

# 不同建植技术对露天煤矿排土场生态修复效果的影响及评价

孔令伟, 薛春晓, 苏 凤, 石 龙

(中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

**摘 要:**为解决矿区排土场生态修复难和生态修复成本高的问题,提出了一种新的穴铺建植技术对排土场进行生态修复,并于 2012—2015 年期间选择 4 种建植技术对永顺煤炭有限公司矿区排土场开展生态修复工作。基于修复后(2015 年)的植被生长状况和土壤改良效果,并通过对比分析的手段,对不同建植技术的生态修复效果进行了评价。结果表明:穴铺植生袋建植法(A)、旱梯田坡面建植法(B)、旱坡植生袋建植法(C)和沙柳围护建植法(D)4 种不同建植技术中,在植被覆盖度方面表现为  $A(85\%) > C(80\%) > B(73\%) > D(63\%) > E(7\%, \text{裸地})$ ;土壤容重方面表现为  $A(1.21 \text{ g/cm}^3) < C(1.27 \text{ g/cm}^3) < B(1.31 \text{ g/cm}^3) < D(1.43 \text{ g/cm}^3) < E(1.52 \text{ g/cm}^3)$ ;土壤侵蚀模数方面表现为  $A[3\ 630 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < C[6\ 350 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < B[7\ 860 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < D[15\ 730 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < E[26\ 000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ ,均表明 A 技术在植被生长状况和土壤质地改良方面效果显著,有效解决了试验区人工建植植物群落稳定性差和水土流失量大等问题,成功完成了试验区的生态修复。穴铺植生袋建植技术在矿区排土场或类似区域的生态修复工程实践中具有良好的借鉴和参考作用。

**关键词:**露天煤矿;建植技术;生态修复

**中图分类号:**Q145; S157

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)01-0187-07

## Evaluation and Effect of Different Construction Techniques on the Ecological Restoration of the Stackpile in Opencast Coal Mine

KONG Lingwei, XUE Chunxiao, SU Feng, SHI Long

(Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high cost of ecological restoration and ecological restoration difficulty in coal mining area, a new method of planting technology(hole spread implant bag method) was proposed to carry out ecological restoration. During the period from 2012 to 2015, 4 kinds of construction techniques were selected to carry out the ecological restoration work on the dump in coal mine of Yongshun Coal Co., Ltd. Based on the vegetation growth status and soil improvement effect, the effect of different construction techniques were evaluated by the means of comparative analysis. The results showed that the vegetation coverage of the four kinds of construction techniques: hole spread implant bag method (A), drought terrace slope method (B), implant bag method (C), and Salix enclosure planting method (D), decreased in the order:  $A(85\%) > C(80\%) > B(73\%) > D(63\%) > E(7\%, \text{Bare land})$ ; soil bulk density increased in the sequence of  $A(1.21 \text{ g/cm}^3) < C(1.27 \text{ g/cm}^3) < B(1.31 \text{ g/cm}^3) < D(1.43 \text{ g/cm}^3) < E(1.52 \text{ g/cm}^3)$ ; soil erosion modulus increased in the sequence of  $A[3\ 630 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < C[6\ 350 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < B[7\ 860 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < D[15\ 730 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})] < E[26\ 000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ . The results showed that technique A had better performance on the vegetation growth status and soil texture improvement aspects, and solved the problems such as the difference of stability of the artificial plant communities and the water and soil erosion in the experimental area, and successfully completed the experimental area of ecological restoration. And the technique A has a good reference function in the practice of the field or similar regional ecological restoration projects.

**Keywords:** opencast coal mine; planting technology; ecological restoration

收稿日期:2016-02-25

修回日期:2016-03-20

资助项目:中国中铁股份有限公司重点科研项目(2012-重点-53);中铁科学研究院青年基金(2015-KJ006-Z006-XB);科技部专项资助项目(2012EG123033)

第一作者:孔令伟(1989—),男,山西祁县人,助理工程师,主要从事地质灾害防治和生态修复工作。E-mail:konglw192819@163.com

通信作者:薛春晓(1981—),男,内蒙古鄂尔多斯人,高级工程师,主要从事生态修复与风沙防治工作。E-mail:xcx0931@163.com

我国是最早发掘和利用煤炭资源的国家<sup>[1]</sup>,煤炭在我国一次性能源消费结构中所占比率一直是70%左右,在国民经济发展和人民生活中起着极其重要的作用,尤其是在我国北方大部分地区,煤炭更是不可或缺的能源。然而,由于不合理的开发利用,在煤炭开采过程中形成大量裸坡和废弃堆积物,地表植被和物种资源遭到破坏,并造成矿区水土流失、土地荒漠化现象加剧,生态环境恶化,且矿区植被重建率远低于发达国家75%的水平<sup>[2]</sup>。而我国的大型露天煤矿又多处于干旱、半干旱的生态脆弱区,增加生态修复难度和成本。因而,有必要对矿区的生态修复技术进行研究,以解决矿区生态修复难和成本较高的问题。

