

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012~2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响

张文娟^{1,2}, 廖洪凯², 龙健^{2*}, 李娟¹, 刘灵飞²

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学山地环境重点实验室, 贵阳 550001)

摘要:以贵州西南部典型石漠化治理示范区内5年、17年、30年生花椒林和乔木林(约60年)土壤为对象,采用室内模拟培养方法研究了0~15、15~30、30~50 cm这3个剖面土壤有机碳的矿化特征及活性有机碳的含量变化。结果表明,30年生花椒林土壤有机碳累计矿化量在各层土壤中均高于对应的乔木林土壤,而5年、17年生花椒林地各层土壤则均低于对应的乔木林土壤,3种花椒林土壤有机碳累计矿化量分配比在各层均高于对应的乔木林土壤。长期种植花椒增加了土壤有机碳的矿化量,降低了土壤有机碳的稳定性。乔木林土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳在各层均显著高于对应的3种花椒林土壤($P < 0.05$)。随花椒种植年限增加,土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳含量在0~15 cm和15~30 cm土层先增加后减少,在30~50 cm土层则为先减少后增加。短期花椒种植有利于土壤活性有机碳的增加,长期则降低了0~15 cm和15~30 cm层土壤活性有机碳含量,花椒种植有利于深层(30~50 cm)土壤活性有机碳的积累。

关键词:喀斯特石漠化地区; 花椒林; 土壤有机碳; 矿化; 活性有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1053-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.039

Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province

ZHANG Wen-juan^{1,2}, LIAO Hong-kai², LONG Jian^{2*}, LI Juan¹, LIU Ling-fei²

(1. Department of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Guizhou Key Laboratory of Mountain Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Taking 5-year-old Chinese prickly ash orchard (PO-5), 17-year-old Chinese prickly ash orchard (PO-17), 30-year-old Chinese prickly ash orchard (PO-30) and the forest land (FL, about 60 years) in typical demonstration area of desertification control test in southwestern Guizhou as our research objects, the aim of this study using a batch incubation experiment was to research the mineralization characteristics of soil organic carbon and changes of the labile soil organic carbon contents at different depths (0-15 cm, 15-30 cm, and 30-50 cm). The results showed that: the cumulative mineralization amounts of soil organic carbon were in the order of 30-year-old Chinese prickly ash orchard, the forest land, 5-year-old Chinese prickly ash orchard and 17-year-old Chinese prickly ash orchard at corresponding depth. Distribution ratios of $\text{CO}_2\text{-C}$ cumulative mineralization amount to SOC contents were higher in Chinese prickly ash orchards than in forest land at each depth. Cultivation of Chinese prickly ash in long-term enhanced the mineralization of soil organic carbon, and decreased the stability of soil organic carbon. Readily oxidized carbon and particulate organic carbon in forest land soils were significantly more than those in Chinese prickly ash orchards at each depth ($P < 0.05$). With the increasing times of cultivation of Chinese prickly ash, the contents of readily oxidized carbon and particulate organic carbon first increased and then declined at 0-15 cm and 15-30 cm depth, respectively, but an opposite trend was found at 30-50 cm depth. At 0-15 cm and 15-30 cm, cultivation of Chinese prickly ash could be good for improving the contents of labile soil organic carbon in short term, but it was not conducive in long term. In this study, we found that cultivation of Chinese prickly ash was beneficial for the accumulation of labile organic carbon at the 30-50 cm depth.

Key words: Karst rocky desertification region; Chinese prickly ash orchard; soil organic carbon; mineralization; labile organic carbon

我国西南喀斯特山区土壤生态系统脆弱,土壤贫瘠,水土流失严重,植被覆盖率低,加上人为活动的干扰,石漠化程度相当严重且有蔓延趋势^[1]。为保护和改善当地生态环境,已研究表明种植喜钙、耐旱和水土保持效果好的多年生木本植物花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim),是喀斯特石漠化地区特色农业的可持续发展模式之一,可作为恢复

和重建喀斯特石漠化地区生态环境的有效途径^[2]。

收稿日期: 2014-08-29; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461072, 31360121); 贵州省社发攻关项目(黔科合SY字[2013]3162号); 贵州省科技厅-贵州师范大学联合基金项目(黔科合J字LKS[2012]25号); 贵州师范大学博士研究项目; 贵州师范大学研究生教育管理创新基金项目(研创2013(17)号)

作者简介: 张文娟(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为喀斯特土壤碳循环, E-mail: zhangwenjuan24@163.com

* 通讯联系人, E-mail: longjian22@163.com

近年来,以花椒林为研究对象,进行了关于土壤特性^[2]、土壤团聚体保护性碳^[3]、土壤酶演变^[4]、土壤团聚体有机碳和活性有机碳^[5]等方面的研究工作,但从土壤有机碳矿化和活性有机碳角度研究花椒林土壤有机碳动态还鲜见报道。

