

# 生物炭和 PAM 共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响

张 妙<sup>1</sup>, 李秧秧<sup>2,3</sup>, 白岗栓<sup>2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**采用二因素三水平(生物炭用量分别为干土重的 0.2% 和 4%, 聚丙烯酰胺用量分别为干土重的 0.02% 和 0.04%) 完全试验方案设计, 研究了两种土壤结构调理剂生物炭和聚丙烯酰胺(PAM) 共施对黄绵土水分入渗和土壤蒸发的影响。结果表明: (1) 生物炭施用后对 Philip 模型的稳渗率( $A$ ) 和 Horton 模型的衰减指数( $\beta$ ) 有显著影响, 2% 生物炭添加对  $A$  和  $\beta$  影响不大, 但 4% 生物炭添加显著降低  $A$ , 显著增加了  $\beta$ ; 施用 PAM 对 Kostiakov 模型的参数  $K$ , Philip 模型的吸渗率( $S$ ) 和 Horton 模型中的稳定入渗率( $i_f$ ) 与初始入渗率( $i_0$ ) 有显著影响, 0.02% PAM 添加对这些参数无显著影响, 但 0.04% PAM 添加显著降低  $K$ ,  $S$ ,  $i_f$  和  $i_0$ 。生物炭和 PAM 共施对 3 种入渗模型的大多数参数存在显著交互作用。所有处理中, 以 2% 生物炭+0.02% PAM 增加入渗的效果为最好; (2) 生物炭、PAM 及二者交互作用对蒸发速率和累积蒸发量影响均不显著, 表明生物炭和 PAM 单施或共施对黄绵土蒸发影响不大。

**关键词:**生物炭; PAM; 入渗; 蒸发

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0124-07

## Effects of Mixed Use of Biochar and Polyacrylamide on Water Infiltration and Evaporation in Loessial Soil

ZHANG Miao<sup>1</sup>, LI Yangyang<sup>2,3</sup>, BAI Gangshuan<sup>2,3</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of

Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Using two-factor and three-level (Biochar was applied at rates of 0, 2% and 4% of dry soil weight, and polyacrylamide was used at the rates of 0, 0.02% and 0.04% of dry soil weight) complete experimental design, we examined the effects of two soil conditioners, biochar and polyacrylamide (PAM), on soil infiltration and evaporation in loessial soil. The results indicated that: (1) the application of biochar had significant effects on steady infiltration rate ( $A$ , Philip model) and attenuation exponent ( $\beta$ , Horton model), the application of 2% of biochar had no significant effects on these parameters compared to the contrast, while the application of 4% of biochar had significantly decreased  $A$ , but had increased  $\beta$ . The application of PAM had significant effects on  $K$  (Kostiakov model), sorptivity ( $S$ , Philip model), final and initial infiltration rates ( $i_f$  and  $i_0$  respectively, Horton model); application of 0.02% of PAM had no effects on these parameters while application of 0.04% of PAM significantly decreased these parameters; the significant interaction of biochar and PAM for most infiltration parameters was found. The mixed application of 2% of biochar and 0.02% of PAM was the best in improving the infiltration rates in all treatments; (2) there were no significant effects of biochar, PAM and their interaction on the evaporation rate and cumulative evaporation, indicating that single or mixed use of biochar and PAM had no effects on soil evaporation in loessial soil.

**Keywords:** biochar; PAM; infiltration; evaporation

入渗指降水或灌溉水由地表进入土壤的过程,蒸发是指土壤中水分汽化进入大气的过程,二者为土壤水分运动的重要环节。土壤的入渗和蒸发能力直接影响着土壤含水量,从而决定着土壤水分的有效库容及植物对土壤水分的可利用程度。如何增加水分入渗,降低土壤蒸发是干旱半干旱地区土壤水分管理的一个核心议题。

近年大量研究表明:生物炭和聚丙烯酰胺(PAM)是两种富有潜力的土壤结构改良剂。生物炭是由植物生物质在高温缺氧或无氧的情况下裂解炭化而成的一类高度芳香化的难溶性固态物质<sup>[1]</sup>,具有高度发达的孔隙结构、巨大的比表面积和较强的离子吸附能力<sup>[2]</sup>。施用生物炭后可增加土壤团聚体数量<sup>[3]</sup>,降低土壤容重<sup>[2]</sup>、增加土壤的入渗和持水性<sup>[4-6]</sup>。PAM是一种水溶性线型高分子聚合物,有阳离子型、阴离子型和非离子型,其中阴离子型常被用作土壤结构调理剂<sup>[7]</sup>。其作用机理是通过分子结构中的基键与土壤颗粒间形成吸附力,从而胶结土壤颗粒,形成团粒结构<sup>[8]</sup>。PAM施用后亦可显著增加土壤团聚体数量<sup>[9]</sup>,提高土壤水分的入渗能力和保水能力<sup>[10-11]</sup>,降低土壤蒸发<sup>[12-13]</sup>,减少地表径流和土壤侵蚀的发生<sup>[11,14-15]</sup>。但无论是施用生物炭还是PAM,其改善土壤水力功能的效果受其本身性质(制备生物炭的生物质来源、裂解温度、裂解方式,PAM的分子量和水解度等)、用量、施用方式和土壤性质(质地、有机质含量等)的复杂影响<sup>[5-6,16-18]</sup>。

