

干旱荒漠区排矸场不同覆盖类型对土壤水分蒸发的影响

珊丹¹, 荣浩¹, 刘艳萍¹, 梁占岐¹, 张欣¹, 石红标²

(1. 水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古, 呼和浩特 010020; 2. 乌拉特前旗自然资源管理局, 内蒙古, 巴彦淖尔市 014400)

摘要: [目的] 在水分匮乏的干旱荒漠区煤矿废弃地植被恢复过程中, 研究不同边坡覆盖模式对土壤水分蒸发的影响, 为干旱荒漠区矿区废弃地生态恢复模式优化与完善植被恢复技术提供科学依据。[方法] 以中国西北干旱荒漠区煤炭基地废弃地——排矸场为研究对象, 研究不同覆盖类型排矸场边坡土壤水分蒸发和表层土壤水分的变化。试验设置了草帘、生态毯和液态地膜 3 种覆盖类型, 以无覆盖为对照。[结果] 干旱荒漠区煤矿排矸场边坡表层土壤含水量基本呈随着坡位降低而增加的变化规律; 蒸发试验进行初期各覆盖处理的土壤日蒸发量较大, 随着时间推移日蒸发量逐渐降低, 草帘覆盖下的平均土壤日蒸发量最低, 与无覆盖处理之间的变化差异达到显著水平 ($p < 0.05$); 3 种覆盖与无覆盖处理下的土壤水分累积蒸发量在排矸场边坡的不同坡位均表现出逐步上升的规律, 无覆盖措施的土壤累积蒸发量增加较明显, 草帘覆盖、液膜覆盖和生态毯覆盖措施下的土壤累积蒸发量分别比无覆盖措施减少了 38.4%, 24.2% 和 20.6%, 坡面覆盖处理的土壤累积蒸发过程符合线性函数关系。[结论] 在草帘、生态毯和液态地膜 3 种覆盖类型中, 草帘覆盖下的土壤含水量较高, 草帘是减少边坡表层土壤水分蒸发量最为适合的覆盖措施。

关键词: 边坡; 覆盖物; 土壤水分蒸发; 土壤含水量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0015-06

中图分类号: S157.2

文献参数: 珊丹, 荣浩, 刘艳萍, 等. 干旱荒漠区排矸场不同覆盖类型对土壤水分蒸发的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 15-20. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.003; Shan Dan, Rong Hao, Liu Yanping, et al. Effects of different mulching modes on soil moisture evaporation at gangue fields in arid desert regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 15-20.

Effects of Different Mulching Modes on Soil Moisture Evaporation at Gangue Fields in Arid Desert Regions

Shan Dan¹, Rong Hao¹, Liu Yanping¹, Liang Zhanqi¹, Zhang Xin¹, Shi Hongbiao²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources of China, Hohhot,

Inner Mongolia 010020, China; 2. Natural Resources Authority, Wulateqian Qi, Bayannur, Inner Mongolia 014400, China)

Abstract: [Objective] The effects of different mulching modes on soil water evaporation were studied during the vegetation restoration of a coal mine wasteland in an arid desert area in order to provide a scientific basis for the optimization of the ecological restoration model of abandoned land in arid desert areas, and for the improvement of vegetation restoration technology. [Methods] The influence of different mulching modes on the evaporation of soil moisture and the soil moisture content were investigated on a dump slope of a gangue field in an arid desert region. Bare land was used as a control. The tested mulching modes included straw curtain mulching, eco-mat mulching, and liquid film mulching. [Results] The moisture content of surface soil increased with a decrease in the slope position of the dump slope. The daily evaporation capacity of the soil was relatively high during the early evaporation period, but decreased gradually over time. The average daily evaporation capacity of the soil was the lowest for the straw curtain mulching mode, which differed

收稿日期: 2020-05-09

修回日期: 2020-07-07

资助项目: 国家重点研发计划项目“西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术”(2017YFC0504405); 内蒙古自治区科技重大专项项目“重点区域荒漠化过程与生态修复研究与示范”(zdx2018058)

第一作者: 珊丹(1978—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 高级工程师, 主要从事草地生态与水土保持研究。Email: mksshd@126.com.

