

## 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究

杨 修<sup>1</sup>, 高 林<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**对德兴铜矿 1 号尾矿库库面纯尾砂立地植被恢复与重建进行了研究。结果表明:纯尾砂植被恢复与重建的主要障碍是土壤因子,即土壤组成、结构、水分、养分和毒性。矿区自然植被的次生演替序列为:次生裸地→草丛→灌丛→针叶林→常绿与落叶阔叶混交林、针阔叶混交林→常绿阔叶林 6 个阶段。纯尾砂立地 13 种试验先锋草种的优劣势比较结果依次顺序为:水蜡烛 1.06>假俭草 1.05>羊状羊茅 1.01>芒草 1.00=弯叶画眉草 1.00>狗牙根 0.98=百喜草 0.98=香根草 0.98>象草 0.87>荩草 0.85>矮象草 0.76>节节草 0.73>苏丹草 0.55。水蜡烛、假俭草、羊状羊茅、芒草、弯叶画眉草、狗牙根、百喜草、香根草、象草、荩草、矮象草、节节草被认为是纯尾砂植被恢复与重建的优良先锋草种。纯尾砂立地植被恢复与重建的途径主要包括植被恢复演替、土壤生物改良和客土复垦 3 种模式。

**关键词:**德兴铜矿;纯尾砂;植被恢复与重建;先锋草种;演替

## A study on re-vegetation in mining wasteland of Dexing Copper Mine, China

YANG Xiu<sup>1</sup>, GAO Lin<sup>2</sup> (1. Agro-Meteorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1932~1940.

**Abstract:** Re-vegetation in mining wasteland is a principal part of the eco-environment construction, and an important guarantee of sustainable development in mining areas. This research took the re-vegetation of No. 1 tailing dam in Dexing Copper Mine as an example. Through the analysis of the site environmental condition and the survey of natural vegetation types in the area, the selection of suitable pioneer plant species, and the experiments of artificial re-vegetation in the tailing sand, the following preliminary results had been achieved: The main obstacle of re-vegetation in the site was the soil condition, i. e., soil composition, structure, water content, nutrients and toxicity. The secondary succession sequence of the vegetation in the mining area essentially experienced 6 phases: sub-secondary bare ground→tussock→shrubbery→coniferous forest→evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest, coniferous and broad-leaved mixed forest→evergreen broad-leaved forest. The climatic community is evergreen broad-leaved forest. The priority degrees of the experimental grass species followed the sequence: *Typha angustifolia* 1.06>*Eremochlon ophiuroides* 1.05>*Testuca arundinacea* 1.01>*Miscanthus sinensis* 1.00=*Eragrostis curvula* 1.00>*Cynodon dactylon* 0.98=*Paspalum notatum* 0.98=*Vetiveria zizanioides* 0.98>*Pennisetum purpureum*, *Equisetum ramosissimum* 0.87>*Arthraxon hispidus* 0.85>*Pennisetum* sp. 0.76>*Equisetum ramosissimum* 0.73>*Sorghum sudanense* 0.55. *Typha angustifolia*, *Eremochlon ophiuroides*, *Testuca arundinacea*, *Miscanthus sinensis*, *Eragrostis curvula*, *Cynodon dactylon*, *Paspalum notatum*, *Vetiveria zizanioides*, *Pennisetum purpureum*, *Arthraxon hispidus*, *Pennisetum* sp., *Equisetum ramosissimum* are the suitable pioneer plant species for re-vegetation in the site type of pure tailing sand. There are 3 basic models for re-vegetation in

**基金项目:**国家“九五”重点科技攻关课题(96-920-13-03)资助项目。

**收稿日期:**2001-07-14; **修订日期:**2001-09-05

**作者简介:**杨 修(1961~),男,河南省新安县人,博士,副研究员。主要从事农林复合经营、乡村可持续发展及退化生态系统的恢复与重建。

the site type, i. e. vegetation restoration succession model, biological soil-improving model and guest soil reclamation model.

**Key words:** Dexing Copper Mine; pure tailing sand; re-vegetation; pioneer grass species; succession

文章编号: 1000-0933(2001)11-1932-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

矿山开采造成大规模土地破坏,在中国乃至世界,都是一个十分严重且日益受到高度重视的问题<sup>[1-3]</sup>。矿山开发造成生态系统的破坏十分严重,特别是土壤和植被的丧失,使土地失去利用价值。如露天开采会直接摧毁地表土层和植被,地下开采会导致地表塌陷,从而引起土地和植被的破坏。矿山开发过程中的废弃物(如尾矿、废石等)需要大面积的堆置场地,从而导致对土地的大量占用和对堆置场原有生态系统的破坏,引起自然条件的变化,并形成限制植物生长和发育的环境因子<sup>[10-13]</sup>。与此同时,选矿排泄的有毒有害物质还易造成重大生态环境问题,如环境污染和因植被丧失引起的局部水土流失和生境恶化等。矿山废弃地不仅占用土地,污染环境,影响当地经济发展,而且也对当地社会产生不良作用。通过复垦被破坏的土地来增加土地资源,既是缓解人地矛盾和矿山环境建设的需要,同时又是促进矿山经济开发与环境保护协调发展的主要举措。矿山废弃地的恢复与重建,已被看作是矿区恢复元气有生力量的组成部分,是改善当地居民生活条件的有效途径。