黄绵土是黄土高原主要地带性土壤之一,关于生物炭或PAM对黄绵土水分入渗和蒸发能力的影响已有一定研究,如室内模拟土柱试验下,0.5%秸秆生物炭添加促进水分入渗和增加土壤累积入渗量,1%和2%添加量无影响,而高添加量(3%和5%)减缓水分入渗速度和降低土壤累积入渗量;不同用量秸秆生物炭未显著影响黄绵土的累积蒸发量<sup>[5]</sup>。杂木(杨树、枣树和槐树等)生物炭明显降低了模拟试验条件下黄绵土的入渗能力,黄绵土的湿润锋深度与累积入渗量随着生物炭添加量的增加(添加量分别为10,50,100,150 g/kg)而降低<sup>[19]</sup>。不同覆盖率的PAM可显著增加黄绵土的入渗能力<sup>[20]</sup>;施用PAM显著提高了土柱试验中黄绵土的含水量,在169 mg/kg PAM用量下,土壤饱和导水率随PAM用量增加而增加,且PAM可显著抑制黄绵土的蒸发<sup>[21]</sup>。这些研究都集中在生物炭或PAM单独使用后的效应上,尚不清楚这两种物质混合施用后的效果。近来发现生物炭和PAM混合施用可促进作物生长,减少土壤流失<sup>[22]</sup>,但是否可改善土壤水力功能尚不明晰,为此,

本研究采用模拟土柱试验,研究了生物炭和PAM混施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤、生物炭与PAM

供试土壤为黄绵土,采自陕西神木县六道沟流域旱坡地。采用多点混合采样方法,采样深度为0—20 cm,采样时同时用环刀测定土壤容重。土样风干后过2 mm筛,以备土柱试验用,从中取部分土样过1 mm筛,利用MS—2000激光粒度分析仪,测定土壤机械组成。该土壤容重为1.38 g/cm<sup>3</sup>,其砂粒、粉粒和黏粒含量分别为58.24%,22.32%和19.44%,属砂质黏壤土。

供试生物炭来自陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司,为苹果枝制备的生物炭,裂解温度为500℃,生物炭粉碎过2 mm筛备用。供试PAM来自于胜利油田长安集团,为阴离子型,分子量为 $12 \times 10^6$  g/mol,白色粉末,水解度为20%,市售。

### 1.2 试验处理

试验包括两个因素:生物炭(BC)和PAM,每个因子分别设3个水平,生物炭的添加量分别为0,2%和4%(基于0—20 cm土层的干土重计算,分别用BC<sub>0</sub>,BC<sub>1</sub>和BC<sub>2</sub>)表示,PAM的添加剂量分别为0,0.02‰和0.04‰(计算方法同上,分别用PAM<sub>0</sub>,PAM<sub>1</sub>和PAM<sub>2</sub>表示),采用完全方案设计,共9个处理,每个处理3个重复。

### 1.3 试验装置及方法

采用模拟土柱试验,土柱为内径10.5 cm、高33 cm的PVC管,底部带有堵头。堵头内先装1 cm厚石英砂,然后垫上滤纸,侧壁留有小孔以利于空气排出。管壁均匀涂抹一薄层凡士林,以减少管壁对入渗产生影响。按田间实际容重分层均匀装入土柱(总高度控制在30 cm),生物炭和PAM仅与0—20 cm土壤混匀。每次填土必须保证土壤表面打毛,再进行填装,以保证土层之间接触紧密。

采用一维定水头垂直积水入渗法测定土壤入渗性状。将土柱容器垂直固定在铁架台上,调整马氏瓶发泡点高度,使橡皮管口与土柱表面在同一水平面上,水头高度均控制为2.5 cm,打开阀门,待湿润峰通过土壤表面时开始计时,连续记录时间和相应的入渗量,当底部小孔有水冒出时停止计时但持续供水直至土柱饱和,然后将所有土柱放置室内测定其在相对稳定环境下的蒸发。室内平均温度为30.8℃,平均相对湿度58.1%,前36 d每日下午用电子秤称量土壤蒸发水分损失量,36 d后每5 d在相同时间称量,

共持续 62 d。

日蒸发量计算公式为：

$$E = M_{\text{差}} \times 10 / (\pi r^2 \cdot \rho)$$

式中： $E$  为土柱日蒸发量(mm)； $M_{\text{差}}$  为土柱日质量变化值(g)； $r$  为土柱内半径(cm)； $\rho$  为水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

