

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

天然林土壤有机碳及矿化特征研究

杨添¹, 戴伟^{1*}, 安晓娟², 庞欢¹, 邹建美¹, 张瑞¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 内蒙古乌海市农业产业化指导服务中心, 乌海 016012)

摘要: 通过野外调查和室内分析培养, 研究了马尾松林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、红松林和油松林这 6 种天然林林下土壤有机碳含量及有机碳矿化特征。结果表明, 林下土壤有机碳含量都表现出随土壤深度增加而逐渐降低的趋势; 双指数方程可以很好拟合出天然林土壤有机碳的矿化过程, 准确反映出各天然林土壤的矿化反应特征。天然林各层土壤矿化反应趋势相同, 但强度各异。其中, 红松林 0~10 cm 土壤反应强度最为强烈, 其下各层土壤的矿化反应强度也显著高于其他天然林的同层土壤; 对落叶阔叶林和针阔混交林土壤矿化特征比较发现, 凋落物种类差异对土壤活性有机碳含量产生较强烈影响, 因此呈现出不同的矿化反应特征。

关键词: 天然林土壤; 有机碳; 矿化碳; 双指数方程; 活性碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1105-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.040

Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil

YANG Tian¹, DAI Wei¹, AN Xiao-juan², PANG Huan¹, ZOU Jian-mei¹, ZHANG Rui¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Inner Mongolia Wuhai Agriculture Industrialization Guidance and Service Center, Wuhai 016012, China)

Abstract: Through field investigation and indoor analysis, the organic carbon content and organic carbon mineralization characteristics of six kinds of natural forest soil were studied, including the pine forests, evergreen broad-leaved forest, deciduous broad-leaved forest, mixed needle leaf and Korean pine and Chinese pine forest. The results showed that the organic carbon content in the forest soil showed trends of gradual decrease with the increase of soil depth; Double exponential equation fitted well with the organic carbon mineralization process in natural forest soil, accurately reflecting the mineralization reaction characteristics of the natural forest soil. Natural forest soil in each layer had the same mineralization reaction trend, but different intensity. Among them, the reaction intensity in the 0-10 cm soil of the Korean pine forest was the highest, and the intensities of mineralization reaction in its lower layers were also significantly higher than those in the same layers of other natural forest soil; comparison of soil mineralization characteristics of the deciduous broad-leaved forest and coniferous and broad-leaved mixed forest found that the differences of litter species had a relatively strong impact on the active organic carbon content in soil, leading to different characteristics of mineralization reaction.

Key words: soil of nature forests; organic carbon; mineralization carbon; double exponential equation; activated carbon

森林土壤是森林生态系统中重要的碳源和碳汇。我国天然林面积占森林总面积的 65.99%, 其土壤固碳功能和潜力在我国碳循环中具有不可替代的作用^[1]。矿化过程分析是研究土壤有机碳特征的有效方法之一, 一些学者以此为基础开展了土壤有机碳相关问题的研究^[2~9]。例如, Jones^[10]通过矿化分析研究了土壤活性有机碳含量及变化特征。为了能够更加清晰了解土壤有机碳的矿化特点, Juma 等^[11]利用单指数方程、双指数方程和指数加线性方程拟合土壤活性碳的矿化过程, 并对拟合效果进行了分析。Wedin 等^[12]应用指数模型对草地土壤矿化过程和特点进行了描述。Fernández 等^[13]还探讨了火烧后森林土壤中碳的矿化动力学。我国也有部分学者针对天然次生杂灌林、山杨 (*Populus*

daurica) 林和辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 林等林下土壤以及农田和草地土壤开展了相关工作^[14~17]。但迄今, 针对天然林土壤开展的相关研究仍显不足, 对不同天然林土壤矿化特征还缺乏深入地认识。为此, 本试验选择马尾松 (*Pinus massoniana*) 林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、红松 (Korean pine) 林和油松 (Chinese pine forest) 林等 6 种代表性的天然林为研究对象, 在比较土壤有机碳含量的基础上, 利用双指数方程拟合各层土壤有机碳的矿化过程, 分析和探讨了 6 种天

收稿日期: 2013-07-19; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB403201)

作者简介: 杨添(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为森林土壤, E-mail: 361045349@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: daiw163@163.com

然林土壤有机碳矿化反应特点,以期为深入了解天然林土壤有机碳的分解转化特征提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

