

# 生物炭和 PAM 混施影响煤矸石基质水分的入渗和蒸发

李娜<sup>1</sup>, 耿玉清<sup>1</sup>, 赵新宇<sup>2</sup>, 董颖<sup>1</sup>, 张超英<sup>1</sup>

(1.北京林业大学林学院,北京 100083;2.神华宁夏煤业集团麦垛山煤矿,银川 750408)

**摘要:** 探究生物炭和聚丙烯酰胺(PAM)混施对煤矸石基质水分入渗和蒸发的影响,可为矿区矸石山土壤水分的调节提供依据。采用模拟土柱方法,研究不同矸土比(1:2,1:1和2:1)的煤矸石基质,在混施生物炭(1%,2%和4%)和PAM(0.5%和1%)条件下,基质水分的吸持性能、入渗及蒸发特征。结果表明:(1)对煤矸石基质入渗性能的影响程度为生物炭>PAM>矸土比;随生物炭施用量的增加,基质的饱和含水量以及入渗速率均呈增加趋势,而PAM施用量的增加则减弱了煤矸石基质的饱和含水量和入渗速率。(2)添加1%PAM处理的基质累积蒸发量均低于添加0.5%PAM的处理;矸土比对煤矸石基质水分蒸发影响程度较生物炭和PAM大。(3)聚类分析表明,4%生物炭和0.5%PAM混施时煤矸石基质的水分吸持性能及入渗速率较高;而矸土比为2:1时,2%的生物炭和1%的PAM混施可减弱基质水分的蒸发。总之,增加生物炭施用量有利于基质水分入渗,而PAM用量的增加,可抑制煤矸石基质水分的蒸发。

**关键词:** 煤矸石基质;生物炭;PAM;入渗;蒸发;土壤水分调节

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)02-0290-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.041

## Mixed Application of Biochar and PAM Influences Water Infiltration and Evaporation of Coal Gangue Matrix

LI Na<sup>1</sup>, GENG Yuqing<sup>1</sup>, ZHAO Xinyu<sup>2</sup>, DONG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Chaoying<sup>1</sup>

(1.College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Maiduoshan Coal Mine, Shenhua Ningxia Coal Group, Yinchuan 750408)

**Abstract:** Investigating the effects of mixed application of biochar and polyacrylamide (PAM) on water infiltration and evaporation of coal gangue matrix can provide a basis for the regulation of soil moisture in coal gangue mountain in mining area. The water retention capability, infiltration and evaporation characteristics of coal gangue matrix with different ratios of coal gangue to soil (1:2, 1:1 and 2:1) under the mixed application of different proportion of biochar (1%, 2% and 4%) and PAM (0.5% and 1%) were studied by using a simulated soil column method. The results indicated that: (1) The influence of biochar on the infiltration performance of coal gangue matrix was greater than that of PAM and ratio of coal gangue to soil. With the rate of biochar addition increased, the saturated water content and infiltration rate of matrix increased. Whereas the rate of PAM addition increased, the saturated water content and infiltration rate of coal gangue matrix declined. (2) The cumulative evaporation of with addition of 1% PAM was lower than that of 0.5% PAM. The effects of ratio of coal gangue to soil on moisture evaporation of coal gangue matrix were greater than that of biochar and PAM. (3) Cluster analysis showed that the water retention capacity and infiltration rate of coal gangue matrix were high under the mixed addition of 4% biochar and 0.5% PAM, while the mixed application of 2% biochar and 1% PAM could weaken soil water evaporation when the ratio of gangue and soil was 2:1. In a word, increasing the addition of biochar would be beneficial to the water infiltration and increasing the proportion of PAM could restrain the evaporation of water in coal gangue matrix.

