

石灰岩弃渣与农田土复配土壤水分蒸发及覆盖物保水性能

王佳欢¹, 杨新兵¹, 刘彦林², 赵小勇², 赵迎雪¹, 鲁绍伟³

(1.河北农业大学林学院,河北 保定 071000;2.河北地矿建设工程集团有限责任公司,
河北省地矿局国土资源勘查中心,石家庄 050000;3.北京市林业果树科学研究院,北京 100093)

摘要: 探究矿山废弃地弃渣与农田土复配后土壤的水分蒸发特性,以及覆盖物添加对水分蒸发的影响,对矿山恢复中土壤水分管理和改善具有实际意义。以石灰岩矿山废弃地现场的弃渣和附近农田土为复配材料,设置 0 : 10(T1),3 : 7(T2),5 : 5(T3),7 : 3(T4),10 : 0(T5)体积比例,在野外条件下采用土柱法模拟土壤水分蒸发过程,探究复配比例对土壤水分蒸发的影响以及不同覆盖物的保水性能。结果表明:(1)试验前和试验后表层复配土壤含水量均表现为 T1>T2>T3>T4>T5,蒸发中期的逐日蒸发量和蒸发结束的累计蒸发量均随弃渣体积比例增加呈极显著降低趋势,不同复配土壤在蒸发前期和蒸发后期的逐日蒸发量没有显著性差异。(2)气象因子中,温度、风速对土壤水分蒸发的影响大于太阳辐射,相对湿度的影响不显著。土壤物理性质中,除毛管孔隙度和非毛管孔隙度与土壤水分蒸发达极显著相关外,其他因子均达显著水平。(3)裸土地添加覆盖物均能降低水分蒸发,根据蒸发量和蒸发速度分析得出,砾石覆盖(直径 2~4 cm、厚度 5 cm)效果最佳。(4)石灰岩矿山废弃地土壤重构最佳保水搭配方案为弃渣 : 农田土以 3 : 7 体积比例复配并覆盖砾石。研究结果可为当地治理采石废弃地提供理论支持。

关键词: 废弃地; 复配土; 土壤水分蒸发; 覆盖物

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0369-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.045

Water Evaporation and Mulch Water Retention of Mixed Soils with Limestone Waste Residue and Farmland Soil

WANG Jiahuan¹, YANG Xinbing¹, LIU Yanlin², ZHAO Xiaoyong², ZHAO Yingxue¹, LU Shaowei³

(1.College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000; 2.Hebei Geology and Mineral Resources Construction Engineering Group Co., Ltd., Land and Resources Exploration Center of Hebei Geology and Mineral Resources Bureau, Shijiazhuang 050000; 3.Beijing Academy of Forestry and Pomology Sciences, Beijing 100093)

Abstract: Exploring the characteristics of soil water evaporation after the combination of mine waste residue and farmland soil and the effect of mulch on soil water evaporation is of practical significance to the management and improvement of soil water in mine restoration. Using the abandoned residue of limestone mine wasteland and nearby farmland soil as compound materials, the combination volume ratios of 0 : 10 (T1), 3 : 7 (T2), 5 : 5 (T3), 7 : 3 (T4) and 10 : 0 (T5) were set. The soil column method was used to simulate the process of soil water evaporation under field conditions to explore the effect of compound ratios on soil water evaporation and the water retention capacity of different mulches. The results showed that: (1) The water content of surface mixed soil before and after the experiment was T1 > T2 > T3 > T4 > T5. The daily evaporation in the middle stage of evaporation and the cumulative evaporation at the end of evaporation decreased significantly with the increase of the volume ratios of abandoned slag. There was no significant difference in daily evaporation between different mixed soils in the early and later stages of evaporation. (2) Among the meteorological factors, the influence of temperature and wind speed on soil water evaporation was greater than that of solar radiation, and the effect of relative humidity was not significant. In soil physical properties, except for capillary porosity and non-capillary porosity, there was a significant correlation

收稿日期:2022-02-17
资助项目:河北省重点研发计划项目(20374208D)
第一作者:王佳欢(1995—),男,硕士研究生,主要从事水土保持和林业生态研究。E-mail:706585572@qq.com
通信作者:杨新兵(1978—),男,博士,副教授,主要从事水土保持和林业生态研究。E-mail:yangxinbing2001@126.com

between soil water evaporation and other factors. (3) Adding mulch to bare land could reduce water evaporation. According to the analysis of evaporation and evaporation rate, gravel mulch (Diameter 2~4 cm, thickness 5 cm) had the best effect. (4) The best water conservation scheme of soil reconstruction in limestone mine wasteland was abandoned slag : farmland soil of 3 : 7 volume ratio and covered with gravel. The study could provide theoretical support for the local treatment of quarrying wasteland.

