

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

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

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响

李君剑¹, 刘峰¹, 周小梅^{2*}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西大学生命科学学院, 太原 030006)

摘要: 矿区废弃地生态退化形势严峻, 生态修复已成为矿区可持续发展的主要措施, 土壤微生物和酶活性可作为评价土壤恢复质量的敏感因子. 本研究将以山西省安太堡煤矿复垦区作为对象, 分析植被恢复方式对土壤微生物和酶活的影响. 结果表明, 不同植被方式对土壤理化特征、参与氮代谢的 3 类菌群(固氮菌、硝化细菌和反硝化细菌)和 4 种酶活性(蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶和多酚氧化酶活)均有显著影响. 土壤总氮含量与固氮菌和硝化细菌数量均显著相关, 而与反硝化细菌不相关. 多酚氧化酶活性与有机碳和总氮含量之间为负相关, 而其它 3 种酶与有机碳和总氮之间呈正相关. 通过主成分分析计算综合肥力指标, 刺槐-油松混交林土壤综合肥力指标最高, 而未复垦综合肥力指标最低. 可见, 刺槐-油松混交林是晋西北干旱区矿区复垦较为适宜的植被恢复模式.

关键词: 矿区复垦; 植被修复方式; 土壤微生物; 土壤酶; 综合肥力指标

中图分类号: X172; X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1836-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.044

Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas

LI Jun-jian¹, LIU Feng¹, ZHOU Xiao-mei^{2*}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Ecological degradation in the mining areas is greatly aggravated in recent several decades, and ecological restoration has become the primary measure for the sustainable development. Soil microbe and enzyme activity are sensitive indices to evaluate soil quality. Ecological reconstruction was initiated in Antaibao mining area, and we tested soil physicochemical properties, microbial populations of azotobacteria, nitrifying-bacteria and denitrifying-bacteria, and enzyme activities (including sucrose, polyphenol oxidase, dehydrogenase and urease) under different regeneration scenarios. Regeneration scenarios had significant effects on soil physicochemical properties, microbial population and enzyme activities. Total nitrogen was strongly correlated with azotobacteria and nitrifying-bacteria, however, total nitrogen was not correlated with denitrifying-bacteria. Phenol oxidase activity was negatively correlated with soil organic carbon and total nitrogen, but other enzyme activities were positively correlated with soil organic carbon and total nitrogen. Principal Component Analysis (PCA) was applied to analyze the integrated fertility index (IFI). The highest and lowest IFIs were in *Robinia pseudoacacia*-*Pinus tabulaeformis* mixed forests and un-reclaimed area, respectively. *R. pseudoacacia*-*P. tabulaeformis* mixed forests were feasible for reclaimed mining areas in semi-arid region Northwest Shanxi.

Key words: reclaimed mining area; regeneration scenarios; soil microbe; soil enzymes; integrated fertility index

土壤微生物和酶在有机物质分解、合成与转化, 以及无机物质氧化与还原等过程中起重要作用, 是土壤生态系统代谢重要动力^[1]. 采矿过程中剥离表土的土壤微生物数量、ATP 酶活和对葡萄糖利用率随堆积厚度和时间增加而降低^[2]. 土壤生态功能恢复是退化的陆地生态系统恢复和持续发展的关键, 土壤微生物群落结构和多样性、及土壤酶活性可作为评价土壤恢复质量的敏感因子^[3~5]. 山西省采煤破坏的土地 89.2% 未得到治理, 造成了环境污染、生态资源破坏以及地质灾害等生态环境问题, 矿区生态修复是促进煤炭工业持续发展和缓解生态环境问题的必要措施. 目前, 山西矿区修复后的植被群落特征演替特征研究较多, 不同植被修复方式和年限均显著影响土壤碳氮含量, 而对生态修复措

施更为敏感的土壤微生物和酶活性研究甚少, 其中对功能微生物群落的研究尤其少.

