

# 风沙黄土区排土场不同恢复类型植物群落与土壤种子库特征

王东丽<sup>1</sup>, 郭莹莹<sup>1</sup>, 谢伟<sup>1,2</sup>, 钱晓彤<sup>1</sup>, 郭建军<sup>2</sup>, 赵晓亮<sup>1</sup>, 连昭<sup>1</sup>, 杜华栋<sup>3</sup>

(1.辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2.内蒙古神东天隆集团股份有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 3.西安科技大学 地质与环境学院, 西安 710054)

**摘要:**风沙黄土区排土场作为一种人造生态系统,自然条件恶劣,土壤贫瘠,植被恢复困难。为了探明有效的人工促进植被恢复措施,采用植被调查与种子库萌发试验相结合的方法,通过研究不同植被类型地上植物群落与土壤种子库特征及二者的关系,探讨了其植被恢复效益及潜力。结果表明:研究区人工植被恢复下地上植物群落中共 47 种植物,分属 16 科 40 属,土壤种子库共 14 种植物,分属 5 科 13 属,其中均以禾本科、菊科、藜科、豆科占主导地位;灌木植被的地上植被和土壤种子库的物种多样性均表现为最优;地上植被与土壤种子库密度的变化范围为 88.48~495.47 株/m<sup>2</sup>, 74.74~1422.91 粒/m<sup>2</sup>,且均在草地类型下最大。土壤种子库和地上植被的相似性普遍较低,相似性系数仅为 0.16~0.23。因此,风沙黄土区排土场的植被恢复与重建需要加强保护与管理,可以考虑构建以草灌配置为主的人工植被恢复模式,保障群落的恢复潜力,并提高群落多样性与稳定性,亦可考虑引入外源种子库提升群落恢复的潜力。

**关键词:**露天煤矿;排土场;植被类型;土壤种子库;半干旱区

中图分类号:S156

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0171-07

## Community and Soil Seed Bank Characteristics of Different Vegetation Restoration Types in Aeolian Sandy Loess Dumps

WANG Dongli<sup>1</sup>, GUO Yingying<sup>1</sup>, XIE Wei<sup>1,2</sup>, QIAN Xiaotong<sup>1</sup>,

GUO Jianjun<sup>2</sup>, ZHAO Xiaoliang<sup>1</sup>, LIAN Zhao<sup>1</sup>, DU Huadong<sup>3</sup>

(1.College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2.Ecological Research Institute, Shendongtianlong Group Corporation Ltd, Ordos, Inner Mongolia 017000, China; 3.College of Geology & Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** As an artificial ecosystem, the natural conditions of the dump in the aeolian loess region are severe and the soil is barren. The characteristics and relationship between aboveground vegetation communities and soil seed bank of different vegetation types were studied by using the method of vegetation investigation and seed bank germination experiment, and the benefit and potential of vegetation restoration were discussed. There are 47 species of plants belonging to 16 families and 40 genera in the aboveground vegetation community under the artificial vegetation restoration in the study area. The soil seed bank consists of 14 species belonging to 5 families and 13 genera, among which Gramineae, Compositae, Chenopodiaceae and Leguminosae are dominant. The species diversity of aboveground vegetation and soil seed bank of shrubbery are the best. The density of soil seed bank and aboveground vegetation vary from 88.48 to 495.47 plants/m<sup>2</sup> and from 74.74 to 1422.91 seeds/m<sup>2</sup>, and they are the largest under grassland type. The similarity coefficient of soil seed bank and aboveground vegetation ranges from 0.16 to 0.23. Therefore, it is necessary to strengthen the protection and management for the vegetation restoration and reconstruction of the dumping site in the aeolian loess area. The artificial grassland and Shrub should be considered as the main factors to improve the

收稿日期:2021-07-20

修回日期:2021-08-05

资助项目:内蒙古自治区科技计划项目(201701024);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01)。

第一作者:王东丽(1986—),女,山西怀仁人,博士,硕士生导师,主要从事植被恢复与生态修复研究。E-mail:starhome0522@163.com

通信作者:赵晓亮(1981—),男,安徽淮北人,博士,副教授,主要从事矿区环境治理与生态修复研究。E-mail:zhaoxiaoliang2008@126.com

community diversity and stability, and different provenances should be introduced to increase the community restoration potential.

