

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 11 期 2014 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)
基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)
西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)
青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)
黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)
三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)
三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)
流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)
江西省自然保护区发展布局空缺分析 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)
鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 黄和平,彭小琳,孔凡斌,等 (3107)
基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2014-06



封面图说: 三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201311062684

高雅, 陆兆华, 魏振宽, 付晓, 吴钢. 露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例. 生态学报, 2014, 34(11): 2844-2854.

Gao Y, Lu Z H, Wei Z K, Fu X, Wu G. Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2844-2854.

露天煤矿区生态风险受体分析 ——以内蒙古平庄西露天煤矿为例

高雅^{1,4}, 陆兆华², 魏振宽³, 付晓^{1,*}, 吴钢¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国矿业大学化学与环境工程学院, 北京 100083; 3. 国家安全生产监督管理总局研究中心, 北京 100713;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 煤矿露天开采行为导致矿区岩体剥离、植被破坏和土壤物理化学性质的巨大改变, 对采矿区土壤生态系统造成剧烈扰动, 使其成为水土流失、滑坡等矿区潜在生态风险的主要受体。以内蒙古平庄西露天煤矿区土壤生态系统为研究对象, 通过分析矿区主要景观单元的土壤理化性质、植被演替规律与土壤线虫群落结构特征, 研究其生态脆弱性分布与变化规律。结果表明矿区土壤系统的成熟度与稳定性与其形成年限具有相关性, 但与农田生态系统和未受扰动的自然生态系统相比, 煤矿开采区与排弃物堆放区的土壤结构较差、土壤肥力偏低、动、植物群落成熟度和稳定性较差。受土壤养分条件及土壤微生物数量等因素的限制, 其植被自然恢复速度慢, 生态系统脆弱, 需通过土壤改良、合理选种适生植物、改善土壤养分条件, 促进植被重建。

关键词: 生态风险; 土壤线虫; 露天煤矿区; 生态恢复

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia

GAO Ya^{1,4}, LU Zhaohua², WEI Zhenkuan³, FU Xiao^{1,*}, WU Gang¹

1 State Key Lab of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

3 National Research Center of State Administration of Work Safety, Beijing 100713, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Open-pit coal mining causes rock mass peeling, vegetation damage and of phy-chemical properties change of soil. Severe disturbance makes soil system in mining area the main receptor of soil erosion, landslide and other potential ecological risks. In this study, soil ecosystem of Pingzhuang western open-pit coal mining area in Inner Mongolia was the research object. To find the distribution and changes of ecological fragility, the main phy-chemical properties of soil, the vegetation succession and the characteristics of soil nematode community structure in mining area were analyzed on landscape units. The results indicate the relevance between maturity and stability of soil systems and their lives. Compared with the agro-ecosystem and natural ecosystem undisturbed, however, mining areas and dumping sites have poor soil structure, low soil fertility and less maturity and stability of animal and plant communities. Due to the restriction factors such as soil nutrient condition and microbial quantity, natural recovery of vegetation in mining area is slow and the ecosystem is fragile. Soil reformation, plants selection and nutrient conditions improvement should be suitable to reconstruct vegetation.

Key Words: ecological risk; soil nematode; open cast coal mine area; ecological restoration

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAC10B01)

收稿日期: 2013-11-06; 网络出版日期: 2014-02-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaofu@cees.ac.cn

自 19 世纪 80 年代以来,生态风险评价研究经历了从环境风险到区域生态风险评价的发展历史^[1],风险受体作为反应生态系统结构和功能的各种物理、化学、生物因素的影响的重要指标也由单一受体发展到多受体,评价范围由局地扩展到景观水平^[2]。

露天煤矿对生态环境的严重影响已引起人们的高度关注,在研究区煤炭露天开采的行为中,由于岩体剥离、植被破坏、矸石堆放等原因造成开采区域内土壤物理化学性质、植被类型以及土壤动物群落结构的显著变化,由此产生的水土流失、滑坡、重金属污染等形成区域环境的潜在生态风险^[3]。在生态风险评价中,人们往往采用 1 个或少数几个物种作为受体进行评价和研究,但风险受体通常是整个生态系统。准确界定风险受体的边界,深入认识和研究受体的各种属性,包括受体对风险源的响应属性、受体的自然演替属性等,对生态风险受体空间尺度的扩展具有重要意义。

本研究在内蒙古平庄西露天煤矿区开展研究工作,将露天煤矿采场、排矸场、排土场以及周围的村庄和农田作为研究区域,以煤矿开采行为破坏最严重的土壤系统作为矿区生态风险受体分析的研究对象。该露天矿区土壤属于富钾土壤,土壤相对较高的钾含量掩盖其它营养元素的相对缺乏,因此本研究选取土壤总氮、总磷、速效氮、速效磷、自然含水量及容重为综合评价土壤肥力的受体因子。露天煤矿区因采掘活动,导致土壤动物种类、数量急剧减少,严重缺乏大、中型土壤动物,因此本研究以土壤线虫为土壤动物的受体因子,对矿区土壤的理化性质、植物群落演替以及土壤动物群落的分布与变化情况展开研究,以揭示矿区潜在生态损失,矿区生态恢复提供科学依据和指导建议。

1 研究区域概况

平庄西露天煤矿位于内蒙古自治区东部赤峰市元宝山区,赤峰中心城区东南 50km,平庄城区西南 4km 处,坐落在哈尔脑山下,平庄镇境内,1958 年 8 月开工建设,是我国自行设计的第一座露天矿,最终开采至 2013 年,露天开采生产能力为商品煤 150 万 t/a。

开采范围,走向长 3.8km,采场宽度 0.7—1.2km,

露煤长度 2.8km,最大降深+311.4m。现有剥离台阶 5 个,采煤台阶 5 个,平均台阶高度 18.10m,三家子和太平地 2 个排土场和一个土杂煤处理场。两个排土场占地 13.72km²,其中太平地排土场容量最大,服务始终,2 条排土线,各条排土线均采用电铲排弃方式。由于开采时间较早,排土场主要采用自然恢复的方式,未采取严格的复垦措施,各采样场不同层次的土壤物质相同。