因此, 本研究以山西安太堡露天矿区 7 种不同植被恢复类型的样地为对象, 对样地的土壤理化特征、固氮、硝化和反硝化细菌、及土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶和多酚氧化酶活性进行测定. 通过分析不同植被恢复类型间土壤微生物和酶活性的差异性, 不同指标间的相关性, 以及可全面表征土壤物理、化学和生物性质的土壤综合肥力指标. 通过揭示不同植被恢复类型对土壤质量的影响, 以期矿

收稿日期: 2014-10-24; 修订日期: 2014-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271530, 41401053)

作者简介: 李君剑(1975~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为恢复生态学, E-mail: lijunjian@sxu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhouxm@sxu.edu.cn

区废弃地生态恢复类型筛选和恢复效果评价提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

矿区地处黄土高原东部晋陕蒙接壤的三角地带,位于东经 112°10'58" ~ 113°30',北纬 39°23' ~ 39°37',海拔1 300 ~ 1 400 m. 属于温带半干旱大陆型季风气候区. 年均温 6.2℃,无霜期约 115 ~ 130 d. 年均风速为 2.3 ~ 4.7 m·s⁻¹,最大风速可达 20 m·s⁻¹. 年平均降水量约为 450 mm,降水主要集中在 7 ~ 9 月. 年均蒸发量约为2 160 mm. 地带性土壤为栗钙土与栗褐土的过渡带.

本研究包括 7 种恢复模式,包括未扰动的原地貌(CK1),采后刚刚覆土 2 年但未经植被恢复的样地(CK2),其余为乔灌木不同配置方式的复垦地,具体情况见表 1.

表 1 各样地的复垦植被组成和时间

Table 1 Composition and time of reclaimed scenarios in sample plots		
样地	植被配置方式	种植年份
CK1	覆土,未复垦	
CK2	未开采的原地貌(虎尾草、狗尾草等)	
GA	苜蓿	2009
PL	刺槐林	1992
MF1	刺槐、油松	1992
MF2	沙棘、刺槐、柠条、沙枣	2002
MF3	刺槐、油松、柠条	1992

1.2 样品采集

每个样地包括 3 个重复小区,小区采样方式为多点混合土样样品处理法,去除地表植被和覆盖物,6 个样点随机土钻取样(0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm)并混匀. 采样时间为 2010 年 10 月. 一部分自然风干,

研磨过 2 mm 的筛以备用;另一部分保存于 4℃ 用于土壤酶活性的测定.

1.3 样品分析

土壤 pH 值采用 1:5 土和水溶液测定;土壤有机碳(organic carbon, OC)采用重铬酸钾氧化法;总氮(total nitrogen, TN)采用凯氏定氮法;碱解氮(available nitroge, AN)采用碱解扩散法^[6].

微生物类群的数量采用稀释平板法测定,固氮菌培养基为无氮阿须贝氏培养基、硝化细菌和反硝化细菌培养基见文献[7]. 土壤多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法;土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法;土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法;土壤过氧化氢酶活性采用 2,3,5-氯化三苯基四氮唑比色法^[8].

1.4 数据分析

不同植被修复类型对土壤理化性质和酶活影响,在 SPSS 中进行 One-way analysis of variance 分析;土壤微生物数量、酶活性和有机碳间进行 Pearson 相关性分析;通过主成分分析(principal component analysis, PCA)特征值的累积贡献率,根据累积贡献率筛选主成分,并确定其主成分评价价值(a_i),得出各主成分的评价价值(Z_i),进而计算综合主成分评价价值,即为综合肥力指标(integrated fertility index, IFI)^[9],公式如下:

$$IFI = \sum a_i Z_i / \sum a_i$$

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

表 2 中列出了不同植被恢复方式,土壤理化性质的差异性. 土壤 pH 偏碱性,且随土壤深度有所提高,不同样地间pH差异不显著. 土壤碳氮含量及其

表 2 矿区复垦地土壤理化性质¹⁾

Table 2 Soil physical and chemical properties of study sites in reclaimed mining area						
深度/cm	样地	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	碳氮比	碱解氮/mg·kg ⁻¹
0 ~ 10	CK1	7.58 ± 0.15 a	10.18 ± 0.86 b	0.78 ± 0.02 bc	13.10 ± 0.31 b	14.19 ± 0.32 b
	CK2	7.51 ± 0.11 a	3.23 ± 0.63 a	0.40 ± 0.08 a	8.18 ± 1.37 a	9.69 ± 2.43 a
	GA	7.43 ± 0.21 a	5.99 ± 2.88 a	0.62 ± 0.14 a	9.67 ± 1.25 a	9.50 ± 1.46 a
	PL	7.33 ± 0.24 a	11.42 ± 5.45 b	0.73 ± 0.27 bc	15.66 ± 3.61 b	18.22 ± 3.02 b
	MF1	7.25 ± 0.07 a	18.17 ± 7.23 c	0.89 ± 0.26 c	20.31 ± 3.94 b	16.95 ± 3.33 c
	MF2	7.64 ± 0.29 a	4.56 ± 1.23 a	0.43 ± 0.10 b	10.54 ± 2.65 a	7.96 ± 0.67 a
	MF3	7.65 ± 0.06 a	13.50 ± 2.18 b	0.80 ± 0.11 bc	16.81 ± 3.79 b	16.87 ± 3.99 c
10 ~ 20	CK1	8.31 ± 0.32 a	3.92 ± 0.52 b	0.40 ± 0.03 c	9.84 ± 1.38 a	13.18 ± 0.57 b
	CK2	8.45 ± 0.16 a	1.97 ± 1.05 a	0.17 ± 0.06 a	11.96 ± 2.64 a	8.04 ± 1.82 a
	GA	7.47 ± 0.04 a	1.86 ± 0.97 a	0.17 ± 0.09 a	11.23 ± 3.28 a	7.48 ± 0.07 a
	PL	7.96 ± 0.17 a	1.97 ± 0.53 a	0.19 ± 0.04 a	10.50 ± 2.39 a	8.96 ± 1.11 a
	MF1	7.60 ± 0.03 a	5.55 ± 3.23 c	0.31 ± 0.13 c	17.83 ± 5.44 b	10.54 ± 1.22 b
	MF2	8.11 ± 0.13 a	3.47 ± 1.11 ab	0.18 ± 0.04 a	14.28 ± 1.89 ab	9.67 ± 3.75 ab
	MF3	7.90 ± 0.28 a	2.05 ± 0.47 a	0.24 ± 0.05 b	11.31 ± 2.870 a	10.92 ± 0.61 b

