

晋陕蒙露天煤矿排土场不同新构土体土壤蒸发特征研究^①

任志胜¹, 解倩¹, 王彤彤¹, 王晓琳¹, 郭艳亮¹, 郑纪勇^{1,2*}, 张兴昌^{1,2}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

2 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室/中科院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为研究不同新构土体改良模式下的土壤蒸发特征, 采用微型蒸发器田间自然条件下测定土壤水分蒸发过程, 分析了不同土体重构模式的日蒸发量、累积蒸发量上差异。结果表明, 相对于沙黄土, 沙黄土、砒砂岩掺混(7:3, w/w)的新构土体土壤蒸发降低了14.81%($P < 0.05$), 风化煤对沙黄土蒸发特征无明显影响, 但显著提高了沙黄土、砒砂岩掺混的新构土体蒸发10.3%($P < 0.05$), 而砒砂岩防渗层和工业防水布等不同防渗措施土体之间蒸发差异不显著, 但防渗层可以有效截留水分在蒸发过程中较长时间供给土体。试验表明砒砂岩、防渗层等措施下的新构土体土壤蒸发较小, 并较长时间内保证土壤水分供给, 在旱区矿区排土场具有一定的实践推广意义。

关键词: 沙黄土; 砒砂岩; 风化煤; 新构土体; 土壤蒸发

中图分类号: S152.7

在鄂尔多斯高原、黄土高原交接的露天煤矿区, 高温干旱、蒸发强烈、水源稀少, 加之在干旱半干旱区地表不能完全被植被覆盖, 农田灌溉或自然降雨的绝大部分都通过土壤蒸散损失^[1-3], 所以在砒砂岩矿区排土场新构土体的首要目标就是减少土壤的无效蒸发提高水分利用效率, 如果土壤蒸发能够得到有效控制, 土体水分利用效率会大幅提升, 排土场农业生态恢复才有可能, 这也是破解煤田开发导致地表破坏、植被衰退等生态环境受损问题困境的重要途径^[4]。

晋陕蒙矿区作为我国重要的能源基地, 由于煤炭的大力开采而形成的大量排土场, 给当地带来了严重的生态和安全危机^[5-6]。而矿区主要的土壤类型是沙黄土和砒砂岩, 两者均不适合直接作为排土场新构土体, 但将两者混合后, 因砒砂岩中含大量保水性矿物蒙脱石, 砒砂岩的保水特性和沙土透水性结合, 可能产生一种新的土壤特性, 相比于沙黄土, 土壤蒸发较小, 水分利用效率得到提高^[7]。本课题组通过室内蒸发模拟试验进行了分析验证, 综合考虑土体的持水、供水能力, 认为沙黄土、砒砂岩7:3比例具有良好的改良潜质^[8-10], 本文所用土体复配方案均以此为基础。

土壤蒸发作为土壤-植物-大气水分交换过程中的重要组成部分, 是干旱半干旱地区土壤水分损失

的重要途径^[11-13], 其强度大小受多种因素制约, 如光照、地温、近地温湿度、土壤质地、冠层等, 而土壤含水量的多少直接关系到土壤蒸发能否得到水分补给而影响土壤蒸发强度^[12]。在减少土壤蒸发方面学者有许多研究成果, 如砾石、秸秆、固化剂, 均在抑制蒸发提高水分利用效率方面取得了一些效果^[14-16], 张磊等^[9,17]一些学者的室内试验证明沙黄土、砒砂岩新构土体蒸发弱于沙黄土蒸发。但现阶段学者在研究土壤蒸发过程多侧重于土壤的纯干燥过程或没有自然降雨的条件下的蒸发, 且多为室内模拟试验, 缺乏室外试验的支撑^[18-20]。降雨等自然条件下土壤的水力学、机械力学等性质会发生改变, 因此不能简单以室内模拟的蒸发来表征自然条件下的蒸发, 特别是砒砂岩“干时疏松遇水变泥”的特殊性质^[10], 自然条件下复配土壤的性质必然相应发生改变, 沙黄土、砒砂岩新构土体能否长期保水保肥依然是一个问题。本试验是新构土体第二年的蒸发试验, 取原状土自然条件下蒸发, 选择蒸发强烈的8—9月份监测, 能在一定程度上解答这个问题。

