

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.025; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.025.

杨春艳, 王小展, 史常青, 等. 不同材料覆盖对高寒矿区扰动界面土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 198-206.

Yang Chunyan, Wang Xiaozhan, Shi Changqing, et al. Effect of different mulching materials on soil evaporation characteristics of disturbed interface in alpine mining area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 198-206.

不同材料覆盖对高寒矿区扰动界面 土壤蒸发特性的影响

杨春艳¹, 王小展¹, 史常青^{1,2,3,4}, 杨建英^{1,2,3}, 孙智龙¹, 邓莫楠¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083;
3.北京林业大学 国家林业和草原局水土保持重点实验室, 北京 100083; 4.林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 探讨不同无机材料的透水性和地表覆盖对土壤蒸发的影响, 以期为解决冻土区因矿产资源开采所造成的水分下渗困难、蒸散量增加等问题提供一定理论依据。 [方法] 以 8 种无机材料为研究对象, 分析了其微观结构及反射特性等基本物理性质; 设置了 3 种降雨强度条件, 研究材料在不同使用厚度下的透水性能; 开展蒸发试验, 探究了不同材料覆盖对土壤水分蒸发特性的影响。 [结果] (1) 材料间的干湿容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度及反射率差异极显著 ($p < 0.01$), 其中玻璃轻石 J₁、玻璃轻石 J₂ 及陶粒 3 种材料通气性和持水性较适中; (2) 在透水性能方面, 火山石、麦饭石、陶粒、玻璃轻石 J₁ 及玻璃轻石 J₂ 性能较优, 且材料透水性与雨强、使用厚度分别呈极显著正相关和负相关关系 ($p < 0.01$); (3) 在蒸发抑制性能方面, 玻璃轻石 J₁、玻璃轻石 J₂、陶粒、火山石及膨胀珍珠岩可显著降低土壤累积蒸发量 ($p < 0.05$)。 [结论] 不同材料之间物理特性 (微观结构、反射率等) 差异明显, 玻璃轻石 J₁、玻璃轻石 J₂ 及陶粒 3 种覆盖材料较其他材料能更好地抑制土壤蒸发的发生, 可为高寒矿区冻土层近自然重构提供物质基础。

关键词: 高寒矿区; 冻土退化; 透水性; 无机多孔材料; 蒸发抑制特性

中图分类号: S714.2; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0198-09

Effect of different mulching materials on soil evaporation characteristics of disturbed interface in alpine mining area

Yang Chunyan¹, Wang Xiaozhan¹, Shi Changqing^{1,2,3,4}, Yang Jianying^{1,2,3}, Sun Zhilong¹, Deng Monan¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Forestry Ecological Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3.Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4.State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The purposes of this study are to investigate the permeability of different inorganic porous materials and the influence of ground mulch on soil evaporation, and to provide a certain basis for solving the problems of lower water infiltration and increase of evapotranspiration in permafrost areas caused by the exploitation of mineral resources in permafrost regions. [Methods] Eight kinds of inorganic porous materials were used as research objects to analyze the differences in their basic physical properties, such as microstructure and reflection characteristics. Three rainfall intensities were set to study the permeability of the materials under different thicknesses. Meanwhile, evaporation tests were carried out to investigate the effects of different mulching materials on the characteristics of soil moisture evaporation. [Results] (1) The

收稿日期: 2024-04-02

修回日期: 2024-04-17

接受日期: 2024-05-21

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目“高寒矿区水源涵养功能恢复新型材料和冻土剖面近自然重构技术研发与试验示范”(2022YFF1302604)

第一作者: 杨春艳(1997—), 女, 贵州六盘水人, 硕士研究生, 研究方向为矿山生态修复。E-mail: 2048536316@qq.com

通信作者: 史常青(1969—), 男, 河北康保人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持及林业生态工程研究。E-mail: scqbj@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

basic physical properties of the eight materials, such as dry bulk, wet bulk weight, pore properties and reflectance, varied significantly ($p < 0.01$), among which glass pumice J₁, glass pumice J₂ and ceramic aggregate had moderate aeration and water holding capacity. (2) In terms of water permeability, volcanic stone, maifanite, ceramic aggregate, glass pumice J₁ and glass pumice J₂ had better performance. Moreover, permeability of the material was significantly inversely proportional to thickness and proportional to the rainfall intensity ($p < 0.01$). (3) In terms of evaporation inhibition performance, glass pumice J₁, glass pumice J₂, ceramic aggregate, volcanic stone and expanded perlite reduced the cumulative evaporation of soil significantly ($p < 0.05$). [Conclusion] The physical properties (microstructure, reflectivity, etc.) of different materials are significantly different. The three mulching materials of glass pumice J₁, glass pumice J₂ and ceramic aggregate can better inhibit the occurrence of soil evaporation than other materials, which can provide a material basis for the near-natural reconstruction of permafrost in alpine mining area.

Keywords: alpine mining area; permafrost degradation; permeability; inorganic porous material; evaporation inhibition property

青藏高原具有高海拔、强辐射、蒸发强、温差大、植被类型相对单一、多年冻土发育等特点,生态环境极为脆弱,可提供水源涵养、冻土保护等多种生态系统服务,而泥炭在其中扮演着重要角色^[1-2]。近年来,冻土区矿产资源的大规模开发对冻土区生态稳定性造成了严重冲击。特别是青海省木里煤矿的大面积开采,直接将上部泥炭缓冲层剥离,取而代之的是开采剥离物和煤矸石。一方面,煤矸石在物理、化学风化过程中吸收、释放热量,内部温度场不断变化,随着热量的积聚而逐渐升高,下部土体升温、冻土融化,从而造成活动层厚度的增加^[3]。另一方面,风化程度较高的煤矸石易堵塞毛孔,造成表层板结,影响水分下渗,从而在垂直方向和水平方向上加剧了冻土的退化^[1]。此外,有研究表明,深色土壤的蒸发量高于浅色土壤,而土壤蒸发量与净辐射量成正比^[4]。活动层厚度的增加会导致蒸散发的增大,进而加重当地的水资源紧缺和植被退化问题^[5]。因此,如何采取一定的措施来改变矿区开采地水分入渗受阻、蒸散发增大等冻土退化现状,已经成为冻土区矿山生态修复的重中之重。