significantly ($p < 0.05$) from that of bare land. The cumulative evaporation capacity of the soil increased gradually at different slope positions of the dump slope under the different mulching modes. The cumulative evaporation capacity of the soil in the bare land substantially increased. The cumulative evaporation capacity of soil under the straw curtain mulching, liquid film mulching, and eco-mat mulching modes decreased by 38.4%, 24.2%, and 20.6%, respectively, compared with that of the bare land. There was a linear relationship between the cumulative evaporation capacity of the soil and time under the different mulching modes. [Conclusion] The moisture content under the straw curtain mulching mode was higher than that under the liquid film and eco-mat mulching modes. Straw curtain mulching could provide the most reasonable mulching model for the dump slope of the gangue field.

Keywords: dump slope; mulching; soil moisture evaporation; soil water content

干旱荒漠区煤炭等矿产资源开采后形成的废弃地,地貌形态、土体结构、生物种群均遭到严重破坏,极易引发剧烈的水土流失,在这样一个生态系统极度退化的状态下,进行植被恢复与重建是一项长期、艰巨的工程^[1]。如何恢复矿区废弃地植被与土壤,使修复后的生态系统与水土保持功能逐渐增强已成为当前矿区生态系统恢复和土地复垦研究中的重要内容。目前,对于矿区废弃地植被恢复与重建的研究主要集中在植物物种选配及其适应性、植被恢复多样性变化、生态恢复效果与水土保持效应、植被恢复与土壤环境相互关系、植被恢复类型的持水性能等诸多方面^[2-5],以上研究均是以人工植被配置模式或天然植被类型为基础,通过营建植物种群和生态系统,为微生物、植被和动物提供一个原生生态环境。

在干旱半干旱地区,受水分制约以及人类活动等诸多因素的影响,植被恢复不可能达到理想的覆盖状态^[6],特别是对于气候条件相对恶劣的干旱荒漠区的煤矿废弃地,立地条件困难,植物生长受限,期间不可避免的会遇到强降雨和径流侵蚀,生态恢复周期延长^[7]。植被建设过程中,铺盖临时覆盖物,如草帘子、无纺布、枯枝落叶等可以抑制土壤蒸发、有效保持土壤水分、防止径流、减少土壤侵蚀,目前已成为较常用的水土保持措施^[8-10]。利用覆盖物防治边坡目前已应用到公路、铁路、工业厂区等生产建设项目的水土流失防治中,这些生产建设项目采取的坡面覆盖措施多以维持边坡稳定、维护主体安全为目的,并且采取覆盖措施的坡面一般坡长较短、坡度较缓,而对于矿产资源开采形成的废弃地——排矸场的高陡边坡采用覆盖措施进行生态恢复的相关研究还相对较少;另一方面,目前已取得的不同覆盖类型对土壤水分蒸发影响等方面的研究成果多集中于大田农业生产,并且大部分以室内模拟试验为主^[11-13],很少涉及坡面采取覆盖措施下的土壤水分蒸发变化研究,受坡度、坡位、坡长、坡向等因素的影响,坡面的土壤水分分布、土壤蒸发以及入渗等特点均与平地存在不同程度的差异,

以往的研究成果是否适用于坡面覆盖条件下土壤水分蒸发变化规律还有待进一步验证。因此,本文在水分匮乏的干旱荒漠区煤矿废弃地植被恢复过程中,研究不同边坡覆盖模式对土壤水分蒸发的影响,确定不同覆盖材料对土壤蒸发的抑制效果,将为干旱荒漠区矿区废弃地生态恢复模式优化与完善植被恢复技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

羊场湾煤矿位于宁夏回族自治区灵武市宁东镇境内,开采规模 3.00×10^6 t/a,井田南北长 6.4 km,东西宽 12.8 km,面积 51.6 km²。试验区位于羊场湾煤矿排矸场,排矸场位于矿井工业场地东北约 3.5 km,属于流动和半流动沙地低凹处,占地面积 18.0 hm²。排矸场平台、边坡为煤矸石与土混排后覆土,形成覆土坡,覆土深度 30~50 cm,排矸场边坡平均长度 12 m,坡度 23°。试验区地处毛乌素沙漠边缘地带,属中温带干旱半干旱大陆性气候,多年平均降水量 157.3 mm,多年平均蒸发量 2 682.2 mm,年平均气温 9.4 °C,土壤主要是灰钙土和风沙土,土壤腐殖质积累很低。试验区以荒漠草原植被为主,优势种主要有油蒿(*Artemisia ordosica*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、川青锦鸡儿(*Caragana tibetica*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)等,植被稀疏,植被盖度 25%~30%^[14]。