2 研究方法

2.1 实地调查

本研究的调查采样时间为 2011 年 7 月,按照景观生态学的均一性原则,将露天煤矿区内的采场、排土场、排矸场、矿区内农田和居民区等作为不同的景观斑块,其中采场、排土场和排矸场形成平台、边坡相间分布的阶梯式地形。采场梯田由上至下的形成时间递减,排矸场和排土场梯田由上到下的形成时间递增,以不同年代的平台/边坡的土壤生态系统为研究对象,测定和分析排矸场、排土场、采场内的风险分布状况与潜在生态损失。

2.2 采样方法

采场北边从底层向顶层选取不同年限 7 个梯田层,南边排土场由底层到顶层选取不同年限的 5 个梯田层;排矸场由顶到底选取不同年限的 3 个梯田层。用编号 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7 分别代表采场北边从底层向顶层年限为 7、10、15、20、25、30、40a 梯田层;B1、B2、B3、B4、B5 代表排土场由底层到顶层 40、20、10、8、4a 限的梯田层;C1、C2、C3 是排矸场由顶到底 5、12、18a 限的梯田层;D、E、F 分别选取了受人为扰动逐渐递减的矿区农田、村庄周围和远郊山坡土壤,其中远郊山坡土壤采用距离研究区域 100km 以外自然景观未受干扰的山坡土壤作为未受扰动的自然生态系统土壤。

在样地采集 5 个复合土样,抽样的地点在梯田层有代表性植被地段随意挑选,每个土样包括 10 个子样,子样在主取样地点直径 25m 以内随机选择^[4],分两层采集土壤(0—5cm,5—10cm),在村庄周围和远郊山坡随机布点,在农田采用 S 形布点,分层采集 5 个复合土壤样本,分别装入布袋中,室内风干进行理化分析。

其中,土壤含水量采用烘干法,土壤容重采用环

刀法(一般土层)、挖坑填沙法(土石混合层和砾石层)测定。pH 值、有机质、全氮、速效氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾与全钠分别采用电位法(GB7859—87)、重铬酸钾氧化-外加热法、半微量开氏法、氯化钾浸提-流动分析仪法、酸溶-钼锑抗比色法、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法、氢氟酸-高氯酸-硝酸消煮-原子吸收分光光度法和乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[5]。

在每个选定样地全场探查,选定有代表性植被类型的地段采样调查,随机调查 25 个 1m×1m 样方,记录每个样方内植物种类、多度、高度、盖度。其中植被盖度测定中不分种,采用盖度框法进行测定。一般采用采样针刺法,如样方框为一个平方米,借助于钢卷尺和样方框绳上每隔 2.5cm 的标记,用粗约 2mm 的细针(针越细结果越准确),按顺序在样方内上下左右间隔 62.5px 的点(共 100 个点)上,从植被的上方垂直下插,如果针与植物接触,即算作 1 次“有”、如没有接触则算“无”不划记。最后计算划记的数次,用百分数表示即为盖度。

类比土壤采集的方法采集分析土壤生物样的土样,装入密封的塑料袋,带回实验室进行鉴别。

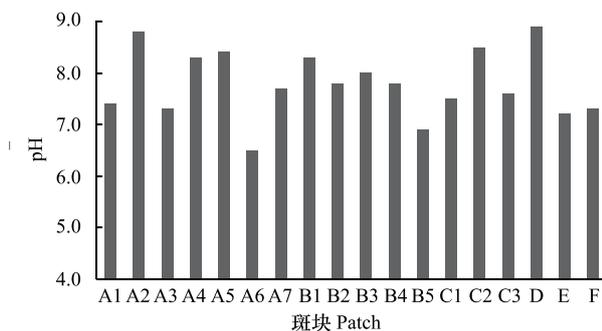
2.3 数据分析

各年龄段梯田层的土壤质量指标值按照各样地取平均值,土壤肥力综合评价从土壤物理、化学指标出发,将所选择指标标准化,并计算主成分的贡献率和累计贡献率,以各主成分的特征贡献率为权重,加权计算不同年限层次土壤的综合肥力值^[6]。

物种多样性指数采用 Shannon-Weiner 指数

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \times \ln p_i$$

式中, $p_i = n_i/N$, 是第 i 物种的个数占物种个体总数的百分比。



物种均匀度采用 Pielou 均匀性指数

$$E = H/H_{\max}$$

式中, H 是 Shannon-Weiner 指数, $H_{\max} = \log 2S$, S 是物种数目。

物种重要值 = (相对密度 + 相对出现频率 + 相对盖度 + 相对植株平均高度) / 4

线虫群落分析:

线虫属 Shannon-Wiener 多样性指数

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \times \ln p_i$$

式中, p_i 是第 i 个线虫属的个体数占线虫总个体数百分比^[7]。

Bongers 提出的成熟性指数 (MI), 是基于线虫生活史特征对线虫进行分类, 定义为一个样品中线虫的平均 cp 值^[8]。cp 值从 1 到 5, 线虫的世代时间延长, 繁殖率和产卵数量降低, 抗干扰和耐污染能力下降。cp-1 的线虫在食物丰富条件下可以急剧增长, 而杂食、捕食和植食性线虫多属于 cp-5 的类别。

$$MI = \sum_{i=1}^n v(i) \times f(i)$$

式中, $v(i)$ 是 i 分类的 c-p 值, $f(i)$ 是样本中 i 分类的数量比例。

低 MI 的线虫群落中开拓者占优势, 出现在高度变化生境中, 高 MI 的线虫群落有相对高比例的维持者, 出现在相对稳定生境中。

3 结果与分析

3.1 矿区土壤物理化学性质

3.1.1 矿区土壤容重、含水量与酸碱度

对不同采样斑块土壤 pH 值与土壤容重的分析结果如图 1 所示, 分析结果表明, 在平庄西露天矿

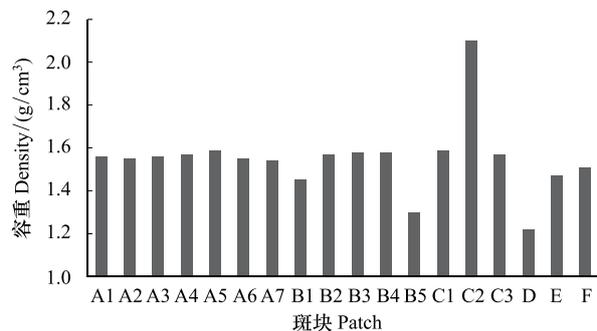


图 1 露天煤矿区不同斑块土壤 pH、容重

Fig.1 The pH, density of soil in different fragments in open cast coalmine

区,农田(C)和排土场顶层(B5)土壤容重都低于1.25。除顶层外,排土场平台土壤容重随年限的增加逐渐降低,年限最高的底层为 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$,排土场采用推土犁和推土机平整排土层面,在平台基地上往复运行作业过程中,大型履带推土机的碾压使得表土容重增高,导致土壤持水能力下降,地表径流增大,土壤侵蚀加重,具有高水土流失风险,影响排土场地基的稳固性,此外,过大的土壤容重,不利于作物的种植和植物根系发育。