土壤有机碳的矿化是土壤中重要的生物化学过程,直接关系到土壤中养分元素的释放与供应、温室气体的形成、土壤质量的保持等,揭示土壤有机碳矿化规律对于养分的科学管理和全球气候变暖的有效控制等都有十分重要的现实意义^[6]。土壤活性有机碳是指土壤中不稳定、易氧化、易矿化,且对微生物有较高活性的那部分碳素^[5],是矿化过程中重要的碳源物质^[7],其含量及组分影响着有机碳的矿化特征^[8,9],因此,从活性有机碳的角度研究土壤有机碳的矿化也逐步受到了关注。Norton 等^[10]在研究干旱环境下不同植被类型对土壤有机碳矿化的影响时表明,微生物生物量碳是仅次于水分条件的主要影响因素。王清奎等^[11]研究常绿阔叶林和杉木林时发现,土壤微生物生物量碳、冷水和热水浸提有机碳的初始含量与有机碳矿化量之间关系密切。谭立敏等^[12]研究发现,可溶性碳和微生物生物量碳随矿化培养的进行逐渐减小,与矿化速率变化趋势一致。但迄今,针对不同年限植被下土壤活性有机碳对土壤有机碳矿化的影响研究还相对较少。

本研究以不同种植年限的花椒林和乔木林为对象,分析花椒林对土壤有机碳矿化和活性有机碳含量的影响,探讨花椒种植对土壤有机碳矿化和活性有机碳含量的影响机制,以及影响花椒林土壤有机碳矿化的因素,以期为探讨喀斯特山区花椒林土壤有机碳的动态趋势、退耕还林还草对石漠化土壤生境的修复影响机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺地区关岭县花江干热河谷小流域(25°39′48″~25°40′00″N,105°39′18″~106°39′27″E),海拔600~700 m,该地区碳酸岩盐广布,河流深切,地下水深埋,热量丰沛,降水分布极不均,5~10月降水量达全年降水量的83%,气候垂直变异明显,海拔850 m以下为南亚带干热河谷气候,900 m以上为中亚热带河谷气候,调查区域内成土母岩以白云质灰岩和泥质灰岩为主,土壤类型以黄色石灰土为主。该地区植被总体覆盖率<3%,岩石裸露率为70%以上,林冠覆盖率低,乔木林主要

生长有香椿(*Toona sinensis*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、核桃(*Juglans regia*)和小叶榕(*Ficus concina*);灌木林主要以花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim)为主。该区是国家“九五”至“十二五”石漠化治理的典型区域,治理模式、恢复和重建植被具备不同的时间阶段特征。

1.2 样品采集

2013年6月上旬,在研究区域内选定5年、17年、30年生花椒林和乔木林(大约60年)作为样地,样地立地条件基本相似,各样地间距在300 m以上。土壤按照0~15、15~30和30~50 cm这3个剖面进行样品采集,每个样地随机采集3个剖面。采样时先去除地表植被凋落物,尽量保持土壤原状结构。土样带回实验室后,仔细剔除土样中动植物残体,于室温下风干,分别研磨过2 mm和0.154 mm筛,供有机碳矿化培养试验和测定土壤基本性质、颗粒有机碳及易氧化有机碳用。

1.3 分析方法

土壤有机碳矿化采用室内恒温培养、碱液吸收法^[13,14]。称取过2 mm筛风干土样35 g于50 mL塑料瓶中,调节水分至其田间持水量的50%,将该塑料瓶与装有20 mL无CO₂蒸馏水的塑料瓶(维持空气的饱和湿度),以及装有10 mL 0.1 mol·L⁻¹的NaOH溶液吸收瓶,一同装入500 mL大塑料瓶中,密封,在25℃下进行恒温培养。同时做空白试验,即在本应装土样的50 mL塑料瓶中不放入土样,其他试验条件均相同。试验期间定期补充水分,维持土壤湿度。在试验开始后1、2、3、5、7、11、15、22、29、36、43、57、71和92 d时更换吸收瓶,并放入新的装有10 mL 0.1 mol·L⁻¹的NaOH溶液吸收瓶。将取出的吸收瓶内的碱液转移至三角瓶中,加2 mL 1 mol·L⁻¹ BaCl₂溶液和2滴酚酞指示剂,用0.05 mol·L⁻¹盐酸溶液滴定,直至微红色,从而计算吸收液中CO₂的含量。根据吸收液中CO₂含量计算土壤有机碳累计矿化量。

土壤易氧化有机碳(readily oxidized carbon, ROC)测定^[15]:称取过0.154 mm筛的风干土2.5 g于50 mL离心管中,加入20 mL 0.02 mol·L⁻¹ KMnO₄溶液和0.1 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液,以180 r·min⁻¹振荡10 min,然后静止10 min,取上清液1 mL定容至50 mL,在紫外分光光度计550 nm处测定吸光度,根据高锰酸钾的消耗量求出土壤的易氧化有机碳。

