

# 黄土区大型露天煤矿复垦排土场植被恢复立地类型划分 ——以安太堡露天煤矿为例

张灵<sup>1</sup>, 白中科<sup>1,2</sup>, 景明<sup>1</sup>, 曹银贵<sup>1</sup>, 陈晓辉<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

**摘要:**露天开采对土地破坏严重,立地条件复杂。只有综合环境因素与植被生态习性,针对不同的立地类型进行植被配置与管护才能达到对矿区生态修复的目的。为此以安太堡露天煤矿西排土场为研究对象,选定 58 个样点,在样点 10 m×10 m 范围内对海拔、坡向、坡位、坡度、坡型、覆土基质、覆土厚度、土壤容重、土壤含水量、有机质含量、全氮含量、植被类型组合、归一化植被指数(NDVI)、地面非均匀沉降、河流动能指数、地形起伏度,共 18 个立地因子进行调查。分析排土场立地条件及特征,运用 SPSS 聚类分析法对样点进行立地类型划分。最终划分为平台、边坡 2 个立地小区;平台小区化分为 9 个立地类型组、13 个立地类型,边坡小区化分为 9 个立地类型组、20 个立地类型。研究结果可以为排土场立地改良、植被恢复与维护及生态系统恢复提供依据。

**关键词:**黄土区;大型露天煤矿;土地复垦;排土场;立地条件;SPSS 聚类分析;立地类型

中图分类号:S718.5;S725.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)06-0054-07

## Type Classification for Vegetation Restoration on Dump of Large Opencast Coal-Mine in Loess Area —Taking Antaibao Opencast Coal-Mine as an Example

ZHANG Ling<sup>1</sup>, BAI Zhong-ke<sup>1,2</sup>, JING Ming<sup>1</sup>, CAO Yin-gui<sup>1</sup>, CHEN Xiao-hui<sup>1</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

**Abstract:** Opencast mining has led to severe land damage and intricate site conditions, only by taking full accounts of environmental factors and ecological habits of vegetation and, according to different site types, conducting appropriate vegetation configuration and management can make the goal of ecological restoration of mining area achieved. Thus, the western dump of Antaibao opencast coal mine was selected as the site, 58 samples were taken in this research site. Within the scope of 10 m×10 m at each sample plot, the total amount of 18 site factors were examined, such as altitude, aspect, slope position, slope, slope type, soil matrixes, soil thickness, soil bulk density, soil water content, organic matter content, total nitrogen content, vegetation type, NDVI, non-uniform settlement of ground, relief degree of land surface and rivers momentum index. Based on the analysis of site conditions and characteristics of dump, site type was divided by using the clustering analysis method of SPSS. The study area was eventually divided into 2 site areas: the platform and the slope. The platform area was classified into 9 site groups and 13 site types; similarly, the slope area was divided into 9 site groups and 20 site types. This classification can provide the guidance for the improvement of mine site conditions, vegetation restoration and maintenance as well as the local ecosystem restoration.

**Key words:** loess area; large opencast coal-mine; land reclamation; dump; site conditions; SPSS clustering analysis; site type

收稿日期:2014-01-21

修回日期:2014-03-25

资助项目:国土资源部公益行业科研专项课题(201311088-02)

作者简介:张灵(1989—),女,河北省定州人,博士生,主要从事土地整理复垦与生态修复研究。E-mail:zhangling19891101@163.com

通信作者:白中科(1963—),男,山西省运城人,博士,教授,博士生导师,主要从事土地整理复垦与生态修复、环境影响评价研究工作。E-mail:baizk@cugb.edu.cn

我国大型露天煤矿大多处于干旱、半干旱的生态脆弱区,剧烈的采矿扰动,引发了地貌变迁、水土流失、农业受损、生态失衡等一系列问题<sup>[1]</sup>。在这种生态系统极度退化的状态下,“地貌重塑—土壤重构—植被重建—生态系统恢复”的土地复垦模式是对露天矿区排土场这种特殊人工生态系统进行修复的有效措施。露天开采造成土地受损严重,立地条件复杂,只有综合气候、海拔、坡向、坡度、坡位、地表物质性状等环境因素与植物生态习性,建立科学的立地类型体系,针对不同立地条件进行植物的配置、栽植及管护才能达到对矿区排土场生态修复与恢复的目的。