#### 1.4 土壤入渗和蒸发模型

选用 3 种入渗模型<sup>[23]</sup>对累积入渗量和入渗时间的关系进行拟合，分别是：

(1) Kostiakov 入渗公式：

$$I(t) = Kt^n \quad (1)$$

式中： $I(t)$  为累积入渗量(mm)； $t$  为入渗时间(min)； $K$  和  $n$  为无量纲的经验常数。

(2) Philip 方程：

$$I(t) = St^{\frac{1}{2}} + At \quad (2)$$

式中： $S$  为吸渗率( $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ )； $A$  为稳渗率( $\text{mm}/\text{min}$ )。

(3) Horton 公式：

$$I(t) = i_f t + \frac{i_0 - i_f}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

式中： $i_0$  和  $i_f$  分别为假定的初始和最终的入渗速率( $\text{mm}/\text{min}$ )； $\beta$  为经验常数。

土壤蒸发采用两段线性函数拟合：

$$f(t) = \begin{cases} \frac{a(T_1 - t) + b(t - 1)}{T_1 - 1} & 1 \leq t \leq T_1 \\ \frac{b(T_2 - t) + c(t - T_1)}{T_2 - T_1} & T_1 \leq t \leq T_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $f(t)$  为累积蒸发量(mm)； $t$  为蒸发时间(d)； $a$ 、 $b$  和  $c$  为模拟参数； $T_1$  为模拟的第 I 段与第 II 段直线交点对应

的横坐标； $T_2$  为最大蒸发时间，本研究中为 62 d。

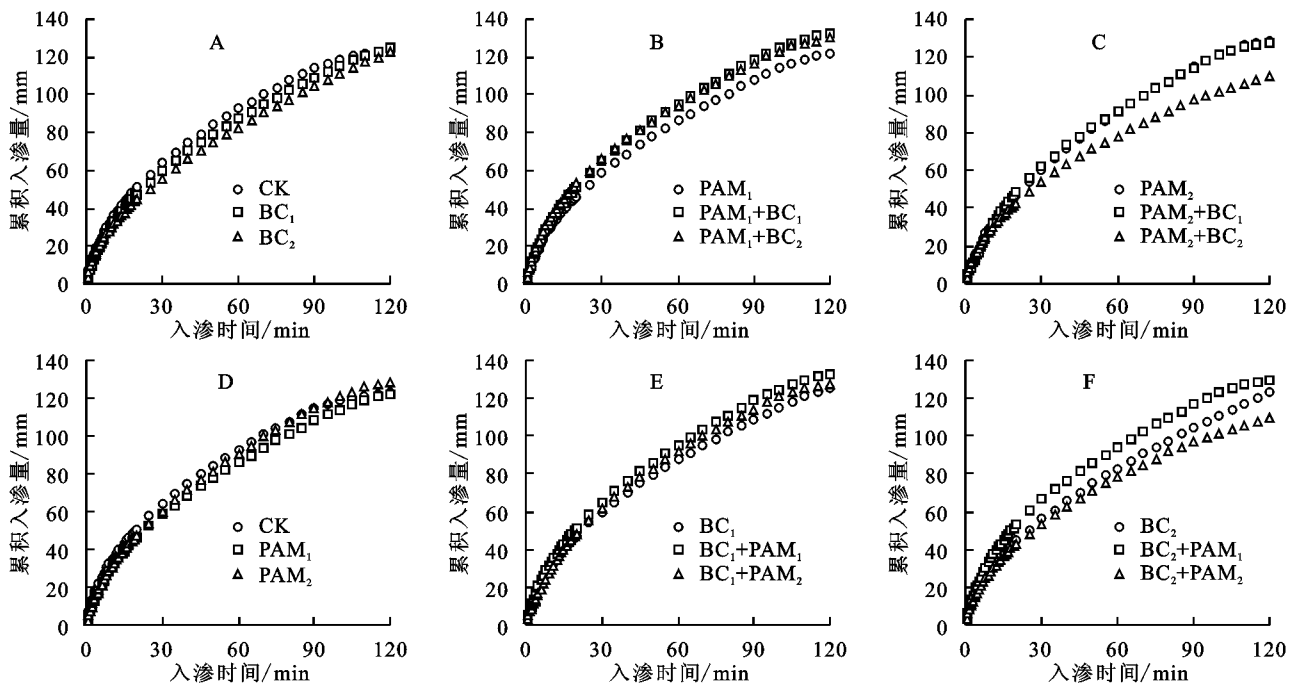
#### 1.5 统计分析

采用二因素方差分析检验生物炭、PAM 及二者交互作用对入渗和蒸发曲线模拟参数的效应，单因素方差分析来检验不同处理之间累积入渗量和累积蒸发量间的差异，Turkey 法进行多重比较，方差分析用 SPSS 16.0 软件进行。入渗和蒸发曲线模拟用 Sigmaplot 10.0 软件进行。