土壤颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC)测定^[16]:称取过 2 mm 筛的风干土 5 g 于 50 mL 离心管中,加 25 mL 质量浓度为 5 g·L⁻¹的六偏磷酸钠溶液,以 180 r·min⁻¹振荡 18 h,然后过 53 μm 筛并用蒸馏水反复冲洗后移至铝盒中,60℃烘干,称重,磨细样品过 0.154 mm 筛,装入样品袋中,

待分析测定。
土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)、土壤颗粒有机碳采用盐酸酸化-元素分析仪测定(Elementar Macro CNHS,德国)^[17],全氮使用元素分析仪测定,pH 值采用酸度计电位法测定,供试土壤其测定结果见表 1。

表 1 供试土壤的基本性质¹⁾

Table 1 Basic properties of the studied soils (mean ± SE)

林型	土壤深度/cm	有机碳/g·kg ⁻¹	pH	总氮/g·kg ⁻¹	C/N
5 年生花椒林 (PO-5)	0 ~ 15	23.25 ± 1.18cA	7.26 ± 0.05b	2.78 ± 0.02dA	8.34 ± 0.27b
	15 ~ 30	19.11 ± 0.61cB	7.39 ± 0.03b	2.48 ± 0.00cAB	7.70 ± 0.27b
	30 ~ 50	19.56 ± 0.76bcB	7.40 ± 0.18b	2.45 ± 0.01cB	7.99 ± 0.46b
17 年生花椒林 (PO-17)	0 ~ 15	29.70 ± 0.45bA	7.21 ± 0.06bA	3.80 ± 0.20bA	7.86 ± 0.30bA
	15 ~ 30	22.26 ± 1.29bcB	7.37 ± 0.12bA	2.87 ± 0.00bB	7.75 ± 0.35bA
	30 ~ 50	16.41 ± 1.31cC	7.12 ± 0.09cB	2.52 ± 0.02bB	6.49 ± 0.09cB
30 年生花椒林 (PO-30)	0 ~ 15	27.55 ± 0.40bA	7.52 ± 0.05a	3.28 ± 0.05cA	8.41 ± 0.13b
	15 ~ 30	23.68 ± 1.06bAB	7.63 ± 0.01a	2.62 ± 0.01bB	9.02 ± 0.09a
	30 ~ 50	22.98 ± 1.58bB	7.72 ± 0.02a	2.56 ± 0.01bB	8.94 ± 0.28a
天然乔木林 (FL)	0 ~ 15	41.61 ± 0.19aA	7.23 ± 0.02b	4.51 ± 0.05aA	9.22 ± 0.10aA
	15 ~ 30	31.28 ± 0.02aB	7.21 ± 0.02b	3.69 ± 0.00aB	8.47 ± 0.03aB
	30 ~ 50	30.28 ± 0.02aB	7.36 ± 0.01b	3.55 ± 0.01aB	8.54 ± 0.09aB

1)表中 PO-5、PO-17、PO-30、FL 分别代表 5 年、17 年、30 年生花椒林和乔木林地;不同小写字母代表不同林型同深度的显著差异 ($P < 0.05$),不同大写字母代表同种林型不同深度的显著差异 ($P < 0.05$),下同

1.4 数据处理

试验数据运用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件进行处理,差异显著性检验 ($P < 0.05$) 采用 one-way ANOVA 的 LSD 法,相关性分析采用 Pearson 法,作图采用 Origin 7.5 软件。