1 试验设计与处理

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古准格尔旗准格尔召乡典型砒

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)和科技部科技惠民计划项目(2012GS610203)资助。

* 通讯作者(zhjy@ms.iswc.ac.cn)

作者简介: 任志胜(1989—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事露天煤矿区修复方面的研究。E-mail: renzhishang@foxmail.com

砂岩区,如图 1 所示。该地区位于 39.69°N,110.27°E,海拔 1 409.90 m,极端高温 39℃,极端最低气温 -34.5℃,年平均气温为 6.2 ~ 8.7℃左右。年平均降水量为 400 mm,月际降水不均,主要集中于 7、8、9 月,年潜在蒸发量约 2 000 ~ 3 000 mm,平均日照时数为 2 900 ~ 3 100 h,总辐射热 143.4 kw/cm²,常年多风沙天气,平均风速 3.4 m/s,是黄土高原与鄂尔多斯高原交错的风蚀水蚀交错地带,为大陆性干旱半干旱气候。



图 1 研究区位置示意图
Fig. 1 Location of study area

1.2 试验设计

试验于 2014 年 8—10 月进行,针对该地区排土场土层薄、土壤水库功能弱、质地差、保水保肥性能低、贫瘠肥力低等问题,根据“价格低廉、就地取材、工程易于实现、安全有效、效果持久”的原则,提出了以下土体重构及土壤改良方案:针对土层薄、漏水漏肥、土壤水库功能弱的问题,采取 50 cm 深度铺设砒砂岩层和工程防渗布两种措施,砒砂岩防渗层压实后厚度达 8 cm 以上,体积质量 1.8 g/cm³ 以上;针对沙黄土质地差、保水保肥性能低的问题,一种措施是 0 ~ 50 cm 范围内将砒砂岩按 7:3(沙黄土:砒砂岩, w/w)比例与沙黄土混掺,另一种措施是将风化煤与沙黄土混掺,风化煤添加量为 600 kg/hm²;

针对土壤贫瘠的问题,对所有重构土体表层施加农家肥、微生物菌肥和化肥,农家肥为羊粪(450 kg/hm²)、菌肥为金宝贝微生物菌肥(60 kg/hm²)、化肥为磷酸二铵(400 kg/hm²),菌肥、农家肥、化肥均表施后翻耕。

根据以上措施,考虑到野外工作量和工程量,本研究采取不完全试验设计,设置 6 个处理(表 1),3 个重复,于 2013 年 7 月修建 18 个规格为 5 m × 4 m、深 50 cm 小区,开展不同土体重构模式土壤生态效应研究。

表 1 试验处理
Table 1 Experimental treatments

处理	沙黄土	砒砂岩	风化煤	工业防渗布	砒砂岩防渗层
Z1	+	+	-	-	+
Z2	+	+	-	+	-
Z3	+	+	+	+	-
Z4	+	-	+	+	-
Z5	+	+	-	-	-
Z6	+	-	-	-	-

注：“+”代表有，“-”代表没有。

土壤蒸发用称重法直接测定,微型蒸发器如图 2,蒸发器由厚度 8 mm 的 PVC 管材制成,蒸发器内桶直径 16 cm,外桶直径 18 cm,高 50 cm,内桶底部用 2 mm 钢筛和透气尼龙布兜底,外桶无底,内桶放在外桶内可以无摩擦提出。测定时内桶取各小区原状土体,为保证每次操作时不破坏土体结构,将外桶打入小区内,使蒸发器顶部近似与地面平行,大气蒸发力用蒸发皿测定,气象数据由试验地微型气象站(HOBO, US)获得。整个测量周期内实行严格的控水方案,无灌溉。