研究区分别位于中国江西省大岗山国家级生态站、庐山生态站、河南省信阳鸡公山生态站以及辽宁省白石砬子国家级自然保护区和医巫闾山国家级自然保护区。大岗山国家级生态站(114°30′~114°45′E, 27°30′~27°50′N)和庐山生态站(115°50′~116°10′E, 29°28′~29°45′N)属亚热带季风气候,年均温 19.3~17.7℃,年平均降水量 1 076~1 472 mm,土壤类型为红黄壤;鸡公山生态站(114°01′~114°06′E, 31°46′~31°52′N)属亚热带季风气候

与大陆性季风气候交界区,年均温 15.2℃,年均降雨量 1 118 mm,土壤类型为黄棕壤;白石砬子国家级自然保护区(124°44′~124°57′E, 40°50′00″~40°57′N)和医巫闾山国家级自然保护区(121°31′~121°46′E, 41°26′~41°46′N)属温带大陆性季风气候,年均温为 5.3~8.2℃,年降雨量为 1 349~572.5 mm,土壤类型为暗棕壤。

1.2 样地布设与土壤样品采集

在研究区分别设置 3 个样地,样地内另设 20 m×20 m 的 3 个标准地,以“S”形采样法,分层采取 0~10、10~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 的土壤混合样品,风干后,过 2 mm 和 0.149 mm 筛,用于土壤有机碳含量和矿化过程 CO₂ 累积释放量的测定,另取部分新鲜样品于 -4℃ 保存,用于土壤微生物碳测定。研究样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况¹⁾

Table 1 General situation of the study area

研究区	森林类型	平均海拔 /m	优势树种	林龄 /a	平均树高 /m	平均胸径 /cm	郁闭度 /%
大岗山	马尾松林	255	马尾松	50	25	22	80
庐山	常绿阔叶林	221	苦槠、香樟	45	14.8	31.8	63
鸡公山	落叶阔叶林	211	栎类	55	22/22	33/28	90
鸡公山	针阔混交林	215	马尾松、栎类	55	19/17	26/25	90
白石砬子	红松林	845	红松	95	20	25.4	60
医巫闾山	油松林	433	油松	60	15.3	20.8	75

1)其他树种和主要林下植被:马尾松林有赤楠(*Syzygium buxifolium* Hook. et Arn.)、香樟(*Cinnamomum porrectum* (Roxb.) Kosh.)等,主要林下植被为毛竹(*Phyllostachys heterocyclic* (Carr.))、莢蒾(*Viburnum dilatatum* Thunb.)、大青叶(*Elatostema macintyre* Dunn)和肾蕨(*Nephrolepis auriculata* Trimmer)、淡竹叶(*Lophatherum gracile* Brongn.)等;常绿阔叶林有苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、香樟、枫香(*Liquidambar formosana*),主要林下植被为八角枫(*Alangium chinense*)、白栎(*Quercus fabri*)、赤楠等和狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、山梅(*Rubus corchorifolius*);落叶阔叶林有栓皮栎(*Quercus variabilis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)和枫香,主要林下植被为山胡椒(*Lindera glauca*)、白檀(*Symplocos paniculata*)和凤尾蕨(*Pteris nervosa*)、牛膝草(*Achyranthes longifolia*);针阔混交林有栓皮栎、麻栎和枫香,主要林下植被为小叶朴(*Celtis bungeana*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)和野葡萄(*Ampelopsis sinica*)、长春藤(*Hedera helix*);红松林为纯林,主要林下植被为兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、刺五加(*Radix Acanthopanax Senticosl*)和羊胡子苔草(*Carex rigescens*)、铃兰(*Convallaria majalis*)、小叶芹(*Aegopodium alpestre*);油松林有山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*),主要林下植被为胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl)和白草(*Pennisetum centrasiticum* Tzvel)、甘草(*Glycyrrhizae*)

1.3 测定方法

土壤有机碳含量:重铬酸钾容量法-外加热法^[18];土壤微生物碳含量:氯仿薰蒸浸提法^[19];土壤惰性碳含量:酸水解法^[20];土壤有机碳矿化过程中 CO₂ 累积释放量:室内恒温培养、碱液吸收法^[21]。称取过 2 mm 的风干土 100 g 放于培养瓶底部,调节土壤含水量至田间持水量的 60%。在 2℃ 下闭光预培养一周,然后将盛有 25 mL 0.4 mol·L⁻¹ NaOH 的吸收瓶置于培养瓶内用于吸收土壤呼吸产生的 CO₂。同时设置装有相同重量的石英砂的培养瓶的空白对照。将所有的培养瓶放在 28℃ 下避光培养。在培养的第 1、4、7、10、20、30、40、50、60、

