

人工措施对阿尔泰山采金矿区地表的恢复作用

赵新风¹ 徐海量^{1*} 王希义^{1,2} 徐 俏^{1,3} 苑塏焯¹ 杨永强¹ 张 鹏¹

(¹中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ²新疆农业大学林学院, 乌鲁木齐 830052; ³新疆师范大学地理与旅游学院, 乌鲁木齐 830041)

摘 要 为了促进采金矿区的植被恢复,以阿尔泰山两河源(额尔齐斯河与乌伦古河)保护区采金矿区为靶区,利用多种措施对其进行生态恢复试验,分析了不同措施对矿区土壤及植被的影响。结果显示:(1)采金扰动地形,采金废弃地百米地形落差由原来的2~3 m变为破坏后的接近5 m;土壤母质流失严重,废弃矿区土石比例较原始草地下降了98.0%、生物量下降了96.8%,土壤因子、植被因子成为矿区生态恢复的关键因子。(2)覆土措施使矿区植物物种数增加;漫灌、圈羊措施下的植被多样性指数明显高于滴灌、喷泥浆处理,漫灌措施下的土石比分别是滴灌、喷泥浆的19.1和5.8倍。(3)覆土+漫灌措施、覆土+圈羊措施下,植被生物量显著高于其他复合措施($P<0.01$),土石比也相对较高。综合考虑漫灌措施的恢复效果与该措施的成本花费后认为,漫灌对矿区生态恢复具有重大意义。

关键词 人工措施; 采金矿区; 多样性; 生物量; 土石比

Effects of artificial measures on surface recovery of gold mining area in Altai Mountain.

ZHAO Xin-feng¹, XU Hai-liang^{1*}, WANG Xi-yi^{1,2}, XU Qiao^{1,3}, YUAN Kai-ye¹, YANG Yong-qiang¹, ZHANG Peng¹ (¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; ²Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; ³Xinjiang Normal University, Urumqi 830041, China).

Abstract: To promote the vegetation recovery in gold mining area, different measures were applied in the abandoned field of the gold mining area in Altai Mountain, which is a conservation region for the source of Irtysh River and Ulungur River. We evaluated the effects of these measures on the restoration of soil and vegetation. The results showed that: (1) Gold mining altered topography. The altitude difference of the gold mining area increased from 2–3 m per 100-m long to approximately 5 m after the destruction of gold mining. The parent material of soils was seriously damaged. Compared with the natural grassland, the soil/gravel ratio decreased by 98.5% and plant aboveground biomass decreased by 96.8% in the abandoned filed. Soil and vegetation factors were the key factors for ecological restoration. (2) Under covering soil treatment, the number of plant species was increased. The vegetation diversity index under the treatment of basin irrigation and corralling flock was significantly higher than that under drip irrigation and mud spraying treatment. The soil/gravel ratios under basin irrigation measure were 19.1 and 5.8 times as high as that of drip irrigation and mud spraying. (3) Under the measures of covering soil + basin irrigation and covering soil + corralling flock, plant biomass was significantly higher than that of other combined measures ($P<0.01$) and the soil/gravel ratio was relatively high. Considering the recovery effect and the cost of the basin irrigation measure, we concluded that the basin irrigation is of great significance to the ecological restoration of the gold mining area.

Key words: artificial restoration measure; gold mining area; diversity; aboveground biomass; soil/gravel ratio.

新疆维吾尔自治区科技支撑项目(201533110)、国家自然科学基金项目(41471099)和中国科学院特色研究所主要服务项目(TSS-2015-014-FW-2-2)资助。

收稿日期: 2017-10-13 接受日期: 2018-04-11

* 通讯作者 E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

阿勒泰地区蕴藏着丰富的自然资源和旅游资源,素有“金山银水”之称。据新疆阿尔泰山两河源综合科学考察报告,近几十年当地矿产资源遭到掠夺性开采,使阿勒泰山两河源矿区千疮百孔(2004),2010年左右仅两河源库尔木图废弃矿区总面积高达333多hm²。

阿尔泰山两河源保护区于2010年开始,从地形、土壤、水、生物4方面对库尔木图采金废弃矿区全面开展恢复试验。地形恢复上用推平措施;土壤恢复采用覆土与撒羊粪,其中撒羊粪不仅可提高土壤有机质,也可补充种源;水分补给采用滴灌、漫灌、喷泥浆措施;生物方面采取补植黑加仑(*Ribes nigrum*)以及播撒当地植被种子,还包括羊群驻扎(可简称圈羊)、河水漫溢等其他方式。

