

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞,杨文龙,董亮,史双昕,周丽,张秀蓝,李玲玲,钮珊,黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜,魏秀丽,高闽光,徐亮,焦洋,李胜,童晶晶,程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊,王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷,金崇伟,刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸,余卫娟,兰亚琼,李立,吕升,叶朝霞,张永明,刘锐,陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国,陈来国,何秋生,孟祥周,封永斌,黄玉妹,唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿,刘文君,张明露,田芳,孙雯,钱令嘉,战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅,王艳花,饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹,石晓勇,丁雁雁,唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷,李凤,刘湘庆,王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔,俞志明,宋秀贤,韩笑天,曹西华,袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男,史小丽,谢薇薇,龚伊,孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林,秦昌海,李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷,陈能汪,陈朱虹,王龙剑,吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛,申宇,杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁,李睿华,李杰,胡俊松,孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新,李文华,吴明,杨文英,蒋科毅,叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理,杨浩,渠晓霞,朱元荣,鄢元波,张明礼,吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿,陈清武,王鑫璇,柴之芳,沈金灿,杨波,刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲,刘锐,兰亚琼,余素林,文晓刚,陈吕军,张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽,石宝友,孙慧芳,张枝焕,顾军农,王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊,盛田田,薛晓芹,谭丽莎,徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新,杨忠莲,高宝玉,王燕,岳钦艳,李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏,常雪红,车越,谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊,丁耀彬,朱丽华,唐和清,廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远,李伟光,刘兴哲,王恺尧,王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君,马志远,郭延凯,席振华,杜海峰,刘晓宇,郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾,李彭,左剑恶,袁琳,李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽,高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟,刘杰伟,曹芮,岳东北,王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭,熊蕾,王云燕,郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊,康荣华,赵斌,黄永梅,叶芝祥,段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利,曾昭霞,陈喆,铁柏清,陈永稳,叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航,王雯雯,姜霞,宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋,高宏超,马俊花,李迎霞,莫雁,孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧,张英,余晔,王博,夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩,潘利祥,张翔宇,李萌,宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东,邱波,彭尽晖,彭亮,胡凌霄,胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔,李晋川,岳建英,周小梅,郭春燕,卢宁,王宇宏,杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶,田云,尹华,彭辉,黄捷,麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞,朱润晔,欧阳杜娟,庄庆丰,陈东之,陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲,吴等等,宋志文,任杰,夏岩,董珊珊,刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳,王海滨,解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京,李国学,张红玉,罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林,钟茂生,朱笑盈,姚珏君,夏天翔,刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕,刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩,秦明周,闫江虹,胡长慧,赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊,贾永刚,潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保,陈卫平,焦文涛,黄锦楼,魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇,雷梅,杨军,周广东,郭广慧,陈同斌,万小铭,梁琪,乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希,孙体昌,黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣,李娟,许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭,郭庆军,杨俊兴,张晗芝,魏荣菲,王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝,黄锦楼,苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰,黄锦楼,刘志强,岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯,黄锦楼,彭会清,李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟,梁学峰,林大松,徐应明,王林,孙约兵,秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华,祝玺,刘黄诚,王琳玲,陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较

王翔¹, 李晋川^{1*}, 岳建英¹, 周小梅², 郭春燕¹, 卢宁¹, 王宇宏¹, 杨生权¹

(1. 山西省生物研究所, 太原 030006; 2. 山西大学生命科学学院, 太原 030006)

摘要: 人工重建植被是露天矿复垦地植被恢复, 提高土壤质量的主要途径之一。选择适宜的人工植被对快速恢复土壤质量具有重要意义。本文主要研究了安太堡露天矿复垦地油松-刺槐-柠条混交林、沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林和苜蓿地的土壤养分含量及酶活性, 综合评价了这 3 种不同植被类型对土壤肥力恢复效果。结果表明, 随着植被恢复的进行, 土壤养分含量均有增加, 油松-刺槐-柠条混交林的土壤养分含量显著高于其它样地。从以养分含量和酶活性权重计算的土壤综合肥力指标值 (IFI) 可知, 油松-刺槐-柠条混交林 IFI 值最高。综合来看, 对土壤重建效果最好的为油松-刺槐-柠条混交林, 其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林, 再次为苜蓿。

