

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

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

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

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

华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素 ..... 苏彬彬 (2519)

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

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

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

微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究 ..... 曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解机制研究 ..... 刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)

二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd<sup>2+</sup> 离子的吸附研究 ..... 张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)

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

基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni<sup>2+</sup> 的吸附性能 ..... 张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)

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

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

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

镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究 ..... 陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)

HRT 对 A<sup>2</sup>O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响 ..... 刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)

发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟 ..... 张超, 陈银广 (2741)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A<sup>2</sup>O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 ..... 高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞微, 白志辉 (2912)

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

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

# 三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究

黄茹<sup>1,2</sup>, 黄林<sup>2</sup>, 何丙辉<sup>1\*</sup>, 周立江<sup>3</sup>, 于传<sup>1</sup>, 王峰<sup>3</sup>

(1. 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; 2. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715; 3. 四川省林业调查规划院, 成都 610081)

**摘要:** 采用野外定位观测, 研究三峡库区坡耕地 7 种林草治理措施下土壤活性有机碳组分(颗粒性有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物生物量碳)含量和团聚体数量特征, 并分析了团聚体的分形特征和可蚀性。结果表明, 不同林草治理措施下, 土壤有机碳及活性有机碳组分含量随土壤深度的增加而降低, 其中 0~10 cm 土壤有机碳及各活性有机碳组分含量显著高于 20~30 cm。林草措施治理对土壤团聚体稳定性也具有显著影响, >0.25 mm 水稳性大团聚体总量总体上表现为: 栎树 + 黄花槐 > 植物篱 > 封山育林 > 自然恢复 > 经济林 > 传统农作 > 裸地对照, 且与土壤有机碳含量呈正相关。不同林草治理措施下土壤具有一定的土壤分形特性。其中栎树 + 黄花槐措施下土壤的分形维数、可蚀性  $K$  值最小, 土壤结构稳定性和抗侵蚀能力相对较强。不同土壤深度下活性有机碳组分与土壤可蚀性  $K$  值均呈极显著负相关关系, 以上研究表明通过不同林草治理措施的治理可改变土壤性状, 从而影响土壤抗蚀能力。

**关键词:** 三峡库区; 土壤活性有机碳; 水稳性团聚体; 土壤可蚀性  $K$  值; 林草治理措施

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2800-09

## Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil

HUANG Ru<sup>1,2</sup>, HUANG Lin<sup>2</sup>, HE Bing-hui<sup>1</sup>, ZHOU Li-jiang<sup>3</sup>, YU Chuan<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Chongqing 400715, China; 2. School of Life Science, Southwest University, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Sichuan Forest Inventory and Planning Institute, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** To gain a better knowledge of characteristics of soils and provide a scientific basis for soil erosion control in the Three Gorges Reservoir Area, contents of aggregates and total soil organic carbon (SOC), as well as soil active organic carbon fractions including particulate organic carbon (POC), readily oxidized organic carbon (ROC), dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC) in the 0-30 cm soil layer under seven different biological regulated measures were studied by the field investigation combined with the laboratory analysis. Results showed that the content of the SOC and active organic carbon fractions decreased with the increasing soil depth; the content of the SOC and active organic carbon fractions in 0-10 cm was significantly higher than that in 20-30 cm. The stability of soil aggregates were also significantly influenced by biological regulated measures, the content of >0.25 mm water-stable aggregates in seven types of biological regulated measures was in the order of *Koeleruteria bipinnata* + *Cassia suffruticosa* > hedgerows > closed forest > natural restoration > economic forest > traditional planting > control plot, moreover, the content of 0.25 mm water-stable aggregates correlated positively with the content of SOC. Soils under different biological regulated measures all demonstrated fractal features, and soil under the measure of *Koeleruteria bipinnata* + *Cassia suffruticosa* was found to have the lowest value of fractal dimension and soil erodible  $K$ , indicating a relatively strong structure stability and erosion-resistant capacity. Negative correlation was observed when compared the content of active organic carbon fractions with the soil erodible  $K$ . It can be concluded that properties of soil can be managed through biological regulated measures; thence had an influence on the soil erosion-resistant capacity.

**Key words:** Three-Gorges Reservoir; soil active organic carbon; soil water-stable aggregates; soil erodibility  $K$ -factor; biological regulated measure

三峡库区地貌类型复杂, 是长江上游四大重点水土流失片区之一, 现已成为严重危害流域生态环境和阻碍社会经济发展的一个重要因素。坡耕地作为三峡库区土壤侵蚀的主要地类, 其土层极易完全流失或形成粗骨土, 导致土地生产力下降。三峡水库建成后, 库区人地矛盾更加突出, 面临着以水土保持为中心的生态环境建设与社会经济持续发展的双

重压力。因此, 急需探寻一种符合可持续发展的水土流失综合治理措施。

收稿日期: 2012-10-10; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 国家林业局生物措施治理水土流失试点项目(04908); 国家自然科学基金项目(40971166); 国家科技支撑计划重点项目(2011BAD31B00)

作者简介: 黄茹(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水土保持与生态修复, E-mail: huangru\_2008@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: hebinghui@yahoo.com.cn

近年来,基于土壤有机碳对全球碳循环的重要影响,许多学者从土壤有机碳储量变化及时空分布格局、耕作方式对土壤有机碳含量的影响<sup>[1~4]</sup>,以及土壤有机碳与土壤微生物的关系<sup>[5,6]</sup>等方面进行了大量研究. 土壤活性有机碳是土壤中较为活跃的部分,它在一定的时空条件下受植物、微生物影响强烈,且在土壤中转化较快,不稳定,易于氧化分解和矿化<sup>[7]</sup>. 土壤中的有机碳背景值较高,变化趋势在短期内难以监测,其数量和质量动态最初主要是通过其活性部分的变化表现出来的<sup>[8~11]</sup>. 在土壤侵蚀过程中,有机质会随着土壤一起被带走,致使土壤有机碳含量下降,而土壤活性有机碳相对总有机碳来说对土壤侵蚀的响应更为敏感. 因此,可以用来评价侵蚀过程对土壤有机碳的影响. 土壤侵蚀倾向于优先使低密度小颗粒的有机碳组分发生再分布<sup>[12]</sup>,生物活性有机质大部分位于表层或亚表层,即使土壤流失量相对较小,也能导致生物活性有机质部分明显迁移.