国外在矿区生态修复研究方面与我国相比,起步较早,研究技术比较成熟,取得良好的修复效果。早在20世纪初,美国等一些发达国家就开展了矿区生态修复方面的研究工作<sup>[3]</sup>,并随着矿区环境问题加剧,开始重视生态恢复重建研究。澳大利亚在矿区生态修复研究方面取得显著的成绩,并将矿区生态修复工作作为矿区生产的重要组成部分<sup>[4]</sup>。另外,美国、德国、加拿大等一些发达国家通过颁布一系列法令条款来约束矿区开采活动,并保证矿区开采后,能够取得良好的生态修复效果。国外在矿区生态修复方面已有许多成功的案例,如德国的鲁尔自然保护区、美国的麦克劳林金矿<sup>[5]</sup>和加拿大多伦多市的汤米逊公园等,值得我国矿区生态修复工作者学习和借鉴。近年来,国外在受损与退化环境区的生态环境恢复、重建和植被的恢复已成为当前生态学科研究的热点方面和问题之一<sup>[6]</sup>。

近年来我国在矿区生态修复方面也开展了多方面的研究工作,但由于经济技术等条件的限制,研究工作尚处于分散和水平较低的阶段,但也取得一定的成绩。目前我国对矿区生态修复研究主要集中于植物物种组合优选<sup>[7-10]</sup>,基于RS和GIS等措施对矿区景观修复的研究<sup>[11-12]</sup>,但对于生态修复中具体的建植技术研究和不同建植技术对生态修复效果研究比较少。在边坡植被建植技术方面我国也开展了一定的研究工作,如“喷混快速绿化”、“喷混植生技术”、“厚层基材喷射护坡技术”和“植被混凝土边坡防护绿化技术”等高新技术<sup>[13-16]</sup>,但由于这些技术存在植被单一、基材剥落、宜退化、养护费用高和造价高等缺点,目前我国矿区边坡绿化方面的推广并不普及。因此,本研究提出一种的新的建植技术,来改善矿区植被群落稳定性差、成本高和易退化的情况。选取内蒙古鄂尔多斯市永顺煤炭有限公司外排土场作为试验地点并结合室内试验,对排土场生态修复建植技术以

及生态修复效果、不同建植技术的生态修复效果进行研究,为我国矿区生态修复研究领域积累经验。

## 1 研究区概况

研究区选择位于内蒙古鄂尔多斯市东胜区境内的永顺煤炭有限责任公司煤矿首采区外排土场,并作为现场试验区。排土场土质以沙土为主,土壤团聚体结构较少,坡度达55°,坡顶垂直地表高度约为15 m。该区域地理坐标为北纬39°51′35″—39°52′59″,东经110°00′41″—110°03′43″,属于温带半干旱大陆性季风气候区,日照丰富,年日照百分率为67.8%。年平均气温为5.9℃,无霜期为140 d左右,年平均风速为3.10 m/s,年平均降雨量为387.70 mm,降水量主要集中在7—8月份。当地的主要植被有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、蒿类、本氏针茅(*Stipa capillata*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 植被多样性调查

本研究于2012年6月开始对矿区排土场进行了生态修复工作,于2015年9月对4种不同人工建植法修复的区域和裸地(对照点)进行植被调查。在每块修复区域设置1个20 m×20 m的样地,并在每个样地内均匀布设5个5 m×5 m的灌木样方,在每个灌木样方内随机布设3个1 m×1 m的草本样方,进行植被调查<sup>[17]</sup>。记录每个样方内植物种类、高度、盖度和株数等。

植物重要值 $P$ 的计算的方法<sup>[18]</sup>:

$$P = (Dr + Fr + Cr) / 3 \quad (1)$$

$$Dr = (d_i / \sum_{i=1}^n d_i) \times 100\% \quad (2)$$

$$Fr = (f_i / \sum_{i=1}^n f_i) \times 100\% \quad (3)$$

$$Cr = (c_i / \sum_{i=1}^n c_i) \times 100\% \quad (4)$$

式中:Dr为相对密度;Fr为相对频度;Cr为相对盖度; $d_i$ 为第 $i$ 个物种在单位面积内出现的个体数; $f_i$ 为第 $i$ 个物种在所作的全部样方中出现的频率; $c_i$ 为第 $i$ 个物种的地上部分垂直投影面积占样地面积的百分比。

### 2.2 土壤容重及土壤侵蚀模数的测定方法

由于该研究区土质以沙土和生土为主,土质比较松散,不宜选用环刀法测土壤容重,因此选用灌砂法测量该区的土壤容重。灌砂法测土壤容重的具体步骤详见文献<sup>[19]</sup>。

利用简易水土流失观测场法(桩钉法)测定各修复区土壤侵蚀模数,布设样地规格为 8 m×8 m。将直径 1.2~1.5 m 长的钢钎,在选定的坡面样方小区按照图 1 所示的间距,分纵横方向共计 12 支钢钎垂直打入地下,使钢钎钉帽与坡面齐平,并在钉帽上涂上油漆,编写编号,每个样地内设置两组平行试验。

