

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

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

京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征 王英, 李令军, 刘阳 (3685)

2008~2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)

沧州市大气污染特征观测研究 王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)

华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)

广州市交通主干道空气中苯系物的测量 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)

基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究 黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)

柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性 胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)

九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)

南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)

天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)

北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)

云阳宗海神的分布与来源 张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)

南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)

三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)

江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究 单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)

人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)

潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响 魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)

人工湿地处理含盐生活污水的特性研究 高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)

催化湿式氧化法降解水中的β-萘酚 刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)

ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究 孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)

微波改性 MWNTs/TiO₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究 施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)

腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)

臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究 邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)

复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究 徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)

进水比例对水解反应器出水水质的影响研究 梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究 韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)

我国城市污水处理回用调查研究 郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)

快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征 姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)

黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)

半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)

广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)

酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究 王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)

淋洗条件下砂土和粉土水盐运移过程的监测研究 付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)

空气注射修复苯污染地下水模拟研究 樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)

不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性 张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)

上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应 陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)

耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究 吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)

高效降酚菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究 陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)

四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究 钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)

长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响 尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)

三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究 何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)

多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因子研究 肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)

硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响 刘敬勇, 孙水裕 (3990)

关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究 纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)

第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文

稻田气溶胶 NH₃ 和气体 NO_x 排放在线测定研究 龚巍巍, 栾胜基 (4006)

一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制 文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)

基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究 孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)

涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别 丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)

人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)

基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌 林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)

消毒副产物生成的温度影响和动力学模型 张小璐, 杨宏伟, 王小任, 付静, 解跃峰 (4046)

一种厌氧微定量研究新方法 张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)

梧桐树叶作为反硝化碳源的研究 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)

降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究 崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)

《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)

黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探

马昕昕¹, 许明祥^{1,2*}, 杨凯¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 土壤剖面 100 cm 以下的深层土壤有机碳储量在土壤碳储量中占有很大比例, 研究深层土壤有机碳矿化特征以揭示其稳定性, 可为深层土壤碳汇认证提供依据. 本文以浅层土壤(0~100 cm)为对照, 模拟深层土壤温度和水分条件(温度 15℃、土壤含水量 8%), 研究了黄土丘陵区刺槐林深层土壤(100~400 cm)有机碳矿化特征. 结果表明: ①土壤有机碳总矿化量随着土壤深度增加呈下降趋势, 亚深层(100~200 cm)、深层(200~400 cm)有机碳总矿化量分别占浅层(0~100 cm)土壤总矿化量的 88.1% 和 67.8%; ②亚深层、深层与浅层土壤有机碳矿化过程相似, 分为 3 个阶段. 快速分解阶段: 亚深层、深层(0~10 d)的矿化量占总矿化量的比值约为浅层(0~17 d)的 50%; 缓慢分解阶段: 亚深层、深层(11~45 d)的矿化量占总矿化量的比值约为浅层(18~45 d)的 150%; 相对稳定阶段: 3 个层次(46~62 d)矿化量占总矿化量的比值无明显差异. ③浅层、亚深层、深层土壤有机碳矿化率差异不显著($P > 0.05$), 有机碳稳定性基本一致. 研究结果反映了深层土壤有机碳也参与土壤碳循环, 在评估黄土丘陵区土壤固碳效应时应充分考虑深层土壤有机碳的变化.

关键词: 黄土丘陵区; 刺槐林地; 深层土壤; 有机碳矿化量; 有机碳矿化率

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3893-08

Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China

MA Xin-xin¹, XU Ming-xiang^{1,2*}, YANG Kai¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: The deep soil layer (below 100 cm) stores considerable soil organic carbon (SOC). We can reveal its stability and provide the basis for certification of the deep soil carbon sinks by studying the SOC mineralization in the deep soil layer. With the shallow soil layer (0-100 cm) as control, the SOC mineralization under the condition (temperature 15℃, the soil water content 8%) of Black Locust forest in the deep soil layer (100-400 cm) of the hilly region of the Loess Plateau was studied. The results showed that: ① There was a downward trend in the total SOC mineralization with the increase of soil depth. The total SOC mineralization in the sub-deep soil (100-200 cm) and deep soil (200-400 cm) were equivalent to approximately 88.1% and 67.8% of that in the shallow layer (0-100 cm). ② Throughout the carbon mineralization process, the same as the shallow soil, the sub-deep and deep soil can be divided into 3 stages. In the rapid decomposition phase, the ratio of the mineralization or organic carbon to the total mineralization in the sub-deep and deep layer (0-10 d) was approximately 50% of that in the shallow layer (0-17 d). In the slow decomposition phase, the ratio of organic carbon mineralization to total mineralization in the sub-deep, deep layer (11-45 d) was 150% of that in the shallow layer (18-45 d). There was no significant difference in this ratio among these three layers (46-62 d) in the relatively stable stage. ③ There was no significant difference ($P > 0.05$) in the mineralization rate of SOC among the shallow, sub-deep, deep layers. The stability of SOC in the deep soil layer (100-400 cm) was similar to that in the shallow soil layer and the SOC in the deep soil layer was also involved in the global carbon cycle. The change of SOC in the deep soil layer should be taken into account when estimating the effects of soil carbon sequestration in the Hilly Region of the Loess Plateau, China.