**Keywords:** coal gangue matrix; biochar; PAM; infiltration; evaporation; soil water management

收稿日期:2019-09-28

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”(2017YFC0504400);“采煤迹地地形与新土体近自然构建技术研究”(2017YFC0504404)

第一作者:李娜(1995-),女,在读硕士研究生,主要从事土壤生态及新土体水分保蓄性能研究。E-mail:1103533899@qq.com

通信作者:耿玉清(1965-),女,副教授,主要从事土壤生态及管理研究。E-mail:gengyuqing@bjfu.edu.cn

煤矸石是目前中国工业生产中排放量最大的固体废弃物之一。对煤矸石的处理,一般是在矿区附近堆放形成煤矸石山,这不仅占用宝贵的土地资源,而且还严重污染矿区及周边环境。因此,合理利用煤矸石,改善矿山生态环境已成为政府和学者关注的焦点。煤矸石中含一定量的有机质和多种养分元素,在适宜的水分和温度条件下,将煤矸石与土壤掺混形成混合基质有利于土壤有机质的积累和理化性质的改善<sup>[1-2]</sup>,这为合理利用煤矸石提供了有利条件。但在西北干旱和半干旱地区,气候干燥、蒸发强烈,土壤以风沙土为主,简单地将矸石与风沙土混合,在短期内难以改变基质结构性差、大孔隙多和保水能力低的现状,因而混合其他外源物质才能满足对煤矸石进行合理利用的要求。

生物炭是各种植物生物质在高温炭化条件下形成的一类富碳固态物质,具有较丰富的孔隙和巨大比表面积。将生物炭施入土壤后可增加土壤的孔隙度、入渗和持水性能,显著提高土壤保水性能<sup>[3]</sup>。聚丙烯酰胺(PAM)属水溶性高分子线型化合物,由于其分子结构中的键可与土壤颗粒之间形成吸附力,从而有利于土壤颗粒黏结,促进土壤团聚体的形成,已成为一种优良的土壤结构调理剂<sup>[4]</sup>。同时,PAM 具有提高土壤水分的入渗和保水性能<sup>[5]</sup>,以及植物水分利用效率的性能<sup>[6]</sup>,在土壤侵蚀治理中得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。

土壤水分的入渗和蒸发是土壤水分运动的重要环节,影响土壤水分的分布和植物对水分的有效利用。大量研究<sup>[8]</sup>表明,在风沙土中,小粒径的细生物炭有利于持水性能的提高,但细生物炭密度低,在施用的初期容易被风蚀,造成再次的环境污染。而 PAM 的黏性可促进生物炭与土壤颗粒的团聚,并减弱其风蚀<sup>[9]</sup>。因此,充分利用生物炭和 PAM 的功能,以提高土壤水分入渗,防止土壤侵蚀,涵养水分的技术研究得到日益关注<sup>[10-11]</sup>。但这些研究主要集中在农业土壤,且改良效果可能受土质以及混合比例的影响。基于 PAM 和生物炭作为土壤改良剂具有重要的应用价值和现实意义<sup>[12]</sup>,本研究采用室内模拟试验的方法,以不同比例的煤矸石和风沙土为基质,探究生物炭与 PAM 混施对土壤水分特征的影响,研究结果可为矸石山土的改良提供数据参考,为矿区脆弱生态环境的改善提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试的煤矸石和风沙土均于 2018 年 11 月采自宁夏灵武羊场湾煤矿的排矸场。供试煤矸石的 pH 为 6.74,EC 值为 10.27 dS/m;风沙土的 pH 为 9.10,EC 值为 1.96 dS/m。将煤矸石和土粉碎后过 0.5 mm 筛备用。

供试生物炭来自辽宁金和福科技股份有限公司,为玉米秸秆制备的粉末状生物炭,裂解温度为 400 °C,比表面积为 8.87 m<sup>2</sup>/g,平均孔直径为 16.23 nm。供试 PAM 来自于法国爱森公司,为阴离子型,白色细小颗粒,分子量为 18×10<sup>6</sup> g/mol,水解度为 25%。

### 1.2 试验设计

试验于 2018 年 12 月在北京林业大学土壤学实验室进行。设置煤矸石与土质量比为 1:2,1:1 和 2:1(分别用 C1:S2,C1:S1 和 C2:S1 表示)的煤矸石基质。采用生物炭和 PAM 混合施用的方式。其中生物炭的添加量分别为 1%,2% 和 4%(生物炭与煤矸石基质的质量百分比,分别用 B1、B2 和 B4 表示),PAM 的添加量分别为 0.5‰和 1‰(计算方法同生物炭,分别用 P0.5 和 P1 表示)。此外,对每种煤矸石基质分别设置 1 个不添加生物炭和 PAM 的空白处理(分别用 CK1、CK2 和 CK3 表示)。共设置 21 个处理,每个处理重复 3 次。

