

兰坪铅锌矿区植被恢复初期土壤种子库 与地上植被关系的研究

齐丹卉¹, 刘文胜^{1,2,3*}, 李世友¹, 朱明远¹, 苏焕珍¹

(1 西南林业大学 环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2 复旦大学 生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 上海 200433; 3 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 长沙 410014)

摘要: 尾矿废弃地是一种极端的生态系统, 其植被恢复的研究将丰富传统的生态学理论。该研究通过野外植被调查与室内萌发实验相结合的方法, 探讨了兰坪铅锌矿区植被恢复初期不同群落类型地上植被、土壤种子库及其相互关系。结果显示: (1) 与对照群落(云南松林、高山栎灌丛)相比, 尾矿区恢复期各群落(早熟禾人工草地、魁蒿群落、马桑灌丛)地上植被及土壤种子库的物种数、物种多样性均较低。(2) 植被恢复时间较短的 2 个群落(魁蒿群落、人工草地)土壤种子库较地上植被物种多样性高。(3) 尾矿区恢复期各群落地上植被及土壤种子库的优势种均主要由风播、种子繁殖的植物组成, 菊科、禾本科占较大比例, 这些植物在尾矿区植被恢复初期起重要作用。(4) 尾矿区恢复期各群落土壤种子库与地上植被的物种相似性较高, 各群落之间地上植被及土壤种子库的相似性则较低。研究表明, 尾矿区恢复初期土壤种子库与地上植被紧密联系, 群落改造方式、恢复时间对土壤种子库具有重要影响。

关键词: 铅锌矿区; 植被恢复; 土壤种子库; 地上植被; 相似性指数; 物种多样性

中图分类号: Q948.15⁺4 **文献标志码:** A

Relationship between Aboveground Vegetation and Soil Seed Banks from Different Communities of Initial Restoration Stage in Lanping Lead/Zinc Mining Area

QI Danhui¹, LIU Wensheng^{1,2,3*}, LI Shiyu¹, ZHU Mingyuan¹, SU Huanzhen¹

(1 College of Environmental Sciences and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2 Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3 College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410014, China)

Abstract: Mining tailings are special ecosystems with harsh environmental conditions, the recovery of these ecosystems would broaden the scope of ecology. In this study, the relationship between soil seed banks and stand vegetation from different communities in Lanping Lead/Zinc Mining Area were explored by combining field investigations and seed germination trial. The results showed that: (1) The communities which recovered from tailing sites (CRTS) (including *Poa pratensis* man-made grassland, *Artemisia princeps* community and *Coriaria nepalensis* scrub) were lower in species number and plant diversity than reference communities (RC) (including *Pinus yunnanensis* forest and *Quercus aquifolioides* scrub, the natural vege-

收稿日期: 2013-07-05; 修改稿收到日期: 2013-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(31160048); 云南省面上基金(2009CD069); 中国博士后基金(20100470632)

作者简介: 齐丹卉(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事森林生态学方面的研究。E-mail: 7942965@qq.com

* 通信作者: 刘文胜, 博士, 副教授, 主要从事森林生态、分子生态方面的研究。E-mail: liuwsairr@163.com

tation in this site). (2) The soil seed bank of *P. pratensis* man-made grassland and *A. princeps* community were higher in species diversity than that of its stand vegetations. (3) Anemochorous plants dominated the soil seed banks and stand vegetations of CRTS, which means these plants would play important roles in vegetation recovery at the early stage of revegetation, and is mainly composed of Compositae and Poaceae. (4) CRTS were higher in similarity between stand vegetation and corresponding soil seed banks than that of RC, and lower in similarity between different vegetations and soil seed banks of different communities. These illustrate stand vegetation is tightly related with its soil seed banks at early stage of CRTS, and the mode of community building and succession time are two important factors influencing plant composition of soil seed banks.

Key words: Lead/Zinc Mining Area; vegetation restoration; soil seed bank; aboveground vegetation; similarity index; species diversity

土壤种子库(soil seed bank)是指埋藏在土壤或土壤表层全部活力种子的总体^[1]。它是植物群落的重要组成部分,是地上植被自然更新的物质基础^[2-3]。而立地植被则是土壤种子库的主要种源,直接影响土壤种子库的形成与动态^[4]。因而,地上植被与土壤种子库紧密联系、不可分割,研究二者的关系对指导退化植被恢复具有非常重要的意义。

尾矿废弃地起源于尾矿,其植被恢复为典型的原生演替。该废弃地土壤具有重金属浓度高、营养物质(如 N、P、K 等)含量低等特点,抑制在该生境中定居植物的生长、生殖活动,从而影响其中土壤种子库的形成与发展^[2];同时也影响该生境土壤种子库的种子萌发、幼苗生长等过程,进而影响地上植被的形成^[5-6]。因而,尾矿废弃地是一类极端的生态系统^[7-8],研究该生境土壤种子库、地上植被及其相互关系将丰富传统的生态学理论,并将有力指导该生境植被恢复,具有重要的理论与实践价值。

本研究将对兰坪铅锌矿区尾矿废弃地植被恢复早期不同群落类型土壤种子库、地上植被及其相互关系进行探讨,揭示其影响因素,以期将来利用土壤种子库技术进行植被恢复提供第一手资料。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

兰坪铅锌矿区位于云南省兰坪白族普米族自治县县城西北 18 km 处的凤凰山脉上,是中国最大的铅锌矿基地。该区矿山开采始自 20 世纪 90 年代,已有 20 多年的历史,开采方式为露天开采。露天造成自然植被完全破坏,废弃矿石、尾矿等大量堆积于地表,急待生态恢复。由于该区尾矿规模大,水土流失、环境污染严重,其植被恢复相当困难^[9]。

