

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄毓, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性

唐国勇^{1,2}, 李昆^{1,2}, 孙永玉^{1,2}, 张春华^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650224; 2. 国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位观测站, 昆明 650224)

摘要: 全球气候变化背景下, 森林土壤固碳能力及所固定碳的稳定性受到极大关注. 基于土壤密度分组和酸水解技术, 对比研究了1991年营造的大叶相思(*Acacia auriculiformis*)林不同阶段(1991、1997、2003和2010年)土壤及其物理和生化组分中有机碳密度. 结果表明, 造林19年后林地表层(0~15 cm)和亚表层(15~30 cm)土壤有机碳密度分别为1.40 kg·m⁻²和0.99 kg·m⁻². 研究期内(1991~2010年)表层和亚表层土壤平均固碳速率分别为37.89 g·(m²·a)⁻¹和16.84 g·(m²·a)⁻¹, 且土壤呈现加速固碳特征. 2003年林地表层重组有机碳分配比例为71.44%, 显著高于2010年(67.99%). 2003年林地表层或亚表层轻组顽固性碳指数显著高于重组, 但均随林龄的增加而降低, 尤其是轻组顽固性碳指数. 2003~2010年间燥红土“新固定”碳中57%~70%受物理保护, 33%~49%为生化稳定性碳. 研究揭示出干热河谷人工林燥红土具备较大的固碳能力. 受物理保护碳的生化稳定性低于非保护碳, 其稳定性均随林龄的增加而降低.

关键词: 土壤碳固定; 土壤密度组分; 酸水解; 有机碳表观稳定性; 干热河谷; 燥红土; 人工林

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0551-07

Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley

TANG Guo-yong^{1,2}, LI Kun^{1,2}, SUN Yong-yu^{1,2}, ZHANG Chun-hua^{1,2}

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China; 2. Yuanmou Desertification Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Kunming 650224, China)

Abstract: Great concerns about potential for carbon (C) sequestration in forested soil and the stability of the sequestered C have been exerted under the background of global climate change. Organic C density in soil and in soil physical and biochemical fractions at various stages (1991, 1997, 2003 and 2010) in *Acacia auriculiformis* stand afforested in 1991 were investigated at Dry-Hot Valley via density fractionation and acid hydrolysis. The results showed that organic C density at surface (0-15 cm) and subsurface (15-30 cm) soil layers was 1.40 kg·m⁻² and 0.99 kg·m⁻² after 19 years of afforestation, respectively. The annual C sequestration rates of surface and subsurface soil layers were 37.89 g·(m²·a)⁻¹ and 16.84 g·(m²·a)⁻¹ during 1991-2010, respectively, and the sequestration was accelerating. The ratio of organic C in heavy fraction to in surface soil was 71.44% in 2003, which was significantly higher than that in 2010 (67.99%). The recalcitrant carbon index (I_{RC}) in light fraction was significantly higher than that in heavy fraction at surface or subsurface layers in 2003, but both decreased with aging of plantation, especially I_{RC} in light fraction. Approximately 57%-70% of new sequestered C was protected by physical mechanism and 33-49 percent was biochemical recalcitrant C during the stage from 12 to 19 years after afforestation. The results reveal that forested torrid red soil at Dry-Hot Valley may have a considerable capability of C sequestration. The biochemical stability of physically protected C is lower than the unprotected. Both the stability, however, decreases with the plantation age.

Key words: soil carbon sequestration; density fractionation; acid hydrolysis; organic carbon apparent stability; Dry-Hot Valley; torrid red soil; plantation

为积极应对全球变化、减少温室气体排放, 中国政府决定: 通过植树造林和加强森林管理, 到2020年中国森林面积比2005年增加 40×10^4 km², 森林蓄积量增加 13×10^8 m³. 《中国应对气候变化国家方案》明确指出“现有可供植树造林的土地多集中在荒漠化、石漠化以及自然条件较差的地区”. 西南干热河谷是我国特有的生态脆弱区, 土地荒漠化严重、植被覆盖率低^[1, 2]. 在我国森林覆盖率已提高到20.36%的今天, 总面积约 0.3×10^4 km²的干热河

谷等造林困难区域无疑是植被恢复、植树造林和加强现有森林管理, 实现国家“十二五”规划提出的森林资源“双增”目标不可或缺的重点地区.