由于矿山废弃地土壤结构性差,有机质含量及植物必需的养分元素(尤其是氮、磷、钾)缺乏,同时重金属含量又较高,因此很不利于植物生长和其他生物活动,恢复起来十分困难。对废弃地植被恢复与重建机理的科学研究,并在此基础上提出植被恢复重建的可行模式,已成为一项紧迫而极其重要的研究课题。虽然我国煤矿区废弃地复垦研究较多<sup>[7-10, 11, 19, 22]</sup>,但关于有色金属矿山废弃地复垦研究的报道很少<sup>[12-14]</sup>。本研究旨在通过铜矿典型尾矿库废弃地类型的研究,为德兴铜矿其它几个尾矿库及我国南方同类矿山的植被恢复与重建提供理论依据和成功模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 矿区和试验地概况及分析

**1.1.1 矿区概况** 德兴铜矿位于江西省上饶地区的德兴市,北纬 28°41',东经 117°44',全矿总面积 100km<sup>2</sup>。矿区内地貌为低山、丘陵,海拔 65~500m。矿区属中亚热带季风气候,年平均温度 17.0℃,≥10℃年积温 5 233~5 809℃,无霜期 248~273d;年日照时数 1 800~2 000h,年太阳辐射总量 466.75~468.13kJ/cm<sup>2</sup>;年降雨量 1,901.6mm;年均相对湿度 81.4%,年蒸发量 1 303mm。土壤主要为红壤和山地黄红壤。

矿区植物区系属于亚热带湿润森林植物区系。由于自然条件优越,又未受到第四纪大陆冰川的毁灭性袭击,因此,植被类型繁多,植物区系丰富。有藻类 6 门,31 科,56 属,135 种;蕨类植物 13 科,16 属,19 种;种子植物 123 科,308 属,462 种。在种子植物中,裸子植物有 8 科,10 属,10 种;被子植物 115 科,298 属,462 种。按照林英教授的区系分析方法<sup>[27]</sup>,该矿区的植物区系可分为主要世界性或亚世界性成分,主要热带性成分,主要热带、亚热带性成分,主要亚热带性成分,主要亚热带、温带性成分,主要热带、温带性成分和主要温带性成分。植被的优势种和常见植物区系成分以主要热带性成分和主要热带、亚热带性成分占优势。主要植被类型有亚热带常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶混交林、针叶林、竹林、荒山灌木草丛、荒山草丛、草甸等(见表 1)。

从以上自然植被类型的分析可大致看出德兴矿区自然植被的演替规律(见图 1)。从图 1 中可以看出,在自然状态下植被向上演替,而在人为不利干扰下则发生向下演替,根据人为影响的强度和持续时间的不同,则向下演替的阶段有所不同。德兴矿区地带性的植被是常绿阔叶林,但在人为影响下开始发生向下演替,取而代之的是一些喜阳的植物,如马尾松。如果马尾松继续遭到砍伐,就会变成各种灌丛;灌丛再被砍伐或火烧,则出现以禾本科和莎草科及其他杂草所形成的荒山草地,最后成为次生裸地。目前矿区植被明显地是沿着向下演替的趋势演变,因此,必须引起足够的重视。在向下演替的某一阶段中,如果停止人为干扰,加之封山育林,在自然状态下植被就会向上演替。目前矿区各种植被类型处于不同的演替阶段,而且极

不稳定,并随着人为干扰程度的大小而变化。减轻或停止干扰植被则向上演替,这种演替是长期的、缓慢的演替;相反,则会向下演替,而且这一演替过程往往是快速的。了解和掌握植被的演替规律,对矿山废弃地植被恢复与重建过程中优良植物种类的筛选、适时引入及人工加速恢复演替进程均具有十分重要的意义。

表 1 德兴矿区的自然植被类型

Table 1 Natural vegetation types in Dexing mining area

植被类型 Vegetation types	典型群落类型 Typical communities
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	苦槠林、樟树林、栲树林、罗浮栲林、青冈栎林、甜槠林
常绿与落叶阔叶林 Evergreen and deciduous broad leaved mixed forests	青冈栎+红楠+枫香-苦竹+白马骨-苔草+淡竹
针叶林 Coniferous forests	马尾松林、杉木林
竹林 Bamboo forests	毛竹林
荒山灌木草丛 Barren mountain shrubbery	短穗竹灌木草丛、茅栗灌木草丛、映山红灌木草丛、石栎灌木草丛、榿木灌木草丛、胡枝子灌木草丛
荒山草丛 Tussock	芒萁草丛、蕨草丛、五节芒草丛、白茅草丛
草甸 Meadows	假俭草草甸、狗牙根草甸、斑芒草甸