该区夏秋多雨、冬春干旱,为典型的亚热带、山地主体型季风气候。全年有霜期 175 d,最高气温

31.5℃,年均温 11.7℃,年平均降雨量 1 015.5 mm^[10]。矿山开采前该区分布最广的 2 种自然植被类型为云南松(*Pinus yunnanensis*)林与高山栎(*Quercus aquifolioides*)灌丛,主要分布于海拔相对较高的地段。云南松林群落高度达 6 m,总盖度达 90%以上,由乔木层、灌木层、草本层构成。乔木层郁闭度达 50%,主要树种有云南松、旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)等;灌木层主要物种有碎米杜鹃(*Rhododendron spiciferum*)、马缨杜鹃(*R. delavayi*)等;草本层主要植物包括黄背草(*Themeda japonica*)、尖叶苔草(*Carex oxyphylla*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、金茅(*Eulalia speciosa*)等。高山栎灌丛群落高度约 3 m,总盖度达 90%,由灌木层与草本层构成。灌木层盖度达 70%,主要植物有高山栎、槲栎(*Quercus aliena*)、大白杜鹃(*R. decorum*)等;草本层主要植物有蛇莓(*Duchesnea indica*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)等。

尾矿废弃地是尾矿、矿石等在原山体的山谷中层堆积后形成的,与自然植被距离相对较远(约 2 km)。其主要植被类型包括魁蒿(*Artemisia princeps*)群落、马桑(*Coriaria nepalensis*)灌丛、草地早熟禾(*Poa pratensis*)人工草地等。魁蒿群落为尾矿弃置 5 年后自然形成,由于小生境不同,其植物在空间上分布、生长不均一。其群落高度达 1.5 m,平均盖度达 50%。主要植物还有香附子(*Cyperus rotundus*)、画眉草(*Eragrostis cilianensis*)、长籽柳叶菜(*Epilobium pyrricholophum*)等。马桑灌丛为尾矿堆积 20 年后自然恢复而成,其群落高度达 2.5 m,总盖度达 80%。马桑为该群落的建群种,草本层主要植物有四脉金茅(*Eulalia quadrinervis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、野棉花(*Anemone vitifolia*)等。由于该群落恢复时间较长,其土壤表层有苔藓生物结皮现象。草地早熟禾人工草地(以下简

称人工草地)为在尾矿上覆以表土,并人工种植草地早熟禾后形成。其盖度达 75%,高度达 25 cm。主要植物还有皱叶酸模(*Rumex crispus*)、戟叶蓼(*Polygonum thunbergii*)、紫苜蓿(*Medicago sativa*)等。

1.2 野外调查

1.2.1 地上植被调查 在对矿区植被全面考察的基础上,选择马桑灌丛、魁蒿群落、人工草地作为尾矿恢复早期的群落代表,云南松林、高山栎灌丛作为对照群落代表进行植物调查。各样地均分布在北纬 26°23′~26°24′、东经 99°25′~99°26′,海拔在 2 670~2 780 m 之间,其基本情况如表 1。地上植被调查采用样方法进行。在乔木林样地(云南松林)布设 5 个 10 m×10 m 的样方调查树种多样性,同时在样方中央设置 1 个 5 m×5 m 的灌丛样方调查灌木多样性,共计 5 个乔木林样方、5 个灌丛样方;在灌丛样地(高山栎灌丛、马桑灌丛)分别布设 5 个 5 m×5 m 的样方调查灌木多样性,2 种群落类型各设置 5 个灌丛样方。为便于比较各群落类型草本层的物种多样性,各样地草本层的植物调查采取同一种方法进行。即在所有 5 个样地各布设 1 条长度为 70 m 的样线,样线上每相距 5 m 设置 1 个 1 m×1 m 的草本植物样方,每个样地分别布设 15 个样方,共计 75 个样方。乔木样方主要检测高度≥3.0 m 的乔木,灌丛样方主要检测高度≥1.0 m 的所有灌木及幼树,记录各植物物种名称、个体数、树高、胸径(地径)和物候等指标;草本样方主要调查并记录草本及木本植物幼苗种名、个体数、高度、盖度等。

1.2.2 土壤种子库取样 于 2010 年 11 月中旬,样地大部分植物的种子已成熟并散落时,采用样线法进行取样。在每个已进行地上植被调查的样地内部(距样地边缘距离超过 10 m)布设 1 条长度为 95 m 的样线,并在样线上每隔 5 m 选择一个土壤种子库

取样点,每个样地各选择 20 个取样点,所有 5 个样地共布设 100 个取样点。每个取样点取土面积均为 10 cm×10 cm,分上层(0~2 cm)、中层(2~5 cm)和下层(5~10 cm)3 层进行取土。所有样地共采集 300 份土壤种子库样品,作好标记后分别装入透气良好的布袋,带回实验室进行萌发实验。

1.2.3 萌发实验 萌发实验在西南林业大学智能温室内开展,该温室内阳光充足,温度保持在 20℃~25℃,该条件利于种子萌发。土样取回后,去除较大的砂砾、枯根、枯枝等杂质;将较大的土块碾碎,并将土壤分别平铺于盛有珍珠岩作为基质的花盆中。每天 17:00 向花盆中喷洒少量水分,保持土壤湿润。每 2 d 为一周期观测种子萌发情况。种子萌发出苗后,定期检查幼苗,一旦能够识别出幼苗的种属便视为有发芽力的有效种子记数,并将其从花盆中轻轻拔掉。暂时不能鉴定的幼苗进行标记后移栽至同一花盆内,直到幼苗长大到能鉴定时为止。整个实验持续时间为 196 d,至土样中不再有种子萌发时结束。

