

DOI: 10.5846/stxb201409111807

郝婧, 郭东罡, 上官铁梁, 刘卫华, 张婕, 张沛沛. 煤矸石场植被恢复初期生态绩效评价. 生态学报, 2016, 36(7): - - .

Hao J, Guo D G, Shangguan T L, Liu W H, Zhang J, Zhang P P. Ecological performance assessment on early plant reclamation in coal gangue yard. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - - .

煤矸石场植被恢复初期生态绩效评价

郝 婧¹, 郭东罡¹, 上官铁梁^{1,2,*}, 刘卫华², 张 婕³, 张沛沛⁴

1 山西大学环境与资源学院, 太原 030006

2 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006

3 山西大学生命科学学院, 太原 030006

4 山西潞安矿业集团司马煤业有限公司, 长治 047105

摘要:以山西潞安矿业集团司马煤业有限公司煤矸石场生态恢复 5 年内(2009—2013 年)的植被-土壤系统为研究对象,在固定监测样地调查的基础上,以空间变化代替时间变化,对煤矸石场人工种植乔木层条件下,草本植物自然恢复初期的生态绩效进行了评价,结果表明:1)相较于一年恢复期,煤矸石场植被恢复初期植物群落基本特征、土壤物理性质、土壤化学性质及其综合生态绩效在五年恢复期时均达到了“优”级水平;2)在足够长的恢复期内,人工种植乔木层条件下,草本植物的自然恢复可以实现矿区的植被重建;3)基于 AHP-FCE 评价模型,以一年恢复期为基准,通过各恢复期生态指标与一年恢复期相比的恢复程度设定绩效等级,对煤矸石场植被恢复初期的生态绩效进行评价,避免了以往选取天然次生群落为恢复目标,但又不确定其是否为最佳恢复效果的盲目性,为生态绩效评价提供了新思路。

关键词:煤矸石场;恢复初期;生态绩效;评价

Ecological performance assessment on early plant reclamation in coal gangue yard

HAO Jing¹, GUO Donggang¹, SHANGGUAN Tieliang^{1,2,*}, Liu Weihua², ZHANG Jie³, ZHANG Peipei⁴

1 College of Environmental and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

3 College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

4 Si'ma Coal Mining Limited Company of Shanxi Lu'an Mining Group, Changzhi 047105, China

Abstract: This study monitored the five-year dynamics of the plant-soil system in the coal gangue yard at Sima Coal Mine of Lu'an Group from 2009 to 2013. The fixed plots were established to use spatial dynamics to represent temporal changes. The assessment was made on the communities characteristics, soil physical and chemical properties, and the comprehensive ecological performance of the plant communities at the early phase of reclamation after reforestation. The results were as follows: 1) The evaluation criterion of ecological performance included five ranks: "Optimal", "Fine", "Middle", "Low", "Lower" at the early stage of restoration on coal waste pile. Referential to the first year, the five-year recovery achieved the "Optimal" rank according to the communities characteristics, soil physical and chemical properties, and the comprehensive ecological functions in the reclaimed coal gangue yard. Notwithstanding the ecological performance of natural secondary community also showing the "Optimal" rank in this study, natural secondary community was not the perfect object for reforestation. This result predicted that the ecological performance of reforestation in coal gangue yard might be better than natural secondary community with recovery age. 2) Given sufficient time, the reforestation and the spontaneous

基金项目:煤矿塌陷及废弃地复垦的生态绩效研究项目(1103100301)

收稿日期:2014-09-11; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sgtl_55@163.com

herbal recovery would achieve the goal of vegetation reconstruction in the mining area. 3) By employing the AHP-FCE model, using the first-year as benchmark, the performance criteria could be made for ranking the ecological performance in the early phases of reclamation. This was advantageous over the traditional method that taken natural secondary communities as the reclamation goal, whose optimism was usually questionable for high uncertainty. In this regard, this study attempted to provide an innovative way in the practice of ecological performance assessment. Moreover, this paper would play an actively model-driven role in advancing the scientific implementation, management, and evaluation of the ecological restoration in the coal gangue yard.

Key Words: Coal gangue yard; the early plant reclamation; ecological performance; assessment

煤炭在我国能源结构中居首要地位,今后仍将是能源供给的主要来源,煤矿开采产生的生态影响,如煤矸石占压土地并污染环境、植被景观被破坏、地表塌陷等,已成为制约区域可持续发展亟待解决的问题,再加上生态恢复所需时间较长、涉及面较广,故其重要性和紧迫性已受到社会的广泛关注^[1-2]。

当前,在煤矿废弃地生态恢复的研究上,国外尚未提出通用于矿区损毁土地生态恢复绩效的评价体系^[3],但存在某些公认的评价指标^[4],如生物物种数以及生物量的增加速度、土壤理化性质、小气候以及地下水位变化等^[5-10]。而我国在生态恢复绩效评价方面的研究特点为:1)恢复绩效的现状评价较多,即主要集中于植物群落、土壤理化性质等某类生态因子恢复绩效的单一现状评价^[11-14],集中于定性指标(如生境复杂性、土地资源节约利用状况等)与少量定量指标(如土地复垦率、植被覆盖率等)相结合的现状评价^[4,15-17],注重于生态、经济、社会等综合绩效,却简化了生态绩效的现状评价^[18-19];2)恢复绩效的动态评价不足,即虽建立了动态综合评价标准,但群落特征指标中均缺乏,如群落物种相似性、群落物种消长、群落稳定性等能详细描述群落整体特征的指标,评价指标体系尚不系统^[20-21]。

对于评价方法,国内外通常采用层次分析法、模糊综合评价法、主成分分析法、聚类分析法、灰色关联度评价等方法^[22-24],且往往选取天然次生群落或人为干扰较小的群落作为恢复目标,但由于缺乏对生态绩效进行长期、系统的定位观测和研究^[12],导致无法确定该恢复目标是否就是最优生态系统,结果造成了评价目标选取的盲目性,尚未形成科学、系统、实用的矿山生态恢复绩效评价标准^[4,12,18,25],对废弃地复垦中的新方法、新技术和方案的应用缺乏理论上的总结和提高,致使矿山生态恢复往往流于形式^[15]。

司马煤业有限公司是山西潞安矿业集团“十五”期间新建的一座现代化矿井,自2006年投产以来,严格遵循“绿色开采、生态和谐”的发展理念,采取边开采边重建的模式,为建设国家级生态示范矿井奠定了坚实的基础,研究该矿区废弃地的生态恢复绩效在长治、山西乃至整个华北地区具有重要的典型性和代表性。