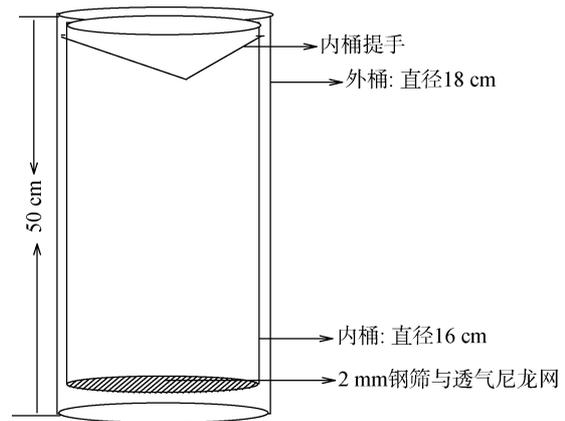


图 2 微型蒸发器示意图
Fig. 2 Micro-Lysimeter schematic diagram

1.3 试验过程及相关计算

本试验小区位于露天环境下,相对真实地模拟土壤自然状态下的蒸发情况。试验所用的 6 种土体均为裸土蒸发,不存在植物蒸腾作用,可以将土体每天减少的质量作为裸土日蒸发量。选择 8—10 月份作为研究周期是因为此段时间温度高、蒸发强烈,是研究蒸发的最佳时段。在土壤蒸发过程中,气象条件也规律地发生变化,本试验用时间变异来代替气象因子作为影响因子。应用下列公式计算土壤蒸发:

$$E_{\text{标}}=10 \times (E_0 - E_s) / \pi (d)^2$$

$$E_{\text{相}} = E_{\text{标}} / ET_0 \times 100\%$$

式中： $E_{\text{标}}$ 为土壤日蒸发(mm/d)； E_0 为蒸发器初始重量(g)； E_s 为蒸发器第 2 天重量(g)； d 为蒸发器内筒半径(cm)； $E_{\text{相}}$ 为土壤相对蒸发量(%)； ET_0 为大气潜在蒸发。

2 结果与分析

2.1 雨后新构土体典型蒸发过程

为了研究土体自然条件下的蒸发过程,选择一次较大的降雨(4.8 mm)后开始测定土体蒸发,不同新构土体自然条件雨后的土壤累积蒸发量随时间变化的过程如图 3A 所示。在自然蒸发条件下,各处理的蒸发过程阶段性明显,为典型蒸发过程,各土体第一阶段蒸发速率较大,但第一阶段持续时间 1 天左右,

第 3 天蒸发速率明显降低并保持在较低水平,其中 Z4 土体第一天相对蒸发强度达 82%,其余土体第一天蒸发强度在 50%~67%(图 3B);其次为土体蒸发的第二阶段,其中沙黄土 Z6 第二阶段时间大约持续 5 天,其他处理只持续约 2 天,沙黄土 Z6 稳定蒸发速率明显大于其他处理,随着土壤水分的快速损失(第一阶段结束)土壤蒸发速率急速下降,土壤孔隙水的逐渐减少,土壤蒸发由液体流蒸发逐渐变化为蒸汽流蒸发,符合一般土体不饱和水分运动规律。改良材料砒砂岩、风化煤可能切断了毛细管作用,迫使土壤水分向上运输到空气始终处于蒸汽流阶段,试验中表现为 Z1、Z2、Z3、Z5 等处理稳定蒸发速率显著(20%)小于沙黄土 Z6(29%),因此砒砂岩能抑制土壤蒸发特别是在含水量较高的阶段,抑制作用更加明显。