Key words: the Hilly Region of the Loess Plateau; Black Locust forest; deep soil layer; SOC mineralization; mineralization rate of SOC

土壤是个巨大的有机碳库, 它占全球陆地总碳库的 2/3 ~ 3/4, 比全球陆地植被和全球大气的碳库总量还要多^[1]. 土壤碳库的微小变化可以导致大气 CO₂ 浓度的显著变化^[2]. 2005 年 2 月 16 日旨在遏制大气二氧化碳排放增加的《京都协议书》正式生效, 温室气体减排成为每个国家发展必须面对的问题.

在此背景下, 了解全球陆地生态系统碳源、碳

收稿日期: 2012-01-28; 修订日期: 2012-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171228, 40971174); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-443)

作者简介: 马昕昕(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤质量演变, E-mail: maxinxin125@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

汇的分布、动态及机制便不仅仅是一个备受关注的科学问题,也成为了重要的政治、经济问题^[3].

国内外有关土壤有机碳研究绝大部分以上层(≤ 100 cm)^[2,4-6]土壤有机碳含量或者有机碳库大小作为研究对象,已有的土壤固碳研究也主要针对上层(≤ 100 cm)土壤展开. 就土壤有机碳矿化及其影响因素的研究已大量展开,并取得了一些重要的结果^[7,8],如艾丽等^[9]对祁连山中部高山草甸土壤有机碳矿化的研究表明,高寒草甸表层土壤有机碳分解受温湿度变化的影响较大; Fang 等^[10]对耕地、草地和林地土壤的分析结果表明,土壤有机质的组成、土层深度、采样方法和培养时间对有机碳的矿化有显著影响,而温度对其影响不明显. 目前我国对土壤有机碳矿化研究仍集中在水稻土^[11-13]、沙地^[14]和湿地^[15]等地区,而近年来黄土高原进行的大规模植被恢复,已对该区土壤有机碳产生了深刻影响^[16,17],针对该区土壤有机碳库的研究也卓有成效^[18]. 有研究发现,黄土丘陵区深层(100~200 cm)有机碳密度可占2 m土层有机碳密度的40%^[19],由此可见,深层土壤碳储量在整个土体碳储量中可能占有较大比例,然而深层土壤对有机碳固存的贡献有多大尚不清楚. 在估算区域植被恢复的土壤固碳效应时是否要考虑深层土壤有机碳尚缺乏足够的科学依据,而深层土壤有机碳稳定性是影响土壤有机碳固存的重要因素. 因此研究深层土壤有机碳的稳定状况对准确估算土壤有机碳储量就显得极其重要.

本研究以黄土丘陵区成熟刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林为对象,考虑到已有的土壤固碳研究主要针对上层(≤ 1 m)土壤展开,土壤有机碳储量也多用1 m以上土层的碳密度为依据估算,据此,本研究将0~100 cm作为浅层,100 cm以下为深层. 以浅层(0~100 cm)土壤为对照,研究深层(100~400 cm)土壤在一定的温度湿度条件下的矿化动态,探索深层土壤有机碳矿化规律,揭示深层土壤有机碳稳定性,以期为黄土丘陵区深层土壤固碳定量认证提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于安塞县纸坊沟流域(N36°51'30", E109°19'30"). 流域面积8.27 km²,年辐射总量492 kJ·cm⁻²,年平均气温8.8℃,≥0℃的积温3733.5℃;年均降水量为549.1 mm,枯水年300

mm左右,丰水年700 mm以上,7~9月的降水量占全年降水的61.1%,年蒸发量>1463 mm^[19]. 该区地形破碎,沟壑纵横,属典型的黄土高原丘陵区;平均海拔1200 m,相对高差100~300 m. 土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,抗冲抗蚀能力差^[20],水土流失严重,是生态环境恢复与重建的重点区域^[21,22],经过30多年水土保持综合治理,通过林草植被和工程建设等措施,成功恢复了退化生态系统,林地面积从1980年的不足5%增加到40%以上^[19]. 该区处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带,常见的植被恢复类型有:以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主的人工林;以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主的人工林灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、丁香(*Syringaoblata*)、虎棒子(*Ostryopsis davidiana*)和狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛;以及以铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、披针苔草(*Carex lancoolata* Boott)等为主要植被的撂荒恢复草地^[23].