Keywords: wasteland; compound soil; soil water evaporation; mulch

截止到 2020 年, 矿山资源监测结果显示, 我国矿山资源占地面积已超过 375 万 hm^2 , 而矿山废弃地土地的复垦率仅达到了 20% 的水平, 对比发达国家 70% 的复垦率, 相差甚远。矿产资源在满足人类社会发展的同时也留下了一系列生态安全问题: 表土资源缺失导致植物难以存活^[1]、地表径流引起水土流失^[2]、景观破碎致使生态系统脆弱^[3]等等, 因此, 废弃地生态环境亟待修复。为保证矿山绿化效果, 前期养护投入较多, 要想实现废弃地生态系统的良性循环, 后期土壤水分条件是植被成活与生长好坏的关键, 因此, 土壤重构成为生态恢复的首要条件^[4]。

针对废弃地表土缺失问题, Kenton 等^[5]采用风化褐砂岩、未风化灰砂岩以及混砂页岩替代表土进行废弃煤矿复垦, 通过研究白蜡 (*Fraxinus chinensis* Roxb.)、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、鹅掌楸 (*Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sargent.) 等人工林的物种丰富度后发现风化褐砂岩作为表土替代材料更适于废弃地造林。位蓓蕾等^[6]将草炭掺入亚黏土作为煤矿复垦替代材料发现, 草炭施用量为 10 g/kg(干土)时紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 的生长量和酶活性最高。胡振琪等^[7]发明了煤基营养剂用于矿山土壤修复, 其成分主要为草炭、风化煤、菌根以及化学试剂, 该项发明既起到改善土壤性能, 增强植物抗逆性的作用, 又提高了草炭、风化煤的资源利用效率。

土壤水分条件是北方矿山修复绿化效果延续的重要制约因素, 土壤覆盖处理是常用方法之一。Dlamini 等^[8]发现, 塑料与砾石 2 种覆盖物结合后可阻断土壤毛细管力的连续性, 减少向上运输的水量, 从而达到抑制水分蒸发的目的; 车飞伟等^[9]探究不同有机材料对土壤的保水效果, 结果表明, 木片、树皮以及 1~3 cm 的园林堆腐物覆盖下土壤含水量均高于无覆盖, 木片的保水效果要强于树皮和 1~3 cm 的园林堆腐物。

河北省西部太行山区矿产资源丰富, 历经大规模开采活动后出现大量基岩裸露的“白茬山”, 表土缺失, 植物难以存活, 土壤重构成为山体植被恢复的必要方式。本研究于石家庄鹿泉区一废弃石灰岩采石现场收集渣土, 与附近农田土按不同体积比例进行复配, 通过土柱模拟试验研究重构土壤水分蒸发规律,

从土壤本身性质与气象条件 2 个角度阐述土壤水分蒸发的影响因素, 同时试验不同覆盖条件下土壤水分蒸发情况, 筛选出复配比例和覆盖物的最佳组合, 为当地治理采石废弃地提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鹿泉区隶属河北省石家庄市 (37°88′08″—38°27′27″N, 114°18′55″—114°51′36″E), 东临石家庄市, 西接井陉, 北邻平山、灵寿, 南连元氏, 行政面积 603 km^2 。其地域南北狭长, 地势西高东低, 西部为山峦起伏的太行山区, 东部为地势平坦的山前平原, 海拔 62.5~907 m。全区位于温带季风气候区, 夏季多雨, 冬季干冷, 7 月气温最高, 平均 27.2 °C, 1 月气温最低, 平均 -1.7 °C, 多年平均降水量 542 mm, 无霜期 219 天。境内河流均属海河水系, 如滹沱河、清水河、太平河等, 土壤类型以石灰性褐土为主, 森林类型以温带落叶阔叶林为主。试验点海拔 300~400 m。

1.2 试验设计

2020 年 12 月 2 日收集鹿泉区一采石废弃地石灰岩弃渣, 风干过 2 cm 筛子, 与农田土进行复配, 按照弃渣与农田土体积比 0 : 10 (T1), 3 : 7 (T2), 5 : 5 (T3), 7 : 3 (T4), 10 : 0 (T5), 每个处理 3 组重复, 土壤粒径及孔隙度见表 1。复配土拌匀后装入内径 19 cm、深 35 cm PVC 管中, 装填高度 30 cm, 封底材料选用 300 目透水纱网, 土柱置于深 30 cm 且内设排水口的水泥槽中, 试验布设于废弃矿山半山腰处, 以此模拟山体自然环境。在土壤水分蒸发模拟试验基础上测试覆盖物对 5 种配比土壤的保水效果, 分别设置砾石 (LS)、渗水地膜 (SS) 和植物毯 (ZW) 共 3 种覆盖物, 每个处理 3 组重复, 以不覆盖作为对照 (CK)。参考已有研究^[10], 砾石为废弃地现场收集的直径 2~4 cm 块石, 覆盖厚度为 5 cm; 渗水地膜购于山西农科院 (厚度 5 μm); 植物毯购于北京华夏绿洲有限公司 (厚度 8~10 mm)。

1.3 试验方法

土壤水分蒸发试验前土柱泡水 24 h, 其间不断加水与土壤表层相平齐, 泡水结束将土柱于沙层上静置 24 h 沥去重力水, 随后封底开始试验。2021 年 8 月 4 日上午将封底土柱置于水泥槽中, 水泥槽底部平

齐,以保证所有土柱接受的光照、风速、风向等气象条件一致,用称量分度值 5 g 的电子台秤(型号 TCS)于每天上午 7:00 进行称重,当日与次日称重差值即为当日蒸发量,采用蒸发量计算公式将质量值换算为高度值,计算公式为:

$$E=10\times\frac{G_i-G_{i+1}}{\rho\times\pi\times r^2}$$

式中: E 为当日土壤水分蒸发量(g); G_i 为当日称重值(g); G_{i+1} 为次日称重值(g); ρ 为水密度(1 g/cm³); r 为 PVC 管半径(9.5 cm)。