## 2 结果

### 2.1 生物炭和 PAM 混施对土壤入渗的影响

**2.1.1 累积入渗曲线** 图 1 为不同处理的累积入渗曲线，其中 A—C 为不同 PAM 施用量下添加不同生物炭时的累积入渗曲线，D—F 为不同生物炭施用量下添加不同 PAM 时的累积入渗曲线。在不添加 PAM 时，不同生物炭用量的累积入渗量并无差异(图 1A)；在添加 0.02‰ 的 PAM 时，2% 和 4% 的生物炭用量均可增加累积入渗量，但二者之间差异不大(图 1B)；在添加 0.04‰ 的 PAM 时，2% 生物炭用量对累积入渗量影响不大，但 4% 生物炭用量导致累积入渗量明显下降(图 1C)。在不施用生物炭时，不同 PAM 用量之间的累积入渗量差异不大(图 1D)；在 2% 生物炭添加量下，0.02‰ 和 0.04‰ 的 PAM 用量均增加累积入渗量，但 0.04‰ 用量的累积入渗量较 0.02‰ 用量的低(图 1E)；在 4% 生物炭用量下，添加 0.02‰ 的 PAM 可明显增加累积入渗量，但添加 0.04‰ 的 PAM 则明显降低累积入渗量(图 1F)。



注：BC<sub>0</sub>、BC<sub>1</sub> 和 BC<sub>2</sub> 分别对应 0、2% 和 4% 的生物炭添加量，PAM<sub>0</sub>、PAM<sub>1</sub> 和 PAM<sub>2</sub> 分别对应 0、0.02‰ 和 0.04‰ 的 PAM 添加量， $n=3$ ，下同。

图 1 各处理的累积入渗

2.1.2 入渗曲线参数 对图 1 的入渗曲线用 Kostiakov, Philip 和 Horton 模型进行模拟, 所得参数见表 1。从表 1 中可看出, 3 种模型均能较好地对入渗曲线进行模拟,  $R^2$  均在 0.99 以上。对这些参数进行二因素方差分析, 发现生物炭仅对 Philip 模型的稳渗率  $A$  和 Horton 模型的衰减指数  $\beta$  有显著影响, 而 PAM 对 Kostiakov 模型的模拟参数  $K$ , Philip 模型的吸渗率  $S$  和 Horton 模型中的稳定入渗率  $i_f$  和初始入渗率  $i_0$  均有显著的影响, 添加 PAM 对入渗参数的影响要大于添加生物炭。生物炭和 PAM 间存在显著的交互作用, 表现对 Kostiakov 模型的模拟参数  $K$  和  $n$ 、Philip 模型的吸渗率  $S$  和稳渗率  $A$  及 Horton 模型中的稳定入渗率  $i_f$  均达到显著水平。分析不同生物炭和 PAM 用量对入渗模型模拟参数的影

响, 发现添加 2% 生物炭对所有入渗模型模拟参数影响不大, 添加 4% 生物炭后其稳渗率  $A$  (Philip 模型) 显著低于添加 2% 生物炭, 且  $\beta$  值 (Horton 模型) 相比对照和添加 2% 生物炭处理的均显著降低, 表明高生物炭用量降低了土壤的入渗能力, 且达到稳定入渗率的时间延长。

添加 0.02‰ 的 PAM 对所有入渗模型的模拟参数影响不大, 添加 0.04‰ 的 PAM 降低了 Kostiakov 模型的参数  $K$ , Philip 模型的吸渗率  $S$ , 但其  $K$  和  $S$  二者与对照相比差异不显著, 但显著低于添加 0.02‰ 的 PAM 处理; 添加 0.04‰ 的 PAM 显著降低了 Horton 模型中的稳定入渗率  $i_f$  和初始入渗率  $i_0$ , 表明低用量的 PAM 对黄绵土入渗能力影响不大, 而高用量的 PAM 显著降低黄绵土的入渗能力。