1.2 样地选取和土壤样品采集

2010年8月中旬,在纸坊沟流域选择3块成熟刺槐林样地,每块样地选3个样点,用内径为5 cm土钻分层采0~400 cm土样,0~200 cm每20 cm为一层,200~400 cm每40 cm为一层. 取样后拣去碎石和根系残体,装入保鲜袋低温保存运回实验室. 一部分土样过2 mm筛,保存在4℃的冰箱中用于测定有机碳矿化及微生物量碳;另一部分土样经风干、研磨、过筛后用于测定有机碳含量. 记录同样地的植被和地形特征(表1). 采集土样时对土壤剖面各层土壤温度、含水量、生物量进行测定(表2).

1.3 试验方法

土壤有机碳矿化培养试验:采用室内恒温培养、碱液吸收法测定有机碳矿化量^[24,25]. 从每块样地的15个土层中各选取0~20、20~40、40~60、80~100、120~140、160~180、200~240、280~320、360~400 cm进行试验. 根据测得的土壤温度、湿度以及文献[26,27],设定土壤试验温度为15℃、含水量为8%(大约为田间持水量的40%). 称取相当于50 g风干土的新鲜供试土壤(过2 mm筛)置于500 mL的带盖子的塑料试剂瓶中,加蒸馏水调节至设定的湿度水平,同时设不加土样的空白处理. 试

表 1 样地概况

Table 1 Characteristics of studied sites

样地	海拔/m	坡位	坡度/(°)	坡向	林下主要草本植被类型
1	1 224	中	30	南偏西	铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> 芨芨蒿 <i>Artemisia giraldii</i> 长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
2	1 221	下	27	南偏西	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> 胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
3	1 224	中	30	西	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 芨芨蒿 <i>Artemisia giraldii</i> 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>

表 2 样地各土层温度、含水量、有机碳含量及生物量¹⁾

Table 2 Characteristics of each soil layer in studied sites

土层/cm	温度/°C	含水量/%	生物量/g	有机碳含量/g·kg ⁻¹
0~20	24.60 ± 0.36a	20.27 ± 0.55a	4.30 ± 0.06ab	5.96 ± 0.34a
20~40	23.90 ± 0.36ab	18.21 ± 0.74b	7.76 ± 7.22a	3.20 ± 0.60b
40~60	23.53 ± 0.46b	12.64 ± 1.52c	0.44 ± 0.14b	2.96 ± 0.70bc
60~80	22.87 ± 0.55bc	6.55 ± 0.36g	7.64 ± 7.38a	2.57 ± 0.50bcd
80~100	22.30 ± 0.44cd	7.02 ± 0.68fg	4.16 ± 3.86ab	2.35 ± 0.33cd
100~120	22.37 ± 0.55cd	7.01 ± 0.34fg	0.08 ± 0.005b	2.21 ± 0.06d
120~140	21.63 ± 0.35de	7.65 ± 0.45efg	0.30 ± 0.20b	2.17 ± 0.18d
140~160	21.00 ± 0.79ef	7.29 ± 0.38fg	0.30 ± 0.10b	2.20 ± 0.48d
160~180	20.90 ± 1.15ef	8.33 ± 1.33ef	0.19 ± 0.16b	2.37 ± 0.70cd
180~200	20.03 ± 0.64fg	8.01 ± 1.38ef	0.03 ± 0.02b	1.92 ± 0.33d
200~240	19.60 ± 0.80g	8.04 ± 0.70ef	0.04 ± 0.01b	2.04 ± 0.33d
240~280	18.37 ± 0.3h	8.69 ± 0.64de	0.14 ± 0.10b	2.04 ± 0.28d
280~320	17.80 ± 0.70h	9.13 ± 0.32de	0.14 ± 0.08b	2.28 ± 0.08d
320~360	18.07 ± 0.75h	9.78 ± 0.15d	0.04 ± 0.02b	2.37 ± 0.22cd
360~400	17.40 ± 0.70h	9.86 ± 0.19d	0.17 ± 0.13b	2.42 ± 0.15cd

1) 生物量为 10 cm × 10 cm × 20 cm 大小土体中的植物根系量; 图中标注的小写字母表明差异显著 ($P < 0.05$)

剂瓶内置装有 20 mL 0.05 mol·L⁻¹ 浓度的 NaOH 溶液的 50 mL 小烧杯, 用以吸收有机碳分解释放出的 CO₂, 然后密封培养瓶, 将培养瓶置于已设定温度的恒温箱内培养. 以称重法补充水分, 使土壤湿度保持恒定. 在培养的第 2、3、5、7、10、13、17、21、25、29、34、39、45、62 d 更换 NaOH 溶液, 同时将取出的 NaOH 溶液完全洗入三角瓶中然后加入 1 mol·L⁻¹ BaCl₂ 溶液 1 mL 及酚酞指示剂, 用 0.05 mol·L⁻¹ HCl 滴定至红色变为粉红色, 根据 CO₂ 的释放量计算培养期内土壤有机碳的矿化量. 每个土样重复 2 次.