当前,我国森林立地的分类与评价研究已经较为成熟,其立地多属于地质条件比较单一、土壤分布规律性较强的常态地貌区。随着学科发展,立地类型划分逐步延伸到植被恢复区:王德安等<sup>[2]</sup>对受自然条件和人为破坏影响的青岛市基岩海岸进行了宜林地的立地类型的调查与划分;樊华等<sup>[3]</sup>用 MATLAB 软件对门头沟区的植被恢复立地类型进行了聚类划分;周应书等<sup>[4]</sup>对喀斯特山地的生态学特性与乔灌木植物分布的相关性进行多元回归分析,应用 Fuzzy 聚类分析建立了喀斯特山地植被恢复的立地类型划分系统;高华端等<sup>[5]</sup>在研究强度石漠化地区立地属性指标空间分异特征及立地因子筛选的基础上,建立了强度石漠化地区立地分类系统;王富等<sup>[6]</sup>利用聚类分析对淄博市城市周围破坏山体进行了立地类型划分;赵荟<sup>[7]</sup>把探针式 TDR 测得的土壤水分作为黄土区阳坡的主要限制因子,用 SPSS 进行聚类。

上述成果均为研究区的植被恢复及生态环境建设提供了科学依据。立地类型划分是立地分类研究的中心环节,是研究人工林地立地特点与植被空间格

局的科学方法。人工植被恢复建设只有以立地分类为基础,才能营造出稳定高效的林地系统<sup>[8]</sup>。由于立地类型划分具有地域差异性、半干旱黄土区生态环境的脆弱性,且针对大型露天矿区排土场此类剧烈人工扰动的植被恢复区的立地特点与类型划分研究仍处于空白。因此,本文以平朔矿区安太堡露天煤矿排土场为研究对象,通过立地条件的综合调查,分析了立地条件对植被恢复的影响,应用 SPSS 聚类分析进行立地类型划分,以期对排土场立地改良、植被恢复与维护及生态系统恢复提供依据。

## 1 研究区概况

安太堡露天矿区位于朔州市区与平鲁区交界处(地理坐标是 112°10'58"—113°30'E,39°07'—39°37'N),地处黄土高原晋、陕、蒙接壤地带。该区位具有典型的大陆性气候,干燥寒冷、风沙严重;年平均气温 5.4~13.8℃;降水量分布极不均匀,多集中在 7—9 月,占全年降水量的 75%~90%,年平均降水量 426.7 mm;原地貌土壤黄土广布,侵蚀切割作用强烈,土壤的物理风化强烈,土质偏砂,土体干旱,通气良好。

排土场作为矿区闭坑前的主要土地损毁区之一,是在极短时间内形成的巨型松散堆积体,属于典型的再塑地貌。安太堡露天矿共有排土场 7 座,其中外排土场 5 座和内排土场 2 座,排土场呈平台边坡相间分布梯式地形,相对高度为 100~150 m。开采和排弃工艺决定了排土场的岩土侵蚀性及不稳定性,其既继承了原地貌的地域特征又孕育了一种新的动态变化<sup>[9]</sup>。

安太堡矿区自 1985 年以来,先后在内外排土场试种植物 98 种,进行乔、灌、草不同的配置模式的种植,常见植被复垦模式及侵入植被如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 不同复垦模式下的植被配置模式

