

露天煤矿排土场不同植被类型持水能力评价

李叶鑫^{1,2}, 吕刚^{1,2}, 刁立夫³, 傅昕阳², 刘雅卓²

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3. 内蒙古大唐国际锡林浩特矿业有限公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要: 采用野外调查和室内综合分析, 系统研究了露天煤矿排土场不同植被类型的枯落物特征、土壤物理性质、土壤渗透性能和蓄水能力变化, 并采用主成分分析对各样地持水能力进行综合评价。结果表明: 不同植被类型枯落物的厚度和蓄积量均差异显著($P < 0.05$), 乔木林地、灌木林地和荒草地枯落物厚度依次为 1.80, 1.23, 0.83 cm, 枯落物蓄积量为 6.76, 2.96, 0.58 t/hm²; 乔木林地枯落物的持水能力和拦蓄能力最强, 显著大于灌木林地和荒草地($P < 0.05$)。各样地土壤容重依次为荒草地 > 灌木林地 > 乔木林地, 乔木林地和灌木林地的土壤入渗能力显著高于荒草地($P < 0.05$), 初始入渗率、稳定入渗率和渗透总量分别为 1.53~4.08 mm/min、0.20~1.51 mm/min 和 28~133 mL。乔木林地和灌木林地的实际库容大于荒草地, 林地水库贮水效率显著高于荒草地($P < 0.05$)。采用主成分分析法评价露天煤矿排土场不同植被类型的持水能力, 15 个评价指标可优化为 3 个主成分, 累计贡献率为 96.832%, 各样地持水能力综合得分为乔木林地 > 灌木林地 > 荒草地。从排土场枯落物层和土壤层的持水能力角度, 可选择乔木树种(刺槐)作为主要复垦植被。

关键词: 持水能力; 排土场; 植被类型; 土壤水库; 主成分分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0309-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.048

Evaluation of Water Retention Capacity of Different Vegetation Types in Dump of Opencast Coal Mine

LI Yexin^{1,2}, LÜ Gang^{1,2}, DIAO Lifu³, FU Xinyang², LIU Yazhuo²

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;

2. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;

3. Inner Mongolia Datang International Xilihaote Mining Co., Ltd., Xilihaote, Inner Mongolia 026000)

Abstract: In the present study, the field investigation and indoor analysis were conducted to study the litter characteristics, soil physical features, soil infiltration characteristics and water retention capacities of different vegetation types in dump of opencast coal mine, and water retention capacities were evaluated by principal component analysis. The results indicated that the thickness and amount of litter were different significantly ($P < 0.05$) among three vegetation types, and the litter thickness of arbor land, shrub land and weeds land were 1.80, 1.23, and 0.83 cm, respectively, and the litter accumulation of three vegetation types were 6.76, 2.96, and 0.58 t/hm², respectively. The water retention capacity and interception capacity of litter in arbor land was the maximum, which was significantly greater than those in shrub land and weeds land ($P < 0.05$). The soil bulk density was in the order of weeds land > shrub land > arbor land. The soil infiltration capacity of arbor land and shrub land were significantly greater than that of weeds land, and the infiltration rate, the stable infiltration rate and cumulative infiltration of three vegetation types were 1.53 ~ 4.08 mm/min, 0.20 ~ 1.51 mm/min, 28 ~ 133 mL, respectively. The actual storage capacity of arbor land and shrub land were both greater than that of weeds land, and the water storage efficiency of arbor land and shrub land were significantly higher than that of weeds land ($P < 0.05$). The water retention capacities of different vegetation types were evaluated by principal component analysis. Fifteen indicators were optimized into 3 principal components, with a cumulative contribution rate of 96.832%. The water retention capacities of different vegetation types were in the order of arbor land > shrub land > weeds land. To improve the water retention capacity of litter

收稿日期: 2017-03-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(51474119)

第一作者: 李叶鑫(1989—), 男, 辽宁阜新人, 博士研究生, 主要从事工矿区水土保持与生态修复研究。E-mail: liyexin2008@126.com

通信作者: 吕刚(1979—), 男, 吉林九台人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与土壤水文学教学和研究。E-mail: lvgang2637@126.com

and soil of dump, arbor (*Robinia pseudoacacia*) could be selected as the main reclaimed vegetation.