70、80、90、100 d 取出吸收瓶测定 CO₂ 含量。其原理是用过量的 BaCl₂ 溶液沉淀吸收瓶里 NaOH 溶液中的 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻,再加入两滴酚酞指示剂,用 0.4 mol·L⁻¹ HCl 滴定到粉红色消失,根据消耗的盐酸含量计算 CO₂ 释放量,矿化碳就是在培养过程中释放的那部分碳量。

1.4 土壤有机碳矿化过程拟合方程

Boyle 和 Paul 双指数方程^[22]:

$$C_{\min} = C_o(1 - e^{-k_o t}) + C_s(1 - e^{-k_s t})$$

式中, $C_{\min}$: 经过 t 时间后土壤 CO₂ 累积释放量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_o : 土壤活性有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); k_o : 活

性有机碳库周转速率(d^{-1}); C_s :土壤缓效性有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); k_s :缓效性有机碳库周转速率(d^{-1}).

1.5 数据处理

所得数据采用 SPSS 17.0 进行方差分析和相关分析;土壤有机碳矿化过程的拟合采用 Origin 8.6 软件进行.

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量特征

不同林分类型土壤有机碳含量呈现出随土壤深度增加而逐渐降低的趋势(图 1). 0~10 cm 土层的有机碳含量变化范围为 $16.55\sim138.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 10~20 cm 土层的 2~3 倍, 和下层土壤达到显著差异水平($P<0.01$), 表现出强烈的表层富集现象. 6 种林下土壤有机碳含量垂直变异较大, 变异系数均在 63% 以上, 其中, 红松林土壤变异最为强烈, 层间变异系数为 101.86% (表 2).

表 2 土壤有机碳含量垂直变异系数

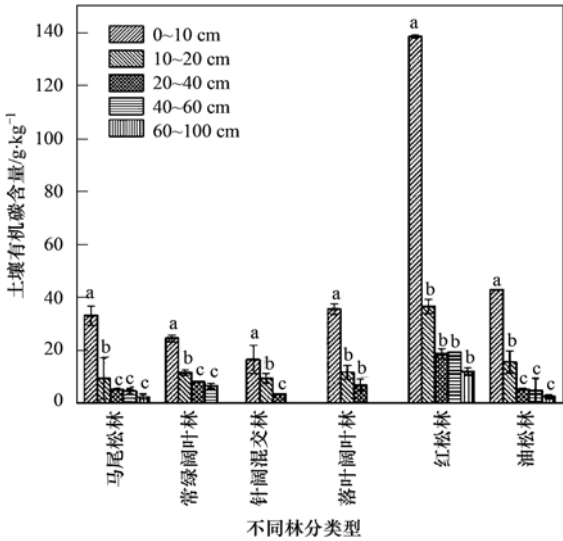
Table 2 Coefficients of vertical variation in soil organic carbon content						
林分类型	马尾松林	常绿阔叶林	落叶阔叶林	针阔混交林	红松林	油松林
变异系数/%	85.51	63.87	64.18	74.36	101.86	96.51

6 种林分同层土壤有机碳含量比较发现(图 1), 红松林各层土壤有机碳含量显著高于其他 5 种天然林同层土壤, 达到极显著差异水平. 而马尾松林、常绿阔叶林、针阔混交林、落叶阔叶林和油松林同层土壤有机碳含量虽有一定差异, 但差异不显著; 与 10~20 cm 和 20~40 cm 土层相比, 0~10 cm 土壤有机碳含量具有更大的变异性.

2.2 土壤有机碳矿化特征及双指数方程拟合效果评价

拟合曲线均显示出拟合趋势线和测定数据很好贴合(图 2), 相关系数达到 0.96~1.00(表 3), 表明双指数方程能够很好拟合出天然林土壤的有机碳矿化特征.