1.2 试验方法

1.2.1 覆盖措施基本情况 在已进行覆土平整后的排矸场边坡种植草木樨、冰草,牧草种植后分别采用 3 种覆盖材料沿排矸场坡面进行整体覆盖,同时以无覆盖作为对照,覆盖物厚度约 1~2 cm,各覆盖试验区面积 48 m²(12 m×4 m),小区间距 0.5 m。小区间隔内沿坡面修建简易步道,便于试验方案的实施,同时又尽可能的避免采样等人为活动对试验区的扰动。边坡覆盖的具体措施配置见表 1。

表 1 不同覆盖类型配置

覆盖材料	技术要点	植被配置
草帘	以稻草秸秆等为原料经过简易草帘机加工成宽 1 m 的草帘卷;种草后铺设草帘,将草帘在排矸场边坡由上而下顺坡铺平、固定。	
生态毯	一种环保型边坡绿化护坡材料,采用天然植物纤维层、一定强度的拉伸网一次性制成,网孔密集且大小合理,各类草籽能顺利穿出生长(规格 2 m×30 m);将排矸场边坡修整、种草后,由上而下顺坡铺平、固定。	草木樨(<i>Melilotus suaveolens</i>)、冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)间作条播;播种量:草木樨 20 kg/hm ² ,冰草 25 kg/hm ²
液膜(液态地膜)	木质素、胶原蛋白等在交联剂的作用下形成高分子聚合物,与多种微生物肥、添加剂、土壤保水剂等经特殊加工而形成高分子聚合材料;液态地膜 1 袋(500 g)兑水 10~15 kg,可喷施 200 m ² ,采用喷雾器均匀喷施地表,6 h 不下雨干燥后可与土壤表层结合形成多分子层化学保护膜。	
对照	无覆盖措施。	

1.2.2 土壤水分蒸发量测定 利用自制微型蒸渗仪进行自然条件下的土壤蒸发试验。自制微型蒸渗仪为高 15 cm,内径 10 cm 的不锈钢圆柱筒,筒柱上沿配有提手,方便取出与放回;为了取出和放回微型蒸渗仪时不干扰周围土壤结构,以 PVC 为材料制成套筒,套筒内径稍大于微型蒸渗仪圆柱筒内径。操作时,使用锤子等工具将微型蒸渗仪从土壤表面垂直推进土壤,筒顶上沿的土壤表面与地面齐平,在不破坏筒内土壤的情况下取出装有原状土的微型蒸渗仪,用刀切平筒底部多余的土壤并用薄铁皮封底,随后将微型蒸渗仪放入套筒中,整体放入试验小区测定位置。每隔 24 h 取出微型蒸渗仪,称重后将其放置套筒内,两次称量的重量差即可换算为土壤蒸发(对该大小的微型蒸渗仪而言,1 g 的重量变化相当于 0.13 mm 的土壤蒸发量)^[15-18]。每个覆盖试验小区(草帘、生态毯和液态地膜)及对照小区内,沿坡面的坡上、坡中和坡下位随机各布设 3 个微型蒸渗仪,一个覆盖试验小区共放置 9 个微型蒸渗仪,蒸发试验从 2019 年 7 月 25 日开始到 7 月 31 日结束,共进行 7 d,每日上午 9:00 进行称重,蒸发试验进行期间内试验区无降水,平均气温 26.1 ℃,平均风速 2.38 m/s。

1.2.3 土壤含水量测定 利用自制微型蒸渗仪测定土壤水分蒸发量的同时,采用烘干法测定不同覆盖类型配置试验小区及对照小区内、微型蒸渗仪周边(以微型蒸渗仪为中心,半径 30 cm 范围内)土壤 0—15 cm 土层的土壤含水量。将土壤样品放入铝盒并密封,对土壤样品称重,105 ℃烘干 8 h 后,称重并计算土壤含水量。