Keywords: water retention capacity; dump; vegetation types; soil reservoir; principal component analysis

长期以来,煤炭始终是我国的主要能源,占总能源消费量的 70% 以上。国土资源部在 2016 年 9 月发布的《中国矿产资源报告》指出^[1],2015 年我国煤炭探明 15 663.1 亿 t,煤炭消费量约为 33.8 亿 t。目前,我国煤炭开采方式以露天开采为主,且所占比例逐年增加。我国大型露天煤矿多位于干旱、半干旱地区的内蒙古高原、黄土高原及沙漠化地带,生态环境极其脆弱^[2],露天开采不仅会开挖扰动大量地表,破坏植被,对生态环境和土地资源造成了严重的破坏和损失,也会产生岩土和矸石等大量剥离物质,在原地貌上形成排土场,进而形成极度退化的生态系统^[3]。排土场具有物质组成复杂、孔隙发达、边坡松散高陡、平台紧实、沉陷不均匀等特性^[4],其边坡水土流失极其严重,易发生滑坡、泥石流等水土流失灾害^[5]。因此,露天煤矿排土场的复垦工作对矿区生态恢复与重建、建设绿色矿山具有重要意义。以往关于排土场的研究多集中在植物物种的选择及其适应性^[6-7]、复垦土壤的入渗特征及水文效应^[8-9]、土壤持水蓄水能力^[10]、土壤团聚体和有机碳分布特征及其影响因素^[11-12]、土壤肥力的恢复作用及程度^[13]、生态环境效益的分析与估算^[14]等方面,但关于排土场不同植被类型枯落物层和土壤层持水能力的系统性研究鲜见报道。吕春娟等^[15]研究了矿区复垦植被的涵养水源功能,认为随着复垦年限的增加,土壤的物理性状和蓄水保水能力都有很大的改善,但未评价各种植物措施水源涵养功能的优劣程度。基于此,本文从排土场枯落物层、土壤物理性质、土壤渗透能力和蓄水能力 4 个生态作用角度,对排土场不同植被类型(乔木林

地、灌木林地和荒草地)枯落物特征和土壤物理性质进行定量研究,采用主成分分析进行持水能力综合评价,以期对排土场土地复垦、植被恢复与重建及改善生态环境提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场位于露天矿坑西南部,地处东经 121°40′12″,北纬 41°57′36″,总面积约为 13 km²。排土场呈阶梯状,共 3 个台面,每个台面高度为 15~20 m,边坡坡度为 35°~45°。研究区年均气温 7.3 ℃,年均降水量 511.4 mm,6—8 月降雨量占全年雨量的 73.25%,年蒸发量 1 790 mm,主要土壤类型为典型褐土。2004 年,由国土资源部投资对该排土场开展土地复垦工作,并于 2005 年初完成复垦工作,复垦土地规模为 998.17 hm²,覆土厚度为 30 cm,具有乔灌草、灌草、乔木、灌木、牧草、农田等多种复垦模式,复垦植被为刺槐、榆树、刺槐和榆树混交、油松、紫穗槐、火炬树、柠条、农地(玉米)、荒草地等,排土场内没有灌溉系统,全部水分均来自天然降水。本研究于 2012 年 6 月在排土场复垦区(复垦年限为 8 a)选取乔木林地(刺槐)、灌木林地(紫穗槐)和荒草地 3 种不同植被类型,研究排土场植被恢复特征及其持水能力。根据乔木、灌木和草本的植株大小、长势、株行距、单株占地面积等指标,确定刺槐的标准地为 20 m×20 m,紫穗槐的标准地为 10 m×10 m,荒草地的标准地为 5 m×5 m,调查其植被恢复特征。具体概况见表 1。

表 1 试验地基本概况

植被类型	海拔/ m	平均 林龄/a	林木密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	平均胸径/ cm	平均树高/ m	平均冠幅/ m	林下优势种
乔木林地	263.3	8	1025	0.75	5.64±0.51a	6.14±0.25a	3.92±0.22a	狗尾草,灰菜,黄蒿,苕蒿
灌木林地	262.0	8	3200	0.75	2.02±0.30b	1.51±0.15b	1.56±0.24b	披碱草,黄蒿,白蒿,山苦荬
荒草地	258.8	—	—	—	—	—	—	苕蒿,棒头草,蒺藜,大刺菜,蒲公英