2 结果与分析

2.1 4 种林型土壤有机碳的矿化特征

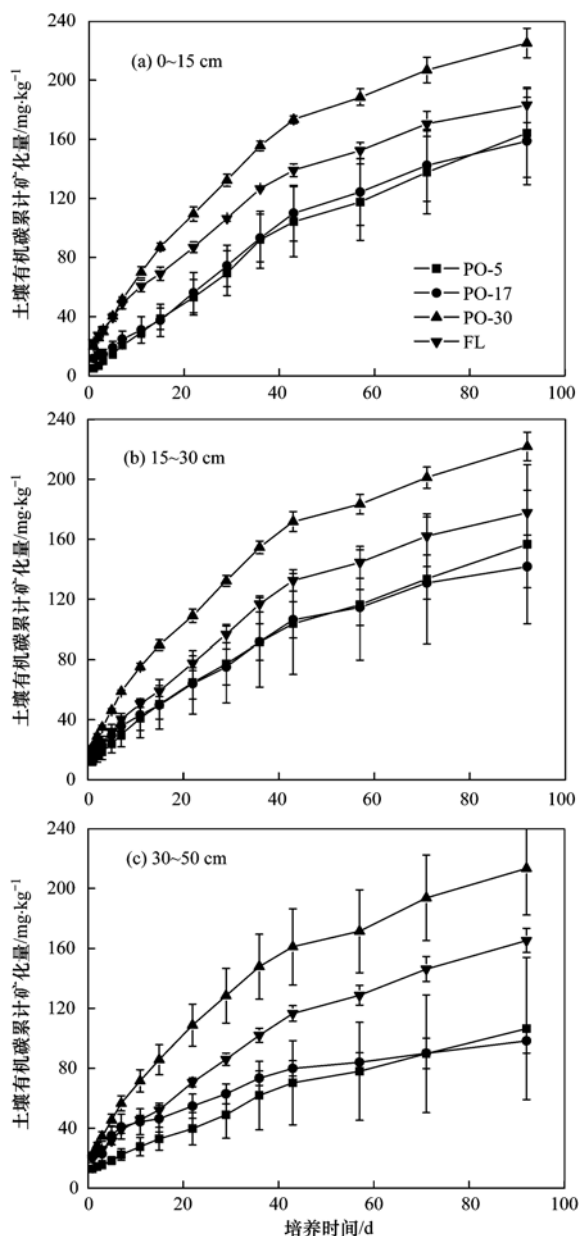
4 种林型 0 ~ 15、15 ~ 30 和 30 ~ 50 cm 土层的土壤有机碳累计矿化量均呈增加趋势,且随培养时间的增加,其增幅逐渐减小(图 1)。培养 92 d 后,各层土壤有机碳累计矿化量均以 30 年生花椒林最高,为 213.37 ~ 224.98 mg·kg⁻¹,其次是乔木林,为 165.25 ~ 183.17 mg·kg⁻¹,5 年和 17 年生花椒林较低,分别为 106.46 ~ 164.11 mg·kg⁻¹、98.20 ~ 158.72 mg·kg⁻¹。随花椒种植年限的增加,各层土壤有机碳累计矿化量变化趋势一致,均以 30 年生花椒林土壤最高,17 年生花椒林土壤最低。0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层,30 年生花椒林土壤有机碳累计矿化量分别是 5 年生花椒林的 1.37、1.42 倍,是 17 年生花椒林的 1.42、1.51 倍,未达到显著差异水平;然而在 30 ~ 50 cm 土层,30 年生花椒林土壤有机碳累计矿化量分别是 5 年、17 年生花椒林的

2.00、2.17 倍,达到了显著差异水平 ($P < 0.05$)。随土壤深度的增加,各林型有机碳累计矿化量均呈减少趋势,减少幅度较小。

土壤有机碳累计矿化量分配比是指在一定时间内土壤有机碳累计矿化量占土壤有机碳含量的比例,能在一定程度上反映土壤有机碳的固碳能力。92 d 培养后,30 年生花椒林土壤有机碳累计矿化量分配比在各层均高于其他林型,且在 30 ~ 50 cm 土层,显著高于 5 年生花椒林(图 2)。0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层,随花椒种植年限的增加,土壤有机碳累计矿化量分配比先减小后增加,30 ~ 50 cm 土层则逐渐增加。这说明在一定时期内种植花椒能增加 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层土壤有机碳的稳定性,长期种植则会降低土壤有机碳的稳定性。乔木林在各层土壤有机碳累计矿化量分配比均较低。同种林型中,15 ~ 30 cm 土层有机碳累计矿化量分配比高于 0 ~ 15 cm 和 30 ~ 50 cm 土层。

2.2 4 种林型土壤活性有机碳组分含量特征

同一土层中,乔木林土壤 ROC、POC 初始含量均显著高于花椒林 ($P < 0.05$) (表 2)。各花椒林土壤 ROC、POC 初始含量由多到少规律一致,随种植年限的增加,ROC、POC 初始含量在 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层为先增加后减少,在 30 ~ 50 cm 土层



图例说明同表1,数据误差线为标准误差,下同

图1 各林型不同深度土壤有机碳累计矿化量

Fig. 1 Cumulative mineralization of soil organic carbon in different forest types at different depth

则先减少后增加。0~15 cm 土层,17年生花椒林土壤 ROC、POC 初始含量均显著高于30年、5年生花椒林($P < 0.05$); 15~30 cm 土层,17年生花椒林土壤 ROC 初始含量显著高于30年生花椒林($P < 0.05$); 30~50 cm 土层,3种花椒林土壤 ROC 初始含量均达到显著差异水平($P < 0.05$),30年生花椒林 > 5年生花椒林 > 17年生花椒林。

除5年生花椒林外,其他各林型土壤 POC 初始含量在0~15 cm 土层均显著高于15~30 cm 和30~50 cm 土层($P < 0.05$),5年生花椒林0~15 cm