复垦模式	先锋植被	侵入植被
草	紫花苜蓿( <i>Medicago sativa</i> )、无芒雀麦( <i>Bromus inermis</i> )、沙打旺( <i>Astragalus adsurgens</i> )、草木樨( <i>Melilotus suaveolens</i> )、红豆草( <i>Onobrychis viciaefolia</i> )	
灌×草	无芒雀麦×沙棘( <i>Bromus inermis</i> × <i>Hippophae rhamnoides</i> )、无芒雀麦×柠条( <i>Bromus inermis</i> × <i>Caragana korshinskii</i> )、草木樨×沙棘( <i>Melilotus suaveolens</i> × <i>Hippophae rhamnoides</i> )、草木樨×柠条( <i>Melilotus suaveolens</i> × <i>Caragana korshinskii</i> )、红豆草×沙枣( <i>Onobrychis viciaefolia</i> × <i>Elaeagnus angustifolia</i> )、红豆草×沙柳( <i>Onobrychis viciaefolia</i> × <i>Salix psammophyll</i> )	冰草( <i>Agropyron cristitum</i> )、黑沙蒿( <i>Artemisia ordosica</i> )、芨芨草( <i>Achnatherum splendens</i> )、狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )、凯氏针茅( <i>Stipa krylovii</i> )、全叶马兰( <i>Kalimeris integrifolia</i> )、披碱草( <i>Elymus dahuricus</i> )、香青兰( <i>Dracocenthalum moldavica</i> )、黄蒿( <i>Artemisia siversiana</i> )、紫花山蒿苣( <i>Mulgedum tatarium</i> )、早熟禾( <i>Poa annua</i> )、榆树( <i>Elm</i> )
灌×灌	沙棘×柠条( <i>Hippophae rhamnoides</i> × <i>Caragana korshinskii</i> )、沙棘×沙柳( <i>Hippophae rhamnoides</i> × <i>Salix psammophyll</i> )、沙棘×沙枣( <i>Hippophae rhamnoides</i> × <i>Elaeagnus angustifolia</i> )	
乔×草	油松×冰草( <i>Chinese pine</i> × <i>Agropyron cristitum</i> )、榆树×冰草( <i>Elm</i> × <i>Agropyron cristitum</i> )、新疆杨×沙打旺( <i>Astragalus adsurgens</i> )、刺槐×无芒雀麦( <i>Locust</i> × <i>Bromus inermis</i> )	
乔×灌	刺槐×油松×柠条( <i>Locust</i> × <i>Chinese pine</i> × <i>Caragana korshinskii</i> )、刺槐×油松( <i>Locust</i> × <i>Chinese pine</i> )、刺槐×沙棘( <i>Locust</i> × <i>Hippophae rhamnoides</i> )、小叶杨×柠条( <i>Populus simonii</i> × <i>Caragana korshinskii</i> )	

## 2 研究方法

### 2.1 立地因子划分

矿区实行采、排、复一体化流程作业,排土场经过地貌重塑、土壤重构、植被重建过程,较原地貌立地条件发生彻底改变。综合排土场特性将其立地因子划分为工程性因子、生物性因子及风险性因子。工程性因子是指在复垦过程中随时间推移性状不易改变的因子,包括地形特征的海拔、坡度、坡位、坡向、坡型和土壤机械特性的覆土基质、覆土厚度;生物性因子是指在复垦过程中由于时间的推移及生物措施的影响,性状随时间推移会改变的因子,包括土壤理化指标的土壤容重、土壤含水量、有机质含量、全氮含量,土壤化学污染指标的镉、汞、硫、多环芳烃含量和植被特征指标的植被类型、归一化植被指数(NDVI);风险性因子是指在复垦过程中易引发地质灾害的不稳定性因子,包括平台地面非均匀沉降、河流动能指数、地形起伏度。

### 2.2 立地条件调查

根据排土场地形地貌、土壤、植被等特征,于 2013 年 8 月,在排土场平台及边坡布设 58 个典型样点(平台 21 个、边坡 37 个)。在样点 10 m×10 m 范围内,进行立地条件的取样与调查。由 GPS 测定各

样点的海拔及地理坐标;每个样点去除表层植物,用环刀采取表层土进行土壤容重、土壤含水量测定。由 3 分点混合得到一个土层土样,测定 0—20 cm 土层土壤有机质、全氮含量;分 3 个土层(0—20 cm, 20—50 cm, 50—100 cm)进行镉、汞、铅、硫、多环芳烃含量测定;采用矿方地测部提供 1 m 间距等高线及高程点,在 GIS 平台下生成的 DEM(栅格为 2 m×2 m),通过 DEM 数字地形分析,提取坡向、坡位、坡度、坡型<sup>[11]</sup>、地形起伏度、河流动能指数;以 2012 年 7 月 WorldView-2 卫星遥感影像为数据源提取植被 NDVI<sup>[12]</sup>;在样点 10 m×10 m 范围内,进行地表植被类型、岩土侵蚀情况等调查;通过资料查取与现场观测获得覆土厚度、覆土基质信息<sup>[9,13-18]</sup>。

## 3 立地条件分析

### 3.1 排土场立地因子选择与分级

研究区海拔变化不大,土壤中的镉、汞、铅、硫、多环芳烃含量符合土壤环境质量标准(修订版),无污染。因此,海拔、土壤化学污染作为共性因子在立地条件分析及划分中不予与考虑。定性因子量化时,遵循各因子对植被恢复的限制(强、中、弱)程度大小,通过评分法(分值分别为 3, 2, 1)确定非共性立地因子体系表(表 2)。