本研究基于恢复生态学的主要理论,以山西潞安矿业集团司马煤业有限公司煤矸石场植被恢复5年内(2009—2013年)的植被-环境系统为研究对象,在固定监测样地调查的基础上,以空间变化代替时间变化^[26-32],对煤矸石场植被恢复初期的生态绩效进行时空尺度监测、对比和判识,建立植被恢复初期生态绩效分析方法,并对恢复绩效进行合理有效的评价,旨在总结适合司马矿乃至长治市煤矿废弃地生态修复的植被构建,提出煤矿废弃地生态绩效评估的可操作性监测和评价指标体系,开发系统的煤矿废弃地植被恢复初期生态绩效评价实用技术,对持续推进矿区生态恢复的科学实施、管理和评估具有积极的示范和辐射带动作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省长治市西南部山西潞安矿业集团司马煤业有限公司井田东北约6 km的苏店镇南天河村东沟,该区属温带大陆性季风气候,四季分明,夏季午间较热,早晚凉爽,昼夜温差较大,春季多风少雨,气候干燥,年平均气温9.1℃,日最高气温37℃,最低气温-29℃,无霜期160 d,冻土深度为50—75 cm,年降水量340.3—832.9 mm,年平均蒸发量1 558 mm,雨季多集中在7、8、9三个月。该区原土壤类型属黄土状石灰性褐

土和黄土质石灰性褐土,植被覆盖度低,并且处在丘陵区,水土流失较其他区严重,属中度侵蚀,侵蚀模数为 500—1 000 t/(km² a)。原地貌主要为沟壑,天然次生植被主要为杠柳(*Periploca sepium*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、白刺花(*Sophora davidii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、羊草(*Leymus chinensis*)和草木犀(*Melilotu officinalis*)等。

该区煤矸石场的排矸工程于 2009、2010、2011 年分 3 期相继完成。排矸场呈 3 个台阶平地,台阶高差 10 m,平台长 50 m,宽 30 m,面积为 1 500 m²,各平台均采取排 3 m 厚煤矸石,压实后覆土 50 cm,最终平台顶覆土 80 cm。覆土取自周边 0—5 m 深的黄土状石灰性褐土和黄土质石灰性褐土。各期均人工栽植规格为无冠幅、株高 3.5 m 的毛白杨(*Populus tomentosa*),并采用株距 1.5 m,行距 2 m 的均匀模式,不采取人工施肥、浇水等管理措施,草本植物群落采取自然恢复。

1.2 样地设置

于 2011 年 8 月在各恢复期平台上,用全站仪建立固定监测样地,样地设在各平台中央划分面积为 20 m×20 m 的区域,并在各区域中设 16 个 5 m×5 m 的样区,三个平台共设 48 个样区。再在每个样区的左下角与右上角分别设一个 1 m×1 m 的草本样方,总共设 96 个。采用 GPS 定位,在矸石场北侧约 1 000 m 处的天然次生群落设置 6 个面积为 1 m×1 m 样方,作为对照样方。

1.3 群落基本特征调查

从 2011 年 8 月至 2013 年 9 月,对各样地进行三期调查,记录各样方中草本植物物种组成、平均高度、多度、盖度,以及毛白杨的高度、胸径、盖度、冠幅。

群落物种消长指数:

群落物种消长指数反映的是群落中物种迁入与迁出的动态变化状况,群落物种消长指数越接近于 1.0,说明群落物种消长越呈现动态平衡,群落物种多样性越趋于稳定。本研究以一年恢复期为基准群落,一年恢复期的物种消长指数按净迁入率计算,并记为 100。

$$C_i = I_i/E_i \quad (i = 2, 3, 4, 5; \text{当 } i = 1 \text{ 时}, C_1 = 100)$$

$$I_i = N_{R_i}/N_1 \times 100\% \quad (i = 2, 3, 4, 5)$$

$$E_i = N_{E_i}/N_1 \times 100\% \quad (i = 2, 3, 4, 5).$$

其中, C_i 为*i*群落物种消长指数; I_i 为*i*群落相对于一年恢复期的净迁入率; E_i 为*i*群落相对一年恢复期的净迁出率; N_{R_i} 为*i*群落相对于一年恢复期迁入的物种数; N_{E_i} 为*i*群落相对于一年恢复期迁出的物种数; N_1 为一年恢复期的物种数。

群落相似性指数:

相似性指数可以用来比较各恢复期群落之间及其与天然次生群落间的物种相似性^[2],本研究采用 Jaccard 相似性指数^[33],对其进行统计分析,计算公式如下:

$$SC = C/(A + B - C) \times 100\%$$

式中,SC 表示两植物群落的相似性指数,A 和 B 分别表示 2 个不同植物群落中的物种总数,C 表示 2 个植物群落中共有的物种数^[2]。

草本植物的重要值:

$$\text{草本植物的重要值}^{[34-35]} = (\text{相对多度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度})/4$$

物种多样性指标:

群落物种多样性指数选取 Shannon-Wiener 指数^[34-36],物种均匀度指数选取 Pielou 指数^[34,36],物种丰富度指数依据群落物种均匀度指数和优势物种的明显程度(通过物种重要值及实际调查情况确定),对群落物种丰富度进行赋值(表 1):

群落稳定性指数:

群落稳定性指数采用 M.Godron 稳定性测定方法^[37-38],将各恢复期及天然次生群落物种相对频度按由大

到小的顺序进行积累排列,并将各群落物种总数取倒数,照此顺序也进行累计排列,使两者一一对应,做出散点图及趋势线,直线 $y = 100 - x$ 与该趋势线的交点即为所求点^[37-38]。Godron 认为(20,80)这一点为群落的稳定点,故交点越接近点(20,80),群落越稳定^[37]。

草本植物生物量测定:

在各恢复期样地及天然次生群落中均选取 3 个 1 m×1 m 的典型小样方,采用完全收获法,将样品装入袋中,带回实验室内进行洗沙,清水冲洗干净后,将根系样品与地上样品分别在 80℃ 恒温箱内烘至恒重,然后在电子天平(精度达 0.01)上称其干重,测定地下和地上生物量^[2]。

1.4 土壤取样与测定

从 2011 年 8 月至 2013 年 9 月,用 GPS 定位,在各平台分别设置 3 个典型取样点,先清除表层植被枯落物,在采样点周围 20cm 处使用直径为 5cm 的土钻取 3 个土样,取样深度为 20cm,最终以 3 个土样的混合土样作为该典型取样点的土样,并将样品装入自封袋中,三个平台共设置 9 个典型样点,每年进行一次重复取样。并在矸石场北侧约 1 000 m 处的天然次生群落设置 3 个典型样点,作为对照样点。