地表覆盖是改变土壤表面蒸发条件的最有效的方法之一^[4]。目前,已取得的材料覆盖对土壤水分蒸发的影响等方面的研究成果很多,所涉及的材料主要是有机废弃物、地膜、砂石等。Zribi等^[6]将土工膜和几种有机覆盖材料进行对比,发现土工膜和松树皮覆盖对土壤水分蒸发抑制效果更好。但有机覆盖物的化学稳定性较差,易于腐熟和风化,作用时间较短,而地膜、土工膜会阻碍雨水的下渗,不能很好地解决高寒矿区水分下渗受阻和蒸散发增大的问题。而在砂石覆盖方面,赵文举等^[7]研究5种覆盖模式对土壤水分蒸发的抑制效果,得出覆砂处理是最符合甘肃省中部的覆盖模式;Bonachela等^[8]研究发现砾石覆盖可

减少土壤蒸发,增加向植物反射的短波辐射,但覆盖上方的气温波动比无覆盖时更强烈;蔡永坤等^[9]通过不同砂石覆盖度和砂石粒径对土壤蒸发的影响研究,得出砂石覆盖度越大,粒径越小,其抑制效果越明显,蒸发越趋于平稳。此外,一些商品如蓄水陶土层^[10]、陶粒^[11]、蚯蚓粪^[12]以及膨胀珍珠岩^[13]等也有显著的抑制土壤蒸发作用。

目前,无机材料覆盖的研究涉及材料种类较少,且对覆盖材料的基本性质和透水性研究鲜有报道。为此,本研究选取8种吸附性强、无污染的无机材料,分析其基本物理性质和孔隙结构,并设置不同雨强,测定材料的透水率,同时开展模拟蒸发试验,探究不同材料覆盖对土壤蒸发特性的影响,以期为材料应用于高寒区冻土层近自然重构提供一定的物质基础和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究共8种试验材料,基本信息见表1。所有材料试验前均置于恒温干燥箱60℃烘干24h,烘干其表面水分,再置于密闭空间内冷却至室温并进行密封保存。试验用土质地为粉壤土,其机械组成为黏粒、粉粒和砂粒分别占6.09%,52.87%和41.04%,土壤容重为1.32 g/cm³,经自然风干后过2 mm筛,备用。

1.2 试验设计

1.2.1 材料表征分析 将超声清洗、干燥后的材料用导电胶固定在样品台上并进行真空喷金,采用日立S-3400N II型扫描电子显微镜观测材料在放大500倍条件下的微观结构。

1.2.2 材料物理性质测定 采用体积为500 cm³的环刀,底部垫上一张滤纸后称重(m_0),环刀填满材料后称

重(m_1),将环刀完全浸泡在水中 24 h 后擦干表面水分称重(m_2),浸泡后的环刀自然排干重力水后称重(m_3),最后放入烘箱 105 ℃ 温度条件下烘干至恒重后进行称重(m_4)。计算材料干容重(DBD)、湿容重(WBD)、总孔隙度(TP)、通气孔隙度(AP)、持水孔隙度(WHP)、水气比(WHP/AP)等指标^[14]。

表 1 试验材料基本信息

Table 1 Basic information of the tested materials			
材料名称	代码	颜色	粒径/mm
陶粒	Ceramic aggregate, CA	黑褐色	3~6
煤渣	Coal cinder, CC	灰褐色	
膨胀珍珠岩	Expanded perlite, EP	白色	
膨胀蛭石	Expanded vermiculite, EVM	金黄色	
麦饭石	Maifanite, MFS	金黄色	
火山石颗粒	Volcanic stone, VS	红色	3~5
玻璃轻石 J ₁	Glass pumice J ₁ , GP ₁	白色	
玻璃轻石 J ₂	Glass pumice J ₂ , GP ₂	白色	

将 S-LIB-M003 总辐射传感器架设在材料表面和照明灯之间、上下距离均为 20 cm,测定材料的反射辐射量和人工气候箱照明灯入射辐射量。将材料反射率(reflectivity, R)定义为材料表面反射辐射量(G_r)与材料表面入射辐射量(G_i)之比^[15],即:

$$R=\frac{G_r}{G_i} \tag{1}$$

1.2.3 材料透水性能测定 本研究采用透水率 W_p (permeability rate, %) 来表征材料的透水性能。将透水率 W_p (%) 定义为单位时间内透过单位面积材料的水量深度与降雨强度的比值,介于 0~1。可由下式计算:

$$W_p=\frac{Z_p}{TP}\times 100\% \tag{2}$$

式中: W_p 为材料透水率(%); Z_p 为单位时间内的透水深度(mm); T 为降雨时长(h); P 为降雨强度(mm/h)。

采用自制的透水率测定简易装置(图 1)测定材料的透水率,根据祁连山区降雨特征^[16],设置 30,60,90 mm/h 3 种降雨强度,3,5,7,10 cm 4 种使用厚度。在试样桶(直径 15 cm、高 20 cm,底部均匀分布 2 mm 孔)桶壁涂抹凡士林,底部填装 2 cm 厚石英砂滤层,材料按照其干容重填装至设计厚度后,置于降雨喷头下方,调节至雨强相应的压力值,开始降雨并计时,读取降雨 2 h 时集雨桶的液面刻度。

1.2.4 模拟蒸发试验 试验共有 9 种处理,分别为 8 种材料覆盖处理和裸土(CK),各处理设置 3 次重复。蒸发桶(直径 15 cm、高 15 cm,底部均匀分布 2 mm 孔)底部填充 1 cm 厚的石英砂滤层,按 1.32 g/cm³ 容

重填装 8 cm 厚的风干土后,浸水 12 h 饱和后排干重力水并称重,然后将 8 种材料于上部均匀铺设 4 cm 并用保鲜膜封底后称重。将蒸发桶放入人工气候箱中,参考青海省木里矿区的气候要素^[17],将温度设置为 20 ℃,相对湿度保持在 50%±2%,每天 9:00—17:00 开启光照,10:00 用电子天平(精度 0.1 g)称重,蒸发历时为 30 d。