表 1 不同处理 3 种入渗模型的模拟参数及方差分析

处理	Kostiakov 公式			Philip 方程			Horton 公式			
	$K$	$n$	$R^2$	$S$	$A$	$R^2$	$i_f$	$i_0$	$\beta$	$R^2$
CK	10.2008	0.5349	0.996	10.8966	0.0946	0.995	0.6285	4.4733	0.0704	0.995
BC <sub>1</sub>	8.2857	0.5724	0.998	9.2636	0.2292	0.996	0.6900	4.0163	0.0730	0.999
BC <sub>2</sub>	8.0415	0.5701	1.000	8.8577	0.2265	0.999	0.7513	4.4847	0.1040	0.997
PAM <sub>1</sub>	8.1021	0.5748	0.997	9.0891	0.2305	0.995	0.6735	3.9454	0.0739	0.998
PAM <sub>2</sub>	7.9059	0.5936	0.998	9.0337	0.3050	0.996	0.7053	3.7546	0.0622	0.998
BC <sub>1</sub> +PAM <sub>1</sub>	9.0624	0.5650	0.993	10.1036	0.2249	0.991	0.7039	4.2555	0.0648	0.996
BC <sub>1</sub> +PAM <sub>2</sub>	7.8520	0.5938	0.995	9.0676	0.3026	0.992	0.6218	3.5456	0.0513	0.999
BC <sub>2</sub> +PAM <sub>1</sub>	10.2936	0.5385	0.997	11.0577	0.1198	0.996	0.6910	4.7922	0.0789	0.998
BC <sub>2</sub> +PAM <sub>2</sub>	8.1391	0.5494	0.998	8.7859	0.1430	0.996	0.5669	3.9532	0.0832	0.997
双因素方差分析										
BC	ns	ns		ns	*		ns	ns	**	
PAM	*	ns		*	ns		**	*	ns	
BC+PAM	**	*		**	*		**	ns	ns	
BC 效应										
BC <sub>0</sub>	8.7363	0.5678		9.4783	0.2100ab		0.6691	4.0578	0.0688b	
BC <sub>1</sub>	8.4000	0.5771		9.4783	0.2522a		0.6719	3.9391	0.0630b	
BC <sub>2</sub>	8.8248	0.5527		9.6731	0.1631b		0.6697	4.4100	0.0887a	
PAM 效应										
PAM <sub>0</sub>	8.8427ab	0.5591		9.6726ab	0.1834		0.6899a	4.3248a	0.0824	
PAM <sub>1</sub>	9.1527a	0.5594		10.0835a	0.1918		0.6894a	4.3310a	0.0725	
PAM <sub>2</sub>	7.9657b	0.5789		8.9624b	0.2502		0.6313b	3.7511b	0.0655	

注: BC<sub>0</sub>, BC<sub>1</sub> 和 BC<sub>2</sub> 分别对应 0.2% 和 4% 的生物炭添加量, PAM<sub>0</sub>, PAM<sub>1</sub> 和 PAM<sub>2</sub> 分别对应 0, 0.02‰ 和 0.04‰ 的 PAM 添加量,  $n=3$ 。  $K$  和  $n$  为 Kostiakov 式中无量纲的经验常数,  $S$  为 Philip 方程中的吸渗率 (mm/min<sup>0.5</sup>),  $A$  为稳渗率 (mm/min),  $i_0$  和  $i_f$  分别为 Horton 式中假定的初始和最终的入渗速率 (mm/min),  $\beta$  为经验常数,  $R^2$  表示决定系数; ns 表示不同处理间无显著差异 ( $p>0.05$ ), \* 表示差异显著 ( $p<0.05$ ), \*\* 表示差异极显著 ( $p<0.01$ ), 同一列不同字母表示具有显著差异, 下同。

2.1.3 入渗 120 min 时的累积入渗量 表 2 为各处理入渗 120 min 对应的累积入渗量。9 个处理中, 除 4% BC+0.04‰ PAM 处理 120 min 的累积入渗量比对照显著降低外, 其他处理的累积入渗量均有一定程度增加,

增加幅度为 6.65%~15.89%, 其中 0.04‰ PAM, 2% BC+0.02‰ PAM, 2% BC+0.04‰ PAM 和 4% BC+0.02‰ PAM 的组合累计入渗量增加幅度均超过 10%, 以 2% BC+0.02‰ PAM 的效果为最好。

表 2 不同处理 120 min 的累积入渗量

处理	累积入渗量/mm	增加百分数/%
CK	114.67bc	—
BC <sub>1</sub>	124.96ab	8.97
BC <sub>2</sub>	123.03ab	7.29
PAM <sub>1</sub>	122.30ab	6.65
PAM <sub>2</sub>	128.37a	11.95
BC <sub>1</sub> +PAM <sub>1</sub>	132.89a	15.89
BC <sub>1</sub> +PAM <sub>2</sub>	127.78a	11.43
BC <sub>2</sub> +PAM <sub>1</sub>	129.93a	13.31
BC <sub>2</sub> +PAM <sub>2</sub>	109.85c	-4.20

2.2 生物炭和 PAM 共施对土壤蒸发的影响

2.2.1 累积蒸发曲线 图 2 为不同处理的累积蒸发曲线。从图中可看出,在不添加 PAM 时,不同生物炭用量处理间的蒸发量差异不大(图 2A);在添加 0.02‰和 0.04‰的 PAM 时,2%的生物炭用量对累积蒸发量影响不大,但 4%生物炭用量导致蒸发后期(40 d 后)的累积蒸发量明显下降(图 2B—C)。在不施用生物炭时,不同 PAM 用量之间的累积蒸发量差异不大(图 2D);在 2%生物炭添加量下,0.02‰和