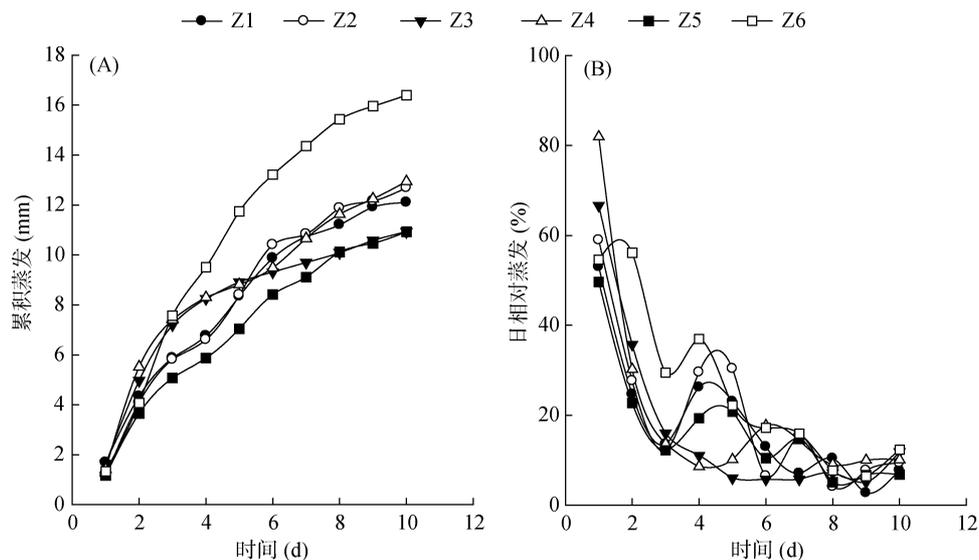


图 3 不同新构土体雨后累积蒸发、相对蒸发量变化

Fig. 3 Cumulative evaporations and relative evaporations of soils contrast after rain

土壤相对蒸发(图 3B)可以看出,降雨过后蒸发开始,供水充足蒸发强烈,此过程损失水分主要为大孔隙水,各土体相对蒸发强度超过 60%。蒸发前期,风化煤添加的 Z4、Z3 处理的相对蒸发均大于其他处理,砒砂岩添加的 Z1、Z2、Z5 相对蒸发强度较小,随着蒸发过程的持续和土壤含水率不断降低,土壤中没有了充足的水分用于蒸发,蒸发强度大幅降低,蒸发中后期各处理相对蒸发强度非常低,在 2% 以下,此过程中 Z6 相对蒸发高于其他土体,而此阶段的蒸发强度主要取决于土壤含水量即土壤水分的供给。沙黄土 Z6 蒸发过程中一直保持较强的土壤蒸发强度,相对蒸发均高于 Z1、Z2、Z5 土体,与砒砂岩、沙黄土、风化煤改良土体相比,沙黄土 Z6 累积蒸发近似是一条平滑曲线,说明砒砂岩对土壤水分蒸发特征产

生了影响,可能是砒砂岩中较高的黏粒含量(主要是蒙脱石)使土壤孔隙结构发生改变,增大了其毛细孔隙,因此毛细水占土体水分比例增大,与沙黄土相比砒砂岩掺混的新构土体水分不易蒸发,因此砒砂岩添加的 Z1、Z2、Z5 土体在整个蒸发过程中蒸发强度变化较平缓,蒸发过程中相对蒸发强度均小于 Z6,特别是在水分供应充足的前中期,砒砂岩对蒸发的抑制作用更加明显。

2.2 新构土体累积蒸发量差异

图 4 为试验期内各处理的累积蒸发量。各处理在连续 52 天测定期间内累积土壤蒸发量大小依次为 Z6>Z4>Z3>Z2>Z1>Z5,各土体蒸发曲线明显可分为两个阶段,10 天以前的典型蒸发阶段和 10 天以后的非典型蒸发阶段。砒砂岩添加的处理的 Z1、Z2、

