

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第21期 Vol.31 No.21 **2011**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 31 卷 第 21 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

基于景观格局理论和理想风水模式的藏族乡土聚落景观空间解析——以甘肃省迭部县扎尕那村落为例·····	史利莎,严力蛟,黄璐,等 (6305)
武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律·····	游巍斌,何东进,巫丽芸,等 (6317)
旅游地道路生态持续性评价——以云南省玉龙县为例·····	蒋依依 (6328)
城市空间形态紧凑度模型构建方法研究·····	赵景柱,宋瑜,石龙宇,等 (6338)
丹顶鹤多尺度生境选择机制——以黄河三角洲自然保护区为例·····	曹铭昌,刘高焕,徐海根 (6344)
西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征·····	凡非得,王克林,熊鹰,等 (6353)
流域尺度海量生态环境数据建库关键技术——以塔里木河流域为例·····	高凡,闫正龙,黄强 (6363)
雌雄异株植物鼠李的生殖分配·····	王娟,张春雨,赵秀海,等 (6371)
长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应·····	王晓明,赵秀海,高露双,等 (6378)
不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局·····	赵成章,任珩,盛亚萍,等 (6388)
残存银杏群落的结构及种群更新特征·····	杨永川,穆建平,TANG Cindy Q,等 (6396)
濒危植物安徽羽叶报春两种花型的繁育特性及其适应进化·····	邵剑文,张文娟,张小平 (6410)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林的乔木叶片功能性状特征·····	罗璐,申国珍,谢宗强,等 (6420)
不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征·····	王丽艳,韩有志,张成梁,等 (6429)
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林分的影响·····	张喜,崔迎春,朱军,等 (6442)
内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和生理生态适应性·····	马成仓,高玉葆,李清芳,等 (6451)
古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析·····	司朗明,刘彤,刘斌,等 (6460)
白石砬子国家级自然保护区天然林的自然稀疏·····	周永斌,殷有,殷鸣放,等 (6469)
黑龙江省东完达山地区东北虎猎物种群现状及动态趋势·····	张常智,张明海 (6481)
基于 GIS 的马铃薯甲虫扩散与河流关系研究——以新疆沙湾县为例·····	李超,张智,郭文超,等 (6488)
2010 年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析·····	蒋春先,齐会会,孙明阳,等 (6495)
B 型烟粉虱对寄主转换的适应性·····	周福才,李传明,顾爱祥,等 (6505)
利用 PCR-DGGE 方法分析不同鸡群的盲肠微生物菌群结构变化·····	李永洙,Yongquan Cui (6513)
鸡粪改良铜尾矿对 3 种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响·····	张宏,沈章军,阳贵德,等 (6522)
铜绿微囊藻对紫外辐射的生理代谢响应·····	汪燕,李珊珊,李建宏,等 (6532)
10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系·····	王燕,李瑞香,董双林,等 (6540)
冬季太湖表层底泥产毒蓝藻群落结构和种群丰度·····	李大命,孔繁翔,于洋,等 (6551)
城市机动车道颗粒物扩散对绿化隔离带空间结构的响应·····	蔺银鼎,武小刚,郝兴宇,等 (6561)
新疆城镇化与土地资源产出效益的空间分异及其协调性·····	杨宇,刘毅,董雯,等 (6568)
山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及 $\delta^{15}\text{N}$ 溯源·····	徐春英,李玉中,李巧珍,等 (6579)
增温对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响·····	肖国举,张强,张峰举,等 (6588)
一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数·····	梁亮,杨敏华,邓凯东,等 (6594)
黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征·····	张惠,杨正礼,罗良国,等 (6606)
专论与综述	
植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望·····	黄娟,莫江明,孔国辉,等 (6616)
植物种群更新限制——从种子生产到幼树建成·····	李宁,白冰,鲁长虎 (6624)
研究简报	
遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响·····	杜成凤,李潮海,刘天学,等 (6633)
学术信息与动态	
科学、系统与可持续性——第六届工业生态学国际大会述评·····	石海佳,梁赛,王震,等 (6641)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 340 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2011-11	



封面图说: 鹤立——丹顶鹤是世界 15 种鹤数量极小的一种,主要栖息在沼泽、浅滩、芦苇塘等湿地,以捕食小鱼虾、昆虫、蛙蚺、软体动物为主,也吃植物的根茎、种子、嫩芽。善于奔驰飞翔,喜欢结群生活。丹顶鹤属迁徙鸟类,主要在我国的黑龙江、吉林、俄罗斯西伯利亚东部、朝鲜北部以及日本等地繁殖。在长江下游一带越冬。在中国文化中有“仙鹤”之说。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录,濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

王丽艳, 韩有志, 张成梁, 裴宗阳. 不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征. 生态学报, 2011, 31 (21): 6429-6441.

Wang L Y, Han Y Z, Zhang C L, Pei Z Y. Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (21): 6429-6441.

不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质 及煤矸石风化物的变化特征

王丽艳¹, 韩有志^{1,*}, 张成梁², 裴宗阳¹

(1. 山西农业大学林学院, 太谷 030801; 2. 轻工业环境保护研究所, 北京 100089)

摘要:为了探讨植被恢复模式对煤矸石山复垦土壤和矸石风化物的影响,对煤矸石山 6 种主要植被类型(刺槐林、刺槐-柠条混交林、榆树-紫穗槐混交林、侧柏-刺槐混交林、荆条林、紫花苜蓿草丛)下土壤和煤矸石风化物的理化性状及重金属进行了比较研究。结果表明:(1)煤矸石山上种植植被可使土壤容重、土壤持水量和孔隙度明显改善。乔木模式更明显。矸石山植被恢复后,可明显增加土壤养分含量。不同植被模式下,土壤养分增加存在显著差异。侧柏-刺槐和榆树-紫穗槐混交模式效果较好。(2)植被对煤矸石风化物容重和机械组成改善作用依次为针阔混交林>乔灌木>乔木纯林>灌木林>草本。植被促进有机质与全氮积累依次为:侧柏-刺槐>刺槐>刺槐-柠条>榆树-紫穗槐>荆条>紫花苜蓿。荆条林下煤矸石风化物全 P 含量最大。荆条林与侧柏-刺槐混交林利于速效 P 积累。对速效 K 积累有利的是荆条林与榆树-紫穗槐混交林。(3)植被种植可以减少煤矸石风化物中重金属含量。榆树-紫穗槐混交模式对减低超标重金属 Cd 的效果好,其次是针阔混交林(侧柏-刺槐)。对于超标重金属 As 而言,侧柏-刺槐模式优于其它植被模式,基本达到重金属 As 不超标。

关键词:植被恢复模式;复垦土壤;矸石风化物;理化性质;重金属

Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile

WANG Liyan¹, HAN Youzhi^{1,*}, ZHANG Chengliang², PEI Zongyang¹

1 College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China

2 Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China

Abstract: The main obstacles to restoration of the vegetation and ecological reconstruction of abandoned mines are from the special and poor physical and chemical properties of the land, particularly to gangue piles. Vegetation is based on soil and also affects soil formation, nutrient cycling and development. Study of nutrient change in soil is important to understand soil fertility and mechanism of nutrient cycling. The study of re-vegetation for coal gangue piles has mainly focused on growth of young forest, soil matrix improvement, vegetation restoration patterns, vegetation dynamics and vegetation restoration techniques and mechanisms, etc. However, there are no many studies on eco-environmental effects of vegetation on gangue piles. Study of the relationship between environment and vegetation on gangue piles is helpful to reveal the stability and dynamic development of existing ecosystem, and to build up the foundation for vegetation regulation on gangue piles. In this study, different reclaimed lands from 280 gangue piles of No. 3 coal mine of Yangquan Coal Industry Group in Shanxi Province were included. The effect of different vegetation restoration patterns were analyzed on reclaimed soil and weathered coal gangue. The soil, physical and chemical properties of weathered coal gangue and heavy metals under 6 different

基金项目:林业公益性行业科研专项经费(200904030)