土壤团聚体是反映土壤肥力的重要指标,其结构性破坏将会导致土壤有机质的流失,而团聚体稳定性直接影响着土壤侵蚀程度,且土壤团聚体的团聚作用在土壤固碳过程中具有不可或缺的贡献<sup>[13]</sup>. 近年来,国内外学者从物理保护和化学保护相结合的角度进行深入研究,并在土壤肥力与团聚体方面的研究取得了显著成绩<sup>[14,15]</sup>.

本研究以三峡库区不同林草治理措施下典型土壤为对象,着重从水土保持学角度出发,探讨了土壤活性有机碳组分和土壤团聚体数量特征,深入分析团聚体的分形特征和可蚀性  $K$  值,以期为进一步了解三峡库区坡地土壤的特征,为生态环境保护提供科学依据;研究土壤活性有机碳与土壤团聚体的关系,揭示土壤侵蚀过程中土壤各因素的作用机制,以期降低土壤侵蚀、减少水土流失提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地设在重庆市开县南山桥沟小流域内,地理位置为  $N30^{\circ}49'30'' \sim 31^{\circ}41'30''$ ,  $E107^{\circ}55'48'' \sim 108^{\circ}54'36''$ . 自然地理类型属渝东北平行岭谷区,位于长江支流小江的上段,地形南高北低,以低山为主,地势起伏大,海拔高度在 280 ~ 797 m 之间;多年平均年降水量为 1 006 mm;无霜期 180 ~ 306 d;气候温和,四季分明,具有冬暖、春早、夏热、秋凉等特点. 土壤以自流井组泥、页岩和须家河组沙岩等形成的紫色土为主,土层浅薄,石砾含量高,土壤肥力较低,且保土蓄水功能差,水土流失严重.

### 1.2 样地设置及样品采集

林草治理措施采取自然封禁、自然恢复、人工栽培等技术措施,对水土流失严重退化土地进行植被恢复与重建的林草治理. 治理后,人工和自然植被得到很大的恢复,目前,已初步形成相对稳定植被群落,水土流失得到有效控制. 于 2004 年在裸露荒坡地采取不同林草措施进行植被恢复,共建 7 个长 20 m、宽 5 m 的标准径流小区,水平投影面积 100 m<sup>2</sup>. 措施包括:栾树 + 黄花槐:栾树、黄花槐混交,栾树株行距 2 m × 3 m,黄花槐株行距 2 m × 2 m;传统农作:轮种胡豆、甘薯、四季豆;植物篱:平行于等高线种植黄花菜,植物篱间距 0.5 m,篱间种植西瓜或白菜;封山育林:按 2 m × 3 m 的株行距补植马尾松,并封育;自然恢复:按 2 m × 3 m 的株行距种植马尾松;经济林:按 3 m × 4 m 的株行距种植枇杷;另设裸地作为空白对照. 各小区的基本情况见表 1.

小区内按上坡、中坡和下坡分设 3 个样方,依照随机、多点采样原则,于 2011 年 8 月分别采集每个样方 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 这 3 个层次土壤样品. 土壤采集后,部分混合土壤盛于塑

表 1 标准径流小区基本概况  
Table 1 Basic situation of runoff plots

编号	类型	海拔/m	坡度/(°)	坡位	坡向	植被覆盖度/%	种植植物
1	栾树 + 黄花槐	274	29	中坡	NW30°	95	栾树 + 黄花槐
2	传统农作	274	27	中坡	NW30°	50	胡豆-甘薯-四季豆
3	植物篱	274	25	中坡	NW30°	56	黄花菜、西瓜-白菜
4	空白对照	278	25	中坡	NW30°		无任何植物覆盖
5	封山育林地	292	31	中坡	NW46°	87	马尾松 + 草地
6	自然恢复地	292	31	中坡	NW46°	82	马尾松 + 草地
7	经济林	285	31	中坡	W	68	枇杷

料自封袋带回实验室,于4℃冷藏室保存以备土壤活性有机碳分析.原状土壤样品置阴凉通风处摊开风干,稍阴干时即将土壤沿自然结构面轻轻掰成直径为1 cm左右的小土块,同时除去粗根和小石块,继续风干<sup>[16]</sup>.用以测定土壤团聚体及各粒级团聚体有机碳含量.

### 1.3 测定项目与方法

土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾外加热法<sup>[17]</sup>测定;微生物量碳(MBC)含量采用氯仿熏蒸浸提法<sup>[18,19]</sup>测定;土壤易氧化碳含量采用高锰酸钾氧化法测定<sup>[20]</sup>.