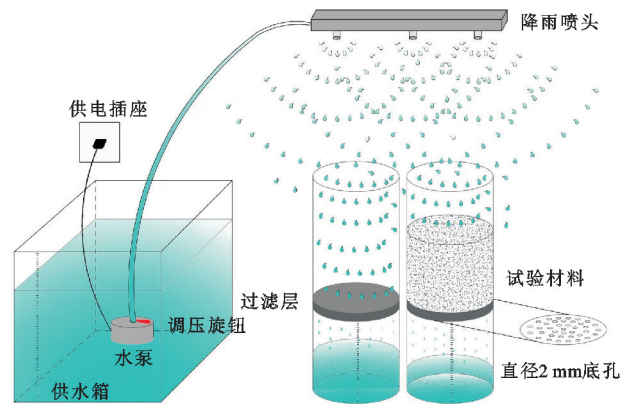


图 1 透水试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of water permeability test device
土壤日蒸发量、累积蒸发量及累积蒸发抑制率的计算方法^[18]:

$$E_t=10\times\frac{\Delta M}{\pi r^2\rho_w} \tag{3}$$

$$EC_t=\sum E_t \tag{4}$$

$$I=\frac{EC_0-EC_t}{EC_0}\times 100\% \tag{5}$$

式中: t 为蒸发天数, $t=1,2,3,\dots,30$ d; E_t 为第 t 天的土壤日蒸发量(mm); ΔM 为前后两次称量的差值(g); r 为蒸发桶内径(cm); ρ_w 为水的密度(g/cm³); EC_t 为第 t 天的土壤累积蒸发量(mm); I 为覆盖材料对土壤蒸发的累积蒸发抑制率(%); EC_0 为对照土壤累积蒸发量(mm)。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件对数据进行整理分析,利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验不同材料之间各指标的显著差异性($p<0.05$),并采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同材料的微观结构

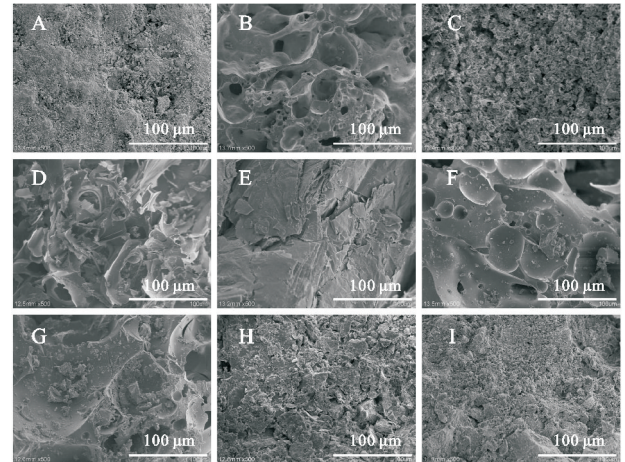
图 2 为不同材料的电镜扫描图,可见不同材料的结构、颗粒排列及孔隙状况存在较大的差异,孔隙的存在可增加水分的吸附面积。陶粒表面较粗糙,含少量微孔,相对内部结构较致密(图 2A),内部为疏松多孔的结构,包含有大量的闭口孔隙(图 2B);煤渣颗粒

排列均匀、结构膨松,含大量不均匀和不规则的孔隙(图 2C);不同于陶粒和煤渣,膨胀珍珠岩存在大量蜂窝状的孔隙,孔壁破碎、相互连通形成丰富的孔道结构,呈片状结构随机分布(图 2D);而膨胀蛭石具有典型的非均匀层状结构,无序堆积的片状固体之间存在众多孔隙(图 2E);玻璃轻石 J₁(图 2F)和玻璃轻石 J₂(图 2G)相似,孔壁附着碎屑物质,但玻璃轻石 J₂附着物质较多且孔径小;麦饭石为片层状结构,表面凹凸不平、有沟壑并露出内部微孔结构,质地较致密(图 2H);火山石呈网孔状外貌,高低大小不一的孔洞和细颗粒布满整个表面,含大量凹坑结构(图 2I)。

2.2 不同材料的物理性质比较

2.2.1 不同材料的物理性质分析 表 2 为不同材料的基本物理性质对比。结果表明,8 种材料的容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度及水气比的差异均达到极显著水平($p < 0.01$)。膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、玻璃轻石 J₁、玻璃轻石 J₂及煤渣湿容重分别是干容重的 4.63,3.48,2.57,1.89 及 1.61 倍,具有较强的吸水能力。总孔隙度可反映基质的总体孔隙状况,由通气孔隙度和持水孔隙度组成,通气孔隙度反映了基质的通气性,持水孔隙度反映了基质的持水特性^[19]。膨胀蛭石总孔隙度最大,煤渣、膨胀珍珠岩、玻璃轻石 J₁

及玻璃轻石 J₂次之,陶粒、火山石及麦饭石最小;在通气孔隙度方面,玻璃轻石 J₁最大,玻璃轻石 J₂、膨胀蛭石、陶粒、煤渣、膨胀珍珠岩及麦饭石次之,火山石最小;膨胀珍珠岩、煤渣及膨胀蛭石的持水孔隙度和水气比均极显著高于其余材料,具有较高的持水能力。



注:图中 A 和 B 分别为陶粒(CA)的表面和内部;C 为煤渣(CC);D 为膨胀珍珠岩(EP);E 为膨胀蛭石(EVM);F 为玻璃轻石 J₁(GP₁);G 为玻璃轻石 J₂(GP₂);H 为麦饭石(MFS);I 为火山石(VS)。

图 2 不同材料的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of different materials