表 1 不同配比下土壤粒级组成和孔隙度

复配比例	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%
0:10(T1)	5.19	60.50	34.48	1.07	48.82	2.36	51.18
3:7(T2)	4.11	57.23	39.40	1.24	42.54	3.05	45.59
5:5(T3)	3.82	54.05	42.61	1.43	35.61	3.98	39.59
7:3(T4)	3.52	52.58	44.54	1.59	21.51	4.47	25.98
10:0(T5)	0.55	38.35	61.50	1.60	21.56	5.36	26.91

试验时间为 8 月 4 日至 9 月 2 日,共计 30 天,相关研究^[11]表示,土壤表层 15 cm 水分含量与水分蒸发关系最为密切,因而在试验期间采用 TDR 300 土壤水分测量仪测量表层土壤体积含水量(15 cm),并将体积含水量换算为质量含水量^[12],计算公式为:

$$W=\frac{Q}{P}$$

式中: W 为质量含水量(%); Q 为体积含水量(%); P 为容重(g/cm³)。

在试验地附近架设 TRM-ZS3 型气象仪采集气象数据,包括太阳辐射、气温、相对湿度以及风速等(图 1)。试验过程中搭设遮雨棚,降雨天气进行遮雨,避免雨水对试验造成影响。

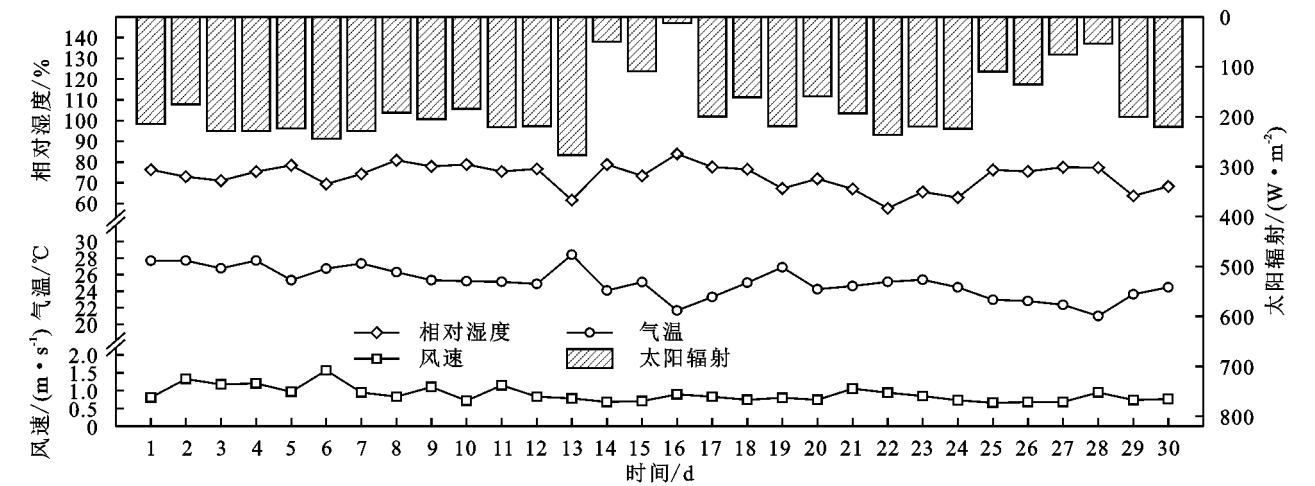


图 1 研究期气象变化

1.4 数据处理

采用累计蒸发失水比^[13]分析土壤抗旱性,计算方法为:

$$\alpha=\frac{\sum_0^iW_i}{\beta}$$

式中: α 为累计蒸发失水比(%); W_i 为第 i 天的累计蒸发量(mm); β 为初始含水量(mm)。

土壤累计蒸发量趋势线采用最小二乘法拟合得到,拟合公式为:

$$y=A+Bx$$

式中: y 为累计蒸发量(mm); x 为蒸发时间(天); B 为斜率; A 为拟合参数。

试验数据在 Excel 2010 软件中进行初步整理,

采用 SPSS 24.0 软件进行方差分析和相关性分析,绘图利用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 不同配比下表层土壤含水量分析

不同配比下表层土壤含水量随蒸发时间的推移逐渐下降,由图 2 可知,表层土壤初始含水量范围为 7.69%~45.75%,大小排序为 T1(45.75%)>T2(32.02%)>T3(24.23%)>T4(10.28%)>T5(7.69%),差异达极显著水平($p<0.01$),历经 30 天蒸发试验后表层土壤含水量范围为 0.25%~14.86%,大小排序为 T1(9.86%)>T2(4.68%)>T3(2.25%)>T4(1.45%)>T5(0.25%),差异达极显著水平($p<0.01$),弃渣体积比例越大土壤含水量越低,说明弃渣可降低原本土壤中的水分含量。