阿尔泰山两河源自然保护区矿山开采活动严重毁损了矿区的植被、地貌,遗留下大量高陡岩质边坡、缓坡及碎石平台,从而也导致实验布置不能像以往研究达到精确布置,难点包括:(a)羊群驻扎时间不受控制;(b)覆土、撒羊粪的厚度达不到理论精确值;(c)地形坡度大,灌溉、补种、圈羊等处理产生的误差也将增大,对于此类问题难以避免,本研究通过加大样方数量以减少误差。通过分析不同人工措施下的植物多样性、土石比、生物量等指标,拟解决以下科学问题:人工恢复措施是否能促进采金废弃矿区的生态恢复?以及恢复效益如何?研究结果既是对之前恢复效果的鉴定,也为推进废弃矿区生态恢复工作提供理论参考。

关于矿区废弃地采取措施后如何维持植被覆盖度,如何建立一个能够自我调节的生态系统是许多生态学家重点关心的问题,而矿区的生态恢复是一个漫长的阶段,刘云等(2006)基于以前矿山恢复成功案例(袁剑刚等,2005;李君剑等,2015),将矿山恢复分为以下5个阶段并确定了每个阶段的恢复流程及恢复目标(表1),由于本研究仅开展了6年,结合近几年对当地的实地考察,确定目前两河源保护

区的生态恢复处于第3、4阶段,第3阶段主要是土壤恢复,恢复目标是为植被恢复做基础,第4阶段是植被恢复,其恢复目标是防止水土流失。随着矿区恢复研究的进行,植被恢复成为矿山修复建设的重要内容(袁剑刚等,2005;刘云等,2006;李君剑等,2015),而植被多样性、生物量等是植被恢复的重要因子。很多区域植被的研究中,恢复区植被与原始植被相似性往往被重视(徐海量等,2008;齐丹卉等,2013),认为相似性指数越高说明恢复区植被即将达到原始植被水平。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

两河源保护区地理坐标为46°31′31.63″N—48°33′27.85″N,88°57′56.61″E—91°04′05.90″E(图1),分布有81科385属967种高等维管束植物。海拔2400~2600m,年均温在-2℃左右,降水量300~350mm,年蒸发量为838.3~1469.6mm。

试验区草地植被样方共出现36种植物(表2),分属17科、36属;其中一年生草本8种,多年生草本25种,灌木3种。研究区环境特殊性造成多年生草本植物物种数目占总物种数目的比例相对较高,多年生草本占69.44%、一年生草本占22.22%,灌木占8.33%。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择在研究选择地势平坦的区域布置5个500m×500m的大样地。每个样地间距1~3km。首先通过大型机械对样地进行机械推平,再给样地周边添加围栏,以免动物的践踏和啃食。

1.2.2 实验设计与植被土壤调查上面的5个大样地内都设有不同的人工恢复措施。共布置55个样地,样地大小为10m×10m。于2012年5月15日进行覆土、撒羊粪;于2012年6月15日进行滴灌、漫灌、喷泥浆;2012年7月15日在需要进行羊群驻扎的样地进行圈羊,做好临时羊圈的围栏防护,以免对样地造成干扰。人工措施的具体实施见表3,对照是没有采取任何措施的废弃地,原始草地是矿区附近未经人为破坏过的草地。

于2012—2017年每年7月底,每个样地内以梅花点设样方法进行1m×1m的样方植被调查。植被调查指标有:样方内植物种类、每种植物个体数、植被盖度、每种植物高度、冠幅;地上生物量对于研究草食动物的环境容纳量、草地植被恢复是必不可

表1 矿山恢复的各个阶段
Table 1 Mine restoration at the stages

时期	阶段	流程	主要目标	所需时间	治理类型
前期	1	污染治理	治理污染		依具体情况而定
	2	地貌恢复	防治地质灾害	数周~数月	人工
	3	土壤恢复	为植被恢复做基础	数日~数周	人工
	4	植被恢复	防止水土流失	数月~数年	自然,以草灌为主
后期	5	生态恢复	建立稳定的生态系统	数十年~上百年	自然