**Keywords:** open pit coal mine; dumping ground; vegetation type; soil seed bank; semiarid region

土壤及其表面凋落物中所有存活种子的总和即为土壤种子库<sup>[1]</sup>,土壤种子库有瞬时种子库和持久种子库两种类型,其中种子在土壤中存活 1 a 以上的为持久种子库,具有在干扰环境中发挥繁殖能力来恢复植被群落多样性的能力<sup>[2-3]</sup>。地上植被生产的种子是土壤种子库的主要来源,地上植物的生长发育状况及繁殖能力直接影响着种子库的组成及动态变化<sup>[4-5]</sup>。土壤种子库通过种子的萌发及形成的幼苗在植被种群更新、演替的过程中扮演着重要的角色,很大程度上决定植被恢复的进度与方向<sup>[6-7]</sup>。因而,地上植被与土壤种子库紧密联系、不可分割,研究二者特征及关系对群落更新、演替及生态系统的恢复与重建十分重要。

矿区废弃地为我国土地资源损毁的主要形式之一,排土场的堆放引发矿区生态系统改变及环境污染等问题<sup>[8]</sup>,加之排土场土壤生物活性低、养分贫瘠、保水保肥能力差,因此排土场的生态恢复和植被重建始终是矿区复垦的重点和难点<sup>[9]</sup>。我国土地复垦工作开展以来,排土场植被恢复的理论与实践工作一直备受关注,针对生态系统的功能恢复开展了大量的研究,主要侧重于适宜植物筛选、群落与生态系统营建及其生态恢复效益等方面<sup>[10-13]</sup>。然而,随着我国煤炭开采逐步向西部生态脆弱地区拓展,由于地域性差异与恶劣的生境,适宜的植被恢复模式仍是区域矿区废弃地生态重建的关键。风沙黄土区排土场土质疏松,易发生面蚀、沟蚀,还会出现沙砾化面蚀、沉陷、崩塌、滑坡等问题<sup>[14]</sup>,开展快速、有效的植被恢复实践至关重要,科学的植被恢复模式评价是其基本保障。然而相关研究多集中在植物群落、土壤改良等方面,土壤种子库作为植物群落恢复潜力的重要表征指标,在排土场生态重建中未受到广泛重视,仅在海州露天矿、安太堡

露天矿和广州市白云山地区排土场有少量研究<sup>[15-18]</sup>。

因此,本文选取鄂尔多斯矿区排土场不同植被类型恢复模式为研究对象,通过研究其地上植被与土壤种子库特征及二者关系,探明风沙黄土区排土场不同植被类型恢复效益及潜力,为其植被重建与生态恢复提供理论依据与实践指导。

## 1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗武家塔露天煤矿,其地理位置为东经 110°05′55″—110°10′48″,北纬 39°15′16″—39°17′50″,平均海拔为 1 100 m 左右。属半干旱半沙漠的高原大陆性气候,冬季严寒,夏季炎热干燥,降水稀少,年平均降水量约为 390 mm,雨量集中在 6—9 月,年蒸发量大。本区春冬两季大风频繁,风向多为西北。土壤类型为以风沙黄绵土为主,并且少量分布着栗钙土型沙土和草甸土。植被属于温带草原区,主要植被类型为沙生植被类型。武家塔排土场基于适宜性植物甄选、生态恢复模式建立、及水土流失防治等方面的生态重建实践,现已完成复垦面积约 200 万 m<sup>2</sup>,人工植被主要包括苜蓿(*Medicago Sativa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides.*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙柳(*Salix Psammophila*)、榆树(*Ulmus pumila.*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等<sup>[19]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选取

本研究样地设在武家塔露天煤矿 4 号排土场,自 2010 年排土以来,平台开展了多种植被类型的生态重建模式,本研究针对草地、灌木和乔木 3 种植被类型分别选取 3 个样地作为研究样地,样地的基本情况见表 1。

表 1 样地的基本概况

序号	植被类型	样地编号	恢复模式	恢复年限/a	含水量/%	土壤容重/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH
1	草地	M2	苜蓿	2	6.18	1.83	7.76
2	草地	M4	苜蓿	4	5.37	1.67	7.53
3	草地	M6	苜蓿	6	6.16	1.66	7.84
4	灌木	SJ	沙棘	4	7.26	1.56	8.15
5	灌木	NT	柠条	7	5.43	1.59	7.84
6	灌木	SL	沙柳+沙蒿	8	5.51	1.48	7.88
7	乔木	YS	榆树	3	7.11	1.59	7.91
8	乔木	CH	刺槐	3	6.35	1.70	8.10
9	乔木	ZL	竹柳	4	7.11	1.54	8.55