土壤有机碳(SOC)库是陆地生态系统中最活跃

收稿日期: 2011-04-14; 修订日期: 2011-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100462); 中国林科院资源昆虫研究所基本科研业务费专项(riricaf201001M, riricaf200803Z); 林业公益性行业专项(201104002-3-2)

作者简介: 唐国勇(1980~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为干热河谷生态恢复与土壤养分循环, E-mail: tangguoyong1980@gmail.com

的碳库,其微小变化可导致大气 CO₂ 浓度的显著变化^[3]. 土地利用变化通常引起 SOC 数量和质量的变化^[3-6]. 如荒山或弃耕地造林后,进入土壤的植物有机残体量增多(如枯立木、植被凋落物、残体根系及根系分泌物等)、SOC 矿化速率潜在降低,导致造林一段时间后 SOC 含量的迅速增加^[4, 7-10],但有机碳稳定性并不一定提高^[6, 11, 12]. 已有研究探究了干热河谷不同利用方式下 SOC 含量特征^[13, 14],但尚未涉及造林/再造林后该地区特有的土壤——燥红土固碳能力及其所固定碳的稳定性. 这直接影响到人们对造林困难地区(如干热河谷)林业碳汇前景及潜力的判断.

要理解全球变化和碳循环中土壤作为碳汇(或碳源)所起的作用并正确管理土壤,首先应弄清 SOC 的稳定机制. SOC 的稳定主要通过 3 种方式实现:①化学稳定. 土壤有机质与土壤颗粒发生吸附作用或与 Ca²⁺、Fe³⁺ 等离子形成沉淀物;②物理保护. 土壤有机质与土壤颗粒(尤其是黏粒和粉粒)形成复合体,或被包裹在团聚体内,在有机碳和分解者之间形成物理屏障;③生化顽固. 外部输入的有机物本身化学性质顽固,或在土壤微生物(或酶)的作用下形成生化性质稳定的有机质,而难以被土壤微生物利用和分解. 通常,物理保护和生化顽固是 SOC 稳定的主要途径^[15].

以干热河谷典型区——云南元谋干热河谷为背景,研究中长期(19 a)人工植被恢复(人工林)过程中:①燥红土固碳特征;②有机碳分布格局及其各组分(密度分组)有机碳顽固性;③“新固定”碳的表观稳定性. 其研究将有助于揭示干热河谷燥红土生物固碳机制,以期为在我国造林极端困难地区进行大规模植树造林以补偿工业二氧化碳排放的可行

性提供土壤固碳方面的论证依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

地处 101°35′ ~ 102°06′E、25°23′ ~ 26°06′N 的云南元谋县,属南亚热带季风干热气候区,是干热河谷的典型代表^[2, 13]. 研究区位于国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位观测站(101°51′47″E、25°40′11″N),试验林区平均海拔 1 120 m,坡度约 7° ~ 12°,坡向为南坡,坡位为中坡,水土流失较严重. 土壤类型为燥红土,表层土壤浅薄;心土层土壤深厚、板结. 造林前植被稀疏,放牧、割草等人为活动频繁,地表裸露率大(> 70%),植被以车桑子(*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.)、余甘子(*Phyllanthus emblica* L.)和扭黄茅(*Heteropogon contortus* (L.) Beauv.)为主. 于 1991 年雨季初期(5 月)在该试验点选择大叶相思(*Acacia auriculiformis*)等速生生态树种,采取撩壕整地,进行容器苗造林,株行距为 2.5 m × 3 m,造林面积超过 20 亩,实施封禁管理. 造林后林木保存率高、生长良好,7 ~ 9 a 后能少量天然更新. 造林前(1991 年)取样测定了土壤主要理化性质.

1.2 样品采集

1997 年 5 月在大叶相思林内设置 5 个立地条件和林木生长状况等相对一致、面积为 20 m × 20 m 的固定样方进行长期观测和样品采集. 在每个样方内按“S”形分层(0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm)采集 7 ~ 9 个土体,样方内同一深度的土体混匀形成一份混合样,即每次采集表层(0 ~ 15 cm)混合样和亚表层(15 ~ 30 cm)混合样各 5 份. 同时调查土壤容重、土壤石砾重量分数等(表 1). 土样采集时间分别为 1997 年 5 月、2003 年 4 月和 2010 年 5 月.

表 1 土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic chemical and physical properties of soil samples

| 采样时间 | 土层 | 土壤容重 /g·cm ⁻³ | > 2 mm 土壤石砾 质量分数/% | 土壤 pH 值 | 土壤有机碳含量 /g·kg ⁻¹ | 土壤全氮含量 /g·kg ⁻¹ |
|--------|-----|-----------------------------|-----------------------|---------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1991 年 | 表层 | 1.68 | 4.70 | 5.99 | 2.82 ± 0.202 e | 0.22 ± 0.015 d |
| | 亚表层 | 1.72 | 4.68 | 6.20 | 2.73 ± 0.116 e | 0.21 ± 0.008 d |
| 1997 年 | 表层 | 1.67 | 4.81 | 6.14 | 3.26 ± 0.272 d | 0.25 ± 0.020 c |
| | 亚表层 | 1.72 | 4.74 | 6.37 | 2.88 ± 0.142 e | 0.22 ± 0.011 d |
| 2003 年 | 表层 | 1.62 | 4.65 | 6.25 | 4.45 ± 0.293 b | 0.36 ± 0.025 b |
| | 亚表层 | 1.69 | 4.60 | 6.40 | 3.42 ± 0.154 d | 0.27 ± 0.011 c |
| 2010 年 | 表层 | 1.59 | 4.66 | 6.24 | 6.15 ± 0.464 a | 0.52 ± 0.037 a |
| | 亚表层 | 1.68 | 4.63 | 6.42 | 4.11 ± 0.207 c | 0.33 ± 0.015 b |

