

DOI: 10.20103/j.stxb.202407251757

王东丽, 王歆然, 张野, 姜聚宇, 周志伟, 定春健. 矽石山不同侵蚀微地貌土壤种子库研究. 生态学报, 2025, 45(8): 3898-3906.

Wang D L, Wang X R, Zhang Y, Jiang J Y, Zhou Z W, Ding C J. Study on soil seed bank of different micro-topographies in gangue dump. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3898-3906.

## 矽石山不同侵蚀微地貌土壤种子库研究

王东丽<sup>1,2,\*</sup>, 王歆然<sup>1</sup>, 张野<sup>1</sup>, 姜聚宇<sup>3</sup>, 周志伟<sup>4</sup>, 定春健<sup>4</sup>

1 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000

2 辽宁工程技术大学矿山重大灾害防治与环境修复协同创新中心, 阜新 123000

3 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000

4 国能宝日希勒能源有限公司, 呼伦贝尔 021000

**摘要:**微地貌在恶劣生境中通常对立地条件与生物资源进行重塑与再分配, 风化矽石山坡面由于水力侵蚀广布着细沟和浅沟等微地貌。为探明矿区侵蚀微地貌是否通过影响土壤种子库而影响植物定居, 选取辽西风化矽石山坡面上的裸坡、细沟和浅沟作为研究对象, 研究不同微地貌土壤种子库的输入与输出特征及其动态, 探讨其对植物更新及定居的贡献。结果表明: (1) 辽西风化矽石山坡面的土壤种子库总密度在不同微地貌中表现为细沟>裸坡>浅沟, 分别为 4904.86 粒/m<sup>2</sup>、4561.87 粒/m<sup>2</sup>和 3395.48 粒/m<sup>2</sup>, 均以一年生草本植物为主; 不同微地貌的土壤种子库输入在坡位与垂直土层表现迥异。 (2) 在不同微地貌中, 萌发幼苗密度和物种数表现为浅沟>细沟>裸坡, 幼苗密度分别为 172.74 株/m<sup>2</sup>、86.41 株/m<sup>2</sup>、23.00 株/m<sup>2</sup>, 且在下坡位高于上坡位。 (3) 三种微地貌内的土壤种子库输出率表现为浅沟>细沟>裸坡, 分别为 6.55%、3.36%、2.00%, 且具有时空一致性, 均在六月最大, 在下坡位高于上坡位。综上所述, 细沟利于土壤种子库的输入, 浅沟则利于输出, 在植被恢复实践中, 可借鉴不同微生境的优势在矿区废弃地坡面构建微地貌人工引导植被有效恢复。

**关键词:**矽石山; 裸坡; 细沟; 浅沟; 土壤种子库; 种子输出特征; 植被恢复

## Study on soil seed bank of different micro-topographies in gangue dump

WANG Dongli<sup>1,2,\*</sup>, WANG Xinran<sup>1</sup>, ZHANG Ye<sup>1</sup>, JIANG Juyu<sup>3</sup>, ZHOU Zhiwei<sup>4</sup>, DING Chunjian<sup>4</sup>

1 College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2 Collaborative Innovation Center of Mine Major Disaster Prevention and Environmental Restoration, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

3 College of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

4 China Energy Baorixile Energy Co., Ltd., Hulun Buir 021000, China

**Abstract:** Micro-topography typically modifies site conditions and reallocates biological resources within challenging environments. Different micro-topographies, such as rills and shallow gullies, are widely distributed on the slopes of weathered gangue dump due to hydraulic erosion. To ascertain if the eroded micro-topography in mining areas impacts plant colonization by affecting the soil seed bank, we chose bare slopes, rills, and shallow gullies on weathered gangue dump slopes in western Liaoning Province as subjects for investigation. The study examined the input and output characteristics and their dynamics within the soil seed bank across various micro-topographies by using soil seed germination experiment, aiming to assess the impact of different micro-topographies on plant regeneration and establishment. The results showed that: (1) The total density of soil seed bank on the weathered gangue dump slopes in western Liaoning followed the order of rill > bare slope > shallow gully, with counts of 4904.86 seeds/m<sup>2</sup>, 4561.87 seeds/m<sup>2</sup> and 3395.48 seeds/m<sup>2</sup>, respectively. The

**基金项目:**辽宁省高校基本科研业务费项目(LJ212410147039); 矿山重大灾害防治与环境修复协同创新中心开放课题(CXZX-2024-14); 辽宁工程技术大学第四批青年教师提升计划-拔尖人才项目

**收稿日期:**2024-07-25; **网络出版日期:**2025-01-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: starhome0522@163.com

input of soil seed bank in different micro-topographies varied among different slope positions and vertical soil layers, with composed mainly of annual herbaceous plants. (2) The density of seedlings emergence and the number of species followed the order of shallow gully > rill > bare slope, with values of 172.74 seedlings/m<sup>2</sup>, 86.41 seedlings/m<sup>2</sup>, and 23.00 seedlings/m<sup>2</sup>, respectively. The output of soil seed bank in different micro-topographies was higher in the downhill position than that in the uphill position. (3) The soil seed bank output rate under the three micro-topographies followed the order of shallow gully>rill>bare slope, with values of 6.55%, 3.36%, and 2.00%, respectively. The output rates of soil seed bank under different micro-topographies showed the consistency in time and space. The output rates of soil seed bank in downhill position were higher than that in the uphill positions, peaking in June. In summary, rill is conducive to the input of soil seed bank, while shallow gully favors the output. In vegetation restoration efforts, leveraging the benefits of various microhabitats can inform the design of micro-topography, thereby effectively supporting vegetation recovery on slopes of abandoned mining land.