## 2.2 野外调查

不同植被恢复样地按照“S”字型随机设置 6 个 1 m×1 m 的样方调查草本层,3 个 5 m×5 m 样方调查灌木林,3 个 10 m×10 m 样方调查乔木林。估测样方的总体盖度,调查记录其相应的物种名、个数、优势物种、高度、盖度、频度。

## 2.3 土壤种子库样品采集与测定

在所选择样地内由北向南划分为 3 个样带,每个样带随机选取 8~12 个样点,采用直径为 6 cm 的专用采样器分别按上层(0—2 cm)、中层(2—5 cm)和下层(5—10 cm)进行土样采集,每个采样点同一土层的土样混合为 1 个样品,分别进行编号后装袋,带回实验室风干备用。土壤种子库测定采用萌发试验<sup>[20]</sup>。

## 2.4 数据处理与分析

采用 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数分析不同植被恢复类型土壤种子库与地上植被的物种多样性。计算公式如下:

(1)Simpson 指数:

$$D=1-\sum_{i=1}^Sp_i^2 \tag{1}$$

(2) Shannon-Wiener 指数:

$$H=-\sum_{i=1}^SP_i\ln p_i \tag{2}$$

(3) Pielou 指数:

$$J_{sw}=-\left(\sum_{i=1}^Sp_i\ln p_i\right)/\ln S \tag{3}$$

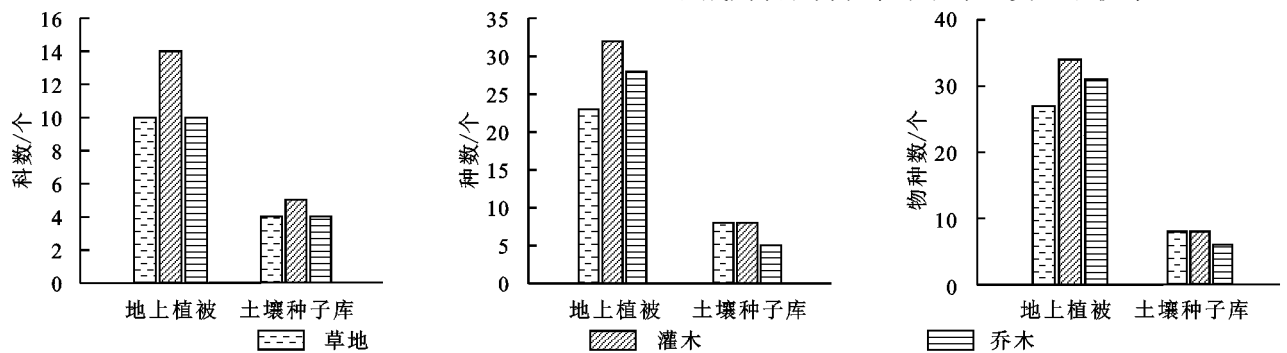


图 1 不同植被恢复类型的物种组成结构

经调查统计可知,研究区地上植被以一、二年生草本植物为主,占 51.1%,多年生草本(45.7%)次之,其他类型植物最少(3.3%)。土壤种子库中一年生草本植物占 71.4%,多年生草本占 28.6%。由表 2 可知,地上植被中 3 种植被类型差异不大,物种数也相差不多,但仍表现为随着植被由草地变为灌木及乔木,其一、二年生植物占比稍有下降,而多年生植物则呈现相反趋势。而对于土壤种子库,草地和灌木植被类型下一、二年生草本植物所占比例明显高于多年生

式中: $P_i$ 为第  $i$  种植物的个体数占有所有物种总个体数的比例; $S$  为物种  $i$  所在样方的物种总数。根据测量的数据计算样地不同物种重要值,计算公式如下:

$$\text{重要值}=(\text{相对密度}+\text{相对盖度}+\text{相对高度}+\text{相对频度})/4 \tag{4}$$

采用 Sorensen 相似性系数分析评价不同植被恢复类型土壤种子库及地上植被物种组成相似性,计算公式如下:

$$SC=2\omega/(a+b) \tag{5}$$

式中:SC 是相似性系数; $\omega$  为两样地共有的植物种数; $a, b$  分别为地表植被、土壤种子库各自拥有的植物种数。

数据统计与分析采用 SPSS 18.0 软件,不同植被类型间土壤种子库密度的差异性采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较。结果图的绘制采用 SigmaPlot 14.0 软件。

## 3 结果与分析

### 3.1 物种组成及多样性

经调查统计可得,不同植被类型地上植被中共 47 种植物,分属 16 科 40 属,土壤种子库共 14 种植物,分属 5 科 13 属,明显少于地上植被,其中禾本科、菊科、藜科、豆科在研究区植被中占绝对优势。由图 1 可知,对于地上植被灌木类型下科数、属数、物种数均最多,草地植被类型最少,而对于土壤种子库物种组成则表现为在灌木和草地类型下较好。