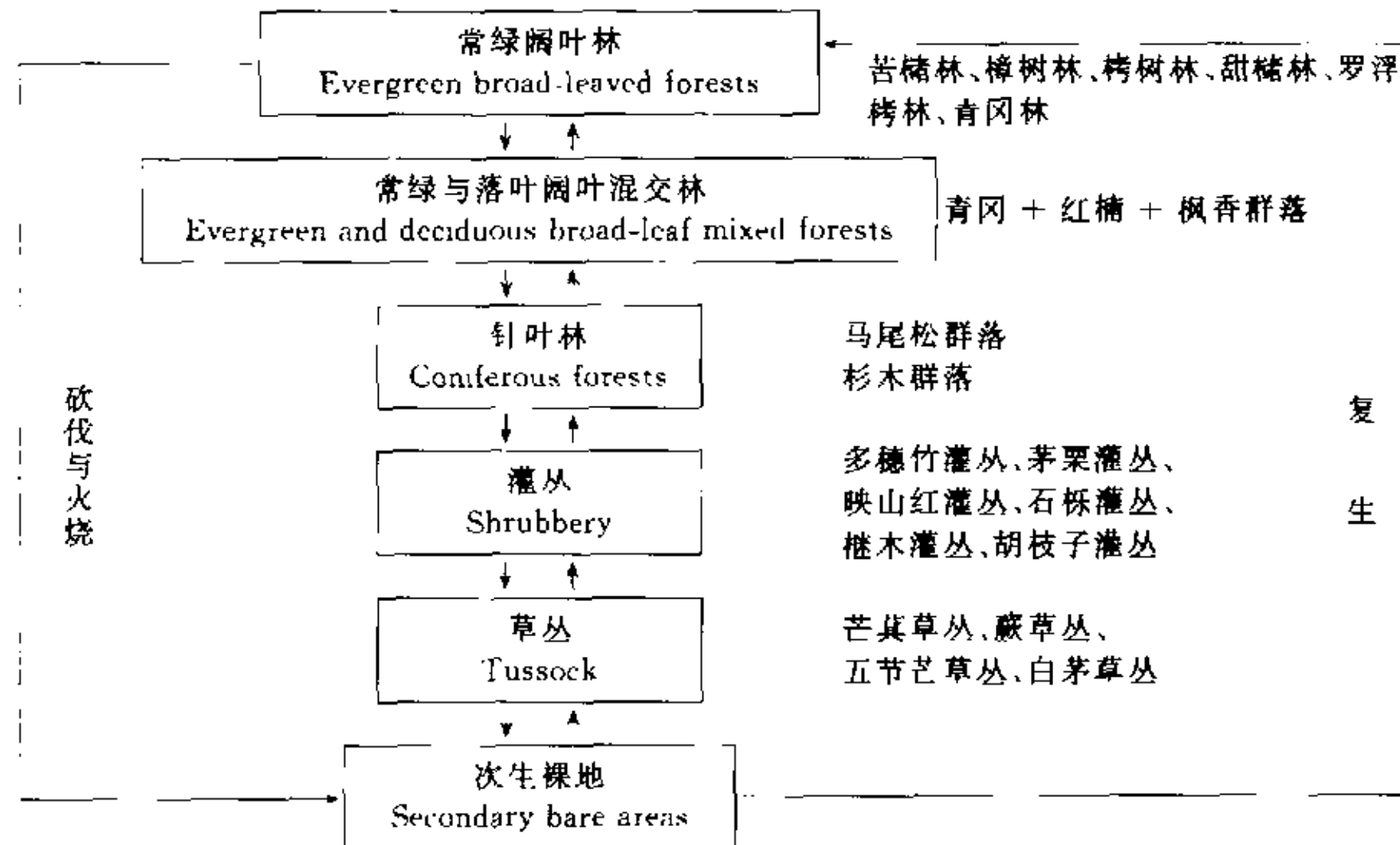


图 1 德兴矿区自然植被的演替规律

Fig. 1 Natural vegetation succession law in Dexing mining area

1.1.2 试验地概况 试验地设在德兴铜矿 1 号尾矿库。库面纯尾砂粒度为 0.2~0.05mm(砂粒),占 50.56%,而 0.05mm(粉粒)以下的占 49.44%,按土壤颗粒分级,介于砂土与壤土之间。纯尾砂的化学成分分析结果(表 2)表明:纯尾砂中有机质含量很低而且缺乏植物生长所必需的氮、磷、钾养分。全氮、全磷含量很低,分别为 0.33g/kg 和 0.48g/kg,速效氮、速效磷极低,仅 1.7mg/kg 与 0.84mg/kg;纯尾砂全钾较高(39.6g/kg),但速效钾只有 18.6mg/kg,仅有最低临界值的一半;阳离子交换量仅 1.19cmol(+)/kg;其 pH 值偏碱性。同时,土壤中含有重金属离子如铜、锌、铅、铬等(表 3)。全铜含量高出当地土壤背景值的 102 倍,超过土壤环境标准的 50 倍,铬超过背景值 50%,低于土壤环境标准,易对植物造成毒害,这些均是植被恢复、重建的不利因素。

表2 德兴铜矿1号尾矿库纯尾砂化学性质分析

Table 2 Chemical characteristics of the pure tailing sand in No. 1 tailing dam

有机质 Organic matter (%)	全氮 N (%)	全磷 P (%)	全钾 K (%)	速效氮 Rapidly available N (mg/100g 土)	速效磷 Rapidly available P (mg/100g 土)	速效钾 Rapidly available K (mg/100g 土)	阳离子交换 量 CEC (cmol+/kg)	pH 值 pH value
1.60	0.033	0.048	3.96	0.17	0.084	1.86	1.19	8.0