土壤有机碳的测定: 采用重铬酸钾外加热法测定^[28].

土壤微生物量碳的测定: 采用氯仿熏蒸浸提法^[24].

1.4 数据计算与分析

用 SPSS 13.0 软件中单因子方差分析 (ANOVA) 对土壤有机碳总矿化量、矿化量累积动

态、矿化率等进行显著性检验. 用 CurveExpert 1.3 软件模拟有机碳矿化动态.

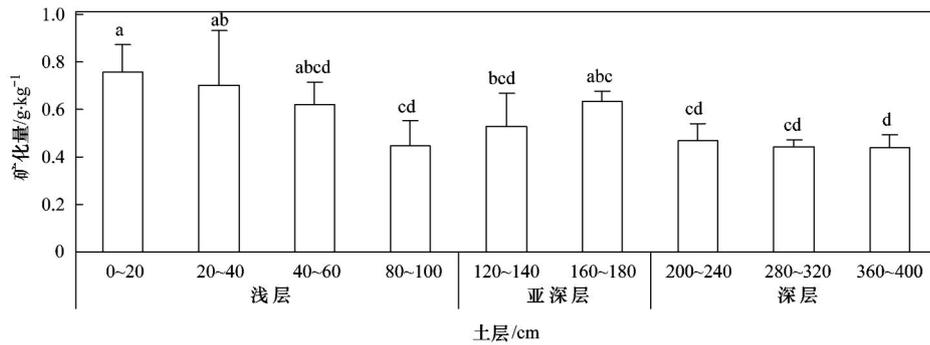
2 结果与分析

2.1 土壤有机碳总矿化量随土层深度的变化

随着土层深度增加, 有机碳总矿化量整体呈下降趋势 (图 1). 亚深层 (100 ~ 200 cm) 土壤有机碳总矿化量加权平均值 (0.590 ± 0.083) g·kg⁻¹ 占浅层 (0 ~ 100 cm) 土壤 (0.670 ± 0.097) g·kg⁻¹ 的 88.1%, 无显著差异 ($P > 0.05$); 深层 (200 ~ 400 cm) 土壤有机碳矿化量的加权平均值 (0.454 ± 0.011) g·kg⁻¹ 占浅层土壤的 67.8%, 呈显著差异 ($P < 0.05$).

2.2 土壤有机碳矿化量累积及矿化速率变化动态

土壤有机碳矿化过程一般可以分为 3 个阶段: ①有机碳快速分解阶段: 培养初期, 土壤有机碳日均矿化速率较快, 矿化量累积速率较快; ②缓慢分解阶段: 随着培养时间的持续, 有机碳日均矿化速率缓



图中标注的小写字母表明差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 土壤有机碳矿化量随土层深度的变化

Fig. 1 Total SOC mineralization in each soil layer

慢,矿化量累积速度减慢,累积矿化量降低;③相对稳定阶段:在培养后期,有机碳矿化速率基本保持相对稳定状态,同时其累积矿化量保持相对稳定状态^[29,30].由累计速度和矿化速率变化特征来看,亚深层、深层与浅层相似,其矿化过程也分为3个阶段(图2).

各层次土壤有机碳矿化过程及其矿化量占总矿化量比例则不尽相同(图3).浅层土壤在矿化培养0~17 d保持相对较高的矿化速率,加权平均值为

(0.031 ± 0.003) $g \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,矿化量累积较快,而亚深层、深层土壤在培养的0~10 d即完成快速分解阶段,矿化速率加权平均值分别为(0.019 ± 0.003) $g \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ 、(0.015 ± 0.008) $g \cdot (kg \cdot d)^{-1}$;亚深层、深层土壤矿化量占总矿化量比值的加权平均值分别为(23.2 ± 3.5)%、(27.3 ± 0.5)%,约为浅层土壤(47.3 ± 4.6)%的50%,呈显著差异($P < 0.05$).各层次土壤均是在培养的第45 d完成缓慢分解阶段:浅、亚深、深层3个层次矿化速率加权平