草本植物,可见一、二年生草本植物在土壤种子库占主导地位。

由图 2 可知,研究区地上植被的 Simpson 指数变化在 0.842~0.892,不同植被恢复类型表现为草地<灌木<乔木,但无显著性差异;土壤种子库的 Simpson 指数变化在 0.880~0.993,不同植被恢复类型表现为草地<乔木<灌木,也无显著性差异。地上植被的 Shannon-Wiener 指数变化较小(0.976~0.977),土壤种子库的 Shannon-Wiener 指数变化在

0.852~0.895,均与 Simpson 指数变化趋势一致。可见,地上植被中草地植被类型物种多样性较差,土壤种子库中乔木植被类型较差,灌木植被类型不论是在地上植被还是土壤种子库中均表现为物种多样性最佳。地上植被的 Pielou 指数则变化在 0.351~0.377,

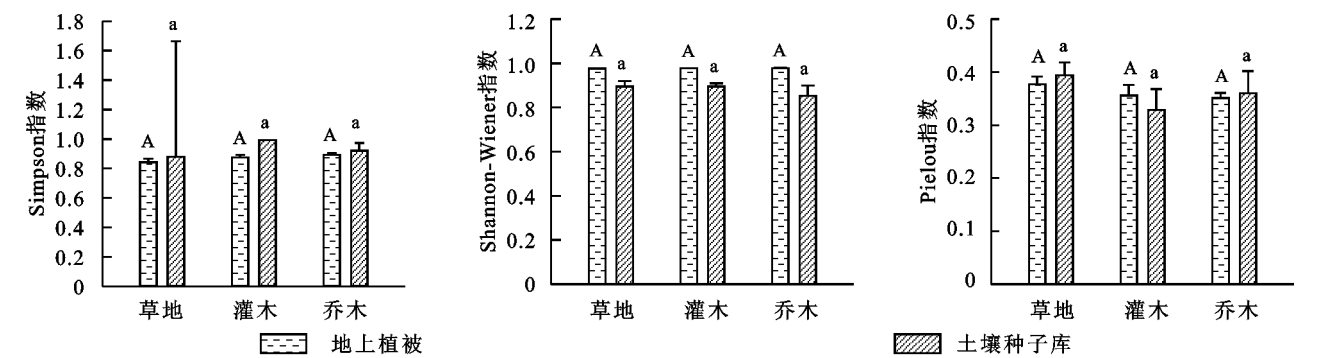
其中草地植被类型下最大,与土壤种子库的结果一致,可见草地植被类型有利于地上植被和土壤种子库中物种数目的均匀分配,这可能与豆科植物占据优势地位对其他植物产生限制有关,但不同植被类型之间无显著性差异。

表 2 不同植被类型下地上植被与土壤种子库的生活型结构

土壤种子库	AB		P		其他	
	数量/个	百分比/%	数量/个	百分比/%	数量/个	百分比/%
草地	7	87.5	1	12.5	—	—
灌木	5	71.4	2	28.6	—	—
乔木	3	50.0	3	50.0	—	—

地上植被	AB		P		其他	
	数量/个	百分比/%	数量/个	百分比/%	数量/个	百分比/%
草地	16	59.3	11	40.7	—	—
灌木	17	50.0	16	47.1	1	2.94
乔木	14	45.1	15	48.4	2	6.45