双指数方程拟合曲线(图 2)表明, 6 种天然林各层土壤有机碳矿化过程都显示出相同的变化趋势, CO_2 累计释放在反应初期增加较快, 之后逐渐趋于平缓. 表 3 进一步表明, 6 种林型土壤活性碳主要集中在 0~10 cm 土壤中. 矿化反应 100 d 时, 除红松林外土壤外, 其他林分 0~10 cm 土壤的 CO_2 累计释放量均低于土壤活性碳(C_0)含量, 为 C_0 含量的 57%~92%, 但其他各层土壤 CO_2 累计释放量, 除落叶阔叶林 10~20 cm 土壤外, 均已超出活性碳



a、b、c 表示不同土层间含量差异水平显著($P<0.01$)

图 1 土壤有机碳含量特征

Fig. 1 Characteristics of soil organic carbon content

含量 2%~80%.

同一林分不同层次土壤有机碳矿化强度不同. 0~10 cm 土壤有机碳矿化过程最为强烈, 除落叶阔叶林外, 其他天然林土壤的最高 CO_2 累计释放量与下层土壤均达到差异极显著水平(表 3), 随着土壤深度增加, 矿化强度虽然逐层减弱, 但层间矿化强度均未表现出明显差异(表 3). 针阔混交林 10~20 cm 和 20~40 cm 土壤有机碳矿化强度的垂直变化有所不同, 没有表现出随土壤深度增加而减弱的特征. 研究表明, 松栎混交林植被结构林分类型的根系多集中在 20~40 cm 的土层中^[23], 有利于该层次土壤碳素分解释放活性有机碳.

6 种天然林同层土壤有机碳矿化强度比较发现, 红松林各层土壤与其他林分同层土壤间都达到显著差异水平. 其中, 0~10 cm 土壤矿化反应强度表现最为强烈, CO_2 最高累计释放量为 $4.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远高于油松林土壤的 $2.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、落叶阔叶林土壤的 $1.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、马尾松林土壤的 $1.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、常绿阔叶林土壤的 $1.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和针阔混交林土壤的 $1.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 和 0~10 cm 土层相比, 虽然 10~20 cm 土壤矿化强度明显减低, CO_2 最高累计释放量仅为 $2.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 降幅达 $2.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但仍