表3 德兴铜矿1号尾矿库纯尾砂重金属含量分析结果

Table 3 Heavy metal element contents of the pure tailing sand in No. 1 tailing dam

Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)
2.524	18.9	11.2	37.5	11.8	22.3	0.098

总的来说,矿区气候温暖湿润,光能资源丰富,日照适宜,雨量丰富,无霜期长,气候条件优越,为各种植物创造了良好的生长发育条件。矿山废弃地的土壤条件是植被恢复重建的重要限制因子,在选择植物种类上应以适生为前提,优先选择那些耐干旱、耐瘠薄、生产力较高、对土壤改良功能较强、环境效益好的草本植物种类为先锋植物种类。

## 1.2 材料及方法

1.2.1 试验的先锋植物种类 选择了假俭草、水蜡烛、节节草、百喜草、芒草、苇状羊茅、苏丹草、狗牙根、弯叶画眉草、籽粒苋、苕草、香根草、象草、矮象草、胡枝子 15 种草种作为试验草种。

1.2.2 试验安排和种植方式 各种草种试验小区面积为 100m<sup>2</sup>。根据试验草种的各自繁殖特点和种子来源难易程度,于 1998 年 4 月 25 日采用了移栽、条播和撒播等方式种植。

1.2.3 抚育管理措施 纯尾砂试验地于各种植物播种或移栽之前(2~3 月份),施基肥 1 次;5 月 10 日又普施尿素追肥 1 次,并根据天气情况进行了多次灌水,除此之外没有再采取其它管理措施。

1.2.4 方法 从 1998 年 4 月 25 日种植后,每月中旬观测一次,直到生长末期(10 月中旬),每年测定 6 次,连续观测 3a。

(1) 覆盖度测定 采用目测法,即调查时鲜草地上部分覆盖地面的百分率。

(2) 高度测定 用实测法,调查时用米尺量取各试验草种的平均高度,作为高度指标值。

(3) 鲜草产量测定 每年最后一次调查时(10 月中旬),在各草种试验板块中选取 1m<sup>2</sup> 有代表性的样方,用利剪刀剪下地上部分,称其鲜重作为样方鲜草产量,推算单位面积鲜草产量。

(4) 生物量测定 每年最后一次调查时(10 月中旬),在各草种试验板块中选取 1m<sup>2</sup> 有代表性的样方,用铁锹挖出样方中全部植株(包括地上和地下部分),用清水洗去根部的泥土,分别放入鼓风恒温(105℃)干燥箱中烘干至恒重,作为各样方生物量,推算各草种单位面积生物量。

(5) 生长状况级 采用目测法,把草种的生长状况分为 5 级,即旺盛、良好、中等、弱、不适宜。能很好适应纯尾砂立地,生长势旺,叶色浓绿的被判定为“旺盛”级;能适应纯尾砂立地,生长良好但势头次于旺盛级,叶色淡绿的草种,被判定为“良好”级;能适应纯尾砂立地,生长势头一般,叶色淡黄的草种,被判定为“中等”级;在纯尾砂立地上勉强能够生存,生长势弱,叶色异常的草种,被判定为“弱”级;种植后不能适应纯尾砂立地,在生长季节中相继死亡的草种,被判定为“不适宜”。

## 2 结果与分析

### 2.1 纯尾砂废弃地植被的恢复与重建

纯尾砂立地作为主要的、同时又是复垦难度较大的矿山废弃地类型,对其进行复垦试验及复垦模式的总结,有利于加速该种立地条件的治理速度,改善矿区生态环境,促进矿山生产和社区的可持续发展。

2.1.1 纯尾砂立地条件下各试验草种的生长状况 纯尾砂立地各试验草种生长情况的调查结果见表 4

表4 纯尾砂各试验草种的产草量和覆盖度  
Table 4 Grass yield of each experimental species in the pure tailing sand

草种 Species	覆盖度(%) Coverage						高度 Height (cm)	鲜草产量 Fresh yield (kg/hm <sup>2</sup> )	生物量 Biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	生长状况 Growing status (旺盛、良好、中 等、弱、不适宜)
	5月 May	6月 Jun.	7月 Jul.	8月 Aug.	9月 Sept.	10月 Oct.				
芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	15	50	65	75	82	82	200	18,800	16,782	旺盛
矮象草 <i>Pennisetum sp.</i>	12	18	21	21	25	30	30	1,500	1,614	良好
籽粒苋 <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	3	5	7	7		—	—			不适宜
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	15	30	45	53	55	55	15	1,847	4,181	旺盛
象草 <i>Pennisetum purpureum.</i>	20	40	46	46	54	60	120	6,800	7,037	良好
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	未出苗	10	14	14	—	—				不适宜
水蜡烛 <i>Typha angustifolia</i>	20	25	42	60	65	65	140	22,000	19,604	旺盛
苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>	8	15	18	18	20	20	23	200	225	弱
弯叶画眉草 <i>Eragrostis curvula</i>	15	20	35	45	55	60	45	5,000	9,682	旺盛
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	40	10	25	75	80	80	8	2,500	6,101	旺盛
节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	10	15	20	40	48	50	18	900	1,371	良好
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	45	66	80	88	90	90	120	5,148	5,972	旺盛
荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	35	45	58	65	70	70	40	2,319	4,724	良好
假俭草 <i>Eremochlon ophiuroides</i>	30	40	55	63	65	70	18	12,944	17,047	旺盛
苇状羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	15	56	67	85	88	93	14	2,241	4,955	旺盛