颗粒性有机碳含量的测定参考文献[21,22]的方法:将风干后的原状土,除去沙石和植物残留.取过2 mm风干土20.00 g,放入250 mL塑料瓶,加入100 mL 5%的六偏磷酸钠,手摇15 min,再用振荡器(90 r·min<sup>-1</sup>)振荡18 h,土壤悬浊液过53 μm筛,并反复以蒸馏水冲洗.收集筛子上方的物质,在60℃下过夜烘干并称量,取其中部分样品分析有机碳含量.根据颗粒所占比例和有机碳含量,推算颗粒有机碳含量.

土壤可溶性有机碳(DOC)含量的测定<sup>[23]</sup>:取过2 mm筛的鲜土10.0 g放入100 mL离心管中,加入20 mL去离子水振荡(220 r·min<sup>-1</sup>)30 min后离心(4 000 r·min<sup>-1</sup>)10 min,上清液通过循环水真空泵抽滤并过0.45 μm的微孔滤膜,滤液在Multi N/C 2100分析仪(耶拿,德国)测定.

土壤水稳性团聚体的测定方法如下:将风干土过7 mm筛子,除去根茬、石块.称取50 g左右的土样至玻璃杯中,从边缘慢慢地加蒸馏水,浸泡20 h以上,然后将吸水达到饱和的土样放入水稳性团聚体分析仪的套筛(2 000、1 000、500、250、106 μm)顶层,在上下振幅为38 mm下湿筛30 min,收集筛上物于不同烧杯中,倒去上清液,在60℃下烘干并称重(准确至0.01 g).计算水稳性团聚体的质量分数.

### 1.4 计算方法

#### 1.4.1 团聚体平均重量直径(MWD)

参照文献[24],水稳性团聚体含量能够表现出大于某一粒径结构的团粒结构所占的百分比,但不能表现这些团粒结构的大小,显然,当水稳性团粒含量相同时,团粒结构的颗粒越大,其抗蚀性越强.因此,引入团聚体平均重量直径的概念:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

式中,MWD为团粒平均重量直径(mm); $X_i$ 为各粒

级范围内团聚体的平均直径(mm); $W_i$ 为对应于 $X_i$ 的团聚体的含量(以小数表示).

#### 1.4.2 土壤粒径分布的分形维数计算

参照文献[25,26],以土壤颗粒重量分布代替土壤颗粒数量分布计算粒径分布的分形维数.可由下式表示:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}$$

式中, $D$ 为分形维数,两筛分粒径 $d_i$ 与 $d_{i+1}$ 间的平均值以 $\bar{d}_i$ 表示, $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta < \bar{d}_i)$ 表示粒径小于 $\bar{d}_i$ 的累计土粒重量, $W_0$ 表示土壤各粒级质量的总和.分形维数 $D$ 即可用回归分析方法进行求解.

#### 1.4.3 土壤可蚀性 $K$ 值的估算

$$\text{参 照 文 献 [ 27 ], } K = 7.594 \times \left\{ 0.0034 + 0.0405 \exp\left(-\frac{1}{2} \left[ \frac{\lg D_g + 1.659}{0.7101} \right]^2 \right) \right\}$$

式中, $D_g$ 为土壤颗粒的几何平均直径,mm.

### 1.5 数据分析

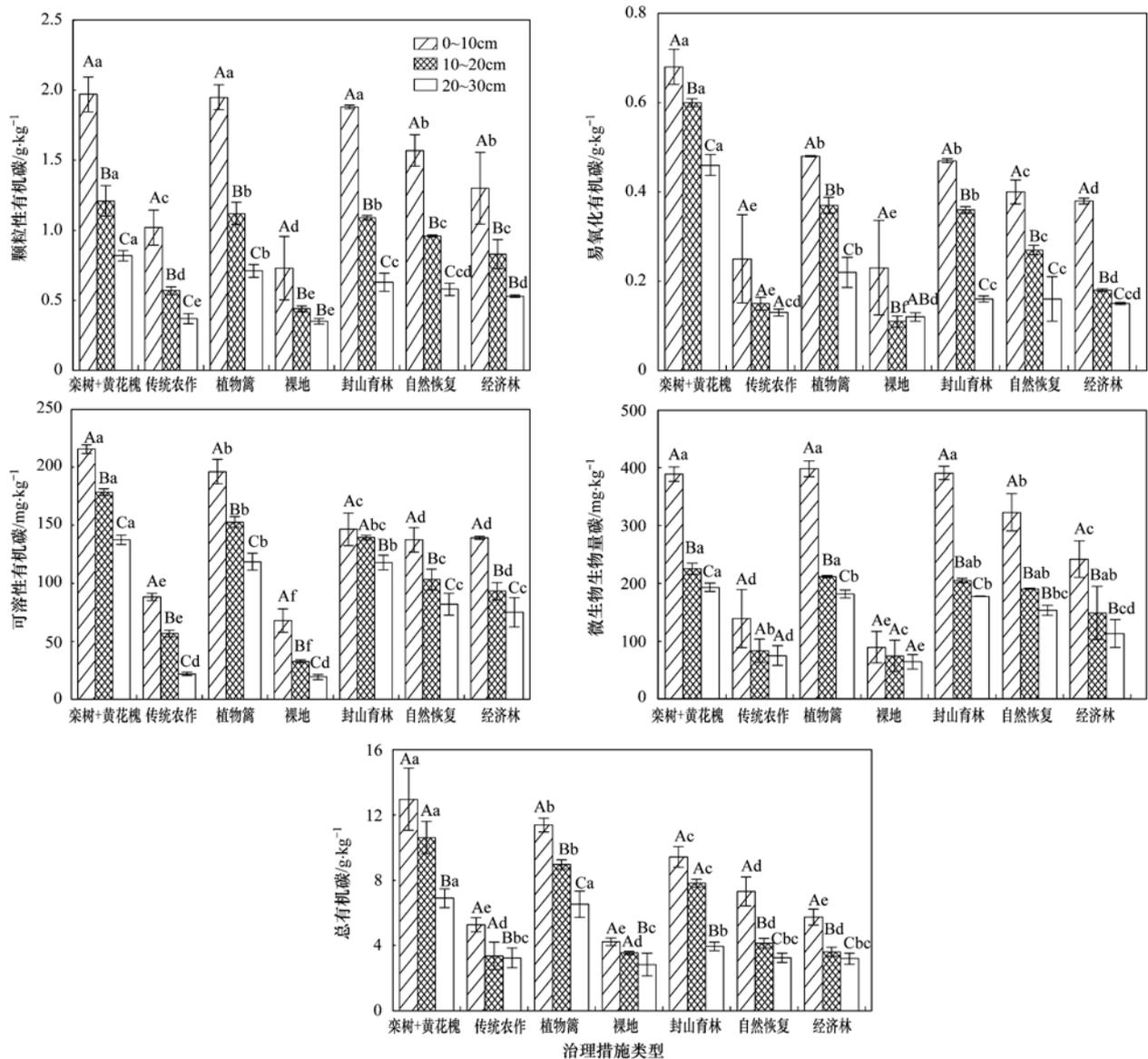
数据经Excel 2003整理后,采用SPSS 17.0软件对数据进行统计分析,不同林草措施间差异显著性采用方差分析(ANOVA)检验,均值的多重比较采用LSD法;变量间的相关关系采用Pearson相关统计方法进行分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 活性有机碳特征