Z5 在测定时期内累积蒸发量显著低于 Z6 处理，砒砂岩抑制土壤蒸发作用明显，沙黄土累计蒸发量为 125 mm，占同期大气蒸发力的 45%，Z1、Z2、Z3、Z4、Z5 土体的蒸发量分别为 106、111、124、125、102 mm，分别占同期大气蒸发力的 38%、40%、45%、45%、37%；而风化煤添加的 Z3、Z4 与沙黄土 Z6 累计蒸发量无显著差异，但高于 Z1、Z2、Z5 ($P < 0.05$)。从总的蒸发量来说，由于第 10 天开始试验地降雨较多，52 天内降雨量达 188 mm，土体一直处于湿润状态，蒸发过程很可能均是处于蒸发前中期，即降雨后蒸发速率稳定上升并保持在较高水平，与时间呈近似为线性关系，属土壤的非典型蒸发。Z5、Z6 曲线的差异反映了砒砂岩对沙黄土土壤蒸发进程的影响，可以看出砒砂岩添加显著抑制土体蒸发。质地相同防渗层不同的 Z1、Z2 蒸发特征曲线近乎重合，说明不同防渗层处理的土体蒸发特征没有显著差异，但二者累积蒸发量略高于 Z5，没有达到显著水平，说明防渗层在一定程度上截留水分，雨后特别是在较大的降雨后土体底部不会出现水分渗漏的情况，有防渗层的土体在蒸发中后期可以持续补给土壤蒸发损失的水分，因而 Z1、Z2 土体累积蒸发量高于 Z5。10 天后降雨丰富，蒸发特征曲线分为两部分：沙黄土、砒砂岩掺混和无掺混，因土体一直处于含水量较高的阶段，砒砂岩掺混土体抑制蒸发的作用更加明显。图中 Z4、Z6 蒸发-时间关系曲线基本一致，只是在土壤水分含量较大的雨后有些差异，总体来说风化煤对沙黄土整个蒸发过程并无大的影响。但图中 Z3、Z4 曲线重叠，而明显区别于 Z2，说明风化煤对沙黄土、砒砂岩新构土体的蒸发有促进作用，对其蒸发过程产生了影响。沙黄土 Z6 累积土壤蒸发量比砒砂岩掺混的新构土体 Z1、Z2、Z5 高出 14.81% ($P < 0.05$)，说明砒砂岩

能抑制土壤蒸发，使新构土体累积蒸发量降低，提高保水持水能力，有利于新构土体在干旱气候区抗旱能力的提高。

2.3 不同土体日蒸发量

图 5 为不同重构土体自然降雨条件下土壤日蒸发量的对比图，可以看出，在蒸发的 52 天内有多次显著的降雨过程，降雨后土壤水分以蒸发为主，在连续的降雨过后土壤蒸发显著降低，甚至出现土壤水分补给的情况(即土壤蒸发为负值)，这可能与雨后的天气状况有关。总体来说土壤蒸发随时间的推移而减少，各重构土体土壤蒸发处于剧烈变化之中。降雨后的 1~2 天内土壤水分随着蒸发过程的进行，同一质地改良不同防渗层处理下蒸发强度基本一致。由于沙黄土水分分布及运移的整体性很弱，多个降雨周期内沙黄土土壤蒸发剧烈变化，由于沙黄土土壤水分管力弱，表现为持续蒸发后不能持续供水，在表层可能出现了干土层，微弱降雨将很快蒸发，较大降雨渗漏损失，导致深层土壤对表土水分供给不足，而到了蒸发后期土壤含水量极低，蒸发较弱。相对于 Z6 土体，砒砂岩掺混的 Z1、Z2、Z5 土体在每次雨后蒸发过程中均以一个小稳定蒸发速率蒸发，蒸发前期即降雨后的 1~2 天内土壤含水量较高，此阶段蒸发过程主要受温度、近地面水分压、风速等气象条件的影响，而此过程中 Z6、Z4 有着较大的蒸发速率，而 Z1、Z2、Z5 蒸发速率较低。在整个蒸发过程中砒砂岩改良处理 Z1、Z2、Z5 蒸发速率分别为 2.04、2.14、1.97 mm/d，裸土 Z6 处理为 2.51 mm/d，Z1、Z2、Z3 相对于 Z6 蒸发强度分别降低了 18.72%、14.74%、21.51%；Z3、Z4 蒸发速率分别为 2.28、2.4 mm/d，显著高于无风化煤添加的 Z1、Z2、Z5 处理。总体来看，相对于沙黄土 Z6，砒砂岩掺混使新构土体 Z1、Z2、Z5 蒸发

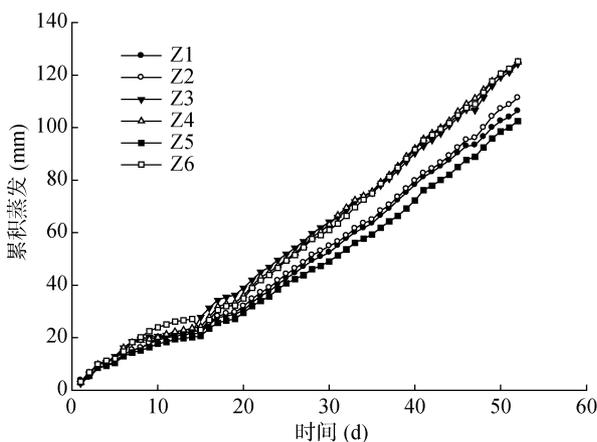


图 4 不同重构土体累计土壤蒸发量随时间的变化
Fig. 4 Relationships between cumulative soil evaporations and time