采场和排矸场的容重偏高,都在1.7以上,采场采煤后露出的不同岩土层有砂质页岩、砂岩、泥质和炭质页岩、砾岩、冲积物和玄武岩,采场平台岩土容重与本身风化难易程度及采煤后露出表面的年限有关,岩土易风化、年限长的平台容重较低。

土壤酸碱性对微生物活性、矿物质和有机质转化有重要作用,同时决定和影响着土壤元素和养分存在状态、转化和有效性^[9]。土壤pH值在6.5左右时,各种营养元素的有效性都较高,当 $\text{pH}>7$ 时易形成磷酸钙沉淀,在 $\text{pH}6.5\text{—}8.5$ 的土壤中钙和镁的有效性高。平庄西露天煤矿区除了A6、B5层土壤pH值略低于7外,其它梯田层土壤pH值都在7以上。由此可以推测,因燃煤释放的二氧化硫通过气体扩散和降雨进入土壤使其酸化的影响较小,同时,土壤pH值与梯田层年限没有明显递变趋势。

3.1.2 土壤氮磷钾含量

平庄西露天煤矿区总氮、磷和速效氮、磷含量分别如表1所示。采场、排矸场和排土场全氮含量在 $0.3\text{—}0.6\text{g}/\text{kg}$,按全国土壤分级标准属于第六级($<0.5\text{g}/\text{kg}$)和第五级标准($0.5\text{—}0.75\text{g}/\text{kg}$),为缺氮和极缺氮土壤。其中采场全部为缺氮土壤,排矸场所有平台属于极缺氮土壤,农田含氮量中等。

采场土壤速效氮含量从低向高层呈递增趋势,含量与梯田年限呈正线性相关($R^2 = 0.9145$),年限最高梯田层受人类耕作影响作用大,含量最高,为 $22.01\text{mg}/\text{kg}$,采场土壤速效氮含量远低于背景和村庄周围土壤中含量;排土场土壤速效氮除B4为表层覆土外,速效氮含量随梯田年限增加而提高,可能是由于年限长的梯田层中植物种类多、植被盖度相对高,氮素主要来源于根瘤菌固定和植物的凋落物。排矸场5、12、18a层土壤速效氮含量分别为16.91、21.28、 $21.98\text{mg}/\text{kg}$,矸石风化前几年速效氮变化较

大,后期几乎没有改变。农田速效氮属全国土壤养分分级标准的第三级,肥力中上。

露天煤矿区土壤总磷含量变化不大,范围在 $0.5\text{—}0.6\text{g}/\text{kg}$,属于全国土壤磷元素分级的第四级。采场土壤速效磷含量为 $2.97\text{—}5.81\text{mg}/\text{kg}$,速效磷含量与梯田年限呈线性正相关($R^2 = 0.9145$);排矸场速效磷含量与梯田年限呈线性正相关($R^2 = 0.9995$);排土场平台土壤速效磷含量表现为不规则变化。农田速效磷含量 $13.32\text{mg}/\text{kg}$,属全国土壤养分分级标准的第三级,肥力中上。

钾主要来源于土壤母质。矿区土壤总钾含量为 $8\text{—}12\text{g}/\text{kg}$,平均值与农田、远郊土壤总钾含量相差不大。其中排矸场梯田层土壤总钾含量与梯田层年限成反比,可能与降雨淋溶作用有关。我国土壤速效钾含量范围在 $20\text{—}400\text{mg}/\text{kg}$,按照我国养分含量分级标准,露天矿区土壤属富钾土壤。

3.1.3 矿区土壤肥力综合评价

氮、磷、钾是植物生长发育的三要素^[10],由于平庄西露天矿区土壤属于富钾土壤,钾含量对矿区的生态恢复没有制约作用,另外速效钾变化范围大,为避免综合评价土壤肥力的过程中,土壤相对较高的钾含量掩盖其它营养元素的相对缺乏,因此综合评价未选取钾含量指标。土壤渗透量与土的孔隙比密切相关,同种土质的土壤是以在最佳含水量时的土壤最密实,孔隙比最小,渗透系数也最小。所以本研究采用自然含水量作为指标反映土壤空隙状况及性能,土壤容重反映土壤疏松程度、板结程度、植物扎根难易程度的指标来反应土壤结构性状况^[11]。

各项指标值采用公式 $X'_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$ 进行无量纲化,对于适度指标的选取,如容重等的处理,假设最适值为 a ,偏离 a 越大越不好,采用公式 $x' = \frac{1}{0.5 + |a - x|}$ 处理后再进行分析,容重的最适值取 $a = 1.2$ 。运用主成分分析法评价矿区土壤肥力,计算各层土壤肥力综合指数值。土壤肥力是土壤的基本属性和质量特征,它不仅反映了动植物群落与土壤协调作用的结果,同时也为后续植物群落的演替创造条件^[12]。

农田总氮磷、速效氮磷含量最高,容重为1,表明其营养元素、物理结构适合作物的生长,因此肥力指

数最高;其次是远郊山坡,肥力指数为 1.297。露天煤矿区采场各梯田层综合肥力指数由底层向顶层呈递增趋势,表明岩体剥离后露出的岩土随着年限增加而日趋变熟,土壤肥力逐渐增加;排土场除第四层为排弃表土复田用外,年轻的梯田平台表现出很低