1.4.1 土壤物理性质的测定

土壤含水量采用国家标准 GB 7172-87 进行测定^[39-40];土壤田间持水量采用农业部行业标准 NYT 1121.1-2006 进行测定^[39-40];土壤密度采用农业部行业标注 NYT 1121.4-2006 进行测定^[39-40];土壤总孔隙度通过土壤容重和土壤比重计算获得^[41]。

1.4.2 土壤化学性质的测定

土壤化学性质测定方法参照《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤(1999)主编)和《土壤农化分析》(鲍士旦(2001)主编)^[42],具体如下:有机质、总有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法^[43-44],pH 值的测定采用电位法^[45],全氮的测定采用半微量开氏法^[45],速效磷的测定采用 0.5mol/LNaHCO₃浸提-钼锑抗比色法^[45],速效钾的测定采用 1mol/LNH₄OAc 浸提-火焰光度法^[42]。

1.5 评价方法

依据司马矿煤矸石场各恢复期所形成的群落基本特征、土壤理化性质,建立层次分析法—模糊综合评价(AHP-FCE)模型^[11,18,46-47]。

1.5.1 层次分析法(AHP)

1) 构建指标体系

将绩效评价问题分为 3 个层次,即目标层、准则层和指标层^[46-47]。

目标层:本研究的目标层为对煤矸石场植被恢复初期的生态绩效进行评价。

准则层:本研究以煤矸石场各生态恢复期的群落基本特征、土壤物理性质、土壤化学性质为准则层。

指标层:经过文献查阅和专家咨询,按照科学性、目标性、独立性、全面性和可操作性的原则,本研究选取了群落基本特征、土壤理化性质两大方面共 26 个指标。但由于煤矸石场生态恢复初期各群落垂直结构仅含乔木层和草本层,故在研究中群落基本特征准则层下所含的灌木平均基径、灌木平均高冠比两项指标在此不做考虑(表 2)。

2) 构造判断矩阵并进行层次排序及一致性检验

在所确定的评价体系层次结构的基础上,按照专家打分法构建判断矩阵。本研究邀请了 10 位土壤及生态学方面的专家(副教授及以上),6 位从事司马矿煤矸石场恢复工程的技术人员(高级工程师及以上),在向其详细解释各指标的具体含义、矩阵的概念、打分的目的和方法后,发放打分表,并按照 Santy 的 1—9 标

表 1 群落物种丰富度的赋值及其赋值含义

Table 1 The assignments of species richness and their meanings

赋值 Assignments	含义 Meanings
1	优势种明显,物种均匀度较差
2	优势种明显,物种均匀度较好
3	优势种不明显,物种均匀度较差
4	优势种不明显,物种均匀度较好

群落物种均匀度指数小于 0.95,则认为物种均匀度较差,反之,物种均匀度较好。

度^[11,18,46-47]对指标进行两两比较、打分。

基于判断矩阵,得出各指标及各层次的权重,并将指标层、准则层分别进行层次单排序及一致性检验,最后进行层次总排序及一致性检验^[11,18,46-47](表3—表7),分析发现群落稳定性指数、垂直结构完整性、物种多样性指数、物种丰富度指数、物种消长指数在群落基本特征的评价中起到重要作用(表3);土壤田间持水量在土壤物理性质的评价中占主导地位(表4);土壤有机质、总有机碳、全氮含量会对土壤化学性质产生显著影响(表5);而相对于生态绩效评价,群落基本特征对其的贡献度较土壤理化性质高(表6),其中群落稳定性指数、群落垂直结构完整性、群落物种多样性指数对生态绩效评价的贡献度位居前三位,其权重共计占总权重值的32.32%(表7)。

表 2 评价体系层次结构

Table 2 The hierarchical structure of assessment system

目标层 The objective layer	准则层 The rule layer	指标层 The index layer
煤矸石场植被自然恢复初期生态绩效评价 Ecological performance assessment on early plant reclamation in coal gangue yard	群落基本特征	乔木平均胸径
		乔木平均高冠比
		草本层盖度
		草本平均高度
		草本总生物量
		群落垂直结构完整性
		群落盖度
		群落物种多样性指数
		群落物种丰富度指数
		群落物种消长指数
		群落相似性指数
		群落稳定性指数
	土壤物理性质	土壤平均含水量
		土壤田间持水量
		土壤密度
		土壤总孔隙度
	土壤化学性质	土壤有机质含量
		土壤总有机碳含量
		易氧化有机碳含量
		颗粒有机碳含量
		pH 值
		全氮
		速效磷
		速效钾

表 3 群落基本特征各指标层相对于群落基本特征准则层单排序、一致性检验及权重

Table 3 The single sorting, consistency check and weight of the index layer relative to the rule layer of basic community characteristic

群落基本特征 Basic community characteristic	权重 Weight	单排序 Single sorting
乔木平均胸径 Average DBH of trees	0.0389	8
乔木平均高冠比 Average the ratio height and crown of trees	0.0269	11
草本层盖度 Coverage of herb layer	0.0273	10
草本层平均高度 Average height of herb layer	0.0209	12
草本层总生物量 Total biomass of herb layer	0.0388	9
群落垂直结构完整性 Integrity of vertical structure	0.1784	2
群落盖度 Coverage of community	0.0562	7
群落物种多样性指数 Index of species diversity	0.1040	3
群落物种丰富度指数 Index of species richness	0.0978	4
群落物种消长指数 Index of growth and decline of species	0.0888	5
群落相似性指数变化值 Change of the value of the community similarity	0.0784	6
群落稳定性指数 Index of community stability	0.2436	1

一致性检验,CI=0.134;RI=1.54,CR=0.08。

1.5.2 模糊综合评价(FCE)

依据各指标的权重,对模糊综合评价体系进行建模^[11,18,46-47]。参考专家及技术人员的意见,结合各指标实测数据(表8),将本研究的生态绩效评价层次定为“优、良、中、较差、差”五个等级,并选取一年恢复期为评级基准,将以后各恢复期的评价指标均与一年恢复期相比,并依据恢复程度评判绩效等级(表9)。即该评价标准所针对的评价对象是植被恢复初期的二年恢复期至五年恢复期以及天然次生群落的生态绩效,评价指标是依据各指标在恢复初期5年内的实际变化趋势以及期望变化趋势相结合而设定的,评价指标具体等级数据除群落垂直结构完整性、群落物种丰富度指数、物种消长指数有专门赋值或赋特殊意义外,其余指标等级数据

均依据各恢复期与一年恢复期相比的恢复程度设定,恢复程度越好,评价等级越高,反之,评价等级越低,评价指标具体含义的设定主要包括以下几类:

表 4 土壤物理性质各指标层相对于土壤物理性质准则层的单排序、一致性检验及权重

Table 4 The single sorting, consistency check and weight of the index layer relative to the rule layer of soil physicalproperty