1) 数值为平均值 ± 标准偏差,不同字母表示不同植被之间 P < 0.05 水平上差异显著

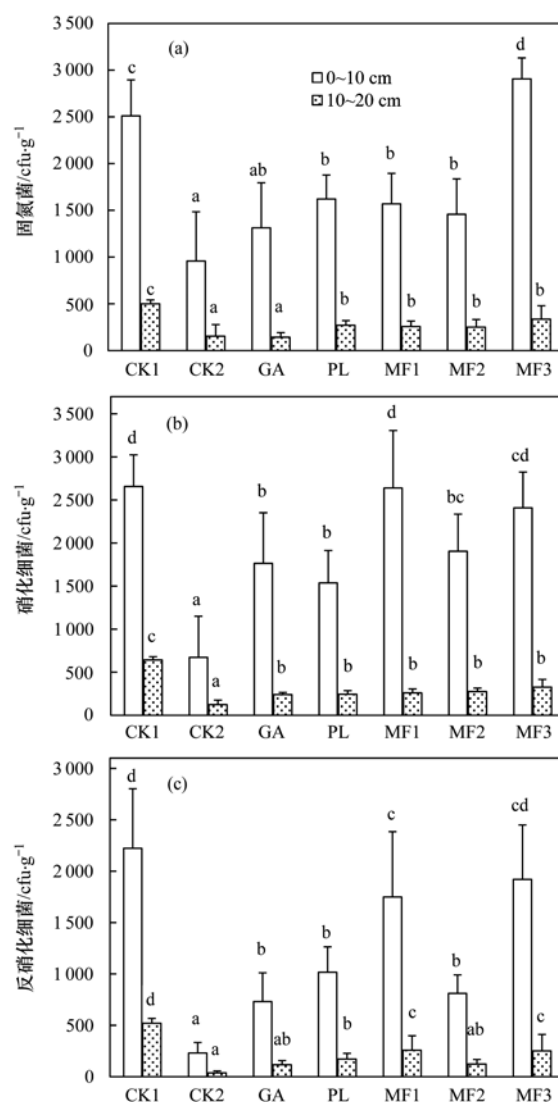
比值因植被恢复类型而有显著的变化. 在 0~10 cm 土壤层, 碳氮特征的最大值均出现在混交林 MF1, 而较小值来自样地 CK2、GA 和 MF2, 且混交林 MF1 碳氮特征值均显著高于 CK1、GA 和 MF2. 随着土壤深度的深入, 在 10~20 cm 层各样地土壤有机碳和总氮含量大幅度地降低, 而碱解氮含量变化幅度较小, 土壤 pH 略有增加; 另外, 不同植被恢复方式对不同土壤层土壤碳氮值影响的差异性有所不同.

2.2 土壤微生物数量

土壤固氮菌、硝化细菌和反硝化细菌数量因植被恢复方式和土壤深度变化而显著变化(图 1). 在 0~10 cm 土壤层, 混交林 MF3 中土壤固氮菌数量最多, 次之为对照样地 CK1, 两者均显著高于其它样地, 而对照样地 CK2 中固氮菌数量显著低于除了苜蓿样地 GA 外的其它样地; 而在 10~20 cm 土壤层, 固氮菌在对照样地 CK1 数量最多, 在样地 CK2 和 GA 中最少, 且与 3 个混交林样地显著不同[图 1(a)]. 在 0~10 cm 土壤层, 对照样地 CK2 中硝化细菌数量显著低于其它样地, 而硝化细菌数量最高的出现在了样地 CK1 和 MF1 中; 10~20 cm 土壤层, 硝化细菌数量最大和最小值分别出现在对照样地 CK1 和 CK2 中, 并与其它 5 个样地显著不同[图 1(b)]. 在 0~10 cm 土壤层, 对照样地 CK1 中反硝化细菌数量最多, 除与混交林 MF3 外的其它样地间均存在显著的差异性, 对照样地 CK2 中反硝化细菌数量显著低于其它样地, 样地 GA、PL 和 MF2 间反硝化细菌数量无显著差异; 10~20 cm 土壤层, 对照样地 CK1 中反硝化细菌显著高于其它样地, 混交林 MF1 和 MF3 中反硝化细菌数量次之[图 1(c)].

2.3 土壤酶活性

不同植被恢复方式对土壤酶活性影响结果见图 2. 植被恢复方式对土壤脲酶活性影响在不同土壤层影响一致, 4 个林地样地(包括 PL 和 MF1~3)中土壤脲酶活性显著高于其它样地[图 2(a)]. 在不同土壤层, 对照样地 CK1 和 CK2 中土壤蔗糖酶活性均显著低于其它样地[图 2(b)]. 0~10 cm 土壤层, 土壤过氧化氢酶活性受植被的显著影响, 其中对照样地 CK2 的土壤过氧化氢酶活性显著低于其它样地; 植被对 10~20 cm 土壤层土壤过氧化氢酶活性的影响均不显著[图 2(c)]. 植被对不同土壤层的多酚氧化酶活性影响有所不同, 0~10 cm 土壤层, 多酚氧化酶活性样地 MF3 中最高, 且显著高于其它样地; 10~20 cm 土壤层, 多酚氧化酶活性最大和最小值分别出现在对照样地 CK2 和混交林 MF3



数值为 3 个重复的平均值, 垂直标线为标准偏差, 不同字母表示不同植被之间 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 下同

图 1 不同植被恢复方式下土壤固氮菌、硝化细菌和反硝化细菌数量

Fig. 1 Populations of azotobacteria, nitrifying-bacteria and denitrifying-bacteria population under different regeneration scenarios

中, 与其它样地间差异显著[图 2(d)].