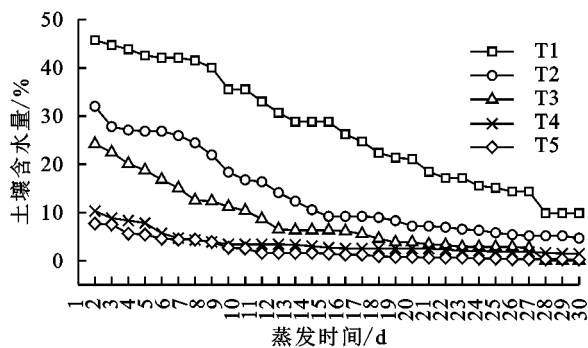


图 2 不同配比下表层土壤含水量变化

2.2 不同配比下土壤水分蒸发分析

由图 3 可知,不同配比下土壤水分逐日蒸发量呈下降趋势,其波动式蒸发过程符合野外条件无水分补充的土壤水分蒸发现律。通过试验发现,野外土壤水分蒸发大致分为 3 个阶段:蒸发量波动较大的前期(第 1~7 天)、蒸发量波动较小的中期(第 8~22 天)和蒸发量趋于平稳的后期(第 23~30 天)。蒸发前期,蒸发量范围为 0.71~6.35 mm,平均蒸发量大小排序为 T1(3.73 mm)=T2(3.73 mm)>T3(3.53 mm)>T4(3.22 mm)=T5(3.22 mm),不同配比下土壤蒸发量差异不显著($p>0.05$)。蒸发中期,蒸发量范围为 0~4.23 mm,平均蒸发量大小排序为 T1(2.16 mm)>T2(1.74 mm)=T3(1.74 mm)>T4(1.13 mm)>T5(0.66 mm),不同配比下土壤蒸发量差异达极显著水平($p<0.01$)。蒸发后期,蒸发量范围为 0~0.71 mm,平均蒸发量大小排序为 T1(0.53 mm)>T2(0.35 mm)=T4(0.35 mm)>T3(0.26 mm)=T5(0.26 mm),不同配比下土壤蒸发量差异不显著($p>0.05$)。综上所述,弃渣配比增加对降低土壤水分蒸发的趋势在蒸发中期较为明显,在土壤水分充足的前期和土壤水分亏缺的后期不明显。

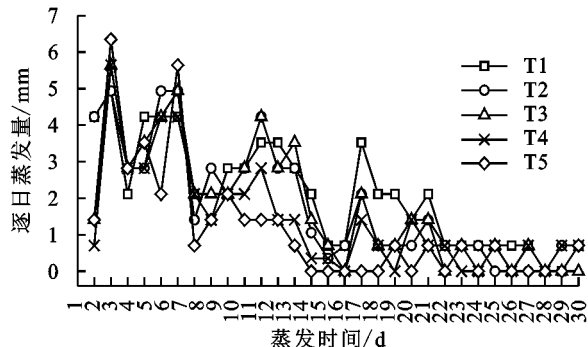


图 3 不同配比下土壤水分逐日蒸发量

由图 4 可知,野外条件下不同配比土壤的累计蒸发量随时间的延续而增加,但累计值的增加速率呈下降趋势,不同配比下土壤累计蒸发量差异达极显著水平($p<0.01$),大小排序为 T1(62.78 mm)>T2(55.02 mm)>T3(52.91 mm)>T4(42.33 mm)>T5(34.57 mm)。

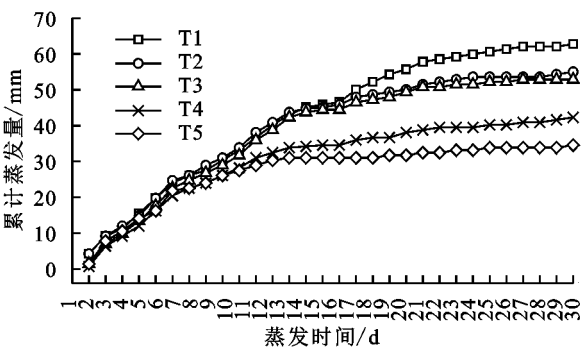


图 4 不同配比下土壤水分累计蒸发量

2.3 土壤水分蒸发相关性分析

土壤水分蒸发影响因素众多,包括气温、风速、太阳辐射等气象因子以及土壤粒径组成、孔隙度等物理性质。通过土壤水分逐日蒸发量与气象因子、物理性质相关关系的显著性检验,阐明土壤水分蒸发的影响因素。由表 2 可知,逐日蒸发量与气温、风速呈极显著正相关($p<0.01$),与太阳辐射呈显著正相关($p<0.05$),与湿度没有显著性相关关系($p>0.05$)。

表 2 土壤逐日蒸发量与气象因子相关性分析

气象因子	逐日蒸发量
太阳辐射	0.462*
气温	0.641**
湿度	0.150
风速	0.760**

注: * 和 ** 分别表示相关性水平在 0.05 和 0.01 水平上显著。下同。

由表 3 可知,逐日蒸发量与毛管孔隙度呈极显著正相关($p<0.01$),与非毛管孔隙度呈极显著负相关($p<0.01$),与黏粒体积含量、粉粒体积含量、总孔隙度呈显著正相关($p<0.05$),与砂粒体积含量、容重呈显著负相关($p<0.05$)。

表 3 土壤逐日蒸发量与物理性质相关性分析

指标	逐日蒸发量
黏粒	0.920*
粉粒	0.923*
砂粒	-0.928*
容重	-0.934*
毛管孔隙度	0.960**
非毛管孔隙度	-0.971**
总孔隙度	0.954*

2.4 土壤抗旱性分析

土壤含水量和水分蒸发量因复配比例产生差异,且二者变化趋势相反,但凭其中一项难以判断土壤的抗旱性,因此,采用土壤累计蒸发失水比进行土壤抗旱性分析。由图 5 可知,土壤蒸发失水比 T1 范围为 0.04~0.52,T2 范围为 0.07~0.85,T3 范围为 0.03~1.21,T4 范围为 0.04~2.57,T5 范围为 0.12~2.85,T1 和 T2 累计蒸发量均小于表层土壤含水量,而 T3、T4 和 T5 均出现累计蒸发量大于表层土壤含水