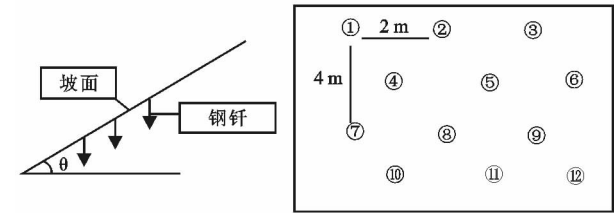


图 1 简易水土流失观测场示意图

经过一段时间的降雨期后,观测钉帽距地面的高度,以此计算土壤侵蚀厚度和总的水土流失数量。

计算公式为:

$$A = Z \cdot \cos\theta \cdot S / 1000 \quad (5)$$

式中: A 为土壤侵蚀数量(m<sup>3</sup>); Z 为侵蚀厚度(mm); S 为坡面面积(m<sup>2</sup>); θ 为斜坡坡度(°)。

2.3 建植技术

在本研究中,不同建植技术中所涉及种子基质层均一致,基质层(腐殖土)中除镶嵌所选植物种子外,还按照 20 g/m<sup>2</sup> 标准镶嵌营养颗粒,营养颗粒由保水剂、复合肥和有机肥 1 : 5 : 6 的配比组成。

在植被选取方面主要考虑植物的耐旱性、耐贫瘠性、根系状况等。因此,种子选取组合均为冰草(*Agropyron cristatum*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、榆树(*Ulmus pumila*),并按 10 : 30 : 20 : 2 : 1 的比例混合。在种子配比方面主要考虑当地土壤质地以沙土为主,质地较差,因此种子选择以草本为主,并搭配一定比例的灌木和乔木树种。

(1) 旱坡植生带建植法。主要是利用植生带技术将种子、营养颗粒和腐殖土按一定比例混合在一起,并装入植生带内,然后铺设于经过修整的排土场坡面上,进行生态修复。植生带是采用专用设备,依据特定的生产工艺,把草种、肥料、添加剂等按一定的密度定植在带状载体上,并经过机器滚压、针刺复合定位或冷粘接等工序,形成的一定规格的工业产品。本课题试验段所采用制作植生带的带状载体为无纺布(图 2),具备质地柔软、重量轻、厚薄均匀,并具有良好的物理强度,无污染,铺装施工后,能够较快地自然降解,设计采用 1 a 降解的产品。

(2) 旱梯田坡面建植法。旱梯田坡面建植法,主要是在排土场坡面沿不同高度的等高线修筑阶梯式梯田,梯田边缘设有护坎,然后在梯田水平坡面上铺

设种子基质层。

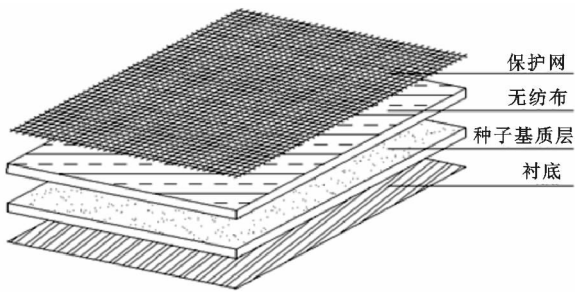
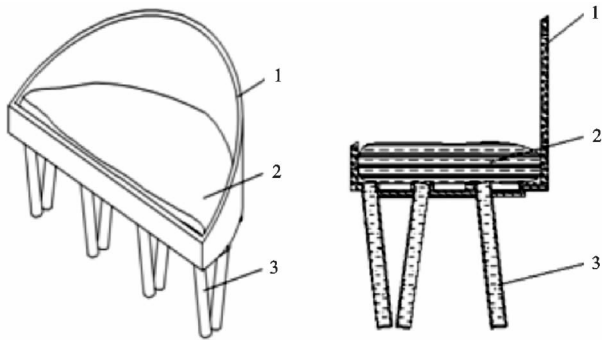


图 2 植生带结构示意图

(3) 沙柳枝围护建植法。沙柳围护建植法是比较传统的建植技术,其建植方法主要是先在坡面上打线,开浅沟,形成菱形网格状,并在浅沟上插入沙柳枝(干枯状态),覆土埋实,最后在坡面上铺设种子基质层。

(4) 穴铺植生袋建植法。针对矿区排土场边坡土质松散,水土流失量大的特点,本研究提出一种新的建植方法,即穴铺植生袋建植法,具有保水保肥特性,该技术主要应用的是边坡穴植植物装置,对边坡进行生态修复。该装置包括保育篮和基础包,保育篮采用可自然降解的天然纤维制成;基础包由可自然降解的袋子和改良土组成,使用时将植物种子均匀拌入腐殖土中,再将拌入种子的腐殖土装入袋内,再将袋子平铺于保育篮中<sup>[20]</sup>,装置设计见图 3。工艺流程一般为:① 生态修复场地刷坡整理;② 将该种子均匀拌入腐殖土中,再将拌入种子的腐殖土、保水剂和复合肥装入基质袋中,形成基础包;③ 在目标边坡上按一定比例挖穴,挖好后先将多个改良土壤棒插入该挖好的穴内;④ 接着安装保育篮;⑤ 将基础包平铺于保育篮中;⑥ 最后进行浇水养护。