土壤物理性质指标 Index of soil physicalproperty	权重 Weight	单排序 Single sorting
土壤平均含水率 Soil water content	0.1051	4
土壤田间持水量 Soil field capacity	0.5150	1
土壤密度 Soil density	0.1900	2
土壤总孔隙度 Soil total porosity	0.1900	3

一致性检验, CI=0.007; RI=0.89, CR=0.008

表 5 土壤化学性质各指标层相对于土壤化学性质准则层的单排序、一致性检验及权重

Table 5 The single sorting, consistency check and weight of the index layer relative to the rule layer of soil chemical property

土壤化学性质指标 Index of soil chemical property	权重 Weight	单排序 Single sorting
土壤有机质 Soil organic matter	0.2303	1
土壤总有机碳 Soil total organic carbon	0.1688	2
易氧化有机碳 Readily oxidation organic carbon	0.1399	4
颗粒有机碳 Particulate organic carbon	0.0559	8
pH 值 pH	0.0802	6
全氮 Total nitrogen	0.1472	3
速效磷 Available phosphorus	0.1041	5
速效钾 Available potassium	0.0736	7

一致性检验, CI=0.081; RI=1.41, CR=0.058

表 6 准则层相对于目标层的单排序、一致性检验及权重

Table 6 The single sorting, consistency check and weight of the rule layer relative to the objective layer

绩效评价 Performance evaluation	权重 Weight	单排序 Single sorting
群落基本特征 Basic communitycharacteristic	0.6144	1
土壤物理性质 Soil physical property	0.1172	3
土壤化学性质 Soil chemiical property	0.2684	2

一致性检验, CI=0.037; RI=0.52, CR=0.071

表 7 各指标的层次总排序、一致性检验及权重

Table 7 The total sorting, consistency check and weight of each index

绩效评价指标 Index ofperformance evaluation	权重 Weight	总排序 Total sorting
乔木平均胸径 Average DBH of trees	0.0239	14
乔木平均高冠比 Average the ratio height and crown of trees	0.0165	21
草本层盖度 Coverage of herb layer	0.0168	20
草本层平均高度 Average height of herb layer	0.0128	23
草本层总生物量 Total bimass of herb layer	0.0239	15
群落垂直结构完整性 Integrity of vertical structure	0.1096	2
群落盖度 Coverage of community	0.0345	12
群落物种多样性指数 Index of species diversity	0.0639	3
群落物种丰富度指数 Index of species richness	0.0601	6
群落物种消长指数 Index of growth and decline of species	0.0546	7
群落相似性指数变化值 Change of the value of tne community similarity	0.0482	8
群落稳定性指数 Index of community stability	0.1497	1
土壤平均含水率 Soil water content	0.0123	24
土壤田间持水量 Soil field capacity	0.0604	5

续表

绩效评价指标 Index of performance evaluation	权重 Weight	总排序 Total sorting
土壤密度 Soil density	0.0223	16
土壤总孔隙度 Soil total porosity	0.0223	17
土壤有机质 Soil organic matter	0.0618	4
土壤总有机碳 Soil total organic carbon	0.0453	9
易氧化有机碳 Readily oxidation organic carbon	0.0375	11
颗粒有机碳 Particulate organic carbon	0.0150	22
pH 值 pH	0.0215	18
全氮 Total nitrogen	0.0395	10
速效磷 Available phosphorus	0.0279	13
速效钾 Available potassium	0.0197	19
一致性检验, CI=0.105; RI=1.44, CR=0.073		

表 8 煤矸石场植被恢复初期生态绩效评价各指标实测数据

Table 8 The measured data of each ecological performance index at the early stage of restoration on coal waste pile

指标 Index	一年 The first year	二年 The second year	三年 The third year	四年 The four year	五年 The five year	天然次生群落 Natural secondary community
乔木平均胸径 Average DBH of trees/cm	4.89	5.63	9.29	10.80	11.85	—
乔木平均高冠比 Average the ratio height and crown of trees	7.92	10.72	2.80	1.85	2.05	—
草本层盖度 Coverage of herb layer/%	35	30	60	75	80	80
草本平均高度 Average height of herb layer/cm	16.95	22.46	28.23	19.12	15.23	37.56
草本总生物量 Total biomass of herb layer/(g/m ²)	482.51	398.14	621.08	390.50	484.95	620.13
群落垂直结构完整性 Integrity of vertical structure	2	2	2	2	2	1
群落盖度 Coverage of community/%	40	35	65	80	80	80
群落物种多样性指数 Index of species diversity	2.902	2.535	2.615	2.741	2.690	2.883
群落物种丰富度指数 Index of species richness	2	4	1	1	1	4
群落物种消长指数 Index of growth and decline of species	100	2.0	1.4	1.0	1.1	0.9
群落相似性指数变化值 Change of the value of the community similarity	1.000	0.400	0.310	0.313	0.290	0.379
群落稳定性指数 Index of community stability	(32,68)	(33,68)	(32,68)	(28,70)	(33,68)	(36,64)
土壤平均含水量 Soil water content/%	4.095	3.970	3.710	2.735	2.860	8.230
土壤田间持水量 Soil field capacity/%	21.200	20.300	20.200	21.500	21.500	25.700
土壤密度 Soil density/(g/cm ³)	1.603	1.424	1.375	1.352	1.243	1.175
土壤总孔隙度 Soil total porosity/%	39.528	46.264	48.106	48.966	50.100	55.300
土壤有机质 Soil organic matter/(g/kg)	24.930	23.440	44.680	35.890	23.450	46.360
土壤有机碳 Soil total organic carbon/(g/kg)	8.738	5.979	11.267	13.368	15.248	20.021
易氧化有机碳 Readily oxidation organic carbon/(g/kg)	0.017	0.011	0.021	0.026	0.030	0.037
颗粒有机碳 Particulate organic carbon/(g/kg)	0.013	0.006	0.011	0.012	0.011	0.018
pH 值 pH	8.46	8.50	8.35	8.24	8.03	7.80
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.048	0.042	0.066	0.075	0.135	1.016
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	4.640	3.850	5.970	5.870	6.260	8.300
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	261.830	250.640	283.260	286.320	292.620	298.600

由于天然次生群落中无乔木层,故其无乔木层指标值

表 9 煤矸石场植被自然恢复初期生态绩效评价标准

Table 9 The evaluation criterion of ecological performance at the early stage of restoration on coal waste pile