试验采用室内模拟土柱法。土柱为高 5 cm,直径 5 cm 的标准环刀。为避免光面环刀壁引起的优势流,在环刀内均匀涂抹一薄层凡士林,以形成毛面确保无边缘效应。将不同比例煤矸石基质混匀后,再加入不同比例的生物炭及 PAM 混合物于标准环刀内。填装土柱时,用从同样高度和同样次数垂直落下的赛钢棒(Polyoxymethylene,POM)压实土柱,使各处理的土柱体积在同等压力条件下均保持为环刀体积。该土柱用于测定基质吸持水量、入渗速率和蒸发量等水分特征指标。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 基质吸水性能的测定 装有土柱的环刀置于平底塑料盆内,加水至距环刀边缘 1 mm 位置。分别在放置环刀后的 0.5,1,2,4,8,12,24 h 时取出环刀并称量,采用烘干法测定每个时刻的土壤含水量,以 24 h 的水分含量为饱和含水量。

1.3.2 基质水分入渗速率的测定 将已吸水饱和的环刀土柱利用环刀法进行测定<sup>[13]</sup>。操作方法为:将浸泡好的环刀土柱取出,在其上方连接 1 个空环刀,用凡士林和玻璃胶将环刀间的缝隙密封,避免水从缝隙中渗漏。在双环刀的下方有承接下渗水的烧杯。测定之初,向空环刀内加水至与环刀口齐平,待滴出第 1 滴下渗水后开始计时,每隔 5 min 更换 1 次烧杯。由于入渗初期变化大,在前 3 min 每隔 1 min 更换 1 次烧杯。试验过程中随时供水,保持水面的高度与环刀口齐平。

各渗透指标的计算方法:初始渗透速率=最初渗透时段内入渗量/最初入渗时间(取前 3 min);稳定渗透速率为单位时间内的入渗量趋于稳定时的渗透速率;

平均渗透速率=达到稳定入渗时的渗透总量/达到稳定入渗时的时间;累积渗透量统一取 60 min 计算。

1.3.3 基质水分蒸发量的测定 将吸水饱和后的环刀放置到石英砂上 8 h,待水分含量维持在田间持水量后从石英砂上取下,放置在室内测定其在平均温度为 25 ℃室温条件下的蒸发。每日上午 9:00 用电子天平称量环刀重量,记录为日蒸发量。蒸发过程持续 15 天。

日蒸发量  $E = M_{\text{差}} \times 10 / (\pi r^2 \cdot \rho)$ 。式中: $E$  为土柱日蒸发量(mm); $M_{\text{差}}$  为土柱质量日变化值(g); $r$  为土柱半径(cm); $\rho$  为水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

## 1.4 数据分析

用 Excel 2016 软件对数据进行处理后,用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析。其中,采用三因素方差分析来检验生物炭、PAM、砷土比及其交互作用对入渗速率、累积入渗量和累积蒸发量的影响,显著性差异水平为  $P < 0.05$ ;采用 Origin 2016 软件作图。采用聚类分析探讨不同砷土比以及不同用量生物炭和 PAM 混施下基质水分吸持、入渗以及蒸发性能的相似性和差异性。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭和 PAM 混施下煤矸石基质的吸水性能

不同砷土比煤矸石基质的吸水过程有一定的差异。从图 1 可以看出,在 20~24 h 时,各基质的吸持水量均达到稳定。在 C1 : S2 和 C1 : S1 基质的吸水过程中,施加生物炭和 PAM 能显著提高含水量。在 PAM 施用量相同时,除 C1 : S1 的 B1+P1 处理外,随着生物炭用量的增加,基质的土壤含水量均呈增加趋势;而生物炭施加量相同时,PAM 施用量为 0.5‰ 处理的土壤含水量高于 PAM 施用量为 1‰ 的处理。3 种基质中,土壤含水量最高的处理均为 B4+P0.5。综合分析来看,不同基质的吸水性能表现为 C1 : S2 > C1 : S1 > C2 : S1。