1) 同列带相同字母表示均值差异未达 95% 显著水平(ANOVA)

1.3 分析指标及其测定方法

土样采回后,用手选法除去活体根系和可见植

物残体,在室内风干、磨细、过 20 目筛,备用. 造林前(1991 年)和造林后 3 个不同时期(1997、2003 和

2010 年)采集的土样测定了 SOC 浓度,造林 12 a 后采集的土样(2003 和 2010 年)测定了土壤密度组分中有机碳浓度及其顽固性碳浓度。

土壤密度组分参照 Janzen 等^[16]的方法,轻组和重组中有机碳顽固性按照 Rovira 等^[17]的酸水解法,

并根据实际情况作了一定的改动.土壤有机碳浓度、分离得到的密度组分(轻组和重组)及其顽固性组分中有机碳浓度用重铬酸钾氧化-外加加热法测定。

1.4 数据计算与统计分析

本研究涉及到的参数及其计算公式见表 2。

表 2 本研究涉及的参数计算公式

Table 2 Calculation formulae of the parameters referred in this study

| 序号 | 参数 | 计算公式 |
|----|--|---|
| 1 | 重组(或轻组)比例/% | $= 60^{\circ}\text{C}$ 下重组(或轻组)烘干重(g)/土壤称样重(g) $\times 100$ |
| 2 | 重组(或轻组)有机碳含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $=$ 重组(或轻组)比例($\%$) \times 该组分中有机碳浓度($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
| 3 | 重组(或轻组)有机碳分配比例/% | $=$ 重组(或轻组)有机碳密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)/土壤有机碳密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) $\times 100$ |
| 4 | 重组(或轻组)顽固性组分比例/% | $= 60^{\circ}\text{C}$ 下重组(或轻组)中顽固性组分烘干重(g)/重组(或轻组)称样重(g) $\times 100$ |
| 5 | 重组(或轻组)顽固性碳含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $=$ 重组(或轻组)顽固性组分比例($\%$) \times 该顽固性组分中有机碳浓度($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
| 6 | 重组(或轻组)顽固性碳指数 | $=$ 重组(或轻组)顽固性碳密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)/重组(或轻组)有机碳密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) $\times 100$ |
| 7 | 土壤(或组分)有机碳密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ | $= d \times \theta \times c \times (1 - \delta) / 100$, 式中, d 为土层厚度(cm), θ 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), c 为土壤(或组分)有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), δ 为 > 2 mm 土壤石砾重量分数($\%$) |

用一维方差分析(One-Way ANOVA)比较不同造林阶段、不同土层深度各参数差异的显著性,通过对样品 t 检验(Paired Samples T-Test)比较轻组和重组顽固性碳指数差异的显著性,以上分析均在 SPSS 11.5 软件上完成。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳演变规律

干热河谷大叶相思林营造 19 a 时(2010 年),林地燥红土表层和亚表层 SOC 密度分别为 $1.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.99 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,比造林前的荒地(1991 年)增加了 $0.72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,即 1991~2010 年间林地表层和亚表层土壤平均固碳速率分别为 $37.89 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $16.84 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (图 1)。

人工林营造后,林地 SOC 密度呈现明显的加速增长趋势(图 1)。方差分析显示除 1997 年表层或亚表层 SOC 密度与造林前差异不显著外,其他造林阶段之间 SOC 密度差异均达到显著水平。在造林最初 6 a 内(1991~1997 年)林地表层 SOC 碳密度增加了 $0.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,平均固碳量为 $16.67 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$;造林中期(1997~2003 年)表层土壤平均固碳量为 $42.67 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$;而在研究后期(2003~2010 年)表层碳密度由 $1.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 提高到 $1.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,增幅达 35.92%,平均固碳量 [$52.86 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]明显高于造林初期和中期[图 1(b)]。林地亚表层 SOC 密度演变趋势与表层类似,但土壤平均固碳量远低于表层(约为表层的 35%~50%)。