采用 Excel 2013 进行数据统计和图表构建,SAS 9.0 统计软件进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖类型土壤表层含水量的变化

持续观测排矸场边坡不同覆盖类型下土壤表层

水分的变化结果(见图 1)表明,试验观测期间在无自然或人工降雨的条件下,排矸场边坡不同坡位、不同覆盖处理的土壤表层含水量随时间变化呈逐步降低的规律。各个覆盖处理下、边坡不同坡位的土壤含水量基本呈坡上部<坡中部<坡下部,平均值分别为 104.40,108.21,121.31 g/kg,土壤含水量随时间推移、沿坡位降低而减少的趋势并不明显。对比不同覆盖处理,草帘覆盖下的土壤含水量相对较高,平均为 143.56 g/kg,生态毯和液膜覆盖土壤含水量相近,分别为 114.90,110.09 g/kg,无覆盖的对照处理表层土壤水分含量最低(76.67 g/kg),说明排矸场边坡在生态恢复过程中,以草帘作为覆盖物更有利于保持表层土壤水分,生态毯和喷洒液膜覆盖措施对土壤水分的保持能力较为相近。

2.2 不同覆盖类型对土壤日蒸发量的影响

3 种覆盖与无覆盖处理的土壤日蒸发量变化见图 2。由图 2 可知,蒸发试验期间,覆盖处理和无覆盖处理的土壤日蒸发量变化规律基本一致,只是变化幅度上有所差异,蒸发试验初期土壤的日蒸发量较大,随着时间推移,各个覆盖类型的土壤日蒸发量逐渐降低。从排矸场边坡不同坡位来看,边坡下部的土壤日蒸发量最低,平均值比坡上、坡中的土壤日蒸发量减少 15.3%,9.3%。在排矸场边坡上部,整个蒸发过程中草帘、生态毯覆盖下的土壤日蒸发量较低,平均值分别为 0.79,0.82 mm,随时间推移土壤蒸发减少的趋势逐渐趋缓;液膜喷洒覆盖的日平均蒸发量为 0.92 mm,要高于草帘、生态毯两种覆盖措施,无覆盖的对照处理土壤日蒸发量最大,平均为 1.07 mm,无覆盖与草帘、生态毯两种覆盖措施之间的土壤日蒸发量变化差异达到显著水平($p < 0.05$);液膜覆盖和无覆盖处理的 4 d 与 5 d 的日蒸发量之间差异较大,有明显的下降,随后变化趋于稳定。排矸场边坡中部,各种覆盖处理土壤日蒸发均表现为逐步减少的规律,

日蒸发量由大到小依次为无覆盖>液膜>生态毯>草帘,边坡中部的各覆盖处理的平均土壤日蒸发量虽然有差异,但未达到差异显著性。排矸场边坡下部各种覆盖措施的土壤日蒸发量由大到小排序为无

覆盖>生态毯>液膜>草帘,草帘覆盖措施下的 1 d 到 7 d 期间日蒸发变化不明显,7 d 平均土壤日蒸发量为 0.48 mm,显著低于无覆盖处理(0.96 mm) ($p<0.05$)。