### 2.2 生物炭和 PAM 混施下煤矸石基质的入渗性能

不同砷土比煤矸石基质入渗速率随时间的延长而逐渐趋于平缓,在 30~40 min 后达到稳定入渗,但添加生物炭和 PAM 对入渗速率的影响程度与基质有关(图 2)。在 C1 : S2 基质中,PAM 用量为 0.5‰ 处理的初始入渗速率随时间变化大,入渗曲线较陡;而 PAM 用量为 1‰ 处理的入渗速率随时间变化较小,入渗曲线较平缓,且生物炭的添加对其入渗影响不显著。在 C1 : S1 基质中,PAM 施用量相同时,入渗速率随着生物炭施用量的增加而增加,处理 B4+P0.5、B2+P0.5 和 B4+P1 提高了基质入渗速率;而在 C2 : S1 基质中,处理 B2+P0.5 和

B4+P0.5 的基质入渗速率显著高于其他处理。3 种基质中,生物炭用量相同时,PAM 施用量为 0.5‰ 处理的入渗速率高于 PAM 施用量为 1‰ 的处理;且 PAM 施用量为 0.5‰ 时,随着生物炭施用量的增加,渗透速率提高。综合来看,入渗速率最高的是 C1 : S2 基质下的处理 B4+P0.5。

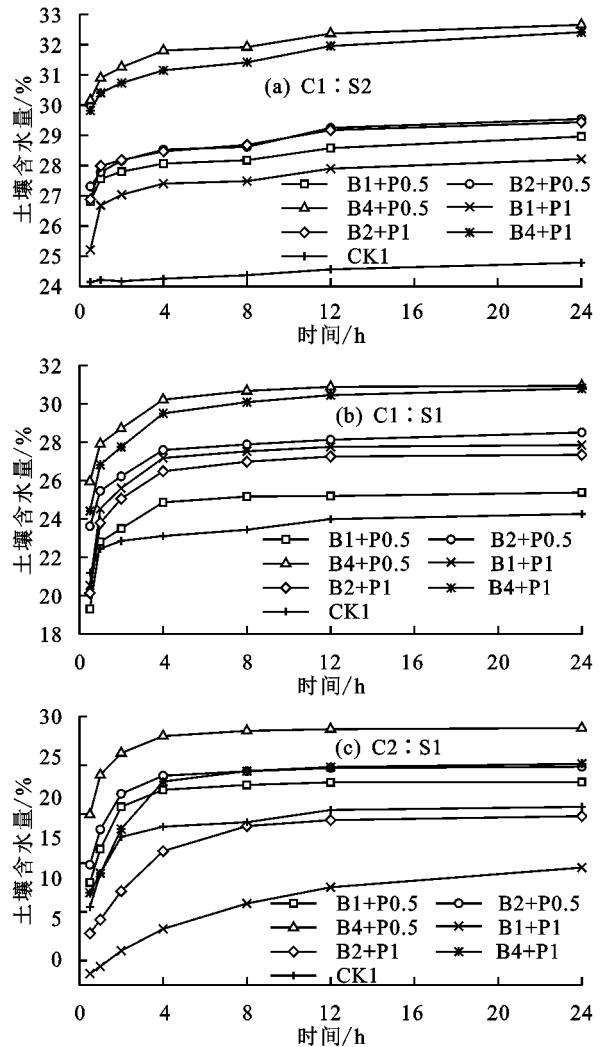


图 1 生物炭和 PAM 混施下基质含水量的时间动态变化

三因素方差分析结果显示,生物炭和 PAM 混施对基质入渗特征的影响最显著,其次是生物炭对入渗特征的影响,而砷土比对基质入渗特征的影响程度最小(表 1)。虽然生物炭对入渗的影响程度高于 PAM,但将生物炭和 PAM 混施较单独使用更有利于基质水分入渗能力的改善。

### 2.3 生物炭和 PAM 混施下煤矸石基质的蒸发性能

不同砷土比煤矸石基质的蒸发过程有一定差异(图 3)。在 C1 : S2 基质中,最初几天各处理的累积蒸发量差异较小,而随着时间的推移,各处理累积蒸发量的极差维持在 2.85 mm。在 C2 : S1 基质中,生物炭和 PAM 混施对蒸发量的影响差异显著,在 15 天时间内各处理的累积蒸发量极差为 6.36 mm。与空白处理相比,