注:表中数据为物种数;AB 为一/二年生草本植物,P 为多年生草本植物。



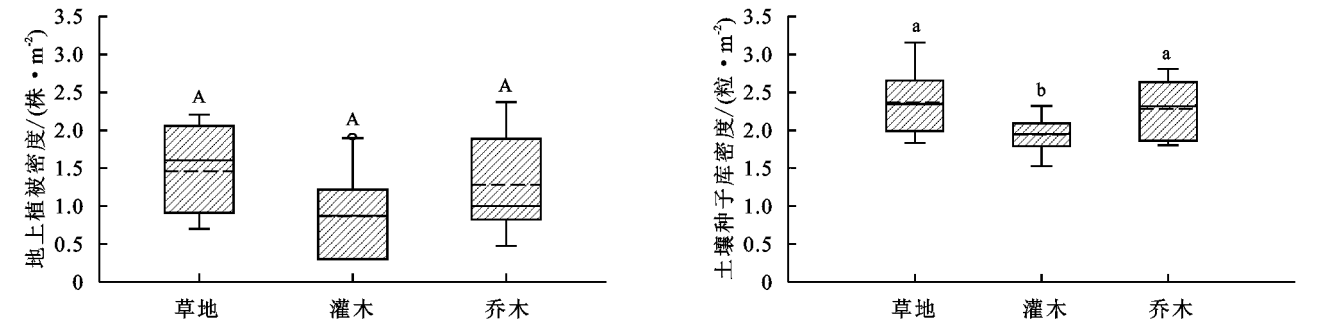
注:图中大写字母为地上植被间的差异性,小写字母为土壤种子库间的差异性。

图 2 地上植被和土壤种子库的物种多样性

3.2 密度特征

研究区地上植被密度的变化范围在 88.48~495.47 株/m<sup>2</sup>,土壤种子库密度的变化范围在 74.74~1 422.91

粒/m<sup>2</sup>。由图 3 看出,地上植被和土壤种子库均在草地类型下密度最大,灌木类型下密度最小,主要由于土壤种子库在恢复初期群落的先锋物种具有较强的种子生产能力。



注:图中所有密度值进行了对数转换;实线为中位数,虚线为平均值。

图 3 地上植被和土壤种子库的密度

由图 4 所示,研究区土壤种子库密度 0—10 cm 总密度由高到低表现为草地>乔木>灌木,变化在 (385.8±141.5)~(1 977.7±286.1)粒/m<sup>2</sup>之间。3 种恢复模式整体表现为在 0—2 cm 密度最大,其中草地和灌木植被类型呈随着土层加深呈先下降后小幅

增长的趋势,草地植被类型在 0—2 cm 时达到最大值(1 422.9±195.4)粒/m<sup>2</sup>。乔木植被类型呈随着土层加深而增长的趋势。其中灌木植被类型下土壤种子库密度低,变化在 (74.7±32.6)~(208.1±99.0) 粒/m<sup>2</sup>之间。



3.3 地上植被与土壤种子库的关系

由表 3 可知,地上植被的相似性系数为 0.62~0.69,其中草地与乔木植被类型的相似性系数最低。土壤种子库的相似性系数为 0.50~0.57,其中草地与灌木植被类型的相似性系数最低。地表植被与土壤种子库的相似性系数为 0.16~0.23,相似性由高到低依次为草地>乔木>灌木,而地表植被与土壤种子库的共有物种表现为草灌类型优于乔木林地。可见,研究区排土场地上植被的相似性普遍较高,而不同植被恢复模式间地上植被与土壤种子库相似性低。

表 3 土壤种子库和地上植被的相似性指数

植被类型	地上植被			土壤种子库			地上植被 VS 土壤种子库		
	草地	灌木	乔木	草地	灌木	乔木	草地	灌木	乔木
草地	1			1			8/0.23		
灌木	21/0.69	1		4/0.50	1		8/0.18		
乔木	18/0.62	21/0.65	1	4/0.57	4/0.57	1	6/0.16		

注:共有种/相似性系数。

4 讨论

4.1 地上植被与土壤种子库的物种多样性

风沙黄土区排土场不同植被恢复类型地上植被中共统计 47 种植物种,土壤种子库共 14 种植物,二者在物种数方面相差较大,表明研究区具备一定的种源,但植被恢复与稳定发展的种源供给具有一定的风险,自我恢复的潜力受限。研究区地上植被与土壤种子库均主要由禾本科、菊科、藜科、豆科植物组成,这与我国北方代表性安太堡露天煤矿排土场的研究结果一致<sup>[15]</sup>,吴祥云等、王改玲等对矿区植被恢复地上植物种类研究也发现菊科、禾本科为主要先锋植物<sup>[16-17]</sup>,验证了这一结论;且灌木类型的地上植被与土壤种子库均呈现出较多的科属种数,可见,灌木植被类型有利于风沙黄土区排土场恢复植物群落物种组成的丰富。研究区地上植被与土壤种子库以一二年生草本为主,安太堡露天矿排土场也得出相似结果<sup>[16]</sup>,但海州露天矿则以多年生植物为主<sup>[17]</sup>;研究区除种植植物种外,其优势种大部分为风播且广泛分布的一二年生植物,如狗尾草、狐尾草、猪毛菜等,这些植物通常具有较强的适生性,且种子个体小、数量多、易萌发出苗,可快速进入新的生境定居,可作为该区恶劣生境植被恢复的先锋物种,这与 Shu 等<sup>[21]</sup>对矿区植物在群落演替初期主要通过风力传播进入样地和土壤种子库的结论一致。同时,研究区随着植被由草地变为灌木及乔木,其一二年生植物占比稍有下降,而多年生植物则呈现相反趋势;而且在灌木植被类型下偶有乔木出现,在乔木植被类型下有少量灌木出现,表明风沙黄