关键词: 人工植被; 土壤酶; 土壤酶指数; 土壤肥力; 安太堡露天矿

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3601-06

Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types

WANG Xiang¹, LI Jin-chuan¹, YUE Jian-ying¹, ZHOU Xiao-mei², GUO Chun-yan¹, LU Ning¹, WANG Yu-hong¹, YANG Sheng-quan¹

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

Abstract: Re-vegetation is mainly applied into regeneration in opencast mine to improve the soil quality. It is very important to choose feasible vegetation types for soil restoration. In this study, three typical forest restoration types were studied at Antaibao mine, namely, *Medicago sativa*, mixed forests *Pinus taebelaefolius-Robinia pseudoacacia-Caragana korshinskii* and *Elaeagnus angustifolia-Robinia pseudoacacia-Caragana korshinskii-Hipophae rhamnoides*, to determine the nutrient contents and enzyme activities in different soil layers. The results showed that re-vegetation markedly increased soil nutrient contents and the enzyme activities during the restoration process. The nutrient content of soil in the *P. taebelaefolius-R. pseudoacacia-C. korshinskii* mixed forest field was significantly higher than those in other plots. It was found that the soil of the *P. taebelaefolius-R. pseudoacacia-C. korshinskii* mixed forest had the highest integrated fertility index values. In conclusion, the restoration effects of the *P. taebelaefolius-R. pseudoacacia-C. Korshinskii* mixed forest was better than that of *E. angustifolia-R. pseudoacacia-C. korshinskii-H. rhamnoides*, while *M. sativa* grassland had the least effect.

Key words: man-made vegetation; soil enzyme; soil enzyme index; soil fertility; Antaibao mine

在黄土高原生态脆弱区, 植被恢复与重建对生态系统中的生物多样性和土壤质量有着显著影响, 这种影响主要体现在对土壤的生物特性和肥力水平上^[1]。土壤酶是土壤的生物学指标之一, 具有敏感揭示土壤肥力变化的特性, 对于土壤生态系统的维持和生产力恢复具有重要意义。目前, 很多学者使用土壤酶活性变化来指示植被恢复过程中土壤质量状况, 并且证实土壤酶可以用来表征煤矿区土壤复垦质量^[2,3]。有学者经研究表明, 不同植被的土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性不同, 而且变异性较大^[4,5]。对于黄土高原植被恢复过程中土壤质量变化已有不少学者进行研究^[6,7], 但关于黄土高原露天煤矿植被复垦区土壤酶活性变化及相关肥力评价的研究较少。本研究在山西安太堡露天矿复垦区

选取 4 种复垦模式, 对土壤的酶活性和部分理化性质进行了测定, 以期从土壤酶学角度研究植被恢复对土壤质量的影响, 从而为黄土高原露天煤矿生态脆弱区植被恢复与生态重建提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

平朔矿区地处黄土高原晋陕蒙接壤的黑三角地带, 山西省北部朔州市境内, 地理坐标: 东经 112°11'

收稿日期: 2012-12-06; 修订日期: 2013-01-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC10B04); 山西省科技重大专项(20121101007)

作者简介: 王翔(1985~), 男, 硕士, 主要研究方向为复垦土地土壤生态系统和分子生态学。

* 通讯联系人, E-mail: sxsxswslj@163.com

~113°30', 北纬 39°23' ~ 39°37', 如图 1 所示. 平朔矿区属于典型的温带半干旱大陆型季风气候区, 冬春干旱少雨, 夏秋降水集中. 矿区年平均气温 4.8 ~ 7.8℃, 日温差为 18 ~ 25℃. 无霜期约 115 ~ 130 d. 平朔矿区地带性土壤为栗钙土与栗褐土的过渡带, 矿区地带性植被类型属于草原, 目前总体上呈农业耕作景观^[8].