植物装置等轴侧示意图  
注: 1 保育篮; 2 基础包; 3 改良土壤棒。

图 3 新型穴植植物装置图

3 结果与分析

3.1 植物恢复效果评价

(1) 植被生长状况。从现场调查表(表 1)中可以看出, A 样地内植被覆盖度最高为 85%, 且植被长势良好, 其次是 C 样地为 80%, 裸地植被覆盖度最低仅

为 7%。A 样地内植物种类最多为 5 种,其样方内总株数为 125 株,紫花苜蓿与冰草占总株数的 88%,植株平均高达 37.2 cm;B 样地植物种类为 4 种,其总株数为 116 株,紫花苜蓿与冰草占总株数的 90%,平均高为 27.6 cm;在 A,B,C,D 共 4 种修复措施中,利用穴铺植生袋建植法修复的 A 样地内植物种类最多,植被生长状况最好,植被覆盖度最高,其原因在于利用穴铺植生袋法,其边坡穴植植物装置可有效缓解自然环境因素对植株生长带来的不利因素的影响,如在植物生长初期能有效减缓风蚀和水蚀带来的不利因素,防止表层营养物质流失,为植被生长创造了良好的生存环境。因此,利用穴铺植生袋建植法能够取得良好的植被修复效果。E 裸地样方内,经过一段时间自我修复,虽出现一定数量的植被,但植被覆盖度低仅为 7%,且植被生长状况与人工修复措施相比较差,表明通过人工干预的修复措施可以有效提高排土场内植被覆盖度和植被生长质量。

(2) 物种特征。重要值  $P$  是一个综合的定量指标,可表示一个物种在某群落组成中的作用和地位。一般重要值大的物种也是群落中的优势种,表明该物种对群落组成、结构和环境具有明显的控制作用,通常情况下它们个体数量大、投影盖度大<sup>[21]</sup>。因此,可根据重要值的指标来确定植物物种在群落以及演替过程中所起的作用和地位。

由图 4 可知,在 4 种不同的人工修复措施中冰草与紫花苜蓿的重要值最高,二者重要值之和均占到植

物总重要值的一半以上,从而表明紫花苜蓿与冰草为修复 3 年后的优势种。如利用穴铺植生袋建植法修复的 A 样地内,冰草与紫花苜蓿的重要值分别为 41.2% 和 29.2%,占植物总重要值的 70.4%;沙打旺、柠条和榆树的重要值分别为 14.5%,8.7%和 6.5%。

表 1 修复 3 年后植被生长情况

| 取样地点 | 植物种类 | 株数 | 高度/cm | 覆盖度/% | 生长状况 | 分布情况 |
|------|------|----|-------|-------|------|------|
| A 样地 | 紫花苜蓿 | 40 | 65    | 85    | 良好   | 均匀   |
|      | 沙打旺  | 10 | 26.5  |       | 良好   | 随机   |
|      | 冰草   | 70 | 19.5  |       | 不良   | 群团   |
|      | 柠条   | 2  | 15    |       | 良好   | 随机   |
|      | 榆树   | 3  | 60    |       | 良好   | 随机   |
| B 样地 | 紫花苜蓿 | 25 | 51.4  | 73    | 良好   | 均匀   |
|      | 沙打旺  | 8  | 23.6  |       | 良好   | 随机   |
|      | 冰草   | 80 | 20.4  |       | 不良   | 群团   |
|      | 柠条   | 3  | 15    |       | 良好   | 随机   |
| C 样地 | 紫花苜蓿 | 30 | 40.1  | 80    | 良好   | 均匀   |
|      | 沙打旺  | 4  | 23.5  |       | 良好   | 随机   |
|      | 冰草   | 50 | 18.8  |       | 不良   | 群团   |
| D 样地 | 紫花苜蓿 | 14 | 47.6  | 63    | 良好   | 均匀   |
|      | 冰草   | 30 | 17.2  |       | 不良   | 群团   |
|      | 榆树   | 1  | 55    |       | 良好   | 随机   |
| E 裸地 | 紫花苜蓿 | 3  | 30    | 7     | 中    | 随机   |
|      | 冰草   | 7  | 17.2  |       | 不良   | 群团   |