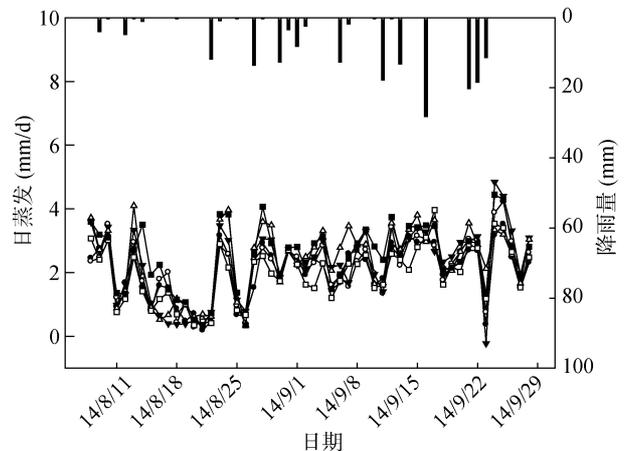


图 5 不同重构土体土壤日蒸发量、降雨与时间关系
Fig. 5 Relationships between daily soil evaporation, rain and time

速率降低了 16% 左右, 而风化煤则提高了沙黄土、砒砂岩新构土体的蒸发速率 10.3% ($P < 0.05$), 对沙黄土蒸发特征没有较大影响。另外, 无论是砒砂岩、工业防水布作为防渗层, 如 Z1、Z2 土体, 整个蒸发过程差异很小, 说明不同防渗层在截留水分、供给土体方面没有显著差异。

3 讨论

土壤蒸发是土壤-大气水分交换的重要形式, 受到大气状况、近地面小气候、土壤状况等多种因素的影响^[21-22], 室内试验研究发现, 砒砂岩可以提高沙黄土的持水能力, 降低沙黄土的标准蒸发量, 一些研究还发现砒砂岩能改善沙土土壤孔隙结构、降低入渗速率、提高土壤饱和含水量进而抑制土壤水热交换、减小土壤蒸发^[23-24]。本试验中自然条件下砒砂岩添加改变了土体的蒸发过程, 减少了土体蒸发水分损失, 表现为砒砂岩掺混的土体累积蒸发、相对蒸发均小于沙黄土。砒砂岩抑制土壤蒸发一方面是因为砒砂岩含有大量蒙脱石, 蒙脱石是一种具有大比表面的层状结构黏土矿物, 添加后土壤水合位点丰富、毛管水增多, 相对于沙黄土的大孔隙水有着较小的蒸发速率^[9]; 此外砒砂岩质地偏黏, 细颗粒较多, 与沙黄土掺混后黏粒矿物可能堵塞土壤孔隙(大孔隙、通气孔隙), 增大水汽扩散阻力进而减小蒸发、保蓄水分^[25-26]。研究中砒砂岩添加的新构土体相对于沙黄土土壤蒸发显著减小, 特别是在土壤含水量较高的阶段, 表现为第 3 天后砒砂岩掺混的 Z1、Z2、Z5 土体土壤日蒸发量显著小于沙黄土 Z6, 在蒸发初期土壤水分在毛管力作用下充足补给土壤蒸发, 除 Z4 外其余土体差异不大。一般来说沙黄土质地偏砂, 体积质量较小 (1.2 g/cm^3 左右), 土体主要以非毛管孔隙为主, 土壤蒸发较强, 表现为 Z4、Z6 土体在蒸发前期蒸发速率显著高于新构土体, 而随着蒸发的进行, 土壤水分逐渐减少, 下层土体由于无法通过毛管孔隙补给蒸发损失导致后期蒸发强度急剧减弱, 这与尹瑞平等^[27]、周学雅等^[28]的研究结果一致。