从表4可以看出,试验的15种草种,在纯尾砂立地生长表现“旺盛”的有8种,它们是:芒草、水蜡烛、百喜草、弯叶画眉草、狗牙根、香根草、假俭草和苇状羊茅,这8种草类能够很好的适应纯尾砂立地条件,并表现出旺盛生长态势,说明用其作为德兴铜矿尾矿库纯尾砂立地类型的植被恢复的先锋草类是可行的。在纯尾砂上表现“良好”的草种有4种,它们是矮象草、象草、节节草和荩草,这4种草类在纯尾砂上虽然能够生长,但生长高度矮于其正常生长高度、生长势弱于其正常生长表现或叶色不浓绿等,能勉强适应纯尾砂立地条件。生长表现“弱”的有一种,即苏丹草,其高生长23cm,仅为其正常生长量的1/10,且生长势较弱,生长后期地上部枯黄。试验草种在纯尾砂上生长表现“不适宜”的有2种,它们是籽粒苋和胡枝子,这些草种播种出苗后表现较差,7月份以后地上部分先后死亡,因此,它们不适宜作为纯尾砂立地植被恢复的先锋草种。

2.1.2 纯尾砂立地试验草种的优劣势比较 为了对各种试验草种在纯尾砂种植的相对优势程度进行比较,根据以上各草种的调查结果,以其生长中若干指标优势值的加权和作为评价依据,对试验中较适宜的13个草种(另外2种已被判定不适宜在纯尾砂立地条件种植)进行优劣势比较。如果某草种的优势值越大,说明相对其它草种而言,该草种在纯尾砂种植越有利。评价的公式如下:

$$P_j = \sum_{k=1}^n W_k \cdot P_{kj}$$

式中: $P_j$ —— $j$ 草种的综合优势值; $W_k$ ——第 $k$ 项指标的权重( $0 \leq W_k \leq 1$ ); $P_{kj}$ ——第 $j$ 草种第 $k$ 项指标的

优势值。

以各种试验草种的生长势、盖度、高度、鲜草产量、生物量、经济特性、土壤改良特性 7 项指标作为评价指标,依据各项指标相对重要程度赋予各项指标权重,而后对纯尾砂立地条件的 13 种试验草种的优劣势进行评价,其结果见表 5。

表 5 中以芒草的各项指标值为 1,其它草种的各项指标值是相对于芒草而言的,最后算出各自的综合优势值。

从优劣势比较的结果来看,纯尾砂 13 种较适宜的试验草种优劣势依次顺序为:水蜡烛 1.06>假俭草 1.05>苇状羊茅 1.01>芒草 1.00=弯叶画眉草 1.00>狗牙根 0.98=百喜草 0.98=香根草 0.98>象草 0.87>荩草 0.85>矮象草 0.76>节节草 0.73>苏丹草 0.55。评价结果表明:水蜡烛是纯尾砂水陆交错或湿润地方的优良先锋草种;而假俭草、苇状羊茅、芒草、弯叶画眉草、狗牙根、百喜草、香根草是纯尾砂干旱地方的优良先锋草种,植被复垦早期,应以这些草类作为纯尾砂草本群落的主要建群种,并适当种植一些象草、矮象草、节节草等;在纯尾砂上种植的苏丹草综合优势值较低,仅为 0.55,不适宜作为纯尾砂早期复垦的先锋草种。

## 2.2 纯尾砂立地条件的植被恢复与重建模式

由于纯尾砂特殊的立地条件,植被恢复与重建的难度很大,根据不同的利用目标,植被恢复、重建可采取不同的技术措施,主要包括:植被恢复演替途径、土壤生物改良途径和客土复垦途径 3 种模式。

### 2.2.1 纯尾砂立地的植被恢复演替模式

植被恢复演替模式是利用群落演替规律,根据矿山废弃地立地条件,通过植物种类筛选和合理的植被顺序,达到矿山废弃地利用和植被恢复的目的。这是世界各地应用最广泛的一种复垦方法<sup>[1,2,5,28,29]</sup>,复垦的目的是恢复矿区植被,改善生态环境,最终实现林业利用。

纯尾砂立地上的植被恢复演替属于人工干预下的旱生砂土基质演替系列。在这个演替系列中,起首要作用的控制因子是土壤因子,即土壤养分和水分等及其可能得到改善的速度。按照群落演替理论<sup>[30-32]</sup>,矿山废弃地植被恢复过程是从先锋植物的引入开始,经过一系列演替阶段,最终达到中生性的顶极群落。在自然状态下,这一演替过程具有较长的历史,受到许多因素的制约,特别是受种子传播来源的约束,而矿山废弃地植被的恢复与重建是人为干预下有目标的植被演替,不受种子传播来源的约束,并能人工调控植被组成及辅助一些管理措施,使生境迅速得以改善,大大加速演替进程。