类型 Types	绩效评价指标 Index of performance evaluation	等级 Rank				
		优 Optimal	良 Fine	中 Middle	较差 Low	差 Lower
群落基本特征 Basic community Characteristic	乔木平均胸径增长率/%	≥140	100—140	60—100	20—60	<20
	乔木平均高冠比变化值	≥6	5—6	4—5	3—4	<3
	草本层盖度增长值/%	≥40	30—40	20—30	10—20	<10
	草本层平均高度增长率/%	≥60	40—60	20—40	10—20	<10
	草本层总生物量增长率/%	≥30	20—30	10—20	5—10	<5
	群落垂直结构完整性	3	2	1		
	群落盖度增长值/%	≥40	30—40	20—30	10—20	<10
	群落物种多样性指数减小值	<0.20	0.20—0.30	0.30—0.40	0.40—0.50	≥0.50
	群落物种丰富度指数	4	3	2	1	
	群落物种消长指数	0.80—1.10	1.10—1.50	1.50—2.00	其他	
	群落相似性指数变化值	0.69—0.71	0.67—0.69	0.65—0.67	0.62—0.65	其他
	群落稳定性指数减小值	≥4.00	2.00—4.00	0—2.00	−2.00—0	<−2.00
土壤物理性质 Soil physical property	土壤平均含水量减小值/%	<0.20	0.20—0.40	0.40—1.00	1.00—1.50	≥1.50
	土壤田间持水量增加值/%	≥0.30	0.20—0.30	0.10—0.20	0—0.10	<0
	土壤密度减小值/(g/cm ³)	≥0.35	0.30—0.35	0.25—0.30	0.20—0.25	<0.20
	土壤总孔隙度增加值/%	≥10.00	9.00—10.00	8.00—9.00	7.00—8.00	<7.00
土壤化学性质 Soil chemical property	土壤有机质含量增加值/(g/kg)	≥19.000	15.000—19.000	8.000—15.000	0—8.000	<0
	土壤总有机碳含量增加值/(g/kg)	≥6.000	4.000—6.000	2.000—4.000	0—2.000	<0
	易氧化有机碳含量增加值/(g/kg)	≥0.013	0.009—0.013	0.005—0.009	0—0.005	<0
	颗粒有机碳含量减小值/(g/kg)	<0.002	0.002—0.003	0.003—0.004	0.004—0.005	≥0.005
	pH 值减小值	≥0.400	0.200—0.400	0.100—0.200	0—0.100	<0
	全氮含量增加值/(g/kg)	≥0.080	0.050—0.080	0.020—0.050	0.010—0.020	<0.010
	速效磷含量增加值/(mg/kg)	≥1.600	1.400—1.600	1.200—1.400	1.000—1.200	<1.000
	速效钾含量增加值/(mg/kg)	≥30.000	20.000—30.000	10.000—20.000	5.000—10.000	<5.000

“ A—B ” 代表的取值范围为包括 A, 不包括 B

(1) 期望与实际变化趋势基本一致的指标

1) 期望增长, 实际基本呈增长趋势的指标

如乔木平均胸径、草本层盖度、平均高度、总生物量、群落盖度、土壤田间持水量、总孔隙度、有机质、总有机碳、易氧化有机碳、全氮、速效磷、速效钾, 这些指标期望增长, 而且实际也呈增长趋势, 故评价标准中以各指标的增长率或增加值来设定等级, 即增长率或增加值越大, 评价等级越高;

2) 期望减小, 实际基本呈减小趋势的指标

如群落稳定性指数, 即趋势线与直线 $y = 100 - x$ 的交点越接近点 (20, 80), 则群落越稳定^[37-38], 所以标准中以距该点的距离设定评价等级。由于一年恢复期距该点距离较远, 故此各恢复期所得的交点距该点的距离越近, 评价等级越高。土壤密度与其相似, 因此两者均以减小值来设定评判等级, 即减小值越大, 评价等级越高;

(2) 期望与实际变化趋势不一致的指标

如群落物种多样性指数、土壤平均含水量、土壤颗粒有机碳含量, 这三个指标实际呈减小的趋势, 与期望不符, 但为避免在标准中出现负值, 故评价标准中以各指标的减小值来设定, 即减小值越小, 评价等级越高;

(3) 期望趋势尚未明确的指标

如乔木平均高冠比, 由于研究区毛白杨在生长过程中, 高度与冠幅的生长速度彼此间会产生影响, 而且根据 5 年的持续观测, 其高度、冠幅在各恢复期均有不同程度的增长, 可是目前尚未有对毛白杨高冠比随着其生

长期增加的变化趋势研究,但可以肯定的是,在其高度、冠幅均随着恢复期增加时,高冠比的变化值越大,说明毛白杨的生长越旺盛,故该变化值越大,评价等级越高;群落相似性指数变化值,即各恢复期与一年恢复期的相似性数值,又与完全相似值(1.000)相差的数值,该变化值说明了各恢复期与一年恢复期相似性的变化幅度,可以预测,随着恢复期的增加,各恢复期与一年恢复期相似性的变化幅度有可能会保持在某一数值范围内,故将恢复初期该变化值比较集中的数值范围设定为最优等级,以此类推。

(4) 被赋值或被赋特殊意义的指标

如对于群落垂直结构完整性,将乔—灌—草、乔—草或灌—草、草三类垂直结构分别赋值为3、2、1,对应等级“优”、“良”、“中”;并依据群落物种均匀度指数和优势物种的明显程度,将群落物种丰富度赋值为4、3、2、1(表1);对于特殊意义的指标,即群落物种消长指数,它可以用来描述群落物种多样性稳定程度,物种消长指数越接近1.0,说明群落物种多样性越稳定,故较接近1.0的数值设定为“优”,并依据恢复初期5年内出现的数值设定其他等级。

依据此评价标准(表9),计算二年恢复期至五年恢复期以及天然次生群落的各实际指标数值对各等级的隶属程度,构建隶属度矩阵,并依据最大隶属度原则^[46-47],将最大隶属度所对应的等级作为绩效评价结果。

2 结果与分析

2.1 群落基本特征恢复绩效评价

相较于一年恢复期,煤矸石场复垦区植物群落基本特征在二年恢复期时,还处于“差”等级,随着恢复期的增加,乔木及其林下草本植物的快速生长,促使群落物种多样性有所提高,至三年恢复期时,群落基本特征提升至“中”等水平,此后,群落物种消长指数基本趋近于1.0,群落稳定性逐步增强,至四年、五年恢复期时,群落基本特征均达到了“优”等级,天然次生群落基本特征评价结果也为“优”(表10),可见人工种植乔木层条件下,草本植物的自然恢复可以对群落基本特征起到一定的改善作用。

表 10 各恢复期群落基本特征评价结果

Table 10 The results of assessment of communities characteristics in each convalescence