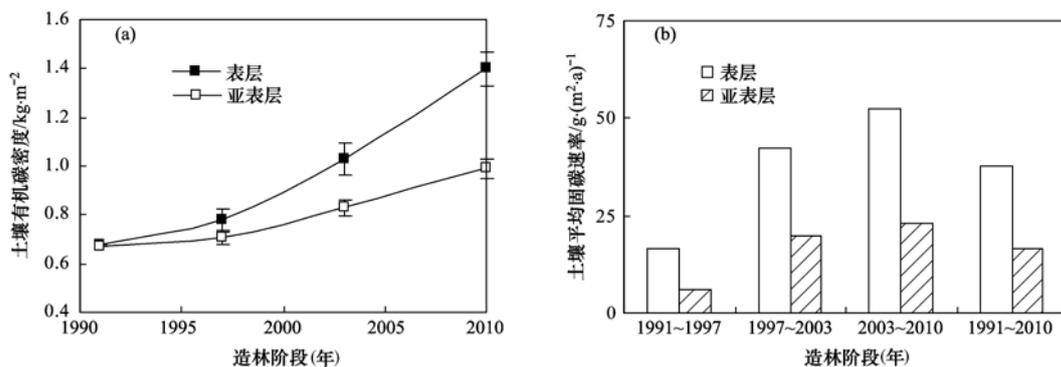


图 1 造林后不同阶段表层和亚表层土壤有机碳密度和土壤平均固碳速率

Fig. 1 Soil organic C density and annual C sequestration rates at surface and subsurface soil layers under various stages after afforestation

2.2 土壤有机碳分布格局

随着 SOC 的积累,林地燥红土各组分(轻组、重组)中有机碳的数量也随之显著增加,但轻组有机

碳的增幅高于重组(表 3)。如表层土壤轻组有机碳在 2003~2010 年间增加了 50.00%,而同期重组有机碳的增幅为 28.38%。2010 年和 2003 年表层土壤

轻组比例不到 0.8%, 亚表层轻组比例约为 0.25%。尽管各土层轻组比例极低, 但轻组有机碳分配比例并不低, 其范围在 23.33% ~ 30.16% 之间。随林龄的增加, 表层轻组比例、轻组有机碳密度、重组有机

碳密度和轻组有机碳分配比例显著提高, 重组有机碳分配比例显著降低, 而重组比例基本不变。随土层的加深, 两组分有机碳密度、轻组有机碳分配比例显著降低, 而重组有机碳分配比例显著提高。

表 3 表层和亚表层土密度组分中有机碳分布格局¹⁾

Table 3 Distribution pattern of organic carbon in soil density fractions at surface and subsurface soil layers

| 采样时间 | 土层 | 采样数 | 轻组比例 /% | 重组比例 /% | 轻组有机碳密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ | 重组有机碳密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ | 轻组有机碳分配比例 /% | 重组有机碳分配比例 /% |
|--------|-----|-----|----------------|-----------------|---|---|-----------------|-----------------|
| 2003 年 | 表层 | 5 | 0.60 ± 0.057 b | 97.72 ± 1.015 a | 0.28 ± 0.027 b | 0.74 ± 0.058 b | 26.76 ± 2.182 b | 71.44 ± 1.829 b |
| | 亚表层 | 5 | 0.25 ± 0.015 c | 98.77 ± 1.075 a | 0.19 ± 0.012 d | 0.63 ± 0.030 c | 23.33 ± 1.131 c | 75.80 ± 1.001 a |
| 2010 年 | 表层 | 5 | 0.78 ± 0.082 a | 97.58 ± 0.696 a | 0.42 ± 0.021 a | 0.95 ± 0.080 a | 30.16 ± 1.179 a | 67.99 ± 1.276 c |
| | 亚表层 | 5 | 0.26 ± 0.013 c | 98.18 ± 1.073 a | 0.24 ± 0.022 c | 0.74 ± 0.034 b | 24.17 ± 1.509 c | 74.59 ± 1.121 a |

1) 数据为 5 个土样的平均值 ± 标准差, 同列带相同字母表示均值差异未达 95% 显著水平 (ANOVA), 下同

2.3 各密度组分中的顽固性碳密度及其顽固性碳指数

2003 年和 2010 年林地表层和亚表层土壤顽固性碳密度和顽固性碳指数 (I_{RC} 值) 见表 4。2010 年表层土壤轻组和重组顽固性碳密度分别为 $0.23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 显著高于 2003 年, 增幅分别为 43.75% 和 28.20%; 同期亚表层土壤轻组和重组顽固性碳密度也有显著的增加, 但增幅 (20.00% 和 15.62%) 约为表层的一半。