注:—表示无数据。

1.2 研究方法

1.2.1 枯落物调查及持水性测定 在标准地内,沿对角线布设 5 个面积为 1 m×1 m 小样方,根据枯落物的颜色和形态将其分为未分解层和分解层^[16],用钢尺分别测定枯落物层总厚度、未分解层厚度和分解层厚度,收集枯落物样品以测定枯落物层的鲜重、干重(恒温 85 ℃条件下烘干 24 h)并计算枯落物含水率,用单位面积干质量表征蓄积量。采用浸泡法测定枯落物的持水性能,计算枯落物持水量和拦蓄量等相关指标。具体步骤和指标计算详见参考文献^[17]。

1.2.2 土壤物理性质测定 用环刀(高为 5 cm、体积为 200 cm³ 的钢环刀)采集各个样地 0—10 cm 土层土壤样品和 2 kg 混合散样,带回实验室以测定土壤物理性质,每个指标 3 次重复。土壤含水率采用烘干法测定,土壤容重、孔隙度、饱和含水率和田间含水量均采用环刀法测定,土壤最大吸湿水采用饱和硫酸钾法测定,凋萎系数为最大吸湿水的 1.5 倍^[18]。砾石(>2 mm)质量含量采用水洗法测定,即将环刀内土壤置于 2 mm 土壤筛上用自来水进行冲洗,在冲洗过程中左右转动筛子,自然风干筛子里的砾石,称重以计算砾石含量。采用双

环入渗仪测定土壤水分入渗过程,其中以最初入渗 1 min 作为初始入渗率,单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率为稳定入渗率。

1.2.3 土壤蓄水能力测定 本文参照文献[19]计算各种土壤水库指标:

$$Q=R\times h\times S\tag{1}$$

式中:Q 为土壤水库库容(t/hm²);R 为土壤容重(g/cm³);h 为计算土层厚度(cm),本研究为 10 cm;S 为土层含水百分率(%)。当 S 分别为土壤饱和含水率、凋萎系数、田间持水量与凋萎系数之差、饱和含水率与田间持水量之差、饱和含水率与凋萎系数之差、天然含水率时,对应的土壤水库为土壤总库容、死库容、兴利库容、滞洪库容、最大有效库容、土壤实际库容;土壤水库持水效率是实际水库与总水库的比值,反映了土壤水库的利用效率、土壤水库功能的优劣情况。

1.2.4 排土场持水能力评价方法 从单一的角度分析与评价排土场不同植被类型持水能力具有一定的偶然性和片面性,但用全部指标来评价不仅复杂麻烦,而且不能避免指标之间的相关性。因此,采用主成分分析来评价排土场不同植被类型持水能力。主成分分析多用于从多个实测的原变量中提取少数的、互不相关的、抽象的综合指标以达到对对象定性评价的作用,通过寻找几个变量来反映所有变量的大部分信息,既能减少变量,又能包含大部分信息量。

2 结果与分析

2.1 枯落物持水能力

森林枯落物是覆盖在林地表层土壤上新鲜、半分解的植物凋落物,是植物地上各部分器官的枯死、脱落物的总称^[20],可以有效地拦蓄降雨、降低雨滴击溅作用、阻延分散地表径流、抑制水分蒸发^[21]。由表 2 可知,乔木林地、灌木林地和荒草地的枯落物厚度依次为 1.80,1.23,0.83 cm,枯落物蓄积量依次为 6.76,2.96,0.58 t/hm²,两者均表现为乔木林地>灌木林地>荒草地。经方差分析可知,不同植被类型枯落物蓄积量差异显著(P<0.05),这是因为不同林分树种的生长状况、林木生

产力、光合作用、水热条件、林下微环境、人为活动等条件存在差异,进而影响枯落物的厚度和蓄积量。乔木和灌木林地的树种长势良好,枝叶繁密,枯落物生产量大,为枯落物层的形成提供物质基础。