根据“德兴矿区自然植被类型及其演替规律”的研究分析,德兴矿区的地带性植被是常绿阔叶林,从裸地开始的进展演替大致经过裸地→草丛→灌丛→针叶林→常绿与落叶阔叶混交林、针阔叶混交林→常绿阔叶林阶段。根据地带性植被演替规律,可以推断德兴铜矿纯尾砂立地植被演替的过程,其演替模式应遵从自然植被演替规律。

在纯尾砂裸地阶段,生境十分恶劣,极不利于植物的定居,木本植物不能生长,大多数草本植物也难存活。为了改善生态环境,恢复植被,种植耐性强的先锋草类,如假俭草、苇状羊茅、芒草、弯叶画眉草、狗牙根、百喜草、香根草、象草、荩草、矮象草、节节草、水蜡烛等,使裸地迅速被植物所覆盖,形成草丛群落,土壤逐渐得以改良。由于植被的遮荫,减少了蒸发,调节了温、湿度变化,土壤中真菌、细菌和小动物的活动也增强了,生境变得能够使更多的植物适宜生长。逐渐地对价值较低的草类进行更新,引入优良牧草、经济价值较高的草类或对土壤改良作用较强的绿肥植物如紫花苜蓿、沙打旺、沙棘、田菁、草木樨、猪屎豆等作为更新种,使群落具有更大的价值和土壤改良作用。草本植物群落发展到一定阶段,特别是土壤的改良程度能够适宜木本灌木生长时,及时引进先锋灌木如沙棘、怪柳、柠条、紫穗槐、胡枝子等一些阳性、喜光灌木,使群落向草-灌群落转化,并逐渐加大灌木数量,促进灌丛群落的出现。继灌木群落之后,生境开始适宜阳性先锋乔木树种生长,逐渐形成针叶林、针阔混交林。至此,林下形成郁闭环境,使耐荫的树种得以定居,耐荫性树种增加,而阳性树种因在林下不能更新而逐渐从群落中消失,林下耐荫的灌木和草本植物复合的森林群落——常绿阔叶林形成,群落结构复杂化,生产力得以提高,土壤条件和小气候进一步改善,最后形成稳定的群落。由于演替过程受多种因素的影响,特别是人为干预在各阶段的水平高低及期待下一个阶段出现的迫切性不同,很难预测矿山废弃地植被恢复演替各阶段持续时间的长短。

表 5 纯尾砂试验草种的优劣势评价  
Table 5 Adaptability assessment of the experimental species in the pure tailing sand in No. 1 tailing dam

草种 Species	生长势 Growing status	指标 Index	盖度 Coverage (%)	指标 Index	高度相对值* Relative height value	指标 Index	鲜草产量 Fresh yield (kg/hm <sup>2</sup> )	指标 Index	生物量 Biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	指标 Index	经济特性指标 Economic feature index	改良土壤特 性指标 Soil-improving feature	综合优势值 Integrated assessment value
Index weighting value	0.55	0.1	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1.00
芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	旺盛	1.00	82	1.00	80.0	1.00	18800	1.00	16782.73	1.00	1.00	1.00	1.00
矮象草 <i>Pennisetum sp.</i>	良好	0.80	30	0.37	22.2	0.28	1500	0.08	1614.70	0.10	3.00	2.00	0.76
象草 <i>Pennisetum purpureum</i> , <i>Equisetum ramosissimum</i>	良好	0.80	60	0.73	40.0	0.50	6800	0.36	7037.36	0.42	3.00	2.00	0.87
水蜡烛 <i>Typha angustifolia</i>	旺盛	1.00	65	0.79	73.7	0.92	22000	1.17	19604.14	1.17	2.00	1.00	1.06
苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>	弱	0.40	20	0.24	9.2	0.12	200	0.01	225.00	0.01	3.00	3.00	0.55
弯叶画眉草 <i>Eragrostis curvata</i>	旺盛	1.00	60	0.73	37.5	0.47	5000	0.27	9682.00	0.58	2.00	3.00	1.00
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	旺盛	1.00	80	0.98	32.0	0.40	2500	0.13	6101.18	0.36	3.00	2.00	0.98
节片草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	良好	0.80	50	0.61	60.0	0.75	900	0.05	1374.79	0.08	1.50	2.00	0.73
白喜草 <i>Paspalum notatum</i>	旺盛	1.00	55	0.67	38.5	0.48	1847	0.10	4181.32	0.25	3.00	3.00	0.98
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	旺盛	1.00	90	1.10	52.2	0.65	5148	0.27	5971.84	0.36	2.00	2.30	0.98
荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	良好	0.80	70	0.85	48.8	0.61	2319	0.12	4724.25	0.28	2.50	2.50	0.85
假俭草 <i>Eremochloa ophiuroides</i>	旺盛	1.00	70	0.85	41.6	0.52	12944	0.69	17046.63	1.02	2.00	2.00	1.05
苇状羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	旺盛	1.00	93	1.13	37.9	0.47	2241	0.12	1975.11	0.30	2.50	3.00	1.01