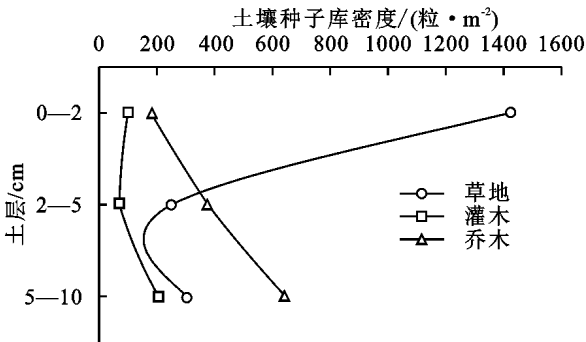


图 4 不同植被类型下土壤种子库密度的垂直分布特征

土区排土场能提供一定的初期种源,人工乔灌植被类型恢复模式在一定程度上可加快该区植被演替。

研究区地上植被的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数均在草地植被类型下最小,可见研究区草地植被类型的物种多样性相对较差,可能由于苜蓿优势性强,对于养分、光照、热等竞争能力强,不利于其他物种的侵入,只有少数种子传播能力较强的植物种定居,吕春娟<sup>[22]</sup>、郭逍宇<sup>[23]</sup>等通过对黄土区排土场生态恢复群落研究发现部分先锋植物的繁殖体传播能力较强,证实了这一结论。同时,土壤种子库的 Simpson 指数也在草地植被类型下最小,Shannon-Wiener 指数在乔木植被类型下最小,主要在于研究区处于生态恢复前中期阶段,乔木相对较大的植冠具有较好的防风效应,早期物种传播方式以风力传播为主,其他物种种子不利于侵入其生境;而苜蓿地由于地上植被定居困难,其土壤种子库的种源供给受限,而灌木类型下多样性指数均较大,一方面由于本研究灌木植被类型的柠条、沙柳+沙蒿两种模式的恢复年限已有 7~8 a,重建群落已演替到一定阶段,较多的植物已成功侵入定居;另一方面,可能由于灌丛郁闭后,其灌丛对植物种子有一定的拦截作用<sup>[24]</sup>,而且这两种模式处于排土场的边界,更易截获扩散到排土场的种子并为其提供有利生境使其进入土壤种子库。故研究区人工种植灌木有利于增加物种多样性,矿区排土场生态重建时可以考虑人工适当引入灌木,丰富群落物种多样性与层次结构,提高群落的多样性与稳定性,促使复垦的生态系统在更短时间内恢复到较优状态。地上植被和土壤种子库的 Pielou 指数均在草

地植被类型下达到最大值,可见草地植被类型有利于地上植被和土壤种子库中物种数目的均匀分配。研究区地上植被与土壤种子库的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数与黄土区其他排土场物种多样性相差不大,但 Pielou 指数较低,可见排土场人工恢复植被群落的物种均匀性较差。

#### 4.2 地上植被与土壤种子库的密度

本研究区不同植被土壤种子库密度变化在 $(385.8 \pm 141.5) \sim (1\,977.7 \pm 286.1)$ 粒/ $\text{m}^2$ 之间,较研究区所属黄土丘陵区土壤种子库密度(约 $2\,000 \sim 5\,000$ 粒/ $\text{m}^2$ )偏低<sup>[25]</sup>。地形地势条件、周围植被分布的密集程度和气候等多种原因均会导致土壤种子库密度差异<sup>[26]</sup>,本研究区排土场的土壤种子库密度偏低主要在于其为人工重塑生态系统,无植被覆盖,且其复垦土壤多来源于风沙黄土区深厚土层的生土,未有储存的种子,故在植被恢复过程中可考虑引入外源种子库提升群落恢复的潜力。另外,本研究区土壤种子库密度均在 $0 \sim 2\text{ cm}$ 土层时达到最大值,一方面种子身处土壤表层易受风力影响再次扩散,难以进入土壤深层;另一方面,导致深层土壤中能萌发的种子数量较少的的原因可能是有些种子扁长且较轻,不易进入土壤深处,在风蚀、下渗水、冬季降雪、融雪等因素影响下,才使其进入土壤深层<sup>[27-28]</sup>。