枯落物持水能力是森林生态系统水分循环中的重要环节^[22],一般用持水率、持水量、拦蓄率和拦蓄量等指标反映^[17]。由表 2 可知,不同植被类型的最大持水率为乔木林地>荒草地>灌木林地,最大持水量则表现为乔木林地>灌木林地>荒草地,3 个样地枯落物最多可以吸收的水分是自身质量的 1.5~2.1 倍。无论是最大持水率还是最大持水量,均为乔木林地最大。灌木林地的最大持水率虽然小于荒草地,但是其蓄积量却大于荒草地,致使灌木林地的最大持水量大于荒草地,这不仅与枯落物自身特性、分解程度、吸水面积、持水能力有关,而且还与枯落物的厚度和蓄积量有关。枯落物的持水能力高于其对降雨径流的实际拦蓄能力,不能准确反映枯落物的拦蓄能力,因此常用有效拦蓄率和有效拦蓄量评价枯落物对降雨的实际拦蓄效果。不同植被类型有效拦蓄量为乔木林地(107.31 t/hm²)>灌木林地(74.80 t/hm²)>荒草地(6.73 t/hm²),其变化规律与最大持水量和最大拦蓄量相一致。乔木林地的有效拦蓄能力最强,可拦蓄 10.73 mm 降雨,而荒草地则较少,仅为 0.67 mm。说明乔木林地枯落物不仅具有较高的持水能力,其实际的拦蓄径流能力也较强。

综合以上分析,乔木林地枯落物的持水能力和拦蓄能力较强,灌木林地次之,荒草地最弱。然而,复垦初期的排土场生态环境较为恶劣,水分条件较差,且乔木树种对土壤水分的要求较高,植物可能会出现缺水、甚至死亡的现象。因此,在排土场复垦初期可优先选择草本或灌草结合,降低溅蚀和径流侵蚀,提高排土场抗侵蚀能力;待排土场水分条件和生态环境改善后(可充分为乔木正常生长提供所需水分),考虑乔木树种,也可乔木或灌木为主、草本为辅,达到排土场蓄水保土和生态景观的作用。

表 2 枯落物蓄积量和持水能力

植被类型	厚度/cm	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	最大持水率/ %	最大持水量/ (t·hm ⁻²)	最大拦蓄率/ %	最大拦蓄量/ (t·hm ⁻²)	有效拦蓄率/ %	有效拦蓄量/ (t·hm ⁻²)	有效拦 蓄深/mm
乔木林地	1.80±0.17a	6.76±0.37a	211.19±7.53a	135.66±2.68a	200.48±4.56a	127.65±2.96a	168.80±3.45a	107.31±2.66a	10.73
灌木林地	1.23±0.23b	2.96±0.79b	150.39±17.85b	91.41±19.13b	145.98±16.90b	88.51±19.00b	74.80±16.13c	74.80±16.13b	7.48
荒草地	0.83±0.12c	0.58±0.17c	163.07±23.90b	9.33±2.92c	140.56±20.51b	8.13±3.00c	116.10±17.29b	6.73±2.56c	0.67

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2 土壤物理性质及入渗特征

土壤是生态系统中的水分循环和贮存的主要场所,其物质组成、土壤结构、孔隙特征是影响土壤蓄水能力的主要原因^[23]。由于复垦植被类型、枯落物层

特性、根系生长发育特征的差异性,其土壤容重和孔隙特征也不同。土壤容重是土壤物理性质的重要指标之一,反映了土壤的松紧程度,其数值大小直接影响着土壤通气性、透水性和持水性^[24]。由表 3 可知,不同

植被类型土壤容重依次为荒草地(1.29 g/cm³)>灌木林地(1.27 g/cm³)>乔木林地(1.19 g/cm³)。相比于灌木林地和荒草地,乔木林地土壤容重较小,土壤结构疏松多孔,这不仅降低植物根系生长、穿插的困难性,提高地表径流入渗能力,也增大土壤贮存植物生长所需水分的空间,为复垦植物的正常生长提供水分保障。土壤总孔隙度由土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度组成。毛管孔隙度反映土壤的蓄水能力,用于维持植物的生长发育;非毛管孔隙度反映土壤的通气透水能力,为土壤水分的暂时贮存提供空间,起到削减洪峰的作用^[25]。不同植被类型的毛管孔隙度为 37.37%~40.17%,各样地之间无显著差异($P>0.05$);非毛管孔隙度为 11.74%~14.54%,灌木林地显著小于乔木林地和荒草地($P<0.05$),这在一定程度上降低灌木林地的渗透能力,导致地表径流的汇集和冲刷,进而加大水土流失。因此,在土地复垦工作中应重点考虑排土场土壤结构,合理控制毛管孔隙