1.3 数据分析

(1)采用 Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 指数(D)、均匀度指数(E)计算地上植被与土壤种子库的物种多样性。

Shannon-Wiener 指数: $H=-\sum P_i \ln P_i$

Simpson 指数: $D=1-\sum P_i^2$

Pielou 均匀度指数: $E=H/\ln S=\ln n_i/\ln N$

式中, S 表示总物种数; $P_i=n_i/N$, N 为样地中植物个体总数, n_i 为第 i 种的个体数。

(2)采用 Sorensen 相似性系数(CC)测度各群落地上植被之间、土壤种子库之间及地上植被与土壤种子库间物种组成的相似性。

$CC=2w/(a+b)$

式中, w 为不同群落类型现状植被或土壤种子库的

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic features of the study fields

编号 Code	群落名称 Community name	高度 Community height/m	上层盖度 Upper coverage	土壤状况 Soil state	群落描述 Community description
I	云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	6.0	50%	暗棕壤 Dark brown soil	自然植被,次生林 Natural secondary forest
II	高山栎灌丛 <i>Quercus aquifolioides</i> scrub	3.0	70%	暗棕壤 Dark brown soil	自然植被,砍伐后形成 Natural vegetation after felled
III	马桑灌丛 <i>Coriaria nepalensis</i> scrub	2.5	70%	土层较薄,有生物结皮现象 Thin soil layer with biological soil crusts on surface	尾矿自然恢复 20 年 Natural succession from tailings for 20 years
IV	魁蒿群落 <i>Artemisia princeps</i> community	1.5	50%	主要由尾矿构成 Mainly composed by tailings	尾矿自然恢复 5 年 Natural succession from tailings for 5 years
V	人工草地 <i>Poa pratensis</i> man-made grassland	0.2	75%	人工覆土厚度达 15 cm Mulching soils for 15 cm in depth	人工种草 2 年 Planting grasses for 2 years

共有物种数, a 为现状植被或土壤种子库的物种数, b 为相应的现状植被或土壤种子库中的物种数^[11]。

(3)采用重要值(IV):测度植物在相应地上植被或土壤种子库中的优势度。

地上植被的物种重要值: $IV=(\text{相对密度}+\text{相对盖度}+\text{相对频度})/3$

土壤种子库的物种重要值: $IV=(\text{相对密度}+\text{相对频度})/2$ ^[11]

2 结果与分析

2.1 地上植被与土壤种子库的物种多样性

地上植被共检测出植物 129 种, 分属 46 科 97 属。表 2 表明, 云南松林物种数、物种多样性指数(H 、 D 、 E)均为草本层>乔木层>灌木层; 高山栎灌丛、马桑灌丛物种数、物种多样性(H 、 D)均表现为草本层>灌木层, 高山栎灌丛均匀度指数 E 则表现为灌木层>草本层。5 个群落草本层物种多样性比较显示, 相比对照群落(云南松林和高山栎灌丛), 尾矿恢复各群落(马桑灌丛、魁蒿群落、人工草地)草本层物种数、物种多样性指数 H 和 D 值均较低, 其中的菊科、禾本科是地上植被的优势科(表 2)。

土壤种子库共检测出 93 种植物, 分属于 35 科 65 属。相比对照群落, 尾矿恢复各群落的物种数、物种多样性指数(H 、 D)均较低。土壤种子库的优势科与地上植被大致相同, 其中的菊科、禾本科是各群落土壤种子库的优势科(表 2)。

除人工草地外, 各群落地上植被物种数均高于土壤种子库物种数, 特别是马桑灌丛地上植被物种数远远高于土壤种子库物种数; 物种多样性表现为植被恢复时间较短的 2 个群落(魁蒿群落、人工草地)土壤种子库的多样性高于地上植被的, 其他群落趋势则相反; 这说明植被恢复初期的 2 个样地具有较丰富的种源, 利于其植被恢复(表 2)。

2.2 地上植被与土壤种子库的物种相似性

表 3 显示, 2 个对照群落间的物种相似性较高, 尾矿恢复期群落之间及与对照群落之间相似性则相对较低。3 个尾矿恢复群落相似性比较而言, 马桑灌丛、魁蒿群落之间及其与对照群落间的相似度较高, 人工草地与对照群落相似性较低。这说明人工草地受到人工改造后, 其地上植被物种组成及结构已发生较大改变。

表3土壤种子库间相似性比较显示, 2个对照

表 2 各群落地上植被、土壤种子库物种多样性比较
Table 2 Comparisons of species diversity of stand vegetation and soil seed banks from 5 communities