收稿日期:2011-01-14; 修订日期:2011-09-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanyouzh@sxau.edu.cn

vegetation types (plantation of *Robinia pseudoacacia* L., mixed plantation of *Robinia pseudoacacia* L. and *Caragana intermedia*, mixed plantation of *Ulmus pumila* L. and *Amorpha fruticosa* L., mixed plantation of *Platycladus orientalis* (L.) Franco and *Robinia pseudoacacia* L., *Vitex negundo* var. *heterophylla* and grass vegetation of *Medicago sativa* L.) on coal gangue piles were compared. The results showed: (1) The vegetation, particularly the tree plantation on coal gangue piles significantly influenced the soil bulk density, soil water holding capacity and porosity. As the vegetation was recovered, the nutrient content in the soil significantly increased. Soil nutrient content varied with the difference between vegetation restoration types. The mixed plantation of *R. pseudoacacia* and *C. intermedia* was much better than other vegetation types. The order of different vegetation types according to their positive effects on soil bulk density and mechanical components of coal gangue were: coniferous > mixed shrub and tree forest > broad-leaf tree pure forest > shrub > grass; (2) The vegetation order according to the accumulation of organic matter and total nitrogen were: mixed plantation of *P. orientalis* and *R. pseudoacacia* > *R. pseudoacacia* plantation > mixed plantation of *R. pseudoacacia* and *C. intermedia* > mixed plantation of *U. pumila* and *A. fruticosa* > *V. negundo* var. *heterophylla* plantation > Grass of *M. sativa*. Total P content under *V. negundo* var. *heterophylla* plantation on weathered gangue piles was the highest. *V. negundo* var. *heterophylla* plantation and mixed plantation of *P. orientalis* and *R. pseudoacacia* were good for quick P accumulation, and mixed plantation of *U. pumila* and *A. fruticosa* for quick K accumulation; (3) Planting of vegetation could reduce the heavy metal content in weathered gangue. Mixed plantation of *U. pumila* and *A. fruticosa* was better in reducing excessive heavy metal Cd, and followed by mixed coniferous forest (mixed plantation of *P. orientalis* and *R. pseudoacacia*). In reduction of excessive heavy metal As, the mixed plantation of *P. orientalis* and *R. pseudoacacia* was better than the other vegetation types, and could control the As level lower than the national standard.

Key Words: vegetation restoration pattern; reclaimed soil; weathered gangue; physicochemical property; heavy metal

矿山废弃地植被恢复和生态重建主要障碍是土壤因子,即废弃地特殊的、不良的理化性质,而煤矸石山在该方面的问题尤为突出。加速土壤熟化过程,改良土壤结构,是煤矸石山植被恢复与生态重建的关键之一^[1]。土壤是生态系统中诸多生态过程(如营养物质循环、水分平衡和凋落物分解等)的载体^[2-3]。土壤结构和养分状况是度量退化生态系统生态功能恢复与维持的关键指标之一^[4]。土壤是植被的基础,植被的出现也影响着土壤的形成与发育^[5]。不同植被类型影响着土壤养分循环,研究土壤养分的变化,对于了解各群落土壤肥力和营养元素循环机制有着重要的意义^[6]。目前对于煤矸石山植被恢复的研究,主要集中于幼林的生长状况^[7]、基质改良^[8-9]、植被恢复模式^[10]、植被动态^[11-13]和植被恢复技术和机制^[14-15]等方面,而对其煤矸石山植被生态环境效应的研究较少。因此,加强对煤矸石山生境与植被相互关系的研究,有助于揭示已有生态系统的稳定性和发展动态,为人为调节煤矸石山植被打下基础^[1]。本文以山西阳煤集团三矿 280 煤矸石山不同植被类型复垦地为研究对象,分析了不同植被类型下复垦地土壤性质及煤矸石风化物的变化特征,为煤矸石山复垦地土壤生态系统的深入研究和矿区生态系统健康状况的客观评价提供依据,以期为煤矸石山生态系统恢复与管理提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

山西阳煤集团位于山西省中部东翼,太行山中段西侧的阳泉市,是我国最大的无烟煤生产基地。地理坐标是北纬 37°49.108',东经 111°29.617'。本区属暖温带半干旱大陆性气候,年均气温 11℃,年均降水量 532 mm,全年以西北偏西风为主,年均风速 2 m/s,无霜期 150 d。阳煤集团三矿 280 煤矸石山位于阳泉市区的西北部,海拔 980 m,1970 年开始堆积,1985 年停止排矸,总面积 3.807 hm²,其中平台面积 0.847 hm²,斜坡面积 2.960 hm²,最大坡度 36.6°,最长坡长 100.3 m。2005 年进行覆土碾压,覆土厚度 50—100 cm,并进行植被建设,目前形成了 6 种典型的植被类型,分别是刺槐林(*Robinia pseudoacacia* L.),刺槐-柠条混交林(*Robinia*

pseudoacacia L. + *Caragana intermedia*), 榆树-紫穗槐混交林 (*Ulmus pumila* L. + *Amorpha fruticosa* L.), 侧柏-刺槐混交林 (*Platycladus orientalis* L. Franco + *Robinia pseudoacacia* L.), 荆条林 (*Vitex negundo* var. *heterophylla* plantation) 草本紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)。

1.2 样地设计及样品采集

2010 年 7 月在 6 种植被类型和荒草裸地内, 选择样地, 设置样方, 如下表 1, 在不同植被类型样地分别设置 3 个样方, 乔木样方 10 m × 10 m, 灌木样方 5 m × 5 m, 草本样方 1 m × 1 m。在每个样方内进行每木检尺, 测定树高、冠幅、株数及草本的盖度, 结合造林记录并采用生长锥测定人工林的树龄。在植被调查的基础上, 分别在每块样地内按对角线随机布点(3 点), 挖取土壤剖面, 并按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 3 个层次分别取土样, 土壤剖面覆土层剥离后用环刀取风化矸石土样, 混匀, 带回实验室内, 样品经风干后粉碎, 挑去植物细根后, 分别过 20、80 目和 100 目筛, 密封贮存, 备测。

表 1 调查样地基本情况
Table 1 General situation of experimental plots

编号 No.	样地 Plot	初植密度/(株/hm ²) Planting density	坡度/(°) Slope	坡向/(°) Aspect	树龄/a Age of tree	覆盖度 Coverage/%
1	刺槐林 PRP	2500	23	西边南 62	7	64
2	刺槐-柠条混交林 MCR	2500	28.5	西偏南 45	7	67
3	榆树-紫穗槐混交林 MUA	2500	35	东偏南 33	7	70
4	侧柏-刺槐混交林 MPR	1667	27.5	西边南 22	8	68
5	荆条林 PVH	3333	36	西边南 69	8	70
6	紫花苜蓿 GMS	—	36.2	西偏南 52	5	75
7	对照荒草裸地 CK	—	36.2	西偏南 48	—	—

PRP: 刺槐林 *Robinia pseudoacacia* L., MRC: 刺槐-柠条混交林 *Robinia pseudoacacia* L. + *Caragana intermedia*, MUA: 榆树-紫穗槐混交林 *Ulmus pumila* L. + *Amorpha fruticosa* L., MPR: 侧柏-刺槐混交林 *Platycladus orientalis* (Linn.) Franco + *Robinia pseudoacacia* L., PVH: 荆条林 *Vitex negundo* var. *heterophylla*, GMS: 草本紫花苜蓿 Grass of *Medicago sativa* L.; CK: 荒草裸地

1.3 土样及煤矸石风化测定

每种植被类型下取 3 份土样测定理化指标。土壤容重和孔隙度等物理指标采用环刀法取样测定。土壤 pH 值用玻璃电极法; 有机质用重铬酸钾容量法-外加热法; 全氮采用浓硫酸消煮半微量凯氏法; 全磷采用浓硫酸。高氯酸消煮钼锑抗比色法; 碱解氮用碱解扩散法; 速效磷用钼锑抗比色法; 速效钾用醋酸氨浸提-火焰光度法^[16]。

煤矸石机械组成采用干筛法: 将取回的煤矸石风化物, 室温下风干, 均匀混合, 对角线十字切割法取出所需土样, 然后用干筛法, 筛后分别称重, 计算各粒径的比重。煤矸石风化物其它理化指标测定同土样。煤矸石风化物重金属总砷 As 用 GB/T22105—2008 土壤中总砷测定法。仪器原子荧光光谱仪。汞 Hg 的测定用硫酸-五氧化二钒消煮-冷原子吸收法测定。仪器原子荧光 AFS-230E 原子荧光光度计。重金属铬 Cr、铜 Cu、锌 Zn、镉 Cd 和铅 Pb 用 DZ/T0223-2001(电感耦合等离子质谱(ICP-MS)) 方法通则。重金属含量的测定委托核工业北京地质研究院分析测定研究中心测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 进行处理, 通过 SPSS13.0 软件的单因素方差分析(ANOVA)检验。不同植被类型下复垦土壤与煤矸石风化物理化性质的差异性($\alpha=0.05$), 相关性分析计算 Pearson 相关系数。利用 SPSS 软件对煤矸石风化物中理化重金属指标进行主成分分析, 进而评价最优恢复模式。

2 结果与分析

2.1 植被对复垦土壤理化性质的影响

根据植被恢复对复垦土壤理化性状的影响(表 2)可以看出, 植被恢复过程中, 有机质相对含量的变化幅度最大, 为 20.29%—93.23%, pH 值的变化幅度最小, 为 0.50%—9.20%。植被恢复对土壤的理化性状的影