2.4 土壤综合肥力指标

将土壤理化性质、酶活性和微生物数量进行 PCA 分析, 结果表明前 3 个特征值的累积贡献率可达 87.07%, 3 个主成分得分分别为 4.77、2.70 和 2.11, 样地各主成分评价值和综合肥力指标见表 3. 整体来看, 恢复时间较长的林地的综合肥力指标较大, 而复垦时间较短和未复垦地的肥力指标较小, 综合肥力指标从高到低依次为 MF1、MF3、CK1、MF2、PL、GA 和 CK2.

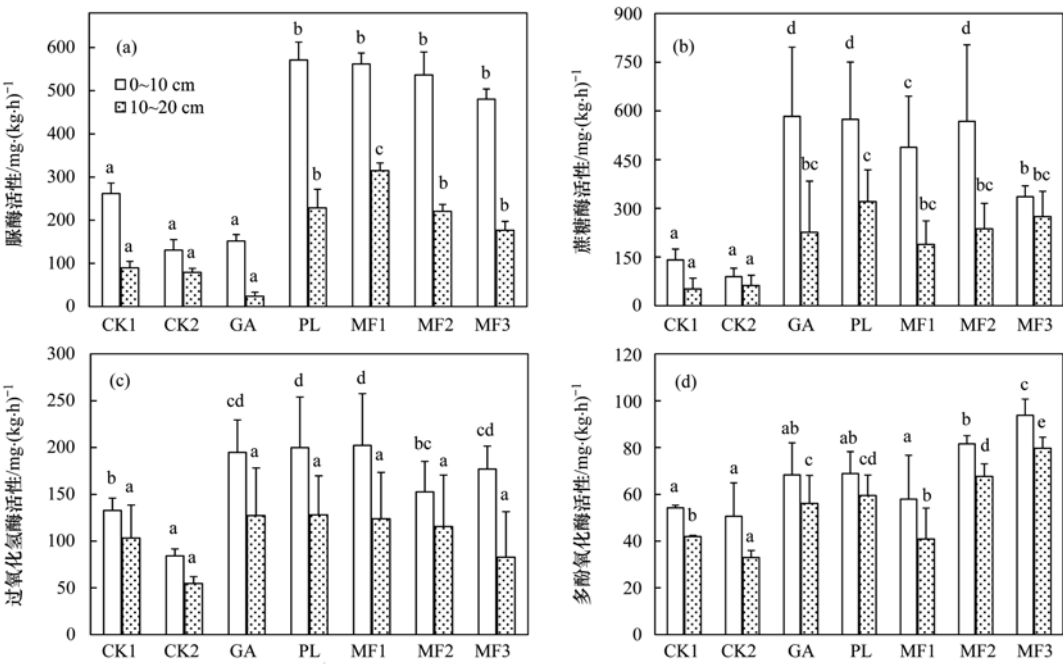


图2 不同植被恢复方式下土壤酶活性

Fig. 2 Soil enzyme activities under different regeneration scenarios

表3 不同植被方式下土壤综合肥力指标

Table 3 Soil integrated fertility index under different regeneration scenarios

样地	Z_1	Z_2	Z_3	IFI
CK1	0.54	1.30	-2.56	0.63
CK2	-3.96	-0.97	-0.99	-2.24
GA	-1.60	-0.33	1.61	-0.89
PL	1.21	-1.35	0.81	0.22
MF1	2.87	-1.38	-0.60	1.03
MF2	0.74	-0.36	0.62	0.27
MF3	0.21	3.08	1.11	0.97