关于风化煤添加对土体蒸发过程的影响, 现阶段学者研究较少, 本试验中风化煤对土体蒸发有促进作用, 原因一方面可能是黑色风化煤的物理增温效应, 室外监测发现风化煤添加的土体地表温度平均比对照高 $1 \sim 2^\circ\text{C}$, 因此温度较高致蒸发强烈, 另一方面风化煤由于其大比表面、官能团丰富等特点使土体疏松多孔^[29-30], 促进土壤水热交换而导致风化煤添加的土体蒸发较大。而 Z1、Z2 与 Z5 土体相比, 在蒸

发后期防渗层处理的 Z1、Z2 比 Z5 有着较高的蒸发损失, 防渗层土体防渗层和砒砂岩有交互作用, 在蒸发中后期保证土壤水分供给。综合来说, 防渗层能截留降水并蓄积, 而砒砂岩会减小土体蒸发、提高土壤含水量, 所以新构土体相对于沙黄土具有较好的蓄水保墒能力。

目前通过质量差表征土体真实蒸发量还有缺陷^[31], 土壤实际蒸发包括充分湿润和非充分湿润两种情况下的蒸发, 即较多的降雨会对蒸发器测量蒸发量产生影响, 一般认为不同土体土壤蒸发差异主要体现在土壤水分含量较高的阶段^[32], Matthias 等^[33]、Ailen^[34]认为土壤在水润状态下测得的土壤蒸发量偏高, 本研究位于潜在蒸发极大的西北干旱半干旱地区, 热量是土壤蒸发的主控因子, 蒸发器土柱在蒸发过程中会出现热量集聚而水热平衡有别于原状土体, 可能导致蒸发与实际不符, 此外风化煤、砒砂岩在影响土壤蒸发方面存在一定的交互作用, 这些问题有待进一步研究。

综合来说, 重构土体相对于沙黄土能显著抑制土壤蒸发, 特别是在土壤含水率较高的阶段。在干旱半干旱的矿区排土场地区, 由于气候干燥、土层薄, 地表蒸发强烈, 土壤含水率下降很快, 难以维持土壤生态系统。砒砂岩和防渗层的处理的新构土体土壤蒸发较小、土壤水分供给稳定, 可以长期涵养土壤“水库”, 这在矿区排土场具有很好的应用推广前景。

4 结论

1) 7:3 掺混沙黄土、砒砂岩相对于沙黄土裸土来说对土壤蒸发显著减小, 砒砂岩使土壤蒸发降低了 14.81%, 特别是在含水量较高的阶段抑制作用更加明显。风化煤使新构土体土壤蒸发增大了 10.3%, 而对沙黄土裸土蒸发过程没有显著影响。

2) 在新构土体蒸发过程中, 防渗层处理可以有效截留底部渗漏水分并持续供给土体, 而不同防渗层处理土体之间土壤蒸发没有显著差异。

参考文献:

- [1] Enrique A T, Alfonso C. Bare soil evaporation under high evaporation demand: A proposed modification to the FAO-56 model[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55(3): 303-315
- [2] 宋日权, 于健, 史吉刚, 等. 内蒙古砂壤土浅层掺粘对土壤蒸发影响的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4/5): 278-282
- [3] 赵丹, 李毅, 冯浩. 砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1 058-1 068
- [4] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 72-81