群落名称 Community name	层次 Synusia	物种数 No. of species	物种多样性 Species diversity			优势科 Dominant family
			H	D	E	
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	乔木层 Tree layer	14	2.093	0.843	0.816	杜鹃花科、壳斗科、松科 Ericaceae, Fagaceae, Pinaceae
	灌木层 Shrub layer	13	0.593	0.229	0.270	杜鹃花科、壳斗科 Ericaceae, Fagaceae
	草本层 Herb layer	62	3.549	0.955	0.853	禾本科、菊科、百合科 Poaceae, Compositae, Liliaceae
	土壤种子库 Soil seed bank	54	2.919	0.910	0.804	菊科、蔷薇科、禾本科 Compositae, Rosaceae, Poaceae
高山栎灌丛 <i>Quercus aquifolioides</i> scrub	灌木层 Shrub layer	12	2.063	0.821	0.804	壳斗科、杜鹃花科、杨柳科 Fagaceae, Ericaceae, Salicaceae
	草本层 Herb layer	69	3.153	0.902	0.745	菊科、禾本科、蔷薇科 Compositae, Poaceae, Rosaceae
	土壤种子库 Soil seed bank	65	2.840	0.892	0.745	菊科、蔷薇科、禾本科 Compositae, Rosaceae, Poaceae
马桑灌丛 <i>Coriaria nepalensis</i> scrub	灌木层 Shrub layer	6	1.169	0.565	0.652	马桑科 Coriariaceae
	草本层 Herb layer	38	2.662	0.884	0.703	菊科、禾本科、蔷薇科 Compositae, Poaceae, Rosaceae
	土壤种子库 Soil seed bank	20	1.578	0.693	0.652	菊科、紫草科、禾本科 Compositae, Boraginaceae, Poaceae
魁蒿群落 <i>Artemisia princeps</i> community	草本层 Herb layer	24	2.266	0.847	0.756	菊科、禾本科、蔷薇科 Compositae, Poaceae, Rosaceae
	土壤种子库 Soil seed bank	21	2.421	0.895	0.703	菊科、十字花科、禾本科 Compositae, Cruciferae, Poaceae
人工草地 <i>Poa pratensis</i> man-made grassland	草本层 Herb layer	14	1.524	0.717	0.563	菊科、蓼科、禾本科 Compositae, Polygonaceae, Poaceae
	土壤种子库 Soil seed bank	15	2.090	0.834	0.756	菊科、豆科、禾本科 Compositae, Leguminosae, Poaceae

表 3 不同群落地上植被、土壤种子库之间的相似度

Table 3 Similarity index (sorensen index) between stand vegetation and soil seed banks

项目 Item	群落名称 Community name	云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	高山栎灌丛 <i>Quercus aquifolioides</i> scrub	马桑灌丛 <i>Coriaria nepalensis</i> scrub	魁蒿群落 <i>Artemisia princeps</i> community
地上植被 Stand vegetation	高山栎灌丛 <i>Quercus aquifolioides</i> scrub	0.541			
	马桑灌丛 <i>Coriaria nepalensis</i> scrub	0.336	0.479		
	魁蒿群落 <i>Artemisia princeps</i> community	0.250	0.400	0.400	
	人工草地 <i>Poa pratensis</i> man-made grassland	0.116	0.156	0.218	0.211
土壤种子库 Soil seed banks	高山栎灌丛 <i>Quercus aquifolioides</i> scrub	0.487			
	马桑灌丛 <i>Coriaria nepalensis</i> scrub	0.351	0.353		
	魁蒿群落 <i>Artemisia princeps</i> community	0.400	0.395	0.537	
	人工草地 <i>Poa pratensis</i> man-made grassland	0.290	0.225	0.343	0.444

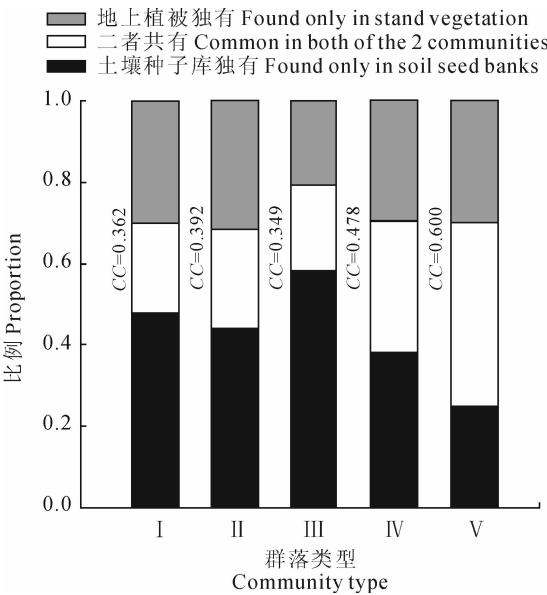


图 1 土壤种子库物种组成与现有地上植被物种组成的关系
I ~ V. 群落类型名称同表 1; CC. Sorensen 相似性系数

Fig. 1 Relationship between soil seed banks
and stand vegetation

I ~ V. Community types are same as Table 1;
CC. Sorensen similarity coefficient

群落之间、3 个尾矿恢复群落之间物种相似性较高，对照群落与各尾矿恢复期群落之间则较低。3 个尾矿恢复期群落相比较，人工草地与对照群落之间相似性较低。这可能是因为人工草地建立后，其群落组成与结构已发生改变，从而与其他群落之间有较大差异；同时，该群落建立时间不长，外来种子对其种子库影响有限。

各群落土壤种子库与地上植被物种相似性如图 1。与对照群落相比，尾矿恢复各群落地上植被与土壤种子库共有物种数占种子库比例较高（均超过 50%）；相似性指数及共有种占地上植被的比例则除马桑灌丛较低外，其他 2 个群落均较高；马桑灌丛相

似性系数与对照群落相近。这说明尾矿恢复初期，地上植被与土壤种子库之间有更紧密的联系。

2.3 地上植被与土壤种子库的物种组成

一个植物群落地面现有种与土壤种子库的种类组成之间的关系可划分为 4 种类型，即地下种子和地面植株都存在、地下种子存在但地面植株不存在、地面植株存在但地下种子不存在、地下种子与地面植株均不存在^[12]。