不同林草措施下土壤活性有机碳组成具有一定的特征.同一林草措施下,土壤剖面的颗粒性有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物生物量有机碳含量均随土层深度的增加呈下降的趋势(图1),0~10 cm各活性有机碳含量显著高于20~30 cm土层的活性有机碳含量( $P < 0.05$ ).不同林草措施下,各土壤活性有机碳组分含量大小顺序基本表现为:栎树+黄花槐>植物篱>封山育林>自然恢复>经济林>传统农作>对照裸地.这是由于传统农作和裸地受外界干扰极大,对土壤质地和土壤生物群落造成严重破坏,使得碳源输入极大减少,从而使其土壤各活性有机碳含量较低.

栎树+黄花槐、植物篱、封山育林措施下的表层0~10 cm的活性有机碳含量显著高于传统农作和对照裸地( $P < 0.05$ ),10 cm以下仍然是以栎树+黄花槐、植物篱、封山育林措施大于传统农作和对照裸地,但差异并不一定显著( $P > 0.05$ ).土壤颗



不同小写字母表示同一土壤深度不同治理措施之间差异显著 ( $P < 0.05$ ),  
不同大写字母表示同一治理措施不同土壤深度间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图1 不同林草措施下土壤颗粒、易氧化、可溶、微生物生物量和总有机碳含量的土壤剖面分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil particulate organic carbon (POC), readily oxidized organic carbon (ROC), dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), total organic carbon (TOC) in different biological regulated measures

粒性有机碳对管理措施反应迅速, 可以作为评价土壤肥力和土壤质量的指标之一<sup>[28]</sup>. 由表2可知, 传统农作相对于栎树+黄花槐措施, 土壤颗粒性有机碳从表层向下依次减少29.44%、43.8%和54.88%, 说明了土壤表层颗粒性有机碳对耕作的敏感响应<sup>[29]</sup>. 主要是因为土壤颗粒性有机碳是处于新鲜动植物残体和腐殖化有机物之间的过渡有机碳库, 其含量变化直接受到地上植被凋落物及部分枯枝或残根的腐烂分解矿化影响<sup>[30]</sup>, 而传统农作作为耕地后最初富集的植物残留已经矿化分解, 导致土壤颗粒有机碳含量降低, 尤其表现在表层.

植物篱措施下土壤平均微生物生物量碳较其他林草措施较高, 与对照裸地相比, 土壤微生物生物量碳在0~20 cm土壤层提高较显著, 这与植物篱对坡面径流的阻滞作用及黄花菜根系吸收土壤中有有机质并归还表层土壤有关. 土壤微生物生物量碳是微生物对土壤养分的生长固持和死亡矿化释放的外在表现形式, 定植植物篱后土壤微生物量增高, 使其对养分的固持量与矿化释放量保持在一个较高水平, 有利于增强土壤肥力.

2.2 林草措施对土壤团聚体组成和稳定性的影响  
不同林草措施均有利于 >0.25 mm 水稳性大团

聚体总量的增加(表2),但不同林草治理措施效果不同. 总体上表现为: 栎树 + 黄花槐 > 植物篱 > 封山育林 > 自然恢复 > 经济林 > 传统农作 > 裸地对照. 与裸地对照表层土壤 >0.25 mm 团聚体含量相比, 栎树 + 黄花槐和植物篱措施分别高 264.7% 和 219.4%, 封山育林、自然恢复和经济林分别高 183.2%、168.7% 和 107.9%. 各林草措施显著高于传统农作和裸地对照处理, 栎树 + 黄花槐、植物篱显著高于封山育林和自然恢复措施, 封山育林和自然恢复措施显著高于经济林措施.