表 4 表层和亚表层土壤各组分中顽固性碳密度和顽固性碳指数

Table 4 Recalcitrant organic C density and recalcitrant C index in soil fractions at surface and subsurface soil layers

| 采样时间 | 土层 | 采样数 | 轻组顽固性碳密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ | 重组顽固性碳密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ | 总顽固性碳密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ | 轻组顽固性碳指数 ¹⁾ | 重组顽固性碳指数 ¹⁾ | 总顽固性碳与土壤总有机碳之比 /% |
|--------|-----|-----|--|--|---|------------------------|------------------------|-------------------|
| 2003 年 | 表层 | 5 | 0.16 ± 0.013 b | 0.39 ± 0.026 b | 0.55 ± 0.033 b | 57.13 ± 1.051 a1 | 53.41 ± 0.841 a2 | 53.42 ± 0.642 a |
| | 亚表层 | 5 | 0.10 ± 0.005 d | 0.32 ± 0.026 c | 0.43 ± 0.027 d | 54.67 ± 1.288 b1 | 51.09 ± 2.723 ab2 | 51.48 ± 2.167 ab |
| 2010 年 | 表层 | 5 | 0.23 ± 0.012 a | 0.50 ± 0.039 a | 0.73 ± 0.043 a | 54.30 ± 1.922 bc1 | 53.07 ± 0.609 a1 | 52.47 ± 1.990 a |
| | 亚表层 | 5 | 0.12 ± 0.011 c | 0.37 ± 0.021 b | 0.49 ± 0.027 c | 52.38 ± 1.698 c1 | 49.89 ± 0.876 b1 | 49.88 ± 1.108 b |

1) 轻组与重组顽固性碳指数栏中字母后数字相同表示数据间差异未达到 95% 显著水平 (成对样品 t 检验)

3 讨论

3.1 林地燥红土固碳能力

干热河谷退化生态系统 (荒地) 造林 19 a 后, 林地燥红土表层 (0 ~ 15 cm) SOC 含量和密度分别为 $5.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (表 1, 图 1), 这与该地区类似研究的结果^[13, 14] 以及第二次土壤普查时燥红土表层 (0 ~ 20 cm) SOC 密度 ($1.58 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 接近^[18], 与气候和植被相似的非洲热带稀树草原 (Savanna) 土壤碳含量相仿^[7], 但明显低于全国表层 SOC 密度 ($2.67 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)^[18] 和全国农田耕层 SOC 密度 ($3.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)^[19], 也远低于同纬度的我国亚热带红壤低山区 ($4.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 和红壤丘陵区 ($3.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 表层 SOC 密度^[20]。鉴于干热河谷生

态系统普遍存在退化现象^[1, 2], 有理由推断西南干热河谷可能是我国 SOC 的一个低密度区。Yu 等^[21] 对我国区域碳密度分布状况进行研究时也得到类似结果。

土壤固碳速率因气候带、生态系统及其演替阶段、植被类型和管理方式等而异^[3, 5, 15]。Huang 等^[22] 分析了中国大陆近 20 a 农田耕层 SOC 储量变化特征, 发现期间 $1.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ 农田 SOC 增加了 $311.3 \sim 401.1 \text{ Tg}$, 即农田土壤平均固碳量约为 $13.2 \sim 17.0 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。方精云等^[23] 研究得出 1981 ~ 2000 年间中国主要陆地生态系统碳汇范围在 $41.2 \sim 70.8 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ [换算成平均固碳量大致为 $6 \sim 10 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]。美国中西部边际农用地造林后 20 a 内土壤平均固碳量为 $40 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 50 a 内土壤

平均固碳速率为 $32 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [4]。本研究大叶相思林营造后 19 a 内表层土壤平均固碳速率为 $37.89 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 明显高于中国农田 [22] 和主要陆地生态系统 [23], 介于美国中西部边际农用地造林前 20 a 与前 50 a 的固碳速率之间 [4], 这暗示干热河谷林地燥红土具备较大的固碳能力。在本研究中, 研究末期 (2003 ~ 2010 年) 林地燥红土表层土壤平均固碳量明显高于研究中期和初期 [图 1(b)], 表明在 19 a 的研究期内林地燥红土有机碳处于加速积累状态。这可能是由于: ①造林前进入荒地的外源有机物甚少, 土壤碳长期处于耗竭状况 [13], SOC 本底值极低 (表 1); ②随林龄的增加, 大叶相思植被凋落物量增多, 其凋落物纤维素含量较高, 分解速度缓慢, 对土壤改良和有机碳积累的贡献也相应滞后 [24]。