响主要体现在有机质、田间持水量(12.82%—65.69%)、总孔隙度(16.10%—63.14%)、碱解氮(41.04%—87.25%)、毛管孔隙度(23.75%—68.68%)、速效钾和速效磷上,而对土壤容重、全氮、全磷、pH 值影响相对较小。通过植被恢复下复垦土壤理化指标与裸地相比的变幅可知,植被恢复主要影响了复垦地物理性质的田间持水量和孔隙度,以及有机质和速效养分的化学性质。

表2 植被恢复对复垦土壤理化性状的影响

Table 2 Effect of vegetations to physical and chemical properties of reclamation soil

项目 Item	变幅/% Range of variation	平均数±标准差/% Mean ± Sd	变异系数/% Coefficient of variation
pH	0.50—9.20	8.43±0.36	4.3
全氮 Total N	25.76—39.09	0.43±0.19	44.75
全磷 Total P	27.73—37.57	0.57±0.37	65.34
碱解氮 Available N	41.04—87.25	31.91±9.29	29.12
速效磷 Available P	16.67—56.67	5.75±2.97	51.56
速效钾 Available K	9.65—53.26	102.39±24.39	23.81
有机质 Organic matter	20.29—93.23	6.51±1.60	24.55
田间持水量 Field moisture	12.82—65.69	29.31±2.19	7.47
容重 Bulk density	3.08—28.79	1.42±0.04	2.89
总孔隙度 Total porosity	16.10—63.14	46.06±1.56	3.39
毛管孔隙度 Capillary porosity	23.75—68.68	41.89±3.23	7.7

2.2 不同植被恢复模式下复垦土壤物理性质变化特征

2.2.1 土壤容重

土壤容重反映了土壤的松紧度和对地表水的蓄积能力。由表3可知,荒草裸地不同土层(0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm)容重分别是1.52、1.63、1.68 g/cm³。相对于荒草裸地,种植植被对减低土壤各层容重的作用较明显。其中针阔混交模式(侧柏-紫穗槐)土壤容重最小,0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层容重分别为1.43、1.37、1.36 g/cm³,说明针阔混交林中物种和结构的变化,使土壤疏松度得到改善。同时可看出,针阔混交林土壤容重随土层深度递减,而其它5种植被恢复模式容重随土层递增。6种植被恢复模式对土壤容重改良效果为:针阔混交林(侧柏-刺槐)>乔灌混交林(榆树-紫穗槐)>乔灌混交(刺槐-柠条)>刺槐纯林>灌木林(荆条)>草本(紫花苜蓿)>对照荒草裸地。

2.2.2 土壤持水能力和土壤孔隙度

土壤水分是土壤肥力的一个重要促动因素,直接影响着植被恢复的进程。表3表明,随着土层加深,各植被模式下的土壤持水量逐渐减低。其中草本紫花苜蓿及荆条灌丛土壤各层次持水量低于乔木林,主要原因是灌草丛地上部分生物量小、根系浅,对水分的截流作用弱,地表部分裸露,蒸发量大,土壤水分含量低;而乔木树冠对降雨有截流作用,使水分慢慢渗入土层,减低了地表径流,加之树冠对太阳辐射的遮蔽作用,使地表温度较低,地表水分蒸发量减少,土壤水分含量则较高。

土壤孔隙度是反映土壤通透性的重要指标。研究区不同植被下各层次土壤孔隙度的变化各异(表3)。针阔混交林(侧柏-刺槐)随着土层的增加呈增加趋势,其它植被恢复模式均呈减低趋势。主要原因是针阔混交林根系在土壤各层次中发达分布、以及大量凋落物的积累分解所致。各层次土壤总孔隙度和毛管孔隙度以草本和灌木最低。说明乔木林对土壤孔隙状况的改善作用优于灌草丛。

2.3 不同植被恢复模式下复垦土壤化学性质特征

2.3.1 土壤 pH 值和有机质含量

研究区复垦土壤均呈碱性,对照土壤的 pH 值最大为8.63。与对照相比,人工种植植被对降低复垦土壤 pH 值有显著影响。但植被模式之间差异不显著。不同植被恢复模式下土壤有机质含量明显增加。从表4数

据可以看出,草本模式下有机质含量 4.14 g/kg,乔木模式下土壤有机质含量较高为 7.14—8.03 g/kg,说明乔

木林可以更有效地改善土壤有机质含量。

表 3 不同植被类型下复垦土壤物理性质(均值±标准误)

Table 3 Physical properties of reclamation soil in different vegetation conditions (Mean±SE)

编号 No.	植被恢复模式 Vegetation pattern	土壤深度 Depth /cm	土壤容重 Bulk density /(g/cm ³)	田间持水量 Field moisture /%	总孔隙度 Total porosity /%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 No capillary porosity/%
1	刺槐 PRP	0—20	1.44±0.47	30.53±0.33	45.53±0.55	44.05±0.34	1.48±0.05
		20—40	1.50±0.19	28.34±0.35	43.52±0.33	42.40±0.31	1.12±0.23
		40—60	1.58±0.12	24.20±0.28	43.40±1.27	36.30±0.56	3.18±0.77
2	刺槐-柠条 MRC	0—20	1.43±0.36	30.74±0.15	45.91±0.22	44.06±0.09	1.85±0.16
		20—40	1.47±0.42	27.75±1.26	44.53±0.53	40.80±0.14	3.73±0.36
		40—60	1.56±0.51	24.88±0.34	44.13±0.57	38.81±0.27	2.33±0.35
3	榆树-紫穗槐 MUA	0—20	1.38±0.52	32.01±0.16	47.80±0.33	44.29±0.16	3.51±0.50
		20—40	1.41±0.29	30.82±0.28	46.67±0.53	43.57±0.30	3.10±0.63
		40—60	1.49±0.67	22.53±0.08	40.00±0.39	36.66±0.13	7.86±0.46
4	侧柏-刺槐 MPR	0—20	1.40±0.16	18.86±0.10	47.30±0.25	36.17±0.28	11.13±0.49
		20—40	1.37±0.20	28.98±0.34	48.43±0.33	39.60±0.17	14.1±5.51
		40—60	1.36±0.04	25.38±0.07	46.88±0.29	34.51±0.26	14.17±0.36
5	荆条 PVH	0—20	1.45±0.23	27.33±0.26	45.28±0.44	39.63±0.51	5.65±0.87
		20—40	1.51±0.35	25.68±1.37	43.02±2.14	38.78±0.27	4.24±1.32
		40—60	1.58±0.14	24.97±0.31	40.50±0.13	39.36±0.04	1.14±0.13
6	紫花苜蓿 GMS	0—20	1.47±0.43	29.34±0.29	44.53±0.23	34.00±0.26	7.38±0.10
		20—40	1.55±0.21	24.93±0.12	41.38±0.13	30.61±0.43	7.87±0.23
		40—60	1.59±0.18	21.88±0.09	38.49±0.38	35.82±0.14	4.18±0.31
7	荒草裸地 CK	0—20	1.52±0.06	12.77±0.02	42.77±0.34	19.37±0.09	23.40±1.42
		20—40	1.64±0.04	12.75±0.03	37.99±1.58	20.95±0.55	17.04±2.13
		40—60	1.68±0.07	12.15±0.04	30.57±0.20	22.36±0.06	8.20±0.22

表 4 不同植被恢复类型下复垦土壤化学性质特征

Table 4 Chemical properties of reclamation soil in different vegetation conditions

植被类型 Vegetation pattern	pH	全氮 Total N /(g/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	碱解氮 Available N /(mg/kg)	速效磷 Available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)	有机质 Organic matter /(g/kg)
刺槐 PRP	8.49 b	0.35c	0.38b	31.89a	3.46c	92.10c	7.14a
刺槐-柠条 MRC	8.41 b	0.59a	0.37b	34.83a	3.42c	87.27 d	7.86a
榆树-紫穗槐 MUV	8.51 b	0.36c	0.40b	21.68b	6.56b	136.33a	7.86a
侧柏-刺槐 MPR	8.53 b	0.53a	0.54a	34.82a	9.13a	87.36 b	8.03a
荆条 PVH	8.37 b	0.29cd	0.35b	25.91b	3.27c	134.15b	6.51b
紫花苜蓿 GMS	7.83 b	0.28c	0.32b	21.31b	5.33b	83.77 e	4.14c
荒草裸地 CK	8.63 a	0.22d	0.25b	14.80c	2.00c	81.06 e	3.44d
平均值 Mean	8.46	0.40	0.53	26.61	4.74	98.39	6.08
标准差 SD	0.34	0.19	0.36	8.01	2.47	24.64	1.85
F	4.950	30.991	5.063	14.123	18.249	665.338	18.315