的肥力;排矸场土壤肥力指数较低,由底层向顶层综合肥力指数递减,主要由矸石风化程度及风化物矿物质含量决定。与农田、远郊山坡比较,矿区干扰地肥力指数很低。

表 1 煤矿区土壤综合肥力指数值

Table 1 Soil integrated fertility index in coalmine

斑块 Patch	总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus	速效氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	含水量 Moisture content	容重 Density	土壤肥力 Soil fertility
A1	0.395	0.455	0.000	0.038	0.000	0.118	0.398
A2	0.426	0.473	0.015	0.000	0.318	0.242	0.561
A3	0.452	0.567	0.071	0.072	0.072	0.191	0.565
A4	0.505	0.553	0.092	0.105	0.301	0.171	0.693
A5	0.505	0.533	0.105	0.159	0.019	0.079	0.588
A6	0.354	0.592	0.149	0.289	0.077	0.159	0.674
A7	0.458	0.589	0.155	0.302	0.491	0.193	0.895
B1	0.446	0.619	0.180	0.078	0.756	0.280	0.924
B2	0.273	0.694	0.155	0.165	1.000	0.238	0.991
B3	0.129	0.653	0.049	0.039	0.445	0.109	0.550
B4	0.385	0.748	0.161	0.059	0.913	0.088	0.939
B5	0.000	0.721	0.039	0.038	0.104	0.895	0.585
C1	0.199	0.711	0.100	0.184	0.008	0.060	0.521
C2	0.284	0.877	0.147	0.228	0.007	0.001	0.653
C3	0.268	0.717	0.154	0.269	0.753	0.170	0.938
D	1.000	1.000	1.000	1.000	0.836	1.001	2.402
E	0.145	0.000	0.327	0.158	0.520	0.489	0.631
F	0.524	0.494	0.451	0.546	0.724	0.389	1.297

3.2 矿区植被组成及动态

3.2.1 植被组成

表 2 至表 5 分别表现了露天煤矿区采场、排土场、矸石山不同年限的梯田层及周围农田、村庄和背景的植被组成与演替规律。其中,露天煤矿区采场多年生植物 25 种,占总数的 29.76%;菊科

(*Asteraceae*)、豆科(*Fabaceae*)、禾本科(*Poaceae*),三科合计占总数的 52.38%。随着梯田年限的增加,入侵定居植物种总数从 26 种逐渐增加到 48 种,植物群落组成趋于复杂。与采场植物相比较,排土场植物群落中多年生植物种数比例较高。

表 2 采场不同年限梯田层中植被组成变化

Table 2 The change of plant composition in different aged terraces in open-pit

梯田层年限/a Terraced layers life	科 Familia	种 Species	1 年生植物 Therophyte	多年生植物 Perennial	主要科的物种数 Number of species		
					菊科 Asteraceae	禾本科 Poaceae	豆科 Fabaceae
7	12	26	19	7	5	4	6
10	14	27	21	6	8	5	5
15	10	26	19	7	8	6	4
20	10	30	19	11	9	6	6
25	10	32	20	12	5	5	6
30	14	38	26	12	12	7	5
40	17	48	35	13	10	7	6
合计 Total	23	84	59	25	21	10	13

表 3 排土场不同年限梯田层中植被组成的变化

Table 3 The change of plant composition in different aged terraces in waste dump

梯田层年限/a Terraced layers life	科 Familia	种 Species	1 年生植物 Therophyte	多年生植物 Perennial	主要科的物种数 Number of species		
					菊科 Asteraceae	禾本科 Poaceae	豆科 Fabaceae
4	13	17	13	4	2	3	0
8	8	19	13	6	4	4	2
10	10	31	20	11	8	7	4
20	19	40	25	15	8	5	7
40	17	48	27	21	12	8	8
合计	23	63	37	26	15	8	11

表 4 不同年限排矸场梯田层中植被组成的变化

Table 4 The change of plant composition in different aged terraces in gangue hill

梯田层年限/a Terraced layers life	科 Familia	种 Species	1 年生植物 Therophyte	多年生植物 Perennial	主要科的物种数 Number of species		
					菊科 Asteraceae	禾本科 Poaceae	藜科 Chenopodiaceae
5	12	27	21	6	8	5	3
12	13	25	16	9	7	4	3
18	11	27	19	8	7	6	3
合计 Total	18	40	27	13	10	7	3

表 5 农田、村庄周围、背景植被组成

Table 5 The plant composition in farmland, village and background

地点 Location	科 Familia	种 Species	1 年生植物 Therophyte	多年生植物 Perennial	主要科的物种数 Number of species		
					菊科 Asteraceae	禾本科 Poaceae	豆科 Fabaceae
农田 Farmland	16	34	24	10	6	5	3
村庄边 Village side	14	32	21	11	9	5	3
背景 Background	20	61	40	21	15	12	13

露天煤矿采场和排土场随着梯田平台年限的增加,植物物种数明显增加,植物群落组成趋于复杂。其中排土场低年限到高年限平台中多年生植物占总物种数的比例依次为 23.5%、31.6%、35.5%、37.5%、43.8%,一般地说,多年生植物比例高的群落相对 1、2 年生植物占主体的群落更稳定。

采场和排土场植物群落形成这种规律的可能原因是,采场和排土场表层的组成物质是采场地表下数十米和上百米深处的土状物质与岩石,不利于生物生长或生存,在这种恶劣条件下 1 年生植物占优势,随着时间推移,表层生土在生物及非生物作用下逐渐熟化,土壤理化性质得到改善,入侵植物种数相应增多,有利于竞争力和存活力高的多年生植物种类定居。

排矸场自然定居植物与排土场植物相比较,物种数量低,且变化不大,这是因为矸石风化物颗粒粗

且养分含量少,夏季高温易于灼伤植物根系,这些都是限制植物生长的主要因子。

农田、村庄周围及远郊山坡与采场、排土场、排矸场植被相比较,其植物群落中豆科类相对优势度较高,豆科植物的固氮作用能有效地提高土壤中氮素的含量,改善土壤营养条件,促进植被演替。其中不同的是,远郊山坡植被中多年生植物芦苇 (*Phragmites communis*) 为占绝对优势的物种,芦苇草群落是湿生演替系列的重要组成部分,生境中土壤水分优越的条件适合芦苇的繁衍。