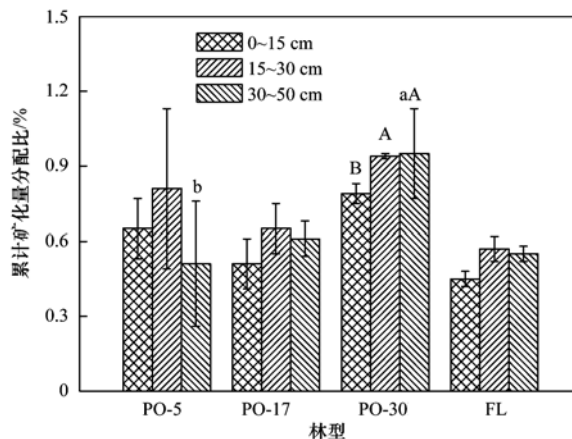


图2 各林型不同深度土壤有机碳累计矿化量分配比例

Fig. 2 Distribution ratios of $\text{CO}_2\text{-C}$ cumulative mineralization amount to SOC contents in different forest types at different depth

土层 POC 初始含量仅显著高于15~30 cm 土层($P < 0.05$)。除30年生花椒林土壤 ROC 初始含量在0~15 cm 和30~50 cm 土层显著高于15~30 cm 外,其他各林型 ROC 初始含量均表现为0~15 cm 土层显著高于15~30 cm 和30~50 cm 土层。

2.3 矿化培养前后土壤活性有机碳含量变化

92 d 培养后,ROC 含量较初始含量在0~15、15~30、30~50 cm 土层分别减少了21.31%~25.00%、12.00%~23.64%、16.67%~28.26%。这说明,在培养过程中,ROC 被作为土壤有机碳矿化的碳源所利用。在同一土层,乔木林减少量最多,分别为:0.23、0.17、0.19 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表2)。随花椒种植年限的增加,0~15 cm 和15~30 cm 土层 ROC 减少量先增加后减少,30~50 cm 土层则先减少后增加,与 ROC 初始含量变化规律一致,且两者之间显著相关($R = 0.689$),这说明矿化过程中 ROC 的变化与其初始含量密切相关。

92 d 培养后,各土层 POC 含量较初始含量均表现为增加,其增量由多到少为:乔木林、30年生花椒林、17年生花椒林、5年生花椒林(表2)。培养前后 POC 含量的增加主要依赖于颗粒有机物质量占原土质量分数的增加,培养后颗粒有机物质量占原土质量分数的增量达到了10.49%~24.75%,从原土中分离出来的颗粒有机物中 C 含量相比培养前是减少的,减少量占原土颗粒有机物中 C 含量的0.51%~11.04%。随种植年限的增加,各土层颗粒有机物中 C 减少量均先减少后增加,且30年生花椒林减少量在各层均显著高于17年生花椒林($P < 0.05$)。这表明,土壤有机碳矿化过程促进了土壤颗

表 2 各林型不同深度土壤活性有机碳初始含量及其培养前后变化值

Table 2 Initial contents of labile soil organic carbon and changes before and after incubation in different forest types at different depth (mean ± SE)							
林型	土壤深度 /cm	易氧化有机碳/g·kg ⁻¹			颗粒有机碳/g·kg ⁻¹		
		初始含量	培后含量	减少值 ¹⁾	初始含量	培后含量	增加值 ²⁾
PO-5	0~15	0.61±0.06cdA	0.48±0.05cA	0.13±0.01b	12.57±2.01cA	13.93±2.67cA	3.10±0.87b
	15~30	0.45±0.02dB	0.35±0.01bB	0.09±0.02b	9.27±0.62bB	11.25±0.61cB	1.98±0.47c
	30~50	0.46±0.02cB	0.33±0.05cB	0.13±0.04ab	9.65±0.67bAB	11.52±0.51bB	1.87±0.88b
PO-17	0~15	0.80±0.05bA	0.60±0.06bA	0.20±0.01abA	18.26±1.58bA	21.74±2.48bA	3.48±1.47ab
	15~30	0.55±0.04bcB	0.42±0.03bB	0.13±0.01abAB	11.21±0.82bB	14.71±1.43bcB	3.51±1.06bc
	30~50	0.36±0.04dC	0.29±0.02cC	0.06±0.02bB	9.15±0.52bB	11.34±0.95bB	2.19±0.51b
PO-30	0~15	0.70±0.01cA	0.54±0.02bcA	0.16±0.02abA	13.55±0.66cA	18.18±0.70b	4.63±0.71ab
	15~30	0.50±0.15cdB	0.43±0.03bB	0.06±0.01bB	10.24±1.69bB	15.48±0.52b	5.24±1.22ab
	30~50	0.63±0.01bA	0.47±0.05bAB	0.16±0.05aA	10.22±1.39bB	14.48±0.79b	4.26±0.07ab
FL	0~15	1.02±0.01aA	0.80±0.02aA	0.23±0.01a	24.96±0.55aA	30.59±0.03aA	6.13±0.41a
	15~30	0.85±0.01aB	0.68±0.01aB	0.17±0.02a	16.18±0.12aB	22.10±0.15aB	5.82±0.08a
	30~50	0.80±0.02aB	0.61±0.02aB	0.19±0.02a	16.14±0.14aB	22.23±0.54aB	6.09±0.46a

1)减少值为培养前后易氧化有机碳的减少值; 2)增加值为培养前后颗粒有机碳的增加值

粒有机物的形成,颗粒有机物中碳素的生物有效性
与花椒种植年限有关.