表 2 立地因子表

工程性因子									
分值	地形特征					土壤机械特性			
	坡向		坡位	平台	边坡	坡型	覆土基质	覆土厚度/cm	
3	阳坡(135°~225°)		上坡	缓坡地(>7°)	陡坡(>40°)	凸型坡	石砾质	<50	
2	半阳坡(90°~135°; 225°~270°) 半阴坡(45°~90°; 270°~315°)		中坡	低坡地(3°~7°)	斜坡(30°~40°)	直型坡	砂质、砾质	50~80	
1	阴坡(315°~45°);全坡		下坡	平地(<3°)	缓坡(<30°)	凹型坡	红黏土、黄土	>80	
生物性因子									
分值	土壤理化指标				植被特征		风险性因子		
	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤含 水量/%	有机质 含量/%	全氮 含量/%	植被 类型	NDVI	地质灾害因子		地形 起伏度
3	压实(>1.7)	<16	<2	<0.1	草、灌灌	<0.16	不稳定(复垦年限<3 a)		>5
2	紧实(1.4~1.7)	16~18	2~3	0.1~0.15	草乔、草灌	0.16~0.25	较稳定(复垦年限 3~13 a)		2~5
1	疏松(1.1~1.4)	>18	>3	>0.15	草灌乔	>0.25	稳定(复垦年限>13 a)		<2

### 3.2 平台立地条件分析

(1) 平台立地特殊性。坡向影响光照的时间和强度、风力强弱、水分等状况,研究区坡向分为阴坡、半阴坡、阳坡、半阳坡和全坡;坡度主要影响土壤水土保持能力。坡度大则土壤发展受到影响,降雨条件下,水土流失发生风险大,不利于养分、水分积累<sup>[19-20]</sup>。平台平地范围占 67%,低坡地占 28%,缓坡地占 5%;研究区为土石混排的堆砌体,地表物质组

成复杂、覆土具有随机性。黄土及黄土状物质占大部分,局部漏盖地段覆盖红黏土,只有少量地段母质为土石混杂物。不同的地表物质决定了土壤的物理结构、保水保肥性、养分以及岩土侵蚀形式;不同植被的根群圈不同,覆土厚度选需求亦不同<sup>[21]</sup>,平台主要为厚层覆土;受排土及大型机械的碾压影响,平台土壤容重较大且分布不具规律性,主要在 1.3~1.9 g/cm<sup>3</sup>

之间比原地貌土壤容重大约  $0.2\sim 0.5\text{ g/cm}^3$ 。不利于水分入渗,降雨后易形成高动能的地表汇流,是平台岩土侵蚀的最根本原因。土壤结构也发生较大变化,易板结,限制了植被的扎根与生长;研究区土壤养分总体偏低,有机质、全氮亏缺,均值分别为  $1.073\%$ 、 $0.047\%$ ;由于排土场堆置厚度各部位不等,颗粒组成差异大,自然固结率不同,在重力和水流入渗作用下,很容易产生地面非均匀沉降,加重平台水土流失。地面径流汇入沉降裂缝及潜蚀,可能诱发排土场整体失衡<sup>[22-23]</sup>。

(2) 平台立地因子相关性分析。对平台的工程性因子、风险性因子与生物性因子进行 Pearson 相关性分析。由于人为扰动剧烈,研究区平台除坡向与土壤有机质及全氮含量、地形起伏度与 NDVI、覆土基

质与土壤容重及植被类型显著负相关,地面稳定性与土壤含水量显著正相关外,其他立地因子间的相关性极低(表 3)。

(3) 平台风险性分析。平台立地特殊性决定了其具有较高的岩土侵蚀风险,选取坡度、覆土基质、覆土厚度、土壤容重、植被类型、NDVI、地面非均匀沉降、河流动能指数、地形起伏度作为平台岩土侵蚀风险的影响因素。计算样点岩土侵蚀风险值:  $E = P_i \cdot Q_i$ ; 其中,  $E$  为平台岩土侵蚀风险,  $P_i$  为影响因素的分值;  $Q_i$  为各影响因素的权重,采用对比求和评分法中的  $0\sim 4$  评分法<sup>[10]</sup> 确定权重系数(表 4)。结合平台的实际情况,将平台岩土侵蚀 ( $1.32\sim 2.15$ ) 分为三个等级:  $E_1$  无风险:  $1.32\sim 1.74$  ( $42.9\%$ );  $E_2$  低风险:  $1.74\sim 2$  ( $48.5\%$ );  $E_3$ : 高风险  $> 2$  ( $8.6\%$ )。