不同林草措施类型下各土壤剖面团聚体分布有较大的差别, >2 mm(传统农作和裸地对照除外)和 <0.106 mm 粒径的团聚体含量相对较多, 就 0~10 cm 表层土而言, 以栎树 + 黄花槐措施下土壤粗粒最多, 而以传统农作和对照裸地下土壤细粒最多(<0.25 mm). 对于 20~30 cm 土层, 除栎树 + 黄花槐措施, 其余各剖面均以 <0.25 mm 粒径的团聚体占较大比例, 且以传统农作和裸地对照最为显著. 以上结果表明: 不同林草措施对于促进土壤中水稳性小团聚体向较大水稳性团聚体的转化效果不同, 这主要与土壤中有机质含量增加有关.

植物篱措施下活性有机碳组分含量较高, 微生物的活性较强(图1), 有利于土壤中有机质的形成

与积累; 将土壤有机碳与水稳性大团聚体含量进行相关性分析(图2), 由图可以看出, 在最易受影响的 0~20 cm 表层土壤, 各林草治理措施下大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤有机碳含量呈正相关( $R^2 = 0.8679$ ,  $n = 18$ ), 且达极显著水平( $P < 0.01$ ), 三峡库区坡耕地采取林草措施治理后, 表层土壤中起团聚土壤主要作用的有机胶结物质逐渐增多. 表明不同林草治理措施有利于土壤中水稳性大团聚体含量的增加, 土壤中有机碳含量的增加也是主要原因之一.

0.25~0.106 mm 级的水稳性微团聚体表现出了与大团聚体相反的分布特征. 栎树 + 黄花槐措施下, 0.25~0.106 mm 级团聚体数量为最少, 而在传统农作和裸地对照措施下增加, 且差异显著( $P < 0.05$ ). 从不同剖面层次来看, 随土壤深度的加深, 该级团聚体数量基本表现为增加趋势. 可以看出, 土壤各级团聚体之间能够相互转化, 由于水稳性团聚体是由微团聚体和各种黏合剂胶结而成, 因此当土壤侵蚀或者翻耕作用使水稳性大团聚体破裂, 释放出原先被大团聚体包裹的微团聚体后, 微团聚体数量就会增加, 而采用合理的措施管理后, 土壤有机质增加, 胶结剂(土壤有机碳)增多, 新的大团聚体就会形成, 而微团聚体相应减少<sup>[31]</sup>.

表2 不同林草措施下水稳性团聚体组成/%

模式	土壤剖面深度 /cm	团聚体粒径					
		>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.106 mm	>0.25 mm
栎树 + 黄花槐	0~10	36.92 ± 0.57	22.01 ± 0.41	13.34 ± 0.20	5.11 ± 0.47	6.22 ± 0.64	77.38 ± 0.32
	10~20	27.20 ± 1.26	16.49 ± 0.49	12.81 ± 0.17	7.41 ± 0.15	9.87 ± 0.12	63.91 ± 0.56
	20~30	28.12 ± 0.65	14.75 ± 0.23	11.97 ± 0.56	8.52 ± 0.27	10.86 ± 0.70	63.36 ± 0.18
传统农作	0~10	8.79 ± 1.56	6.06 ± 0.32	3.99 ± 0.25	5.93 ± 0.19	12.54 ± 1.06	24.77 ± 3.82
	10~20	6.52 ± 1.09	4.70 ± 0.73	3.89 ± 0.27	5.44 ± 1.02	14.32 ± 1.42	20.55 ± 2.87
	20~30	7.71 ± 0.56	4.06 ± 0.36	3.94 ± 0.19	6.05 ± 0.84	16.24 ± 0.37	21.76 ± 1.51
裸地	0~10	6.42 ± 2.37	5.29 ± 0.76	3.83 ± 0.17	5.68 ± 0.26	12.43 ± 0.11	21.22 ± 3.56
	10~20	6.95 ± 0.43	4.59 ± 0.11	3.64 ± 0.24	5.42 ± 0.06	14.35 ± 0.07	20.60 ± 0.12
	20~30	9.64 ± 1.94	3.88 ± 0.17	3.77 ± 0.17	5.79 ± 0.25	16.01 ± 0.23	23.09 ± 1.35
植物篱	0~10	15.18 ± 1.35	8.76 ± 0.68	15.06 ± 0.20	28.77 ± 0.19	17.29 ± 0.98	67.78 ± 2.42
	10~20	12.72 ± 1.32	11.34 ± 0.29	12.76 ± 0.43	23.78 ± 1.64	18.94 ± 1.08	60.60 ± 0.89
	20~30	9.77 ± 0.73	7.40 ± 0.48	9.57 ± 0.13	25.66 ± 1.41	20.27 ± 0.21	52.39 ± 0.24
封山育林	0~10	24.52 ± 1.83	13.41 ± 0.21	12.36 ± 0.19	9.80 ± 0.48	20.43 ± 1.34	60.09 ± 1.46
	10~20	23.44 ± 2.02	15.28 ± 1.12	13.51 ± 0.45	8.83 ± 0.67	17.41 ± 2.34	61.06 ± 2.92
	20~30	17.08 ± 1.09	12.52 ± 1.15	11.71 ± 0.27	9.09 ± 0.52	19.21 ± 1.37	50.40 ± 1.99
自然恢复	0~10	28.87 ± 1.19	15.53 ± 1.65	6.95 ± 0.13	5.67 ± 0.15	10.08 ± 0.13	57.02 ± 0.62
	10~20	24.94 ± 1.82	11.32 ± 0.84	7.63 ± 0.67	5.81 ± 0.19	11.46 ± 0.12	49.70 ± 0.42
	20~30	23.68 ± 0.63	7.16 ± 0.81	6.20 ± 0.15	8.65 ± 0.12	15.42 ± 0.34	45.70 ± 0.32
经济林	0~10	17.89 ± 0.21	13.72 ± 0.26	6.00 ± 2.55	6.50 ± 0.09	14.46 ± 0.14	44.11 ± 2.52
	10~20	15.37 ± 0.21	8.19 ± 0.11	5.61 ± 0.14	5.91 ± 0.14	15.45 ± 0.23	35.08 ± 0.41
	20~30	19.52 ± 2.12	9.79 ± 0.53	7.02 ± 0.21	7.09 ± 0.13	13.47 ± 0.16	43.42 ± 1.52