正常条件下土壤种子库中的存活种子通过萌发和形成实生苗参与地上植被的更新演替,直接影响着地上植物群落的组成与结构<sup>[29-30]</sup>,故地上植被的物种组成及密度特征与土壤种子库的特征一致。研究区地上植被与土壤种子库中均在草地植被类型下密度最大,灌木植被类型下密度最小,由于草地植被类型中苜蓿占据优势地位,可能会导致土壤表层干旱,不利于其他植物种子萌发并生长,故储存在土壤种子库中<sup>[31]</sup>;另外,不同土地利用类型、放牧均会影响土壤种子库的密度,其优势物种在不同措施下表现并不相同<sup>[32]</sup>,研究区人为干扰也是引起土壤种子库密度和组成差异的重要原因。同时,研究区的地带性植被以草原植被为主,故建议该区矿山废弃地植被重建或恢复时以草本植物为主,进而保障群落的恢复潜力。

#### 4.3 地上植被与土壤种子库的相似性

研究区不同植被类型地上植被的相似性系数 $(0.62 \sim 0.69)$ 及其土壤种子库的相似性系数 $(0.50 \sim 0.57)$ 均大于 $0.5$ 且普遍较高,可见不同植被类型间地上植被及土壤种子库的差异较小。而各植被类型下土壤种子库与地上植被的相似性系数变化在 $0.16 \sim 0.23$ ,其相似性均较小,与韩丽君等<sup>[15]</sup>、刘建立等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。地上植被与种子库产生差异的原

因一方面是传播、演替、干扰(动物采食和人类干扰)等<sup>[34-35]</sup>,另一方面是本研究土壤种子库取样时间是在6月下旬,在雨季来临前,已经有一部分先锋物种萌发了,这些先锋物种多为机遇性植物,适生性较强,只要拥有合适条件便会萌发,导致土壤种子库的组成与其地上植被组成之间相似性小,其季节动态差异有待进一步研究。

研究区不同植被类型地上植被与土壤种子库的相似性表现为草地>乔木>灌木,草地植被类型的相似性之所以最高,可能是由于矿区排土场生态重建时人工种植豆科牧草成为群落优势种,使得其他物种很难在群落中侵入并定居,导致该植被类型中植物种类较少,而地表植被主要由土壤种子库提供种源,地上植被与土壤种子库组成基本一致,因此相似性系数较其他植被类型高。灌木和乔木植被类型的相似性较低,一方面是由于灌木和乔木对一些植物种子具有拦截作用,能够为一部分植物提供定居的微生境,而且使其进入土壤种子库;另一方面是研究区排土场人工植被恢复初期土壤种子库物种组成较小,排土场严重的强光辐射与干旱胁迫等会对研究生境产生较大干扰<sup>[36]</sup>。不同植被类型地表植被与土壤种子库的共有种表现出草灌类型优于乔木林地,不同植被类型间植物种类有所差异。其中狗尾草、灰绿藜和冷蒿在3种植被类型下均为共有种,主要由于这些植物种具有较强的种子生产力,而且种子易形成持久种子库;而在草地共有种还以苜蓿、地肤为主,在灌木林地共有种主要还包含早熟禾,在乔木林地不同样地共有种各异,表明矿区这种干扰生态系统人工恢复初期,不同植被类型地上植被与土壤种子库的共有种仍以种子产量大、持久性强、扩散广、适生性强的植物为主,在群落中占据重要地位,其次在人工草地种植种成为其次要共有种,而乔灌林地的次要共生种则各异,也证实了乔灌林恢复有利于促进物种多样性的增加。

## 5 结论

风沙黄土区排土场不同植被恢复类型中,地上植被物种和科属组成数量是土壤种子库的3倍左右,均以禾本科、菊科、藜科、豆科占绝对优势,以一、二年生草本植物为主,多年生草本次之。草地植被类型在天上植被中密度最大,灌木植被类型在地上植被与土壤种子库的物种多样性均表现为最佳。研究区土壤种子库可为植被恢复提供一定的种源,但土壤种子库与地上植被相似性较低时,在干扰生境下自我恢复的潜力也相应较低,因此,可考虑引入外源种子库提升群落恢复的潜力。研究区在草地和灌木恢复模式下达