表 3 平台工程性因子、地质灾害因子与生物性因子 Pearson 相关性

项目	土壤容重	土壤含水量	有机质含量	全氮含量	植被类型	NDVI
坡向	-0.241	0.260	-0.566**	-0.553**	0.118	0.006
坡度	-0.318	-0.335	-0.168	-0.063	0.136	-0.317
覆土基质	-0.480*	-0.230	-0.139	-0.283	-0.586**	0.213
地面非均匀沉降	-0.023	0.440*	-0.207	-0.263	0.133	0.132
河流动能指数	0.169	-0.170	0.025	0.095	0.083	-0.163
地形起伏度	-0.110	0.204	-0.081	-0.031	0.190	-0.484*

注: \* 为  $< 0.05$  水平(双侧)上显著相关, \*\* 为  $< 0.01$  水平(双侧)上显著相关。

表 4 平台岩土侵蚀风险影响因素权重

影响因子	坡度	覆土基质	覆土厚度	土壤容重	植被类型	NDVI	地面非均匀沉降	河流动能指数	地形起伏度
权重	0.097	0.097	0.056	0.083	0.118	0.160	0.125	0.146	0.118

### 3.3 边坡立地条件分析

(1) 边坡立地特殊性。坡向由阴坡向阳坡过渡中,边坡的 NDVI 变化规律与原地貌相符;排土场边坡缓坡、斜坡各占约  $50\%$ ;自上坡—中坡—下坡,土壤含水量、土壤有机质、全氮含量及 NDVI 变化规律与原地貌相同,呈增加趋势(表 5)。上坡优势群种为草灌类,中下坡草灌乔比例增加。岩土侵蚀强度随坡位的不同而异,下坡发生侵蚀频次及侵蚀沟宽深比均大于中坡和上坡;坡型包括凹型坡、直型坡、凸型坡,边坡的剖面形态对滑坡的孕育有着重要影响作用。凸型坡、直型坡发生滑坡的概率高于凹型坡。其中边坡与平台交界处以凸型坡为主,由中坡到下坡坡型逐渐由直型坡过渡到凹型坡。接近的  $41\%$  边坡为直型坡,凹型坡大约  $32\%$ ,凸型坡约  $27\%$ ;边坡物质组成同样具有随机性,有的坡面覆有薄层黄土状物质,有的坡面地表裸露着碎砾或石块。土状物质的土壤颗粒较细,易于植物的扎根、生长。砂质、砾质土机械组成较差,其中部分混有大砾。还有一些是石砾土,地

表植被稀疏,以草本为主;边坡未经机械压实,土体较疏松 ( $1.2\sim 1.6\text{ g/cm}^3$ )、颗粒大、胶结差,易产生土壤侵蚀。不同物质构成对侵蚀程度或破坏类型不同;在黄土边坡,在中下坡出现轻微细沟侵蚀。红黏土斜坡上,坡面细沟侵蚀交织成网,有发生泻溜的危险。砂质、砾质坡在重力作用下,沙土向坡角倾泻,饱和后可能引发泥石流。土石混排区砂砾化较为明显。在煤矸石埋深浅的部位易发生自燃,其对植被立地条件的破坏几乎是不可修复的。

表 5 不同坡位上相关因子差异特征

因子	上坡均值	中坡均值	下坡均值
土壤含水量/ $\%$	17.45	16.26	16.51
有机质/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	8.55a	11.42bc	14.16ac
全氮/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	398.3a	469.2bc	562.5ac
NDVI	0.185	0.200	0.228