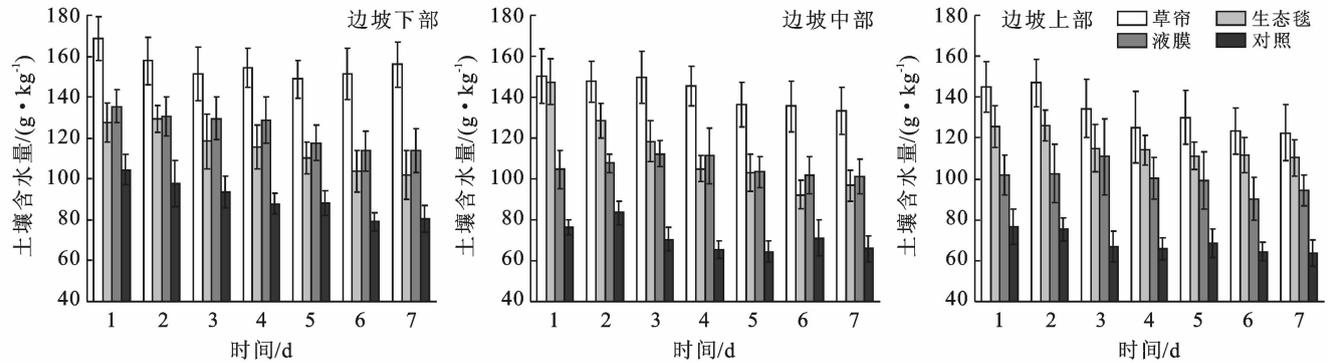


图 1 不同覆盖类型土壤含水量的变化

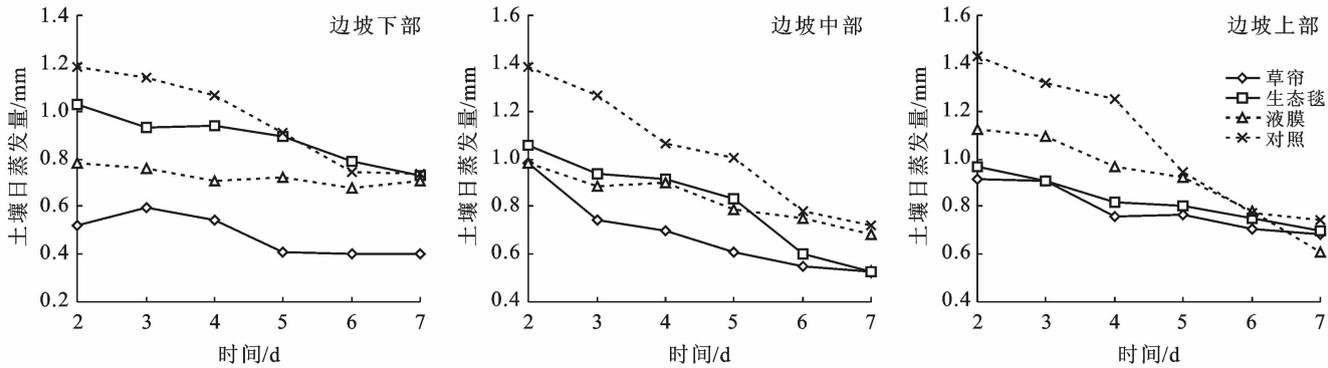


图 2 不同覆盖类型土壤日蒸发量的变化

2.3 不同覆盖类型对土壤累积蒸发量的影响

图 3 显示了不同覆盖处理下的土壤水分累积蒸发量随时间的动态变化过程,在排矸场边坡的不同坡位,3 种覆盖与无覆盖处理下的土壤水分累积蒸发量均表现出逐步上升的规律,与采取覆盖相比,无覆盖处理的土壤累积蒸发量增加趋势较明显,说明干旱荒漠区排矸场边坡植被恢复过程中,对土壤表层采取的覆盖措施对抑制土壤蒸发有一定的作用。在排矸场边坡上部,草帘覆盖与生态毯覆盖两种措施下的土壤累积蒸发量均较低,累积蒸发量分别为 17.42 mm, 18.24 mm,喷洒液膜覆盖后的土壤累积蒸发量为 20.98 mm,无覆盖措施下的土壤累积蒸发量最大,累积达到 25.27 mm;对比边坡中部不同覆盖措施下土壤累积蒸发量的变化发现,草帘覆盖下的土壤累积蒸发量最低(15.88 mm),液膜覆盖与生态毯覆盖的土壤累积蒸发量相近,分别为 18.42 mm,18.93 mm,无覆盖

措施下的土壤累积蒸发量依然最大(24.17 mm);在边坡下部,各个覆盖措施的土壤累积蒸发量由大到小依次为无覆盖(22.01 mm)>生态毯(19.51 mm)>液膜(15.54 mm)>草帘(10.69 mm)。排矸场边坡采取草帘覆盖、液膜覆盖、生态毯覆盖措施下的土壤累积蒸发量分别比无覆盖措施减少了 38.4%,24.2% 和 20.6%。