表 2 不同材料的物理性质对比

Table 2 Comparison of physical properties of different materials

材料	DBD/(g · cm ⁻³)	WBD/(g · cm ⁻³)	TP/%	AP/%	WHP/%	WHP/AP
CA	0.68±0.03d	0.95±0.05d	27.47±2.13e	19.48±2.00bcd	7.99±0.16g	0.41±0.04d
CC	0.81±0.03c	1.31±0.07b	49.67±4.14b	17.67±2.49cd	32.00±1.66b	1.83±0.18b
EP	0.12±0.01g	0.57±0.02f	45.06±1.62bc	16.73±1.73de	28.33±0.90c	1.71±0.20b
EVM	0.28±0.01f	0.96±0.01d	68.18±0.06a	20.96±0.75bc	47.22±0.70a	2.26±0.12a
GP ₁	0.27±0.02f	0.70±0.06e	42.74±4.11c	28.63±3.73a	14.11±0.75d	0.50±0.06d
GP ₂	0.36±0.02e	0.69±0.05e	32.44±3.24d	22.59±2.30b	9.85±1.19e	0.44±0.04d
MFS	1.53±0.07a	1.70±0.09a	17.54±2.45f	13.49±1.94ef	4.05±0.62h	0.30±0.03d
VS	1.00±0.04b	1.21±0.04c	20.91±0.93f	12.36±0.34f	8.55±0.66ef	0.69±0.04c

注:表中同列数据后不同小写字母表示材料之间的显著性差异, $p < 0.05$;上述代码 CA,CC,EP,EVM,GP₁,GP₂,MFS,VS 分别代表陶粒、煤渣、膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、玻璃轻石 J₁、玻璃轻石 J₂、麦饭石、火山石,下同。

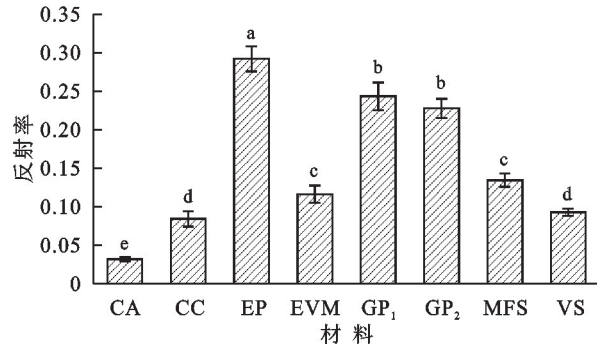
2.2.2 不同材料的反射率对比 材料反射率与其颜色、粒径等因素息息相关。如图 3 所示,不同材料的反射率整体表现为膨胀珍珠岩 > 玻璃轻石 J₁ > 玻璃轻石 J₂ > 麦饭石 > 膨胀蛭石 > 火山石 > 煤渣 > 陶粒。其中,膨胀珍珠岩(0.292)反射率极显著高于其余材料,而陶粒(0.032)极显著低于其余材料($p < 0.01$),不足膨胀珍珠岩的 11%。其次,玻璃轻石 J₁(0.244)和玻璃轻石 J₂(0.228)反射率差异不显著,分别是陶粒的 7.63 倍和 7.13 倍。膨胀蛭石(0.116)和麦饭石(0.135)、煤渣(0.084)和火山石(0.093)反射率差异不显著,依次分别是陶粒的 3.64 倍、4.21 倍、2.64 倍和 2.91 倍。上述结果表明了材料的颜色和反射率存在密切关系,总

体趋势为白色材料(膨胀珍珠岩、玻璃轻石 J₁及玻璃轻石 J₂)的反射率较高,其次为金黄色(膨胀蛭石、麦饭石)、红色(火山石)和灰褐色材料(煤渣),最低是黑褐色材料(陶粒)。

2.3 不同材料的透水性能

不同雨强条件下材料不同使用厚度的透水率大小如图 4 所示。结果表明,材料透水率与雨强呈极显著正相关($r = 0.509, p < 0.01$),与使用厚度呈极显著负相关($r = -0.645, p < 0.01$)。在相同雨强和使用厚度条件下,材料透水率整体表现为火山石、麦饭石及陶粒最大,玻璃轻石 J₁和玻璃轻石 J₂次之,膨胀珍珠岩、煤渣及膨胀蛭石最小。特别是在 90 mm/h 雨强条件下,

材料在 7 cm 使用厚度下的透水率高于 90%，其中煤渣和麦饭石在 10 cm 厚度条件下的透水率低于 60 mm/h，可能是因为雨强大的雨滴动能较大，煤渣和麦饭石破碎化、愈发紧实，从而降低了透水性。



注：图中不同小写字母表示不同材料之间的显著性差异， $p<0.05$ 。

图 3 不同多孔材料的反射率差异

Fig. 3 Differences in reflectivity of different porous materials

2.4 不同材料覆盖下的土壤蒸发特性

2.4.1 不同材料覆盖下土壤日蒸发量 土壤蒸发是

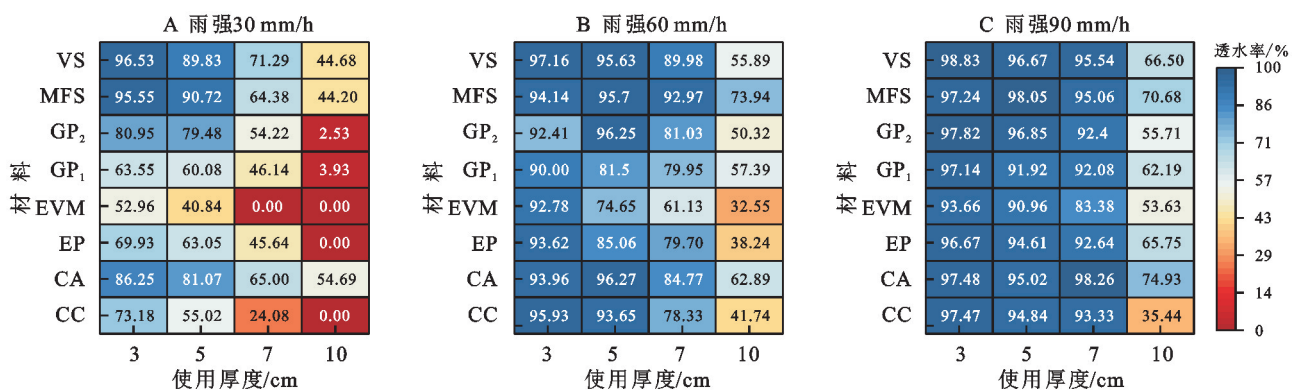


图 4 不同雨强条件下材料不同使用厚度的透水率大小

Fig. 4 Permeability rate of materials with different thickness under different rainfall intensities