到最优,所以可以考虑构建以草灌配置为主的人工植被恢复模式,一方面可保障群落的恢复潜力,另一方面可提高群落多样性与稳定性,进而为植被恢复效益与可持续性提供保障。

#### 参考文献:

- [1] Roberts H A. Seed banks in soils[J]. *Advances in Applied Biology*, 1981, 6: 1-55.
- [2] 闫巧玲,刘志民,李荣平.持久土壤种子库研究综述[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(8): 948-952.
- [3] 赵凌,程积民,王占彬.持久种子库在黄土高原植被恢复中的作用[J]. *草业科学*, 2013, 30(1): 104-109.
- [4] 李锋瑞,赵丽娅,王树芳,等.封育对退化沙质草地土壤种子库与地上群落结构的影响[J]. *草业学报*, 2003, 12(4): 90-99.
- [5] Kim K D, Lee E J. Soil seed bank of the waste landfills in SouthKorea [J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1): 109-121.
- [6] Willems J H, Bik L P M. Restoration of high species density in calcareous grassland: The role of seed rain and soil seed bank[J]. *Applied Vegetation Science*, 1998, 1(1): 91-100.
- [7] 钟章成,李旭光,汪莉,等.亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤种子库的初步研究[J]. *植物生态学报*, 1992, 16(3): 249-257.
- [8] 彭建,蒋一军,吴健生,等.我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J]. *地理科学进展*, 2005, 4(2): 38-48.
- [9] 王金满,郭凌俐,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 223-232.
- [10] 凌婉婷,贺纪正,高彦征.我国矿区土地复垦概况[J]. *农业环境与发展*, 2000, 17(4): 34-36.
- [11] 胡振琪.中国土地复垦与生态重建 20 年: 回顾与展望[J]. *科技导报*, 2009, 27(17): 25-29.
- [12] 卞正富.国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. *中国土地科学*, 2000, 4(1): 6-11.
- [13] 魏远,顾红波,薛亮,等.矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2): 107-114.
- [14] 魏忠义,马锐,白中科,等.露天矿大型排土场水蚀特征及其植被控制效果研究: 以安太堡露天煤矿南排土场为例[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 164-167.
- [15] 韩丽君,白中科,李晋川,等.安太堡露天煤矿排土场土壤种子库[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 817-821.
- [16] 王改玲,白中科,郝明德.平朔安太堡露天矿排土场土壤种子库研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(6): 178-180.
- [17] 吴祥云,李宏昌,瞿春艳.露天矿排土场不同恢复措施土壤种子库生态特征[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2009, 28(5): 820-822.
- [18] 束文圣,蓝崇钰,黄铭洪,等.采石场废弃地的早期植被与土壤种子库[J]. *生态学报*, 2003, 4(7): 1305-1312.
- [19] 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 17-26.
- [20] 谢伟,钱晓彤,王东丽,等.鄂尔多斯矿区排土场苜蓿恢复地土壤种子库的演变特征[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(4): 29-37.
- [21] 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(1): 49-60.
- [22] 吕春娟,白中科,陈卫国.黄土区采煤排土场生态复垦工程实施成效分析[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 232-236.
- [23] 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.
- [24] 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等.铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2121-2130.
- [25] 王宁,贾燕锋,白文娟,等.黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库特征与季节动态[J]. *草业学报*, 2009, 18(3): 43-52.
- [26] 沈有信,刘文耀,张彦东.东川干热退化山地不同植被恢复方式对物种组成与土壤种子库的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(7): 1454-1460.
- [27] 于顺利,蒋高明.土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 552-560.
- [28] 张玲,方精云.太白山土壤种子库储量与物种多样性的垂直格局[J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 880-888.
- [29] Kalamees R, Pssa K, Zobel K, et al. Restoration potential of the persistent soil seed bank in successional calcareous (alvar) grasslands in Estonia [J]. *Applied Vegetation Science*, 2012, 15(2): 208-218.
- [30] 吕春花.黄土高原子午岭地区土壤质量对植被恢复过程的响应[D].陕西杨凌,西北农林科技大学, 2009.
- [31] Fenner M, Thompson K. *The Ecology of Seeds* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [32] 金振洲.植物社会学理论与方法[M].北京:科学出版社, 2009.
- [33] 刘建立,袁玉欣,彭伟秀,等.坝上地区孤石牧场土壤种子库与地上植被的关系[J]. *草业科学*, 2005, 22(12): 57-62.
- [34] Falińska K. Seed bank dynamics in abandoned meadows during a 20-year period in the Białowieża National Park[J]. *Journal of Ecology*, 1999, 87(3): 461-475.
- [35] 张冰,杨丽雯,张峰,等.大同矿区煤矸石山土壤种子库及其与地上植被的关系[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(12): 344-350.
- [36] 冯秀,仝川,丁勇,等.土壤种子库在植被恢复与重建中的作用与潜力[J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2007, 38(1): 102-108.