在 19 a 的研究期内, 林地表层和亚表层土壤容重变幅较小 (均小于 2%), 其范围分别为 $1.67 \sim 1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.66 \sim 1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (表 1)。因此, 有理由推断 19 a 内土壤剖面, 至少是 0 ~ 30 cm 内土壤厚度变化很小, 而且造林前 (1991 年) 土壤表层和亚表层土壤碳含量差异不显著 (表 1)。表明土壤厚度所引起的不同研究阶段土壤碳密度的误差或不确定性较小, 可忽略其影响。造林初期林地存在一定的水土流失, 这可能导致本研究中林地土壤固碳能力存在一定程度的低估。

3.2 林地燥红土有机碳物理保护能力

土壤重组有机碳与土壤颗粒, 尤其是黏粒和粉粒结合形成复合体, 或被包闭在团聚体内, 微生物较难接触到有机碳而受土壤物理保护, 通常分解速度较慢, 在土壤中较为稳定。而轻组有机碳主要为游离腐殖酸和植物残体及其分解产物, 缺乏物理保护, 周转时间短, 能够在土壤全碳变化之前反映人为活动或自然变化所引起的土壤微小变化 [5, 15, 16, 25, 26]。通常, 不同生态系统或土地利用方式下轻组比例和土壤物理保护碳的能力各异。如 Christensen [27] 综述得出温带、寒温带森林表层土壤轻组比例范围为 1.8% ~ 14.7%。Marin-Spiotta 等 [8] 研究发现波多黎各亚热带湿润森林生命带的原始森林表层土壤轻组 (自由轻组和闭合轻组) 比例约为 2.3%, 10 ~ 80 a 的次生林表层土壤轻组比例在 1.2% ~ 3.0% 之间, 而牧地表层土壤轻组比例为 0.6%。青藏高原高寒草甸原生植被封育条件下表层土壤轻组比例为 3.51%, 重度退化条件下轻组比例为 0.67% [25]。本研究大叶相思林表层土壤轻组比例明显偏低 (表 3)。这可能是由于造林前荒地经历了长时间的弃荒

和放牧等人为干扰, 缺乏外源有机物补充, 而干热河谷特殊“干”、“热”气候促进和加剧了没有物理保护的轻组碳的分解矿化 [8, 13]。

高寒草甸原生植被封育条件下 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层中土壤轻组有机碳分配比例分别为 21.05% 和 9.68%, 重度退化条件下比例分别为 9.16% 和 4.09% [25]。Christensen [27] 研究了温带、寒温带 10 个地点的森林表层土壤有机质组分特征, 得出其轻组碳分配比例在 17% ~ 47% 的范围内。通常, 同等立地条件下次生林重组有机碳分配比例要高于人工林 [11]。农田生态系统中耕层轻组有机碳分配比例很少超过 20% [5, 16]。本研究中, 人工林营造 19 a 时表层燥红土中受物理保护的碳约为 70% (表 3), 与其他气候带或地区森林土壤碳的物理保护能力相当, 但明显高于草原和农田生态系统。可见, 在无人干扰下, 干热河谷人工林林地燥红土具备较强的物理保护碳的能力。

Laik 等 [9] 对印度 Bihar 地区 6 种人工林土壤活性有机碳库特征进行研究, 得出人工林营造 18 a 后轻组碳的增加对 SOC 增加的贡献最大。Wang 等 [28] 对子午岭森林灰褐土保护有机碳的能力进行了深入研究, 揭示了土壤中受物理保护的碳随土层深度的增加而大幅提高。笔者也发现在不同造林阶段燥红土物理保护的碳均随土层的加深而显著提高 (表 3)。2010 年表层重组有机碳密度显著高于 2003 年, 而重组碳分配比例显著低于 2003 年, 这暗示干热河谷人工林燥红土中碳可能优先进入非保护的轻组 [5, 6, 8, 10]。

各造林阶段, 轻组与重组有机碳之和略低于土壤总有机碳, 即实验测试过程中损失了有机碳, 损失率约为 0.86% ~ 1.84% (图 1, 表 1), 这与类似研究报告的碳损失率接近 [12]。

3.3 林地燥红土有机碳生化顽固性

Marin-Spiotta 等 [8] 研究了热带牧场造林后土壤有机质的动态, 得出造林 80 a 后表层自由轻组有机碳的替代比率高于重组, 但表层轻组和重组中还是有大约 5% 和 20% 的碳来自于原先的 C_3 植被。这一方面说明土壤表层轻组的周转速率比重组高, 另一方面也说明轻组中具有顽固性物质。Richards 等 [10] 和 Swanston 等 [12] 也得出类似结论。Wang 等 [28] 以土壤密度组分中碳水化合物与有机碳的比例和 I_{RC} 值作为评价土壤有机碳顽固性的指标, 得出自由轻组碳和重组碳的顽固性是相似的, 甚至在土壤表层以下, 自由轻组碳的顽固性比重组碳高。因此, 其作者