各群落地上植被草本层及土壤种子库优势植物如表 4 所示。其中，各群落土壤种子库优势种与地上植被优势种均具有不完全同步性，各群落均有 2 ~ 4 个土壤种子库的优势种来自样地外。如云南松林草本层中 10 种优势度最大的植物中，魁蒿、华火绒草 (*Leontopodium sinense*)、西南金丝梅 (*Hypericum henryi*) 为地上植被及土壤种子库共有的优势种，而倒提壶 (*Cynoglossum amabile*)、苦买菜 (*Ixeridium denticulata*) 等仅在土壤种子库中出现，未发现在草本层中出现；高山栎灌丛中蛇莓、魁蒿、云南繁缕 (*Stellaria yunnanensis*)、长籽柳叶菜为地上植被及土壤种子库共同的优势种，无只出现于土壤种子库中的植物；马桑灌丛中，马桑、香附子、野棉花、魁蒿 4 种植物为地上植被与土壤种子库共同的优势种，滇紫草 (*Onosma paniculatum*)、细蝇子草 (*Silene gracilicanlis*)、平车前 (*Plantago depressa*) 则仅在土壤种子库中出现；魁蒿群落中魁蒿、平车前、小灯芯草 (*Juncus bufonius*) 为地上植被、土壤种子库共同的优势种，而碎米荠 (*Cardamine hirsuta*)、芥 (*Capsella bursa-pastoris*)、中华山蓼 (*Oxyria sinensis*)、云南繁缕则仅在土壤种子库中被发现；人工草地群落地上植被与土壤种子库共有的优势种共有 6 种，包括草地早熟禾、紫苜蓿、皱叶酸模、魁蒿、马桑、西南金丝梅，而华火绒草、香附

子则仅在土壤种子库中出现。

各群落地上植被及土壤种子库优势种以菊科、禾本科占优势,大多具有种子传播能力强、速度快等特征。土壤种子库优势种主要为风播植物,而动物传播的则较少,仅云南松、蛇莓、倒提壶、滇紫草主要依靠动物传播种子;沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、南烛(*Vaccinium bracteatum*)、腋花杜鹃(*R. racemosum*)、野草香(*Elsholtzia cypriani*)、西南金丝梅、阿墩子龙胆(*Gentiana atuntsiensis*)、马桑、拉拉藤(*Galium yunnanense*)、细蝇子草、平车前、毛蕊花(*Verbascum thapsus*)、碎米荠、荠、云南繁缕、紫苜蓿、白车轴草(*Trifolium repens*)主要依靠自身重力传播种子。大部分植

表 4 对照和尾矿恢复群落地上植被草本层与土壤种子库优势植物*
Table 4 Dominant species of stand vegetation and soil seed banks in reference communities and communities recovered from tailing sites

群落名称 Community name	物种名称 Species name	科 Family	生活型 Life form	传播方式 Dispersal pattern	再生途径 Regeneration mode	重要值 Important value	
						地上植被 Stand vegetation	土壤种子库 Soil seed bank
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	尖叶苔草 <i>Carex oxyphylla</i>	莎草科 Cyperaceae	G	Wind	Wi/V	12. 16	0. 60
	黄背草 <i>Themeda japonica</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	8. 55	0. 00
	沿阶草 <i>Ophiopogon bodinieri</i>	百合科 Liliaceae	G	Self	V	5. 47	0. 00
	金茅 <i>Eulalia speciosa</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	4. 67	0. 00
	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	松科 Pinaceae	T	Self/ Ani	S	3. 51	0. 00
	南烛 <i>Vaccinium bracteatum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	H	Self	S	3. 13	0. 00
	魁蒿 <i>Artemisia princeps</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	5. 02	12. 25
	华火绒草 <i>Leontopodium sinense</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	3. 29	11. 97
	腋花杜鹃 <i>Rhododendron racemosum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	S	Self	S	2. 05	7. 00
	蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	蔷薇科 Rosaceae	H	Ani	VBs	1. 93	6. 17
	野草香 <i>Elsholtzia cypriani</i>	唇形科 Labiatae	H	Self	Wi/Bs	2. 84	4. 68
	西南金丝梅 <i>Hypericum henryi</i>	藤黄科 Guttiferae	H	Self	Bs	3. 73	6. 16
	倒提壶 <i>Cynoglossum amabile</i>	紫草科 Boraginaceae	H	Ani	Wi	0. 00	3. 73
	白草 <i>Pennisetum centrasaticum</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	6. 63	2. 68
	苦买菜 <i>Ixeridium denticulata</i>	菊科 Compositae	G	Wind	Wi	0. 00	3. 39
	飞蓬 <i>Erigeron acer</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	0. 56	2. 89
	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	莎草科 Cyperaceae	G	Wind	Wi/V	0. 33	2. 94
高山栎灌丛 <i>Quercus aquifolioides</i> scrub	蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	蔷薇科 Rosaceae	H	Ani	VBs	20. 58	2. 88
	白草 <i>Pennisetum centrasaticum</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	5. 83	0. 00
	牡蒿 <i>Artemisia japonica</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	5. 65	0. 00
	尖叶苔草 <i>Carex oxyphylla</i>	莎草科 Cyperaceae	G	Wind	Wi	5. 60	0. 18
	魁蒿 <i>Artemisia princeps</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	4. 74	15. 26
	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	3. 29	0. 00
	云南繁缕 <i>Stellaria yunnanensis</i>	石竹科 Caryophyllaceae	H	Self/Wind	Wi	3. 11	10. 02
	箭竹 <i>Fargesia similaris</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	V	2. 90	0. 00
	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	松科 Pinaceae	T	Self/ Ani	S	2. 66	0. 00
	长籽柳叶菜 <i>Epilobium pyrricholophum</i>	柳叶菜科 Onagraceae	H	Wind	Wi	2. 09	2. 72
	华火绒草 <i>Leontopodium sinense</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	0. 42	7. 12
	红茎马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	0. 81	6. 48
	西南金丝梅 <i>Hypericum henryi</i>	藤黄科 Guttiferae	H	Self	Bs	1. 07	4. 14
	倒提壶 <i>Cynoglossum amabile</i>	紫草科 Boraginaceae	H	Ani	Bs	0. 33	2. 20
	飞蓬 <i>Erigeron acer</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	0. 56	2. 85
	野草香 <i>Elsholtzia cypriani</i>	唇形科 Labiatae	H	Self	Wi/Bs	0. 51	3. 19
马桑灌丛 <i>Coriaria nepalensis</i> scrub	毛连菜 <i>Picris hieracioides</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	13. 89	0. 00
	四脉金茅 <i>Eulalia quadrinervis</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	12. 91	0. 00
	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	10. 34	0. 00
	阿墩子龙胆 <i>Gentiana atuntsiensis</i>	龙胆科 Gentianaceae	H	Self	Bs	6. 84	0. 00