3.2.2 矿区植物群落演替

根据矿区各研究样地的植被调查结果,计算各样地主要物种重要值,研究表明:采场 7、10a 梯田层水稗草 (*Echinochloa ispidula*) 重要值远高于其它物种; 15a 到 30a 梯田层植物群落以狗尾草 (*Setaria viridis*) 占优势; 40a 梯田中多年生披硷草

(*Clinelymus dahuricus*) 为优势度最高的物种(表 6)。尽管采场始终受到人类密集而频繁的活动影响,但植被仍表现出从 1 年生优势群落向多年生植物群落方向演替。

排土场相对受干扰较少,其不同梯田植被是由先锋种入侵、定居、群聚、竞争而形成,具有原生演替的特征,根据群落建群种的不同,分为 3 种演替植物

群落类型:蒺藜群落、水稗草群落、披硷草群落。由于排土场年限 8a 层是矿区为复田而覆盖表土的梯田层,其土壤内部可能含有相对丰富的种子库,且土壤理化性质与其它年限梯田层的混排岩土差异很大,不能够表现出土壤和植被的原生演替,将其作为对照层。

表 6 排土场不同年限梯田层植物种的重要值

Table 6 The key values of plant species in deferent aged terraces in waste dump

梯田层年限 Terraced layers life				
4a	10a	20a	40a	对照 8
蒺藜 37.12	水稗草 20.68	水稗草 16.19	披硷草 23.81	狗尾草 19.32
猪毛菜 22.80	大籽蒿 8.66	披硷草 12.54	芦苇 12.66	水稗草 18.39
水稗草 22.00	黄蒿 8.58	狗尾草 10.38	水稗草 7.46	大籽蒿 13.10
马齿苋 6.91	狗尾草 7.48	黄蒿 9.13	狗尾草 6.81	黄花草木犀 8.46
披硷草 3.04	披硷草 6.21	大籽蒿 6.01	黄蒿 5.28	黄蒿 7.58
狗尾草 2.05	野燕麦 5.94	家榆 4.91	鸡眼草 4.12	披硷草 5.43
野燕麦 1.79	蒺藜 4.96	野燕麦 4.51	家榆 3.78	大丁草 3.64
苋菜 0.68	猪毛菜 3.32	山黧豆 4.45	水棘针 3.43	地瓜儿苗 3.47
	山黧豆 3.22	地肤 4.36	大籽蒿 2.80	地梢瓜 3.09
	苍耳 2.32	大丁草 2.91	平车前 3.08	蒺藜 2.62
	黄花草木犀 2.13	黄花草木犀 2.58	野燕麦 2.72	山黧豆 1.41
	水棘针 2.08	鸡眼草 2.48	地梢瓜 2.71	萝摩 0.84
	地梢瓜 2.02	猪毛菜 2.29	蒙古蒿 2.08	家榆 0.66
	地瓜儿苗 1.63	水棘针 1.68	黄花草木犀 1.61	地肤 0.54
	地肤 1.45	鹅不食 1.42	野大麦 1.03	水棘针 0.53
	萝摩 1.36	胡枝子 1.32	苦买菜 0.78	香薷 0.45
	鸡眼草 1.26	地瓜儿苗 0.93	萝摩 0.56	鹅不食 0.39
	鹅不食 1.19	苍耳 0.80		
		蒺藜 0.26		

排土场 4 年梯田层中只有 17 种植物(表 4),优势种大多是低小、耐旱和生活力强的 1 年生草本植物,群落物种种类少,结构简单,群落具有很大不稳定性,蒺藜(*Tribulus terrestris*) 优势度极为突出,其余植物种类的定居和生长受到抑制。在其它梯田层中蒺藜重要值很快降低,可见蒺藜可作为平庄西露天矿排土场生态恢复的先锋种,以迅速提高排土层的盖度。

10a 梯田层中植物种类迅速增长,菊科、豆科和禾本科种数比例从 29.4% 升到 61.3%,与 4a 层植物相比较,优势度最高物种的重要值有所下降,而亚优势种重要值的均匀性增加,群落组成与结构稍微复杂一些。

20a 梯田层优势种的重要值比较接近,表明群落中植物种类通过竞争达到了一定平衡。几种物种共

为建群种,植物种类分布相对均匀,高物种多样性,对于外界的干扰有相对高稳定性。

40a 梯田层中,优势种由 1 年生草本演替为多年生植物,其中披硷草重要值占绝对优势,表明该层植物群落有向单优势种群落演替的趋势。

3.3 矿区土壤动物

3.3.1 矿区土壤线虫群落组成

根据线虫的头部形态学特征和取食生境,将土壤线虫分成 4 个营养类群:食细菌类(*Bacterivores*)、食真菌类(*Fungivores*)、植物寄生类(*Plant parasites*)、捕食类/杂食类(*Omnivores-predators*) 线虫^[13]。露天煤矿区土壤共分离鉴定出土壤线虫 5 目 16 科 28 属,其中植物寄生类群占总数量的 77.8%,食细菌类群占 16.64%,食真菌类群与捕食/杂食性营养类群分别占 5.80% 和 0.39%。

不同年限梯田层以及农田、远郊山坡土壤中线虫数量及类群构成,如图 2 所示。采场梯田平台土壤线虫总数、植物寄生类群线虫数量随着年限而增加,在 A6 和 A7 平台线虫数量降低,而食细菌类群和食真菌类群数量明显的升高。

排土场 B4 为排弃表土用以复田层,土壤动物群落没有被破坏,因此线虫数量较高。除 B4 层外,排土场土壤线虫数量随着梯田年限降低而减少,在顶层平台每千克干土仅 83 条,食细菌类群取代植物寄生类群线虫在数量上占优势。排矸场土壤线虫总数、植物寄生类群线虫数量随着梯田平台年限的增长而增加。与采场、排土场土壤比较,排矸场土壤线

虫总数最低,其次是农田。

平庄西露天煤矿区不同类群的土壤线虫中,植物寄生类群的数量占绝对地位,其变化与线虫总数变化的趋势一致。其次是食细菌类群数量较多,这是以细菌为食物的一类线虫,可对土壤中细菌的数量和活性起指示作用。微生物行为增加是食细菌组数量增加的原因,而微生物行为增加是由诸如施肥或其它导致分解加速的干扰引起的^[14]。