认为自由轻组有机质并非像经常定义的那样是最新鲜或很少被分解的一个组分,灰褐土轻组和重组在周转上的差异并不是由于其化学顽固性存在差异,而是由于轻组缺少物理保护使得微生物更容易侵入,重组中有机碳受到土壤物理保护使微生物较难接触.本研究以 I_{RC} 值作为土壤各组分有机碳稳定性的指标, I_{RC} 值低则有机碳生化稳定性低.不同造林阶段重组 I_{RC} 值均低于轻组,尤其是 2003 年其差异达显著水平(表 4).表明各土层受物理保护的碳其生物稳定性低于非保护碳.其原因这可能是由于:①在长期“干”、“热”环境背景下,轻组中顽固性碳受化学保护,较活性碳(非顽固性碳)难分解矿化,导致其组分中顽固性碳相对积累^[6, 8];②重组受到物理保护,土壤微生物接触和利用重组碳的机会较少,在能源和碳源缺乏的情况下(即 SOC 含量较低的土壤中),导致微生物利用顽固性碳的能力增强^[6].2003 年重组 I_{RC} 值显著低于轻组,但到 2010 年时两组分 I_{RC} 值差异不显著,这可能与外源碳的补充有关.随着外源碳优先进入轻组^[5, 6, 8, 10],新鲜、易分解外源有机物的输入在一定程度上“稀释”了轻组中顽固性碳比例(即顽固性碳指数)^[8].

随林龄的增加,两组分 I_{RC} 值呈现下降趋势,尤其是轻组 I_{RC} 值下降显著,而且总顽固性碳与土壤总有机碳之比也呈现下降趋势(表 4).说明在造林 12~19 a 内 SOC 顽固性随生态恢复而降低.这可能是由于造林前燥红土有机碳长期处于耗竭状况,相对顽固性碳而言,活性碳更易受到分解和矿化,导致顽固性碳的相对积累.造林一段时间后,进入土壤中的活性有机物逐渐增多.但各组分 I_{RC} 达到稳定时的数值及其所需的年限有待继续研究.

3.4 林地燥红土“新固定”碳表观稳定性

“新固定”碳的稳定性是土壤碳固定的关键和核心^[3, 12, 15],尤其是亚热带季节性干旱地区的人工林^[10].本研究中造林后 12~19 a,表层土壤“新固定”的碳为 $0.37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,其中受物理保护的碳为 $0.21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,占“新固定”碳的一半以上(57%).同期,亚表层土壤“新固定”碳中受物理保护的碳约占 70%(表 3).可见造林后 12~19 a 间燥红土“新固定”碳中大部分(57%~70%)与矿质颗粒(细粉粒、黏粒)形成了有机-无机复合体或进入团聚体,受物理保护,成为稳定性碳.

2003~2010 年,大叶相思林表层土壤轻组和重组顽固性有机碳增加了 $0.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,占该土层轻组和重组“新固定”碳的 50% 和

52%;而亚表层土壤轻组和重组“新固定”碳中 40% 和 45% 为顽固性碳(表 4).由此可见,表层“新固定”的轻组和重组有机碳中顽固性碳与活性碳数量相当,亚表层“新固定”碳中顽固性碳略低于活性碳.此外,同期表层和亚表层“新固定”的总顽固性碳为 $0.18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.06 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,约占相应土层土壤“新固定”碳的 49% 和 33%.

需要说明的是本研究未考虑研究期间土壤各组分“原有”有机碳的转化问题,文中“新固定”碳实际上是表观固定碳,即研究期内土壤或某组分所固定的碳(包括转化形成的碳)与同期转化(分解和矿化)的碳之差.

4 结论

(1)干热河谷大叶相思林营造 19 a 后,林地表层 SOC 密度为 $1.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.在 19 a 研究期内,林地燥红土具备较大的固碳能力,表层和亚表层土壤平均固碳速率分别为 $37.89 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $16.84 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,并且土壤处于加速固碳阶段.

(2)在无人干扰条件下,林地燥红土各土层中受物理保护碳的增幅不及非保护碳.

(3)在表层和亚表层燥红土中,受物理保护碳的生化稳定性低于非保护碳,两者的稳定性均随林龄的增加而降低.

(4)大叶相思林营造后的 12~19 a 内,土壤“新固定”碳中 57%~70% 受物理保护,约 33%~49% 的“新固定”碳生化性质稳定.