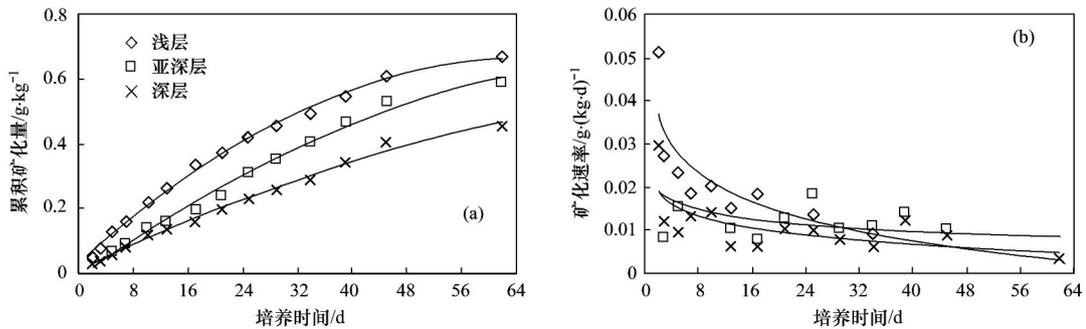
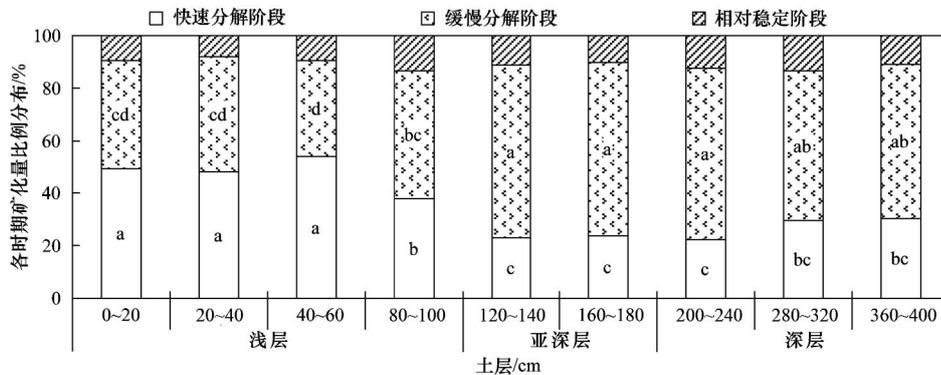


图 2 各层次土壤有机碳矿化量累积、矿化速率变化动态

Fig. 2 Dynamics of cumulative SOC mineralization and SOC mineralization rate in each soil layer



图中标注的小写字母表明差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 各时期各层土壤有机碳矿化量占总矿化量的比例分布图

Fig. 3 Percentage of SOC mineralization in each soil layer in total SOC mineralization at each stage

均值分别为 (0.011 ± 0.001) 、 (0.012 ± 0.002) 、 $(0.008 \pm 0.0005) \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 亚深层、深层土壤矿化量占总矿化量的比值加权平均值分别为 $(65.9 \pm 4.6)\%$ 、 $(60.4 \pm 3.3)\%$, 约为浅层土壤 $(42.6 \pm 1.6)\%$ 的 150%, 呈显著差异 ($P < 0.05$)。各层次土壤均是在矿化培养 46 d 后保持相对稳定阶段; 3 个层次矿化速率加权平均值分别为 (0.004 ± 0.001) 、 (0.003 ± 0.001) 、 $(0.003 \pm 0.0005) \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 土壤矿化量占总矿化量的比例加权平均值均无明显差异 ($P > 0.05$)。

用以下一级动力学方程定量描述土壤有机碳矿化累积动态^[31,32]:

$$y = C_p \times (1 - e^{-kx})$$

式中, C_p 表示土壤有机碳矿化潜力 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); k 表示有机碳矿化速率常数 (d^{-1}); x 表示天数 (d); y

表示土壤培养时间 x 时的有机碳矿化量。

各土层土壤有机碳矿化累积动态和培养时间的关系拟合得 C_p 和 k 值 (表 3), 一级动力学方程拟合土壤有机碳矿化累积动态均达到较好效果 ($r > 0.98$)。

由表 3 可看出, 浅层、亚深层及深层 C_p 的加权平均值无显著差异 ($P > 0.05$)。通过相关性检验, C_p 仅与各层次土壤快速积累阶段有机碳矿化量占总矿化量比值显著负相关 ($r = -0.403, P < 0.05, n = 27$), 而与各层次土壤有机碳含量相关性不显著。 k 值与各层次土壤快速积累阶段有机碳矿化量占总矿化量比值极显著相关 ($r = 0.873, P < 0.01, n = 27$), 与土层深度显著负相关 ($r = -0.446, P < 0.05, n = 27$), 亚深层、深层的 k 值加权平均值与浅层呈显著差异 ($P < 0.05$)。