食真菌类线虫除在 A3、A5、A7 有较高数量外,在其它平台都比食细菌类线虫数量低。在 C/N 高的环境下真菌数量高,真菌降解路线占优势,相应地食真菌线虫数量多。

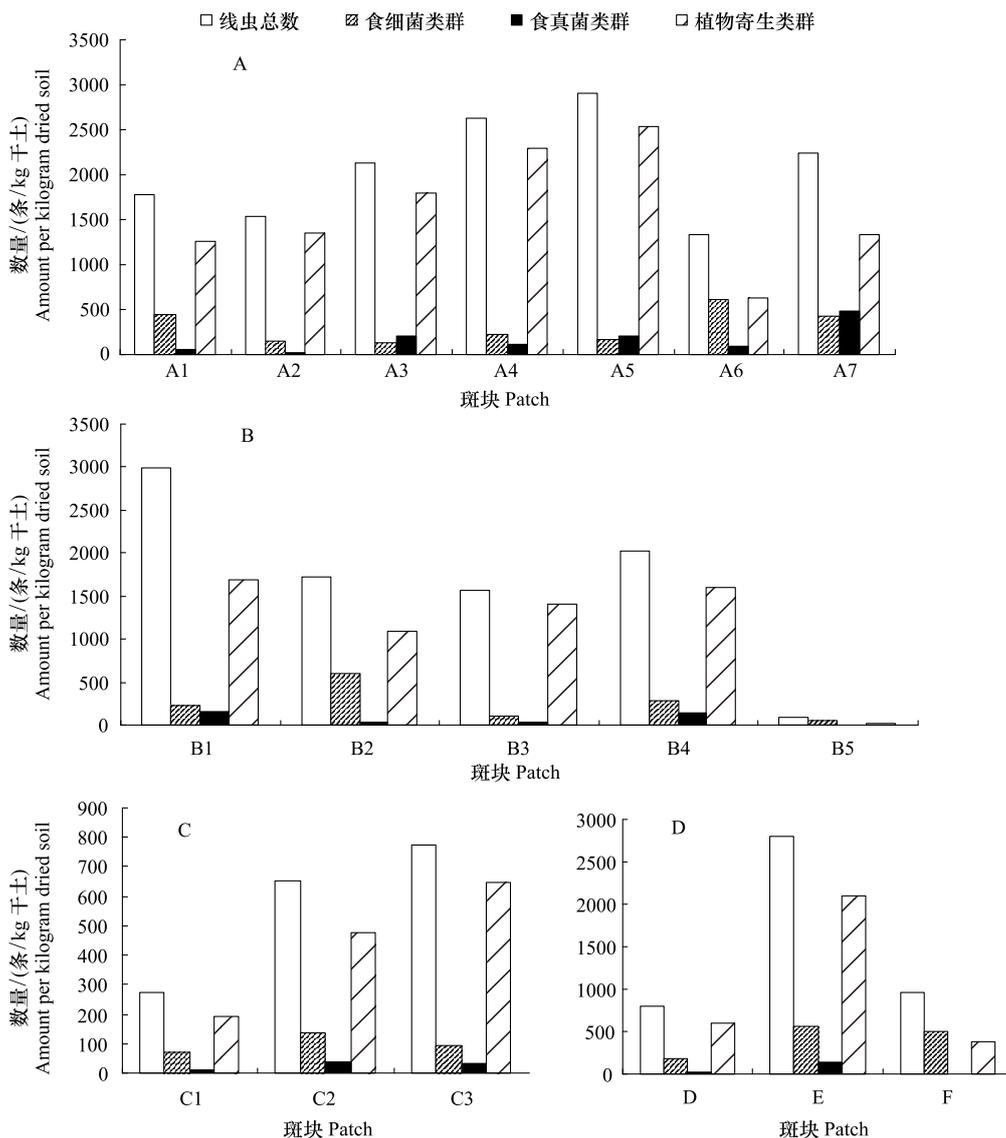


图 2 露天煤矿矿区土壤中线虫各营养类群数量
Fig.2 Abundance of nematode trophic groups in opencast coalmine

矿区土壤中捕食/杂食类线虫数量最低。采场平台每千克干土只有几条,排矸场土壤中没有发现捕食/杂食类线虫,排土场除 B4 平台层外,其它梯田层没有鉴别到捕食/杂食类线虫,远郊山坡土壤中此类线虫数量最高,每千克干土达 67 条。

捕食/杂食类群属于次级消费者,主要以原生动物、线虫等为食,它们被认为在土壤动物群落中行使了调节功能。当这类高等线虫首先消失后,系统的缓冲能力和稳定性可能会下降,此类线虫对污染和其他干扰最敏感,在受干扰环境中,其密度和多样性较低。

在远郊山坡土壤中,线虫总数比采场、排土场都低,但是数量低并不代表线虫群落对土壤过程的影响降低,因为顶级捕食线虫在远郊山坡含量最高,这

可能使得通过线虫区系和微植物系的物质能量通量更高。

3.3.2 线虫群落指数及其变化

如图 3 所示,矿区采场的年轻梯田层线虫成熟指数较低,随着梯田年限增加逐渐升高,在 A6、A7 层由于受到人类干扰而降低。排土场生土层(除 B4 外)土壤线虫成熟指数从最年轻梯田层的 1.52 升高到年限最高梯田层的 1.98,因为高年限的土壤环境得到了改善,K-策略属线虫的数量相应增加。排土场 B4 层土壤捕食性线虫含量 6 条/kg 干土,其它生土平台层没有发现 cp 值高的捕食性线虫,说明排土场土壤环境不稳定或者有其它胁迫因子(如重金属),这种环境下多存在 cp 值为 1 和 2 线虫。