注:A 样地为穴铺植生袋建植法,B 样地为旱梯田坡面建植法,C 样地为旱坡植生袋建植法,D 样地为沙柳围护建植法,E 样地为裸地对照,下表同。

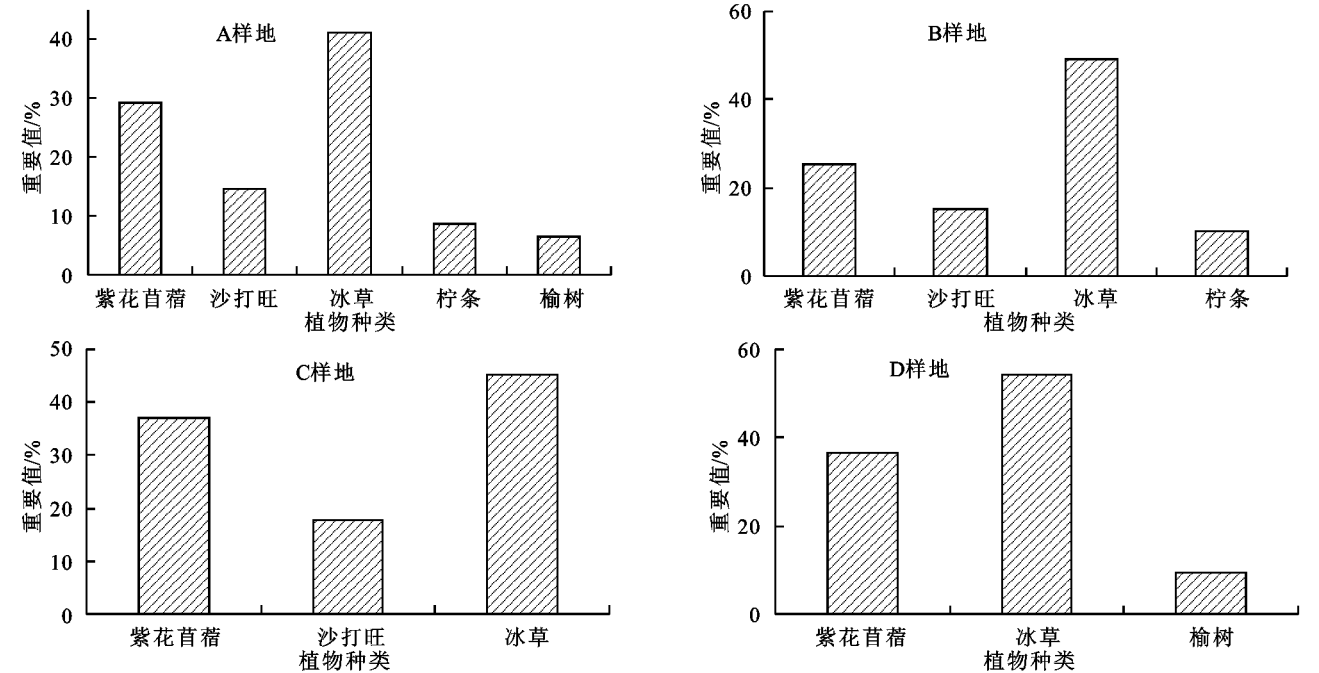


图 4 不同修复措施中植物重要值对比

结合植物重要值和植被生长状况发现,虽然冰草重要值指标较高,但其生长状况较差,处于半枯萎状

态(大部分叶片发黄),有衰退的迹象,而紫花苜蓿和沙打旺等植被长势良好,因此本研究认为再经过 1~

2 a 的恢复期后冰草很可能被沙打旺、柠条等植被所替代,而成为新的优势种。分析其原因可能是由于冰草属于禾本科植物,而紫花苜蓿、沙打旺等植被属于豆科植物,且有研究发现紫花苜蓿与沙打旺根部均能与根瘤菌产生共生作用。因此,紫花苜蓿与沙打旺可通过两种不同的途径来获得氮素,一是通过吸收土壤中的氮素,主要是植物通过根系吸收硝酸盐,二是通过根瘤菌固定空气中的氮,将空气中的氮转变为氨,最后转变为氨基酸和蛋白质被植物所利用<sup>[22]</sup>。由于排土场土壤贫瘠,含氮量少,冰草在人工干预的初始阶段时生长速度较快,长势良好,但随着时间的推移土壤中含氮量与初期人工施肥时相比有所下降,无法满足冰草正常生长的需求,从而导致冰草逐渐衰退,而紫花苜蓿与沙打旺等植物通过固氮作用获得额外的营养补给,从而保持良好的生长态势。

表 2 土壤容重分级标准

| 分级                         | 过松    | 适宜        | 偏紧        | 紧实        | 过紧实       | 坚实    |
|----------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) | <1.00 | 1.00~1.25 | 1.25~1.35 | 1.35~1.45 | 1.45~1.55 | >1.55 |

由图 5 可知,E 裸地下的土壤容重最大为 1.52 g/cm<sup>3</sup>(过紧实),显著大于其他 4 种人工建植模式下的土壤容重,表明在人工建植条件下的生态修复对土壤质地和结构等的改善起到了一定的促进作用。对比 4 种不同人工建植技术条件下的修复区域,发现 A 样地土壤容重最小为 1.21 g/cm<sup>3</sup>(适宜),为裸地条件下土壤容重的 0.79 倍,其次 C 样地,其土壤容重为 1.27 g/cm<sup>3</sup>(偏紧),为裸地条件下土壤容重的 0.84 倍,其余 2 种土壤容重大小为 B 样地 1.31 g/cm<sup>3</sup>(偏紧)和 D 样地 1.43 g/cm<sup>3</sup>(紧实)。结果表明,通过不同的生态修复措施能够有效改善土壤质地和结构,使修复区土壤容重明显优于裸地区土壤容重。其原因是由于植物在生长过程中,根系不断渗入土壤中,使原本紧实的土壤产生分散,增加了土壤了孔隙,且在根系衰老或死亡时,根系会发生收缩,从而使土壤中产生更多的孔隙,并且死亡的根系和地表枯落物通过自身的腐殖分解作用转化为腐殖质,也能有效地改善土壤的孔隙状况和团聚结构,使得经过人工修复的土壤质地发生改变,在一定范围内,土壤容重减小,有效地提高了修复区土壤的水源涵养功能和水土保持功能。另外,在穴铺植生袋建植技术中应用的边坡穴植植物装置(含有保育篮、土壤棒等)在经过 3 年的恢复期后在一定程度上分解,对土壤有机质含量、营养元素含量的提升和土壤质地的改良也具有一定的促进作用;而裸地土壤容重较大,其原因是由于该区域土质主要以沙土为主,且地表植被覆盖较小,土壤孔隙较少,从而造成该区域土壤容重较大,且由于该区域土壤团粒结构较少,土粒间粘合力较差,抗