表 3 土壤有机碳矿化势 (C_p) 及矿化速率常数 (k)¹⁾

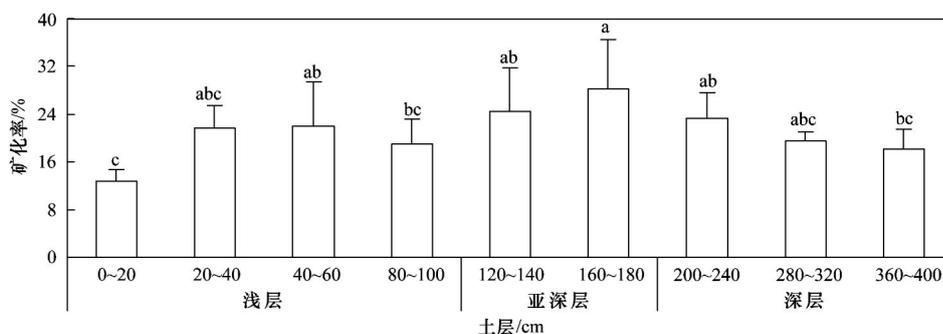
土层/cm	拟合参数				r	
	$C_p/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$		k/d^{-1}			
	计算值	加权平均值	计算值	加权平均值		
浅层	0~20	0.88 ± 0.27 ab	0.81 ± 0.06	0.04 ± 0.02 ab	0.033 ± 0.005 a	0.995 6
	20~40	0.80 ± 0.22 ab		0.03 ± 0.06 abc		0.997 6
	40~60	0.66 ± 0.53 ab		0.04 ± 0.01 a		0.996 8
	80~100	0.91 ± 0.66 ab		0.02 ± 0.01 cd		0.995 0
亚深层	120~140	0.97 ± 0.47 ab	1.06 ± 0.42	0.01 ± 0.006 d	0.015 ± 0.005 b	0.996 2
	160~180	1.15 ± 0.40 ab		0.02 ± 0.006 cd		0.995 4
	200~240	1.39 ± 0.84 a		0.01 ± 0.008 d		0.995 8
深层	280~320	0.67 ± 0.017 ab	0.91 ± 0.29	0.02 ± 0.006 cd	0.017 ± 0.006 b	0.989 5
	360~400	0.63 ± 0.16 b		0.02 ± 0.006 abcd		0.990 8

1) 表中标注的小写字母表明差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 土壤有机碳矿化率随土层深度的变化

土壤有机碳矿化率, 指在一定时间内土壤有机碳矿化量占土壤有机碳的比例。土壤有机碳矿化率从某种程度上反映了土壤有机碳的稳定性, 如果该

比例越低, 表明土壤有机碳的稳定性越强, 固碳能力强, 反之, 则土壤有机碳稳定能力越弱参与生态系统碳循环。图 4 为各土层土壤有机碳的矿化率。浅层、亚深层、深层土壤有机碳矿化率的加权平均值分别



图中标注的小写字母表明差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 土壤总有机碳的矿化率随土层深度的变化

Fig. 4 Ratio of $\text{CO}_2\text{-C}$ released by SOC mineralization to the total SOC in each soil layer

为 $(18.8 \pm 3.0)\%$ 、 $(26.4 \pm 7.5)\%$ 、 $(20.3 \pm 1.6)\%$, 无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.4 土壤有机碳矿化特征与矿化底物间的相关性

由表 4 可看出, 有机碳矿化量与有机碳含量、

微生物量碳、生物量、土层深度均显著相关 ($P < 0.05$); 而矿化率与土层的各个指标均无显著相关性; 矿化速率常数 k 值与有机碳含量、土层深度显著相关 ($P < 0.05$)。

表 4 各土层有机碳矿化量、矿化率和 k 值与样地基本性质的相关性¹⁾

Table 4 Correlations of total SOC mineralization, $\text{CO}_2\text{-C}/\text{SOC}$, k with characteristics of each soil layer

指标	土层深度	有机碳含量	微生物量碳	生物量
矿化量	-0.588 **	0.614 **	0.564 *	0.617 **
矿化率	0.069	-0.360	0.188	-0.059
k	-0.446 *	0.632 **	0.308	0.281

1) ** 表明相关性极显著 ($P < 0.01$); * 表明相关性显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

土壤是个巨大的碳库, 而且活跃地参与全球碳循环, 很多研究认为陆地生态系统既可能是全球 CO_2 循环的“汇”, 也可能是“源”, 主要取决于土壤碳库的变化^[33,34], 因此土壤有机碳的矿化则是土壤碳循环中重要环节。目前关于有机碳矿化的研究已有不少报道^[9-13], 但就关于黄土高原地区有机碳矿化方面的研究还很少。黄土高原土层深厚, 近年来的植被恢复对土壤有机碳也产生了深刻的影响, 探索深层土壤有机碳矿化规律不仅可以为深层土壤作为可以认证的“碳汇”提供科学依据, 推动我国全球变化科学的发展, 同时也可为我国在国际碳贸易中增加筹码。