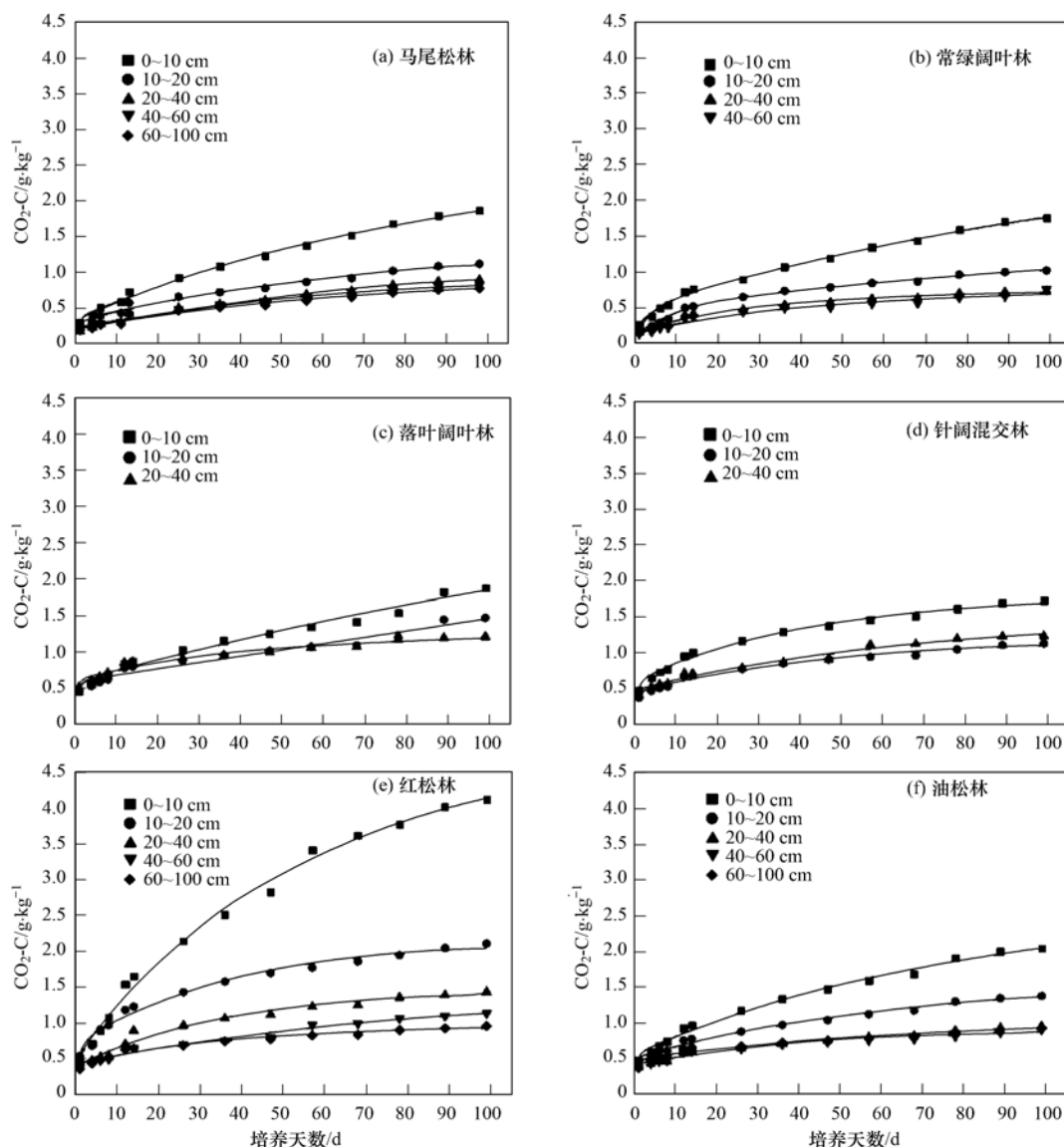


图2 土壤有机碳矿化过程双指数方程拟合曲线

Fig. 2 Double exponential curve fitting equation of mineralization of soil organic carbon

显著高于其他林分同层土壤的 $1.02 \sim 1.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其他 5 种天然林同层土壤间有机碳矿化强度虽有差异,但都没有达到显著差异水平。

3 讨论

各林分类型土壤有机碳含量都表现出随土壤深度增加而逐渐降低的变化趋势,0~10 cm 土壤有机碳表层富集现象强烈。10 cm 以下各层土壤有机碳含量虽有差异,但变化不明显。除红松林土壤外,其他 5 种林分同层土壤间有机碳含量没有表现出明显的变化。

Alvarez 等^[24]利用单指数方程、双指数方程、指数+常数方程和指数+直线方程拟合了不同管理方式(牧场和农田)、不同耕作系统、不同作物循环

及不同采样深度下土壤的矿化过程,结果也表明双指数方程具有更好的拟合效果。

各天然林土壤具有相同的矿化反应特征。首先,初期强度较大,但随着反应进行,反应强度减弱,曲线趋于平缓。说明在矿化初期,土壤中易分解的活性有机碳类物质,如单糖等,被迅速分解,随着这类物质的分解和消耗,导致微生物在矿化后期,被迫分解较难分解的有机碳类物质,分解速率逐渐降低,CO₂ 释放量减少^[25];其次,由于 6 种天然林土壤中活性有机碳类物质主要集中在 0~10 cm 表层土壤中(表 3),加之该层微生物活动强烈(图 3),导致该层土壤矿化反应强度大、时间长,矿化过程反应始终保持着强烈的增长趋势。