不同覆盖措施 1 d 到 7 d 土壤累积蒸发量与时间关系的拟合方程见表 2。从表 2 可以看出,排矸场边坡进行覆盖处理的土壤累积蒸发过程符合线性函数关系,可以通过方程 $y=ax+b$ 表示,式中, x,y 为蒸发天数(d)和土壤累积蒸发量(mm), a,b 为参数, R^2 值在 0.988 4~0.995 7 之间,线性关系反映出覆盖对土壤蒸发过程的影响,方程中 a 值、 b 值越大则土壤累积蒸发量越大。从表 2 中可以看出,采取草帘覆盖是抑制排矸场边坡土壤水分蒸发最为适合的覆盖措施。

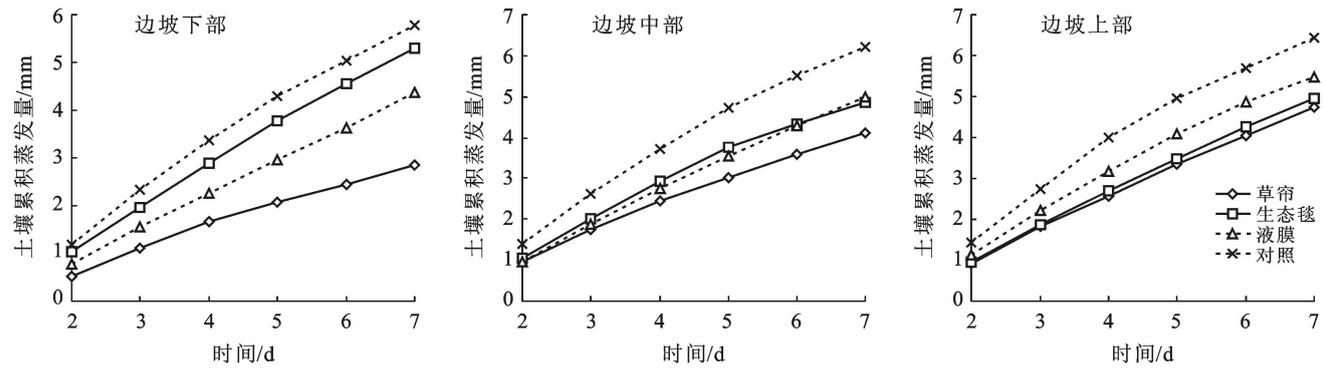


图3 不同覆盖类型土壤水分累积蒸发量的变化特征

表2 不同覆盖类型土壤累积蒸发量与时间的拟合方程

覆盖处理	拟合方程	决定系数 R^2
草帘	$y=0.614x+0.2962$	$R^2=0.9957$
生态毯	$y=0.807x+0.3233$	$R^2=0.9951$
液膜	$y=0.781x+0.2759$	$R^2=0.9953$
对照	$y=0.959x+0.6122$	$R^2=0.9884$

3 讨论

控制土壤有效蒸发对合理开发利用水资源、调控水分状况有重要作用,特别是对于干旱荒漠区煤矿排矸场这种大型的人工堆积体,土壤结构松散,稳定性差,有效水分含量偏低,土壤表面水分的蒸发是排矸场植被恢复重建的重要水分损失,在造成水资源浪费的同时,还会引起土壤盐渍化等问题。地表覆盖是减少土壤水分蒸发、提高水分利用效率较为有效的方法,长期以来,农业生产中广泛应用秸秆、砂石和地膜等材料作为覆盖物对地表形成保护层,以减少或降低土壤水分的无效蒸发,提高作物对水分的有效利用^[19]。排矸场边坡不同于一般意义上的坡耕地和原始地貌,其坡面的可蚀性是自然坡面的10~100倍^[20],侵蚀速率是撂荒地的43.60~180.13倍^[21],并且坡位、坡长和坡向的不同会引起坡面局部地形、土壤性状的空间变异^[22],因此排矸场边坡的植物恢复更为困难。本研究在干旱荒漠区排矸场边坡植被恢复过程中,采用了草帘、生态毯和液膜3种覆盖材料对坡面进行临时整体覆盖,研究结果表明采用覆盖措施后,土壤日蒸发量、土壤累积蒸发量均小于无覆盖措施,说明边坡采取覆盖措施能有效阻碍大气和土壤之间的水分交换,将土壤水分保存在土壤中,降低土壤水分的无效蒸发,另一方面,坡面覆盖物与土壤之间可以形成一个相对独立的土壤水分循环,覆盖物阻挡土壤水分的蒸发,土壤水分遇到覆盖物阻碍后会部分返回到土壤中,加强了土壤水分的横向运移,进而降低土壤水分损失。对比3种覆盖材料,草帘覆盖处理对土壤水