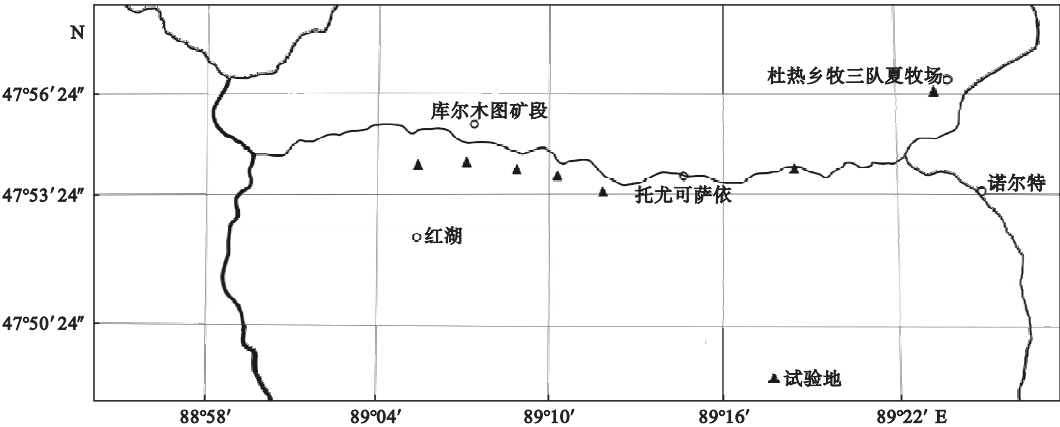


图 1 研究区分布示意图
Fig.1 Location of the study area

表 2 草地植被样方出现的植物种

Table 2 Occurring species in the sampling grassland

序号	植物名	拉丁名	科	属	生长特性
1	瑞士羊茅	<i>Festuca valesiaca</i>	禾本科	羊茅属	多年生草本
2	发草	<i>Deschampsia caespitosa</i>		发草属	多年生草本
3	无芒雀麦	<i>Bromus inermis</i>		雀麦属	多年生草本
4	早熟禾	<i>Poa annua</i>		早熟禾属	一年生草本
5	大看麦娘	<i>Alopecurus pratensis</i>		看麦娘属	多年生草本
6	异燕麦	<i>Helictorichon schellianum</i>		异燕麦属	多年生草本
7	薄公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科	薄公英属	多年生草本
8	苦苣菜	<i>Sonchus oleraceus</i>		苦苣菜属	一年生草本
9	无心草	<i>Gnaphalium affine</i>		鼠曲草属	二年生草本
10	小蓬草	<i>Conyza canadensis</i>		白酒草属	一年生草本
11	喀什蒿	<i>Artemisiakas chgaria</i>		蒿属	半灌木
12	高山紫菀	<i>Aster alpinus</i>		紫菀属	多年生草本
13	蒙新风毛菊	<i>Saussurea grubovii</i>		风毛菊属	多年生草本
14	野火球	<i>Trifolium lupinaster</i>		车轴草属	多年生草本
15	野豌豆	<i>Vicia sepium</i>		野豌豆属	多年生草本
16	黄花苜蓿	<i>Medicago falcate</i>		苜蓿属	多年生草本
17	野波菜	<i>Rumex acetosa</i>	蓼科	酸模属	多年生草本
18	高山蓼	<i>Polygonum alpinum</i>		扁蓄属	多年生草本
19	两栖蓼	<i>Polygonum amphibium</i>		蓼属	多年生草本
20	二裂委陵菜	<i>Potentilla bifurca</i>	蔷薇科	委陵菜属	多年生草本
21	金丝桃叶绣线菊	<i>Spiraea hypericifolia</i>		绣线菊属	灌木
22	西伯利亚羽衣草	<i>Alchemilla sibirica</i>		羽衣草属	多年生草本
23	芥菜	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	十字花科	芥菜属	一年生草本
24	芹叶芥	<i>Smelowskia calycina</i>		芹叶芥属	多年生草本
25	山地糙苏	<i>Phlomis oreophila</i>	唇形科	糙苏属	多年生草本
26	短柄芝麻	<i>Lamium album</i>		野芝麻属	多年生草本
27	大车前	<i>Plantago major</i>	车前科	车前属	多年生草本
28	多伞阿魏	<i>Ferula ferulaeoides</i>	伞形科	阿魏属	多年生草本
29	野罂粟	<i>Papaver nudicaule</i>	罂粟科	罂粟属	一年生草本
30	齿叶沙参	<i>Adenophora stricta</i>	桔梗科	沙参属	多年生草本
31	灰灰菜	<i>Chenopodium album</i>	藜科	藜属	一年生草本
32	单叶毛茛	<i>Ranunculus monophyllus</i>	毛茛科	毛茛属	多年生草本
33	丝状点地梅	<i>Androsace filiformis</i>	报春花科	点地梅属	一年生草本
34	森林勿忘草	<i>Myosotis sylvatica</i>	紫草科	勿忘草属	多年生草本
35	节节草	<i>Equisetum ramosissimum</i>	木贼科	木贼属	多年生草本
36	高山柳	<i>Salix cupularis</i>	杨柳科	柳属	小灌木

表3 人工恢复措施及具体实施方法
Table 3 Artificial recovery measures and specific implementation

人工恢复措施	具体实施方法
机械推平	利用推土机将起伏不大的区域推平,深沟或高坡区域利用装卸设备进行平整。包括精推平和简单推平2种方式
漫灌	即洪水漫溢,洪水漫溢到周边时,人工将含有泥沙土块的洪水引至试验区进行灌溉
滴灌	采用拉滴灌带的方式对地表进行灌溉。16 mm的滴灌带,滴头工作压力5 m,滴头流量1.8 L·h ⁻¹
喷泥浆	因滴灌费用高,漫灌对有些地势陡峭的矿区作用不大,所以采用土壤、水混合后喷洒到平整矿区地表的方式
覆土	从试验区周边获取土壤,均匀覆盖在废弃矿区地表1~2 cm
圈羊	即羊群驻扎,每年7—8月引导牧民将羊圈驻扎在平整后的试验区