2.4.2 不同材料覆盖下土壤累积蒸发量 覆盖是影响土壤蒸发过程的方式之一。不同材料覆盖下土壤累积蒸发量随蒸发时间的变化曲线如图 5B 所示，结果表明，随蒸发时间的推移，土壤蒸发过程呈现出明显的阶段性变化，即在前期基本呈线性增加，后期增速逐渐减缓。此外，不同材料覆盖下土壤 30 d 的累积蒸发量大小依次为玻璃轻石 J_1 < 玻璃轻石 J_2 < 陶粒 < 火山石 < 膨胀珍珠岩 < 裸土(CK) < 膨胀蛭石 < 麦饭石 < 煤渣，整体上，大部分材料覆盖显著降低了土壤累积蒸发量，其中玻璃轻石 J_1 和玻璃轻石 J_2 覆盖的效果最为显著，而煤渣覆盖和麦饭石覆盖的累积蒸发量远大于裸土(CK) ($p<0.05$)。在持续蒸发 30 d 后，玻璃轻石 J_1 覆盖和玻璃轻石 J_2 覆盖的累积蒸发量分别为 6.34 mm 和 6.64 mm，仅是 CK(11.52 mm) 的 55.06% 和 57.67%，且累积蒸发量随时间的变化曲线高度重合；煤渣覆盖和麦饭石覆盖的累积蒸发量为 14.40 mm

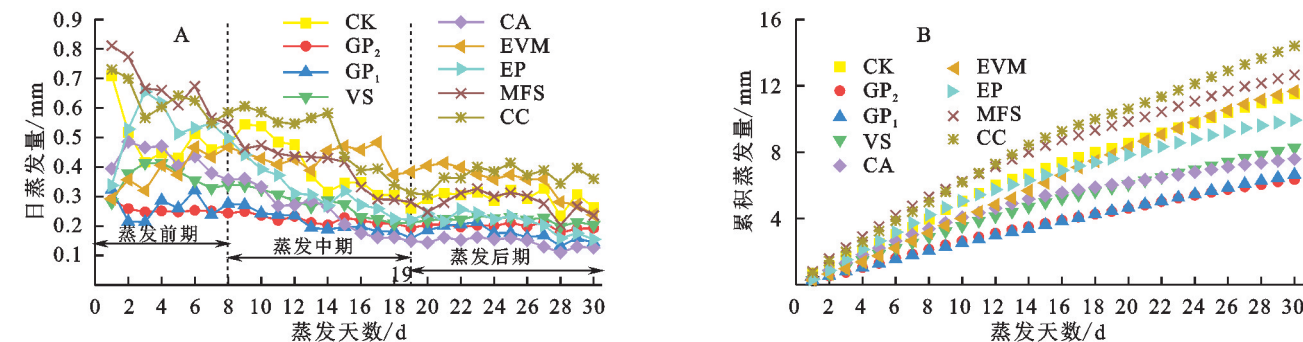
指土壤水分汽化后从土壤表面进入大气的过程，是土壤水分损失的重要因素之一，有效抑制土壤水分的无效蒸发对提高土壤水分的利用效率有重要意义^[9]。图 5A 为不同材料覆盖下土壤日蒸发量随蒸发时间的变化曲线，整体上，不同材料覆盖和无覆盖处理的土壤日蒸发量一致地呈现出随蒸发天数的增加而逐渐降低的趋势。其中，膨胀珍珠岩、陶粒、火山石及膨胀蛭石 4 种材料覆盖下的土壤日蒸发量初期较低，是因为材料具有较强的吸水特性，覆盖层对水汽扩散也有一定阻力，且减少了到达土壤表面的太阳能、减少空气湍流。不同材料覆盖下的土壤蒸发过程均可大致可分为 3 个阶段：蒸发量波动较大的前期(第 1—8 天)、蒸发量波动较小的中期(第 9—19 天)和蒸发量趋于稳定的后期(第 20—30 天)，蒸发后期不同覆盖材料之间的日蒸发量差异逐渐减小，整体上呈现出陶粒 < 玻璃轻石 J_1 < 膨胀珍珠岩 < 玻璃轻石 J_2 < 火山石 < 麦饭石 < 裸土(CK) < 膨胀蛭石 < 煤渣 ($p<0.05$) 的规律。

和 12.66 mm，分别为 CK 的 1.25 倍和 1.10 倍。

2.4.3 不同覆盖材料的蒸发抑制效果 蒸发抑制效率是指在土壤蒸发过程中某些指标抑制土壤水分蒸发的能力^[20]。不同覆盖材料下土壤累积蒸发抑制率随时间的变化如图 6 所示，累积蒸发量越小，则蒸发抑制效果越强。整体上，不同材料覆盖的蒸发抑制效果表现为玻璃轻石 J_1 > 玻璃轻石 J_2 > 陶粒 > 火山石 > 膨胀珍珠岩 > 膨胀蛭石 > 麦饭石 > 煤渣，其中除膨胀蛭石、麦饭石及煤渣 3 种材料覆盖，其余材料覆盖均显著抑制了土壤水分的蒸发($p<0.05$)。不同材料覆盖均在蒸发第 1 天蒸发抑制效果最佳，除煤渣和麦饭石外，其余覆盖材料的累积蒸发抑制率最大值均在 44%~61% 范围内；蒸发前期 1—12 d 内，土壤蒸发过程均不稳定，累积蒸发抑制率变化幅度较大，膨胀蛭石覆盖下的蒸发抑制率随时间的推移而减小，而其余材料覆盖均呈现出一致的变化趋势，即随蒸发天

数的增加,表现出先降低、再升高的趋势;蒸发 12 d 之后,不同覆盖材料的蒸发抑制率表现不一,随蒸发天数的增加,陶粒、膨胀珍珠岩及麦饭石 3 种材料覆盖均平缓升高,而玻璃轻石 J₁、玻璃轻石 J₂、火山石、膨胀蛭石及煤渣 5 种材料覆盖则是平缓下降。由表