**Key Words:** gangue dump; bare slope; rill; shallow gully; soil seed bank; seed output characteristic; vegetation restoration

煤炭资源的开采利用造成的生态环境问题一直备受关注,还可导致塌陷、崩塌、滑坡、泥石流等各种地质灾害,而且矿山固体废弃物堆积对土地进行侵占和损毁,同时,矿区废弃地还会对植被、空气、土壤和区域地下水系统等造成严重影响<sup>[1-4]</sup>。为减少矿区废弃地对环境的破坏,有效的治理措施必不可少,而植被恢复是我国治理矿区废弃地的重要措施之一<sup>[5]</sup>。植被恢复可以改善土壤理化性质、增加土壤有机质和增强土壤微生物活性等,这些都对矿区废弃地的生态修复至关重要<sup>[6-7]</sup>。

在植被恢复的过程中,土壤种子库作为重要的潜在植被群落,是植物种群生存、繁衍和扩散的基础<sup>[8]</sup>。土壤种子库的时空分布格局对种子萌发、幼苗生长与定居均起决定性作用<sup>[9]</sup>。而幼苗作为土壤种子库的输出,是植物更新及定居的基础,同样对植被群落自然更新有重要影响<sup>[10]</sup>。在矿区废弃矽石山这种条件恶劣、生态脆弱的地区,种子萌发出苗与否更是判断植物种是否适合定居于此的重要依据<sup>[11]</sup>。

坡面在水力侵蚀作用下会形成多种微地貌<sup>[12]</sup>,微地貌会直接重塑土壤水热状况与微气候,进而改变微生境,对植物更新与群落结构产生影响<sup>[13-16]</sup>。王瑞燕等研究发现黄河三角洲不同微地貌类型间 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 等盐分特征具有显著差异<sup>[17]</sup>,张宏芝等分析了陕北黄土坡面塌陷、缓台、陡坎、切沟和浅沟 5 种微地形的土壤化学性质差异<sup>[18]</sup>,王东丽等则对风化矽石山细沟、浅沟和堆积体等微地貌的基质粒径、容重、孔隙度及水热差异进行了研究<sup>[13,16]</sup>,发现堆积体更有利于植被发展<sup>[19]</sup>。然而,这些研究多侧重微地貌的生境条件变化及与植被的关系,忽视了土壤种子库在植被发展过程中的作用机理,而且关于矿区植被恢复的研究多集中土壤理化性质及微生物与植被群落间的相互作用关系<sup>[20-22]</sup>,仅有少量研究涉及土壤种子库,且多是关于种子库储量及与植物定居的关系研究<sup>[19,23]</sup>,土壤种子库如何通过动态输入与输出驱动植被发展的机理有待深入探究。

因此,本研究以辽西风化矽石山坡面裸坡、细沟和浅沟三种典型微地貌为研究对象,通过监测不同微地貌土壤种子库、幼苗出苗特征及动态,探讨不同微地貌土壤种子库输入与输出动态关系及更新潜力,进而为矿区风化矽石山管理和植被恢复等工作提供理论支撑和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究区位于辽宁省阜新市新邱区中北部(图 1),属北温带半干旱半湿润大陆性季风气候,四季分明,日照丰富,年平均气温 8.6 °C,干燥多风,降水时空分布不均,年均降水量 501 mm,冬季严寒少雪,夏季炎热多雨,且降雨多集中于 7—9 月;干旱、大风、冰雹、暴雨等恶劣天气和自然灾害频发<sup>[24]</sup>。研究区地带性土壤是在各种岩石风化物残积母质上以黄土、红土母质发育的淋溶褐土、褐土性土,土层较薄<sup>[25]</sup>。研究区属于新邱露

天煤矿,矿区地形起伏、高差大,矿坑面积达到  $7.08 \text{ km}^2$ ,矸石山边坡陡峭,最高高程  $363 \text{ m}$ ,最大高差达  $273 \text{ m}$ 。并且存在占用土地、破坏生态和环境污染问题,以及局部滑坡等地质灾害<sup>[26]</sup>。

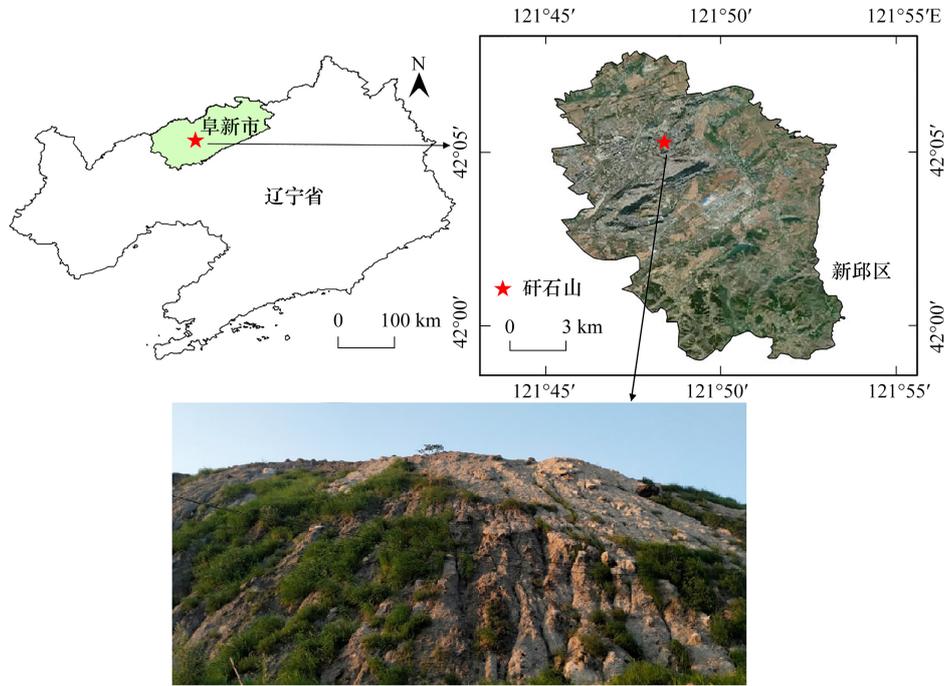


图1 研究区位置与样地分布图

Fig.1 Location of the study area and distribution of the sample sites

## 1.2 样地与侵蚀微地貌的选取

### 1.2.1 样地的选取与基本信息

2021年3月,通过对阜新周边煤矸石山进行充分踏查,选取位于阜新市新邱区的一座风化矸石山作为研究样地。本研究所选的矸石山表面广泛分布着典型侵蚀微地貌。具体样地位置与信息见图1与表1。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample site