2.4 土壤有机碳矿化与土壤特性和活性有机碳含
量的关系

对土壤有机碳累计矿化量与土壤特性、活性有
机碳含量进行相关性分析,结果表明(表 3),土壤有

机碳累计矿化量与 pH、C/N 之间显著正相关($P < 0.05$),与 POC 含量增加值呈极显著正相关($P < 0.01$),与 SOC 的相关性未达到显著水平. 这说明
土壤有机碳累计矿化量与 pH、C/N 和 POC 含量增
加值密切相关,但与有机碳和活性有机碳初始含量
关系较弱.

表 3 土壤有机碳累计矿化量与土壤特性和活性有机碳含量的相关性¹⁾

Table 3 Correlations of CO ₂ -C cumulative mineralization amount with soil physic and chemical properties and labile organic carbon							
相关系数	土壤有机碳	pH	C/N	易氧化有机碳		颗粒有机碳	
				初始含量	变化值	初始含量	变化值
92-CO ₂ -C	0.303	0.342 *	0.329 *	0.291	0.161	0.199	0.472 **

1)92-CO₂-C 分别表示培养 92 d 累计矿化量; * 表示显著相关性($P < 0.05$), ** 表示极显著相关性($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 不同年限花椒林对土壤有机碳矿化的影响

不同年限花椒林土壤特性存在差异,对土壤有
机碳矿化产生了不同的影响,其中,以 pH 值最大、
C/N 最高的 30 年生花椒林土壤矿化最快. pH 值影
响着微生物的种类和活性^[7],不同种类微生物适应
的 pH 值范围存在差异,在适应范围内 pH 值的变动
影响着微生物活性. 碳、氮是组成微生物细胞的重
要元素,土壤 C/N 影响土壤微生物的数量、活性及
群落组成^[18]. 本研究中,pH 值、C/N 与有机碳累计
矿量显著正相关(表 3),土壤中微生物种类及活性
受其影响较大,进而影响土壤有机碳的矿化. 喀斯
特山区不同年限花椒林土壤特性对微生物种类和活
性的影响机制还有待进一步研究.

土壤活性有机碳是土壤中不稳定、易氧化、易
矿化,且对微生物有较高活性的那部分碳素,有研究

表明,其含量与土壤有机碳矿化密切相关. 如
Motavalli 等^[19]发现热带森林土壤有机碳矿化速率
与土壤有机碳、溶解性微生物量碳、轻组有机碳表
现为正相关. 但本研究中,土壤活性有机碳 ROC、
POC 初始含量与有机碳累计矿化量的相关性较弱,
17 年生花椒林土壤 ROC、POC 初始含量在花椒林
中最高,但其有机碳累计矿化量低于 30 年生花椒
林. 产生这种现象的原因可能有 3 个:①喀斯特山
区 ROC 对有机碳矿化的贡献较小. ROC 虽为微生
物有效碳源,但培养前后 ROC 减少量与有机碳累计
矿化量的相关性较弱(表 3). ②颗粒有机物对有机
碳的物理保护作用. 随种植年限从 17 年到 30 年,
花椒林进入衰退期,土壤退化,土壤结构变差,颗粒
有机物占土壤质量分数减少了 25.49%~28.00%,
受物理保护的有机碳暴露,增加了微生物可利用性
碳含量,从而加速了微生物对土壤有机碳的矿化.
土壤培养前后颗粒有机物中 C 含量的减少量也证

明了这一点. 花椒林土壤颗粒有机物中 C 含量减少最多的是 30 年生花椒林, 且在各层均显著高于 17 年生花椒林 ($P < 0.05$). ③施肥管理措施对土壤微生物及有机碳的影响. 人工施肥可能通过影响输入土壤中碳源物质的组成而影响土壤微生物的群落和区系^[20], 进而影响土壤有机碳的矿化. 另外, 有机肥的施用可能使进入土壤中的有机碳与矿质颗粒形成有机-无机复合体, 有利于腐殖质的积累^[21], 促进土壤团聚体的形成, 抑制土壤有机碳的矿化. 处于盛产期的 17 年生花椒林施肥量大于 5 年和 30 年生花椒林. 进入衰退期后, 花椒林土壤有机碳矿化明显高于其它时期, 增加了 CO_2 的释放量, 这将不利于土壤有机碳的积累和气候变暖的控制, 通过合理适当的管理措施来增加土壤中颗粒态团聚体的含量有利于提高土壤有机碳的稳定性.