3 可看出:玻璃轻石 J₂ 和膨胀蛭石覆盖下蒸发抑制率表现为蒸发前期>蒸发中期>蒸发后期,陶粒、膨胀珍珠岩及麦饭石覆盖则表现为蒸发后期>蒸发中期>蒸发前期,煤渣、玻璃轻石 J₁ 及火山石 3 种材料覆盖下各蒸发阶段的蒸发抑制率相差不大。



注:图中代码 CK 代表裸土(对照组),其余同上。

图 5 不同材料覆盖下土壤日蒸发量、累积蒸发量随时间的变化

Fig. 5 Changes of daily soil evaporation and soil cumulative evaporation with time under different mulching materials

表 3 不同材料覆盖下不同蒸发阶段蒸发抑制率的对比

Table 3 Comparison of evaporation inhibition rates at different evaporation stages under different mulching material %

蒸发阶段	CA	CC	EP	EVM	GP ₁	GP ₂	MFS	VS
蒸发前期(1—8 d)	14.55	—26.01	—6.51	21.45	46.27	48.60	—33.76	27.15
蒸发中期(9—19 d)	38.64	—23.65	21.14	—9.98	46.68	43.82	0.04	31.25
蒸发后期(20—30 d)	51.51	—25.61	28.74	—17.61	41.02	32.73	6.03	25.72
全过程	33.98	—25.02	13.76	—1.31	44.94	42.33	—9.91	28.28

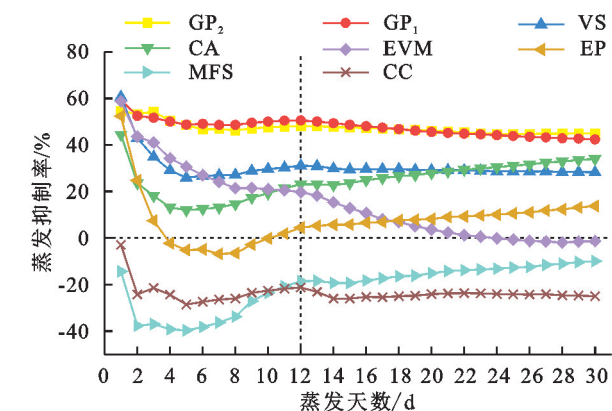


图 6 不同材料覆盖下累积蒸发抑制率的动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of cumulative evaporation inhibition rate under different mulching materials

3 讨论

3.1 材料透水性能大小

多孔材料吸水表面微孔越多,吸水性相对越大,透水性反之越弱。本研究中,电镜分析反映出多数材料具有孔隙结构,其中,膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、玻璃轻石、陶粒等材料的孔隙结构是加工过程中瞬时高温导致内部结晶水突然蒸发膨胀或产生大量 CO₂ 而形成的^[21-23]。较大的颗粒粒径、孔径和松散的存在状态可

以增大基质材料的总孔隙度,总孔隙越大,材料比表面积也就越大,容纳水、气的能力也增强。本研究中膨胀蛭石、膨胀珍珠岩、煤渣及玻璃轻石总孔隙度显著高于其他材料,魏佳^[24]、席梦涵^[25]等研究也得出类似的结论。此外,湿容重与干容重也反映出了材料的吸水性,在一定程度上也体现了材料的保水性。本研究中,膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、玻璃轻石、煤渣是吸水性较强的 4 种材料,表现出了较差的透水性,与 Eksi^[26]、黄启华^[27]、王啸宇^[28]等研究结果相似。其次,外界条件(如降雨强度、风速等)对材料的透水性也有一定的影响。降雨强度越大,雨滴逐渐变大,进而其重力势能和动能亦随之增大,水分更易穿透材料。但本研究中,10 cm 厚度时,煤渣和麦饭石在 90 mm/h 雨强下的透水率低于 60 mm/h 雨强,可能是因为煤渣和麦饭石,较大雨强的雨滴动能越大,导致颗粒破碎并堵塞孔隙。综上,材料透水性大小受自身性质(孔隙状况、疏松程度等)和外界条件(如降雨强度、风速等)的影响。而同一种材料,粒级的大小也影响着材料的物理性质和透水性,在今后的研究中需加强不同粒径范围的材料的基本物理性质和透水性的探究。

3.2 材料覆盖改变土壤蒸发特性的作用机制

土壤蒸发可分为水分的汽化和水汽扩散 2 个过

程^[29]。因此,当采取覆盖措施后,蒸发到大气中的水分可分为两个部分:一是土壤水分汽化后穿过覆盖层孔隙扩散至大气;二是部分水汽被覆盖层吸持后,再次汽化逃离覆盖层、扩散至大气(图7)。