坡向 Slope direction	坡长 Slope length/m	坡度 Slope/(°)	海拔 Elevation/m	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全钾 Total potassium/ (g/kg)	经纬度 Longitude and latitude
西南 Southwest slope	9.5—11.1	39.4—44.1	170—180	0.16	0.36	0.41	121°48'28.20"E, 42°5'6.18"N

### 1.2.2 微地貌的选取及其特征

由于水力侵蚀作用,坡面上常会形成沟状侵蚀,以往学者根据沟的深度、宽度、截断面状态和发展阶段将其细分为细沟、浅沟、冲沟等<sup>[27]</sup>。本研究结合矿区风化矸石山实际情况,将宽度和深度大于  $5 \text{ cm}$ ,小于  $20 \text{ cm}$ ,断面呈“V”形的称为细沟,将宽度和深度大于  $20 \text{ cm}$ ,断面呈倒梯形的称为浅沟,将坡面上没有明显沟壑的称为裸坡。本研究在研究样地按照上述规则选择微地貌,具体信息见表2。

## 1.3 土壤种子库采集与测定

### 1.3.1 土壤种子库采集

于2021年4月在所选矸石山的边坡上,按照裸坡、细沟和浅沟,每种侵蚀微地貌随机选取3处样方(长×宽  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ )或样带(长  $1 \text{ m}$ ),并且按上、下两个坡位分别随机选取3个采样点,按  $0—2 \text{ cm}$ 、 $2—5 \text{ cm}$ 、 $5—$

10 cm的垂直土层分别取样,采用土钻在每个采样点按多点混合取样,分别装袋备用。

表 2 微地貌基本信息

Table 2 Basic information of the micro-topographies

微地貌 Micro-topography	宽 Width/cm	深 Depth/cm	侵蚀特征 Erosion features	植被状况 Vegetation condition
裸坡 Bare slope	—	—	以面蚀为主,坡面偶有片状小坑。	植被较差,物种贫乏,生长很差。
细沟 Rill	18.56±0.76	11.50±0.85	以细沟侵蚀为主,侵蚀断面呈“V”形下切。	植株仍较少,生长一般。
浅沟 Shallow gully	34.33±0.88	36.11±1.52	以浅沟侵蚀为主,侵蚀断面呈倒梯形。	物种较丰富,覆盖零散,生长较好。

表中数据为平均值±标准误

### 1.3.2 土壤种子库特征测定

将野外取回的土样进行风干,过孔径大小为 2 mm 的土筛并称量,以去除杂物、浓缩土样。取处理完毕的土壤样品以每一份土样作为一个发芽单位,将土样均匀平摊在萌发盘内,在温室进行萌发。萌发盘底部铺一层透气性好、经过处理不含任何植物种子的珍珠岩,珍珠岩的厚度约为萌发盘厚度的三分之一,用以保证种子萌发的温度及发芽盘的透气透水性。种子发芽实验期间,每日定时浇水。种子萌发出苗后,观测其种属,记录它们的数量并移除,对于当时无法鉴定的幼苗,将其移至盆栽进行单独培养,直至可以鉴定为止。试验持续至土壤不再出苗维持一周后,对土壤进行松翻,重复上述培养、鉴定与统计工作,试验再持续至不再出苗维持一周后,辅以赤霉素喷液进行喷洒,以促进土壤中种子完全出苗,直至完全不出苗一周后结束。

### 1.4 土壤种子库输出特征调查

土壤种子库的输出特征采用幼苗出苗及其密度来表征。从 2021 年 4 月中旬开始,每月根据气候条件调查两次,直到 6 月中旬为止,共计调查六次。调查时在裸坡按照上、下坡位分别设置三个 50 cm×50 cm 的样方,在除裸坡外的侵蚀微地貌按照上、下坡位分别选取三处代表性样带,样带长 50 cm、宽即为沟宽,统计样方内幼苗物种组成及数量等特征。

### 1.5 更新潜力的表征

本研究将土壤种子库累计输出密度与土壤种子库总密度的比值称为土壤种子库输出率,用于表征土壤种子库的更新潜力。这一比值既与土壤中原有的种子库密度有关,又与周边微生境关系密切,可以综合表征该地的土壤种子库的更新潜力。具体公式为:

$$\text{土壤种子库输出率} = \frac{\text{输出密度}}{\text{总密度}} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.6 数据处理与分析

本研究采用 Excel 2016 进行数据处理,采用 ArcGIS 10.4 进行研究区样地图绘制,采用 SigmaPlot 14.0 进行结果图的绘制,采用 SPSS 20.0 进行数据统计分析;不同处理间的差异性采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法 LSD 进行分析比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同微地貌的土壤种子库特征

#### 2.1.1 物种组成

由表 3 可知,矸石山坡面土壤种子库共萌发出植物种类 5 科 6 种,以一年生草本植物为主,占土壤种子库总密度的 97.98%;其中禾本科的狗尾草在裸坡、细沟、浅沟三种微地貌中密度均最大,且在细沟中最大,占细沟土壤种子库总密度的 95.91%,在浅沟中相对较少,但也达到(2965.83±673.94)粒/m<sup>2</sup>;在裸坡、细沟、浅沟三种微地貌的土壤种子库中,次于狗尾草的分别为猪毛菜、猪毛菜和青蒿、地肤;整体来看矸石山坡面土壤种