有关浅层土壤有机碳矿化研究表明, 有机碳总矿化量随土层加深呈递减趋势^[30,31]。本研究结果显示, 亚深层 (100 ~ 200 cm) 和深层 (200 ~ 400 cm) 土壤有机碳总矿化量分别占与浅层 (0 ~ 100 cm) 土壤总矿化量的 88.1% 和 67.8%。这表明, 相对于浅层土壤而言, 深层土壤有机碳矿化较慢。李顺姬等^[31]的研究表明, 褐土, 黑垆土等土壤类型下的土壤有机碳累积矿化量都随土壤深度的加深有不同程度的下降。可见, 尽管土壤类型及利用方式不同, 但土壤有机碳稳定性在土壤剖面上的表现具有相似性。

与郝瑞军等^[13]关于南方红壤水稻土的研究结果相似, 本研究中土壤有机碳总矿化量与土壤有机碳含量 (表 1)、微生物量碳显著正相关 (表 4), 反映了深层土壤有机碳总矿化量与浅层土壤一样, 主要受控于土壤有机碳总量^[31], 且与土壤有机碳的生物有效性相关^[24]。Fontaine 等^[32]曾提出稳定的深层 SOC 会由于新鲜有机物质的加入而加快分解, 本研究中土壤总矿化量与生物量极显著正相关 (表 4), 这可能是由于根系分泌新鲜有机物质而影响了

土壤有机碳的矿化。另外, 不同土层间由于不同的土壤条件引起的土壤微生物类型及多样性的差异应该也会对有机碳矿化产生影响, 这些需要进一步研究。

与浅层土壤类似, 亚深层、深层土壤矿化过程可分为 3 个阶段: 有机碳快速分解阶段、缓慢分解阶段、相对稳定阶段, 这与以往多数研究结果相同^[10,35,36]。然而与浅层不同, 亚深层、深层在快速分解阶段持续时间较短, 缓慢分解阶段持续时间较长。土壤微生物是土壤有机碳矿化的参与者^[24], 培养阶段, 微生物活动优先土壤中易分解的小分子有机物质, 随着易分解有机物质的消耗, 微生物开始利用有机碳组分中难分解部分^[10]。这说明亚深层、深层土壤中易分解的小分子有机物质相对较少, 快速分解阶段持续时间短, 且其矿化量占总矿化量的比值较浅层低。这表明, 就释放 CO_2 过程而言, 亚深层、深层较浅层更缓慢。

本研究中土壤浅层、亚深层、深层有机碳矿化率无显著差异, 这可能是由于本研究是室内试验, 土壤经采样、过筛等扰动后, 可能增加了土壤的矿化量; 另外室内培养条件与自然条件存在一定差异, 它增加了土壤与空气的接触面积, 这也会增加其矿化量, 使得本研究所得的土壤矿化量可能比实际偏高。但环境条件改变及扰动对浅层 (0 ~ 100 cm) 和深层 (100 ~ 400 cm) 土壤有机碳矿化特性同时存在影响, 因此, 模拟深层土壤温度和水分条件下, 深层土壤矿化特征与浅层土壤的比较结果仍具有一定的实际意义和参考价值。这表明亚深层、深层土壤有机碳的稳定性与浅层基本一致, 同时表明, 深层 (> 100 cm) 土壤在一定程度上参与了土壤碳循环, 对土壤碳通量有一定贡献。

另一方面, 由亚深层、深层土壤在培养过程中缓慢分解阶段和相对稳定阶段矿化量所占比例较

高,说明其相对于浅层土壤释放 CO₂ 的过程更缓慢,这可能会使深层(>100 cm)土壤在长期的深根性灌、乔木植被恢复与重建过程中,比浅层土壤更有能力固存难分解的有机碳。

4 结论

(1)土壤有机碳总矿化量随土层加深呈递减趋势,与有机碳含量、微生物量碳、生物量显著相关;亚深层(100~200 cm)、深层(200~400 cm)有机碳总矿化量分别占浅层(0~100 cm)土壤总矿化量的 88.1% 和 67.8%。

(2)深层土壤矿化过程可分为 3 个阶段:①有机碳快速分解阶段:亚深层、深层(0~10 d)的矿化量占总矿化量比例约为浅层(0~17 d)的 50%;②缓慢分解阶段:亚深层、深层(11~45 d)的矿化量占总矿化量比例约为浅层(18~45 d)的 150%;③相对稳定阶段:3 个层次(46~62 d)的矿化量占总矿化量的比例无明显差异。亚深层、深层土壤快速分解阶段持续时间较浅层土壤明显缩短。