2.5 土壤检测指标间的相关性

土壤理化特征、酶活性和微生物数量间 Pearson 相关性分析表明(表4),土壤总氮与除了过氧化氢酶和反硝化细菌数量外的其他各指标间均显著相关,硝化细菌与蔗糖酶和过氧化氢酶极显著相关,其余微生物数量和酶活性间不存在显著的相关性。

3 讨论

本研究结果表明,土壤有机碳含量因植被恢复

表4 土壤理化特征、酶活性和微生物数量间 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 4 Pearson correlation analysis for the linear regressions between soil physical and chemical properties, enzyme activities and microbial populations

	有机碳	总氮	碱解氮	蔗糖酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶	脲酶	固氮菌	硝化细菌
总氮	**								
碱解氮	**	**							
蔗糖酶	**	**	**						
过氧化氢酶	ns	ns	*	**					
多酚氧化酶	—**	—**	—*	—**	ns				
脲酶	ns	*	**	ns	**	ns			
固氮菌	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns		
硝化细菌	ns	*	ns	**	**	ns	ns	*	
反硝化细菌	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	**

1) ** 表示在 0.01 水平上相关(双尾); * 表示在 0.05 水平上相关(双尾); ns 表示在 0.05 水平上不相关(双尾)

方式和年限均有显著的变化(表2)。随着植被恢复年限的延长,输入土壤有机碳量会逐步增加,因此在植被恢复年限较长样地,其有机碳和氮含量均较

高^[10]。Cerli 等^[11]报道不同林龄的挪威云杉土壤腐殖质的研究中发现,随林龄土壤碳储量逐步提高至 73 年的林地达到平衡状态。另外,有研究报道随恢

复年限的增加,不同土壤层间有机碳和氮含量差值增加^[10, 12],这样的趋势也在本研究有所体现,有机碳和氮含量在未复垦地(CK2)和复垦时间较短的苜蓿样地的不同土壤层间变化较小,在复垦年限较长样地的不同土壤层间变化较大.不同植被恢复方式显著影响土壤有机碳和氮含量,其主要原因是不同植被组成会导致输入土壤中枯落物量和降解难易程度有所差异,另外,植物根系量和分泌物有所不同^[13].

已有的研究表明土壤功能微生物组成和活性受土地利用变化显著影响,如硝化过程中的硝化细菌和氨氧化细菌在不同样地间差异显著,硝化细菌数量与氮矿化和硝化速率、土壤水分和矿质氮含量显著相关^[14].本研究中的固氮菌、硝化细菌和反硝化细菌在不同样地间差异显著(图1),植被恢复方式影响土壤微生物群落,主要是通过影响微生物生长代谢所需的有机碳和总氮等基质来实现^[15].本研究中土壤固氮菌和硝化细菌与总氮间显著相关性(表4)表明,固氮菌和硝化细菌主要受总氮含量影响.土壤反硝化细菌与总氮间并不相关(表4),类似的趋势也在造林后土壤反硝化作用的研究中发现,反硝化作用与土壤有机碳、氮以及土壤水分间均不相关^[16].

土壤酶介导有机碳的降解和氮磷等元素的循环,其活性可指示自然或人为干扰强度.本研究中4种土壤酶活性因植被恢复方式有显著变化(图2).土壤脲酶是广泛存在的一种好气性水解酶,其活性与土壤氮素相关^[17],本研究中通过相关性分析,脲酶活性与总氮和碱解氮显著相关,且与碱解氮为极显著相关(表4).蔗糖酶对增加土壤中小分子营养物质起着重要作用,通常土壤肥力越高,蔗糖酶活性越强.本研究中土壤蔗糖酶活性与土壤有机碳、总氮以及碱解氮均呈极显著的相关性(表4),极显著的相关性也在黄土高原的退耕地土壤酶活性的研究中发现^[17].过氧化氢酶广泛存在于土壤和生物体内,可被用作表示土壤氧化强度.本研究中发现土壤过氧化氢酶在恢复年限较长的样地中活性较大[图2(c)],且与土壤碱解氮显著相关,与硝化细菌呈极显著相关性,可见土壤肥力增加,供微生物代谢的底物增加,从而促进了过氧化氢酶活提高^[18].土壤多酚氧化酶主要参与芳香族有机碳的代谢,在本研究中多酚氧化酶活性与有机碳、总氮和碱解氮之间负相关,可能是由于土壤有机碳和氮的提高,土壤微生物群落结构发生改变,其酶活性有所降低^[19].