恢复期 Convalescence	隶属度矩阵 Membership matrix					评价结果 Results of assessment
	优 Optimal	良 Fine	中 Middle	较差 Low	差 Lower	
二年 The second year	0.0000	0.0978	0.2590	0.2436	0.3996	差 Lower
三年 The third year	0.0482	0.3428	0.4488	0.1602	0.0000	中 Middle
四年 The four year	0.4663	0.3815	0.0000	0.1313	0.0209	优 Perfect
五年 The five year	0.5265	0.0777	0.0000	0.3476	0.0482	优 Perfect
天然次生群落 Natural secondary community	0.4935	0.1187	0.0000	0.0784	0.2436	优 Perfect

2.2 土壤理化性质恢复绩效评价

2.2.1 土壤物理性质恢复绩效评价

煤矸石场生态恢复过程中,相对于一年恢复期,二年、三年恢复期的土壤疏松度和通透性较差,其物理性质还处于“差”水平,随着恢复期的增加,土壤田间持水量有所上升,土壤密度逐渐减小,并且土壤孔隙度逐步提升,其疏松度和通透性得到了明显改善,故在四年、五年恢复期时,土壤物理性质提升至“优”等级,可见在人工种植乔木层的条件下,草本植物的自然恢复基本可以实现土壤物理性质的较快改善(表11)。

2.2.2 土壤化学性质恢复绩效评价

相对于一年恢复期,土壤化学性质在生态恢复初期实现了明显提升。在二年恢复期时,土壤有机质、有机碳、全氮、速效磷、速效钾的含量仍处于较低水平,评价结果为“差”。随着恢复期的增加,植被枯落物、根系分

泌物的积累量增加,导致土壤中有机质含量提高^[48-49],同时由于豆科植物,如草木犀、紫苜蓿的入侵,促进了土壤全氮含量的提升^[50-51]。此外,矸石风化作用逐步加强,释放的钾、磷等盐基物质增多,致使土壤速效磷、速效钾含量有所提升^[50-51],故土壤化学性质经过三年、四年恢复期“中”等水平的过渡,在五年恢复期时达到了“优”等级,说明人工种植乔木与自然恢复林下植被相结合的生态恢复模式可以实现煤矸石场土壤化学性质的改善(表 12)。

表 11 各恢复期土壤物理性质评价结果

Table 11 The results of assessment of soil physical property in each convalescence

恢复期 Convalescence	隶属度矩阵 Membership matrix					评价结果 Results of assessment
	优 Optimal	良 Fine	中 Middle	较差 Low	差 Lower	
二年 The second year	0.1051	0.0000	0.0000	0.0000	0.8949	差 Lower
三年 The third year	0.0000	0.1051	0.1900	0.1900	0.5150	差 Lower
四年 The four year	0.5150	0.1900	0.1900	0.1051	0.0000	优 Perfect
五年 The five year	0.8949	0.0000	0.0000	0.1051	0.0000	优 Perfect
天然次生群落 Natural secondary community	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	优 Perfect

表 12 各恢复期土壤化学性质评价结果

Table 12 The results of assessment of soil chemical property in each convalescence

恢复期 Convalescence	隶属度矩阵 Membership matrix					评价结果 Results of assessment
	优 Optimal	良 Fine	中 Middle	较差 Low	差 Lower	
二年 The second year	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	差 Lower
三年 The third year	0.2303	0.1295	0.3531	0.2871	0.0000	中 Middle
四年 The four year	0.0559	0.2937	0.4815	0.1688	0.0000	中 Middle
五年 The five year	0.7138	0.0559	0.0000	0.0000	0.2303	优 Perfect
天然次生群落 Natural secondary community	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	优 Perfect

2.3 生态恢复绩效综合评价

基于以上群落基本特征、土壤物理性质、土壤化学性质逐步改善的原因,相对于一年恢复期,煤矸石场生态恢复综合绩效亦呈逐年好转的态势。即从二年恢复期的“差”等级,提升至三年恢复期的“良”水平,到四年、五年恢复期时均已达“优”等级(表 13),天然次生群落的生态绩效也处于“优”等水平,说明,在足够长的恢复期内,人工种植乔木层条件下,草本植物的自然恢复可以实现矿区的植被重建。

表 13 各恢复期生态绩效综合评价结果

Table 13 The results of comprehensive assessment of ecological performance in each convalescence

恢复期 Convalescence	隶属度矩阵 Membership matrix					评价结果 Results of assessment
	优 Optimal	良 Fine	中 Middle	较差 Low	差 Lower	
二年 The second year	0.0123	0.1096	0.1914	0.1497	0.5370	差 Lower
三年 The third year	0.0985	0.3398	0.3074	0.1939	0.0604	良 Fine
四年 The four year	0.3945	0.2996	0.1515	0.1306	0.0239	优 Perfect
五年 The five year	0.5840	0.0954	0.0000	0.2221	0.0985	优 Perfect
天然次生群落 Natural secondary community	0.6283	0.1335	0.0000	0.0482	0.1497	优 Perfect

3 讨论与结论

3.1 讨论

李江峰依据已有的水土流失防止标准,对北京首云铁矿尾矿库坝面复垦区生态恢复初期的群落基本特征进行评价,结果为:五年恢复期>四年恢复期>自然群落>三年恢复期>二年恢复期>一年恢复期^[20],这与本研究所认为的四、五年恢复期、天然次生群落优于三年恢复期,更优于二年恢复期的结论基本相似;本研究还认为人工种植乔木层条件下,草本植物自然恢复过程中,四、五年恢复期、天然次生群落的土壤物理性质优于二、三年恢复期,五年恢复期、天然次生群落的土壤化学性质优于三、四年恢复期,更优于二年恢复期。这与宋小园等^[52]提出的经过人工林恢复的矿区复垦地土壤质量评价结果:三年恢复期>二年恢复期>一年恢复期,以及樊兰英^[53]所认为的植被恢复(2年)对煤矸石场土壤质量具有改良作用的观点相近,可见人工种植乔木层条件下,草本植物自然恢复初期的五年内,随着恢复期的增加,土壤质量的改善程度基本呈增加的趋势。但本研究结论与李江峰提出的铁矿尾矿库坝面复垦区生态恢复初期的土壤指标评价由大到小为:三年恢复期>自然群落>四年恢复期>一年恢复期>五年恢复期>二年恢复期^[20]的结论并不一致。而且对于生态恢复的综合绩效评价,北京首云铁矿尾矿库坝面复垦区为:五年恢复期>四年恢复期>三年恢复期>自然群落>一年恢复期>二年恢复期^[20],这与本研究所认为的四、五年恢复期、天然次生群落的生态绩效较三年恢复期好,较二年恢复期更好的结论不一致。造成以上差异的原因这可能是由于该类研究对象虽均是人工栽植乔木条件下的植被恢复,但李江峰的研究中所种植的植物是山楂(*Crataegus pinnatifida*),而本研究为毛白杨,再加上指标选取的不同也会对评价结果产生影响。虽然本研究并未说明天然次生群落与五年恢复期相比,哪一群落的生态绩效更优,但是从李江峰^[20]的研究中可以发现,无论是对群落基本特征、土壤理化性质评价,还是对生态综合绩效评价,自然群落并非就是最优的恢复目标,随着恢复期的增加,复垦区的生态绩效有可能会优于自然群落。