0.04‰的 PAM 用量对累积蒸发量亦影响不大(图 2E);在 4%生物炭用量下,添加 0.02‰和 0.04‰的 PAM 均降低了蒸发后期的累积蒸发量(图 2F)。

2.2.2 蒸发曲线模拟参数及累积蒸发量 对图 2 的累积蒸发曲线用两段线性函数进行模拟,所有处理模拟的  $R^2$  均在 0.99 以上,表明两段线性函数能很好地模拟不同处理的蒸发过程。模拟第 I 和第 II 阶段的斜率分别对应两个阶段的平均蒸发速率,同时,从模拟曲线亦可求得第 I 阶段向第 II 阶段转折的时间( $T_1$ )。各处理模拟参数 a,b 和 c 分别为 0.97~2.43, 78.44~91.28,90.78~102.35,第 I 阶段的平均蒸发速率为 2.06~2.22 mm/d,第 II 阶段的平均蒸发速率为 0.51~0.69 mm/d,转折时间大约在 37~44 d。对这些参数进行二因素方差分析,发现生物炭和 PAM 对所有蒸发参数的影响均不显著;且二者间的交互作用亦不显著。不同处理蒸发 62 d 时对应的累积蒸发量之间亦无显著差异,表明生物炭和 PAM 单施或共施对总累积蒸发量影响不大。

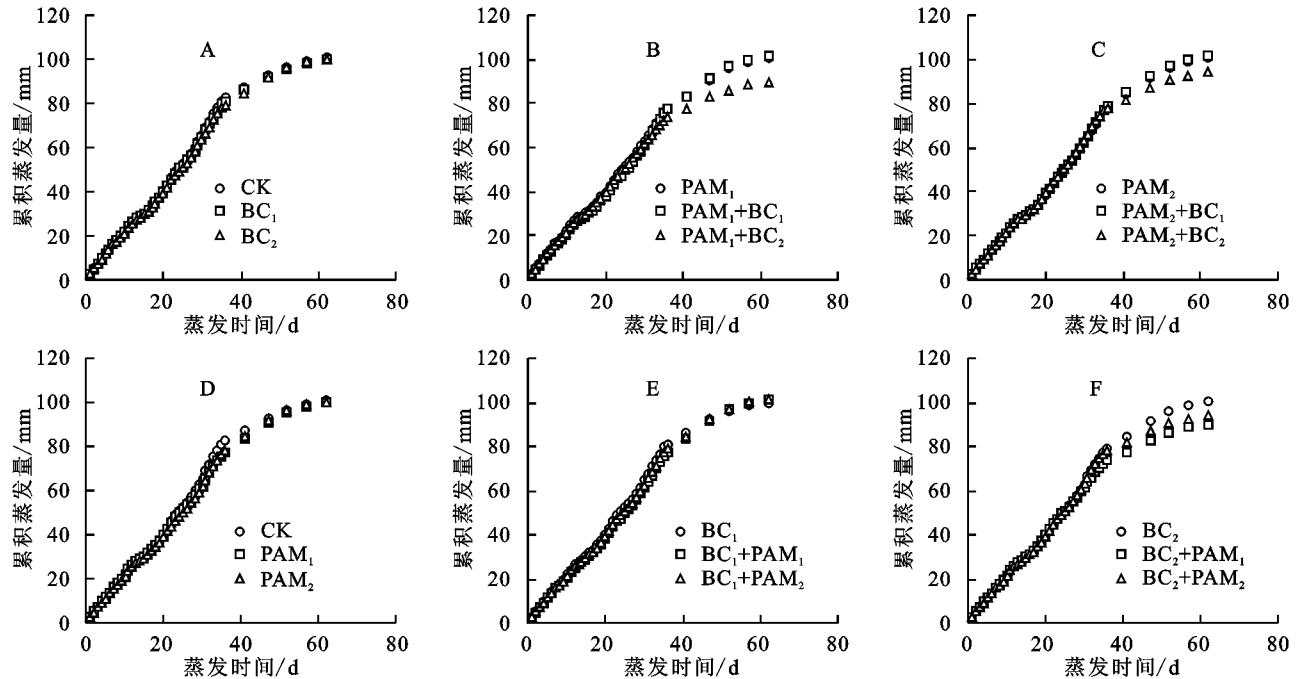


图 2 各处理的累积蒸发

3 讨论

3.1 生物炭和 PAM 混施对黄绵土入渗能力的影响

本研究发现低用量(2%)生物炭添加对土壤入渗能力影响不大,而高用量生物炭添加(4%)则导致土壤入渗能力明显降低,表现在稳渗率  $S$  降低,入渗速率的衰减速率  $\beta$  变大。不同用量生物炭的这种效应与肖茜等在黄绵土上的研究结果一致<sup>[5]</sup>,而与解倩等发现的随生物炭添加量的增大,黄绵土的累积入渗量