少的定量指标(任继周,1998),生物量测定是将1 m×1 m样方内的植被全部剪掉、称鲜重。

土壤调查指标是土石比,即体积为50 cm×50 cm×50 cm中的土壤质量与石头质量之比(用孔径2 mm的土样筛)。

1.3 数据处理

(1)相似性系数

在生产实践中,经常需要对全部实体或全部属性,比较任何两部分之间的相似程度。衡量其间相似性程度的数量指标就是相似性系数(coefficient of similarity 或 coefficient of resemblance)。其计算公式(Ungar *et al.*, 1996; Guo *et al.*, 1999)如下:

$$S_s = 2X / (a + b)$$

式中:*a* 原始草地物种数;*b* 为人工恢复后物种数;*X* 为原始草地与人工恢复后植被共有的物种数。

(2)多样性指数计算

群落多样性的测度选用优势度指数(Simpson)、物种多样性指数(Shannon)、Pielou 均匀度指数。

Simpson 优势度指数 $D_1 = 1 - \sum P_i^2$ (孙儒泳等,1993)

式中, P_i 是物种相对重要性(由频率计算出)。物种相对重要性的计算公式为:

$$P_i = W_i / W$$

式中, W_i 是物种*i*的个体数,*W*是样方内所有物种的个体数。

Shannon 指数 $H = - \sum P_i \ln P_i$ (孙儒泳等,1993)

式中, P_i 为属于种*i*的个体在全部个体中的比例。

Pielou 均匀度指数

$$J = H / \ln S \text{ (Whittaker, 1972)}$$

式中:*H* 是 Shannon 指数,*S* 是样方内的物种数。

(3)统计分析:采用统计软件(SPSS 21.0)对相关指标进行单、双因素方差分析;采用 Excel 2013 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生态恢复目标与生态恢复关键因子确定

采金矿占用了大量土地资源,扰动地表,改变了地形起伏,表现为大型机械化采金过程,底部生土上翻,造成土壤剖面构造解体。在库尔木图段随机调查的20个采矿点,90%的金矿废弃地地形起伏加大,在100 m范围内,从山坡到山顶的斜面距离100 m,而垂直距离20~30 m,当山体被采矿行为破坏后,整个山体几乎被颠覆了一遍,通过测量20座这样的山体后,发现垂直弃石堆高达4~5 m,因此,百米距离垂直落差由不到1 m增大到近5 m(图2)。

采金后,通过人力或机械目的性地挖掘地表,造成两河源保护区库尔木图段植被毁灭性地破坏,表层土壤剥离、深层土壤流失。原始草地土石比2.45,废弃矿区土石比较原始草地减少了98%,仅有0.05左右;表明采矿后破坏了土壤结构,土壤母质流失。

采金后,两河源保护区库尔木图段植被物种大量流失,经多年调查,仅库尔木图段森林草地植被物种就有上百种,甚至几百种。草地被破坏后几乎没有植被,废弃矿区 Simpson 指数与原始草地相比形成显著差异($P<0.01$) (图3a,图3b),废弃矿区植物多样性较原始草地减少了86.67%,说明了采矿后草地植物种类受到严重影响,植物种类大幅度减少。

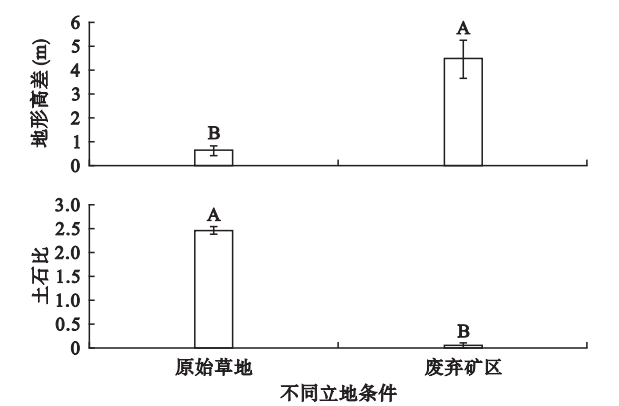


图2 原始草地与废弃矿区地形高差与土石比比较
Fig.2 Comparison of the terrain drop and ratio of soil and gravel under artificial measures and the natural grassland