当前,对矿区废弃地复垦是选择人工恢复还是自然恢复仍存在争议^[36,54],本研究认为在足够长的恢复期内,人工种植乔木层条件下,草本植物的自然恢复可以实现矿区植被重建。Darina 等对煤矿废弃地植被自然恢复与人工恢复的特征进行比较后,发现两者仅仅是时间上的差异^[55]。在时间尺度上,自然恢复较人工恢复长,可能会长达几十年或者几个世纪,而且可以通过合理的人工模仿或者适当干扰加快恢复进程^[56];李青丰对准格尔煤田露天矿废弃地植被自然恢复过程进行研究,也发现自然恢复是一个较漫长的过程,可以进行适当人工干扰,以加快恢复^[57]。Holl 认为美国东部煤矿人工恢复 35 年后的植被构成与周围自然植被相似,并且有望发展成为周围森林类型。但在人工恢复中,如果种植具有侵略性的外来物种,将会延缓植被恢复进程^[58]。此外,Pensa 等对爱沙尼亚 4 种废弃油页岩堆上 30 年生的林木进行研究后,发现自然植被重建有利于植物多样性的恢复^[59-61],而人工恢复却对物种多样性有所限制^[60-61]。

3.2 结论

相较于一年恢复期,煤矸石场植被恢复初期植物群落基本特征、土壤物理性质、土壤化学性质及其综合生态绩效在五年恢复期时均达到了“优”级水平。可见,在足够长的恢复期内,人工种植乔木层条件下,草本植物的自然恢复可以实现矿区的植被重建。

基于 AHP-FCE 评价模型,以一年恢复期为基准,通过各恢复期生态指标与一年恢复期相比的恢复程度设定绩效等级,对煤矸石场植被恢复初期的生态绩效进行评价,评价结果具有客观性和科学性,评价技术具有可操作性和实用性,避免了以往选取天然次生群落为恢复目标,但又不确定其是否为最佳恢复效果的盲目性,为生态绩效评价提供了新思路,并对持续推进矿区生态恢复的科学实施、管理和评估具有积极的示范和辐射带动作用。

4 展望

本文应用了 AHP-FCE 模型对煤矸石场植被恢复初期的生态绩效进行了评价,而基于其它方法(如主成

分分析法)的生态绩效综合评价结果如何,所得结论是否一致,还有待进一步研究。

煤矸石场复垦区生态绩效研究不仅仅包括群落基本特征、土壤理化性质的恢复研究,还包括土壤重金属污染治理研究、土壤动物与微生物对环境的适应性研究等,今后研究中应将后者也纳入生态绩效评价体系。

本研究旨在为矿区废弃地生态绩效评价提供新思路,而且仅对煤矸石场植被恢复初期的生态绩效构建了评价指标体系和标准,并进行了评价。随着恢复期的增加,煤矸石场植被恢复的生态绩效如何,该评价体系和标准又该如何改进,还有待于进行长期跟踪监测与研究。

参考文献(References):

- [1] Li YG, Jiang G M. Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: an over review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 95-100.
- [2] 郝婧, 张婕, 张沛沛, 郭东翌, 王丽媛, 上官铁梁, 黄汉富, 宋向阳. 煤矸石场植被自然恢复初期草本植物生物量研究. *草业学报*, 2013, 22(4): 51-60.
- [3] Tibbett M, Mulligan D, Audet P. Recent advances in restoration ecology: Examining the modern Australian agro-ecological and post-mining landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 163(1): 1-2.
- [4] 钟爽. 矿山废弃地生态恢复理论体系及其评价方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [5] Ott T, van Aarde R J. Coastal dune topography as a determinant of abiotic conditions and biological community restoration in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Landscape and Ecological Engineering*, 2014, 10(1): 17-28.
- [6] Ličina V, Akšić M F, Čolić S, Zec G. A bioassessment of soil nickel genotoxic effect in orchard planted on rehabilitated coalmine overburden. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 98: 374-382.
- [7] Wang X M, Chu L, Chu Z X, Dong Z B. Vegetation development on coal waste pile in Panyi coal mine. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, 25(10): 5778-5780.
- [8] Xie K, Zhang Y Q, Yi Q T, Yan J P. Optimal resource utilization and ecological restoration of aquatic zones in the coal mining subsidence areas of the Huaibei Plain in Anhui Province, China. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(19/21): 4019-4027.
- [9] Parraga-Aguado I, Gonzalez-Alcaraz M N, Alvarez-Rogel J, Jimenez-Carceles F J, Conesa H M. The importance of edaphic niches and pioneer plant species succession for the phytomanagement of mine tailings. *Environmental Pollution*, 2013, 176: 134-143.
- [10] Anawar H M, Canha N, Santa-Regina I, Freitas M C. Adaptation, tolerance, and evolution of plant species in a pyrite mine in response to contamination level and properties of mine tailings: sustainable rehabilitation. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(4): 730-741.
- [11] 李江锋. 北京首钢铁矿生态恢复及效果评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [12] 闫德民. 北京首云铁矿尾矿库生态恢复的植被特征分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [13] 李涛. 赤泥堆场生态修复技术评价体系的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [14] 范亚辉. 煤矸石废弃地植被恢复效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [15] 李武斌. 九寨沟马脑壳金矿露天矿山生态恢复研究[D]. 北碚: 西南大学, 2011.
- [16] 余地. 基于 GIS 技术和 AHP 法的煤矿区土地复垦综合效益评价[D]. 晋中: 山西农业大学, 2013.
- [17] 周富春, 金旺, 孙阳. 矿山环境治理效益评价方法及实证分析. *环境工程*, 2013, 31(1): 85-88.
- [18] 石健. 门头沟龙凤岭废弃矿生态恢复效益评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [19] 王巧妮. 采煤塌陷地复垦模式综合效益评价与对策研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [20] 李江锋. 北京矿山废弃地生态恢复质量评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [21] 刘永光. 北京山区关停废弃矿山人工恢复效果及评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [22] Gomez-Ros J M, Garcia G, Peñas J M. Assessment of restoration success of former metal mining areas after 30 years in a highly polluted Mediterranean mining area: Cartagena-La Unión. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 393-402.
- [23] Vickers H, Gillespie M, Gravina A. Assessing the development of rehabilitated grasslands on post-mined landforms in north west Queensland, Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 163: 72-84.
- [24] 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 李建涛, 李新国. 焉耆盆地土壤重金属的污染及潜在生态风险评价. *中国环境科学*, 2014, 34(6): 1523-1530.
- [25] 张文岚. 平朔矿区采矿废弃地生态恢复评价研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [26] Alvey S, Yang C H, Buerkert A, Crowley D E. Cereal/legume rotation effects on rhizosphere bacterial community structure in West African soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(2): 73-82.
- [27] 姚成, 万树文, 孙东林, 钦佩. 盐城自然保护区海滨湿地植被演替的生态机制. *生态学报*, 2009, 29(5): 2203-2210.
- [28] 靳虎甲, 马全林, 何明珠, 贾晓红, 刘有军, 张有佳, 李发鸿. 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征. *生态学报*, 2013, 33(7): 2248-2259.
- [29] 邵新庆, 王堃, 王赞文, 刘贵河. 典型草原自然恢复演替过程中植物群落动态变化. *生态学报*, 2008, 28(2): 855-861.
- [30] Aplet G H, Vitousek P M. An age-altitude matrix analysis of Hawaiian rain-forest succession. *Journal of Ecology*, 1994, 82(1): 137-147.