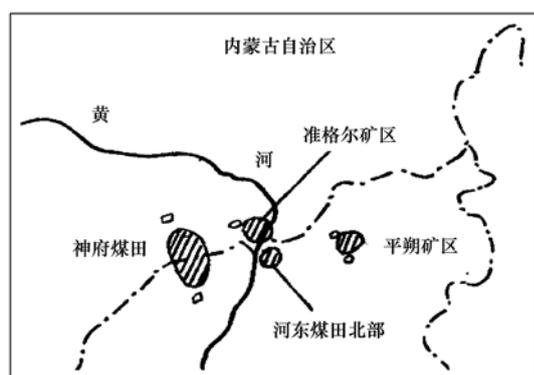


图 1 平朔矿区地理位置示意

Fig. 1 Illustration of geographical location of Pingshuo mining area

1.2 采样方法

供试土壤采自朔州市平鲁区安太堡露天矿复垦地, 采样地分别为未复垦地(自然生长灰黎、虫实等, HL)、苜蓿地(种植 1 年苜蓿, MX)、油松等混交林(油松、刺槐、柠条混交林, 于 1992 年种植, YCN)和柠条等灌木混交林(沙棘、刺槐、柠条、沙枣混交林, 于 2002 年种植, SCNS). 在距植被 50 cm 的地方用土钻取样, 取样深度分别为 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm. 各样地内取 5 个重复, 观察测定各样地土壤理化性质、酶活性变化. 采样时间为 2010 年 10 月, 多点采集混匀带回实验室经处理后进行各项指标测定.

1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质的测定

土壤酸碱度的测定采用电位法. 土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法、全氮采用凯氏法^[9,10].

1.3.2 土壤酶活性的测定

蔗糖酶的测定采用硫代硫酸钠滴定法, 脲酶的测定采用苯酚钠比色法, 过氧化氢酶的测定采用高锰酸钾滴定法, 多酚氧化酶的测定采用邻苯三酚比色法^[11].

1.4 土壤酶指数

土壤酶种类繁多, 每一种酶在土壤中起着不同的作用, 单一的酶类在反映土壤酶的变化存在很大的片面性. 为了全面了解不同林龄人工灌木林土壤

酶活性的变化规律, 在各种酶的基础上, 进一步采用加权和法计算土壤酶指数 (soil enzymes index, I_{SE})^[12].

1.5 土壤生物学肥力的评价

应用多元统计分析方法, 以各主成分特征值贡献率为权重, 加权计算各样地土壤生物学肥力指标值, 以评价各样地土壤的生态肥力特征^[13-15]. 将 pH、有机碳、全氮、C/N、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶数据进行标准化处理后, 经过主成分分析, 得到变量, 计算得分系数, 进而依据 IFI 公式得出不同样地的 IFI 值.

1.6 数据处理

采用 Excel 2003 与 SPSS 19.0 进行数据分析.

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

土壤 pH 值是土壤重要的化学性质, 由表 1 可见, 与未复垦地相比, 植被恢复情况使得土壤 pH 值下降, 但变化不显著, 可以看到, 随着土层加深, pH 值增加.

不同植被恢复模式对土壤有机碳和全氮含量影响不同. 由表 1 可见, 植被恢复提高了土壤有机碳含量. 在 0 ~ 10 cm 土层, 油松-刺槐-柠条混交林有机碳含量最高, 并显著高于其他恢复模式和未复垦地, 其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林和苜蓿地, 但二者与未复垦地差异不显著; 10 ~ 20 cm 土层土壤有机碳含量表现出相同变化趋势. 氮素含量是影响土壤肥力的重要指标, 不同植被恢复模式土壤全氮含量显著不同, 0 ~ 10 cm 土层油松-刺槐-柠条混交林全氮最高, 且显著高于未复垦地, 其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林, 10 ~ 20 cm 土层也表现出相似规律. 此外, 油松-刺槐-柠条混交林的 C/N 值最高, 且显著高于未复垦地, 其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林和苜蓿地, 10 ~ 20 cm 土层的变化规律与 0 ~ 10 cm 土层一致.