$F_{0.05}(6,14) = 2.848$ 同一列中,具有相同字母平均数表示差异不显著 ($P < 0.05$)

2.3.2 复垦土壤全氮和全磷含量

由表 4 可以看出,乔木林表层(0—20 cm)土壤全氮含量均高于灌草丛。4 种乔木林土壤全氮的含量依次为:刺槐-柠条>侧柏-刺槐>榆树-紫穗槐>刺槐。刺槐和柠条同为豆科植物,有较高的固氮作用。故该林地全氮含量较高。在复垦地建立人工林后,林地内全氮含量的增幅在 31.83%—168.18%。植被恢复后复垦土壤

全磷含量增加,增幅为 28%—116.00%。不同植被模式下,土壤全磷变化存在明显差异。植被对土壤全磷积累依次为:侧柏-刺槐>榆树-紫穗槐>刺槐>刺槐-柠条>荆条>紫花苜蓿。针阔混交模式与其它植被模式间差异显著。

2.3.3 复垦土壤速效养分含量

从表 4 可知,各植被模式对速效养分影响差异明显。相对于荒草裸地,6 种植被类型下,表层(0—20 cm)土壤碱解氮含量均呈增加的趋势。其中,刺槐-柠条、刺槐和侧柏-刺槐林地碱解氮含量较高,草本植被下碱解氮含量最低,其余林地碱解氮基本一致。与草本植被相比,(侧柏-刺槐)和(榆树-紫穗槐)林地速效磷含量呈增加趋势,其余植被类型林地速效磷含量有减少的趋势。6 种植被恢复模式下,草本速效钾增幅为 3.34%。灌木丛增幅为 65.49%,乔木林的增幅为 24.31%,土壤表层速效钾含量均有增加的趋势。

2.4 不同植被恢复模式下覆土层下矸石风化物的特征

2.4.1 煤矸石风化物物理性质特征

种植植被改善了煤矸石风化物容重和孔隙度。乔木林的改善作用显著优于灌木和草本模式,其中,针阔混交林(侧柏-刺槐)煤矸石风化物容重(1.41 g/cm^3)最小,对照荒草裸地(1.70 g/cm^3)最大,植被恢复促进了煤矸石的风化,减少了石砾和石块的比例,增大了煤矸石风化物中细砾及以下粒径的比重。有林地和草地下煤矸石风化物细砾(3—1mm)增幅为 0.27%—29.09%,侧柏-刺槐模式下增加最大为 29.09%,刺槐-柠条混交模式下增幅最小为 0.27%。粗砂(1—0.5mm)增幅为 1.24%—53.55%,中砂以下粒级(<0.5mm)增幅为 6.79%—59.24%,侧柏-刺槐模式下增幅最大,草本最小(表 5)。

表 5 不同植被类型下煤矸石风化物物理性质特征

Table 5 Physical properties of the weathered coal gangue in different vegetation conditions

植被类型 Vegetation pattern	容重 Bulk density /(g/cm^3)	总孔隙度 Porosity /%	石块 10mm Stones /%	粗砾 10—3mm Coarse gravel /%	细砾 3—1mm Gravel fine /%	粗砂 1—0.5mm Coarse sand /%	中砂以下粒级 Grain size <0.5mm/%
刺槐 PRP	$1.45 \pm 0.05 \text{ c}$	$39.90 \pm 0.30 \text{ a}$	$10.13 \pm 1.29 \text{ c}$	$38.37 \pm 1.80 \text{ b}$	$15.73 \pm 0.56 \text{ b}$	$16.55 \pm 3.00 \text{ a}$	$19.22 \pm 0.84 \text{ b}$
刺槐-柠条 MRC	$1.48 \pm 0.11 \text{ bc}$	$40.20 \pm 0.35 \text{ a}$	$10.69 \pm 1.03 \text{ c}$	$38.79 \pm 0.44 \text{ b}$	$15.06 \pm 1.64 \text{ b}$	$16.95 \pm 1.58 \text{ a}$	$19.37 \pm 0.63 \text{ b}$
榆树紫穗槐 MUA	$1.44 \pm 0.26 \text{ c}$	$40.27 \pm 0.55 \text{ a}$	$10.51 \pm 0.48 \text{ c}$	$39.10 \pm 3.43 \text{ b}$	$15.96 \pm 3.92 \text{ b}$	$16.33 \pm 3.05 \text{ a}$	$18.10 \pm 3.97 \text{ b}$
侧柏-刺槐 MPR	$1.41 \pm 0.03 \text{ c}$	$42.47 \pm 2.26 \text{ a}$	$8.01 \pm 0.62 \text{ d}$	$34.59 \pm 0.93 \text{ c}$	$19.39 \pm 0.62 \text{ a}$	$17.25 \pm 1.92 \text{ a}$	$23.46 \pm 1.56 \text{ a}$
荆条 PVH	$1.54 \pm 0.06 \text{ b}$	$34.27 \pm 3.68 \text{ b}$	$12.06 \pm 1.21 \text{ b}$	$39.55 \pm 0.92 \text{ b}$	$17.59 \pm 2.31 \text{ a}$	$12.72 \pm 2.42 \text{ b}$	$18.09 \pm 0.40 \text{ bc}$
紫花苜蓿 GMS	$1.65 \pm 0.05 \text{ a}$	$28.75 \pm 1.49 \text{ c}$	$13.58 \pm 0.91 \text{ a}$	$43.79 \pm 1.64 \text{ a}$	$15.53 \pm 0.48 \text{ b}$	$11.39 \pm 1.76 \text{ b}$	$15.73 \pm 1.77 \text{ c}$
荒草裸地 CK	$1.70 \pm 0.04 \text{ a}$	$25.69 \pm 0.69 \text{ c}$	$14.67 \pm 0.46 \text{ a}$	$44.33 \pm 0.94 \text{ a}$	$15.02 \pm 0.31 \text{ b}$	$11.25 \pm 0.43 \text{ bc}$	$14.73 \pm 1.82 \text{ c}$
F	21.899	44.059	18.074	11.468	3.932	4.616	6.489

2.4.2 煤矸石风化物化学性质特征

由矸石风化物方差分析表明,各植被模式对煤矸石风化物 pH 值的影响差异不显著。与对照荒草裸地(pH 值=6.21)相比,有林地和草地(pH 值=7.03 均值)对改善煤矸石风化物的酸化起到一定作用(图 1)。

与荒草裸地相比,不同植被恢复模式下煤矸石风化物养分含量差异明显。依据土壤养分分级标准^[17],乔木和灌木模式下煤矸石风化物有机质含量为一级极高(>40 g/kg)。植被恢复促进有机质含量增加依次为侧柏-刺槐(71.90 g/kg)>刺槐(60.81 g/kg)>刺槐-柠条(42.91 g/kg)>榆树-紫穗槐(42.97 g/kg)>荆条(42.68 g/kg)>紫花苜蓿(21.84 g/kg)(图 2)。

乔木恢复模式下,风化物中全氮含量极高达到一级水平(>2 g/kg)^[17]。灌木模式下,风化物总氮含量为中上属三级(1.5—1 g/kg)。草本模式和荒草裸地煤矸石风化物中全氮含量中下属四级(1—0.75 g/kg)。植被恢复促进了煤矸石风化物种全磷含量的增加。荆条、侧柏-刺槐和榆树-紫穗槐这 3 种植被类型煤矸石风化物中全磷含量中下属四级(0.4—0.6 g/kg),荆条丛煤矸石风化物总磷含量最大为 0.54 g/kg。其它植被类型煤矸石风化物总磷含量低(图 3)。

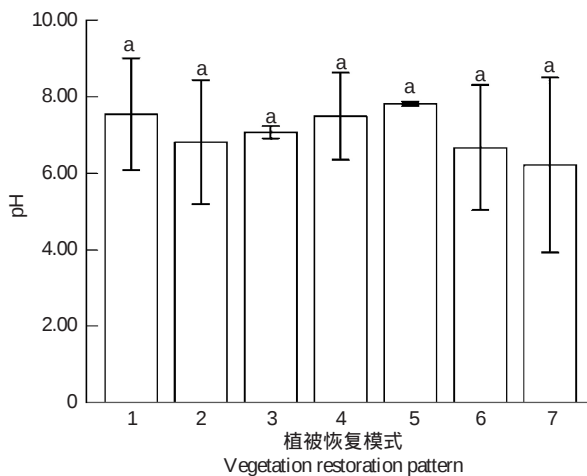


图1 不同植被恢复模式下煤矸石风化物 pH 值

Fig. 1 pH of weathered coal gangue under different restoration patterns

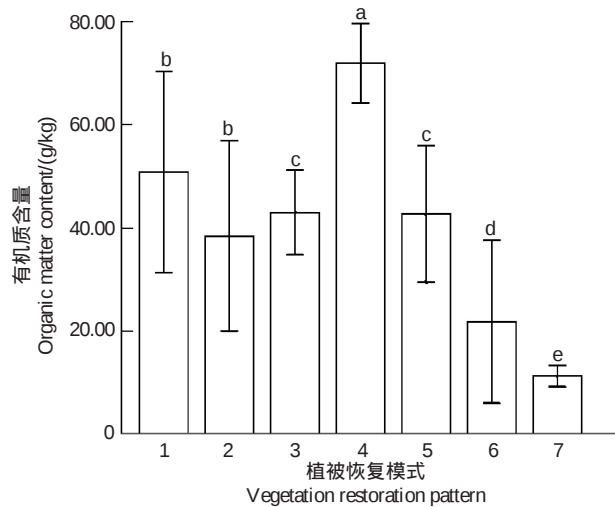


图2 不同植被恢复模式下煤矸石风化物有机质

Fig. 2 Organic matter of weathered coal gangue under different restoration patterns