3.2 水土保持效益评价

(1) 不同修复措施下土壤容重。土壤容重是指一定容积的土壤(包括土粒间孔隙)烘干后的土壤干重与同容积水质量的比重,又称为土壤假比重或干容重。土壤容重的大小与土壤中的有机质含量、孔隙结构、质地以及土壤紧实度等紧密相关。土壤容重的大小在一定程度上能够反映出土壤的孔隙状态和贮水能力大小。当土壤容重较高时,表明土壤结构紧密,土壤中孔隙较少,水源涵养和水土保持能力较低;反之,当土壤容重较低时,表明土壤中孔隙较多,土壤结构疏松,其水源涵养能力和水土保持功能较高。土壤容重的大小也能客观地反映出植物对于土壤结构等物理性状的改善程度。土壤容重和孔隙度直接影响到土壤的通气性和透水性,是决定土壤水源涵养功能的重要指标<sup>[23]</sup>。表 2 为土壤容重分级表<sup>[24]</sup>。

侵蚀能力较差,易造成水土流失。

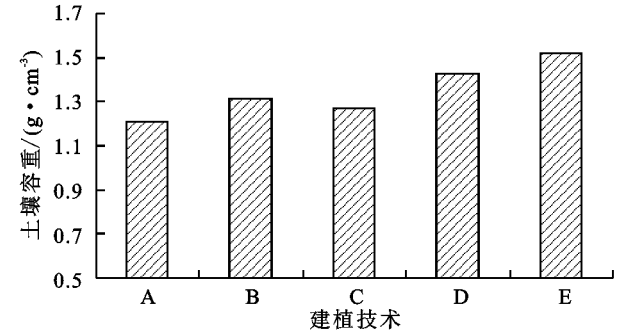


图 5 不同建植技术下土壤容重对比

(2) 侵蚀沟类型对比。从侵蚀沟形状大小和分布密度来看,利用穴铺植生袋建植技术修复的区域形成的侵蚀沟尺寸和分布密度均相对较小,表明其防护效果最好,其次是早坡植生袋建植技术、早梯田坡面建植技术,防护效果较差的是沙柳围护建植技术,具体对比情况见表 3。

相比于其他几种人工建植修复技术,裸坡坡面形成的侵蚀沟数量相对较少,侵蚀沟宽度较小、深度较浅。分析其原因主要是由于裸坡坡面植被覆盖度小,土壤团粒结构少,也没有人工辅助措施来减缓或减少径流量的产生。因此,在降雨条件下,易形成面蚀,从而造成侵蚀沟数量相对较少。

(3) 不同修复措施下土壤侵蚀模数。由图 6 可知,土壤侵蚀模数从小到大依次排序为:A,C,B,D 和 E,其中 4 种人工干预修复条件下的土壤侵蚀模数分别为裸地条件下土壤侵蚀模数的 14.97%,24.42%,30.23%和 60.50%,表明不同的人工修复措施对土壤侵蚀模数的减

少具有明显的改善作用,有效地减少了坡地土壤的水土流失情况。其中,利用穴铺植生袋建植法土壤侵蚀模数最小为 3 630 t/(km<sup>2</sup> · a),而利用沙柳枝围护建植法土壤侵蚀模数最高的为15 730 t/(km<sup>2</sup> · a)。

表 3 不同修复措施下形成的侵蚀沟类型对比

| 方法       | 侵蚀沟形状    | 侵蚀沟尺寸、数量  | 形成的原因   |
|----------|----------|---|---|
| 穴铺植生袋建植法 | 弯曲、间断型   | 平均长约为 1.8 m,宽约为 7 cm,深度约为 10 cm;每 100 m 水平长度上侵蚀沟数量约为 42 条           | 保育篮等装置能起到阻断水流,减缓径流的作用;植生袋表面分布有细小网格,能起到减缓、分散和阻断径流的作用                               |
| 旱梯田坡面建植法 | 较为笔直、贯通型 | 长度大约为坡面的斜长的 2/3,侵蚀沟平均宽为 15 cm,深度约为 20 cm;每 100 m 水平长度上侵蚀沟的数量约为 62 条 | 该法主要是利用梯田护坎来减缓水土流失,当降雨量较小时,雨量积于护坎内,没有形成有效径流;当雨量较大时,囤积在护坎内降水冲破护坎形成径流,且成逐渐增大的趋势     |
| 旱坡植生带建植法 | 弯曲、间断型   | 平均长度约为 2.3 m,宽为 10 cm,深度约为 15 cm;每 100 m 水平长度上侵蚀沟的数量约为 54 条         | 植生带表面分布有很多细小的网纹,能起到减缓、分散和阻断径流的作用  |
| 沙柳围护建植法  | 笔直、贯通型   | 长度大约为坡面的斜长的 3/4,侵蚀沟平均宽为 25 cm,深度约为 27 cm;每 100 m 水平长度上侵蚀沟的数量约为 68 条 | 菱形网格内的降雨主要集中于网格的最下角,使得该区域形成较大的地表径流量,最终导致坡面上形成笔直、连续贯通的侵蚀沟;由于沙柳铺设的规格限制,导致形成的侵蚀沟数量较多 |