3 种基质中 B1+P1 和 B2+P1 2 个处理均可显著抑制其水分蒸发,而其他处理则促进了基质水分的蒸发。就生物炭和 PAM 而言,在生物炭施用量相同时,PAM 施用量为 0.5‰ 处理的累积蒸发量低于 PAM 施用量为 1‰ 的处理;而 PAM 施用量相同时,基质的累积蒸发量随生物炭施用量的增加而增加。

基质水分蒸发的三因素方差分析结果显示,除生物炭外,其余因素均显著影响基质水分蒸发。其中,矸土比对基质水分累积蒸发量的影响最显著,其次是生物炭和 PAM 混施(表 2)。生物炭与 PAM 相比,PAM 对累积蒸发量的影响程度高。

2.4 生物炭 PAM 混施煤矸石基质水分特征聚类分析

对 21 个处理的基质水分特征进行系统聚类分析的结果见图 4。在将距离阈值定位到 10 时,可将各处理分为 4 类(表 3):类别 1 主要包含各基质中的 B1+P0.5、B1+P1、B2+P1 和 B4+P1 处理,表现为饱和含水量高、各入渗速率低和累积蒸发量高;类别 2 包含 C2 : S1 基质中的 B1+P1 和 B2+P1 处理,各水分特征均为最低;类别 3 包含 C2 : S1 基质的 B2+P0.5 和空白处理,此类别中除饱和含水量和累积蒸发量外,其余水分特征均显著高于类别 1;类别 4 则主要包含各基质的 B4+P0.5 处理,各水分特征均为最高。总体来看,类别 2 中的处理有效减少基质水分蒸发,而类别 4 中的处理能有效提高基质水分吸持和入渗性能。

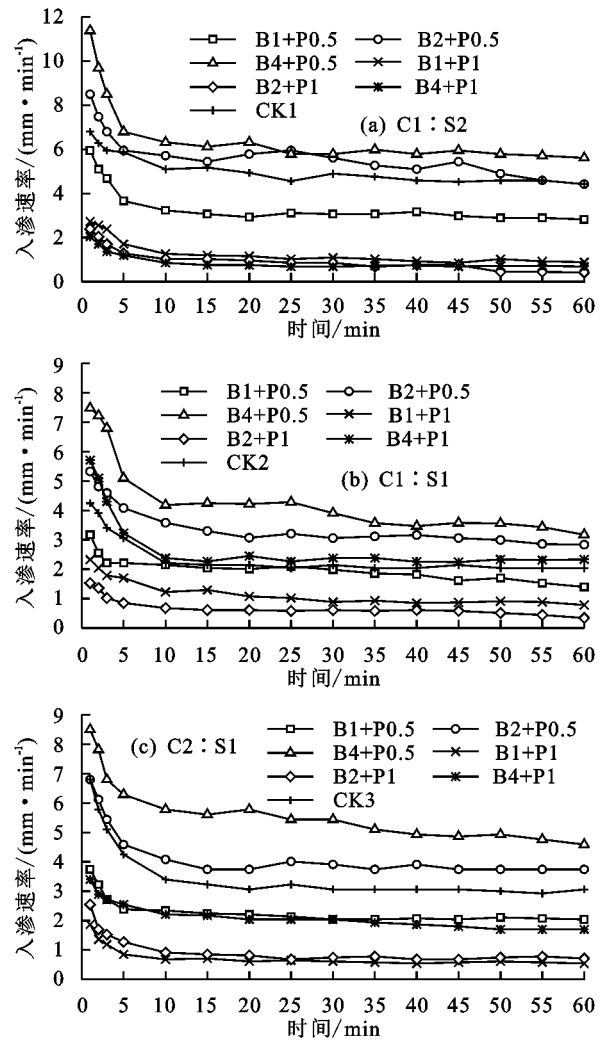


图 2 生物炭和 PAM 混施下基质水分入渗速率的时间动态变化

表 1 煤矸石基质入渗特征的三因素分析

入渗特征	项目	矸土比	生物炭	PAM	矸土比 *		生物炭 *	
					生物炭	PAM	PAM	生物炭 * PAM
初始入渗速率	F	82.042	589.598	112.894	98.981	72.501	1551.410	27.392
	P	0	0	0	0	0	0	0
稳渗速率	F	31.973	448.832	66.704	59.411	28.880	967.312	12.486
	P	0	0	0	0	0	0	0
平均渗透速率	F	31.717	345.428	42.244	37.449	14.993	720.237	17.188
	P	0	0	0	0	0	0	0
累积入渗量	F	265.696	2735.514	369.920	321.508	145.147	5862.815	143.724
	P	0	0	0	0	0	0	0