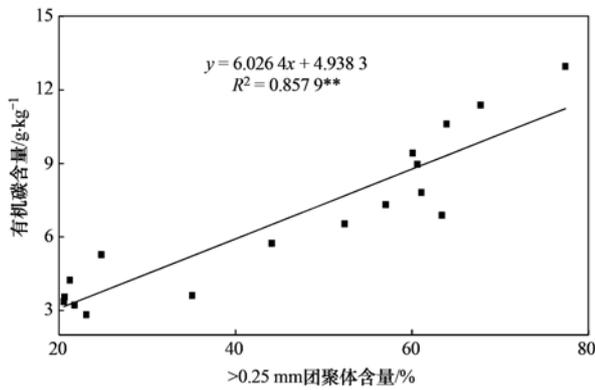


图2 土壤有机碳含量与土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体含量的关系

Fig. 2 Relationship between contents of soil organic carbon and >0.25 mm water-stable aggregates

### 2.3 土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD)、分形维数(CDF)与可蚀性K值分析

不同林草措施下土壤团聚体平均质量直径具有一定差异(表3),土壤平均重量直径为0.37~1.59 mm,栎树+黄花槐措施下土壤的MWD在0~30 cm层均表现最高,说明栎树+黄花槐措施下的土壤结构稳定性、抗侵蚀能力相对较强。土壤是具有自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特性,通过回归分析法,得出不同措施类型土壤湿筛团聚体的

CFD,研究土壤的分形维数的变化范围在2.404~2.85,各种林草措施下,除裸地对照,农耕地土壤团粒结构分形维数最大,土壤水稳性团聚体含量低,显著高于其他林草措施,所以,传统农作相对其他林草措施对土壤结构破坏率高,不利于土壤团聚体含量增加和土壤结构稳定性的提高。综上可知,林草措施可以在一定程度上改善土壤结构,各林草措施中,以栎树+黄花槐措施较好,而以传统农作较差,说明合理的植被治理措施确实可以提高土壤团聚体的含量、改善土壤的物理结构,但是当措施不当,人为干扰严重时,会对土壤团聚化促进作用减弱,甚至会降低大团聚体的含量。

对7种不同林草措施下土壤剖面的可蚀性K值分析可知,以栎树+黄花槐各层土壤的可蚀性K值最小,为0.052,说明该措施下土壤较难被分散、搬运。植物篱表层土壤相对封山育林措施土壤可蚀性K值较大,这是由于横坡种植的植物篱黄花菜措施有人为耕作,其土壤中粒径较大的水稳性团聚体含量减少。没有任何植被覆盖的裸地对照各层土壤的可蚀性K值最大,最高为0.237,降雨时最容易引起水土流失,并导致土层变薄,土壤在雨滴打击,径流冲刷或者两者共同作用下极易被分散、搬运,造成地表土壤流失。

表3 土壤水稳性团聚体特征值

Table 3 Properties of water-stable soil aggregate for different biological regulated measures

模式	土壤剖面深度/cm	平均重量直径/mm	分形维数	土壤可蚀性K值
栎树+黄花槐	0~10	1.59	2.404	0.052
	10~20	1.24	2.541	0.074
	20~30	1.21	2.547	0.075
传统农作	0~10	0.46	2.821	0.192
	10~20	0.39	2.836	0.205
	20~30	0.46	2.814	0.186
植物篱	0~10	0.89	2.407	0.086
	10~20	0.82	2.490	0.096
	20~30	0.62	2.571	0.118
裸地	0~10	0.38	2.839	0.221
	10~20	0.37	2.850	0.237
	20~30	0.40	2.821	0.193
封山育林	0~10	1.16	2.492	0.081
	10~20	1.10	2.518	0.083
	20~30	0.87	2.608	0.108
自然恢复	0~10	1.19	2.624	0.085
	10~20	1.03	2.674	0.103
	20~30	0.94	2.683	0.113
经济林	0~10	0.85	2.692	0.119
	10~20	0.70	2.745	0.145
	20~30	0.80	2.713	0.128

### 2.4 土壤活性有机碳组分与土壤团聚体可蚀性( $K$ 值)的关系

由表4可知,不同林草治理措施下土壤中 $>0.25$  mm团聚体含量与土壤可蚀性 $K$ 值之间呈极显著负相关; $>0.25$  mm团聚体含量与颗粒性有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳之间呈极显著正相关关系,表明在不同林草措施下,土壤大团聚体含量与土壤中活性有机碳各组分有关,不同林草

治理措施能提高三峡库区坡耕地土壤中团聚体水稳性,提高土壤结构稳定性,从而将提高土壤抵抗外力破坏的能力<sup>[32]</sup>.土壤可蚀性 $K$ 值与颗粒性有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳之间均呈极显著负相关,表明不同林草治理措施对土壤的抗侵蚀和抗冲刷能力具有一定改善作用,而只有当所采用的植物物种类型与水土流失的搭配适当时,才能达到最好的防治水土流失的效果.