续表 4 Continued Table 4

马桑灌丛 <i>Coriaria nepalensis</i> scrub	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	马桑科 Coriariaceae	S	Self	S	6.38	2.51
	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	莎草科 Cyperaceae	G	Wind	Wi/V	5.27	2.04
	野棉花 <i>Anemone viti folia</i>	毛茛科 Ranunculaceae	H	Wind	Wi	4.86	1.79
	魁蒿 <i>Artemisia princeps</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	3.94	35.15
	剪股颖 <i>Agrostis matsumurae</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	3.71	0.00
	拉拉藤 <i>Galium yunnanense</i>	茜草科 Rubiaceae	H	Self	Wi	3.04	0.00
	滇紫草 <i>Onosma paniculatum</i>	紫草科 Boraginaceae	H	Ani	Wi	0.00	12.85
	细蝇子草 <i>Silene gracilicanlis</i>	石竹科 Caryophyllaceae	H	Self	Wi	0.00	21.51
	长籽柳叶菜 <i>Epilobium pyrricholophum</i>	柳叶菜科 Onagraceae	H	Wind	Wi	1.70	5.50
	平车前 <i>Plantago depressa</i>	车前科 Plantaginaceae	H	Self	Wi	0.00	2.87
魁蒿群落 <i>Artemisia princeps</i> community	毛蕊花 <i>Verbascum thapsus</i>	玄参科 Scrophulariaceae	H	Self	Wi	1.76	2.63
	西南金丝梅 <i>Hypericum henryi</i>	藤黄科 Guttiferae	H	Self	Bs	2.75	2.63
	魁蒿 <i>Artemisia princeps</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	33.68	13.57
	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	莎草科 Cyperaceae	G	Wind	Wi/V	12.35	3.66
	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	马桑科 Coriariaceae	S	Self	S	7.24	0.72
	画眉草 <i>Eragrostis cilianensis</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	6.66	0.00
	蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	蔷薇科 Rosaceae	H	Ani	VBs	6.07	0.85
	长籽柳叶菜 <i>Epilobium pyrricholophum</i>	柳叶菜科 Onagraceae	H	Wind	Wi	5.12	0.00
	尖叶苔草 <i>Carex oxyphylla</i>	莎草科 Cyperaceae	G	Wind	Wi/V	4.82	0.00
	平车前 <i>Plantago depressa</i>	车前科 Plantaginaceae	H	Self	Wi	3.46	11.13
人工草地 <i>Poa pratensis</i> man-made grassland	滇杨 <i>Populus yunnanensis</i>	杨柳科 Salicaceae	T	Wind	S	2.24	0.00
	小灯心草 <i>Juncus bufonius</i>	灯心草科 Juncaceae	G	Self	Bs	2.04	9.62
	碎米荠 <i>Cardamine hirsuta</i>	十字花科 Cruciferae	H	Self	Wi	0.00	14.66
	芥 <i>Capsella bursa-pastoris</i>	十字花科 Cruciferae	H	Self	Wi	0.00	7.56
	中华山蓼 <i>Oxyria sinensis</i>	蓼科 Polygonaceae	H	Wind	VBs	0.00	7.19
	黄鹌菜 <i>Youngia nuijiangensis</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	1.02	12.68
	云南繁缕 <i>Stellaria yunnanensis</i>	石竹科 Caryophyllaceae	H	Self	Wi	0.00	3.49
	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi/V	1.22	2.84
	草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	31.01	9.68
	紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	豆科 Leguminosae	H	Self	VBs	23.33	2.86
人工草地 <i>Poa pratensis</i> man-made grassland	毛颖草 <i>Alloteropsis semialata</i>	禾本科 Poaceae	G	Wind	Wi	15.20	0.00
	皱叶酸模 <i>Rumex crispus</i>	蓼科 Polygonaceae	H	Wind	Wi	8.18	17.93
	戟叶蓼 <i>Polygonum thunbergii</i>	蓼科 Polygonaceae	H	Wind	Wi	5.98	0.00
	白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	豆科 Leguminosae	H	Self	VBs	5.49	1.43
	魁蒿 <i>Artemisia princeps</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	1.91	18.27
	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	马桑科 Coriariaceae	S	Self	S	1.52	11.53
	西南金丝梅 <i>Hypericum henryi</i>	藤黄科 Guttiferae	H	Self	Bs	1.28	1.94
	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	松科 Pinaceae	T	Self/Ani	S	1.22	0.00
	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i>	蓼科 Polygonaceae	H	Wind	Wi	1.22	22.47
	华火绒草 <i>Leontopodium sinense</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	0.00	2.86
人工草地 <i>Poa pratensis</i> man-made grassland	蓟 <i>Cirsium japonicum</i>	菊科 Compositae	H	Wind	Wi	1.22	1.94
	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	莎草科 Cyperaceae	G	Wind	Wi/V	0.00	1.94