表 2 煤矸石基质累积蒸发量的三因素分析

项目	矸土比	生物炭	PAM	矸土比 * 生物炭	矸土比 * PAM	生物炭 * PAM	矸土比 * 生物炭 * PAM
F	715.744	1.418	5.911	5.459	6.796	118.808	15.401
P	0	0.255	0.020	0.002	0.003	0	0

表 3 各类别基质水分特征平均数据统计结果

类别	饱和含水量/%	初始渗透速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	稳定渗透速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	平均渗透速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	累积渗透量/mm	累积蒸发量/mm
1	27.65a	3.13b	0.79b	1.88c	107.83c	17.34a
2	17.16c	1.70b	0.33b	0.84c	44.97c	10.36b
3	22.80b	6.01a	1.72a	3.79b	218.45b	13.03b
4	29.30a	7.69a	2.33a	5.27a	309.72a	18.73a

注:表中同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

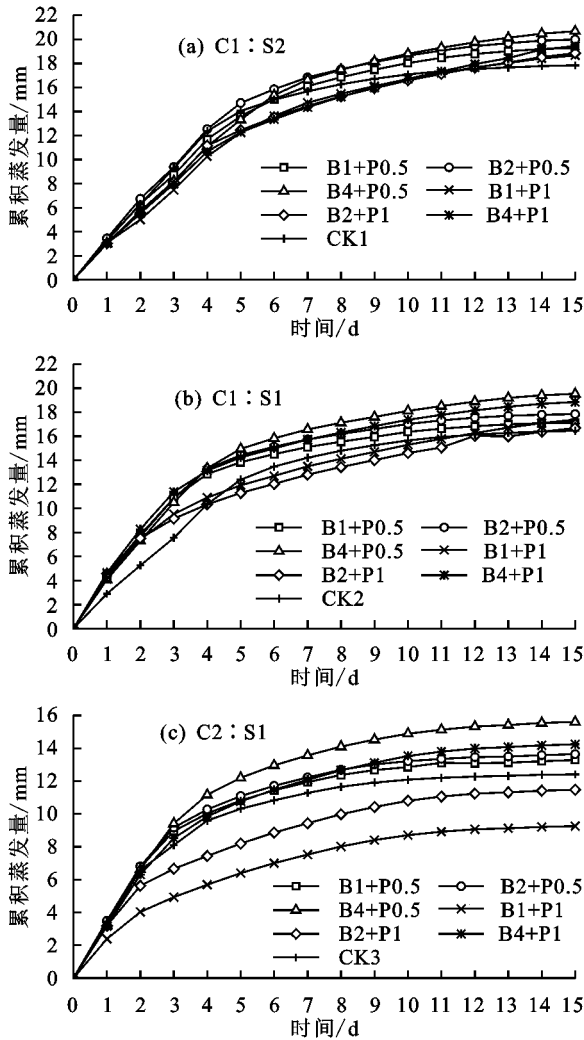


图 3 生物炭和 PAM 混施下基质水分蒸发的时间动态变化

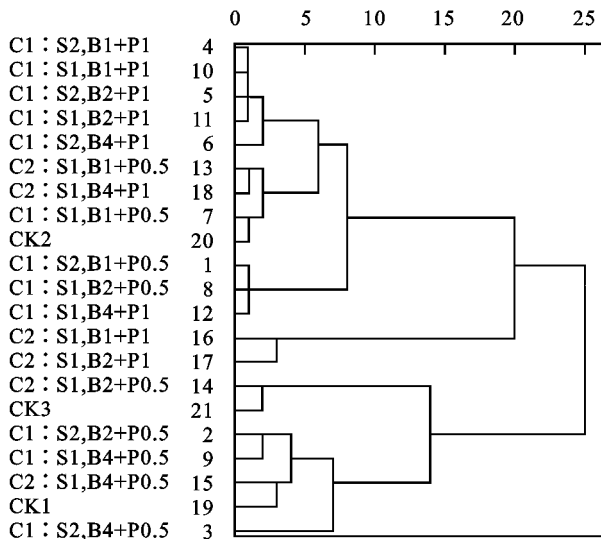


图 4 生物炭和 PAM 混施下各基质水分特征聚类分析结果

## 3 讨论

### 3.1 生物炭和 PAM 混施对煤矸石基质水分入渗的影响

入渗是将地表水与土壤水联系起来的纽带,土壤水的入渗性能受土壤表面积、含水率以及孔隙状况等因素的共同影响。已有研究<sup>[14]</sup>表明,施用生物炭可

改善土壤孔隙的分布和数量,增加土壤有效水的持水量,提高土壤导水率,从而有利于水分入渗。施用 PAM 可影响基质的孔隙状况,降低 PAM 的施用量,提高土壤入渗性能,而高的 PAM 施用量则显著降低土壤入渗率<sup>[15]</sup>。本研究发现,在等量 PAM 施用量条件下,随着生物炭施用量的增加,基质入渗速率提高,这与前人<sup>[16]</sup>研究结果一致。但在施加等量生物炭条件下,随 PAM 施用量的增加,煤矸石基质入渗速率降低。