度和非毛管孔隙度的比例,以最大程度地蓄水保土。

土壤水分入渗是土壤水文循环中的一个重要环节,是土壤水库中水分的主要来源,常用初始入渗率、稳定入渗率和渗透总量来反映土壤入渗能力^[26]。由表 3 可知,乔木林地、灌木林地的土壤入渗能力与荒草地差异显著($P<0.05$),其初始入渗率、稳定入渗率和渗透总量分别为 1.53~4.08 mm/min、0.20~1.51 mm/min 和 28~133 mL,均表现为乔木林地>灌木林地>荒草地,乔木林地的入渗特征值分别是荒草地的 2.67,7.55,4.75 倍。这是由于乔木林地土壤容重小,结构松散,且较为发达的植物根系为土壤水分入渗提供优先路径。各个样地的砾石含量均较高,改变了土壤结构,促进土壤水分入渗。然而,若是发生在排土场边坡处,在土体裂缝或大孔隙的作用下,大量的地表径流汇集、涌入排土场土体内部,会降低土体抗剪强度,进而诱发滑坡、泥石流等水土流失灾害。

表 3 土壤物理性质及入渗特征

植被类型	初始 含水率/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	砾石 含量/%	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	渗透 总量/mL
乔木林地	11.42±3.21a	1.19±0.20b	40.17±3.01a	14.54±1.81a	66.53±0.99a	4.08±0.57a	1.51±0.21a	133±19a
灌木林地	10.75±2.84a	1.27±0.30a	40.14±2.39a	11.74±0.71b	59.65±1.98b	3.57±0.55a	1.22±0.13a	113±7a
荒草地	9.65±3.01a	1.29±0.20a	37.37±2.78a	14.35±0.99a	50.65±2.99c	1.53±0.36b	0.20±0.06b	28±5b

2.3 土壤水库特征

土壤是布满大大小小孔隙的疏松多孔体,具有明显的存贮、调节水分的功能,称之为土壤水库^[27],起到了拦截洪水和蓄水保土的重要作用。土壤水库总库容由死库容、兴利库容和滞洪库容组成,其中兴利库容和滞洪库容构成最大有效库容。总库容是土壤拦蓄水分的最大能力,反映土壤调节水分循环和水土保持的功能。由表 4 可知,不同样地的总库容差异显著($P<0.05$),大小依次为灌木林地>荒草地>乔木林地;灌木林地拦蓄径流的能力较强,而乔木林地总库容较小是因为其土壤容重偏小,致使其总库容相对较小。兴利库容表征土壤水库长时间拦蓄和贮存水分的能力,是植物吸水的主要来源,对削减洪峰具有重要意义。乔木林地、灌木林地和荒草地的兴利库容

分别为 288.77,257.06,294.61 t/hm²,荒草地高于乔木林地和灌木林地,这说明乔木林地和灌木林地提供植物生长所需水分的能力较弱,也间接证明乔木林地和灌木林地的需水量较大。

滞洪库容表征土壤临时贮存水分的能力,可以短暂调节强降雨或长期降雨所产生的地表径流。各样地滞洪库容差异显著($P<0.05$),其变化规律与总库容相一致,灌木林地临时蓄水能力比较强。乔木林地、灌木林地和荒草地的实际库容分别为 135.51,172.41,124.71 t/hm²,灌木林地的实际蓄水效果显著优于乔木林地和荒草地($P<0.05$)。乔木林地和灌木林地的水库持水效率显著高于荒草地($P<0.05$),其水库持水效率分别为荒草地的 1.19 和 1.31 倍,说明林地持水效率优于草地。

表 4 排土场土壤蓄水特征

植被类型	总库容/ (t·hm ⁻²)	死库容/ (t·hm ⁻²)	兴利库容/ (t·hm ⁻²)	滞洪库容/ (t·hm ⁻²)	最大有效库容/ (t·hm ⁻²)	实际水库/ (t·hm ⁻²)	水库持水 效率/%
乔木林地	545.62±16.72c	42.08±2.31b	288.77±6.57a	214.78±10.38c	503.54±19.63b	135.51±7.63b	24.84±5.64a
灌木林地	631.43±11.85a	53.16±3.54a	257.06±13.07b	321.22±7.58a	578.26±7.88a	172.41±13.21a	27.31±2.38a
荒草地	598.86±1.48b	39.46±1.87b	294.61±5.66a	264.78±8.64b	559.39±5.92a	124.71±5.66b	20.83±4.23b