逐渐降低的研究结果并不一致<sup>[17]</sup>,原因可能与后者研究中生物炭添加比例比较高(1%~15%)有关。影响土壤入渗能力的主要因素为土壤孔隙大小及其分布。生物炭本身是一种具有多孔结构的黑色颗粒物,加入土壤后破坏了土壤原有结构,并改变了土壤孔隙大小及分布。此外,生物炭本身具有疏水性,只有在表面氧化后才具有吸水和保水性质<sup>[24-25]</sup>。生物炭加入后对土壤水力性质的影响是其改变孔隙结构和疏水性共同作用的结果。当疏水性起主导作用时,添加

生物炭对水力性质影响并不大,甚至可能导致水力性质下降<sup>[24-25]</sup>,高生物炭添加量导致的入渗能力下降可能与这个原因有关。

尽管前人研究表明施用 PAM 可显著增加黄绵土的入渗能力<sup>[11,18]</sup>,本研究发现低用量 PAM 与土壤混施对入渗能力影响并不大,而高用量 PAM 则导致黄绵土入渗能力显著降低,表现在 Kostiakov 模型的模拟参数  $K$ , Philip 模型的吸渗率  $S$  和 Horton 模型中的稳定入渗率  $i_f$  和初始入渗率  $i_0$  显著降低。这与在壤土<sup>[26-27]</sup>和棕壤<sup>[28]</sup>上的研究结果一致。PAM 具有降低或提高入渗的作用,取决于其种类、使用剂量、

土壤类型以及操作方法等<sup>[29]</sup>。PAM 作用的机理是 PAM 分子中的基键与土壤颗粒间会形成吸附力,使土壤颗粒胶结在一起,形成大团聚体,从而改善土壤结构。低用量时改善土壤结构的能力有限,而 PAM 用量过大,在土壤中吸水形成凝胶,堵塞土壤大孔隙,降低了土壤的有效孔隙度,从而导致入渗能力下降<sup>[27]</sup>,也有研究认为 PAM 溶于水后,其聚合体链中只有部分片段被土壤颗粒吸附,而其他长链以长环和尾的形式出现在土壤溶液中,长链中的一些尾链能够堵塞土壤孔隙,使土壤的水分传导能力下降,随 PAM 用量增加,这种堵塞作用加强<sup>[12]</sup>。

表 3 各处理蒸发蒸发曲线的模拟参数和累积蒸发量及其方差分析

处理	参数 a	参数 b	参数 c	转折时间 $T_1$ (d)	第 I 阶段平均蒸发 速率/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	第 II 阶段平均蒸发 速率/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	62 d 时的累积 蒸发量/mm
CK	0.97	89.05	101.85	40.60	2.22	0.59	100.90
BC <sub>1</sub>	1.44	87.29	100.95	40.33	2.18	0.63	99.74
BC <sub>2</sub>	1.44	89.22	101.30	42.19	2.13	0.62	100.40
PAM <sub>1</sub>	2.43	86.59	101.31	41.25	2.08	0.69	100.20
PAM <sub>2</sub>	1.72	90.42	101.08	43.56	2.08	0.58	100.36
BC <sub>1</sub> + PAM <sub>1</sub>	1.44	90.76	102.15	44.27	2.06	0.64	101.28
BC <sub>1</sub> + PAM <sub>2</sub>	1.64	91.28	102.35	43.73	2.10	0.61	101.55
BC <sub>2</sub> + PAM <sub>1</sub>	2.20	78.44	90.78	37.56	2.07	0.55	89.81
BC <sub>2</sub> + PAM <sub>2</sub>	1.44	83.53	94.72	39.79	2.12	0.51	94.01
双因素方差分析							
BC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PAM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
BC PAM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

低用量生物炭和 PAM 共施时具有显著交互作用,导致入渗能力显著增加。生物炭本身的多孔结构、PAM 对土壤和生物炭颗粒间的胶结作用的效应可能导致形成更多的团聚体,增大土壤的孔隙度,最终导致入渗能力增加。而二者高用量时,均会堵塞土壤大孔隙,另外,高生物炭用量时其疏水性增强,PAM 吸水形成的凝胶及溶解于水时的长链上的尾链可能堵塞生物炭内部的孔隙,从而导致入渗能力较单独使用时显著下降。

3.2 生物炭和 PAM 混施对黄绵土蒸发能力的影响

无论是生物炭和 PAM 单施还是混施对黄绵土的土壤蒸发影响并不大,这与人发现不同生物炭用量对黄绵土土壤蒸发影响不大的结果一致<sup>[5]</sup>,而与 PAM 抑制黄绵土土壤蒸发并不一致<sup>[12]</sup>。土壤蒸发一般分 3 个阶段:大气蒸发力控制阶段、土壤导水率控制阶段和扩散控制阶段(蒸发由水汽扩散控制),本研究土壤蒸发过程持续 62 d,土壤蒸发经历大气蒸发力