\* 高度相对值表示草种在纯尾砂上的生长高度占最适生立地下生长高度的百分数。

该种演替的目的是林业利用,但在不同的演替阶段为了某种目的(如经济效益)可以人为干预使其停止向下演替。如为了发展牧业可以在草丛阶段发展优质牧草,阻止灌丛出现;为了发展条编,可以使其停留在灌丛阶段,发展紫穗槐、柠条等;为提供薪材,可使其停留在混交林阶段,发展薪炭林。为了实现群落的快速演替,迅速恢复地带性植被,应以上壤改良和植被演替各阶段之间的迅速转化为原则,在各演替阶段都积极地引进下一演替阶段的植物种类。

该种恢复、重建模式的特点是:投入的人力、物力、财力少,生态效益明显;但恢复历史较长,经济效益较低。

**2.2.2 纯尾砂立地的土壤生物改良模式** 纯尾砂立地的土壤生物改良模式是人工干预下的一种群落演替类型,最终出现人工干预的偏途演替顶极——农田,发挥更大的经济效益。该种模式的开始阶段与前一模式相同,即先锋草本植物阶段,使裸地迅速被植物所覆盖,形成草丛群落,同时改善土壤和小气候条件,创造适宜更多植物生长的生境。逐渐引入对土壤改良作用较强的绿肥植物如紫花苜蓿、沙打旺、沙棘、田菁、草木樨、猪屎豆等作物进行压青,使土壤迅速得到改良。继而引进具有固氮作用的豆科作物与绿肥作物,并轮番种植,使土壤得到改良的同时获得一定经济效益,使草丛群落逐步为低产农田所替代。与此同时,加强水肥管理,并坚持一季绿肥一季作物的原则使土壤得到进一步改良,逐渐引进其它作物,变低产农田为高产农田。

土壤生物改良模式的特点是:前期为牧草地,以改良土壤为目的;后期为农业利用,以经济效益为目的。投资较少,对于土地资源紧张、客土及资金缺乏的地区(特别是我国)具有重大应用价值。

**2.2.3 纯尾砂立地的客土复垦模式** 客土复垦法是矿山废弃地复垦最直接、最快速的一种复垦途径。它是指在有覆土条件的矿山废弃地上,覆盖一定厚度(通常为50cm左右)有生产能力的土壤,并通过一些土壤改良措施(如施肥、种植豆科作物或绿肥等)直接对矿山废弃地进行利用的一种途径,复垦的目的往往是农业或经济利用。它能克服矿山废弃地土壤极端贫瘠问题,并能迅速为植物所定居,变纯尾砂为森林、草场、果园及高产农田等。主要技术为:在覆土的初期,由于新覆的土一般为未经熟化的生土,需进行土壤熟化改良,特别是有机肥的施用,提高土壤有机质含量和水肥保持及供给能力,轮番种植绿肥作物和豆科作物是一条有效的途径。当土壤培肥后,应根据利用目的加强作物栽培管理技术。该种恢复、重建模式的优点是:快速,能很快实现复垦目的;缺点是:需要大量客土资源、工程量大、投资高、大面积推广的现实性差。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

**3.1.1** 对德兴铜矿1号尾矿库库面纯尾砂进行的立地条件诊断表明,矿区气候条件优越,有利于植物生长发育,植被恢复与重建的主要障碍是土壤因子。纯尾砂的保水保肥性差,表层渗漏速度大,不易贮水,易干旱,缺乏植物生长所需的有机质和营养元素,而且尾砂中残存的某些重金属离子和选矿药液易对植物造成毒害,这些都是植被恢复与重建的不利因素。植被恢复的关键是筛选优良先锋植物和实施土壤改良。

**3.1.2** 矿区的主要植被类型有亚热带常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶混交林、针叶林、竹林、荒山灌木草丛、荒山草丛和草甸等。植被的次生演替序列基本经历了次生裸地→草丛→灌丛→针叶林→常绿与落叶阔叶混交林、针阔叶混交林→常绿阔叶林6个阶段,顶极群落为常绿阔叶林。

**3.1.3** 适生先锋植物种类的试验结果表明:水蜡烛、假俭草、苇状羊茅、芒草、弯叶画眉草、狗牙根、百喜草、香根草、象草、荩草、矮象草、节节草是纯尾砂植被恢复与重建的优良先锋植物种类。

**3.1.4** 纯尾砂植被恢复与重建模式主要有植被恢复演替模式、土壤生物改良模式和客土复垦3种模式。

#### 3.2 讨论

**3.2.1** 植物种类选择的适当与否是矿山废弃地植被恢复成败的关键之一。根据矿山废弃地极端的环境条件,选定的植物种类应具备适应性强、抗逆性好、有改良土壤能力、根系发达,有较高的生长速度、播种栽植较容易、成活率高等特性。

**3.2.2** 土壤改良在植被恢复与重建过程中占有举足轻重的地位。土壤熟化和培肥问题是废弃地植被复垦的根本,只有提高了土壤肥力,才能真正创造植物生长的条件,达到植被恢复与重建的目的。



3.2.3 根据矿山废弃地立地条件,通过植物种类筛选和合理的植被顺序,达到矿山废弃地利用和植被恢复的目的,是世界各地应用最广泛的一种复垦方法。按照群落演替理论和群落发展规律,适时引入高级植物种及辅以人工栽培管理措施是加速复垦进程的重要环节。