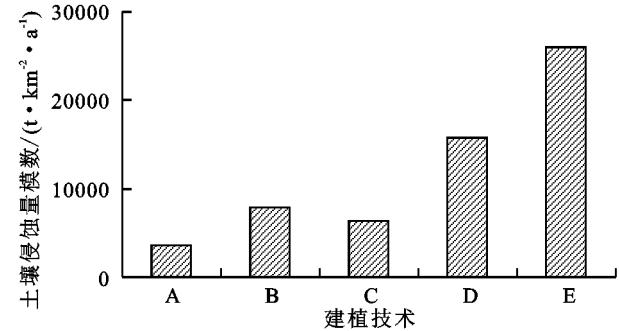


图 6 不同修复类型下土壤侵蚀模数对比

利用人工生态修复措施能有效降低土壤侵蚀模数,其原因主要有以下几个方面:(1) 植被覆盖度。植被覆盖度高可有效减少雨水对地表土壤的直接冲刷,通过枝叶的拦截作用有效地减少了到达地面的降雨量和雨滴势能,在一定程度上减缓地表发生溅蚀、面蚀和沟蚀的可能。另有研究表明,当地表植被覆盖度为 85%以上时,能较大幅度地保护地表土壤,防治土壤侵蚀<sup>[25]</sup>;而利用穴铺植生袋建植法修复的 A 样地,其植被覆盖度达 85%;(2) 植物根系作用。植物根系通过改善土壤的孔隙状况和质地结构增强了土壤渗透率和稳定性,同时植物根系可通过对土体的缠绕、串连和固结作用增强土壤抗冲蚀性,从而增强土壤的水土保持的作用<sup>[25-26]</sup>;(3) 枯落物的作用。地表枯枝落叶层通过对地表的覆盖,有效地减弱了雨水对地表的冲刷,而且枯枝落叶还可以吸收一部分水分,延缓了地表径流的形成,并且其腐殖质层也可以通过改善土壤的质地结构来增强土壤的水土保持作用。有研究表明,当地表枯落物层厚度达 1 cm 以上时,土壤流失量可减少 80%以上<sup>[27]</sup>。因此,通过人工生态修复措施可以有效减小土壤的流失量,改善土壤质地,增强土壤的水源涵养功能。

4 结论

- (1) 穴铺植生带建植技术、旱梯田坡面建植技术、旱坡植生带建植技术和沙柳围护建植技术均可满足在无养护条件下的生态修复,修复后植被覆盖度分别为 85%,73%,80%和 63%,其中利用穴铺植生袋建植技术修复的区域植被恢复效果最优。
- (2) 利用不同的人工修复措施修复的区域,在修复初期植物优势种以冰草(先锋草种)为主,现阶段群落优势种转变为紫花苜蓿与冰草组成的共优种,而冰草长势衰退,沙打旺、柠条和榆树等植被长势良好,易形成灌草组合的植物群落,对保障植物群落结构后期的稳定性具有重要的意义。
- (3) 利用不同的人工生态修复技术,其土壤质地和水土保持功能均得到有效地改善,其中穴铺植生袋建植修复技术防护效果最为显著,土壤容重处于适宜状态,为 1.21 g/cm<sup>3</sup>,土壤侵蚀模数最小为 3 630 t/(km<sup>2</sup> · a)。
- (4) 利用不同建植技术对矿区排土场生态修复效果有较大的影响,其中利用穴铺植生袋建植技术在免养护的情况下取得了显著的生态修复效果,因此可在类似地区进行推广应用,为我国矿区生态修复工作提供新的思路和借鉴作用。
- 参考文献:
- [1] 胡文耀.我国煤矿生产中刑事责任法律问题研究[D].大连:大连海事大学,2014.
- [2] Li M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice[J]. Science of the Total Environment,2006,357(1):38-53.
- [3] 高国雄,周心澄.国外工矿区土地复垦动态研究[J].水土保持研究,2001,8(1):98-103.