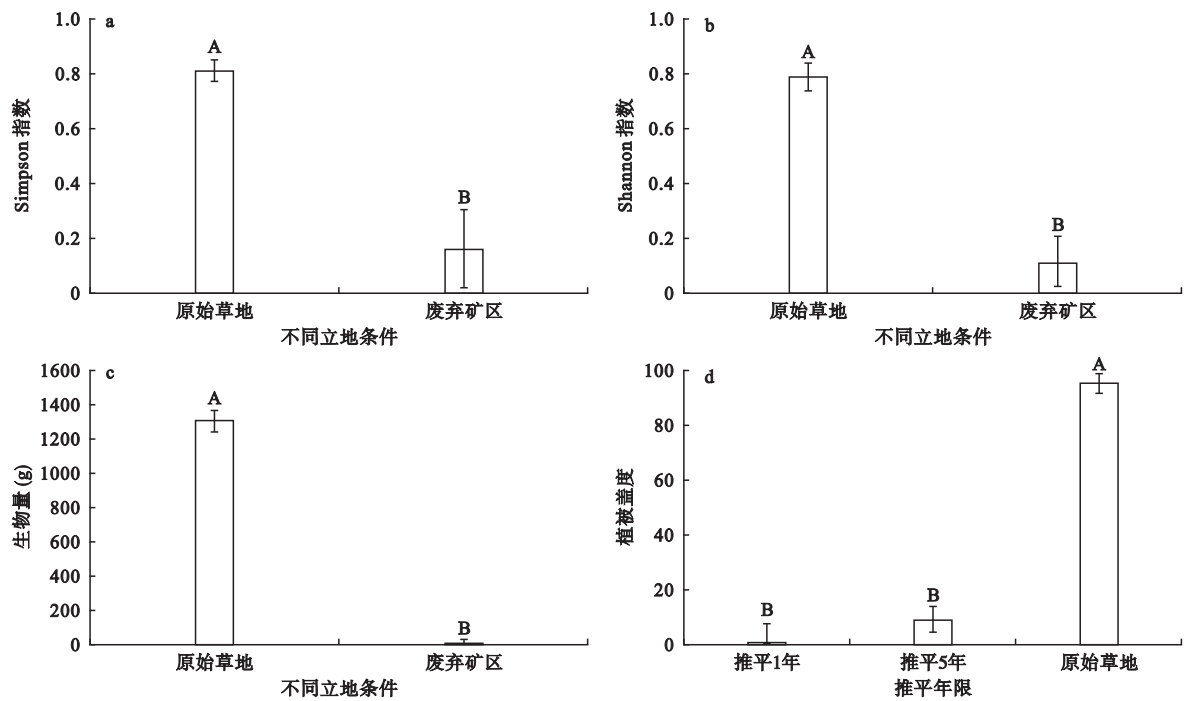


图 3 原始草地与废弃矿区 Simpson 指数(a)、Shannon 指数(b)、生物量(c)、植被盖度(d)的比较
Fig.3 Comparison of Simpson index (a), Shannon index (b), aboveground biomass (c) and vegetation coverage (d) in mining area and the natural grassland

原始草地生物量鲜重约 $1307\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,被破坏矿区生物量($2\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)比原始草地减少了 99.8%(图 3c)。废弃矿区在推平后 4~5 年,植被覆盖度还不到 8%,与原始草地相比,植被盖度差距依然很大(图 3d)。

由于废弃矿区(对照)与原始草地植被相似性系数几乎为零,我们计算了人工措施下的恢复区与原始草地植被物种相似性系数(图 4)。圈羊+喷泥浆后的植被与原始草地物种相似性程度最高(相似性指数为 0.46),但是其他 7 种措施下的物种相似性

系数也在 0.36~0.41,相似性系数差异不显著,因此不建议相似性系数作为本文生态恢复的关键因子。

综合以上可以看出,增加土壤含量、提高土石比是废弃矿区土壤修复的关键因子,而植被恢复中对物种多样性、植被生物量的恢复则是关键。

2.2 人工措施对植被入土壤的恢复作用

2.2.1 覆土对植物物种的恢复作用 覆土措施为植被的生长提供了土壤母质,覆土措施使研究区物种数显著增加,废矿区覆土后,无论一年生草本还是多年生草本或灌木物种数明显增加。但覆土也引起了群落结构改变,原始草地植被中多年生、一年生草本植物分别占 60%、40%,覆土后一年生草本比例显著下降(仅占 14%~16%),灌木种出现(灌木物种数为 $0.33\sim1.83\text{ 种} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.2.2 滴灌、漫灌、喷泥浆、圈羊对植被及土壤的恢复作用 由图 5 可以看出,圈羊措施下的多样性指数值最高,其次为漫灌条件,这 2 种处理下的多样性指数均高于滴灌与喷泥浆措施,且显著高于滴灌处理($P<0.01$);从对生物量的恢复效果看,喷泥浆处理下生物量高于其他处理,但差异不显著;针对土石比而言,漫灌条件下的土石比值最高并显著高于其他处理,其次为喷泥浆处理,漫灌下的土石比分别较滴灌、喷泥浆高出 22.1 和 5.8 倍。