2.4 持水能力评价

排土场持水能力是枯落物层和土壤层共同作用的结果。枯落物层可以有效地降低溅蚀、拦蓄径流,形成地表保护层来维持土壤结构的稳定性;土壤层是

植被蓄水保土的主体,其土壤结构直接影响土壤持水能力,主要表现为土壤的渗透性能和贮水能力。因此,本文选取选取枯落物厚度(X_1)、枯落物蓄积量(X_2)、枯落物最大持水率(X_3)、枯落物最大持水量

(X_4)、枯落物有效拦蓄量(X_5)、土壤容重(X_6)、毛管孔隙度(X_7)、非毛管孔隙度(X_8)、砾石含量(X_9)、稳定入渗率(X_{10})、渗透总量(X_{11})、土壤总库容(X_{12})、实际库容(X_{13})、兴利库容(X_{14})、最大有效库容(X_{15})作为评价指标,运用主成分分析方法对排土场复垦区的持水能力进行评价,揭示排土场不同植被类型持水能力的优劣程度。由表 5 可知,经降维处理后筛选出 3 个主成分(F_1 、 F_2 、 F_3),其贡献率大小依次为 F_1 (53.526%)> F_2 (31.441%)> F_3 (11.865%),累计贡献率为 96.832%,信息损失量很少,几乎解释整个总方差;3 个主成分的特征根分别为 8.029,4.716,1.780,其数值均大于 1,说明用这 3 个主成分来表征 15 个评价指标是合理的。

表 5 排土场持水能力评价的总方差分析

主成分	未旋转平方和载入			旋转平方和载入		
	特征根	贡献率	累计贡献率	特征根	贡献率	累计贡献率
1	8.029	53.526	53.526	6.149	40.996	40.996
2	4.716	31.441	84.967	5.348	35.651	76.646
3	1.780	11.865	96.832	3.028	20.185	96.832

表 6 为未旋转的主成分矩阵,将表 6 中的数据除以主成分相应特征值的开平方值,便得到主成分中每

表 6 排土场持水能力评价中未旋转的主成分矩阵

主成分	指标														
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
F_1	0.937	0.977	0.822	0.879	0.863	-0.877	0.363	0.280	0.649	0.806	0.788	-0.782	-0.066	0.133	-0.836
F_2	0.162	0.150	-0.399	0.448	0.477	0.257	0.462	-0.651	-0.681	0.576	0.600	0.589	0.968	-0.846	0.472
F_3	-0.117	-0.080	-0.107	0.018	0.033	0.388	0.798	0.678	0.311	0.119	0.109	0.179	0.216	0.489	0.242

由表 7 可知,排土场各样地持水能力综合得分为乔木林地(1.938)>灌木林地(0.040)>荒草地(-1.978),即持水能力优劣依次为乔木林地>灌木林地>荒草地。因此,从排土场持水能力角度考虑,在今后排土场复垦工作中可考虑选择乔木树种。

表 7 排土场不同植被类型持水能力评价主成分分析综合指数

植被类型	主成分			综合得分	排序
	F_1	F_2	F_3		
乔木林地	重复 1	1.921	2.057	0.630	1.807
	重复 2	3.670	0.544	1.807	2.427
	重复 3	0.659	3.986	-0.640	1.580
灌木林地	重复 1	1.188	-2.020	-1.232	-0.150
	重复 2	2.691	-3.236	-0.180	0.415
	重复 3	0.267	-0.020	-2.333	-0.145
	重复 1	-3.451	-0.671	0.616	-2.050
荒草地	重复 2	-2.501	-1.346	1.643	-1.618
	重复 3	-4.445	0.706	-0.311	-2.266