量情况,说明无外界水源补充下连续蒸发 30 天,混合土壤中弃渣体积比例超过 30%,表层土壤水分无法满足蒸发需求。T1~T5 表层土壤末期含水量分别为 9.86%,4.68%,2.25%,1.45%,0.25%,初期含水量和累计蒸发量差值分别为 6.63%,2.44%,−0.44%,−7.47%,−6.72%,对比发现,前者均大于后者,说明弃渣体积比例越大,混合土壤下层蓄水能力越弱,土壤抗旱性越差。

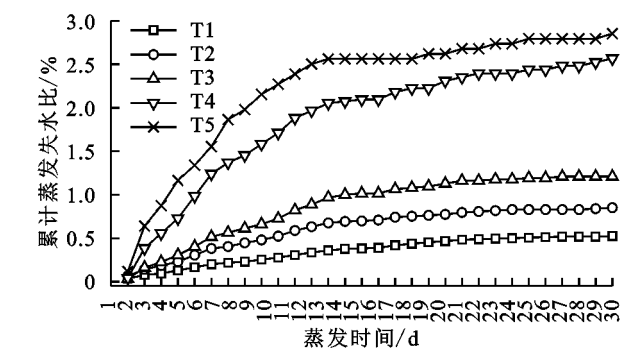


图 5 不同配比下土壤累计蒸发失水比

2.5 覆盖物保水性能分析

由图 6 可知,不同配比下覆盖物均能降低土壤水分蒸发。T1 条件下土壤水分累计蒸发量差异达极显著水平($p<0.01$),由大到小为 CK(62.78 mm)>SS(52.20 mm)>LS(45.15 mm)>ZW(38.80 mm);T2 条件下土壤水分累计蒸发量差异达极显著水平($p<0.01$),由大到小为 CK(55.02 mm)>LS(44.03 mm)>SS(40.91 mm)>ZW(38.09 mm);T3 条件下土壤水分累计蒸发量差异达显著水平($p<0.05$),由大到小为 CK(52.91 mm)>SS(40.91 mm)>LS(40.21 mm)>ZW(35.98 mm);T4 条件下土壤水分累计蒸发量差异达极显著水平($p<0.01$),由大到小为 CK(42.33 mm)>SS(37.39 mm)>ZW(34.57 mm)>LS(26.81 mm);T5 条件下土壤水分累计蒸发量差异达显著水平($p<0.05$),由大到小为 CK(34.57 mm)>ZW(33.15 mm)>SS(31.74 mm)>LS(24.69 mm)。覆盖物不仅有效降低了土壤水分蒸发,还具有一定减缓蒸发速度的能力,由趋势线方程参数可知,T1 条件下 CK(2.02 mm/d)>SS(1.55 mm/d)>LS(1.16 mm/d)>ZW(1.08 mm/d);T2 条件下 CK(1.64 mm/d)>SS(1.33 mm/d)>ZW(1.24 mm/d)>LS(1.23 mm/d);T3 条件下 CK(1.68 mm/d)>SS(1.36 mm/d)>ZW(1.08 mm/d)>LS(1.00 mm/d);T4 条件下 CK(1.21 mm/d)>SS(1.02 mm/d)>ZW(0.90 mm/d)>LS(0.57 mm/d);T5 条件下 ZW(1.05 mm/d)>SS(0.99 mm/d)>CK(0.84 mm/d)>LS(0.71 mm/d),当弃渣比例为 100%时,覆盖渗水地膜和植物毯并不能有效降低土壤水分蒸发速度。