和土壤导水率控制阶段,无论哪个阶段,两种土壤结构调理剂不同用量对土壤蒸发均无显著的抑制作用,这与前人在相似用量下的研究结果不同<sup>[12]</sup>,原因可能与所用 PAM 分子量大小不同及试验条件不同等有关。低分子量 PAM 链长较短,对水分子的束缚作用可能较弱,从而对土壤蒸发的影响较小;本研究中蒸发试验用自来水饱和,自来水中含  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  及  $\text{HCO}_3^-$  等离子,可能影响土壤结构,从而影响 PAM 使用后土壤水分的蒸发性能。

4 结论

施用 2% 生物炭或 0.02% PAM 对黄绵土入渗能力影响不大,但施用 4% 生物炭或 0.04% PAM 显著降低黄绵土入渗能力;生物炭和 PAM 对黄绵土大多数入渗参数具有显著的交互作用,2% 生物炭和 0.02% PAM 共施可显著提高黄绵土的入渗能力,但生物炭和 PAM 单施或共施对黄绵土土壤蒸发能力影响不大。该研究结果肯定了生物炭和 PAM 共施在增强黄绵土入渗能力方面的正效应,对黄土高原旱地土壤水分增蓄扩容有一定指导价值。

## 参考文献:

- [1] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems-a review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006,11(2): 403-427.
- [2] 王欣,尹带霞,张凤,等.生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4):248-257.
- [3] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010,158:443-449.
- [4] Barnes R T, Gallagher M E, Masiello C A, et al. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments [J]. *Plos One*, 2014,9(9):e108340.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Barvenik F W. Polycrylamide characteristics related to soil application [J]. *Soil Science*, 1994,158(4):235-243.
- [8] 陆绍娟,王占礼.土壤改良剂聚丙烯酰胺的研究进展[J]. *人民黄河*, 2016,38(7):73-77.
- [9] Agassi M, Ben-Hur M. Stabilizing steep slopes with soil conditioners and plants[J]. *Soil Technology*, 1992, 5(3):249-256.
- [10] Flanagan D C, Norton L D, Shainberg I. Effect of water chemistry and soil amendments on a silt loam soil. 1. Infiltration and runoff [J]. *Transactions of the Asae*, 1997,40:1549-1554.
- [11] 于健,雷廷武,Isaac,等. PAM 特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J]. *土壤学报*, 2011,48(1):21-27.
- [12] 潘英华,雷廷武,赵军,等. PAM 与 PG 对土壤水分蒸发的影响[J]. *土壤通报*, 2008,39(5):990-994.
- [13] 谢伯承,薛绪掌,王纪华. 保水剂对土壤持水性状的影响[J]. *水土保持通报*, 2003,23(6):44-46.
- [14] Letey J. Effective viscosity of PAM solution through porous media[M]// Sojka R E, Lentz R D. *Managing Irrigation-induced Erosion and Infiltration with Polyacrylamide*. Idaho, University of Idaho Miscellaneous Publication, 1996.
- [15] Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management[J]. *Advance in Agronomy*, 2007,92:75-162.
- [16] Tryon E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils [J]. *Journal of Ecological Monographs*, 1948,18(1):81-115.
- [17] Lim T J, Spokas K A, Feyereisen G, et al. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties [J]. *Chemosphere*, 2016,142:136-144.
- [18] 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.
- [19] 解倩,王丽梅,齐瑞鹏,等.生物炭对黄绵土水分入渗和持水性能的影响[J]. *地球环境学报*, 2016,7(1):66-76.
- [20] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究: I. 入渗[J]. *土壤学报*, 2003,40(2):178-185.
- [21] 杨永辉,武继承,赵世伟,等. PAM 的土壤保水性能研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2007,35(12):120-124.
- [22] 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.
- [23] Dashtaki S G, Homae M, Mahdian M H, et al. Site-dependence performance of infiltration models [J]. *Water Resources Management An International Journal Published for the European Water Resources Association*, 2009,23(13):2777-2790.
- [24] Jeffery S, Meinders M B J, Stoof C R, et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil [J]. *Geoderma*, 2015,251/252:47-54.
- [25] Ojeda G, Mattana S, Ávila, et al. Are soil-water functions affected by biochar application[J]. *Geoderma*, 2015,249/250:1-11.
- [26] 员学锋,汪有科,吴普特,等. PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J]. *水土保持学报*, 2005,19(2):37-40.
- [27] 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):109-135.
- [28] 张振华,谢恒星,刘继龙,等. PAM 对一维垂直入渗特征量影响的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2006(3):75-77.
- [29] Lentz R D. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide and surfactants; applications for irrigated agriculture [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003,58(5):290-300.