这是由于较高用量的 PAM 使基质颗粒之间的黏结作用增强,堵塞基质水分入渗通道,进而导致入渗速率的下降<sup>[17]</sup>。此外,三因素分析结果表明,生物炭对提高基质水分入渗效果优于 PAM。这是由于生物炭本身具有多孔隙特点,增大了矸石基质的比表面积,从而提高了基质水分入渗率。因此,生物炭和 PAM 混施的效果绝不是独立使用时效果的叠加,且 PAM 的施用会对施加生物炭而提高的孔隙度产生负面影响<sup>[18]</sup>。

煤矸石可做培育植被生长的基质材料。将煤矸石覆盖于土壤,有利于基质水分入渗,累积入渗量和入渗速率随煤矸石厚度的增加而增大<sup>[19]</sup>。此外,把煤矸石添加到土壤中,其初始入渗率和稳定入渗速率均随矸土比的增加而增加<sup>[20]</sup>。因此,煤矸石的施用可提高水分的入渗性能。在本研究中,相比生物炭和 PAM,矸土比对入渗的影响作用较弱。因此,增大矸土比,不会对入渗构成影响。

### 3.2 生物炭和 PAM 混施对煤矸石基质水分蒸发的影响

土壤水分蒸发能力是土壤耐旱性评价的重要依据。减少土壤水分蒸发对提高干旱地区土壤水分的利用效率有重要意义。在土壤中添加生物炭会改变土壤孔隙度及其分布,从而影响土壤水分蒸发过程<sup>[21]</sup>,但影响效果受土壤性质的影响。前人<sup>[22]</sup>研究证实,生物炭未显著影响黄绵土和黑垆土的累积蒸发量,但显著改变了风沙土的蒸发特征;也有研究<sup>[23]</sup>表明,生物炭添加到沙土中并没有减少土壤水分蒸发损失。因此,生物炭对土壤蒸发的作用具有不确定性。尽管本研究发现,在同等 PAM 施用量情况下,基质水分累积蒸发量随生物炭施用量的增多而增大。这可能与生物炭施用量增加,增加了土壤表层与空气接触面积,从而促进基质的蒸发有关<sup>[24]</sup>。但对于单独施用生物炭对煤矸石基质的水分蒸发特征的影响效果仍有待研究。

PAM 作为高分子化合物,其内部包含大量的亲水基和疏水基。土壤中施加 PAM 后,由于其强吸水性和持水性,使得土壤对水分子的吸着能力加强,从而有效抑制了土壤水分的蒸发。随着 PAM 施用

量的增加,抑制土壤水分蒸发效果增强<sup>[25]</sup>,本研究也证实了这一结果,且施加PAM对基质水分蒸发的抑制效果高于施加生物炭。

基质矸土比对基质累积蒸发量的影响程度大大超过了生物炭和PAM,这可能与矸土比显著影响基质含水量的高低有关。由于煤矸石具有斥水性,随着矸土比的增加,基质水分吸持性能降低,这导致了水分蒸发,有效水量的减少。因此,改善基质的水分蒸发,要综合考虑矸土比以及生物炭和PAM的混施比。