- [31] Pichett S T A. Population patterns through twenty years of oldfield succession. *Vegetatio*, 1982, 49(1): 45-59.
- [32] Elgersma A M. Primary forest succession on poor sandy soils as related to site factors. *Biodiversity and Conservation*, 1998, 7(2): 193-206.
- [33] 郭东盟, 上官铁梁, 白中科, 邵宏波. 山西太岳山油松群落对采伐干扰的生态响应. *生态学报*, 2011, 31(12): 3296-3307.
- [34] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. *生态学报*, 1995, 15(3): 268-277.
- [35] Wassenaar T D, Henschel J R, Pfaffenthaler M M, Mutota E N, Seely M K, Pallett J. Ensuring the future of the Namib's biodiversity: Ecological restoration as a key management response to a mining boom. *Journal of Arid Environments*, 2013, 93: 126-135.
- [36] Wozniwoda B, Kopec D. Afforestation or natural succession? Looking for the best way to manage abandoned cut-over peatlands for biodiversity conservation. *Ecological Engineering*, 2014, 63: 143-152.
- [37] Godron M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal. *Statistical Ecology*, 1972, 3: 397-415.
- [38] 胡苏. 盐亭县防护林群落结构特征与稳定性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2012.
- [39] 谢元贵, 车家骧, 孙文博, 彭熙. 煤矿矿区不同采煤塌陷年限土壤物理性质对比研究. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 26-29.
- [40] 蔡福, 明惠青, 张淑杰, 陈鹏狮, 米娜, 周广胜. 辽宁农田土壤田间持水量的空间变异性分析. *气象与环境学报*, 2009, 25(1): 27-30.
- [41] 张晓薇. 半干旱地区矿区废弃地土壤与植被演化规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [42] 苏敏. 采煤塌陷区土壤养分循环及对生态环境的影响研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2010.
- [43] 魏孝荣, 邵明安, 高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系. *环境科学*, 2008, 29(10): 2879-2884.
- [44] 韩晓日, 王玲莉, 杨劲峰, 战秀梅, 刘小虎, 王晔青, 马玲玲. 长期施肥对土壤颗粒有机碳和酶活性的影响. *土壤通报*, 2008, 39(2): 266-269.
- [45] 原琴, 梅娟, 李华, 张强, 郜春花, 张秋华. 不同管理措施对铝矿废弃地复垦区土壤有机碳的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1374-1380.
- [46] 吕相权. 吉林省东晋煤矿生态环境评估与恢复方案设计研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [47] 刘慧. 神府矿区土地复垦评价及模式研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [48] 黎炜, 陈龙乾, 周天建. 张集矿区复垦土壤养分变化研究及评价. *现代矿业*, 2011, (2): 41-43.
- [49] 王改玲, 王小利, 李东方, 白中科. 安太堡露天煤矿复垦地土壤养分相关研究. *煤矿环境保护*, 2001, 15(5): 25-27.
- [50] 郭志彬, 王道中, 刘长安, 刘枫, 李凤民. 引入草木樨对半干旱黄土高原区早期植物群落演替和土壤养分的影响. *西北植物学报*, 2012, 32(4): 787-794.
- [51] 杨晓晖, 王葆芳, 江泽平. 乌兰布和沙漠东北缘三种豆科绿肥植物生物量和养分含量及其对土壤肥力的影响. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1134-1138.
- [52] 宋小园, 朱仲元, 韩永明, 赵振亚, 刘艳伟, 焦玮. 基于改进的突变级数法在复垦区土壤恢复评价中的应用. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 1012-1018.
- [53] 樊兰英. 煤矿废弃地植被恢复对土壤质量的影响及评价. *山西林业科技*, 2014, 43(1): 25-27, 30-30.
- [54] Evans D M, Zipper C E, Burger J A, Stanhm B D, Villamagna A M. Reforestation practice for enhancement of ecosystem services on a compacted surface mine: Path toward ecosystem recovery. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 16-23.
- [55] Hodačová D, Prach K. Spoil heaps from brown coal mining: technical reclamation versus spontaneous revegetation. *Restoration Ecology*, 2003, 11(3): 385-391.
- [56] Burton C M, Burton P J, Hebda R, Turner N J. Determining the optimal sowing density for a mixture of native plants used to revegetate degraded ecosystems. *Restoration Ecology*, 2006, 14(3): 379-390.
- [57] 李青丰, 曹江营, 张树礼, 薛玲, 李利萍, 秦梅枝. 准格尔煤田露天矿植被恢复的研究——排土场植被自然恢复的观察研究. *中国草地*, 1997, (2): 23-25, 66-66.
- [58] Holl K D. Long-term vegetation recovery on reclaimed coal surface mines in the eastern USA. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 39(6): 960-970.
- [59] Pensa M, Sellin A, Luud A, Valgma I. An analysis of vegetation restoration on opencast oil shale mines in Estonia. *Restoration Ecology*, 2004, 12(2): 200-206.
- [60] Prach K, Lencová K, Řehounková K, Dvořáková H, Jírová A, Konvalinková P, Mudářík O, Novák J, Tmčková R. Spontaneous vegetation succession at different central European mining sites: a comparison across seres. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(11): 7680-7685.
- [61] Burkhalter J C, Moon D C, Rossi A M. Diversity and community similarity of arthropods in response to the restoration of former pine plantations. *Southeastern Naturalist*, 2013, 12(1): 121-136.