2.2 土壤蔗糖酶

复垦地蔗糖酶活性变化趋势见图 2. 可以看出, 各植被恢复模式的蔗糖酶活性不同, 但较未复垦地均有提高. 在 0 ~ 10 cm 油松-刺槐-柠条混交林最高, 可达 $53.66 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g} \cdot \text{h})^{-1}$, 较未复垦地提高了 31%. 而沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林次之, 较未复垦地提高了 26%, 苜蓿地提高了 15.8%, 其中, 除苜蓿地外其余恢复模式与未复垦地差别显著, 10 ~ 20 cm 表现出相似趋势.

表 1 不同植被恢复下土壤养分含量

Table 1 Nutrient contents in soil regenerated with different vegetation types

样地	土层/cm	pH	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	C/N
HL	0~10	7.43 ± 0.21 a	6.93 ± 0.99 a	3.63 ± 0.46 a	1.97 ± 0.19 a
	10~20	8.45 ± 0.16 a	6.00 ± 0.36 a	2.90 ± 0.31 a	1.03 ± 0.19 a
MX	0~10	7.51 ± 0.11 a	9.02 ± 2.19 a	4.27 ± 0.47 a	2.05 ± 0.30 a
	10~20	8.11 ± 0.13 a	6.77 ± 2.93 a	3.70 ± 0.17 b	1.62 ± 0.04 a
YCN	0~10	7.64 ± 0.29 a	26.83 ± 0.87 b	7.71 ± 0.19 c	3.43 ± 0.10 c
	10~20	7.90 ± 0.28 a	14.92 ± 0.90 b	4.77 ± 0.14 c	2.96 ± 0.15 c
SCNS	0~10	7.47 ± 0.04 a	11.11 ± 0.53 a	6.18 ± 0.31 b	2.18 ± 0.72 b
	10~20	7.65 ± 0.06 a	8.00 ± 0.78 a	3.69 ± 0.08 b	1.90 ± 0.10 b

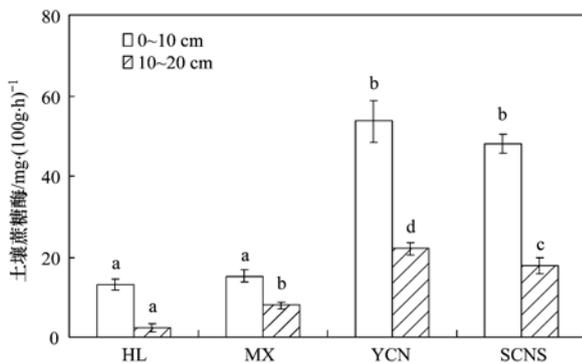


图 2 不同植被恢复下土壤蔗糖酶活性

Fig. 2 Invertase activities in soil regenerated with different vegetation types

2.3 土壤脲酶

由图 3 可见,4 种样地间脲酶活性差异显著,在 0~10 cm 土层中油松-刺槐-柠条混交林最高,达约 $56.20 \text{ mg}\cdot(100 \text{ g}\cdot\text{h})^{-1}$,较未复垦地提高了 100%,显著高于其他样地;其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林,约为 $41.00 \text{ mg}\cdot(100 \text{ g}\cdot\text{h})^{-1}$,较未复垦地提高了 45.9%,并差异显著;苜蓿地与未复垦地差异不显著. 10~20 cm 土层表现出相似变化趋势.