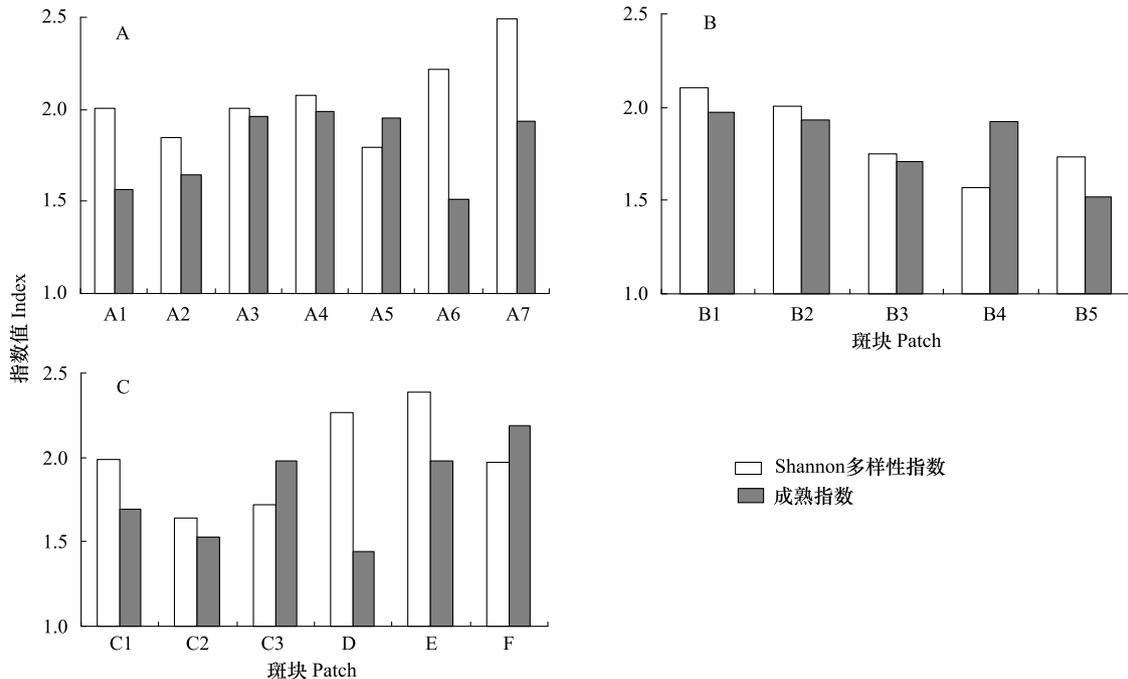


图 3 矿区线虫 shannon 指数和成熟指数

Fig.3 Shannon diversity index and maturity index of soil nematode in opencast mine

排矸场 C2 层 MI 最小,其次是顶层 C1,底层 MI 最大。原因是煤矸石矿物组成、化学成分各不相同,其风化物程度、物理、化学性质也不同。相比较而言,C2 层土壤容重和 pH 值较高,抑制了线虫活动。

采场、排土场和排矸场最年轻梯田土壤线虫属多样性都略高于亚年轻梯田的线虫多样性,这是由于 C3、C2 层线虫数量分别是 C1 层数量的 2.8 和 2.4 倍,高数量掩盖了多样性。

农田 MI 值最低,为 1.439,施用农药、化肥以及

每年翻耕,导致了高 cp 线虫的消失。远郊山坡土壤中捕食/杂食类线虫含量高,MI 最高,为 2.187。

4 讨论

平庄西露天煤矿区采场、排土场及排矸场土壤结构较差,氮磷含量偏低,生境脆弱,不利于植物生长,系统抵御生态风险的能力较低。由于氮元素的增加仅依赖天然入侵植物的积累作用,因此,增加速度很慢。露天煤矿区土壤速效磷含量低,其原因可

能是土壤偏碱性,使得土壤中铁、钙、镁和铝对磷有强烈的固定作用,尤其矿区土壤铁含量高,磷酸盐大量地被无定形氢氧化铁吸收,降低了磷有效性^[15]。而排土场平台土壤速效磷含量变化没有趋势,可能与成土母质有关。

矿区土壤营养元素含量的分布呈现一定规律,随着梯田年限增加,采场、排土场和排矸场平台的土壤熟化程度提高,相应地植被结构和土壤生物群落结构趋于复杂和稳定,采场和排土场年轻平台植物群落中1、2年生和多年生植物物种都比年老平台物种数少,土壤系统生态脆弱程度呈下降趋势,由此推测,物种总数和多年生物种数的增加与梯田土壤的熟化程度有关。但由于仅依赖自然风化作用和天然入侵植物的积累作用,土壤肥力增长缓慢,需采用相应的生态恢复手段与土地复垦技术,促进土壤改良与熟化^[16],并在复垦种植中重视氮、磷肥的施用。

排土场不同年限的梯田植被呈现出明显的原生演替特征,物种重要值的相对大小显示出物种在群落演替过程中生态位宽度^[17],这对于矿区生态恢复中物种筛选有重要指导意义。在排土场植被演替过程中,蒺藜在4年生梯田层中优势度突出,而在其它梯田层中的重要值迅速降低,由此可见,在平庄西露天矿排土场生态恢复中,可将其作为先锋种,以迅速提高排土层的盖度。水稗草和狗尾草作为顽固性杂草,在不同年限梯田中一直保持较高的优势度,刘志民研究发现,水稗草和狗尾草属于典型的风险分摊型禾本科植物,在高度干扰的环境中对其后代延续具有积极作用^[18]。露天煤矿采场、排土场和排矸场土壤水分、土壤厚度及光照等环境因子对水稗草、狗尾草种子萌发的共同调节,增大了两物种幼苗在贫瘠土壤上的生存几率,两者在矿区植物群落演替中表现出重要的作用,占据重要的功能地位,有助于保持群落的稳定性。

土壤动物对土壤有机物质分解、养分循环和能量转化等生态学过程起着重要作用,是土壤肥力形成和保持的活跃因子,对矿区土壤动物群落的研究结果表明,从低年限的梯田到高年限的梯田层,土壤线虫群落的成熟度与多样性增加。但露天煤矿区土壤微生物的缺少抑制了营养成分的转化、植物生长和生态演替,因此自然恢复是很慢的过程,相关研究结果表明,由于植物种类少,土壤氮、磷等营养物质

贫乏,排土场40a梯田层中土壤线虫的总数仍远远低于荒草地和林地中线虫数量^[19]。从长远看来,矿区生态恢复的成功依赖于土壤的生物活性,对于排土场、排矸场等干扰地的生态恢复,不仅仅要恢复地上部分的植被,还要注重地下部分土壤微生物群落的恢复,提高土壤生物肥力,增强干扰地土壤中C、N等营养元素循环及能量流动。

