植物根系分泌物产生的高分子黏质对土壤颗粒有很强的黏着力,高分子黏胶物质与土壤颗粒相互作用,促进团聚体的形成<sup>[37]</sup>. 果园因为根系分泌物的数量少,土壤中促进团聚作用的黏合物也少,由此形成的大团聚体含量也随之减少,从而导致土壤团聚体稳定性降低.

另外,土壤团聚体的稳定性也受土壤黏结介质持久性的影响. Tisdall 等<sup>[38]</sup>认为有机黏结介质基于时间的持久性分成三类:瞬时的(主要是多糖)、暂时的(根、真菌菌丝、微生物细胞、藻类)、持久的(与多价金属阳离子联系的芳香腐殖物质和受黏粒强烈吸附的聚合物). 微团聚体主要是由持久性介质的作用而稳定,大团聚体则是通过瞬时和暂时介质黏结在一起<sup>[38]</sup>. 虽然撂荒地土壤有机质含量高于林地,但其  $> 0.25 \text{ mm}$  的大团聚体含量以及 MWD 和 GMD 值却均显著低于林地 ( $P < 0.05$ ),与谢锦升等的研究结果相似<sup>[15]</sup>,在他们的研究里,虽然百喜草地  $0 \sim 5 \text{ cm}$  土壤有机质含量约为板栗园土壤的 3 倍,但土壤团聚体的稳定性相似. 撂荒地是坡耕地弃耕撂荒 14 a 后发展起来的,地表植被为杂草,还处在生态系统恢复的初期,土壤有机质多数是新近形成的,有机黏结介质可能大多为暂时和瞬时的物质,因而稳定性较低. 而林地为天然的亚热带常绿阔叶林,历史悠久,形成时间长,土壤有机质的腐殖化程度高,形成的持久性有机介质比例大,因而土壤团聚体的稳定性高.

### 3.2 不同土地利用方式对土壤团聚体内有机碳的影响

4 种土地利用方式下各粒径团聚体有机碳含量均随土壤深度的增加而减少,这与王勇等<sup>[39]</sup>的研究结果一致. 这是因为植物残体主要积累在土壤表层,可供微生物维系生命活动的能量充足,从而促进土壤表层的生物活性,包括真菌生长、根和土壤动物区系,从而有助于在各粒径团聚体内部结合形成微粒有机质<sup>[40]</sup>. 数据分析发现,林地和撂荒地各粒径团聚体有机碳含量及储量均显著高于果园和坡耕地,表明林地的垦殖会造成土壤有机碳的降低,而坡耕地的撂荒则会截存土壤有机碳. 林地和撂荒地由于人类活动的干扰较少,地表的植被凋落物可通过分解补充土壤碳库;而且林木和草本植物根系的转化也是土壤碳的主要来源. 果园周围居住的大多为山地农民,由于运输不便以及经济落后等原因,这些居民依靠果树的剪枝作为木柴的主要来源,再加上

果实的收获等,使得果园土壤有机碳的来源比林地少. 坡耕地由于常年翻耕,表层土壤松软,水土流失严重,使得土壤中有机碳也随之流失;并且人为翻耕增加了土壤的通透性,加剧了土壤有机碳的矿化;而且由于作物的收获,致使植物中的碳不能还田,这些原因都导致坡耕地不利于土壤有机碳的积累. 毛艳玲等<sup>[20]</sup>的研究表明,林地不同粒径团聚体有机碳含量都显著高于农业用地,魏亚伟等<sup>[41]</sup>的研究也发现相同粒径的团聚体中,原生林地的有机碳含量要显著高于玉米-红薯轮作地,均与本研究结果一致.

研究发现林地转变为果园和坡耕地后,粒径较大的团聚体内损失的有机碳较多,而且储存有机碳的主要团聚体组分的粒径也随之减小. 这种变化符合 Tisdall 等<sup>[38]</sup>以及 Six 等<sup>[42]</sup>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<sup>[43]</sup>,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有机碳由于受到物理保护,所以其稳定性比大团聚体中的新鲜有机质更高. 另外 Golchin 等<sup>[44]</sup>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 (particulate organic matter, POM),这部分团聚体中的 POM 因受微团聚体的物理保护而减少了矿化分解,较游离的 POM 稳定,从而导致微团聚体中有机碳的变化较小. 但本研究中坡耕地向撂荒地的转变与经典模型稍有出入,坡耕地撂荒后,中间团聚体土壤有机碳增加量最大,而大团聚体增加量最小. 造成这种现象的原因可能与土地利用变化的时间有关,本研究中的林地当地典型的亚热带常绿阔叶林原生林地,果园及坡耕地均是在解放后 20 世纪 50 年代开垦而来,至今已有五六十年变化的历史,土地利用变化的时间较长;而撂荒地才退耕 14 a,土地利用变化的时间较短,导致不同粒径间团聚体内有机碳变化的效应而没有完全展现出来.

## 4 结论

(1) 林地土壤团聚体组分主要为大团聚体和中间团聚体,撂荒地和果园以中间团聚体和粉 + 黏团聚体为主,坡耕地则以粉 + 黏团聚体为主. 说明林地转化为坡耕地和果园后将导致大团聚体破碎化,从而使土壤结构恶化;而坡耕地闲置为撂荒地后,则会促使粉 + 黏团聚体向粒径大的微团聚体及中间

团聚体转化,使土壤结构趋于改善.