2.4 土壤过氧化氢酶

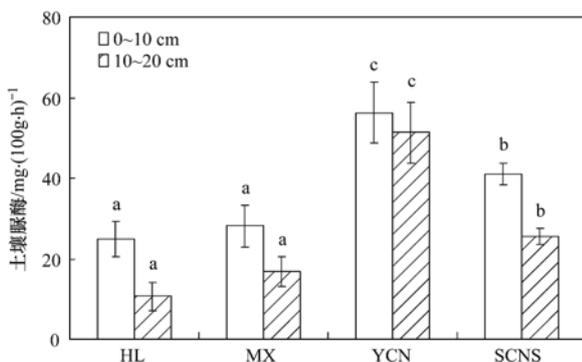


图 3 不同植被恢复下土壤脲酶活性

Fig. 3 Urease activities in soil regenerated with different vegetation types

不同植被恢复模式下过氧化氢酶活性不同,如图 4 所示,在 0~10 cm 土层中,油松-刺槐-柠条混交林 H_2O_2 酶活性最高,达到了 $19.67 \text{ mg}\cdot(100 \text{ g}\cdot\text{h})^{-1}$,较未复垦地提高了 61%,并显著高于其他样地;沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林次之,为约 $14.75 \text{ mg}\cdot(100 \text{ g}\cdot\text{h})^{-1}$,较未复垦地提高 21%,并差异显著;苜蓿地也显著高于未复垦地. 10~20 cm 土层也表现出相似变化趋势.

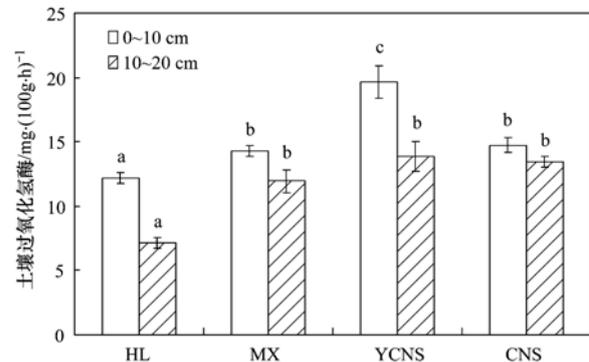


图 4 不同植被恢复下土壤过氧化氢酶活性

Fig. 4 Catalase activities in soil regenerated with different vegetation types

2.5 土壤多酚氧化酶

从图 5 可见,在 4 种样地中,0~10 cm 土层多酚氧化酶活性差异显著,以油松-刺槐-柠条混交林较高,为 $7.84 \text{ mg}\cdot(100 \text{ g}\cdot\text{h})^{-1}$,较未复垦地提高 117%,其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林,为 $5.42 \text{ mg}\cdot(100 \text{ g}\cdot\text{h})^{-1}$,较未复垦地提高约 50%,再次是苜蓿地. 10~20 cm 土层也具有相似变化趋势.

2.6 土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

表 2 是土壤酶活性间的相关性,可见蔗糖酶活性与过氧化氢酶、多酚氧化酶活性极显著正相关;脲酶活性与过氧化氢酶活性极显著正相关;过氧化氢酶活性与多酚氧化酶活性极显著正相关. 表 3 是土壤酶活性与土壤理化性质间的相关性,可见蔗糖酶活性

与土壤 pH 极显著负相关,与土壤有机碳、全氮、C/N 极显著正相关;脲酶活性与土壤 pH 极显著负相关;

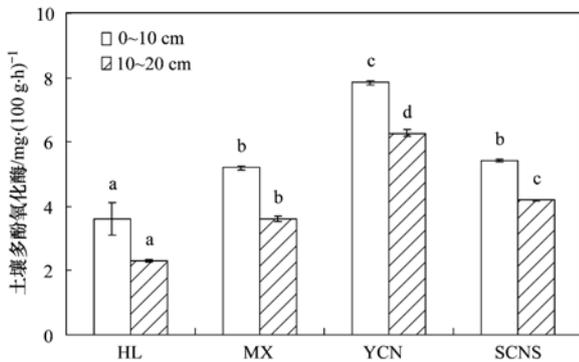


图 5 不同植被恢复下土壤多酚氧化酶活性

Fig. 5 Polyphenol oxidase activities in soil regenerated with different vegetation types

过氧化氢酶活性与土壤 pH 极显著负相关.