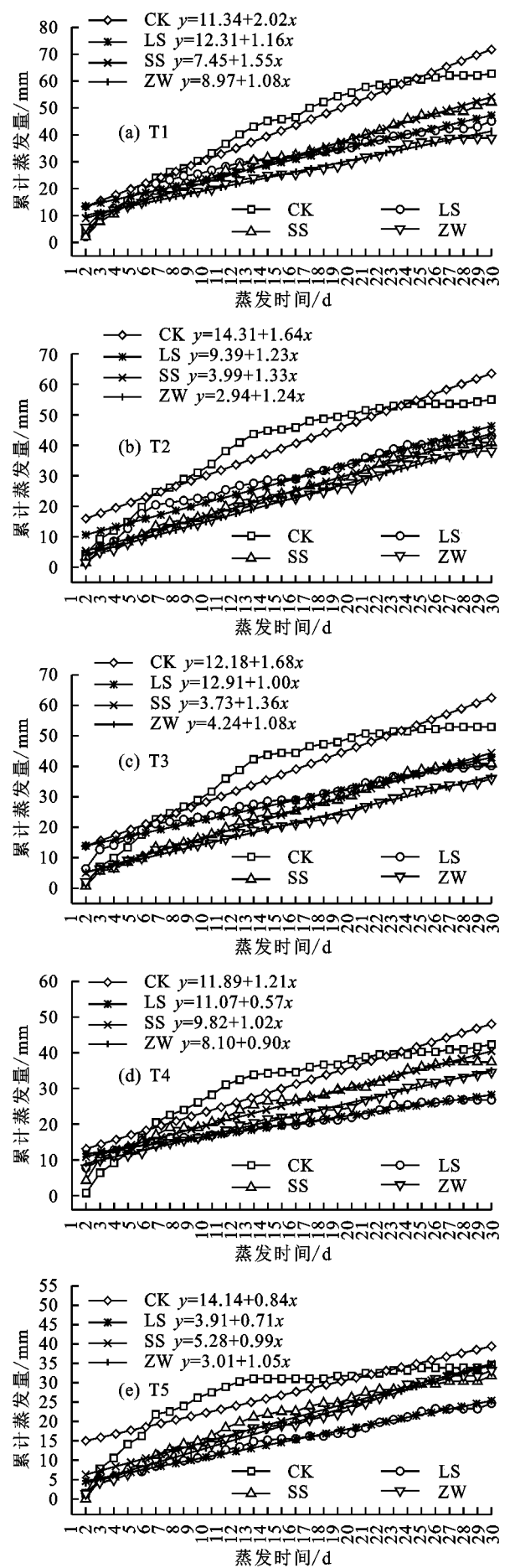


图 6 不同覆盖处理下土壤水分累计蒸发量

2.6 覆盖物保水性能灰色关联分析

通过上述分析发现,因覆盖种类和复配比例的不同,产生的保水效果也不一致,为筛选出最优覆盖物,采用灰

色关联分析^[14]。采用最优值化方法,将不同覆盖处理下复配土的蒸发量和蒸发速度数值分别除以各组最优值,从而得到新的数列,即数值无量量化处理(表 4)。

表 4 覆盖物保水性能数值无量量化处理

土壤类型	蒸发量				蒸发速度			
	CK	LS	SS	ZW	CK	LS	SS	ZW
T1	1.648	1.185	1.370	1.000	1.741	1.000	1.336	1.069
T2	1.660	1.298	1.234	1.000	1.562	1.171	1.267	1.000
T3	1.364	1.036	1.055	1.000	1.680	1.000	1.360	1.080
T4	1.579	1.000	1.395	1.342	2.123	1.000	1.789	1.895
T5	1.400	1.000	1.286	1.400	1.183	1.000	1.394	1.268

灰色关联分析结果为同列灰关联系数做平均得到的灰关联度,其数值越接近 1.000 则表示覆盖物保水性能越好。由表 5 可知,不同覆盖条件下土壤蒸发量大小为 LS(0.869) > ZW(0.841) > SS

(0.694) > CK(0.521),蒸发速度大小为 LS(0.977) > ZW(0.779) > SS(0.610) > CK(0.512),通过比较蒸发量和蒸发速度 2 个保水性能指标发现,砾石覆盖相对最优。

表 5 覆盖物保水性能灰关联系数和灰关联度

参数	土壤类型	蒸发量				蒸发速度			
		CK	LS	SS	ZW	CK	LS	SS	ZW
灰关联系数	T1	0.464	0.752	0.603	1.000	0.392	0.883	0.563	1.000
	T2	0.460	0.653	0.706	1.000	0.627	1.000	0.874	0.986
	T3	0.607	0.939	0.911	1.000	0.452	1.000	0.609	0.875
	T4	0.492	1.000	0.587	0.621	0.333	1.000	0.416	0.492
	T5	0.584	1.000	0.663	0.584	0.754	1.000	0.587	0.540
灰关联度		0.521	0.869	0.694	0.841	0.512	0.977	0.610	0.779

3 讨论

3.1 不同配比下表层土壤含水量差异

土壤重构过程中,随着土壤弃渣体积比例增大,土壤颗粒变化趋势表现为黏粒和粉粒减少,砂粒增加,这将导致土壤颗粒表面积减少,吸附性降低,对水分的吸附能力也会因此而下降^[15],伴随弃渣体积比例增加,黏粒含量降低 89.40%,粉粒含量降低 36.61%,砂粒含量增加 78.36%,致使表层土壤含水量初期和末期分别降低 38.06%和 9.61%。土壤粒径的差异还会通过改变土壤本身的孔隙度,间接对土壤含水量造成影响。一般认为,毛管孔隙主要受细颗粒影响,数量越多则储水能力越强,本研究中毛管孔隙度最大可达 48.82%,而非毛管孔隙主要受粗颗粒影响,数量越多则通透性越好^[16],本研究中非毛管孔隙度最大可达 5.36%,弃渣体积比例的增加通过提高土壤粗颗粒体积占比间接导致总孔隙度中非毛管孔隙比例上升,从而影响土壤含水量。表层土壤末期含水量与初期含水量和累计蒸发量的差值存在一定差异,原因在于历经 30 天连续蒸发后上层土壤(15 cm 以上)与下层土壤(15 cm 以下)形成水势差,下层水分借助毛管作用向上补充^[17],致使表层土壤末期含水量不同于蒸散后的水分差值。