(2)4 种土地利用方式下林地的 MWD 和 GMD 值最大,果园和撂荒地居中,坡耕地最低. 表明林地的垦殖致土壤团聚体的稳定性降低,而坡耕地弃耕则会增强土壤团聚体的稳定性.

(3)林地开垦为果园和坡耕地将导致各团聚体组分内有机碳的损失,不利于土壤有机碳的积累;而坡耕地撂荒则能有效促进土壤各团聚体组分内有机碳的增加,有助于土壤有机碳的恢复和截存.

(4)林地转变为果园后, $>0.25\text{ mm}$  的大团聚体与  $<0.25\text{ mm}$  的微团聚体的有机碳储量分别降低了  $15.71\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $3.71\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,转变为坡耕地后分别降低了  $26.46\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $11.76\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,坡耕地撂荒后,则分别升高了  $35.42\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $29.16\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,表明在土地利用变化过程中,粒径较大的团聚体更容易损失或积累有机碳.

#### 参考文献:

- [1] 史奕,陈欣,沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(11): 1495-1498.
- [2] Wander M M, Bollero G A. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(4): 961-971.
- [3] Lu S G. Role of organic matter in formation and stability of aggregates in mulberry plantation soils[J]. Pedosphere, 2011, **11**(2): 185-188.
- [4] Chan K Y, Heenan D P. Microbial-induced soil aggregate stability under different crop rotations[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, **30**(1-2): 29-32.
- [5] Amezketa E. Soil aggregate stability: A review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, **14**(2-3): 83-151.
- [6] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of long-term cropping systems on soil physical properties related to soil erodibility[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, **67**(2): 637-644.
- [7] 窦森,李凯,关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, **48**(2): 412-418.
- [8] 陈恩凤,周礼恺,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, **31**(1): 18-25.
- [9] 田慎重,王瑜,李娜,等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(22): 7116-7124.
- [10] 王丽,李军,李娟,等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 759-768.
- [11] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(5): 950-960.
- [12] 刘希玉,王忠强,张心昱,等. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(16): 4949-4955.
- [13] 郝翔翔,杨春葆,苑亚茹,等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(35): 263-269.
- [14] 陈山,杨峰,林杉,等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(5): 211-216.
- [15] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 702-709.
- [16] 马帅,赵世伟,李婷,等. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(2): 157-161.
- [17] 于寒青,李勇,金发会,等. 黄土高原植被恢复提高大于  $0.25\text{mm}$  粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(4): 876-883.
- [18] 章明奎,何振立,陈国潮,等. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J]. 土壤学报, 1997, **34**(4): 359-366.
- [19] 杨慧,张连凯,于爽,等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(3): 265-271.
- [20] 毛艳玲,杨玉盛,邢世和,等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(4): 132-137.
- [21] 罗友进,魏朝富,李渝,等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(1): 257-266.
- [22] 秦明周. 红壤丘陵区农业土地利用对土壤肥力的影响及评价[J]. 山地学报, 1999, **17**(1): 71-75.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 146-166, 289-295.
- [26] 姚贤良. 土壤结构的肥力意义(文献综述)[J]. 土壤学报, 1965, **13**(1): 111-120.
- [27] 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.
- [28] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, **99**(1-2): 123-145.
- [29] 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]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, **41**(11): 137-145.
- [30] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1991, **34**(1-4): 407-419.

- [31] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **103**(2): 412-418.
- [32] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 等. 利用方式对岩溶山地土壤团聚结构的影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, **11**(5): 451-455.
- [33] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(4): 715-722.
- [34] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(8): 1513-1520.
- [35] 唐晓红, 魏朝富, 吕家格, 等. 保护性耕作对丘陵区水稻土壤团聚体稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(11): 49-54.
- [36] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. *Geoderma*, 2005, **124**(1-2): 3-22.
- [37] Killham K. *Soil ecology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 102-113.
- [38] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [39] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(7): 1365-1373.
- [40] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(3): 777-783.
- [41] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(4): 971-978.
- [42] 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.
- [43] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management [J]. *Plant and Soil*, 1984, **76**(1-3): 319-337.
- [44] Golchin A, Baldock J A, Oades J M. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics [A]. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*[C]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1998. 245-266.

## CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing .....	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou .....	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM <sub>2.5</sub> and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan .....	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> in Urban Chengdu, China .....	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing .....	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing .....	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China .....	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO <sub>2</sub> .....	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles .....	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion .....	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer .....	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River .....	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River .....	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins .....	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake .....	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas .....	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands .....	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body .....	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on the Release and Activation of Mercury in Sediment .....	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China .....	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park .....	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors .....	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater .....	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation .....	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment .....	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter .....	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge .....	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal .....	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region .....	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure .....	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong .....	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island .....	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO <sub>2</sub> and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates .....	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season .....	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain .....	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb .....	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site .....	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality .....	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years .....	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures .....	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO <sub>2</sub> Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行