花椒种植对不同深度土壤有机碳矿化的影响不同. 与已有研究相类似^[22], 随土壤深度的增加, 土壤有机碳累计矿化量呈减少趋势, 减少幅度较小, 这说明植被覆盖对土壤有机碳矿化的影响随土层的加深而减弱. 相较于 0~15 cm 和 15~30 cm 土层, 只有 30~50 cm 土层 30 年生花椒林土壤有机碳累计矿化量显著高于 5 年、17 年生花椒林, 这可能与植物根系及其分泌物的分解和转化^[23]有关. 30 年生花椒林属于花椒生长的衰退期, 植物根系归还土壤, 增加了 30~50 cm 土层土壤中生物有效性碳. 本研究中, 土壤有机碳累计矿化量分配比以 15~30 cm 土层最高, 这可能是由两方面原因造成的: ①适宜的环境、土壤的扰动以及非表层土壤在空气中的暴露对微生物产生了激发效应^[24]; ②受土壤有机碳与有机碳累计矿化量变化幅度的影响. 0~15 cm 土层土壤有机碳含量显著高于 15~30 cm ($P < 0.05$), 有机碳累计矿化量的变化相比有机碳的变化可以忽略不计, 因此 15~30 cm 土壤有机碳累计矿化量分配比高于 0~15 cm, 30~50 cm 层低于 15~30 cm 则是因为有机碳累计矿化量的减小幅度 (7.00%~32.04%) 大于土壤有机碳的减少幅度 (2.96%~26.28%) 造成的.

3.2 种植花椒对土壤活性有机碳的影响

现有研究中, 随林龄的增加, 人工林对土壤有机碳及活性有机碳的影响规律不一. 谢涛等^[25]研究表明, 在苏北沿海地区, 随着杨树林龄的增加, SOC、微生物生物量碳和水溶性有机碳含量均先增大后减少, 其中以 15 年最大, 4 年最小; 但李平等^[26]研究苏南丘陵不同林龄杉木林时发现, 随林龄的增加,

SOC、ROC 和水溶性有机碳含量均表现为先降低后增加. 研究区域、土壤性质、树木品种及树龄都可能影响土壤有机碳和活性有机碳含量. 本研究中, 随花椒种植年限的增加, 0~15 cm 和 15~30 cm 土层 ROC、POC 均先增加后减少. 其原因可能是花椒种植前期植物凋落物数量少, 施肥量适中, 有机质来源较少, 随着种植年限增加至盛产期, 凋落物逐渐增多, 施肥量增加, 增加了土壤有机质的来源, 加之团聚体对有机碳的保护作用和较低的矿化作用, 促进了土壤有机碳的积累, 增加了活性有机碳含量. 随着花椒林进入衰退期, 人工施肥减少, 大团聚体减少, 土壤有机碳受到的物理保护作用减弱, 活性有机碳最先矿化流失, 含量减少^[27]. 然而 30~50 cm 土层 SOC、ROC 和 POC 含量随种植年限的增加则先降低后增加, 这可能与植物根系^[28]有关. 植物根系是 30~50 cm 土层土壤有机碳的主要来源. 随花椒种植年限的增加, 为满足自身所需养分, 根系快速生长, 吸收土壤养分, 致使土壤有机碳含量减小, 同时也降低了活性有机碳含量; 当花椒林进入衰退期, 根系衰老腐化增加了有机碳输入量, 促进了有机碳和活性有机碳的积累. 长期种植花椒可能会使 0~15 cm 和 15~30 cm 土层土壤质量有一定的退化, 但对于 30~50 cm 土层土壤而言, 则有利于土壤有机碳储存.

在室内恒温恒湿培养下, 随种植年限的增加, 土壤 POC 培养前后的增加量呈递增趋势, 这说明在适宜的环境下, 种植花椒能增加喀斯特地区土壤 POC 的含量. 联系本研究测定的土壤有机碳含量变化规律, 发现随种植年限的增加, 0~15 cm 和 15~30 cm 土层土壤 POC 呈先增加后减少的变化趋势, 出现这种差异可能是多变的环境因子、施肥状况和土壤有机碳含量及矿化作用等共同影响的结果. 在自然状态下, 合理调控影响土壤 POC 含量的因子可以作为恢复喀斯特山区土壤质量的有效措施之一.