3 讨论

3.1 排土场枯落物层持水能力

森林生态系统中 3 个水文作用层依次为植被层、枯落物层和土壤层^[16],其中枯落物层不仅可以有效地降低雨滴动能、截留降雨、增加地表粗糙度^[28-29],还

个指标对应的特征向量,进而得到以下 3 个主成分表达式。

$$F_1 = 0.331X_1 + 0.345X_2 + 0.290X_3 + 0.310X_4 + 0.305X_5 - 0.309X_6 + 0.128X_7 + 0.099X_8 + 0.229X_9 + 0.284_{10} + 0.278X_{11} - 0.276X_{12} - 0.023X_{13} - 0.047X_{14} - 0.295X_{15}$$

$$F_2 = 0.075X_1 + 0.069X_2 - 0.184X_3 + 0.207X_4 + 0.219X_5 + 0.118X_6 + 0.213X_7 - 0.300X_8 - 0.314X_9 + 0.265X_{10} + 0.276X_{11} + 0.271X_{12} + 0.446X_{13} - 0.390X_{14} + 0.217X_{15}$$

$$F_3 = -0.087X_1 - 0.060X_2 - 0.080X_3 + 0.014X_4 + 0.025X_5 + 0.291X_6 + 0.598X_7 + 0.508X_8 + 0.233X_9 + 0.089X_{10} + 0.082X_{11} + 0.134X_{12} + 0.162X_{13} + 0.366X_{14} + 0.181X_{15}$$

根据各主成分得分及其权重,按照公式(2)计算排土场持水能力评价的综合指数(表 7)。

$$F = \frac{8.029}{8.029 + 4.716 + 1.78} F_1 + \frac{4.716}{8.029 + 4.716 + 1.78} F_2 + \frac{1.78}{8.029 + 4.716 + 1.78} F_3 \quad (2)$$

能促进水分入渗、调控坡面产流产沙^[30-31]。枯落物厚度和蓄积量是表征枯落物特性的重要指标,与枯落物的持水能力和拦蓄能力关系密切。栾莉莉等^[32]认为枯落物蓄积量与植被类型显著相关,且表现为乔木群落(4.4~8.4 t/hm²)>灌木群落(1.06~2.18 t/hm²)>草本群落(0.12~0.68 t/hm²)。时忠杰等^[33]研究表明,六盘山主要森林类型的枯落物蓄积量达 4.87~30.86 t/hm²,枯落物蓄积量和持水能力均表现为针叶林>阔叶林>灌丛。本研究表明,3 个样地枯落物蓄积量表现为乔木林地>灌木林地>荒草地,乔木林地是灌木林地和荒草地的 2.29 和 11.66 倍,其蓄积量与辽宁省阜新市海棠山自然保护区的枯落物蓄积量无显著差异(海棠山自然保护区 6 种林分枯落物蓄积量为 3.68~12.46 t/hm²),但仍然低于海棠山自然保护区,这不仅与林木类型、林龄及生长特性等有关,更与排土场和海棠山立地条件的差异有关。排土场土壤水分亏缺、养分贫瘠、重金属污染严重,不能为植被生长提供更好的生态环境,导致地表枯落物较少。吕刚等^[17]认为排土场复垦植被枯落物的分解能力较差,枯落物以未分解层为主。本文分析了排土场复垦植物枯落物的蓄积量和持水能力,但研

研究对象仅为乔木、灌木和草地 3 种单一植被类型,且未揭示枯落物分解层和未分解层持水能力的差异性、不同林型枯落物分解周期特征及其对持水能力的影响,今后应加强乔灌混交、乔灌草混交、针阔叶混交林等多种林型枯落物蓄积量、持水能力以及枯落物分解程度对其持水能力的影响等方面的研究。