子库密度在不同微地貌中表现为细沟>裸坡>浅沟,且均以一年生草本植物为主,其中狗尾草在三种微地貌中均高于其他物种。

表 3 不同微地貌土壤种子库物种组成及其密度

Table 3 Species composition of soil seed banks and their density in site

科 Family	属 Genus	种 Species	生活型 Life-form	土壤种子库密度 Soil seed bank density/(粒/m <sup>2</sup> )		
				裸坡 Bare slope	细沟 Rill	浅沟 Shallow gully
藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜属	猪毛菜	一年生草本	472.43±229.95	60.39±31.74	44.23±30.00
	地肤属	地肤	一年生草本	121.58±104.51	38.18±18.36	171.61±138.54
禾本科 Poaceae	狗尾草属	狗尾草	一年生草本	3681.02±1677.90	4704.10±1839.47	2965.83±673.94
豆科 Leguminosae	苜蓿属	苜蓿	多年生草本	260.09±260.09	—	—
菊科 Compositae	蒿属	青蒿	一年生草本	—	60.38±37.33	66.56±39.56
苋科 Amaranthaceae	苋属	反枝苋	一年生草本	26.75±17.13	41.82±27.01	147.26±103.32
总计 Total				4561.87±1821.32	4904.86±1805.47	3395.48±659.15

### 2.1.2 密度

不同微地貌下不同坡位的土壤种子库密度如图 2 所示,裸坡和浅沟在上坡位的土壤种子库密度稍高于下坡位,裸坡分别为 4833.25 粒/m<sup>2</sup>和 4290.49 粒/m<sup>2</sup>,浅沟分别为 4554.05 粒/m<sup>2</sup>和 2236.91 粒/m<sup>2</sup>;细沟在下坡位的土壤种子库密度高于上坡位,分别为 6430.05 粒/m<sup>2</sup>和 3379.67 粒/m<sup>2</sup>;可见,在上坡位裸坡和浅沟的土壤种子库密度稍高于细沟,在下坡位细沟的土壤种子库密度高于裸坡、浅沟,整体上看细沟土壤种子库密度高于裸坡、浅沟。

不同微地貌下不同土层的土壤种子库密度如图 3 所示,可以看出三种微地貌中土壤种子库密度均随土层加深而减小;在 0—2 cm 土层,细沟土壤种子库密度最高,达到 3138.41 粒/m<sup>2</sup>,裸坡次之,有 2569.26 粒/m<sup>2</sup>,浅沟最小,为 1386.91 粒/m<sup>2</sup>;在 2—5 cm 土层,浅沟的土壤种子库密度稍高于细沟和裸坡,有 1345.95 粒/m<sup>2</sup>;在 5—10 cm 土层,裸坡土壤种子库最大,有 954.93 粒/m<sup>2</sup>,细沟和浅沟内的密度稍低于裸坡。

## 2.2 不同微地貌的土壤种子库输出特征

### 2.2.1 物种组成

矸石山坡面不同微地貌土壤种子库输出的物种组成及密度如表 4 所示,坡面幼苗物种以一年生草本植物为主,物种数表现为浅沟>细沟>裸坡;在四月至六月的六次幼苗调查中,裸坡中仅出现猪毛菜和狗尾草,且最大密度分别为 (33.33±15.75) 株/m<sup>2</sup>和 (24.00±6.85) 株/m<sup>2</sup>;在细沟和浅沟中猪毛菜和狗尾草也均有出现,且密度较大;整体来看,浅沟中萌发幼苗数量和物种均较多,且萌发时间也较早,细沟次之,裸坡幼苗较少且萌发时间相对较晚。

### 2.2.2 密度

在幼苗调查期间,不同坡位下不同微地貌的土壤种子库输出规模及动态如图 4 所示。由图 4 可知,无论在任何坡位,不同侵蚀微地貌间的幼苗密度均存在显著性差异 ( $P<0.05$ ),均表现为浅沟>细沟>裸坡,且整体

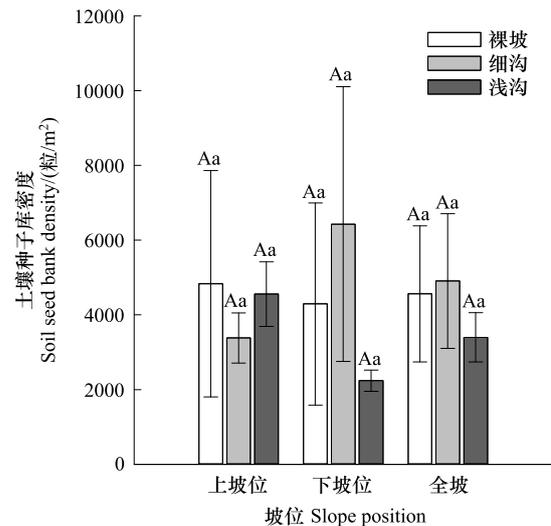


图 2 不同微地貌下不同坡位的土壤种子库密度

Fig. 2 Soil seed bank density at different slope positions under different micro-topographies

不同大写字母代表相同坡位下不同微地貌内的土壤种子库密度达到显著性差异 ( $P<0.05$ ),不同小写字母代表相同微地貌内不同坡位间的土壤种子库密度达到显著性差异 ( $P<0.05$ );全坡为整个坡面土壤种子库密度的平均值

表现为下坡位高于上坡位;可见,浅沟的土壤种子库输出规模最大,且下坡位明显优于上坡位而裸坡的土壤种子库输出较差。随着时间的推移,裸坡上的幼苗密度最低,且变化幅度最小,上坡位的幼苗密度整体上稍低于下坡位;浅沟的幼苗密度在 5 月 14 日达到高峰,上、下坡位分别可达  $(308.21 \pm 21.38)$  株/ $m^2$  和  $(427.25 \pm 191.42)$  株/ $m^2$ ,裸坡和细沟的幼苗密度则有所下降;可见,随着生长季的推进,浅沟的土壤种子库输出表现为较为稳定的先上升后下降的趋势,裸坡和细沟中的土壤种子库输出普遍较少且变化幅度较小。