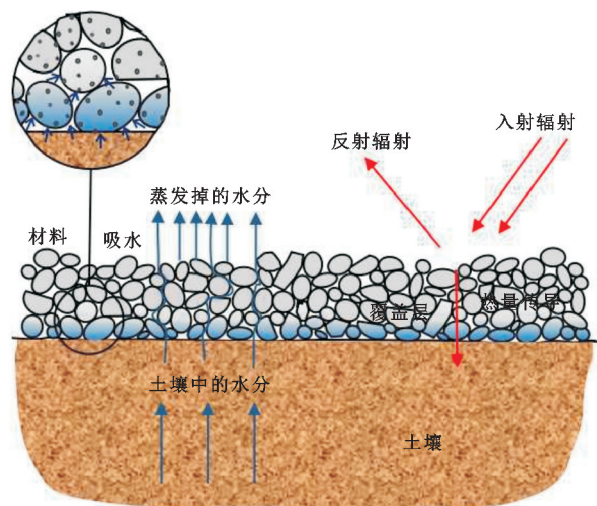


图7 多孔材料覆盖下土壤水分蒸发过程

Fig. 7 Soil water evaporation process under the mulching of porous material

覆盖材料自身颗粒的多孔性和不同的堆积密度决定了覆盖层孔隙的结构和数量^[30]。本研究中,不同材料覆盖蒸发抑制率最大值均出现在第1天,是因为多孔材料覆盖层作为大气和土壤表面之间的缓冲介质,能增大空气动力学粗糙度,延长水汽扩散至覆盖层一大气界面的时间和距离^[7]。丛文成等^[30]研究指出玉米芯颗粒可显著降低土壤蒸发量。本研究认为:由于多孔材料具有吸附、结合和释放水汽的能力,如膨胀蛭石和麦饭石结合水分子可形成氢键,提高了自身比热容,放出水分就需要更多的能量,而车陆禄等^[31]研究中也得出松针吸水特性和盖层延缓土表温度变化是抑制土壤蒸发过程的主要原因。但本研究中,膨胀蛭石、麦饭石及煤渣覆盖反而促进了土壤蒸发,可能有两个原因:一是材料覆盖过厚且吸水膨胀,失水过程中表面出现干裂等情况,增大蒸发面积;二是材料吸水后,反射能力有所减弱,有更多的热量传递至土体内部^[32]。另外,本研究中陶粒蒸发抑制效果仅次于玻璃轻石,而Fekri等^[11]也指出陶粒覆盖能有效减少土壤蒸发,因为陶粒内部的闭口气孔使其具有较低的导热能力,阻止热量向下传递。此外,覆盖材料颜色浅的材料可反射部分太阳辐射,抑制显热热流的释放,从而抑制覆盖层的热传导效应。本研究中,白色的玻璃轻石和膨胀珍珠岩的反射率显著高于其他材料,和Bonachela等^[8]研究得出的结论一致。而在蒸发后期覆盖和对照效果差异渐小,因为对照在干旱过程中也会逐步形成气相阻滞层,限制了水分向

大气的扩散^[33]。综上,覆盖材料性质(孔隙状况、颜色等)和外界环境因子(如风速、温度等)共同影响着土壤水分蒸发过程。

覆盖材料粒级和厚度对水分蒸发和植物生长影响较大,后续应进一步研究不同覆盖厚度和覆盖粒级对土壤蒸发的影响及对典型生态修复植物的生长的影响,提升材料在冻土区生态修复中的应用价值。

4 结论

8种材料间的干湿容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度及反射率呈极显著差异($p < 0.01$),其中玻璃轻石J₁、玻璃轻石J₂及陶粒3种材料综合物理性质适中;在透水性能方面,火山石、麦饭石、陶粒、玻璃轻石J₁及玻璃轻石J₂表现较优,且材料透水性 with 雨强、使用厚度分别呈极显著正相关和负相关关系($p < 0.01$);在蒸发抑制性能方面,玻璃轻石J₁、玻璃轻石J₂、陶粒、火山石及膨胀珍珠岩显著降低了土壤累积蒸发量,具有较强的蒸发抑制性能。综上,玻璃轻石J₁、玻璃轻石J₂及陶粒3种材料的综合性能较好,可为高寒矿区冻土层近自然重构等研究与实践提供一定的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 王伟超,梁振新,张文龙,等.青海省祁连山聚乎更矿区冻土特征及其生态地质功能作用研究[J].中国煤炭地质,2022,34(7):56-60,66.
Wang W C, Liang Z X, Zhang W L, et al. Research on permafrost characteristics and eco-geological function of Juhugen mining area, Qilian Mountains, Qinghai Province[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(7): 56-60, 66.
- [2] 程国栋.局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J].中国科学:地球科学,2003,33(6):602-607.
Cheng G D. The influence of local factors on the distribution of permafrost and its enlightenment to the design of Qinghai-Xizang Railway[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2003, 33(6): 602-607.
- [3] 徐良骥,朱小美,刘曙光,等.不同粒径煤矸石温度场影响下重构土壤水分时空响应特征[J].煤炭学报,2018,43(8):2304-2310.
Xu L J, Zhu X M, Liu S G, et al. Temporal and spatial response characteristics of reconstructed soil moisture under different particle size coal gangue temperature field[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2304-2310.
- [4] 祝晨佳,高吉喜.土壤蒸发影响因素及抑制途径研究综述[J].环境保护科学,2024,50(4):19-26.

- Zhu C J, Gao J X. A review of the factors affecting soil evaporation and its inhibition methods [J]. *Environmental Protection Science*, 2024, 50(4):19-26.
- [5] 季芳,范林峰,匡星星,等.青藏高原多年冻土退化对蒸散发的影响[J].*水科学进展*, 2022, 33(3):390-400.
- Ji F, Fan L F, Kuang X X, et al. Role of permafrost degradation on evapotranspiration on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3):390-400.
- [6] Zribi W, Aragüés R, Medina E, et al. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 148:40-45.
- [7] 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.
- Zhao W J, Ma H, Yu W, et al. Effect of different mulching modes on soil moisture evaporation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(6):539-544.
- [8] Bonachela S, López J C, Granados M R, et al. Effects of gravel mulch on surface energy balance and soil thermal regime in an unheated plastic greenhouse[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192:1-13.
- [9] 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, 297.
- Cai Y K, Li Y, Feng H. Effects of gravel-sand mulching degree and size on soil moisture evaporation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6):273-277, 297.
- [10] 常艺睿,马娟娟,孙西欢,等.上覆蓄水陶土层对黄土高原土壤水分入渗与蒸发的影响[J].*水土保持学报*, 2022, 36(6):101-109.
- Chang Y R, Ma J J, Sun X H, et al. Effect of overlying water storage clay layer on soil water infiltration and evaporation on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):101-109.
- [11] Fekri M, Kasmaei L S. Effects of windy sand and LECA mulches on decreasing evaporation from soil surface[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(1):163-168.
- [12] 李彦霁,邵明安,王娇.蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响[J].*土壤学报*, 2018, 55(3):633-640.
- Li Y P, Shao M A, Wang J. Effects of earthworm cast mulch on soil evaporation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3):633-640.
- [13] 李瑞娟,刘文兆,王培榛.春小麦蒸腾测定中茎流计的标定及其应用[J].*干旱地区农业研究*, 2012, 30(6):79-82, 93.
- Li R J, Liu W Z, Wang P Z. Application and calibration of sap flow gauge in spring wheat transpiration[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6):79-82, 93.
- [14] 郭世荣.无土栽培学[M].2版.北京:中国农业出版社, 2011.
- Guo S R. Soilless culture[M]. 2nd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [15] 王继伟,张明义,夏明海,等.热反射技术及其在多年冻土区道路热保护中的应用[J].*冰川冻土*, 2020, 42(1):282-294.
- Wang J W, Zhang M Y, Xia M H, et al. Heat-reflective technology and its application in the thermal protection of roads in permafrost regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1):282-294.
- [16] 李岩瑛,张强,许霞,等.祁连山及周边地区降水与地形的关系[J].*冰川冻土*, 2010, 32(1):52-61.
- Li Y Y, Zhang Q, Xu X, et al. Relationship between precipitation and terrain over the Qilian Mountains and their ambient areas [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1):52-61.
- [17] 张玉芳,李希来,金立群,等.基于高寒矿区颗粒有机肥和羊板粪配施的无客土重构土壤理化性质分析[J].*中国土壤与肥料*, 2023(7):129-137.
- Zhang Y F, Li X L, Jin L Q, et al. Analysis of soil physicochemical properties based on combined application of granular organic fertilizer and sheep board manure in alpine mining areas[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(7):129-137.
- [18] 张建国,赵英,徐新文,等.极端干旱区咸水灌溉下流沙压埋的减蒸抑盐效应[J].*应用生态学报*, 2014, 25(5):1415-1421.
- Zhang J G, Zhao Y, Xu X W, et al. Effect of shifting sand burial on evaporation reduction and salt restraint under saline water irrigation in extremely arid region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(5):1415-1421.
- [19] 肖超群,郭小平,刘玲,等.绿化废弃物堆肥配制屋顶绿化新型基质的研究[J].*浙江农林大学学报*, 2019, 36(3):598-604.
- Xiao C Q, Guo X P, Liu L, et al. Greening waste compost as a new substrate for green roofs[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(3):598-604.
- [20] 姜海波,唐凯,何新林.抑制干旱区平原水库蒸发试验及蒸发模型研究[J].*干旱区资源与环境*, 2016, 30(1):119-124.
- Jiang H B, Tang K, He X L. Experimental study on inhibiting water surface evaporation of reservoir in arid region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(1):119-124.