分累积蒸发量影响较大,其原因可能是以草帘作为覆盖物,其材质的紧实度高于生态毯和地膜,遮挡作用也相对较强,水汽从土壤表层穿过覆盖物孔隙散发到空气中的能力减弱,进而使蒸发速率减慢。冀宏等^[23]的研究也表明,覆盖物对水分有很大的吸附作用,而且覆盖物越厚,吸附能力越强,土壤水分蒸发越小。排矸场边坡不同覆盖处理下第1—7 d的土壤累积蒸发量与时间之间符合线性函数关系,赵文举等^[13]对不同覆盖模式1—7 d土壤水分累积蒸发量与时间的关系利用线性方程($W=a+bt, R^2=0.9860\sim 0.9974$)、指数方程($W=at^b, R^2=0.9304\sim 0.9971$)和对数方程($W=a+blnt, R^2=0.8484\sim 0.9171$)进行拟合,研究结果也表明 $W=a+bt$ 的拟合效果最好。根据赵文举等研究,在1—14 d不同覆盖处理下的土壤水分累积蒸发量与时间关系更符合 $W=at^b$,即随着时间推移,不同覆盖处理的土壤水分蒸发速率与无覆盖之间的差距会逐渐缩小。本研究由于受野外自然条件限制,蒸发试验共进行7 d,随着时间的延长,不同覆盖措施下土壤累积蒸发量与时间的关系是否还是线性方程($y=ax+b$)拟合效果最好的,还需进一步研究确认。

对土壤表层水分分析结果表明,排矸场土壤含水量由坡上部向坡下部有增加的趋势,主要原因,一是边坡上部受太阳辐射更多,温度相对较高,蒸发量大,导致土壤水分较低,其次,在重力作用下土壤水分随坡位的高低变化有由坡上向坡下汇集的作用,并且坡下植被比坡上、坡中部生长状况较好,在一定程度上对土壤水分涵养起到一定作用,造成坡下表层土壤含水量较高。答竹君等^[24]在研究道路边坡土壤水分空间和季节变异性分析中也发现,除了秋季(10月份),其他季节道路边坡的坡下土壤含水量均显著高于坡上和坡中,说明土壤水分在坡面不同位置上的变化有一定的规律性,坡面降水的再分配使其从坡上部到坡下部的土壤水分差异越来越大^[25]。根据土壤表层水

分在坡面不同坡位的分布规律,干旱荒漠区排矸场采用坡面覆盖措施抑制土壤水分蒸发时,从经济成本上考虑,可采取非坡面整体覆盖方式,在既能有效减少土壤蒸发量、保蓄土壤水分的同时,又能降低投资成本,但采取何种形式的非整体坡面覆盖还需进一步的深入研究探讨。

4 结论

(1) 3种覆盖类型下的土壤日蒸发量和土壤水分累积蒸发量均低于无覆盖处理,其中草帘覆盖下的平均土壤日蒸发量显著低于无覆盖处理($p < 0.05$),说明排矸场坡面采取覆盖措施对抑制土壤水分蒸发有一定作用。

(2) 自然条件下,在1—7 d坡面覆盖处理的土壤累积蒸发过程符合线性函数关系,可以通过方程 $y = ax + b$ 表示,对比3种覆盖材料,草帘覆盖下的土壤累积蒸发量最低,草帘是减少边坡土壤水分蒸发最为适合的覆盖措施。