- [4] 李若愚,侯明明,卿华,等. 矿山废弃地生态恢复研究进展[J]. 矿产保护与利用,2007(1):50-54.
- [5] Jackson S T, Hobbs R J. Ecological restoration in the light of ecological history[J]. Science,2009,325(5940):567-569.
- [6] 马建军. 黄土高原丘陵沟壑区露天煤矿生态修复及其生态效应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [7] 廖晓勇,陈同斌,阎秀兰,等. 金昌镍铜矿区植物的重金属含量特征与先锋植物筛选[J]. 自然资源学报,2007,22(3):486-495.
- [8] 易扬,王越,辜再元,等. 矿山边坡生态建设的植被特征与群落动态变化[J]. 中国水土保持科学,2014,12(4):51-56.
- [9] 陈影,张利,董加强,等. 废弃矿山边坡生态修复中植物群落配置设计:以太行山北段为例[J]. 水土保持研究,2014,21(4):154-157.
- [10] 刘鸿雁,邢丹,肖玖军,等. 铅锌矿渣场植被自然演替与基质的交互效应[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3217-3224.
- [11] 侯湖平,张绍良,闫艳,等. 基于 RS, GIS 的矿区生态景观修复研究:以徐州市城北煤矿区为例[J]. 中国土地科学,2009,23(8):62-67.
- [12] 侯湖平,张绍良,闫艳,等. 基于 RS, GIS 的徐州城北矿区生态景观修复研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(4):504-510.
- [13] 章梦涛,吴长文. 岩质坡面喷混快速绿化新技术浅析[J]. 水土保持研究,2000,7(3):65-66.
- [14] 周颖,曹映泓,廖晓瑾,等. 喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用[J]. 岩土力学,2001,22(3):353-356.
- [15] 德培,俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [16] 许文年,叶建军,周明涛,等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术,2004,35(10):50-52.
- [17] 方精云,王襄平,沈泽昊,等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性,2009,17(6):533-548.
- [18] 贺山峰,蒋德明,李晓兰. 小叶锦鸡儿固沙群落草本种群重要值与生态位的研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(10):150-155.
- [19] 郭希娟. 浅谈灌砂法试验[J]. 山西建筑,2007,33(20):180-181.
- [20] 薛春晓,石龙,火明彩. 寒区露天煤矿排土场边坡生态修复研究[J]. 冰川冻土,2014,36(4):1026-1030.
- [21] 石健. 门头沟龙凤岭废弃矿生态修复效益评价研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [22] 马丹丹. 野生豆科牧草根瘤菌及其固氮活性的研究[D]. 长春:东北师范大学,2006.
- [23] 刘德虎. S233 公路项目水土保持效果评价[D]. 山东泰安:山东农业大学,2011.
- [24] 杨鞞鞞. 矿山废弃地生态修复技术与效应研究[D]. 郑州:华北水利水电学院,2012.
- [25] 张光辉,梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J]. 水土保持研究,1996,3(2):104-110.
- [26] Ghidey F, Alberts E E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability[J]. Transactions of the ASAE,1997,40(1):129-135.
- [27] 戴全厚,喻理飞,薛蕙,等. 植被控制水土流失机理及功能研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):32-35.
- [28] Carroll C, Tucker A. Effects of pasture cover on soil erosion and water quality on central Queensland coal mine rehabilitation[J]. Tropical grasslands,2000,34(3/4):254-262.

~~~~~

(上接第 186 页)

- [11] 陈红顺,夏斌. 快速城市化地区土地利用变化研究:以广东省东莞市为例[J]. 水土保持研究,2012,19(1):239-242.
- [12] 朱会义,李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报,2003,58(5):643-650.
- [13] 张国坤,邓伟,张洪岩,等. 新开河流域土地利用格局变化图谱分析[J]. 地理学报,2010,65(9):1111-1120.
- [14] 武鹏飞,宫辉力,周德民. 基于复杂网络的官厅水库流域土地利用/覆被变化[J]. 地理学报,2012,67(1):113-121.
- [15] 吕立刚,周生路,周兵兵,等. 1985 年以来江苏省土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(7):1086-1093.
- [16] 田义超,梁铭忠,胡宝清. 北部湾钦江流域土地利用变化与生态服务价值时空异质性[J]. 热带地理,2015,35(3):403-415.
- [17] 谢花林. 基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析:以江西兴国县为例[J]. 中国环境科学,2011,31(4):688-695.
- [18] 赵小沉,陈文波,代力民. Markov 和灰色模型在土地利用预测中的应用[J]. 水土保持研究,2007,14(2):19-21.
- [19] 谢花林,李秀彬. 基于分形理论的土地利用空间行为特征:以江西东江源流域为例[J]. 资源科学,2008,30(12):1866-1872.
- [20] 陈昌春,张余庆,项瑛,等. 土地利用变化对赣江流域径流的影响研究[J]. 自然资源学报,2014,29(10):1758-1769.
- [21] 王盼盼,郑林,曹昀,等. 鄱阳湖沙区农户对土地利用变化的影响:以江西省都昌县多宝乡为例[J]. 中国水土保持,2014(6):39-42.
- [22] 张婷,骆希,蔡海生. 江西省耕地的动态变化及驱动因子[J]. 水土保持通报,2014,34(3):305-310.
- [23] 于法展,张忠启,陈龙乾,等. 江西庐山自然保护区不同林地水源涵养功能研究[J]. 水土保持研究,2014,21(5):255-259.
- [24] 马彩虹,任志远,李小燕. 黄土台塬区土地利用转移流及空间集聚特征分析[J]. 地理学报,2013,68(2):257-267.