(2) 边坡立地因子相关性分析。对边坡的工程性因子、风险性因子与生物性因子进行 Pearson 相关

性分析。研究区边坡除坡向与 NDVI 显著负相关,坡位与植被类型显著正相关外,其他立地因子间的相关性极低(表 6)。

(3) 边坡稳定性分析。边坡立地特殊性决定了其具有不稳定性,选取坡位、坡度、坡型、覆土基质、土壤容重、植被类型、NDVI、河流动能指数、坡度起伏度

作为边坡稳定性影响因素,同平台侵蚀风险分析确定影响因素权重、计算稳定性分值: $S = B_i \cdot Q_i$ ;  $S$  为边坡稳定性,  $B_i$  为影响因素分值,  $Q_i$  为各影响因素的权重(表 7),最终将边坡稳定性分值(1.3~2.4)分为两类:  $S_1$  稳定: 1.3~2.3(70%),  $S_2$  不稳定: >2.3(30%)。

表 6 边坡工程性因子、地质灾害因子与生物性因子 Pearson 相关性

Pearson 相关性	土壤容重	土壤含水量	有机质含量	全氮含量	植被类型	NDVI
坡向	0.065	-0.093	0.139	0.165	0.322	-0.646**
坡位	-0.207	0.053	0.154	0.134	0.375*	0.107
坡度	0.152	-0.152	0.117	0.080	-0.170	0.219
坡型	0.058	-0.002	0.300	0.297	0.014	0.013
覆土基质	0.148	-0.246	-0.178	-0.262	-0.023	-0.308
河流动能指数	-0.197	0.018	0.063	0.111	0.161	-0.100
地形起伏度	-0.101	-0.108	0.139	0.114	-0.125	0.323

注: \* 为 <0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 为 <0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 7 边坡稳定性影响因素权重

影响因子	坡位	坡度	坡型	覆土基质	土壤容重	植被类型	NDVI	河流动能指数	坡度起伏度
权重	0.118	0.160	0.083	0.097	0.069	0.125	0.160	0.097	0.090

## 4 排土场微立地类型划分

依据上述植被恢复立地因子特点,按立地类型小区、立地类型组、立地类型的三级分类系统进行分类。

### 4.1 平台立地类型

根据平台立地特点,选取坡度、坡向、覆土基质、覆土厚度、土壤容重、地面非均匀沉降、地形起伏度、河流动能指数 8 个非生物性因子为变量,运用 SPSS 软件,采用组间联接的聚类方法、以平方 Euclidean 距

离为度量标准, Z 得分标量进行标准化,对排土场平台各样点进行系统聚类<sup>[18,24]</sup>。

结合平台立地条件分析及立地因子相关性分析,选取坡向、覆土厚度、覆土基质为主导因子。按照“坡向+覆土基质”,二段式命名法对平台立地类型组进行命名;按照“坡向+覆土厚度+覆土基质+风险性”,四段式命名法对平台立地类型进行命名<sup>[13-18,24]</sup>(表 8),完全组合可得到 135 种立地类型,在调查范围内有 9 种立地类型组、13 种立地类型。

表 8 平台立地类型划分结果

立地类型组	立地类型	立地类型组	立地类型
I 阳坡黄土型	阳坡厚层黄土低风险型	IV 半阳坡红黏土型	半阳坡厚层红黏土无风险型
	阳坡薄层黄土低风险型	V 半阳坡砾质型	半阳坡薄层砾质低风险型
	阳坡厚层黄土无风险型	VI 半阴坡黄土型	半阴坡厚层黄土无风险型
II 阳坡砾质型	阳坡厚层砾质低风险型	VII 半阴坡砾质型	半阴坡厚层砾质低风险型
	半阳坡厚层黄土型无风险型	VIII 阴坡黄土型	阴坡厚层黄土型无风险型
III 半阳坡黄土型	半阳坡薄层黄土低风险型	IX 全坡黄土型	全坡厚层黄土型无风险型
	半阳坡厚层黄土型高风险型		

平台立地类型特征及植被恢复状况:类型 I 阳坡黄土型,植被覆盖度高,土壤有机质及全氮含量较低。厚层覆土区,植物生长无明显限制因子。薄层覆土区,柠条等灌木长势较好;类型 II 阳坡砾质型,土质疏松,土壤有机质及全氮含量低,有大面积沙棘枯死,出现小陷坑等岩土侵蚀痕迹;类型 III 半阳坡黄土型,土壤有机质及全氮含量较高。植被覆盖率高的区域土壤容重小;类型 IV 半阳坡红黏土型,土质紧实,植被较