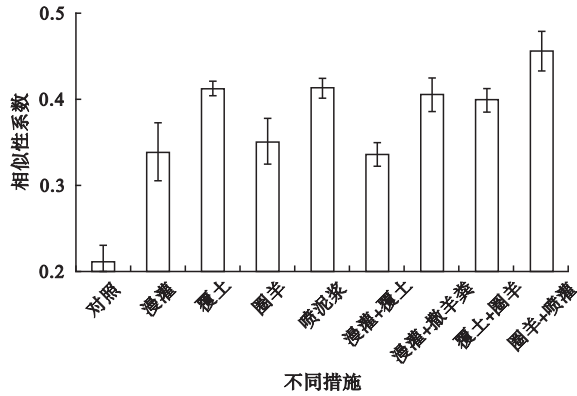


图 4 不同人工措施下植被与原始草地物种相似性系数
Fig.4 Similarity coefficient between different measures and natural grassland

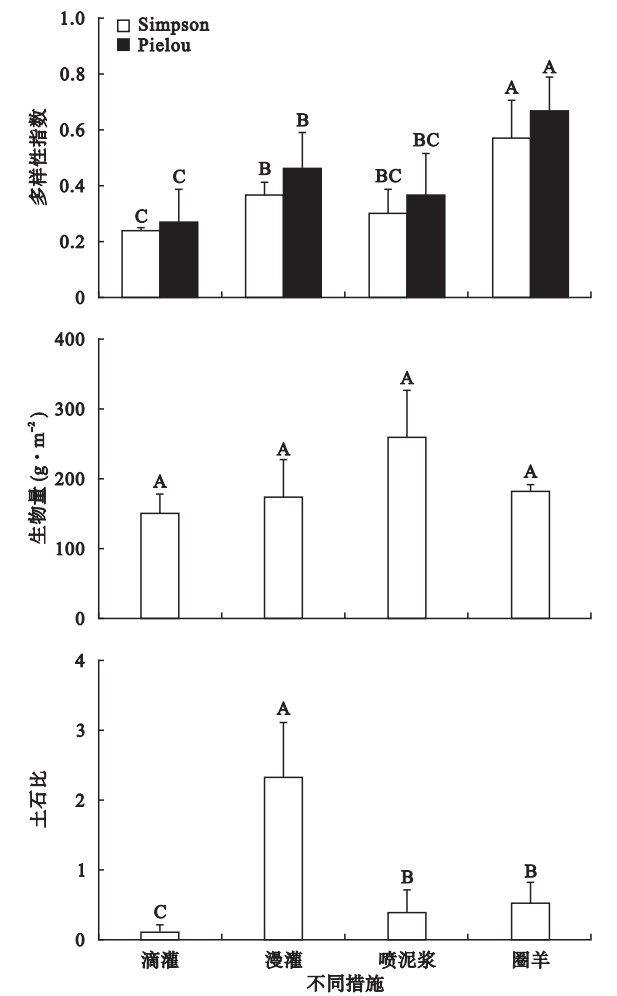


图 5 不同措施下的多样性指数、生物量与土石比情况
Fig.5 Comparison of diversity index, aboveground biomass and ratio of soil and gravel under different measures

2.2.3 各措施相结合对植被与土壤的恢复作用
由于以上各单措施恢复作用中覆土、漫灌、喷泥浆对土壤恢复效果好,圈羊、漫灌、喷泥浆对植物多样性与生物量恢复效果好,图 6 是对这几种措施相结合下的恢复效果作了比较:各组合措施对植物多样性指数的影响差异不显著;漫灌+覆土、覆土+圈羊措施下这 2 种措施对样地生物量的恢复效果较好,并与其他措施相比达到了显著差异($P<0.01$);同时,这两种措施下的土石比也相对较高,与圈养+喷泥浆处理形成了显著差异($P<0.01$)。