## 4 结论

生物炭和PAM混施可以改善煤矸石基质水分性能。随着生物炭施用量由1%提高到4%,基质饱和含水量和平均入渗速率平均提高了21.98%和100.78%;而随着PAM施用量由0.5‰增加到1‰,基质饱和含水量、平均入渗速率和累积蒸发量均降低了6.69%,68.99%和7.72%。矸土比对基质入渗影响较小,但显著影响基质水分蒸发。聚类分析表明,4%生物炭和0.5‰PAM混施的煤矸石基质水分吸持能力以及入渗能力高;而矸土比为2:1时,2%的生物炭和1‰的PAM混施能够有效减少基质水分的蒸发。总之,合理使用生物炭和PAM可调节煤矸石基质水分的入渗和蒸发。由于对煤矸石与土壤混合改善水分特征的研究结果局限于室内土柱试验。因此,在田间试验的效果有待于进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 孔涛,郑爽,张莹,等.煤矸石对盐碱土壤绿化和土壤微生物的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):321-326.
- [2] 陈孝杨,周育智,严家平,等.覆土厚度对煤矸石充填重构土壤活性有机碳分布的影响[J].煤炭学报,2016,41(5):1236-1243.
- [3] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入参与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [4] 王勇,李富程,汪璇,等.聚丙烯酰胺对紫色土坡地耕作位移及土壤结构的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):51-56.
- [5] Abrola V, Shainberg I, Ladoc M, et al. Efficacy of drygranular anionic polyacrylamide (PAM) on infiltration, runoff and erosion[J].European Journal of Soil Science,2013,64(5):699-705.
- [6] 白岗栓,邹超煜,杜社妮,等.聚丙烯酰胺对干旱半干旱区不同作物水分利用及产值的影响[J].农业工程学报,2015,31(23):101-110.
- [7] Lee S S, Gantzer C J, Thompson A L, et al. Polyacrylamide and gypsum amendments for erosion and runoff control on two soil series[J].Journal of Soil and Water Conservation,2010,65(4):233-242.
- [8] 李明玉,孙文静.黏土掺入生物炭后的持水特性及其影响机制[J].岩土力学,2019,40(12):4722-4730.
- [9] 李元元,王占礼.聚丙烯酰胺(PAM)防治土壤风蚀的研究进展[J].应用生态学报,2016,27(3):1002-1008.
- [10] 曹雨桐,余冬立.施用生物炭和聚丙烯酰胺对海涂围垦区盐碱土水力性质的影响[J].应用生态学报,2017,28(11):3684-3690.
- [11] Lee S S, Shah H S, Awad Y M, et al. Synergy effects of biochar and polyacrylamide on plants growth and soil erosion control [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(3):2463-2473.
- [12] 张伟明,陈温福,孟军,等.东北地区秸秆生物炭利用潜力、产业模式及发展战略研究[J].中国农业科学,2019,52(14):2406-2424.
- [13] 郭晓朦,何丙辉,姚云,等.扰动地表下不同长度坡面土壤物理性质及水分入渗特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(7):57-65.
- [14] 王红兰,唐翔宇,张维,等.施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):107-112.
- [15] 陈渠昌,雷廷武,李瑞平.PAM对坡地降雨径流入渗和水力侵蚀的影响研究[J].水利学报,2006,37(11):1290-1296.
- [16] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等.定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2281-2288.
- [17] 张春强,冯浩.PAM和尿素混施对土壤入渗特性的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):109-113,135.
- [18] 张妙,李秧秧,白岗栓.生物炭和PAM共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):124-130.
- [19] 党宏宇,邵明安,陈洪松,等.不同煤矸石厚度及位置对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):62-66.
- [20] 马保国,王健,刘婧然,等.煤矸石基质土壤的水分入渗试验研究[J].煤炭学报,2014,39(12):2501-2506.
- [21] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol [J]. Geoderma,2013,209/210:188-197.
- [22] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等.生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J].农业工程学报,2015,31(16):128-134.
- [23] 许健,牛文全,张明智,等.生物炭对土壤水分蒸发的影响[J].应用生态学报,2016,27(11):3505-3513.
- [24] Zhang J, Chen Q, You C F. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil [J]. Pedosphere,2016,26(2):265-272.
- [25] 张莹莹,李俊颖,王定勇.PAM对潮土水分蒸发量的影响[J].中国农学通报,2010,26(4):152-156.