稀疏,水土流失严重,土壤较贫瘠;类型 V 半阳坡砾质型,土质疏松,土层薄,土壤养分贫瘠,导致“小老树”产生。地面有非均匀沉降痕迹;类型 VI 半阴坡黄土型,土层厚,土质紧实,土壤含水量、土壤有机质及全氮含量较高。植物生长限制因素少,具有很好的立地条件;类型 VII 半阴坡砾质型,厚层覆土,土质偏紧实,土壤养分较贫瘠。地形起伏较大,是水土流失易发区域;类型 VIII 阴坡黄土型,土层厚,土壤含水量及土壤养

分较高。植物生长限制因素少,具有较好的立地条件;类型Ⅸ全坡黄土型,为平台顶部地区。土层厚,土质疏松,土壤有机质及全氮较高,主要为农用地及其防护林带。

#### 4.2 边坡立地类型

根据边坡立地特点,选取坡度、坡向、坡位、坡型、基质、土壤容重、地形起伏度、河流动能指数8个非生物性因子为变量,采用与平台相同的方法对边坡各点进行聚类。

结合边坡立地条件分析及立地因子相关性分析,选取坡向、坡位、坡度、基质为主导因子。按照“坡向+坡位”,二段式命名法对边坡立地类型组进行命名;按照“坡向+坡位+基质+稳定性+坡度”,五段式命名法对边坡立地类型进行命名<sup>[13-18,24]</sup>(表9),完全组合可得到144种立地类型,在调查范围内有9种立地类型组、20种立地类型。

表9 边坡立地类型划分结果

立地类型组	立地类型	立地类型组	立地类型
I 阳坡上部坡	阳坡上部土质稳定缓坡	V 半阳坡下部坡	半阳坡下部土质稳定斜坡
	阳坡上部土质不稳定斜坡		半阴坡上部土质稳定缓坡
	阳坡上部石砾质不稳定缓坡	VI 半阴坡上部坡	半阴坡上部土质稳定斜坡
II 阳坡中部坡	阳坡中部砾质稳定斜坡	VII 半阴坡中部坡	半阴坡上部砾质不稳定斜坡
	阳坡中部土质稳定斜坡		半阴坡中部土质稳定缓坡
III、阳坡下部坡	阳坡下部砾质稳定缓坡	VIII 半阴坡下部坡	半阴坡中部土质稳定斜坡
	阳坡下部土质稳定斜坡		半阴坡中部砾质不稳定缓坡
	阳坡下部砾质不稳定陡坡	IX 阴坡上部坡	半阴坡下部土质稳定缓坡
IV 半阳坡中部坡	半阳坡中部土质稳定缓坡		半阴坡下部砾质稳定缓坡
	半阳坡中部石砾质不稳定缓坡		阴坡上部砾质稳定缓坡

## 5 植被恢复优化措施

植被重建是土地复垦的基础与成败关键,不同的立地类型决定着植被恢复的难易程度、植被类型的配置类型及演替规律。其中,平台厚层黄土型、边坡土质中/下部坡型具有良好的立地条件,有利于植被恢复。在排土场构筑过程中,应避免砾质、砾石质覆土的出现;豆科牧草(如:沙打旺、紫花苜蓿、草木樨等)能够短期内取得水土保持、改善土壤营养状况的成效;通过培植耐干旱、耐贫瘠、生命力强、防风固沙能力较强的植被(如:沙棘、柠条等)使植物生境逐步得到改善;阳坡栽植喜光植被(如:沙棘、沙枣、油松、刺槐、新疆杨等),阴坡应栽植耐阴植被(如:沙柳、榆树、旱柳等);合理配置植物空间,减少植物内部的相互竞争。喜光、速生的植物种植宜稀一些,耐阴、生长慢的宜密一些;采用较好的混交林种植模式(如:刺槐×油松×柠条林、刺槐×油松林、刺槐×沙棘林),充分利

用营养空间,有利于立地条件的改善、防护效能的发挥、抵抗灾害能力的提升;必要时增施肥料,加快复垦土壤熟化,改善其营养状况;对于水土流失严重的区域及不稳定边坡,加强平台堆状地面、坡面截排工程、道路硬化等工程措施的实施;采取“苗木防冻、锄草、施肥、修枝、间伐”等植被维护及管理技术,防范植被退化、推动复垦区植被与生态系统的恢复与正向演替。

## 6 结论

(1) 本文立地类型划分的数据建立在安太堡矿区西排土场基础上,虽然调查范围未涵盖露天矿区所有排土场,但是分类方法具有一定科学性,分类体系较为完整、涉及了排土场范围内所有可能的立地类型。