表4 土壤团聚体组成和可蚀性 $K$ 值与土壤活性有机碳组分的线性关系( $n=21$ )

Table 4 Linear relationship of the composition of aggregate and  $K$  with soil labile organic carbon

项目	颗粒性有机碳 POC	易氧化有机碳 ROC	可溶性有机碳 DOC	微生物生物量碳 MBC	$>0.25$ mm
$>0.25$ mm	0.731 **	0.821 **	0.922 **	0.835 **	1.000
可蚀性 $K$ 值	-0.67 **	-0.755 **	-0.862 **	-0.790 **	-0.967 **

### 3 讨论

对于试验区的不同林草措施,植被类型以草本和乔木为主,因此植被根系在 $0\sim 30$  cm土壤层分布最为集中,腐殖质的含量在这一层也最为丰富,因此这一层有机碳积累也较多.土壤有机碳库主要受初级生产量的输入与分解制约,三峡库区坡地不同林草治理措施土壤剖面的活性有机碳含量均随土壤深度的增加而减少,这是因为土壤表层植被枯落物多,植被的根系在浅表层分布最丰富,有机质积累量较大,随着土壤深度的增加,植被根系分布减少,有机质来源少,故而出现活性有机碳随土壤深度的增加而减少的趋势,这与前人大部分研究结果一致<sup>[33]</sup>.

土壤团聚体影响土壤的各种理化性质,是土壤结构构成的基础,其形成与土壤有机碳含量有着紧密的联系<sup>[34]</sup>.早有研究表明,较大的团聚体是通过土壤有机碳胶结较小的团聚体而形成的<sup>[35,36]</sup>,且土壤有机碳与 $>1$  mm的水稳性大团聚体之间存在显著地正相关关系<sup>[32]</sup>.本研究结果显示(表3),不同林草治理措施的采取可以一定程度上提高土壤有机碳及活性有机碳各组分含量,并对土壤团聚体的形成有较明显促进作用.与不采取任何措施的对照裸地相比,栎树+黄花槐、封山育林等措施可以明显增加大团聚体的数量,提高土壤的平均质量直径,有利于土壤结构的改善.

土壤水稳性团聚体大小、数量和稳定性决定土壤孔隙大小、结构的稳定性,影响土壤通透性、抗蚀性,是表征土壤结构的重要指标之一<sup>[37]</sup>.本研究发现,栎树+黄花槐、植物篱、封山育林措施采取后,土壤团聚体、有机碳及活性有机碳含量增加,传

统农作不利于土壤有机质及结构稳定,造成土壤侵蚀较为严重,土壤营养物质流失<sup>[38]</sup>,这是因为形成并维持土壤结构的主要因素是土壤有机胶结物质,土壤有机质水平的提高有利于土壤形成良好结构并提高土壤稳定性,而传统农作却加速了土壤有机质的分解,并促进了土壤有机质的矿化分解.而其他措施尤其是栎树+黄花槐措施,每年有一定的枯落物归还土壤转化为有机质,且根系分布较丰富,使土壤有机胶体含量增加,这些都有利于土壤团聚体和大粒径团聚体的形成及稳定性增加,进而导致林草措施采取后土壤团粒结构分形维数降低和土壤结构改善.

与单纯的土壤粒径分布相比,分形维数是不同粒径含量的综合反映,也是对土壤复杂与不规则结构的描述.研究表明,相同环境条件下,传统农作较其他林草措施分形维数大,农业耕种改变了该区域原有的自然植被,对土壤颗粒的组成产生影响,使土壤中团聚体百分含量发生变化,从而使土壤颗粒的分形维数也随之变化<sup>[39]</sup>.相关研究表明,湿筛条件下,土壤团粒结构分形维数与各粒级水稳性团聚体含量呈极显著负相关,与结构体破坏率呈极显著正相关,其中与 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量和结构体破坏率相关性最佳<sup>[40]</sup>.因此,团粒结构分形维数能够反映各粒级团聚体含量和土壤结构体破坏率对土壤结构与稳定性的影响趋势, $>0.25$  mm团聚体和水稳性团聚体含量是影响团粒结构分形维数的重要粒径含量因素,且 $>0.25$  mm土壤团聚体含量越高,其分形维数越小,土壤结构体破坏率越低,土壤结构越稳定.在水蚀严重地区,土壤中细颗粒物质伴随着养分容易受水蚀而发生流失,而不同的土

地利用类型对水土流失的阻截作用不同,从这一意义上来看,土壤粒径分布特征也可以反映土地利用对侵蚀的影响。

土壤可蚀性  $K$  值是定量计算土壤流失量的重要指标,土壤可蚀性表示在雨滴打击,径流冲刷或者两者共同作用下土壤被分散、搬运的难易程度<sup>[41]</sup>。很多研究均表明,土壤可蚀性的大小主要受制于土壤结构的稳定性,土壤有机质含量、团聚体含量等是反映土壤可蚀性的最佳指标<sup>[42]</sup>,通过本研究结果可以看出,不同林草措施的采取,使土壤活性有机碳有一定增加,可蚀性  $K$  值有所减小。对照裸地及传统农作土壤各活性碳组分较低,土壤肥力贫瘠,而栎树+黄花槐、植物篱、封山育林措施下土壤活性碳含量较高,土壤肥力增强,可蚀性  $K$  值也有所降低,抵抗侵蚀的能力有一定的提高。紫色土容易遭受侵蚀的特性众所周知,不同林草措施的采取使土壤可蚀性  $K$  值在不同程度上有所降低,说明土壤对侵蚀营力分离和搬运作用敏感性降低,土壤抗蚀性能逐渐增强,土壤抵抗侵蚀能力提高,在同一单位降雨侵蚀作用力下土壤侵蚀产沙减少<sup>[43]</sup>。