6种植被类型煤矸石风化物中速效养分含量均有增加趋势。除草本植被碱解氮含量(34.32 mg/kg)低外,乔木林和灌木丛下碱解氮含量基本一致。荆条和侧柏-刺槐恢复模式下速效磷含量显著优于其它植被类型。荆条林、榆树-紫穗槐和侧柏-刺槐,这3种植被类型有利于煤矸石风化物速效钾的积累(图4)。表明矸石山的植被恢复促进矸石的风化和养分的释放,但其养分条件仍然较差并且很不平衡。其矸石风化物中碱解氮、速效磷含量呈增加的趋势,主要与复垦后土壤结构、环境变化、植物生物量增加有利于氮磷积累有关。另外在阳泉复垦区矸石是以碳质、泥质、砂质页岩为主,由于受季风气候、生物和人为因素的影响,矸石风化程度不同。在风化过程中,矸石所含钾、钠等盐基物质被不断释放,也不断地被地表植物吸收利用及淋失^[18]。矸石风化程度、植物吸收利用以及淋溶作用使得复垦区矸石风化物中养分不平衡。

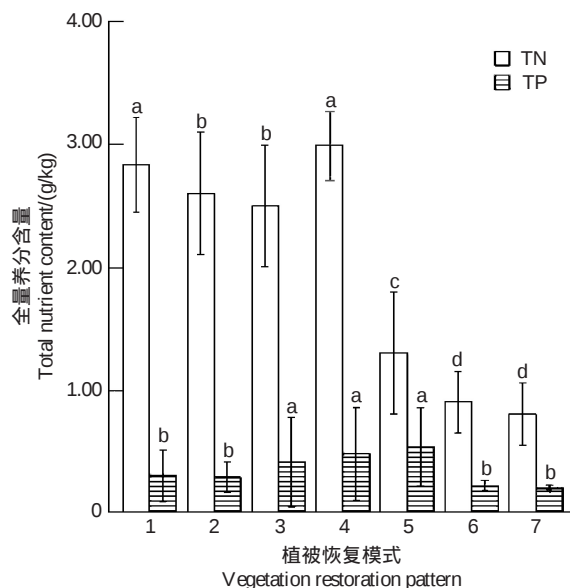


图3 不同植被恢复模式下煤矸石风化物全量养分

Fig. 3 Total nutrient of weathered coal gangue under different restoration patterns

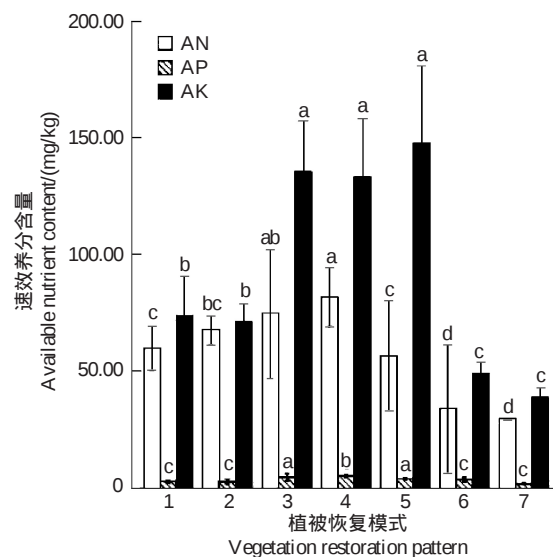


图4 不同植被恢复模式下煤矸石风化物速效养分

Fig. 4 Available nutrient of weathered coal gangue under different restoration patterns

2.4.3 煤矸石风化物理化指标的相关性

不同植被类型下煤矸石理化性质的相关分析表明,煤矸石风化物容重与矸石风化物机械组成中的小粒径颗粒($d \leq 1\text{mm}$)比重呈负相关($P < 0.01$),与大粒径颗粒($3 < d < 10\text{mm}$)比重呈正相关,与煤矸石风化物的主要养分指标呈显著负相关($P < 0.001$)。风化物有机质与容重呈显著负相关($r = -0.845, P < 0.01$),与风化物颗粒($d < 0.5\text{mm}$)呈显著正相关($r = 0.804, P < 0.01$)。说明煤矸石的风化物容重大小对煤矸石养分含量具有明显的指示作用。

表 6 煤矸石风化物理化指标相关分析

Table 6 Correlation among properties of the weathered coal gangue

	BD	10mm	10—3mm	3—1mm	1—0.5mm	<0.5mm	pH	OM	TN	TP	AN
BD	1										
10mm	0.895 **	1									
10—3mm	0.841 **	0.881 **	1								
3—1mm	-0.169	-0.326	-0.452 *	1							
1—0.5mm	-0.724 **	-0.746 **	-0.751 **	-0.058	1						
<0.5mm	-0.748 **	-0.778 **	-0.811 **	0.372 *	0.702 **	1					
pH	-0.511 **	-0.482 *	-0.535 **	0.164	0.410 *	0.344	1				
OM	-0.845 **	-0.878 **	-0.853 **	0.330	0.763 **	0.804 **	0.501 *	1			
TN	-0.894 **	-0.886 **	-0.808 **	0.081	0.845 **	0.759 **	0.409 *	0.908 **	1		
TP	-0.546 **	-0.534 **	-0.476 *	0.206	0.267	0.486 *	0.408 *	0.491 *	0.359	1	
AN	-0.875 **	-0.868 **	-0.839 **	0.173	0.755 **	0.757 **	0.523 **	0.868 **	0.884 **	0.596 **	1
AP	-0.455 *	-0.418 *	-0.362	0.264	0.008	0.213	0.476 *	0.266	0.170	0.749 **	0.453 *
AK	-0.714 **	-0.677 **	-0.629 **	0.245	0.362	0.527 **	0.572 **	0.589 **	0.517 **	0.871 **	0.763 **

BD:容重 Bulk density; TP:土壤孔隙度 Soil porosity; TN:全氮 Total N; TP:全磷 Total P; AN: 碱解氮 Available nitrogen; AP 速效磷 Available phosphorus; AK 速效钾 Available potassium; OM:有机质 Organic matter; 石块 10mm;粗砾 10—3mm;细砾 3—1mm;粗砂 1—0.5mm;中砂以下粒级 <0.5mm; * * 表示在 0.01 水平上显著, * 表示在 0.05 水平上显著

有机质含量与全氮(0.908 **)、速效氮(0.868 **)、速效钾(0.589 *)呈显著负相关。与总磷(0.491 *)呈正相关。矸石风化物与其他主要理化指标存在显著的正相关关系(表 6)。

2.4.4 不同植被恢复模式下煤矸石风化物重金属含量变化特征

本试验区,煤矸石风化物 pH 值的范围为 6.5—7.5,依据国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)^[1],土壤重金属评价标准可知,在不同植被类型下煤矸石风化物中测定的 7 个重金属指标中,Cd,As 含量均超过国家环境质量的二级标准,其它重金属含量未超标。从表 7 看出,植被恢复对降低煤矸石风化物重金属含量起到一定作用,但植被恢复也造成了煤矸石风化物重金属 Pb 的释放。

表 7 不同植被类型下煤矸石风化物重金属含量(mg/kg)

Table 7 Heavy metal content of the weathered coal gangue in different vegetation conditions