3 讨论

通过多年的自然恢复,植被恢复缓慢。两河源保护区森林草地植被有上百种,对矿区进行地表平整后,通过 4~5 年的自然恢复,物种数也只有 2~

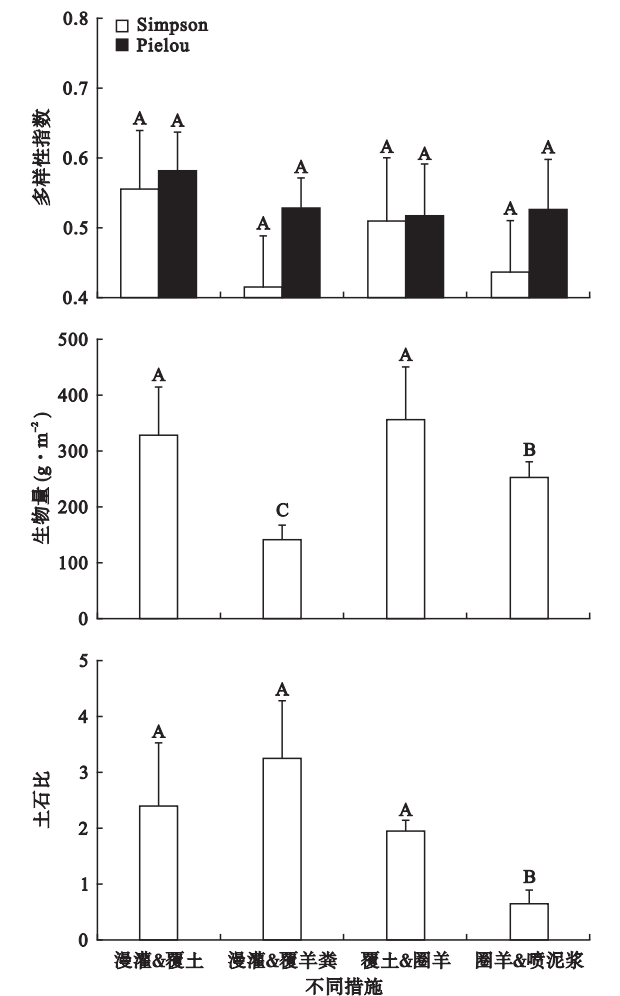


图 6 各组合措施下植被多样性、地上生物量与土石比情况
Fig.6 Comparison of plant diversity index, aboveground biomass and ratio of soil and gravel under the combination measures

3 种·m⁻²、植被覆盖度≤8%,与原始草地相比,植被盖度差距依然很大,这主要是由于采金后地表土壤剥离、地下土壤被掏空,造成植物无处可生存。据文献报道,矿山废弃地自然恢复过程往往要花费几十年到一个世纪以上 (Milgrom, 2008),因此只靠自然恢复不可取,应辅以人工措施加快其恢复;而本文通过对各种人工措施后的植被生长及土壤状况进行分析后,发现覆土是矿区恢复的关键。

覆土、覆羊粪、漫灌+覆土形成物种数增加的原因:本文中覆土措施为植被的生长提供了土壤母质。经过覆土、圈羊后、漫灌后,均有灌木出现,主要是金丝桃叶绣线菊 (*Spiraea hypericifolia*)、高山柳 (*Salix cupularis*)、喀什蒿 (*Artemisia kaschgaria*)。以上植物种的出现主要是由于覆土过程中带来了土壤种子,比如金丝桃叶绣线菊、高山柳、喀什蒿均是当地常见

植物种;漫灌过程中从河流上游处带来种子,比如生于高海拔的高山柳;圈羊过程中羊的粪便带来的种子,金丝桃叶绣线菊、高山柳、喀什蒿均是牲畜非常喜欢的类型。覆土措施带来土壤种子库这一事实还体现在本文中覆土后一年生草本比例显著下降(仅占14%~16%),灌木种出现(灌木物种数为0.33~1.83种·m⁻²),因为一年生草本种子寿命较低,大多在第一年就萌发了,而灌木种子寿命往往较强(赵新风等,2009)。

群落结构改变可能主要是覆土、羊群驻扎以及漫灌过程中带来的土壤种子所引起,圈羊这一措施增加了土壤的有效资源,改变了植物地上和地下的竞争强度,也会引起植物群落多样性格局的变化(Goldberg *et al.*, 1990)。有些研究得出土壤养分的增加会引起植物多样性的增加,施氮后物种丰富度比对照提高42.9%(郑华平等,2007),而有些研究结果显示施肥会显著降低物种丰富度或认为土壤养分的增加并未引起草地群落植物多样性的明显变化(Theodosev *et al.*, 1997; Huberty *et al.*, 1998; 张彦东等,2004; 赵新风等,2014),而本研究中圈羊这一措施对草地植被的恢复特别是植物多样性的恢复起到了一定的促进作用,在土壤贫瘠的地方,补土是基础,施肥过多不但不会对退化草地起到改善作用,可能会增加干旱强度进一步加速草地的退化(赵新风等,2014)。漫灌、圈羊形成土石比增大的原因:通过实地调查,采金矿区一般分布在河边,这对漫灌的实施提供了方便,既提供了植被恢复所需要的水分,又可增加土壤含量、提升植被生长立地条件。当地大多居民以放牧为生,采用便捷的羊群驻扎方式可为当地植被恢复创造良好的土壤条件。