3.2 不同配比下土壤蒸发量差异

从土壤水分蒸发量来看,整体上逐日蒸发量和

累计蒸发量均随弃渣体积比例增加而降低,逐日蒸发量可分为 3 个阶段^[18]:蒸发前期主要受当地气象条件的控制,即大气蒸发力控制阶段,在充分供水条件下,水通过毛管作用源源不断输出,同等大气蒸发力致使前期逐日蒸发量差异不明显^[19],因此,本研究中平均逐日蒸发量最小的 T4(3.22 mm)和 T5(3.22 mm)仅比最大 T1(3.73 mm)和 T2(3.73 mm)低 13.67%。当表层土壤水分降至某一临界值时,此时进入土壤导水率控制阶段,气象因素退居次要地位^[19],该阶段内以薄膜水形式向外扩散,质地偏黏、孔隙度高的 T1 含有较多薄膜水,平均逐日蒸发量达 2.16 mm,是质地偏砂、孔隙度低 T5(0.66 mm)的 3.27 倍。当薄膜水运动停止后进入第 3 阶段,即水汽扩散控制阶段,该阶段内土壤中的水分以汽化的方式逸入大气,土层间的水汽压梯度和下层土壤的含水量是蒸发量的决定性因素^[20],农田土体积比例大的配比,其保水性好,土层水汽压梯度大,因而 T1 平均逐日蒸发量为 T5 的 2.04 倍,但以水汽扩散方式蒸发掉的水分还是少量的,平均逐日蒸发量最大 0.53 mm,与最小 0.26 mm 仅差 0.27 mm,差异不显著。累计蒸发量是逐日蒸发量的累计结果,尽管不同蒸发阶段的逐日蒸发量有所不同,但最终累计蒸发量随弃渣体积比例增加而降低。

3.3 土壤水分蒸发影响因子分析

气象因素是引起土壤水分蒸发的重要外源因素,土壤水分蒸发与气温、太阳辐射以及相对湿度等气象因子具有紧密联系,本研究中,太阳辐射、气温和风速与土壤水分蒸发呈正相关,太阳辐射作用于地表,促使地表温度升高,加速土壤水分蒸发,因此太阳辐射与温度的协同作用促进土壤水分蒸发加快^[21];风速带走近地表处湿润空气,以干燥空气代之,风速大则蒸发量大,以此方式促进土壤水分蒸发^[22]。从相关性显著程度分析,温度和风速的显著性大于太阳辐射,其原因在于太阳辐射是通过提高近地表温度间接影响土壤水分蒸发,其影响程度不如温度和风速的作用直接^[23]。相对湿度与土壤水分蒸发不存在显著相关性的原因可能是山峦气候多变,空气相对湿度昼高夜低致使日变化不明显。粒径、孔隙度为影响水分蒸发的土壤自身因子,粒径通过影响孔隙度进而对土壤水分蒸发造成影响^[24],较细颗粒易形成毛管孔隙并发挥其毛管作用,土壤表层水分减少形成水势差,下层水分借助毛管孔隙沿水势梯度向上扩散,补充上层土壤蒸发散失的水分^[17]。土壤中弃渣体积比例越大,较大土壤颗粒对毛管孔隙的阻断效应越强,抑蒸效应越强,与 Xiao 等^[25]研究结果一致。

3.4 覆盖物保水性能差异

覆盖物对土壤的保水性能具有显著性,综合不同配比土壤在不同覆盖方式下的蒸发量和蒸发速度发现,任意覆盖方式下的土壤水分蒸发量均低于 CK,与王丽丽等^[26]研究结果相似。LS 覆盖通过形成干燥表层切断向上运输水分的毛细管从而抑制水分蒸发,弃渣体积比例达到 30% 时蒸发速率最小,为 1.23 mm,保水效果初见;ZW 覆盖则是通过降低表层土壤的热通量达到抑制水分蒸发的目的,弃渣体积比例达到 50% 时蒸发量最小为 35.98 mm,弃渣体积比例超过 50% 时 ZW 对土壤水分保有能力弱于 LS^[27];SS 覆盖既未形成干燥表层,也未降低表层土壤热通量,而是在土壤与大气之间的形成隔膜抑制水分蒸发,但膜下高温积累也会产生一定的水分蒸发^[28],同一土壤条件下覆盖 SS 其蒸发量和蒸发速度均未达到最优。

结合土壤累计蒸发量和蒸发速度分析发现,同一配比条件下,蒸发速度随累计蒸发量增加而变慢,说明覆盖物不仅可有效降低土壤水分蒸发,还具有一定减缓蒸发速度的能力,而 T5 条件下不符合这一规律,CK(34.57 mm)累计蒸发量高于其他覆盖处理,其 0.84 mm/d 的蒸发速度低于 SS 的 0.99 mm/d 和 ZW 的 1.05 mm/d,原因在于该处理水分蒸发集中于试验开始前期,中期和后期水分蒸发微弱。

4 结论

(1)土壤重构中,弃渣体积比例越大表层土壤含水量越低,累计蒸发失水比越大,土层蓄水能力越弱,土壤抗旱能力越差,结合土壤累计蒸发失水比与表层土壤含水量和累计蒸发量关系分析得知,弃渣:农田土以 3:7 体积比例复配混合土壤抗旱性最强。

(2)蒸发中期(第 8~22 天)不同配比土壤逐日蒸发量和累计蒸发量差异显著,在土壤水分充足的蒸发前期(第 1~7 天)和土壤水分亏缺的蒸发后期(第 23~30 天)差异不显著。砾石覆盖在蒸发量和蒸发速度方面优于植物毯和渗水地膜。

(3)影响土壤水分蒸发的气象因子主要是太阳辐射、气温、风速,土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度对土壤水分蒸发存在极显著影响,各粒级含量、容重以及总孔隙度对土壤水分蒸发存在显著影响。

综上分析,弃渣:农田土以 3:7 体积比例复配覆盖砾石为石灰岩矿山废弃地土壤重构最佳保水搭配方案。

参考文献:

- [1] 王乐,郭小平,韩祖光,等.基于废弃物的潞安煤矿废弃地改良土壤基质配比研究[J].土壤,2020,52(1):145-152.
- [2] 荣浩,珊丹,刘艳萍,等.草原工程侵蚀区植被恢复模式的水土保持效应[J].水土保持研究,2017,24(3):24-28.
- [3] 张进德,郗富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].生态学报,2020,40(21):7921-7930.
- [4] 赵佳琪,陈晓琳,李玉灵.冀东矿区不同植被恢复类型尾矿基质粒径组成和养分特征研究[J].林业与生态科学,2021,36(3):262-268.
- [5] Kenton S, Christopher B, Sarah H, et al. Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia, United States [J].Restoration Ecology,2015,23(2):131-138.
- [6] 位蓓蕾,胡振琪,张建勇,等.紫花苜蓿对草炭改良露天矿表土替代材料的响应[J].农业环境科学学报,2013,32(10):2020-2026.
- [7] 胡振琪,朱永官,康惊涛.用于土壤改良的煤基营养剂:中国,CN 200510077469.6 [P].2005-10-26.
- [8] Dlamini P, Ukoh I B, Rensburg L V, et al. Reduction of evaporation from bare soil using plastic and gravel mulches and assessment of gravel mulch for partitioning evapotranspiration under irrigated canola [J].Soil Research,2017,55(3):222-233.
- [9] 车飞伟,李素艳,孙向阳,等.不同有机材料覆盖对土壤保水效果的影响[J].水土保持通报,2020,40(2):182-187.
- [10] 周约,谢铁娜.不同厚度砾石覆盖对土壤蒸发的影响[J].安徽农业科学,2015,43(21):101-103.
- [11] 龙桃,熊黑钢,张建兵,等.不同降雨强度下的草地土壤蒸发试验[J].水土保持学报,2010,24(6):240-245.

- [12] 熊明明,陈海山,俞森.CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估Ⅱ:土壤湿度[J].气象科学,2011,31(1):1-10.
- [13] 李沙沙,韦杰,徐文秀,等.不同温度下紫色土与黄壤的水分持续性耗散特征[J].水土保持通报,2019,39(3):51-56.
- [14] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].应用生态学报,2016,27(5):1445-1452.
- [15] 马生花,谢应忠,胡海英,等.荒漠草原 2 种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J].中国水土保持,2019,40(7):61-65.
- [16] 吕刚,王磊,卢喜平,等.不同复垦方式排土场砾石对饱和导水率和贮水能力的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1414-1426.
- [17] 李渊博,李胜龙,肖波,等.黄土高原水蚀风蚀交错区藓结皮覆盖土壤的蒸发特征[J].水土保持学报,2020,34(5):208-215.
- [18] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004:65-122.
- [19] 李艳,刘海军,黄冠华.麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J].农业工程学报,2015,31(1):98-106.
- [20] 潘全良,陈坤,宋涛,等.生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J].水土保持研究,2017,24(1):115-121.
- [21] 苏彦尹,范兴科.基于称重法对影响蒸发蒸腾量的主要气象因子研究分析[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):40-48.
- [22] 靳姗姗,汪星,汪有科,等.黄土丘陵枣林休眠期土壤水分损失及其剖面气态水分析[J].水土保持学报,2016,30(3):309-316.
- [23] 彭焕华,赵传燕,梁继.黑河上游高寒草地蒸散发日变化及其影响因子分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(1):46-53.
- [24] 穆家伟,查天山,贾昕,等.毛乌素沙地典型沙生灌木对土壤蒸发的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(12):39-45.
- [25] Xiao B, Wang H F, Fan J. Biological soil crusts decrease soil temperature in summer and increase soil temperature in winter in semiarid environment [J]. Ecological Engineering, 2013, 58(5): 52-56.
- [26] 王丽丽,余海龙,黄菊莹,等.不同覆盖措施的土壤生态环境效应和作物增产效应述评[J].江苏农业科学,2016,44(7):11-15.
- [27] Wang Y J, Xie Z H, Malhi S S, et al. Effects of gravel-sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon yield in a semi-arid Loess Plateau of northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2012, 101(1): 88-92.
- [28] 胥生荣,张恩和,马瑞丽,等.覆盖对枸杞根系土壤环境和水分利用的影响[J].草业学报,2019,28(2):12-22.
- (上接第 368 页)
- [15] 陈丽,郝晋珉,王峰,等.基于碳循环的黄淮海平原耕地固碳功能研究[J].资源科学,2016,38(6):1039-1053.
- [16] 尹钰莹,郝晋珉,牛灵安,等.河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究[J].资源科学,2016,38(5):918-928.
- [17] 杨果,陈瑶.中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(12):171-176.
- [18] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth [R]. Paris: OECD, 2002.
- [19] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [20] 李波.我国农地资源利用的碳排放及减排政策研究[D].武汉:华中农业大学,2011.
- [21] 田云,张俊飏,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105.
- [22] 吴昊玥,黄瀚蛟,陈文宽.中国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产脱钩效应研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(6):85-91.
- [23] 陈柔,何艳秋,朱思宇,等.我国农业碳排放双重性及其与经济发展的协调性研究[J].软科学,2020,34(1):132-138.
- [24] 国家发展和改革委员会.省级温室气体清单编制指南[试行][R].北京:国家发展和改革委员会,2011.
- [25] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究[J].自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
- [26] 程琳琳.中国农业碳生产率时空分异:机理与实证[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [27] Cubasch U, Wuebbles D, Chen D, et al. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013: 121-155.
- [28] 田云,林子娟.长江经济带农业碳排放与经济增长的时空耦合关系[J].中国农业大学学报,2021,26(1):208-218.