植被类型 Vegetation types	铅 Pb	铜 Cu	锌 Zn	铬 Cr	镉 Cd	汞 Hg	砷 As
刺槐 PRP	38.86 a	54.88b	34.20f	32.49f	0.66b	0.09b	33.56b
刺槐-柠条 MRC	27.84b	59.13a	62.28d	57.78b	0.61c	0.06e	32.50c
榆树-紫穗槐 MUA	20.08e	47.28c	61.05e	53.65d	0.66b	0.15a	32.79c
侧柏-刺槐 MPR	23.28c	55.94b	82.82b	35.28e	0.63c	0.07c	27.72d
荆条 PVH	22.92d	51.52b	70.29c	54.40c	0.68b	0.08b	30.43c
紫花苜蓿 GMS	23.28c	60.61a	82.82b	35.28e	0.72b	0.07c	37.71b
荒草裸地 CK	16.84f	64.30a	86.88a	62.79a	0.81a	0.06d	43.60a
土壤评价标准 Soil evaluation standard	300	100	250	200	0.6	0.5	30

通过 LSD 法差异显著性分析表明,与荒草裸地相比,不同植被恢复对减低超标重金属含量有显著的作用。不同植被对减低重金属含量的作用有差别,(榆树-紫穗槐)植被恢复模式对减低重金属 Cd 含量最好,其次是(侧柏-刺槐)模式,显著优于其它植被恢复模式。草本模式最差。对于超标重金属 As 的修复而言,(侧柏-刺槐)效果最显著,基本达到煤矸石风化物中重金属 As 不超标。乔灌混交模式优于乔木纯林(刺槐)对重金属 As 的吸附作用。

2.4.5 不同植被恢复模式下煤矸石风化物理化指标与重金属的主成分分析

综合上述不同植被恢复模式下煤矸石风化物的物理指标(容重、总孔隙度、不同粒径组成中石块、粗砾、细砾、粗砂和中砂以下粒级)、化学指标(pH、有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾)和重金属(Pb、Cu、Zn、Cr、Cd、Hg、As)共 21 项指标,进行主成分分析,提取出四个主成分变量(表 8)。提取出的前 4 个综合指标的累计贡献率达到 93.094%,表明提取出的前 4 个综合指标能代表 21 个单项指标的绝大部分信息,可以用这 4 个主成分对不同植被恢复模式下煤矸石风化物理化性质和重金属进行概括分析。

表 8 不同植被恢复模式下煤矸石风化物中各指标主成分分析

Table 8 Principal component analysis of every index of the weathered coal gangue in different vegetation conditions						
成分 Component	提取平方和载入 Extraction sums of squared loadings			旋转平方和载入 Rotation Sums of squared loadings		
	特征根 λ Eigenvalues	贡献率/% % of Variance	累积贡献率/% Cumulative	特征根 Eigenvalues	贡献率/% % of Variance	累积贡献率/% Cumulative/%
1	12.683	60.393	60.393	8.256	39.312	39.312
2	2.805	13.356	73.749	4.579	21.807	61.119
3	2.200	10.478	84.227	4.562	21.726	82.845
4	1.862	8.867	93.094	2.152	10.249	93.094

通过综合评价公式,得出 6 种不同植被恢复模式改良煤矸石山复垦效果的排名,计算方法是,用每个主成分的特征根作权重加总,用公式表示即为:

$$f = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} f_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} f_2 + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} f_3 + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} f_4$$

式中, f 为综合评价价值; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 为特征根值; f_1, f_2, f_3, f_4 为主成分值。

根据上述公式,计算出综合评价价值,从而可知煤矸石山植被恢复模式评价结果如下表 9 所示。

表 9 不同植被恢复模式综合评价价值及排序

Table 9 Comprehensive appraise value and sequencing of different vegetation conditions						
植被恢复模式 Vegetation pattern	各主成分值 Every factor value				综合评价价值 f Comprehensive appraise value	排名 Rank
	f_1	f_2	f_3	f_4		
侧柏-刺槐 MPR	1.05419	0.09338	0.87157	1.45421	0.93	1
刺槐-柠条 MRC	0.91499	0.17936	-0.88631	-0.04419	0.52	2
榆树-紫穗槐 MUA	0.35835	0.42728	0.94113	-1.89018	0.22	3
刺槐 PRP	0.63368	-1.33488	-1.01256	-0.28829	0.08	4
荆条 PVH	-0.60625	-0.03588	1.21897	0.37786	-0.23	5
紫花苜蓿 GMS	-0.74101	1.70803	-1.02265	0.25994	-0.33	6
裸地 CK	-1.61396	-1.03729	-0.11014	0.13065	-1.2	7

不同植被恢复模式改良煤矸石山风化物效果依次为:侧柏-刺槐(0.93)>刺槐-柠条(0.52)>榆树-紫穗槐(0.22)>刺槐(0.08)>荆条(-0.23)>紫花苜蓿(-0.33)>裸地(-1.2)。表明针阔混交林(侧柏-刺槐)改良煤矸石效果最佳,其次是乔木模式(刺槐-柠条、榆树-紫穗槐、刺槐),单纯的灌木(荆条)和草本模式(紫花苜蓿)改善效果不明显,但是通过植被恢复,有植被覆盖的煤矸石山的立地条件均优于裸地。

3 讨论

3.1 煤矸石山不同植被类型对复垦土壤理化性质的影响

退化生态系统系统的恢复,应注重植被群落结构,从而有效地加快土壤理化性质的恢复进程^[19]。不同的植被类型可以使土壤质量发生明显改变^[20]。土壤养分含量受植被类型因素的影响^[21-22],相对于乔木林,灌草丛容重最高,土壤持水量和孔隙度较低,表明乔木植被能有效改善土壤的质地和结构^[23]。乔木林中,种植针阔混交林能使土壤疏松,结构得到改善,土壤持水量和孔隙度较高。表明针阔混交林具有改良土壤结构的潜力较强。孙海运等^[24]对复垦 5a 的马家塔矿区土壤研究表明,复垦种植不同植被土壤质量差异较大,种植牧草杨树较好,针叶树较差。其主要原因是调查样地中针叶林为纯林,其树冠比阔叶林小并且林下枯落物较少,导致土壤质量低。水土流失是土壤养分流失的重要途径^[25]。乔木林水土保持效果明显,乔木林下复垦土壤持水能力强,土壤侵蚀减少,养分流失小,这可能是乔木林土壤养分较高的重要原因之一^[26]。本研究的多个植被类型分布于同一气候和地质背景条件下,它们表层土壤间 pH 值、有机质和有效养分含量及物理性能存在显著差异,表明不同植被恢复模式对土壤改良作用的积累效果存在差异,也说明煤矸石山植被对复垦土壤的改良效果是不可忽视的。

3.2 不同植被类型对煤矸石风化物理化性质的影响

植被的建立是煤矸石山土壤形成的必要条件,也是煤矸石山土壤重构的重要内容。植被对煤矸石山土壤的加速形成具有重要影响,大大加速了矸石风化物成土过程。与荒草裸地相比,植被对矸石风化物容重和机械组成改善作用依次为针阔混交林>乔灌木>乔木纯林>灌木林>草本。植被的恢复减少了煤矸石风化物中石砾和石块的比例,增大了砂砾以下细粒的比重,从而减小了风化物的容重。张光灿^[27]等认为:植被具有明显改善矸石风化物理化性质的作用,许多国外研究也得出相似的结论,并认为不同树种改善风化物性质的能力不同^[28-29]。Suqing Li 等^[30]对在山西阳泉三矿 9 号煤矸石废弃地 3 种植被类型刺槐,旱地麦草,紫云英对煤矸石风化物的影响研究表明,在刺槐林下,煤矸石风化物粒径小于 3mm 所占比重为 66.7%,在沙生麦草、紫云英草本下,煤矸石风化物粒径小于 3mm 所占比重分别为 40.8%、57.1%。而对于速效养分 N、P、K 而言,草本紫云英煤矸石风化物中含量高于乔木林刺槐,其主要原因是为了快速建立植被防止水土流失,在该复垦区采取覆盖施入污泥、污水作为土壤添加剂恢复土壤肥力和提高土壤生产力的化学复垦措施,有机废弃物如污水污泥作为土壤添加剂在某种程度上充当一种缓释营养源。施用有机肥作基肥对紫云英的幼苗生长,根瘤发育和全苗有很好的促进作用,起到了很好的固氮作用,是紫云英植被下速效 N 含量高的原因所在。矸石风化物有机质在养分循环中起着关键作用,不同植被恢复模式下矸石养分与物理性质是一致的,良好的养分循环与积累也必须以良好的物理性能为基础和载体。不同植被模式下主要理化指标之间密切相关,因此在该区植被恢复过程中,全面提高林地地力及改善土壤结构尤为重要。