(3)亚深层、深层土壤有机碳矿化率分别为 18.8%、26.4%,与浅层(20.3%),间无显著差异,表明有机碳稳定性基本一致,深层土壤有机碳也参与土壤碳循环。

致谢:感谢中国科学院安塞水土保持综合试验站对本研究的大力支持,感谢张金、邱宇洁等诸位同学的帮助。

参考文献:

- [1] 吴庆标,王效科,郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, **36**(5): 743-747.
- [2] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [3] 中国科学院华南植物园. Science 杂志刊登我国科学家重要发现: 成熟森林土壤可持续积累有机碳[J]. 自然科学进展, 2007, **17**(6): 747.
- [4] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Application, 2000, **10**(2): 423-436.
- [5] Carter M R, Gregorich E G. Carbon and nitrogen storage by deep-rooted tall fescue (*Lolium arundinaceum*) in the surface and subsurface soil of a fine sandy loam in eastern Canada[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **136**(1-2): 125-132.
- [6] 吴金水,童成立,刘守龙. 亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(1): 131-137.
- [7] Reichstein M, Subke J A, Angeli A C, et al. Does the temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter depend upon water content, soil horizon, or incubation time[J]. Global Change Biology, 2005, **11**(10): 1754-1767.
- [8] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems-recent progress and challenges[J]. Global Change Biology, 2006, **12**(2): 141-153.
- [9] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(4): 530-538.
- [10] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, et al. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature[J]. Nature, 2005, **433**(7021): 57-59.
- [11] 任秀娥,童成立,孙中林,等. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(10): 2245-2250.
- [12] 孙中林,吴金水,葛体达等. 土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 214-220.
- [13] 郝瑞军,李忠佩,车玉萍. 苏南水稻土有机碳矿化特征及其与活性有机碳组分的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(9): 1069-1074.
- [14] 苏永中,赵哈林,张铜会,等. 不同退化沙地土壤碳的矿化潜力[J]. 生态学报, 2004, **24**(2): 372-378.
- [15] 张文菊,童成立,杨钙仁,等. 水分对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2005, **25**(2): 249-253.
- [16] 彭文英,张科利,杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J]. 地域研究与开发, 2006, **25**(3): 94-99.
- [17] 季志平,苏印泉,贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. 西北林学院学报, 2006, **21**(6): 54-57.
- [18] 刘毅,李世清,邵明安,等. 黄土高原不同土壤结构体有机碳库的分布[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(6): 1003-1008.
- [19] 王征,刘国彬,许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(14): 3947-3952.
- [20] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: challenges and prospects[J]. AMBIO, 1999, **28**(8): 663-668.
- [21] 徐勇,田均良,沈洪泉,等. 生态重建模式的评价方法——以黄土丘陵区为例[J]. 地理学报, 2004, **59**(4): 621-628.
- [22] 李育才. 退耕还林还草工作回顾与总体思路[J]. 林业经济, 2001, (9): 3-11.
- [23] Chen L D, Gong J, Fu B J, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China[J]. Ecological Research, 2007, **22**(4): 641-648.
- [24] 石玲,戴万宏. 宣城红壤微生物量碳含量及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤通报, 2009, **40**(3): 547-551.
- [25] Franzluebbers A J, Stuedemann J A, Schomberg H H, et al. Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(4): 469-478.
- [26] 李婧,李占斌,李鹏,等. 黄土高原丘陵沟壑区退耕生态系统土壤水分动态变化规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, **16**(5): 153-156.

- [27] 黄肖勇, 李生宝. 半干旱黄土丘陵区土壤水分动态变化研究综述[J]. 农业科学研究, 2009, **30**(3): 69-72.
- [28] 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.
- [29] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(6): 709-714.
- [30] Franzluebbers A J, Hanry R L, Honeycutt C W, *et al.* Climate influences on active fractions of soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(7-8): 1103-1111.
- [31] 李顺姬, 邱丽萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, **30**(5): 1217-1226.
- [32] Fontaine S, Barot S, Barré P, *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, **450**(7167): 277-280.
- [33] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, **351**(6324): 304-306.
- [34] 孙文义, 郭胜利, 周小刚. 黄土丘陵沟壑区地形和土地利用对深层土壤有机碳的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2740-2747.
- [35] Weintraub M N, Schimel J P. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in Arctic Tundra soils[J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(2): 129-143.
- [36] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1832-1837.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4-n-Nonylphenol in Soil	JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU-Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloroalkane and Chloroalkene	WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed	DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 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@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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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

国内外公开发刊