#### 4 结论

(1) 不同林草治理措施下土壤活性有机碳组成具有一定的特征。同一林草措施下,颗粒性有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物生物量有机碳含量均随土层深度的增加呈下降的趋势;栎树+黄花槐措施下土壤活性有机碳组分含量高于其他几种林草治理措施。

(2) 不同林草治理措施均有利于土壤中水稳性小团聚体向较大水稳性团聚体的转化,但不同林草措施治理效果不同,其中以栎树+黄花槐措施下粗粒含量增加效果最显著;在 0~20 cm 表层土壤, > 0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤有机碳呈显著正相关。

(3) 土壤可蚀性  $K$  值与颗粒性有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳之间均呈极显著负相关,与 >0.25 mm 团聚体含量存在极显著负相关关系,同时土壤也具有一定的分形特性。其中栎树+黄花槐措施下土壤 MWD 值最大,CFD 值、可蚀性  $K$  值最小,土壤结构的稳定性和抗蚀性较强。

#### 参考文献:

- [1] Liang B C, MacKenzie A F, Schnitzer M, *et al.* Management-induced change in labile soil organic matter under continuous

corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **26**(2): 88-94.

- [2] Freixo A A, De Machado P L O, Dos Santos H P, *et al.* Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **64**(3-4): 221-230.
- [3] 万忠梅, 郭岳, 郭跃东. 土地利用对湿地土壤活性有机碳的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(3): 567-570.
- [4] 万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(2): 406-412.
- [5] Melero S, López-Garrido R, Murillo J M, *et al.* Conservation tillage: short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **104**(2): 292-298.
- [6] Wang L L, Song C C, Song Y Y, *et al.* Effects of reclamation of natural wetlands to a rice paddy on dissolved carbon dynamics in the Sanjiang Plain, Northeastern China [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(10): 1417-1423.
- [7] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(6): 780-785.
- [8] Biederbeck B O, Zentener R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(12): 1647-1656.
- [9] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, **12**(4): 459-465.
- [10] Soon Y K, Arshad M A, Haq A, *et al.* The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **95**(1-2): 38-46.
- [11] Belay-Tedla A, Zhou X H, Su B, *et al.* Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(1): 110-116.
- [12] Gregorich E G, Greer K J, Adneron D W, *et al.* Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, **47**(3-4): 291-302.
- [13] Madari B, Machado P L O A, Torres E, *et al.* No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, **80**(1-2): 185-200.
- [14] 张保华. 长江上游典型区域森林土壤结构体形成和稳定性机制分析[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2007, **20**(1): 12-17.
- [15] 朱冰冰, 李鹏, 李占斌, 等. 子午岭林区土地退化/恢复过程中土壤水稳性团聚体的动态变化[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, **36**(3): 124-128, 134.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

- [17] Bittelli M, Campbell G S, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(4): 782-788.
- [18] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distribution[J]. Ecological Modelling, 2005, **182**(3-4): 305-315.
- [19] 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, 1999. 106-288.
- [20] Blair G J, Lefory R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [21] Carter M R, Parton W J, Rowland I C, et al. Simulation of soil organic carbon and nitrogen changes in cereal and pasture systems of southern Australia[J]. Australian Journal of Soil Research, 1993, **31**(4): 481-491.
- [22] Zhang M K, He Z L. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an Ultisol under rice cropping in southeast China[J]. Geoderma, 2004, **118**(3-4): 167-179.
- [23] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(9): 1231-1243.
- [24] 沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 等. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(3): 345-348.
- [25] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**(2): 362-369.
- [26] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, **38**(20): 1896-1899.
- [27] 杨萍, 胡续礼, 姜小三, 等. 小流域尺度土壤可蚀性(K值)的变异及不同采样密度对其估值精度的影响[J]. 水土保持通报, 2006, **26**(6): 35-39.
- [28] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA [J]. Environmental Pollution, 2002, **116**(S1): S53-S62.
- [29] Ashagrie Y, Zech W, Guggenberger G, et al. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia[J]. Soil and Tillage Research, 2007, **94**(1): 101-108.
- [30] 李银科, 李小刚, 张平良, 等. 土地利用方式对荒漠土壤有机碳和养分含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, **42**(2): 103-107.
- [31] Wairiu M, Lal R. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands[J]. Soil and Tillage Research, 2003, **70**(1): 19-27.
- [32] Kay B D. Rates of change of soil structure under different cropping systems[J]. Advances in Soil Science, 1990, **12**: 1-52.
- [33] 李明峰, 董云社, 耿元波, 等. 草原土壤的碳氮分布于 CO<sub>2</sub> 排放通量的相关性分析[J]. 环境科学, 2004, **25**(2): 7-11.
- [34] 李军锋, 赵秀海. 分形理论在集材道土壤团聚体研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(9): 1795-1797.
- [35] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, **33**(2): 141-163.
- [36] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 1988, **11**(3-4): 199-238.
- [37] 邱仁辉, 杨玉盛, 俞新妥. 不同栽植代数杉木林土壤结构特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, **20**(4): 6-11.
- [38] 黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区坡地林草植被阻止降雨径流侵蚀[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(9): 70-76.
- [39] 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(5): 120-125.
- [40] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南坡地不同坡耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(6): 1410-1416.
- [41] 张文太, 于东升, 史学正, 等. 中国亚热带土壤可蚀性 K 值预测的不确定性研究[J]. 土壤学报, 2009, **46**(2): 185-191.
- [42] 薛蕊, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤抗蚀性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(S1): 69-72.
- [43] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(2): 56-61.

## CONTENTS

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

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行