由相关性分析可知(表 2),4 种土壤酶相互影响,均表现出正向促进作用,即一种酶活性的提高会促进与之显著或极显著相关土壤酶活性的强度.此外,土壤理化性质和酶活性也存在一定程度的关联(表 3),特别是土壤蔗糖酶与土壤酸碱度、碳氮含量均为极显著相关,说明土壤酶活性对土壤养分含量和土壤肥力促进作用显著.

表 2 土壤酶活性间的相关性¹⁾

Table 2 Correlation coefficients of soil enzyme activities

	蔗糖酶	脲酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶
蔗糖酶	1			
脲酶	0.084	1		
过氧化氢酶	0.454**	0.305**	1	
多酚氧化酶	0.254**	0.131	0.262**	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

表 3 土壤酶活性与土壤理化性质的相关性¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil physicochemical properties

	蔗糖酶	脲酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶
pH	-0.294**	-0.399**	-0.286**	-0.155
有机碳(SOC)	0.528**	0.128	0.086	0.004
全氮(TN)	0.562**	0.141	0.084	-0.007
碳氮比(C/N)	0.457**	0.068	0.090	0.003

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.7 土壤酶指数

为了克服不同种类酶活性在土壤质量改变中的片面性,使用土壤酶指数(I_{SE})作为酶因子的综合作用表征,使得酶活性的变化能够客观、全面地表达.研究表明, I_{SE} 在各样地间不同,其中 0~10 cm 油松-刺槐-柠条混交林最高,达到 0.92,其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林和苜蓿地(图 6). 10~20 cm 土层变化趋势相同.

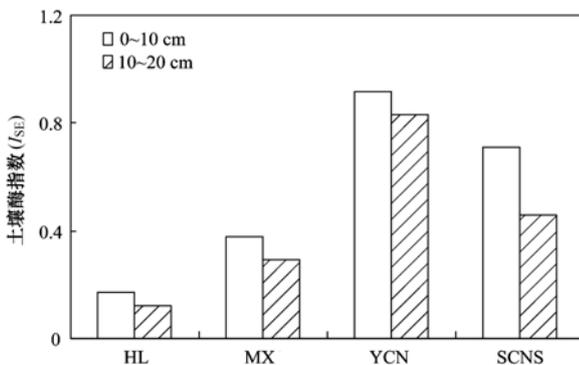


图 6 不同植被恢复下土壤酶活性指数(I_{SE})

Fig. 6 Soil enzymes index(I_{SE}) of soil regenerated with different vegetation types

2.8 土壤肥力综合指标值

土壤养分含量和土壤酶活性是反映土壤养分供应能力的重要指标,但土壤总体肥力水平取决于各项肥力指标的平衡,以土壤理化性质和酶活性指标计算 IFI,结果显示(图 7),油松-刺槐-柠条混交林的 IFI 值最高,其次是沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林,3 种植被恢复模式 IFI 值均优于未复垦地,10~20 cm 土层的 IFI 值变化规律与 0~10 cm 一致.

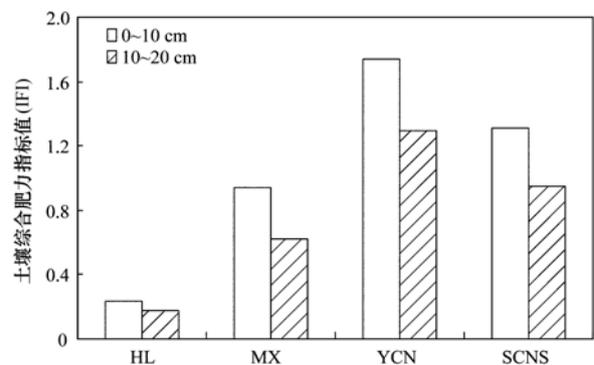


图 7 不同植被恢复下土壤肥力综合指标值 (IFI)

Fig. 7 Integrated fertility index (IFI) of soil regenerated with different vegetation types