参考文献:

- [1] 张荣祖. 横断山区干旱河谷 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 何毓蓉, 黄成敏, 杨忠, 等. 云南省元谋干热河谷的土壤退化及旱地农业研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 56-60.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [4] Niu X Z, Duiker S W. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U. S [J]. Forest Ecology & Management, 2006, 223(1-3): 415-427.
- [5] Tan Z, Lal R, Owens L, et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1-2): 53-59.
- [6] Billings S A. Soil organic matter dynamics and land use change at a grassland/forest ecotone [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(9): 2934-2943.
- [7] Trouve C, Mariotti A, Schwartz D, et al. Soil organic carbon dynamics under *Eucalyptus* and *Pinus* planted on savannas in the

- Congo [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, **26**(2): 287-295.
- [8] Marin-Spiotta E, Silver W L, Swanston C W, *et al.* Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures [J]. *Global Change Biology*. 2009, **15**(6): 1584-1597.
- [9] Laik R, Kumar K, Das D K, *et al.* Labile soil organic matter pools in a calciorthent after 18 years of afforestation by different plantations [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, **42**(2): 71-78.
- [10] Richards A E, Dalal R C, Schmidt S. Soil carbon turnover and sequestration in native subtropical tree plantations [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, **39**(8): 2078-2090.
- [11] Li Y Q, Xu M, Zou X M, *et al.* Comparing soil organic carbon dynamics in plantation and secondary forest in wet tropics in Puerto Rico [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(2): 239-248.
- [12] Swanston C W, Torn M S, Hanson P J, *et al.* Initial characterization of processes of soil carbon stabilization using forest stand-level radiocarbon enrichment [J]. *Geoderma*, 2005, **128**(1-2): 52-62.
- [13] 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.
- [14] 郭玉红, 郎南军, 和丽萍, 等. 元谋干热河谷 8 种植被类型的林地土壤特性研究 [J]. *西部林业科学*, 2007, **36**(2): 56-64.
- [15] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展 [J]. *土壤学报*, 2007, **44**(2): 327-337.
- [16] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(6): 1799-1806.
- [17] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach [J]. *Geoderma*, 2002, **107**(1-2): 109-141.
- [18] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析 [J]. *土壤学报*, 2004, **41**(1): 35-43.
- [19] 许泉, 芮雯奕, 何航, 等. 不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异 [J]. *中国农业科学*, 2006, **39**(12): 2505-2510.
- [20] 唐国勇, 吴金水, 苏以荣, 等. 亚热带典型景观单元土壤有机碳含量和密度特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2047-2052.
- [21] Yu D S, Shi X Z, Wang H J, *et al.* Regional patterns of soil organic carbon stocks in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, **85**(3): 680-689.
- [22] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(15): 1785-1803.
- [23] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, **37**(6): 804-812.
- [24] 李昆. 金沙江干热河谷适宜树种选择与植被恢复研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [25] Wang W Y, Wang Q J, Lu Z Y. Soil organic carbon and nitrogen content of density fractions and effect of meadow degradation to soil carbon and nitrogen of fractions in alpine *Kobresia* meadow [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2009, **52**(5): 660-668.
- [26] Wick B, Tiessen H. Organic matter turnover in light fraction and whole soil under Silvopastoral land use in semiarid Northeast Brazil [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2008, **61**(3): 275-283.
- [27] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J]. *Advanced Soil Science*, 1992, **20**: 1-90.
- [28] Wang G, Wang C Y, Wang W Y, *et al.* Capacity of soil to protect organic carbon and biochemical characteristics of density fractions in Ziwulin Haplic Greyxems soil [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(1): 27-32.

CONTENTS

| | |
|--|---|
| Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk | ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337) |
| Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk | LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342) |
| A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health | LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346) |
| Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed | SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352) |
| Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin | XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359) |
| Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta | AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370) |
| Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids | LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379) |
| Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period | WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385) |
| Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China | LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393) |
| Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze | ZHANG Wen-bin, YU Hui (399) |
| Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution | PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407) |
| Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake | LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412) |
| Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model | LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421) |
| Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm | ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429) |
| Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands | LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436) |
| Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species | BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442) |
| Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae | CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448) |
| Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals | BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454) |
| Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic | ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459) |
| Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron | LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469) |
| Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution | SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476) |
| Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution | JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481) |
| Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation | FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488) |
| Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i> | ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495) |
| Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation | CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499) |
| Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge | LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505) |
| Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge | LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511) |
| Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China | LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518) |
| Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing | QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525) |
| Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon | XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532) |
| Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA) | CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539) |
| Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China | SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545) |
| Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley | TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551) |
| Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It | GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558) |
| Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn | JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565) |
| Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China | WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574) |
| Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area | QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580) |
| Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area | WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587) |
| Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing | PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592) |
| Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai | LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599) |
| Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China | SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606) |
| Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir | WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612) |
| Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment | YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618) |
| Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir | ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625) |
| Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil | YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633) |
| Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe | ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640) |
| Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid | WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647) |
| Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography | HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i> (652) |
| Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells | JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658) |
| Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry | PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665) |

《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

| | | | | |
|---------|--|------------------|----|--|
| 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@reces. 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@reces. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行