3.3 不同植被对煤矸石风化物中重金属变化的影响

矿区土壤植物修复是一种主要利用植物去除和消减污染物的环境治理技术,与传统的化学、物理和工程等修复措施相比,它具有投资成本低、操作简便,具有潜在经济效益等优点,更适应环境保护的要求。煤矸石风化物中不仅含有植物生长发育必需的大量矿质元素和一些微量元素,而且含有大量 As、Hg、Zn、Cu、Pb、Cr、Cd 等重金属元素。随着煤矸石的风化,重金属也会释放。选择适当的植物种类可以在重金属污染土壤上生存的植物,对于矿区土地的复垦至关重要。通常要选择抗旱型的、能在重金属污染和营养缺乏的土壤上快速生长的树木或草本植物。Dutta^[31]对生长在煤矸石废弃地 4 年生桉树(*Eucalyptus hybrid*)、铁刀木(*Cassia siamea*)和阿拉伯胶树(*Acacia auriculiformis*)这 3 种林下土壤中重金属(Cd、Ni、Mn、Cr、Pb 和 Zn)进行调查发现,除了 Cd,铁刀木(*Cassia siamea*)林地的其他重金属元素浓度都较高,而桉树和阿拉伯胶树林地重金属含量最小,表现出对重金属较强的吸纳能力。调查还发现,除了 Mn,其他重金属元素在不同林地与对照相比,都有明显地减小。Petra M. Bleeker^[32]等对植物在煤矸石山重金属的耐受性研究表明,剪股颖(*Agrostis castellana*)和绒毛草(*Holcus lanatus*)对重金属 As 的耐受能力强。Hector M. Conesa^[33]研究表明,松叶菊(*Asparagus*

horridus L.)、兔耳草 (*Helichrysum decumbens* (Lag.) Camb)、甜菜 (*Beta vulgaris* L.) 和地中海白松 (*Pinus halepensis* Miller) 对重金属有较强的忍耐性。樊金拴^[34]研究表明:植物对矿区 As 吸收能力以侧柏能力最强,其次是刺槐,再次是臭椿和白榆。以上研究主要集中在单一林分或草本植被模式对重金属的耐受和净化方面。本试验区,在不同植被类型下煤矸石风化物中重金属 Cd、As 含量超过国家环境质量二级标准。植被吸收有毒元素的能力,因植物种类不同而异 (Dutta)^[31]。植物吸收 As 元素的能力,侧柏和刺槐混交模式最好。(榆树-紫穗槐)复合林分恢复模式对减低重金属 Cd 含量最好,其次是(侧柏-刺槐)模式,显著优于其它植被恢复模式。草本模式最差。因此,在煤矸石山植被恢复过程中,(侧柏-刺槐)模式和(榆树-紫穗槐)对优化构建土壤剖面,消除污染,改善土壤环境质量意义重大。

4 结论

4.1 煤矸石山上种植植被可使土壤容重、土壤持水量和孔隙度明显改善。乔木植被恢复模式更明显。矸石山植被恢复后,可明显增加土壤养分含量。不同植被模式下,土壤养分增加存在显著差异。侧柏-刺槐和榆树-紫穗槐混交模式效果较好。

4.2 植被对煤矸石容重和机械组成改善作用依次为针阔混交林>乔灌林>乔木纯林>灌木林>草本。植被对煤矸石风化物全氮和有机质积累依次为:侧柏-刺槐>刺槐>刺槐-柠条>榆树-紫穗槐>荆条>紫花苜蓿。荆条林下煤矸石风化物全 P 含量最大。荆条林与侧柏-刺槐混交林利于速效 P 的积累。对速效 K 积累有利植被类型是荆条林与榆树-紫穗槐混交林。

4.3 植被种植可以减低煤矸石风化物中重金属含量。榆树-紫穗槐混交模式对减低超标重金属 Cd 效果好,其次是针阔混交林(侧柏-刺槐)。对于超标重金属 As 而言,侧柏-刺槐模式优于其它植被模式,基本达到重金属 As 不超标。

致谢: 感谢山西农业大学韩有志和王良民教授及北京轻工业环境保护研究所张成梁高工对本文写作的帮助。

References:

- [1] Hu Z Q, Li P B, Zhang G C. Coal Waste Pile Reclamation. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006: 136-144.
- [2] Oyonarte C, Aranda V, Durante P. Soil surface properties in Mediterranean mountain ecosystems: effects of environmental factors and implications of management. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(2): 156-165.
- [3] Hopmans P, Bauhus J, Khanna P, Weston C. Carbon and nitrogen in forest soils: potential indicators for sustainable management of eucalypt forests in South-Eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 75-87.
- [4] Tang B, Liu S R, Cai D X, Lu L H, He R M, Gao Y X, Di W Z. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [5] Huang C Y. *Agrology*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [6] Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 2002, 59(3): 233-253.
- [7] Hu Z Q, Zhang G C, Bi Y L, Wei Z Y. Stand productivity and ecological effects of black locust in a coal waste pile. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 621-628.
- [8] Wang X F, Cai T J. Study of substrate amendment in coal-gangue pile of Jixi coal mine. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 134-139.
- [9] Pedrol N, Puig C G, Souza P, Forján R, Vega F A, Asensio V, González L, Cerqueira B, Covelo E F, Andrade L. Soil fertility and spontaneous revegetation in lignite spoil banks under different amendments. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 134-142.
- [10] Liu G H, Shu H L, Zhang J C, Zhang X C. Research on the model of revegetation in mine spoils of Mufu mountain in Nanjing. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1): 141-144.
- [11] Hao R, Bai Z K, Zhao J K, Peng S L, Song Y T. Vegetation dynamics during plant rehabilitation in degraded mined land of large opencast coal mine within loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 22(8): 1470-1476.
- [12] Guo X Y, Zhang J T, Gong H L, Zhang G L, Dong Z. Species abundance pattern of artificial vegetation in Antaibao open mine. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(3): 118-121.
- [13] Wang X C, Cai T J, Gu J F. Effects of soil properties on vegetation restoration in coal-gangue pile in Jixi area, China. *Acta Ecologica Sinica*,

- 2007, 27(9): 3744-3751.
- [14] Zhang C L. The Habitat and Vegetation Constructing for Spontaneous Combustion Gangue Pile in Yangquan, Shanxi Province. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [15] Wang B, Zhao G D, Su T C, Li G, Bai X L. A study on vegetation restoration technique in extreme difficult sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 151-154.
- [16] Bao S D. *Soil Agro-Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [17] Yao R J, Yang J S, Chen X B, Zou P, Zhao X F. Classification and fuzzy synthetic evaluation of soil nutrient at plough horizon in coastal region of north Jiangsu province. *Soil and Fertilizers Sciences in China*, 2009, (4): 16-20.
- [18] Ding Q B, Wang Q B, Wei Z Y, Han C L, Wang H L, Wang X F. Soil nutrients and organic carbon contents with different reclamation years in the colliery area s of Fushun City. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 262-267.
- [19] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, Zhang T H, Guo Y R, Li Y Q, Huang Y X. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China. *Plant and Soil*, 2009, 318(1/2): 153-167.
- [20] Turrión M B, López O, Lafuente F, Mulas R, Ruipérez C, Puyo A. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. *Science of the Total Environment*, 2007, 378(1/2): 195-198.
- [21] Pedrol N, Puig C G, Souza P, Forjón R, Vega F A, Asensio V, González L, Cerqueira B, Covelo E F, Andrade L. Soil fertility and spontaneous revegetation in lignite spoil banks under different amendments. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 134-142.
- [22] Ren X X, Cai T J, Wang X F. Effects of vegetation restoration models on soil nutrients in an abandoned quarry. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 151-154.
- [23] Tripathi N, Singh S R. Influence of different land uses on soil nitrogen transformations after conversion from an Indian dry tropical forest. *Catena*, 2009, 77(3): 216-223.
- [24] Sun H Y, Li X J, Hu Z Q, Liu X R, Zhong W J. Variance of reclamation soil quality in Majiata opencast mine region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 205-209.
- [25] Syversen N. Effect and design of buffer zones in the Nordic climate: the influence of width, amount of surface runoff, seasonal variation and vegetation type on retention efficiency for nutrient and particle runoff. *Ecological Engineering*, 2005, 24(5): 483-490.
- [26] Wang L Y, Zhang C L, Han Y Z, Pei Z Y. Effects of different vegetation restoration patterns in Gangue Pile on soil erosion and nutrient loss. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(2): 93-99.
- [27] Zhang G C, Liu X, Wang Y. Effect of vegetation and soil hydrology in the ecological reconstruction process in weathered coal gangue dump. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 20-23, 99.
- [28] De S, Mitra A K. Reclamation of mining-generated wastelands at Alkusha-Gopalpurahandoned open cast project, Raniganj Coalfield, Eastern India. *Environmental Geology*, 2002, 43(1/2): 39-47.
- [29] Dutta R K, Agrawal M. Effect of tree plantations on the soil characteristics and microbial activity of coal mine spoil land. *Tropical Ecology*, 2002, 43(2): 315-324.
- [30] Li S Q, Wu D M, Zhang J T. Effects of vegetation and fertilization on weathered particles of coal gob in Shanxi mining areas, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 124(1/3): 209-216.
- [31] Dutta R K, Agrawal M. Impact of plantations of exotic species on heavy metal concentrations of mine spoils. *Indian Journal of Forestry*, 2001, 24(3): 292-296.
- [32] Bleeker P M, Assunção A G L, Teiga P M, de Koe T, Verkleij J A C. Revegetation of the acidic, As contaminated Jales mine spoil tips using a combination of spoil amendments and tolerant grasses. *The Science of the Total Environment*, 2002, 300(1/3): 1-13.
- [33] Conesa H M, García G, Arnaldos R. Dynamics of metal tolerant plant communities' development in mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain) and their interest for further revegetation purposes. *Chemosphere*, 2007, 68(6): 1180-1185.
- [34] Fan J S. *Studies on Characteristics of Eco-Environment and Vegetation Construction of the Coal Dumping Lands in North China*. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.