(3) 干旱荒漠区煤矿排矸场边坡不同坡位的表层土壤水分含量有一定的变化规律,各个覆盖处理下的表层土壤含水量基本呈随着坡位降低而增加的趋势,对比3种覆盖类型,草帘覆盖下的土壤含水量较高,说明草帘覆盖更有利于保持表层土壤水分。

[参 考 文 献]

- [1] 卫智军,李青丰,贾鲜艳,等. 矿业废弃地的植被恢复与重建[J]. 水土保持学报,2003,17(4):172-175.
- [2] Krauss S L, Sinclair E A, Bussell J D, et al. An ecological genetic delineation of local seed-source provenance for ecological restoration[J]. *Ecology and Evolution*, 2013,3(7):2138-2149.
- [3] 张绍良,米家鑫,侯湖平,等. 矿山生态恢复研究进展:基于连续三届的世界生态恢复大会报告[J]. 生态学报,2018,38(15):5611-5619.
- [4] Guo Donggang, Zhao Bingqing, Shanguan Tieliang, et al. Dynamic parameters of plant communities partially reflect the soil quality improvement in eco-reclamation area of an opencast coal mine[J]. *Clean: Soil, Air, Water*, 2013,41:1018-1026.
- [5] 台培东,孙铁珩,贾宏宇,等. 草原地区露天矿排土场土地复垦技术研究[J]. 水土保持学报,2002,16(3):90-93.
- [6] Tongway D J, Valentin C, Seghieri J. Banded vegetation patterning in arid and semiarid environments[M]. New York, NY: Springer New York, 2001.
- [7] 杨勤学,赵冰清,郭东罡. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J]. 生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.
- [8] Hann M J, Morgan R P C. Evaluating erosion control measures for bioremediation between the time of soil reinstatement and vegetation establishment [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006,31(5):589-597.
- [9] Davies K, Fullen M A, Booth C A. A pilot project on the potential contribution of palm-mat geotextiles to soil conservation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006,31(5):561-569.
- [10] 骆汉,赵廷宁,彭贤锋,等. 公路边坡绿化覆盖物水土保持效果试验研究[J]. 农业工程学报,2013,29(5):63-70.
- [11] 蔡永坤,李毅,冯浩. 不同砂石覆盖度和粒径对土壤水分蒸发的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(6):273-277.
- [12] 赵永敢,王婧,李玉义,等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报,2013,29(23):109-117.
- [13] 赵文举,马宏,郁文,等. 不同覆盖模式对土壤水分蒸发的影响[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(6):539-544.
- [14] 周玉喜. 宁夏羊场湾煤矿水土保持设施及其技术评估[J]. 水土保持通报,2007,27(5):114-115.
- [15] 孙宏勇,刘昌明,张永强,等. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J]. 水利学报,2004,35(8):114-118.
- [16] 王双菊. 秸秆还田条件下潜水平深对土壤水分及蒸发的影响[D]. 江苏扬州:扬州大学,2013.
- [17] 杨宪龙,魏孝荣,邵明安. 不同规格微型蒸渗仪测定土壤蒸发的试验研究[J]. 土壤通报,2017,48(2):343-350.
- [18] 刘艳萍,珊丹,何京丽,等. 一种蒸渗仪:中国,ZL201921121002.0[P]. 2020-04-17.
- [19] 平全荣. 旱地农业覆盖栽培技术研究应用进展与展望[J]. 山西农业科学,2008,36(2):63-66.
- [20] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia [J]. *Applied Geography*, 1995,15(4):309-323.
- [21] 郭明明,王文龙,李建明,等. 神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测[J]. 土壤学报,2015,52(5):1044-1057.
- [22] 吕刚,刘雅卓,李叶鑫,等. 露天煤矿排土场边坡表层土壤水分物理性质空间变异特征[J]. 土壤通报,2018,49(1):69-77.
- [23] 冀宏,黄雄,郑健,等. 不同覆盖条件对土壤水分蒸发的影响[J]. 节水灌溉,2010(4):29-32.
- [24] 答竹君,艾应伟,宋婷,等. 道路边坡土壤水分空间和季节变异性分析[J]. 水土保持通报,2011,31(1):72-75.
- [25] 马风云,李新荣,张景光,等. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报,2006,17(5):789-795.