- [21] 赵思颢,晏华,李云涛,等.石蜡/膨胀珍珠岩复合相变材料的性能研究[J].化工新型材料,2017,45(9):89-91.
Zhao S X, Yan H, Li Y T, et al. Study on performance of paraffin/expand perlite composite phase material[J]. New Chemical Materials, 2017, 45 (9):89-91.
- [22] 刘梦欣,李素艳,孙向阳,等.园林废弃物堆肥用于屋顶绿化轻型基质的配方筛选[J].环境工程学报,2022,16(7):2374-2380.
Liu M X, Li S Y, Sun X Y, et al. Screening of light substrate formulations of garden waste compost for roof greening [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(7):2374-2380.
- [23] 齐晓雪,张宸,于江华.基于建筑废弃物的轻石制备及其对重金属的吸附性能[J].环境工程,2022,40(8):171-177.
Qi X X, Zhang C, Yu J H. Preparation of pumice based on construction waste and its adsorption performance on heavy metals[J]. Environmental Engineering, 2022, 40 (8):171-177.
- [24] 魏佳,路天宇,王朝胜,等.不同粒级园艺基质原料物理性质差异分析[J].北京农学院学报,2022,37(4):13-18.
Wei J, Lu T Y, Wang C S, et al. Analysis of physical properties differences of different grain grades of horticultural substrate materials[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2022, 37(4):13-18.
- [25] 席梦涵,郑思俊,张青萍,等.屋顶绿化单体基质材料对降雨径流氮磷特征的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2019,43(3):77-84.
Xi M H, Zheng S J, Zhang Q P, et al. Influence of roof greening substrate materials on nitrogen and phosphorus characteristics in rainfall runoff[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2019, 43(3):77-84.
- [26] Eksi M, Sevgi O, Akburak S, et al. Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates [J]. Ecological Engineering, 2020, 156: 105966.
- [27] 黄启华,徐晓军,段正洋,等.灌木式屋顶绿化设计及对屋面初期雨水的净化[J].水土保持通报,2018,38(1):198-202.
Huang Q H, Xu X J, Duan Z Y, et al. Design of green shrub roof and purification of initial roof runoff [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 198-202.
- [28] 王啸宇,郑思俊,张青萍,等.屋顶绿化适用栽培基质材料保水特性比较研究[J].西北林学院学报,2017,32(5):257-262.
Wang X Y, Zheng S J, Zhang Q P, et al. Comparative study on water retention characteristics of roof greening media[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(5):257-262.
- [29] 孟杰,卜崇峰,张兴昌,等.移除和沙埋对沙土生物结皮土壤蒸发的影响[J].水土保持通报,2011,31(1):58-62,159.
Meng J, Bu C F, Zhang X C, et al. Effects of biological crust removal and sand mulching on soil evaporation in a sandy soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1):58-62, 159.
- [30] 丛文成,袁立敏,蒙仲举,等.玉米芯颗粒对风沙土毛管水运移和蒸发特性的影响[J].中国农业科技导报,2024,26(2):198-207.
Cong W C, Yuan L M, Meng Z J, et al. Effects of corncob on capillary water transport and evaporation characteristics of sandy soil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(2):198-207.
- [31] 车陆禄,刘冬冬,杨娅,等.喀斯特森林近地表层覆盖对碳酸盐岩红土蒸发过程的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):153-161.
Che L L, Liu D D, Yang Y, et al. Effect of surface cover on evaporation process of carbonate laterite in karst forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5):153-161.
- [32] 张乐乐,赵林,李韧,等.青藏高原唐古拉地区暖季土壤水分对地表反照率及其土壤热参数的影响[J].冰川冻土,2016,38(2):351-358.
Zhang L L, Zhao L, Li R, et al. Investigating the influence of soil moisture on albedo and soil thermodynamic parameters during the warm season in Tanggula Range, Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2):351-358.
- [33] 姚健,王丁,张显松,等.不同地表覆盖方式对土壤水分、温度及幼苗生长的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(5):7-11.
Yao J, Wang D, Zhang X S, et al. Effects of different types of mulches on soil moisture, temperature and seedling growth [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2009, 33(5):7-11.