10 cm 以下土壤中由于有机碳含量降低,活性

表 3 不同林分类型土壤矿化特征¹⁾

Table 3 Soil mineralization characteristics of different forest types

林分类型	深度/cm	C/g·kg ⁻¹	C ₀ /g·kg ⁻¹	C/C ₀	R ²
马尾松林	0~10	1.87±0.15aB	2.38	0.79	1.00
	10~20	1.12±0.14bB	1.09	1.02	0.98
	20~40	0.82±0.13bB	0.80	1.02	0.99
	40~60	0.97±0.17bB	0.90	1.08	0.99
	60~100	0.77±0.18bB	0.70	1.10	0.97
常绿阔叶林	0~10	1.75±0.19aB	2.41	0.73	0.99
	10~20	1.12±0.05bB	1.06	1.06	0.98
	20~40	0.73±0.03bB	0.57	1.28	0.98
	40~60	0.75±0.03bB	0.61	1.23	0.96
落叶阔叶林	0~10	1.88±0.31aB	3.28	0.57	0.98
	10~20	1.47±0.18aB	2.12	0.69	0.96
	20~40	1.21±0.01aB	0.89	1.34	0.96
针阔叶混交林	0~10	1.73±0.16aB	1.22	1.41	0.99
	10~20	1.13±0.10bB	0.75	1.51	0.98
	20~40	1.23±0.17abB	1.04	1.18	0.98
红松林	0~10	4.12±0.82aA	4.47	0.92	0.99
	10~20	2.11±0.18bA	1.46	1.15	0.99
	20~40	1.44±0.27bA	1.07	1.34	0.98
	40~60	1.13±0.12bA	1.06	1.07	0.98
	60~100	0.96±0.58bA	0.55	1.75	0.97
油松林	0~10	2.04±0.24aB	2.04	1.00	0.99
	10~20	1.38±0.14bB	1.14	1.21	0.99
	20~40	0.95±0.08bB	0.66	1.44	0.98
	40~60	0.90±0.26bB	0.51	1.76	0.97
	60~100	0.92±0.03bB	0.51	1.80	0.97

1) C:矿化 100 d 时 CO₂-C 累计释放量; C₀:拟合计算得出活性碳含量; R²:拟合相关系数; ab,C 垂直差异水平(P<0.01); AB:同层间 C 差异水平(P<0.01)

有机碳类物质含量较少,微生物活动相对较弱(图 3),造成矿化反应强度较低、层间差异不明显以及

在反应中后期土壤中活性有机碳就已被消耗,开始对土壤中较难分解有机碳类物质进行分解等特征;除红松林外,其他 5 种天然林同层土壤矿化反应强度差异不大,均未达到显著性差异水平。

在 6 种天然林中,红松林土壤显示出明显的独特性,不仅 0~10 cm 土壤表现出最为强烈的矿化反应强度,其下各层土壤的矿化反应强度也都明显高于其他天然林的同层土壤。这可能和多种因素有关,有研究表明,0~10 cm 的土壤是红松细根主要分布区,凋落物 1.6 倍的细根死亡量是红松林土壤有机碳的主要来源^[26]。本研究中,红松平均林龄 95 a,高出其他 5 种天然林 30~45 a(表 1),发达的细根为土壤和微生物活动提供大量碳源。此外,白石砬子国家级自然保护区是我国成立最早的自然保护区之一,自 1981 年成立至今,长达 30 余年的严格保护措施,形成了该地区良好的土壤生态环境,这不仅有利于红松生长,促进土壤有机碳的积累,也导致土壤微生物活动较为强烈,显示出各层土壤微生物碳生物量显著高于其他天然林土壤的微生物特征(图 3)。