(2) 本文立地类型划分的对象是复垦后的排土场,其划分方法及体系同样适用于未复垦的排土场。

针对不同的立地类型以及复垦区呈现出的立地条件变化、植被恢复规律,对未复垦排土场的植被选配等重建技术具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 魏忠义,王云凤,李晓雷等.露天矿区景观恢复与整治措施探讨[J].金属矿山,2012(1):144-146.
- [2] 德安,郭仕涛,孙大庆,等.青岛市大陆基岩海岸宜林地立地类型的划分[J].山东林业科技,1996(4):43-46.
- [3] 樊华,赵方莹,孙保平,等.北京市门头沟区植被恢复立地类型划分[J].中国水土保持,2007(8):29-31.
- [4] 周应书,何兴辉,谢永贵,等.毕节喀斯特山地植被恢复立地类型划分[J].林业科学,2009,44(12):123-128.
- [5] 高华端,林泽北,罗婷,等.贵州省强度石漠化区立地分类系统研究[J].水土保持研究,2011,18(2):26-29.
- [6] 王富,李红丽,董鲁光,等.淄博市周边破坏山体立地类型划分[J].山东林业科技,2008,38(3):41-43.
- [7] 赵荟,朱清科,王晶,等.黄土区阳坡不同立地植被恢复研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(3):116-121.
- [8] 万浩宇,高欣,高保山,等.陕北资源开发区植被恢复与重建制约因子调查分析[J].陕西林业科技,2011(3):31-35.
- [9] 王治国,佟则昂.黄土区大型露天矿排土场岩土侵蚀及其控制技术的研究[J].水土保持学报,1994,8(2):10-17.
- [10] 郝蓉,白中科,赵景逵,等.黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J].生态学报,2003,23(8):1470-1476.
- [11] 殷昊,刘飞,杜立新,等.黄土高原区地形与植被分布规律对滑坡发生概率的影响[J].现代地质,2010,24(5):1016-1021.
- [12] 卫亚星,王莉雯,刘闯.基于MODIS NDVI时序数据的青海省草地分级[J].资源科学,2008,30(5):688-693.
- [13] 王富,李红丽,董智,等.城市周边破坏山体的立地条件类型划分及其植被恢复措施:以山东淄博市为例[J].中国水土保持科学,2009,7(1):92-96.
- [14] 樊华,赵方莹,孙保平,等.北京市门头沟区植被恢复立地类型划分[J].中国水土保持,2007(8):29-31.
- [15] 赵鹏祥,徐国策,王鸿哲,等.基于GIS的陕北农牧交错带立地类型划分研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(10):76-82.
- [16] 赖挺.四川巨桉人工林立地分类研究[D].四川雅安:四川农业大学,2005.
- [17] 赵飞.淄博市四宝山破坏山体立地分类与评价研究[D].山东泰安:山东农业大学,2008.
- [18] 田涛.北京典型边坡立地条件类型划分研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- [19] 闫德仁,赵丽.华北落叶松,兴安杨树人工林对土壤养分变化的影响[J].东北林业大学学报,2013,41(1):27-31.
- [20] 易亮,李凯荣,张冠华,等.渭北黄土高原经济林地土壤养分特征研究[J].水土保持研究,2009,16(2):186-190.
- [21] 冯全洲,徐恒力.土地复垦的覆土厚度及覆土基质确定[J].农业科学与技术:英文版,2009,10(4):183-188.
- [22] 吕春娟,白中科,秦俊梅,等.黄土区大型排土场岩土侵蚀特征研究:以平朔矿区排土场为例[J].水土保持研究,2006,13(4):233-236.
- [23] Zhang Y, Liu B, Zhang Q, et al. Effect of different vegetation types on soil erosion by water[J]. Acta Botanica Sinica, 2002, 45(10): 1204-1209.
- [24] 邓送求,闫家锋,关庆伟,等.基于聚类分析的风景立地类型划分[J].南京林业大学学报:自然科学版,2009(3):73-77.
- [25] 李晋川,白中科,张立城,等.露天煤矿土地复垦与生态重建[M].北京:科学出版社,2000.
- [26] 郭道宇,张金屯,宫辉力,等.安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J].生态学报,2005,25(4):763-770.