注:本文仅列出相应样地地上植被与土壤种子库中重要值居前 10 位的植物,以黑体字表示;H. 双子叶草本;G. 单子叶草本;S. 灌木;T. 乔木;Wind. 风播;Self. 自我传播;Ani. 动物传播;Wi. 产生可广泛传播的种子;V. 侧根繁殖;Bs. 永久种子库;VBs. Bs 与 V 的综合;S. 种子的季节性繁殖。

Note: *. Only 10 plants with the highest important value (IV) in the stand vegetation and soil seed banks of corresponding communities were listed, and expressed as bold letters in this paper. H. Herb; G. Grass; S. Shrub; T. Tree; Wind. Wind dispersal; Self. Self dispersal; Ani. Animal dispersal; Wi. Widely dispersal seeds; V. Vegetative propagation; Bs. Long-lived seed banks; VBs. Combined by V and Bs; S. Seasonal seed propagation.

物具有广泛传播的种子,仅沿阶草、箭竹(*Fargesia similaris*)主要依靠克隆繁殖进行种群扩展(表 4)。

3 讨 论

3.1 地上植被与土壤种子库的物种多样性

兰坪矿区尾矿恢复时期各群落地上植被及其土壤种子库的物种多样性均低于对照群落,其原因可能主要有 2 个方面,一是尾矿恢复各群落建立时间均不长,尚处于初级恢复阶段,仅部分繁殖体传播能力较强的先锋植物在其中定居;吕春娟等^[13],郭道宇等^[14]研究也显示演替时间是影响矿区物种多样性变化的主要因素之一。二是与对照群落相比,尾矿废弃地土壤重金属含量较高、营养成分含量较低,对植物产生毒害作用,许多不耐重金属的植物不能在其中萌发生长,因而该群落主要由重金属耐性较强的植物组成;沈章军等^[15]也认为尾矿废弃地地上植被、土壤种子库主要由耐性较强的植物组成。而本研究的 2 个对照群落上层盖度相对较低,利于多种植物共存;且其土壤受重金属污染少,适宜植物生长,因而其物种多样性相对较高。

3 个尾矿恢复群落相比,地上群落物种多样性为马桑灌丛>魁蒿群落>人工草地,土壤种子库则为魁蒿群落>人工草地>马桑灌丛。马桑灌丛具有最高的地上植被物种多样性与最低的土壤种子库物种多样性,其原因一方面可能是马桑灌丛植被恢复时间达 20 年,多种植物已开始在其中生长、繁殖[如箭竹、西南栒子(*Cotoneaster franchetii*)等];马桑灌丛郁闭后,其根系盘根错节,阻碍了植物种子进入土壤种子库;同时,该群落土壤具有生物结皮现象,阻碍了种子的进入。苏延桂等^[16]、沈章军等^[15]研究也认为生物结皮阻碍了植物种子进入土壤种子库。因此,马桑灌丛具有较高的地上植被植物多样性与较低的土壤种子库植物多样性。

兰坪矿区尾矿恢复初期各群落地上植被、土壤种子库主要由菊科、禾本科植物组成,其优势种大部分为风播且广泛分布的植物(表 4)。Shu 等^[17]、王改玲等^[18]、吴祥云等^[19]对矿区植被恢复初期地上植物种类研究也发现先锋植物主要由菊科、禾本科植物组成。其原因可能主要是尾矿中无植物繁殖体存在,其植被的自然恢复主要依靠外源植物进行;而菊科、禾本科的植物种子均具个体小、数量多的特点,且多具冠毛,能随风飘散,具有较强的种子传播能

力,可快速进入新的生境定居。Shu 等^[17]研究也认为尾矿废弃地植被恢复相当于原生演替,土壤内无植物繁殖体,植物在群落演替初期主要通过风力自样地外传播进入样地,并进入土壤种子库。因而,菊科、禾本科等植物为矿区植被恢复初期植物构成的主体。

3.2 地上植被与土壤种子库的相似性

本研究中尾矿恢复各群落地上植被与土壤种子库之间相似性系数在 0.35~0.60 之间,与对照群落(相似性系数为 0.36~0.39)及其他矿区恢复的植物群落相比,其地上植被与土壤种子库的相似性较高。如吴祥云等^[19]研究显示露天矿排土场地上植被与土壤种子库之间相似性在 0.10~0.33 之间;韩丽君等^[20]发现安太堡露天排土场的相似性在 0.27~0.43 之间。沈章军等^[15]研究显示铜矿废弃地的相似性在 0.14~0.49 之间。其主要原因可能是本研究尾矿废弃地与自然植被距离相对较远,种子雨难以从自然植被中传入,这一点也可从自然植被物种多样性远高于尾矿恢复各群落得到说明;同时,尾矿废弃地各群落建立时间不长,除马桑灌丛外,尚未形成稳定的植物群落,其地上植物主要由土壤种子库萌发的幼苗形成。而其他的研究中群落已处入相对稳定的阶段,土壤种子库对地上植被的贡献减弱。这一点也说明本研究中土壤种子库将对地上植被的建立起重要作用。