3.2 排土场土壤层持水能力

土壤层是土壤水分入渗和贮存的重要场所,其透水能力和蓄水能力是反映森林涵养水源功能的重要指标,体现了土壤层对降雨的动态调蓄能力(渗透能力)和静态调蓄能力(蓄水能力)2 个方面^[28]。Clark 等^[8]研究了美国某露天煤矿复垦林地(14 a)和草地(14 a)入渗特征,认为林地的土壤入渗率显著大于草地,林木根系对土壤渗透性能影响显著。吕春娟等^[15]观测到排土场复垦区刺槐林地的径流系数仅为 17.62%,极大程度地提高了排土场入渗能力。从本研究上看,乔木林地的初始入渗率、稳定入渗率、渗透总量分别为荒草地的 2.67、7.55、4.75 倍,林地土壤的入渗能力得到了显著提高。排土场土壤持水能力不仅与土壤类型、孔隙结构及土壤理化性质有关,而且还与植被恢复类型关系密切。任志胜等^[10]研究了排土场不同复配方式人工新构土体水分时空变化规律,认为排土场土体年内变化周期可分为雨季丰水期和旱季贫水期,风化煤加大了土壤水分的蒸发损失,而砒砂岩却可以增加土体剖面持水能力。吕春娟等^[15]认为林地的饱和蓄水量大于草地,通过合理地筛选排土场复垦植物树种可以有效地提高排土场土壤蓄水能力。从本研究上看,灌木林地拦蓄径流的能力和实际蓄水能力要优于荒草地,不仅可以增加入渗、减少地表径流,还能贮存大量水分,保证植物的正常生长。本研究从枯落物层和土壤层对排土场不同植被类型的持水能力进行初探,但未涉及林冠层,林冠层可以截留降雨、削弱降雨侵蚀力,今后应加强这一方面的研究。

4 结论

(1)枯落物可以有效地拦蓄地表径流。不同植被类型枯落物的厚度和蓄积量均表现为乔木林地>灌木林地>荒草地,各个样地均可以较为有效地降低溅蚀;乔木林地枯落物的持水能力和拦蓄能力最好,可最大程度地拦蓄降雨和地表径流,其最大持水率可达 211%。乔木林地的有效拦蓄率和有效拦蓄量最大,可拦蓄 10.73 mm 降雨。

(2)排土场不同植被类型的土壤渗透性和持水性差异显著,这与各个样地的土壤容重和孔隙结构关系密切。荒草地土壤容重显著大于乔木林地,不利于植被生长和水分入渗,在一定程度上加大了水土流失发生的可能性。乔木林地入渗性能优于灌木林地和荒

草地,可贮存更多水分,为植物生长提供保证。

(3)利用主成分分析方法评价排土场持水能力的优劣程度是合理有效的,可综合反映排土场枯落物层和土壤层持水能力。主成分分析筛选出 3 个主成分,其累计贡献率为 96.832%,排土场各样地持水能力综合得分最高的是乔木林地,其次为灌木林地,荒草地最差。因此,在今后排土场复垦工作中可考虑选择乔木树种。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国土资源部. 2016 年中国矿产资源报告[R]. 北京:地质出版社,2016.
- [2] 谷裕,王金满,刘慧娟,等. 干旱半干旱煤矿区土壤含水率研究进展[J]. 灌溉排水学报,2016,35(4):81-86.
- [3] Jackson S T, Hobbs R J. Ecological restoration in the light of ecological history[J]. Science,2009,325(5940):567.
- [4] 魏忠义,白中科. 露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J]. 煤炭学报,2003,28(5):486-490.
- [5] Suding K N, Hobbs R J. Threshold models in restoration and conservation: A developing framework [J]. Trends in Ecology and Evolution,2009,24(5):271-279.
- [6] Cerqueira B, Vega F A, Silva L F O, et al. Effects of vegetation on chemical and mineralogical characteristics of soils developed on a decantation bank from a copper mine[J]. Science of the Total Environment,2012,421(8):220-229.
- [7] Mukhopadhyay S, Maiti S K, Masto R E. Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land[J]. Ecological Engineering,2013,57(8):133-142.
- [8] Clark E V, Zipper C E. Vegetation influences near-surface hydrological characteristics on a surface coal mine in eastern USA[J]. Catena,2016,139(4):241-249.
- [9] Heras M D L, Merino-Martín L, Nicolau J M. Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-continental climate[J]. Catena,2009,77(1):39-47.
- [10] 任志胜,申卫博,解倩,等. 砒砂岩区排土场新构土体保水效应研究[J]. 土壤学报,2016,53(5):1148-1159.
- [11] 唐骏,党廷辉,薛江,等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. 生态学报,2016,36(16):5067-5077.
- [12] 文月荣,党廷辉,唐骏,等. 不同林地恢复模式下露天煤矿排土场土壤有机碳分布特征[J]. 应用生态学报,2016,27(1):83-90.
- [13] 王晓琳,王丽梅,张晓媛,等. 不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分 16 a 恢复程度的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(9):198-203.
- [14] 王晶,魏忠义,抚顺西露天矿西排土场不同土地利用方式下生态环境效益分析[J]. 中国土地科学,2012,26(11):74-79.