### 2.3 不同微地貌的土壤种子库输出率

不同微地貌土壤种子库的输出率如图 5 所示,裸坡在上、下坡位的土壤种子库输出率均在六月份达到最大,分别为 1.76% 和 7.12%,细沟在上坡位也在六月份达到土壤种子库输出最大值,7.19%;浅沟在上、下坡位的土壤种子库输出率均在五月份达到最大,分别为 5.55% 和 15.60%,细沟在下坡位的土壤种子库输出率也在五月份达到最大,4.94%;整体上看,下坡位的土壤种子库输出率稍大于上坡位,不同微地貌内的土壤种子库输出率基本表现为浅沟>细沟>裸坡,土壤种子库输出的高峰主要在五月和六月。

表 4 不同微地貌下幼苗库物种组成及其密度

Table 4 Species composition and density of seedling banks under different micro-topographies

科 Family	种 Species	生活型 Life-form	幼苗密度 Seedling density/(株/ $m^2$ )		
			裸坡 Bare slope	细沟 Rill	浅沟 Shallow gully
藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜	一年生草本	0—(33.33±15.75)	(1.82±1.82)—(146.59±93.50)	(16.64±5.42)—(186.65±62.25)
	灰绿藜	一年生草本	—	0—(10.53±10.53)	0—(6.88±3.57)
禾本科 Poaceae	狗尾草	一年生草本	0—(24.00±6.85)	0—(91.24±30.58)	(61.00±61.00)—(152.63±76.02)
菊科 Compositae	青蒿	一年生草本	—	0—(14.68±10.81)	(5.00±5.00)—(46.12±31.00)
蒺藜科 Zygophyllaceae	蒺藜	一年生草本	—	—	(1.96±1.96)—(2.90±2.00)

表中数据为六次调查中对应物种的幼苗密度的范围

### 3 讨论

辽西矸石山不同侵蚀微地貌下土壤种子库输入规模及空间分布格局有所差异。本研究发现矸石山坡面的土壤种子库总密度在不同微地貌中表现为细沟>裸坡>浅沟,且均以一年生草本植物为主,特别是狗尾草在三种微地貌中均高于其他物种。龙琪等人研究发现沟宽和沟深与细沟侵蚀强度呈极显著的正相关关系<sup>[28]</sup>,故在本研究中侵蚀地貌形态参数相对较小的细沟中,其侵蚀强度较小,随侵蚀冲刷裹挟的种子得以在沟内保持一定的蓄积,经过常年的累积形成一定的规模,而在侵蚀强度相对较大的浅沟中,种子极易被冲刷<sup>[16,29]</sup>;相对裸坡而言,细沟因其具备一定的粗糙度导致其更易拦截种子,增加其规模;同时,种子库输入的测定为春季,经过前一年冬季的风力扩散,很多种子更易被具有粗糙度的细沟拦截并蓄存,而浅沟由于基质岩石多、孔隙大,不利于扩散至此的种子保留。另外,不同微地貌中的土壤种子库输入规模在不同坡位分布迥异。裸坡的土壤种子库密度在上下坡位相差较少,细沟的土壤种子库密度在下坡位大于上坡位,而浅沟则是上坡位大于下坡位,这与前面的解释相吻合,即细沟中侵蚀相对较小,随侵蚀流失的种子有部分蓄积在沟内尤其是下坡位,而浅沟则由于侵蚀强度较大,特别是随着沟道的延伸,径流冲刷力急骤增大,使得下坡位沟内侵蚀强烈,种

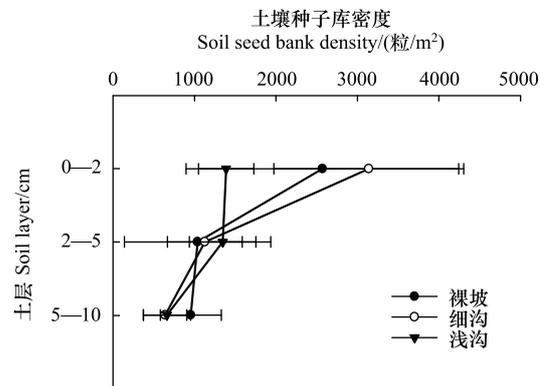


图 3 不同微地貌下不同土层的土壤种子库密度

Fig.3 Soil seed bank density in different soil layers under different micro-topographies