4 结论

(1)不同植被恢复方式显著地影响了土壤理化特征、微生物数量和酶活性,但对pH影响甚微.不同层次土壤的土壤理化、微生物和酶活指标差异较大,在恢复年限较长的样地中更为明显.

(2)土壤总氮含量与微生物和酶活性的相关性较强,但反硝化细菌与总氮间并不相关,多酚氧化酶活性与土壤有机碳和总氮之间为负相关,而其它酶活与有机碳和总氮间为正相关.

(3)根据PCA分析得到综合肥力指标可得出,矿区植被修复可有效提高土壤肥力,且随着植被恢复年限增加,土壤肥力会逐步增加,在晋西北半干旱区矿区复垦中刺槐-油松混交林是最佳的植被恢复模式.

参考文献:

- [1] Van Der Heijden M G, Bardgett R D, Van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2008, **11**(3): 296-310.
- [2] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review [J]. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, **3**(2): 1-20.
- [3] Zornoza R, Guerrero C, Mataix-Solera J, et al. Changes in soil microbial community structure following the abandonment of agricultural terraces in mountainous areas of Eastern Spain [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, **42**(3): 315-323.
- [4] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 矿区废弃地土壤微生物及其生化活性[J]. *生态学报*, 2003, **23**(3): 496-503.
- [5] 洪坚平, 谢英荷, 孔令节, 等. 矿山复垦区土壤微生物及其生化特性研究[J]. *生态学报*, 2000, **20**(4): 669-672.
- [6] 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.
- [7] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [8] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [9] 杨珊, 何寻阳, 苏以荣, 等. 岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(6): 1596-1602.
- [10] Zhao Z Q, Shahroui I, Bai Z, et al. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **55**: 40-46.
- [11] Cerli C, Celi L, Kaiser K, et al. Changes in humic substances along an age sequence of Norway spruce stands planted on former agricultural land [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**(9): 1269-1280.
- [12] Sever H, Makineci E. Soil organic carbon and nitrogen

- accumulation on coal mine spoils reclaimed with maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) in Agacli-Istanbul [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **155**(1-4): 273-280.
- [13] Li J J, Li H J, Zhou X M, *et al.* Labile and recalcitrant organic matter and microbial communities in soil after conversion of abandoned lands in the Loess Plateau, China [J]. Soil Science, 2011, **176**(6): 313-325.
- [14] Singh J S, Kashyap A K. Dynamics of viable nitrifier community, N-mineralization and nitrification in seasonally dry tropical forests and savanna [J]. Microbiological Research, 2006, **161**(2): 169-179.
- [15] Bending G D, Turner M K, Jones J E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(8): 1073-1082.
- [16] Orr C H, Stanley E H, Wilson K A, *et al.* Effects of restoration and reflooding on soil denitrification in a leveed midwestern floodplain [J]. Ecological Applications, 2007, **17**(8): 2365-2376.
- [17] 王兵, 刘国彬, 薛莲. 退耕地养分和微生物量对土壤酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(10): 1375-1382.
- [18] 戴全厚, 刘国彬, 姜峻, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(9): 429-434.
- [19] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L, *et al.* Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity [J]. Ecological Applications, 2004, **14**(4): 1172-1177.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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