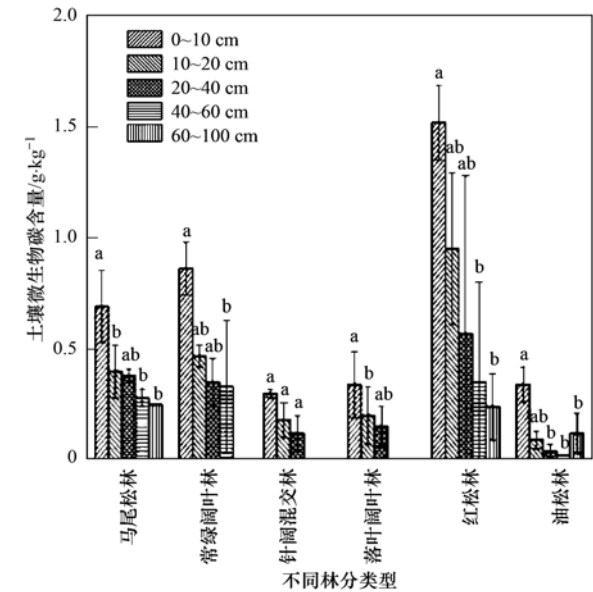


图 3 不同林分土壤微生物碳含量

Fig. 3 Microbial carbon content in different forestry types of soil

本研究的落叶阔叶林和针阔混交林的调查样地基本状况极为一致(表1),不同点只是落叶阔叶林是麻栎-栓皮栎混交,而针阔混交林为麻栎-栓皮栎和马尾松混交。在55 a的生长过程中,不同种类的凋落物并没有使两种林分土壤间有机碳总量和矿化反应 CO_2 释放量产生显著差异(表3),但进一步分析发现,两种林分土壤间活性碳含量和矿化反应特征存在明显不同。落叶阔叶林0~20 cm土壤中 C_0 总量较高,100 d矿化后土壤中仍残存有大量的活性碳($C/C_0 = 0.57/0.69$)。因此,土壤矿化反应强度在一定时期内会继续维持在较高的水平;而针阔混交林0~20 cm土壤中含量较低的 C_0 在矿化反应前期或中期被迅速分解($C/C_0 = 1.41/1.51$),较难分解的有机碳类物质成为后期的主要分解对象,表现出反应强度逐渐降低的变化趋势(表3)。根据上述分析判断,在相同地区,由于混交方式不同所引起的凋落物种类差异可能对土壤有机碳总量影响不大,但对活性有机碳含量却会产生较为强烈影响,导致有机碳矿化呈现出不同的反应特征。

4 结论

(1) 6种天然林林下土壤有机碳含量都表现出随土壤深度增加而逐渐降低的趋势;双指数方程可以很好拟合出天然林各层土壤有机碳的矿化过程,完全可以反映出研究土壤的矿化特征。

(2) 天然林各层土壤矿化强度均呈现出随土壤深度增加而降低的趋势,红松林各层土壤矿化强度显著高于其他天然林的同层土壤;落叶阔叶林和针阔混交林土壤矿化特征比较表明,凋落物种类差异对土壤活性有机碳含量产生较强烈影响,呈现出不同的矿化反应特征。

参考文献:

- [1] 国家林业局.《中国森林资源报告——第七次全国森林资源清查》国家林业局[M].北京:中国林业出版社,2005.
- [2] 冯朝阳,吕世海,高吉喜,等.华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J].北京林业大学学报,2008,30(2):20-26.
- [3] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等.北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究[J].北京林业大学学报,2009,31(5):19-24.
- [4] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J].土壤学报,2004,41(5):687-699.
- [5] 孙维侠,史学正,于东升,等.我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究[J].土壤学报,2004,41(2):298-300.
- [6] 王海燕,雷相东,张会儒,等.近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J].北京林业大学学报,2009,31(3):11-16.
- [7] 王清奎,汪思龙,冯宗炜.杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较[J].北京林业大学学报,2006,28(5):1-6.
- [8] 徐秋芳,姜培坤,沈泉.灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究[J].北京林业大学学报,2005,27(2):18-22.
- [9] 张伟,王克林,陈洪松,等.典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究[J].土壤学报,2012,49(3):601-606.
- [10] Jones C A. Estimation of an active fraction of soil nitrogen [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1984, 15(1):23-32.
- [11] Juma N G, Paul E A, Mary B. Kinetic analysis of net nitrogen mineralization in soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(4):753-757.
- [12] Wedin D A, Pastor J. Nitrogen mineralization dynamics in grass monocultures [J]. Oecologia, 1993, 96(2):186-192.
- [13] Fernández I, Cabaneiro A, Carballas T. Carbon mineralization dynamics in soils after wildfires in two Galician forests [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(13):1853-1865.
- [14] 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.
- [15] 杨继松,刘景双,孙丽娜.温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J].生态学杂志,2008,27(1):38-42.
- [16] 杨长明,欧阳竹,杨林章,等.农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2006,26(12):4148-4155.
- [17] 窦晶鑫,刘景双,王洋,等.三江平原草甸湿地土壤有机碳矿化对C/N的响应[J].地理科学,2009,29(5):773-778.
- [18] 国家林业局,LY/T 1210~1275-1999.森林土壤分析方法[S].1999.
- [19] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1976, 8(3):209-213.
- [20] Leavitt S W, Paul E A, Pendall E, et al. Field variability of carbon isotopes in soil organic carbon [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1997, 123:451-454.
- [21] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation incubation procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10):1923-1928.
- [22] Boyle M, Paul E A. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage sludge [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(1):99-103.
- [23] 吴昊,王得祥,黄青平,等.环境因子对秦岭南坡中段松栎混交林物种多样性的影响[J].西北农林科技大学学报,2012,40(9):41-50.
- [24] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1):184-189.
- [25] Collins H P, Rasmussen P E, Douglas C L. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3):783-788.
- [26] 杨丽楹,李文华.长白山原始阔叶红松林细根分布及其周转的研究[J].北京林业大学学报,2005,27(2):1-5.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行