3.2.4 废弃地重金属及其毒性不仅影响植物的定居及群落的形成和发展,而且关系到各项植物产品利用的安全性。开展矿山废弃地重金属的迁移转化及去除机理研究是矿山废弃地安全利用、高效利用和可持续发展的客观要求。

#### 参考文献

- [1] Bellairs S M *et al.* Proceedings of Workshop on Native Species Establishment on Mined Lands in Queensland; 8~10 November 1995. St. Lucia, Qld.; Centre for Mined Land Rehabilitation, University of Queensland, 1996.
- [2] Cairns J. *Rehabilitating damaged ecosystems*, 2nd ed. Boca Raton; Lewis Publishers, 1995.
- [3] Chaturvedi A N. *Wasteland afforestation*. Indian-For. Dehra Dun; N. M. Misra, 1985, 111(11): 919~920.
- [4] L. R. 霍斯纳[美]. 中国土地学会土地复垦分会露天开采复垦专业委员会译. 露天矿土地复垦. 1988.
- [5] Lloyd R. Hossner. *Reclamation of surface-mined lands*. CRC Press Inc, 1988.
- [6] McNearny. Knight mine reclamation: A study of revegetation difficulties in a semiarid environment. *IJSM, R&E*, 1995, (9): 113~119.
- [7] 马志本, 卢崇恩, 王文英, 等. 黄土高原晋陕蒙接壤区露天煤矿废弃土地复垦战略及其对策的探讨. 黄土高原地区露天煤矿土地复垦研究论文集(第一集). 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 90~99.
- [8] 马恩霖. 露天开采复田. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [9] 卞正富, 林家聪. 矿区的土地复垦规划问题. 煤炭学报, 1992, (1): 53~62.
- [10] 卞正富, 张国良. 煤矿区土地复垦工程的理论和方法. 地域研究与开发, 1994, 13(1): 6~9.
- [11] 王金良, 佟侧昂, 吴增录. 赴加拿大对露天矿废弃土地复垦的考察报告. 黄土高原地区露天煤矿土地复垦研究论文集(第一集). 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 116~119.
- [12] 王金良, 佟侧昂, 马志本. 赴美国对露天煤矿废弃土地复垦学术交流与考察报告. 黄土高原地区露天煤矿土地复垦研究论文集(第一集). 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 111~115.
- [13] 韦朝阳, 张立城. 试论我国煤矿生态环境现状及其综合整治战略. 中国人口、资源与环境, 1995, (4): 26~29.
- [14] 代宏文. 澳大利亚矿山复垦现状. 矿山废地复垦与绿化. 北京: 中国林业出版社, 1995. 194~204.
- [15] 孙绍先. 沉陷区土地复垦与重建村落环境. 煤炭科学技术, 1992, (10): 18~21.
- [16] 徐尚龄. 采矿当地生态重建和恢复生态学. 科技导报, 1994, (3): 49~51 转 16.
- [17] 杨修, 高林, 吴刚. 矿山废弃地复垦的理论与技术. 社会-经济-自然复合生态系统可持续发展研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 124~136.
- [18] 周树理. 矿山废弃地复垦与绿化. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [19] 祝国军. 煤矿塌陷区综合开发的一种新模式. 西安矿业学院学报, 1993, (2): 43~45.
- [20] 胡振琪. 采煤沉陷地的土地资源管理与复垦. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [21] 赵景透. 废弃地复垦中的景观和生态问题. 矿山废地复垦与绿化. 北京: 中国林业出版社, 1995. 55~56.
- [22] 赵景透. 矿山土地复垦技术与管理. 北京: 农业出版社, 1993.
- [23] 高林, 张文敏, 施文献, 等. 有色金属工业环境的整治及矿山土地复垦. 现代生态学的热点问题研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. 572~582.
- [24] 黄玉山. 露天砂金矿土地复垦. 西安: 陕西人民出版社, 1994.
- [25] 蒋高明. 矿山废弃地恢复生态学的理论与实践. 中国退化生态系统研究. 中国科学技术出版社, 1995. 234~246.
- [26] 李文华, 杨修. 环境与发展. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [27] 林英. 论南岭山地植被的性质及其在中国植被区划中的位置. 植物生态学与地植物学丛刊, 1965, 3(1): 65~73.
- [28] Ludeke K L. Tailing reclamation [Vegetation]. In J. L. Thames, ed. *Reclamation and Use of Disturbed Land in the Southwest*. 1977, 262~276.
- [29] Wagner W L, *et al.* Natural succession on strip-mined lands in northwestern New Mexico. *Reclamation Research*, 1978, 1: 67~73.
- [30] Finegan B. Forest succession. *Nature*, 1984, 312: 109~114.
- [31] Glenn-Lewin D C, *et al.* Plant succession: theory and prediction. Chapman and Hall; London, 1992.
- [32] 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [33] 苏智先, 王仁卿. 生态学概论. 北京: 高等教育出版社, 1993.