参考文献:

- [1] 胡振琪, 李鹏波, 张光灿. 煤矸石山复垦. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 136-144.
- [4] 唐冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮峙. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [7] 胡振琪, 张光灿, 毕银丽, 魏忠义. 煤矸石山刺槐林分生产力及生态效应的研究. *生态学报*, 2002, 22(5): 621-628.
- [8] 王笑峰, 蔡体久. 鸡西矿区矸石山基质改良研究. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 134-139.

- [10] 刘国华, 舒洪岚, 张金池, 张秀春. 南京幕府山矿区废弃地植被恢复模式研究. 水土保持研究, 2005, 12(1): 141-144.
- [11] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 彭少麟, 宋艳墩. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态. 生态学报, 2003, 22(8): 1470-1476.
- [12] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 张桂莲, 董志. 安太堡露天矿区人工植被的物种多度分布分析. 林业科学, 2007, 43(3): 118-121.
- [13] 王晓春, 蔡体久, 谷金锋. 鸡西煤矿矸石山植被自然恢复规律及其环境解释. 生态学报, 2007, 27(9): 3744-3751.
- [14] 张成梁. 山西阳泉自然煤矸石山生境及植被构建技术研究. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [15] 王兵, 赵广东, 苏铁成, 李刚, 白秀兰. 极端困难立地植被综合恢复技术研究. 水土保持学报, 2006, 20(1): 151-154.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [17] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 邹平, 赵秀芳. 苏北海涂围垦区耕层土壤养分分级及其模糊综合评价. 中国土壤与肥料, 2009, (4): 16-20.
- [18] 丁青波, 王秋兵, 魏忠义, 韩春兰, 王洪禄, 王晓峰. 抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特性研究. 土壤通报, 2007, 38(2): 262-267.
- [22] 任小旭, 蔡体久, 王笑峰. 不同植被恢复模式对矿区废弃地土壤养分的影响. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 151-154.
- [24] 孙海运, 李新举, 胡振琪, 刘雪冉, 仲伟静. 马家塔露天矿区复垦土壤质量变化. 农业工程学报, 2008, 24(12): 205-209.
- [26] 王丽艳, 张成梁, 韩有志, 裴宗阳. 煤矸石山不同植被恢复模式对土壤侵蚀和养分流失的影响. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 93-99.
- [27] 张光灿, 刘霞, 王燕. 煤矿区生态重建过程中风化石山植被生长及土壤水文效应. 水土保持学报, 2002, 16(5): 20-23, 99.
- [34] 樊金拴. 中国北方煤矸石堆积地生态环境特征与植被建设研究. 北京: 北京林业大学, 2006.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 21 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Landscape spatial analysis of a traditional tibetan settlement based on landscape pattern theory and feng-shui theory; the case of Zhagana, Diebu, Gansu Province	SHI Lisha, YAN Lijiao, HUANG Lu, et al (6305)
Temporal-spatial differentiation and its change in the landscape ecological security of Wuyishan Scenery District	YOU Weibin, HE Dongjin, WU Liyun, et al (6317)
Evaluation of eco-sustainability of roads in a tourism area; a case study within Yulong County	JIANG Yiyi (6328)
Study on the compactness assessment model of urban spatial form	ZHAO Jingzhu, SONG Yu, SHI Longyu, et al (6338)
A multi-scale analysis of red-crowned crane's habitat selection at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China	CAO Mingchang, LIU Gaohuan, XU Haigen (6344)
Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China	FAN Feide, WANG Kelin, XIONG Ying, et al (6353)
Construction of an eco-environmental database for watershed-scale data; an example from the Tarim River Basin	GAO Fan, YAN Zhenglong, HUANG Qiang (6363)
Reproductive allocation in dioecious shrub, <i>Rhamnus davurica</i>	WANG Juan, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai, et al (6371)
Age-dependent growth responses of <i>Pinus koraiensis</i> to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China	WANG Xiaoming, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (6378)
Fine-scale spatial point patterns of <i>Stipa krylovii</i> population in different alpine degraded grasslands	ZHAO Chengzhang, REN Heng, SHENG Yaping, et al (6388)
Community structure and population regeneration in remnant <i>Ginkgo biloba</i> stands	YANG Yongchuan, MU Jianping, TANG Cindy Q., et al (6396)
Reproductive characteristics and adaptive evolution of pin and thrum flowers in endangered species, <i>Primula merrilliana</i>	SHAO Jianwen, ZHANG Wenjuan, ZHANG Xiaoping (6410)
Leaf functional traits of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia	LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, et al (6420)
Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile	WANG Liyan, HAN Youzhi, ZHANG Chengliang, et al (6429)
Influence of fire on stands of <i>Pinus massoniana</i> in a karst mountain area of central Guizhou province	ZHANG Xi, CHUI Yingchun, ZHU Jun, et al (6442)
Morphological and physiological adaptation of <i>Caragana</i> species in the Inner Mongolia Plateau	MA Chengcang, GAO Yubao, LI Qingfang, et al (6451)
A comparative study on reasons of degenerated of <i>Haloxylon ammodendron</i> population in the western part of Gurbantunggut desert	SI Langming, LIU Tong, LIU Bin, et al (6460)
Self-thinning of natural broadleaved forests in Baishilazi Nature Reserve ...	ZHOU Yongbin, YIN You, YIN Mingfang, et al (6469)
Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province	ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai (6481)
The relationship between the occurrence of Colorado Potato Beetle, <i>Leptinotarsa decemlineata</i> , and rivers based on GIS: a case study of Shawan Country	LI Chao, ZHANG Zhi, GUO Wenchao, et al (6488)
Occurrence dynamics and trajectory analysis of <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010	JIANG Chunxian, QI Huihui, SUN Mingyang, et al (6495)
Adaptability of B-biotype <i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius) to Host Shift	ZHOU Fucui, LI Chuanming, GU Aixiang, et al (6505)
Structural change analysis of cecal bacterial flora in different poultry breeds using PCR-DGGE ...	LI Yongzhu, Yongquan Cui (6513)
Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities	ZHANG Hong, SHEN Zhangjun, YANG Guide, et al (6522)
Physiological response of <i>Microcystis</i> to solar UV radiation	WANG Yan, LI Shanshan, LI Jianhong, et al (6532)
Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates	WANG Yan, LI Ruixiang, DONG Shuanglin, et al (6540)
The community structure and abundance of microcystin-producing cyanobacteria in surface sediment of Lake Taihu in winter	LI Daming, KONG Fanxiang, YU Yang, et al (6551)
Influence of green belt structure on the dispersion of particle pollutants in street canyons	LIN Yinding, WU Xiaogang, HAO Xingyu, et al (6561)
Spatio-temporal variation analysis of urbanization and land use benefit of oasis urban areas in Xinjiang	YANG Yu, LIU Yi, DONG Wen, et al (6568)
Nitrate contamination and source tracing from NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ in groundwater in Weifang, Shandong Province	XU Chunying, LI Yuzhong, LI Qiaozhen, et al (6579)
The impact of rising temperature on spring wheat production in the Yellow River irrigation region of Ningxia	XIAO Guoju, ZHANG Qiang, ZHANG Fengju, et al (6588)
A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy	LIANG Liang, YANG Minhua, DENG Kaidong, et al (6594)
The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River	ZHANG Hui, YANG Zhengli, LUO Liangguo, et al (6606)
Review and Monograph	
Research perspective for the effects of nitrogen deposition on biogenic volatile organic compounds	HUANG Juan, MO Jiangming, KONG Guohui, et al (6616)
Recruitment limitation of plant population: from seed production to sapling establishment	LI Ning, BAI Bing, LU Changhu (6624)
Scientific Note	
Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes	DU Chengfeng, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (6633)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 21 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 21 2011

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 70.00 元