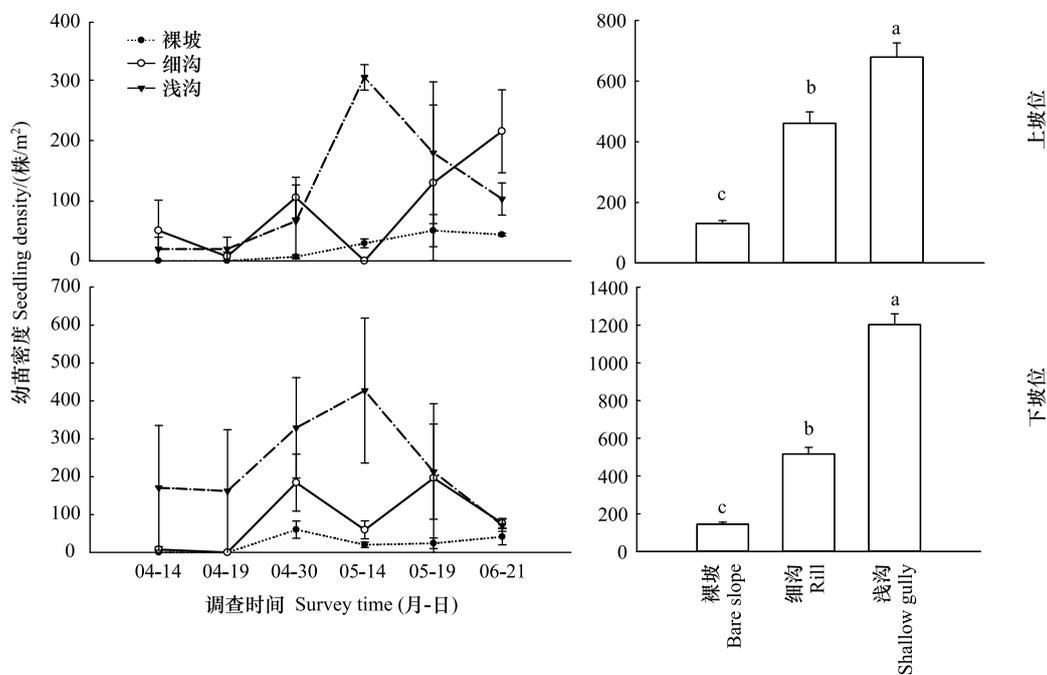


图 4 不同微地貌下不同坡位的幼苗密度

Fig.4 Seedling density of different slope positions in different micro-topographies

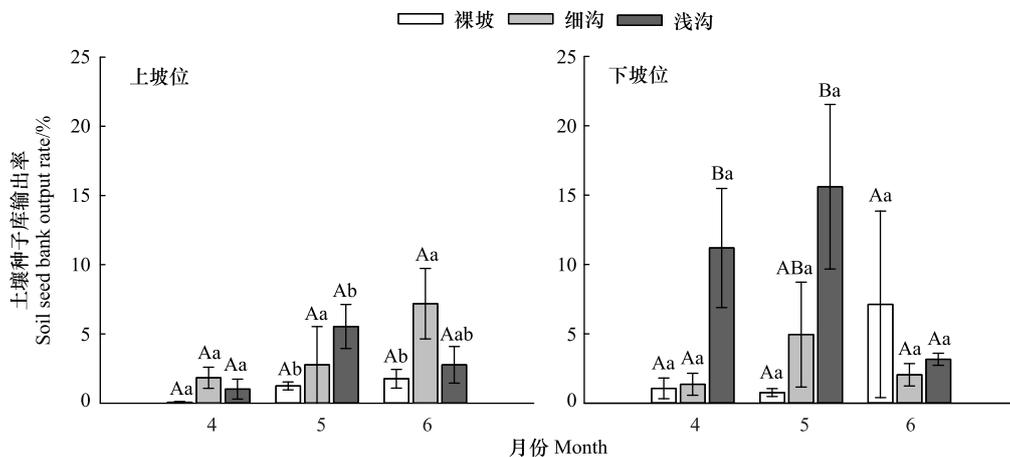


图 5 不同微地貌下不同坡位的土壤种子库输出率

Fig.5 Soil seed bank output rates on different slope positions under different micro-topographies

不同大写字母代表相同月份下不同微地貌内的土壤种子库输出率达到显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母代表相同微地貌内不同月份的土壤种子库输出率达到显著性差异 ( $P < 0.05$ )

子多被冲刷流失,故出现种子库规模低于上坡位的现象<sup>[16]</sup>。此外,三种微地貌的土壤种子库密度在垂直剖面均表现为随土层深度加深而减小,表层土壤种子库密度最大,这是由于种子来源于地上植被或由风力、水力侵蚀传播,使种子易于在土壤表层聚积,与以往的大部分研究结果一致<sup>[30-32]</sup>;然而,对于不同土层,不同微地貌间的土壤种子库输入规模的仍有所差异。表层表现为细沟最大,2—5 cm 土层表现为浅沟最大,而 5—10 cm 土层则为裸坡最大,主要由于裸坡水力冲刷作用较均匀,无法下切到一定深度,而且深层被扰动较少,种子还可常年蓄积,而浅沟内水力侵蚀强,表层的种子多随水蚀而流失,加之研石山多岩石,在强烈的水蚀作用下浅沟内表面起伏不定、异质性大,再次体现不同侵蚀微地貌及其影响的水力作用综合影响下导致土壤种子库输入的差异性,其耦合作用机制有待深入探究。

不同侵蚀微地貌的土壤种子库输出规模各异。本研究幼苗调查结果发现浅沟中萌发出苗数量和物种均较多,且出苗时间也较早,细沟次之,裸坡幼苗较少且萌发时间相对较晚,表明浅沟和细沟等侵蚀形成的微地貌更有利于土壤种子库输出;主要由于浅沟和细沟相对于裸坡能为种子提供更有利的水分、温度和遮荫等生境条件,增加土壤种子库中种子的有效输出<sup>[10,33-34]</sup>,而自燃煤矽石山的浅沟则有所不同,主要与其内部发生自燃、浅沟底部温度高导致水分易蒸散且植物幼苗受干热胁迫难存活有关<sup>[13]</sup>,故在实践生产中,对于浅沟利用种子库恢复因矽石山类型而异。另外,不同侵蚀微地貌的土壤种子库输出在不同坡位表现出不一致。本研究发现浅沟在下坡位明显高于上坡位,与其较强的侵蚀将上坡位土壤种子库的种子甚至幼苗冲蚀至下坡位安全生境,进而萌发出苗甚至建植,表现出较高的输出;同时,坡面上水分更易在下坡位蓄积<sup>[35-36]</sup>,更有利于种子萌发出苗;而细沟与裸坡的土壤种子库输出在不同坡位间变化不大。此外,不同侵蚀微地貌的土壤种子库在生长季的输出动态各异。本研究发现浅沟的土壤种子库输出随着生长季的推进表现为较为稳定的先上升后下降的趋势,而裸坡和细沟中的土壤种子库输出变化幅度较小,这可能由于在不能提供较好生境的情况下,幼苗萌发更易受影响而波动<sup>[37-39]</sup>,而且浅沟在雨季受水力作用影响较复杂,其对土壤种子库的动态扰动有待深入探究。