本研究中尾矿恢复各群落土壤种子库之间相似性系数在 0.34~0.54 之间,高于与对照群落之间相似性系数(0.23~0.40),与韩丽君等^[20](0.31~0.67)、吴祥云等^[19](0.23~0.46)的研究结果接近,低于沈章军等^[15]的研究结果(0.31~0.64)。其主要原因可能是本研究人工草地经过了覆土改造,其土壤成分及种类构成已与自然植被明显不同,这一点也可从其地上植被相似性与其他群落类型较低得到说明;另一方面,本研究几个尾矿恢复群落之间恢复时间存在较大差异,分别为 2 年、5 年、20 年,其地上植被构成存在较大差异。这与韩丽君等^[20]、吴祥云等^[19]的研究类似,他们的研究中各群落恢复时间及改造方式上也存在差异。而沈章军等^[15]所研究的各群落均为自然演替,且演替时间相差不大。这一研究结果也进一步说明植被恢复方式与恢复时间是影响土壤种子库组成的 2 个重要因素。

参考文献:

- [1] ROBERTS H A. Seed banks in soil[J]. *Advances in Applied Biology*, 1981, 6: 41—55.
- [2] MEERTS P, GROMMESCH C. Soil seed banks in a heavy-metal polluted grassland at Prayon (Belgium)[J]. *Plant Ecology*, 2001, 155: 35—45.
- [3] KALAMEES R, ZOBEL M. The role of the seed bank in gap regeneration in a calcareous grassland community[J]. *Ecology*, 2002, 83: 1 017—1 025.
- [4] CHANG Q(常青), ZHANG D W(张大维), LI X(李雪), *et al.* Soil seed bank research of China mining areas: Necessity and challenges[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, 22(5): 1 343—1 350(in Chinese).
- [5] HUOPALAINEN M, TUITTILA E S, VANHA-MAJAMAA I, *et al.* Effects of long-term aerial pollution on soil seed banks in drained pine mires in southern Finland[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 125: 69—79.
- [6] HUOPALAINEN M, TUITTILA E S, VANHA-MAJAMAA I, *et al.* The potential of soil seed banks for revegetation of bogs in SW Finland after long-term aerial pollution[J]. *Annales Botanici Fennici*, 2000, 37: 1—9.
- [7] SHU W SH(束文圣), LAN CH Y(蓝崇钰), HUANG M H(黄铭洪), *et al.* Early natural vegetation and soil seed banks in an abandoned quarry[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2003, 23(7): 1 305—1 312(in Chinese).
- [8] LEI D M(雷冬梅), DUAN CH Q(段昌群), ZHANG H Y(张红叶). Lead and zinc induced changes in activity of antioxidant enzymes of *Rumex dentatus*, a kind of pioneer plant growing on mine tailings[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, 29(10): 5 417—5 423(in Chinese).
- [9] MIAO F J(缪福俊), SUN H(孙浩), CHEN L(陈玲), *et al.* Study on lead-zinc tailings soil and five plants occurring naturally in lead-zinc mining tailings in Lanping[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*(环境工程学报), 2011, 5(1): 189—194(in Chinese).
- [10] 云南植被编写组. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [11] MAGURRAN A E. Ecological Diversity and Its Measurement[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1988.
- [12] WHIPPLE S A. The relationship of buried, germination seed to vegetation in an old-growth Colorado subalpine forest[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1977, 56: 1 506—1 509.
- [13] LÜ CH J(吕春娟), BAI ZH K(白中科), CHEN W G(陈卫国). Ecological reclamation effect of mining dump in Loess area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*(水土保持通报), 2011, 31(6): 232—236(in Chinese).
- [14] GUO X Y(郭逍宇), ZHANG J T(张金屯), GONG H L(宫辉力), *et al.* Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao Mining Field, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2005, 25(4): 763—770(in Chinese).
- [15] SHEN ZH J(沈章军), OU Z L(欧祖兰), TIAN SH N(田胜尼), *et al.* Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2013, 33(7): 2 121—2 130(in Chinese).
- [16] SU Y G(苏延桂), LI X R(李新荣), CHEN Y W(陈应武), *et al.* Effects of biological soil crusts on soil seed bank and seed germination of desert plants in North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2007, 27(3): 938—946(in Chinese).
- [17] SHU W S, YE Z H, ZHANG Z Q, *et al.* Natural colonization of plants on five Lead/Zinc Mine Tailings in Southern China[J]. *Restoration Ecology*, 2005, 13: 49—60.
- [18] WANG G L(王改玲), BAI ZH K(白中科), HAO M D(郝明德). Features of soil seed bank at dump of Antaibao open cast Mine[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2003, 17(6): 178—180(in Chinese).
- [19] WU X Y(吴祥云), LI H CH(李宏昌), QU CH Y(瞿春艳). Characteristics of the soil seed bank with different recovery measures Open-cast mine dump[J]. *Journal of Liaoning Technical University*(Nat. Sci. Ed.) (辽宁工程技术大学学报·自然科学版), 2009, 28(5): 820—822(in Chinese).
- [20] HAN L J(韩丽君), BAI ZH K(白中科), LI J CH(李晋川), *et al.* Soil seed bank of Antaibao opencast coalmine dump[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2007, 26(6): 817—821(in Chinese).