露天煤矿区表土和原有植被受到彻底破坏,在矿区特定自然环境下,通过自然恢复来实现生态恢复是非常漫长的过程,生态系统长期处于脆弱的高生态风险状态,需通过筛选及合理配置本地耐贫瘠的先锋植物和适生植物,进行植被重建,加强抚育管理,缩短演替进程。

References:

- [1] Chen H, Liu J S, Cao Y, Li S C, Ouyang H. Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [2] Cao C L, Yu X S, Geng B, Liu X, Ye Q, Zhu C X. Soil reclamation for abandoned opencast coal mine and a case study on Pingshuo surface coal mine. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2013, 33(1): 51-55.
- [3] Sun H B, Yang G S, Su W Z, Wan R R. Research progress on ecological risk assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(2): 335-341.
- [4] Song S Q, Zhou Y Z. Mining wasteland and its ecological restoration and reconstruction. *Conservation and Utilization of mineral resources*, 2001(5): 43-49.
- [5] Liu D S, Zeng Z Y. *Mathematical methods and modeling in soil and environmental research*. Beijing, Agriculture Press, 1987.
- [6] Lu R K. *Soil agrochemistry analysis*. Beijing, China Agricultural science and technology press, 1999.
- [7] Thornton C W, Matlack G R. Long-term disturbance effects in the nematode communities of south Mississippi woodlands. *Journal of Nematology*. 2002, 34: 88-97.
- [8] De Ley P, De Ley I T, Morris K, Abebe E, Mundo-Ocampo M, Yoder M, Heras J, Waumann D, Rocha-Olivares A, Jay Burr A H, Baldwin J G, Thomas W K. An integrated approach to fast and informative morphological vouchering of nematodes for applications in molecular barcoding. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences*, 2005, 360(1462): 1945-1958.
- [9] Zhao J X. Soil pH and plant growth. *Inner Mongolia Agricultural Science And Technology*, 2003(6): 33, 42.
- [10] Liu X R, Li X J, Li H L. Study on quality change of reclaimed soil in coal mining subsidence area in Zoucheng City. *Journal of*

- Anhui Agricultural Science, 2008, 38(32): 14206-14209.
- [11] Li S Z, Gao R J. Variability of reclaimed soil properties in subsided land. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(5): 792-794.
- [12] Xia T Y, Duan C Q, Zhang C X, Fu D G, Duan Z Y, Da L J. A study on the soil fertility in eucalyptus robusta plantation and their adjacent vegetations. *Journal of Yunnan University*, 2010, 32(1): 118-123.
- [13] Yeates G W, Bongers T. Nematode diversity in agroecosystems. *Agric. Ecosystems Environ*, 1999, 74: 113-135.
- [14] Ettema C H, Bongers T. Characterization of nematode colonization and succession in disturbed soil using the Maturity Index. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 16: 79-85.
- [15] Wang G G, Fu W L, Wei C F, Yuan H. Iron transformation and phosphorus availability in a drawdown area of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 66-70.
- [16] Wang X X, Li X J. Land reclamation of open-pit dump in Pingzhuang west. *Open pit mining techniques*, 2008 (Supplement): 78-80.
- [17] Chen Y R, Yin L K. Community composition and niche change characteristics of dominant species in the wind-breaking and sand-fixing forest, Xinjing, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(5): 1126-1133.
- [18] Liu Z M, Li X H, Li R P, Jiang D M, Cao C Y. A comparative study on seed germination of 15 grass species in Kerqin Sandyland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1416-1420.
- [19] Li H X, Liu M Q, Hu F, Chen X Y, He Y Q. Nematode abundance under different vegetations restored on degraded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1882-1889.
- 展. *生态学报*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [2] 曹翠玲, 于学胜, 耿兵, 刘雪, 叶婧, 朱昌雄. 露天煤矿废弃地复垦技术及案例研究. *西安科技大学学报*, 2013, 33(1): 51-55.
- [3] 孙洪波, 杨桂山, 苏伟忠, 万荣荣. 生态风险评价研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(2): 335-341.
- [4] 宋书巧, 周永章. 矿业废弃地及其生态恢复与重建. *矿产保护与利用*, 2001(5): 43-49.
- [5] 刘多森, 曾志远. 土壤和环境研究中的数学方法与建模. 北京: 农业出版社, 1987.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [9] 赵军霞. 土壤酸碱性与植物的生长. *内蒙古农业科技*, 2003(6): 33, 42.
- [10] 刘雪冉, 李新举, 李海龙. 邹城市采煤塌陷区复垦土壤质量变化研究. *安徽农业科学*, 2008, 38(32): 14206-14209.
- [11] 李树志, 高荣久. 塌陷地复垦土壤特性变异研究. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(5): 792-794.
- [12] 夏体渊, 段昌群, 张彩仙, 付登高, 段宗颜, 达良俊. 桉树人工林与邻近区域群落土壤肥力研究. *云南大学学报*, 2010, 32(1): 118-123.
- [15] 王改改, 傅瓦利, 魏朝富, 袁红. 消落带土壤铁的形态变化及其对有效磷的影响. *土壤通报*, 2008, 39(1): 66-70.
- [16] 王秀秀, 李宪杰. 平庄西露天矿排土场的土地复垦. *露天开采技术*, 2008(增刊): 78-80.
- [17] 陈艳瑞, 尹林克. 人工防风固沙林演替中群落组成和优势种群生态位变化特征. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1126-1133.
- [18] 刘志民, 李雪华, 李荣平, 蒋德明, 曹成有. 科尔沁沙地 15 种禾本科植物种子萌发特性比较. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1416-1420.
- [19] 李辉信, 刘满强, 胡锋, 陈小云, 何圆球. 不同植被恢复方式下红壤线虫数量特征. *生态学报*, 2002, 22(11): 1882-1889.

参考文献:

- [1] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 李双成, 欧阳华. 生态风险评价研究进

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol
League, Inner Mongolia WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia; a case study of Heidaigou
open pit coal mining KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus*
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus*
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)
- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)
- Population, Community and Ecosystem**
- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)
- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) cultural ponds YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)
- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- CO₂ emissions transfer embedded in inter-regional trade in China LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)
- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)
- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)
- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ... WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)
- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)
- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)
- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)
- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)
- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)
- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 11 (June, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元