4 结论

(1) 各林型土壤有机碳累计矿化量从高到低分别为: 30 年生花椒林, 乔木林, 5 年生花椒林, 17 年生花椒林. 各花椒林土壤有机碳累计矿化量分配比高于乔木林, 表明人工林植被恢复的固碳能力较自然林要弱; 随花椒种植年限增加, 土壤有机碳累计矿化量分配比表现为 0~15 cm 和 15~30 cm 土层先减少后增加, 深层 (30~50 cm) 逐渐增加, 种植花椒能在一定时期内增加土壤有机碳的稳定性, 但长

期种植则会降低土壤有机碳的稳定性,不利于土壤有机碳的积累。

(2)随花椒种植年限的增加,土壤 ROC 和 POC 含量在 0~15 cm 和 15~30 cm 土层先增加后减少,在 30~50 cm 土层则先减少后增加,表明花椒种植前期有利于 0~15 cm 和 15~30 cm 土层活性有机碳的增加,深层(30~50 cm)活性有机碳含量的增加则需依靠长期植被恢复。

(3)土壤有机碳矿化的影响因素纷繁复杂,喀斯特地区花椒林土壤有机碳的矿化量与土壤 pH 值和 C/N 显著正相关,与 POC 培养前后的变化值极显著正相关。另外,土壤微生物和施肥状况也可能是影响喀斯特地区土壤有机碳矿化的重要因素。

参考文献:

- [1] 闫俊华,周传艳,文安邦,等. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, **19**(3): 273-278.
- [2] 何腾兵,刘元生,李天智,等. 贵州喀斯特峡谷水保经济植物花椒土壤特性研究[J]. 水土保持学报, 2000, **6**(2): 55-59.
- [3] 罗友进,魏朝富,李渝,等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(1): 257-266.
- [4] 周玮,周运超,田春. 花江喀斯特地区花椒人工林的土壤酶演变[J]. 中国岩溶, 2008, **27**(3): 240-245.
- [5] 廖洪凯,龙健,李娟. 不同小生境对喀斯特山区花椒林表土团聚体有机碳和活性有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(1): 156-160.
- [6] 李忠佩,张桃林,陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, **41**(4): 544-552.
- [7] 李顺姬,邱莉萍,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.
- [8] 罗友进,赵光,高明,等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(6): 117-122.
- [9] 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.
- [10] Norton U, Saetre P, Hooker T D, *et al.* Vegetation and Moisture controls on soil carbon mineralization in semiarid environments[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, **76**(3): 1038-1047.
- [11] 王清奎,汪思龙,于小军,等. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(12): 1918-1923.
- [12] 谭立敏,彭佩钦,李科林,等. 水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 233-239.
- [13] 王雪芬,胡锋,彭新华,等. 长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转速率的影响[J]. 土壤学报, 2012, **49**(5): 954-961.
- [14] 严毅萍,曹建华,梁毅,等. 桂林毛村岩溶区三种亚类石灰土有机碳矿化研究[J]. 地球与环境, 2012, **40**(2): 219-226.
- [15] 张迪,韩晓增. 长期不同植被覆盖和施肥管理对黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, **43**(13): 2715-2723.
- [16] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**(3): 776-783.
- [17] Harris D, Horwath W R, van Kessel C. Acid fumigation of soils to remove carbonates prior to total organic carbon or carbon-13 isotopic analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, **65**(6): 1853-1856.
- [18] 王红,范志平,邓东周,等. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(9): 1469-1475.
- [19] Motavalli P P, Palm C A, Parton W J, *et al.* Comparison of laboratory and modeling simulation methods for estimating soil carbon pools in tropical forest soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1994, **26**(8): 935-944.
- [20] Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, **38**(4): 747-758.
- [21] 赵丽娟,韩晓增,王守宇,等. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力变化Ⅳ. 有机碳组分的变化[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(5): 817-821.
- [22] 黄宗胜,喻理飞,符裕红. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤可矿化碳库特征[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2165-2170.
- [23] Trumbore S, Da Costa E S, Nepstad D C, *et al.* Dynamics of fine root carbon in Amazonian tropical ecosystems and the contribution of roots to soil respiration[J]. Global Change Biology, 2006, **12**(2): 217-229.
- [24] 姜发艳,孙辉,林波,等. 川西亚高山云杉人工林恢复过程中土壤有机碳矿化研究[J]. 土壤通报, 2011, **42**(1): 91-97.
- [25] 谢涛,王明慧,郑阿宝,等. 苏北沿海不同林龄杨树林土壤活性有机碳特征[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(1): 51-58.
- [26] 李平,郑阿宝,阮宏华,等. 苏南丘陵不同林龄杉木林土壤活性有机碳变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(4): 778-783.
- [27] Hassink J. Density fractions of soil macroorganic matter and microbial biomass as predictors of C and N mineralization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(8): 1099-1108.
- [28] 张金,许明祥,王征,等. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(10): 2721-2727.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedum in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行