微地貌作为土壤种子库萌发的环境载体,不同微地貌的土壤种子库萌发出苗能力各异<sup>[40-41]</sup>,决定其更新潜力。本研究发现,三种微地貌内的土壤种子库输出率大致表现为浅沟>细沟>裸坡,一方面浅沟因其侵蚀较强,将上坡位种子或幼苗冲蚀汇至下坡位,同时因其蓄积水分和遮荫好的特性有利于种子的萌发出苗,而细沟虽易蓄积、储存种子,但输出率次于浅沟,主要在于研究区矽石山强辐射、高温、干旱等胁迫复合影响下,其遮荫效果较浅沟差,但是优于裸坡;故浅沟在矽石山更有利于土壤种子库输出,具有更强的促进植物更新潜力,在植被恢复实践中可通过塑造类似微地貌促进植物更新与恢复。另外,不同微地貌土壤种子库的输出率具有时空一致性。本研究发现五月和六月的土壤种子库输出率稍大于四月,主要由于四月温度偏低,仅有萌发耐低温的猪毛菜种子萌发出苗,随着气温的升高与降雨的增加,大部分种子更易萌发<sup>[42-43]</sup>,不同物种土壤种子库的输出时间在人工播种引导植被恢复实践时可作为播种设计依据,不同温度与水分条件的场景可以规划不同植物种的播种及管理措施。另外,本研究发现土壤种子库输出率在下坡位普遍高于上坡位,主要由于下坡位水分条件较好,特别是浅沟在四五月时输出率在下坡位显著高于上坡位,与其初春土壤解冻具备较好的墒情,其独特的微地貌在这个季节有利于维持较好的水热条件,故萌发出苗较多,同时由于本研究土壤种子库输入未考虑其动态变化,浅沟下坡位的土壤种子库输入规模相对较小,导致输出率较高,土壤种子库的动态储量及其输出率有待进一步探究。

#### 4 结论

(1) 辽西风化矽石山坡面不同微地貌的土壤种子库输入规模表现为细沟>裸坡>浅沟,且均以一年生草本植物为主;不同微地貌的土壤种子库输入存在坡位差异,浅沟表现为上坡位高于下坡位;在不同垂直土层,不同微地貌的土壤种子库输入变化不一致。

(2) 不同侵蚀微地貌的土壤种子库输出特征迥异,浅沟的土壤种子库输出规模与物种及均最大,且在下坡位高于上坡位。

(3) 三种微地貌的土壤种子库的输出率具有时空一致性,均在六月最大,且在下坡位高于上坡位,其中浅沟的土壤种子库输出率最大。

(4) 细沟利于土壤种子库的输入,浅沟则利于输出,在植被恢复实践中,可借鉴不同微生境的优势在矿区废弃地坡面构建微地貌实现人工引导植被有效恢复。

#### 参考文献(References):

- [1] 汤姚楠,周伟奇. 废弃矿区生态修复的资源再利用价值评估——以徐州为例. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3430-3441.
- [2] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2499-2515.