3 讨论

露天矿排土场生态系统的恢复是一个比较大的生态环境问题,人工重建植被是尽快恢复复垦地生态功能、防止生态环境进一步恶化的重要途径^[16~18]。随着植被恢复进行,植被产生的凋落物和根系腐解物在土壤中不断积累和矿化,将有机物和无机营养元素释放于土壤,从而改善土壤的理化性质和生物学性状^[19]。但是植被模式组成的不同,形成的凋落物数量、种类和分解速率也就不同,故对于土壤质量的改善效果不同^[20]。了解不同植被类型在安太堡露天矿复垦地土壤质量恢复方面的作用,可以为选择适合的人工植被模式提供参考依据。

本研究结果显示,3种植被恢复模式土壤养分含量和酶活性强度较未复垦地均有增加。从土壤剖面结构来看,上层土壤高于下层土壤。可以看出,复垦地土壤养分的淋溶、下渗是人工植被土壤养分获取的来源之一^[21]。因此在评价不同类型植被恢复效果时,下层土壤质量也应是评价指标之一。

土壤养分含量的增加改善了土壤微生物的生存环境,进而改善了土壤酶活性状况。土壤酶活性揭示了土壤促进自身养分转化的能力,是土壤肥力质量的重要指标之一^[22]。从土壤酶指数可知,人工植被恢复增加了土壤营养物质来源,促进了土壤微生物的生命代谢活动,提高了土壤酶活性^[23]。不同植被恢复模式 I_{SE} 值增加不同,可见土壤酶指数可以表征各种土壤酶活性强弱的综合作用,较全面反映了土壤酶的变化^[12]。

以土壤养分含量和土壤酶权重计算的土壤肥力综合指标值 (IFI) 来反映土壤肥力质量。本研究结果表明,3种植被恢复模式 IFI 值均优于未复垦地,且上层土壤优于下层土壤。说明人工植被恢复促进了矿区土壤质量恢复与重建^[24,25],且油松-刺槐-柠条混交林模式较好。其原因一方面可能是该植被模式凋落量丰富并易分解,另一方面,可能是该林地种植年限较长,积存优于其它样地,C/N 值较高,有更多有机质和氮素等养分通过物质循环回归土壤^[26,27];另外在凋落物降解过程中产生的酸类物质可能优于其它植被模式,从而促进土壤中难溶性物质向有效性方向的转化^[28]。

可以看到,一年生苜蓿地与未复垦地相比较各项指标均得到提高,说明进行植被恢复后土壤理化性质和酶活性得到了改善。魏雅丽等^[29]研究表明植被恢复可以促进土壤酶活性改善,提高土壤肥力。

营造人工林后,随着恢复年限的增加,土壤质量得到改善(图6)。可见油松-刺槐-柠条混交林(种植20a)的土壤理化性质及酶活性优于沙棘-刺槐-柠条-沙枣混交林(种植10a)。何斌等^[30]和周炜等^[31]研究发现随着林龄的增加,土壤酶活性也趋于增强。但也有学者研究表明土壤酶活性随着林龄的增加而降低。这可能与不同地区土壤条件有关,本研究所处实验区气候干燥、水分缺乏,土壤矿质元素转化较慢。随着植被恢复的进行,土壤生物学条件得以改善,从而使得土壤酶活性也显著增强。此外,影响土壤酶活性的因素较多,土壤质地、水热条件、植被组成以及土壤物质代谢途径多样化等均对于土壤酶活性差异造成了影响,并且不同的研究由于实验设计不同也会造成结果差异^[12]。

4 结论

(1)人工植被恢复显著改善了土壤质量。不同的植被恢复模式对土壤酶活性和土壤肥力的影响不同,其中乔木混交林的恢复效果较好。

(2)植被种植时间是影响复垦效果的重要因子,植被恢复时间越长,土壤质量改善效果越明显。

参考文献:

- [1] 邱莉萍,张兴昌,程积民.坡向坡位和撂荒地云雾山草地土壤酶活性的影响[J].草业学报,2007,16(1):87-93.
- [2] Caravaca F, Alguacil M M, Figueroa D, et al. Re-establishment of *Retama sphaerocarpa* as a target species for reclamation of soil physical and biological properties in a semi-arid Mediterranean land[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 182(1): 49-58.
- [3] Izquierdo I, Caravaca F, Alguacil M M, et al. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions [J]. Applied Soil Ecology, 2005, 30(1): 3-10.
- [4] 安韶山,黄懿梅,刘梦云,等.宁南宽谷丘陵区植被恢复中土壤酶活性的响应及其评价[J].水土保持研究,2005,12(3):31-34.
- [5] 胡斌,段昌群,王震洪,等.植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响[J].土壤学报,2002,39(4):604-608.
- [6] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J].应用生态学报,2004,15(12):2292-2296.
- [7] 温仲明,焦峰,刘宝元,等.黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J].应用生态学报,2005,16(11):2025-2029.
- [8] 李晋川,白中科.露天煤矿土地复垦与生态重建[M].北京:科学出版社,2000.8-12.
- [9] Kelly J J, Tate R L. Effects of heavy metal contamination and

- remediation on soil microbial communities in the vicinity of azincsmelter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**(3): 609-617.
- [10] 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. 12-152.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274-339.
- [12] 魏振荣, 刘国斌, 薛莲, 等. 黄土丘陵区人工灌木林土壤酶特征[J]. *中国水土保持科学*, 2010, **8**(6): 86-92.
- [13] 魏媛, 喻理飞, 张金池, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生态肥力质量评价——以贵州花江喀斯特峡谷地区为例[J]. *中国岩溶*, 2009, **28**(1): 61-67.
- [14] 张庆费, 宋永昌, 由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. *生态学报*, 1999, **19**(2): 174-178.
- [15] 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究[J]. *土壤*, 2004, **36**(1): 104-106.
- [16] Campbell B M, Frost P, King J A, *et al.* The influence of trees on soil fertility on two contrasting semi-arid soil types at Matopos, Zimbabwe[J]. *Agroforestry Systems*, 1994, **28**(2): 159-172.
- [17] Lamb D. Large-scale ecological restoration of degraded tropical forest lands: The potential role of timber plantations [J]. *Restoration Ecology*, 1998, **6**(3): 271-279.
- [18] 安韶山, 黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究[J]. *林业科学*, 2006, **42**(1): 70-74.
- [19] Rutigliano F A, D'Ascoli R, De Santo A V. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(11): 1719-1729.
- [20] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(1): 66-74.
- [21] 王海英, 宫渊波, 陈林武. 不同植被恢复模式下土壤微生物及酶活性的比较——以嘉陵江上游地区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(2): 201-206.
- [22] 戴全厚, 刘国彬, 姜俊, 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.
- [23] 安韶山, 黄懿梅, 郑粉莉. 黄土丘陵区草地土壤脲酶活性特征及其与土壤性质的关系[J]. *草地学报*, 2005, **13**(3): 233-237.
- [24] 张笑培, 杨改河, 任广鑫, 等. 黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, **28**(6): 64-68.
- [25] 邹军, 喻理飞, 李媛媛. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤酶活性特征研究[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(4): 894-898.
- [26] 兰雪, 戴全厚, 喻理飞, 等. 喀斯特退化森林不同恢复阶段土壤酶活性研究[J]. *农业现代化研究*, 2009, **30**(5): 620-624.
- [27] 李媛媛, 周运超, 邹军, 等. 黔中石灰岩地区不同植被类型根际土壤酶研究[J]. *安徽农业科学*, 2007, **35**(30): 9607-9609.
- [28] 邓欢, 张斌, 王会利, 等. 侵蚀红壤区不同人工植被恢复下的土壤肥力比较[J]. *中国农业科技导报*, 2007, **9**(3): 79-85.
- [29] 魏雅丽, 郭芬芬, 陈安强, 等. 元谋干热河谷植被恢复对土壤酶活性的影响特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(1): 100-106.
- [30] 何斌, 贾黎明, 金大刚, 等. 广西南宁马占相思人工林土壤肥力变化的研究[J]. *林业科学*, 2007, **43**(5): 10-16.
- [31] 周炜, 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.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-ning, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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