漫灌+覆土、覆土+圈羊形成多样性与生物量增加的原因:通过覆土可为破坏矿区增加土壤母质,特别是河边覆土(如漫灌+覆土)既增加了土壤母质,又补充了土壤水分,为植物提供了较好的生长环境。建议矿区开采初期就应将地表土壤进行储存,以解决后来的山区取土难、花费大问题。单一的覆土只能对研究区土壤母质进行补充、单一的灌溉(如滴灌)只能对土壤水分进行补充,因此,将多种措施相结合(如漫灌+覆土、覆土+圈羊),从水、土、气、生物、地形等多方面为植被的生长提供条件,比如充足的水分会促进养分效应的发挥(Huberty *et al.*, 1998; 郑华平等,2007),因此建议在今后矿区恢复中注重水、肥耦合作用的发挥。

两河源保护区采矿后地形起伏加大,百米地形落差由原来的2~3 m变为破坏后的20~30 m,土壤母质流失严重,土石比较原始草地减少了98.2%,地上生物量减少了99.8%,矿区恢复的关键是对土壤、植被的恢复。各单措施对矿区植被及土壤的恢复效果中,首先是漫灌措施,漫灌使植被多样性指数高于喷泥浆处理、显著高于滴灌措施($P<0.01$),土石比分别较滴灌、喷泥浆处理高出22.1与5.8倍;其次是圈羊措施,该措施下植物多样指数显著高于滴灌、喷泥浆、漫灌措施($P<0.01$),土石比显著高于滴灌措施($P<0.01$)。本文中每项恢复措施的开展都以地表平整为基础,除了废石堆平整花费最为昂贵外,其他措施花费较大的是覆土、滴灌;通过将恢复效果较好的单措施相交后实施,发现漫灌+覆土措施、覆土+圈羊措施下的恢复效果要好于其他相交措施,植被多样性指数均有所增加、生物量显著增加($P<0.01$)。结合漫灌措施的经济投入与恢复效果,认为漫灌对矿区恢复意义重大。

参考文献

- 李君剑, 严俊霞, 李洪建. 2015. 矿区不同复垦措施对土壤碳矿化和酶活性的影. 生态学报, **35**(12): 4178-4185.
- 刘云, 李均辉, 王梦春. 2006. 矿山恢复的过程及前期恢复时限分析. 地球与环境, **34**(4): 47-52.
- 齐丹丹, 刘文胜, 李世友, 等. 2013. 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. 西北植物学报, **33**(11): 2317-2325.
- 任继周. 1998. 草业科学研究方法. 北京: 中国农业出版社.
- 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 1993. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社.
- 徐海量, 李吉玫, 张占江, 等. 2008. 塔里木河下游退化荒漠河岸林地上植被与土壤种子库关系初探. 中国沙漠, **28**(4): 657-664.
- 袁剑刚, 周先叶, 陈彦. 2005. 采石场悬崖生态系统自然演替初期土壤和植被特征. 生态学报, **25**(6): 1517-1522.
- 张彦东, 沈有信, 刘文耀. 2004. 金沙江干旱河谷退化草地群落对氮磷施肥的反应. 植物研究, **24**(1): 59-64.
- 赵新风, 徐海量, 张鹏, 等. 2014. 养分与水分添加对荒漠草地群落结构与物种多样性的影响. 植物生态学报, **38**(1): 47-56.
- 赵新风, 朱艳芬, 徐海量, 等. 2009. 塔里木河下游21种荒漠植物繁殖体形态特征及对环境的适应. 西北植物学报, **29**(2): 283-290.
- 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 等. 2007. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响. 草业学报, **16**(5): 34-

39.

Goldberg DE, Miller TE. 1990. Effects of different resource additions of species diversity in an annual plant community. *Ecology*, **71**: 213–225.

Guo QF, Rundel PW, Goodall DW. 1999. Structure of desert seed banks: Comparisons across four North American desert sites. *Journal of Arid Environments*, **42**: 1–14.

Huberty LE, Gross KL, Miller CJ. 1998. Effects of nitrogen addition on successional dynamics and species diversity in Michigan old-fields. *Journal of Ecology*, **86**: 794–803.

Milgrom T. 2008. Environmental aspects of rehabilitating abandoned quarries: Israel as a case study. *Landscape and Urban Planning*, **87**: 172–179.

Theodose TA, Bowman WD. 1997. Nutrient availability, plant abundance, and species diversity in two alpine tundra communities. *Ecology*, **78**: 1861–1872.

Ungar IA, Woodell SR. 1996. Similarity of seed banks to aboveground vegetation in grazed and ungrazed salt marsh communities on the Gower Peninsula, South Wales. *International Journal of Plant Sciences*, **157**: 746–749.

Whittaker RH. 1972. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, **21**: 213–251.

作者简介 赵新风,女,1981年生,硕士,研究方向为恢复生态学,发表论文30余篇。E-mail: 370461817@qq.com

责任编辑 张 敏