- [5] 王治国, 段喜明, 李文银, 等. 开发建设项目水土流失预测的若干问题讨论[J]. 中国水土保持, 2006(4): 35-37
- [6] 白中科, 胡振华. 露天矿排土场人为加速侵蚀及分类研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 34-40
- [7] 叶浩, 石建省, 李向全, 等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 145-150
- [8] 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 115-123
- [9] 张磊, 齐瑞鹏, 张应龙, 等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 77-86
- [10] 甄庆, 摄晓燕, 张应龙, 等. 晋陕蒙能源区不同构型土体水分入渗特性模拟[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 90-96
- [11] 邹平, 杨劲松, 福原辉幸, 等. 蒸发条件下土壤水盐热运移的实验研究[J]. 土壤, 2007, 39(4): 614-620
- [12] 王欢元, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙复配成土过程中沙的调控作用[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 286-290
- [13] 王晓燕, 陈洪松, 王克林. 红壤坡地不同土地利用方式土壤蒸发和植被蒸腾规律研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 41-45
- [14] 原翠萍, 张心平, 雷廷武, 等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 25-28
- [15] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同麦秸覆盖量对夏玉米田棵间土壤蒸发和地温的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 95-100
- [16] 苏涛, 张兴昌. EN-1 对砒砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 68-75
- [17] 张露, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与风沙黄土土复配土壤的持水特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 207-214
- [18] 韩霁昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87-94
- [19] 闫德仁, 薛英英, 刘果厚. 库布齐沙漠生物结皮层土壤理化特性的研究[J]. 土壤, 2008, 40(1): 145-148
- [20] Poesen J, Wesemael B, Bunte K, et al. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: A case-study from southeast Spain[J]. Geomorphology, 1998, 23(2/4): 323-335
- [21] 韦彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 67-72
- [22] 任利东, 黄明斌. 砂性层状土柱蒸发过程实验与数值模拟[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1 282-1 289
- [23] 周虎, 李保国, 吕贻中, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征, 土壤学报, 2010, 47(6): 1 094-1 100
- [24] 吴奇凡, 樊军, 王继军. 晋陕蒙接壤区露天矿不同质地土壤水分运动特征与模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1 134-1 142
- [25] 李娟, 韩霁昌, 张卫华, 等. 砒砂岩与沙复配土壤的物理性状和相关光谱特性[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 394-401
- [26] 张露, 韩霁昌, 王欢元, 等. 砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 44-49
- [27] 尹瑞平, 吴永胜, 张欣, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6 173-6 180
- [28] 周学雅, 王安志, 关德新, 等. 科尔沁草地棵间土壤蒸发[J]. 中国草地学报, 2014, 36(1): 90-97
- [29] 段学军, 闵航, 陆欣. 风化煤玉米秸配施熟化土壤的生物学效应研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 517-520
- [30] 武瑞平, 李华, 曹鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究[J]. 农业环境保护, 2009, 28(9): 1 855-1 861
- [31] 龙桃, 熊黑钢, 李宝富, 等. 微型蒸发器测量精度的影响因素试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 21-25
- [32] 张兴娟, 王志敏, 郭文忠, 等. 灌溉后不同处理方式对土壤水分蒸发过程的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 74-78
- [33] Matthias A D, Salehi R, Warrick A W. Bare soil evaporation near a surface point-source emitter[J]. Agricultural Water Management, 1986, 11(3/4): 257-277
- [34] Ailen S J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barely crops in northern Sytia[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1990, 49(4): 291-809

Characteristics of Evaporation of Different Reconstruction Soils in Mining Area's Earth Disposal Sites of Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia Adjacent Area

REN Zhisheng¹, XIE Qian¹, WANG Tongtong¹, WANG Xiaolin¹, GUO Yanliang¹,
ZHENG Jiyong^{1,2*}, ZHANG Xingchang^{1,2}

(1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University / Institute of Soil and Water Conservation, CAS & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the evaporation of soil under different soil reconstruction conditions, the evaporation process of soil moisture was determined by micro-evaporator under natural conditions. The results showed that, compared to sandy loess, the sandy loess and soft sandstone (7 : 3, w/w) doped with bulk soil significantly inhibited soil evaporation ($P < 0.05$) by 14.81%, and weathered coal mixed with bulk soil had no significant effect on evaporation characteristics of the sandy loess, but significantly increased soil water evaporation of the bulk soil that mixed with sandy loess and soft sandstone by 10.3% ($P < 0.05$). Soil evaporation were not significant among soft sandstone impervious layer, industrial waterproof and other anti-seepage measures. Overall, impervious layer can effectively intercept precipitation and accumulation of soil moisture, and soft sandstone reduce soil evaporation, also increase soil water content. In addition the new structure of bulk soil with respect to the sandy loess has better moisture storage capacity, which has a certain practical significance in mining area's earth disposal sites under arid and semi-arid climate conditions.

Key words: Sandy loess; Soft sandstone; Weathered coal; Soil structure; Soil water evaporation