- [ 3 ] 张进德, 郝富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究. 生态学报, 2020, 40(21): 7921-7930.
- [ 4 ] 魏远, 顾红波, 薛亮, 江泽平, 周金星, 郑施雯, 崔明, 杨建立. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 107-114.
- [ 5 ] 刘钊, 韩磊, 王丹月, 刘志宏. 陕北黄土高原煤矿区土壤理化性质及质量评价. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1555-1564.
- [ 6 ] 杜华栋, 曹祎晨, 聂文杰, 宋世杰. 黄土沟壑区采煤塌陷地人工与自然植被恢复下土壤性质演变特征. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1641-1649.
- [ 7 ] 甄莉娜, 李侠, 李朕, 刘丽珍, 卫振华, 郭彤彤, 王润梅. 煤矸石山不同植被根际可培养微生物数量的动态变化. 草地学报, 2021, 29(6): 1224-1233.
- [ 8 ] 于露, 周玉蓉, 赵亚楠, 郭天斗, 孙忠超, 王红梅. 荒漠草原土壤种子库对灌丛引入和降水梯度的响应特征. 草业学报, 2020, 29(4): 41-50.
- [ 9 ] 赵总, 刘勇, 田祖为, 贾宏炎, 赵蕊蕊, 安宁. 红锥种子雨土壤种子库与幼苗更新动态. 林业科学, 2020, 56(5): 37-49.
- [ 10 ] 苏娜, 焦菊英, 王巧利, 杜华栋, 王志杰, 寇萌. 黄土丘陵沟壑区不同侵蚀环境下幼苗库及其与地上植被的关系. 草业学报, 2013, 22(5): 154-164.
- [ 11 ] Adman B, Wahyu Nugroho A, Yassir I. The growth of local tree species on post-coal mining areas in east Kalimantan. Indonesian Journal of Forestry Research, 2020, 7(2): 83-97.
- [ 12 ] Luo J, Zheng Z C, Li T X, He S Q, Zhang X Z, Huang H G, Wang Y D. Quantifying the contributions of soil surface microtopography and sediment concentration to rill erosion. Science of the Total Environment, 2021, 752: 141886.
- [ 13 ] 王东丽, 李佳, 张子倩, 刘阳, 徐源, 郭莹莹, 吕刚. 风化矸石山不同侵蚀微环境的水热特征. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2583-2592.
- [ 14 ] 司梦可, 曹建生, 阳辉. 微地形变化对地表水文过程影响的研究进展. 中国生态农业学报, 2019, 27(10): 1587-1595.
- [ 15 ] Liu Y L, Du J Q, Xu X L, Kardol P, Hu D. Microtopography-induced ecohydrological effects alter plant community structure. Geoderma, 2020, 362: 114119.
- [ 16 ] 王东丽, 焦菊英, 王宁, 杜华栋, 寇萌, 于卫洁, 胡澍. 黄土丘陵沟壑区不同侵蚀微环境对植物更新的影响. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1141-1148.
- [ 17 ] 王瑞燕, 孔沈彬, 许璐, 李玉环, 程韦翰, 赵恩来. 黄河三角洲不同地表覆被类型和微地貌的土壤盐分空间分布. 农业工程学报, 2020, 36(19): 132-141.
- [ 18 ] 张宏芝, 朱清科, 赵磊磊, 邝高明, 谢静, 李镇. 陕北黄土坡面微地形土壤化学性质. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 20-25.
- [ 19 ] Wang D L, Qiao J T, Zhang Y, Wu T, Li J, Wang D, Zhao X L, Shen H O, Zou J L. Effects of erosion micro-topographies on plant colonization on weathered gangue dumps in Northeast China. Sustainability, 2022, 14(14): 8468.
- [ 20 ] 杨鑫光, 李希来, 金立群, 孙华方. 不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究. 草业学报, 2019, 28(3): 1-11.
- [ 21 ] 关炳昌, 刘家豪, 朱宇恩, 李华. 矿区恢复植被配置模式对土壤碳库与生物多样性的影响. 山西大学学报: 自然科学版, 2020, 43(1): 196-205.
- [ 22 ] 张兆彤, 王金满, 张佳瑞. 矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展. 土壤, 2018, 50(2): 239-247.
- [ 23 ] 王东丽, 张野, 钱晓彤, 王东, 赵晓亮. 黄土区露天煤矿排土场不同微地貌土壤种子库特征. 生态学报, 2022, 42(20): 8425-8434.
- [ 24 ] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 冯良山, 杨宁, 蔡倩, 冯晨, 张哲. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3702-3713.
- [ 25 ] 许丽, 樊金栓, 周心澄, 孙广树, 尹忠东. 阜新市海州露天煤矿排土场植被自然恢复过程中物种多样性研究. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6): 152-157.
- [ 26 ] 邱岳, 耿谦. 辽宁新邱废弃矿山环境治理中浮煤残煤回收研究. 矿产勘查, 2019, 10(11): 2792-2798.
- [ 27 ] Anderson R L, Rowntree K M, Le Roux J J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. CATENA, 2021, 206: 105482.
- [ 28 ] 龙琪, 韩剑桥, 何育聪, 王飞, 焦峰. 黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征. 水土保持学报, 2022, 36(1): 1-7.
- [ 29 ] 张小彦, 焦菊英, 王宁, 贾燕锋. 黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀对 3 种蒿属种子有效性的影响. 水土保持研究, 2010, 17(1): 56-61.
- [ 30 ] 冯昶栋, 郭小平, 罗超, 叶金鹏, 张昕, 马原. 干旱矿区不同干扰强度下土壤种子库特征. 草业科学, 2021, 38(3): 443-452.
- [ 31 ] 孙瑜硕, 常选选, 张雪, 王磊, 曲文杰, 秦伟春, 张波, 牛金帅. 腾格里沙漠东南缘不同植被类型土壤种子库多样性. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2356-2362.
- [ 32 ] 沈章军, 欧祖兰, 田胜尼, 汤伟. 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征比较. 生态学报, 2013, 33(7): 2121-2130.
- [ 33 ] 王宁. 坡沟侵蚀环境对繁殖体库及幼苗建群的影响——以黄土高原安塞纸坊沟为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [ 34 ] Zhang Q W, Wang H, Wang J. Biocrusts and subshrub development and soil water through a slope-gully system in a vegetation-restored site on the Loess Plateau of China. CATENA, 2022, 216: 106344.
- [ 35 ] 刘文国, 王林权, 张兴昌, 邵明安, 李林海. 坡面水分和养分渗透模拟研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(z1): 68-72.
- [ 36 ] 程凉, 焦雄, 邸涵悦, 熊翔宇, 郭忠录. 不同整地措施坡面土壤水分时空分布特征. 土壤学报, 2021, 58(6): 1423-1435.
- [ 37 ] Hong M G, Nam B E, Kim J G. Effects of microtopography and nutrients on biomass production and plant species diversity in experimental wetland communities. Ecological Engineering, 2021, 159: 106125.
- [ 38 ] 何建军, 姚立蓉, 汪军成, 边秀秀, 司二静, 杨轲, 王化俊, 马小乐, 李葆春, 尚勋武, 孟亚雄. 干旱和盐胁迫对盐生植物盐生草种子萌发特性的影响. 草业学报, 2020, 29(11): 129-140.
- [ 39 ] 岳永寰, 靳瑰丽, 宫珂, 董乙强, 韩万强, 刘文昊, 吴雪儿. 人工模拟降水格局变化对醉马草种子萌发和幼苗生长的影响. 生态学杂志, 2020, 39(3): 838-846.
- [ 40 ] Hartl C, Dühorn E, Tejedor E, Kirchhefer A J, Timonen M, Holzkämper S, Büntgen U, Esper J. Micro-site conditions affect Fennoscandian forest growth. Dendrochronologia, 2021, 65: 125787.
- [ 41 ] Niu Y J, Yang S W, Zhu H M, Zhou J W, Chu B, Ma S J, Hua R, Wang T, Hua L M. Plant community distribution induced by microtopography due to soil cracks developed in overgrazed alpine meadows on the Tibetan Plateau. Land Degradation & Development, 2021, 32(11): 3167-3179.
- [ 42 ] 姜黎, 赵振勇, 张科, 田长彦. 温度与盐分对囊果碱蓬种子萌发特性的影响. 中国草地学报, 2021, 43(10): 115-120.
- [ 43 ] 白梦杰, 陶奇波, 韩云华, 王彦荣. 十种荒漠植物种子萌发对温度的响应. 草业学报, 2019, 28(12): 53-62.