

不同秸秆生物炭对土壤水分入渗和蒸发的影响

詹舒婷^{1,2}, 宋明丹¹, 李正鹏¹, 马海曼²

(1.青海大学农林科学院, 西宁 810016; 2.青海大学农牧学院, 西宁 810016)

摘要: 探究不同秸秆生物炭对土壤入渗和蒸发的影响, 对于秸秆废弃物的资源化利用和水土资源高效利用具有重要意义。选取 3 种秸秆(油菜、藜麦和马铃薯)为原料制备生物炭, 采用室内土柱模拟方法, 探究不同材料生物炭对土壤湿润过程、累积入渗量和蒸发过程的影响。结果表明: 不同材料生物炭下的土壤入渗和蒸发过程存在显著差异。马铃薯杆炭显著促进了湿润锋的运移, 而藜麦杆和油菜杆炭在中后期减缓了湿润锋的运移速度。添加生物炭处理均提高了土壤早期的入渗速率, 降低了土壤后期的稳定入渗速率, 其中马铃薯杆炭表现最好, 促进了早期入渗, 而且后期入渗降低少, 在入渗 55 min 时, 马铃薯杆炭累积入渗 67.8 mm, 比对照提高 41.8%。在模拟施炭土壤的入渗过程方面, Kostiakov 模型表现最优。施炭对于前期土壤蒸发无显著影响, 但显著提高了后期的土壤蒸发量。蒸发 30 天后, 马铃薯杆、油菜杆和藜麦杆炭累积蒸发量分别比 CK 高 5.2%, 9.2% 和 10.2%。马铃薯杆生物炭能显著提高土壤的入渗能力。研究结果为青海省东部农区选择合适的生物炭种类提供了科学依据。

关键词: 土柱; 湿润锋; 稳定入渗速率; 入渗模型; 蒸发

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0294-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.042

Effects of Different Straw Biochars on Soil Water Infiltration and Evaporation

ZHAN Shuting^{1,2}, SONG Mingdan¹, LI Zhengpeng¹, MA Haiman²

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016;

2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016)

Abstract: A better understanding on the effect of biochar derived from different straw types on soil infiltration and evaporation is of great significance for resource utilization of agricultural straw waste and efficient use of soil and water resources. In the present study, by using the soil column simulation investigation, biochars derived from three straw materials (oilseed rape stalk, quinoa stalk, and potato stalk) were used to explore the effect of biochar from different raw materials on soil wetting process, the cumulative infiltration amount and evaporation. The results showed that biochars derived from different feedstocks had significant effect on soil infiltration and evaporation. Biochar derived from potato stalk accelerated significantly the advancement of wetting front, while the ones derived from oilseed rape stalk, quinoa stalk slowed down the mid-late wetting process. Overall, biochar addition improved early soil infiltration rate and decreased stable infiltration rate in late period. Among the three tested biochars, the one derived from potato stalk performed the best in improving soil infiltration, with the cumulative infiltration 67.8 mm after 55 minutes, which was 41.8% higher than control treatment without biochar addition. The Kostiakov model performed best in simulating soil infiltration with biochar addition. Biochar addition had no significant effect on early soil evaporation, but increased significantly the later soil evaporation rate. After the successive evaporation of 30 days, the cumulative evaporation rates with biochar addition derived from potato stalk, oilseed rape stalk, and quinoa stalk were 5.2%, 9.2% and 10.2% respectively higher than CK. Our results suggest that biochar derived from potato stalk could improve soil infiltration ability, which provides scientific basis for choosing reasonable biochar raw materials in the eastern Qinghai Province.

Keywords: soil column; wetting front; stable infiltration rate; infiltration model; evaporation

收稿日期: 2020-07-18

资助项目: 青海省科技厅青年基金项目(2018-ZJ-961Q); 青海省农林科学院基本科研业务费专项(2017-NKY-05)

第一作者: 詹舒婷(1996—), 女, 硕士生, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: 3276428695@qq.com

通信作者: 李正鹏(1988—), 男, 副研究员, 主要从事农业废弃物资源高效利用研究。E-mail: lipengzheng131@163.com

土壤入渗是降水和灌溉水通过土壤表面进入土壤内部的过程,土壤蒸发是土壤水以水蒸气形式散失到大气中的过程,入渗过程决定了有多少水进入土壤,蒸发过程决定了有多少水流出土壤,两者都是农田水分循环的重要内容^[1]。土壤入渗和蒸发过程主要受气象、初始含水量、土壤质地和耕作措施等因素的影响,两者直接影响了土壤含水率,决定了农田水资源的有效利用程度,进而影响作物的水分利用效率^[2]。西北干旱半干旱地区降水少而分布不均,蒸发量大,土壤保水能力弱,农田水资源供需矛盾突出^[3]。因此,如何通过有效措施提高土壤入渗能力,降低蒸发,提高土壤蓄水保墒能力,是西北干旱半干旱地区提高水资源利用效率,实现农业可持续发展的重要内容^[4-5]。

生物炭是生物质废弃物在高温绝氧或缺氧条件下热裂解生成的黑色富碳物质^[6]。它具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积,表面含有多种活性官能团,具有较强的离子吸附交换能力^[7-8]。其原料来源广泛,具有特殊的物理、化学和微观结构特征,作为一种新型土壤改良剂、肥料缓释载体和污染物吸附剂具有广阔的产业化和应用前景^[9-10]。已有研究^[11-12]表明,施加生物炭能提高土壤有机质含量,降低土壤容重和紧实度,提高孔隙度,增强土壤的保水保肥能力。王红兰等^[13]在川中丘陵区紫色土的研究表明,施炭明显提高了土壤的孔隙度,尤其是 $>500\ \mu\text{m}$ 的孔隙,同时土壤有效水含量增加,土壤导水率增大。生物炭对于土壤入渗和蒸发的影响受生物炭种类、用量和施用方式、土壤类型等多种因素的影响而存在显著不同^[14-15]。李帅霖等^[2]研究表明,在土壤表层添加 4% 的生物炭能显著提高黏壤土的入渗能力,生物炭添加对土壤蒸发无显著影响。肖茜等^[16]研究表明,在风沙土和黑垆土中,随生物炭用量增加,土壤入渗量降低,生物炭能抑制风沙土早期蒸发,但对其他土壤的蒸发过程无显著影响。Abrol 等^[17]研究表明,生物炭显著提高砂土的稳渗率,而对于壤土无显著影响。Sun 等^[18]在滨海盐土的研究表明,高量生物炭添加会降低土壤的入渗能力,而小粒径生物炭能显著提高土壤的入渗能力。目前关于生物炭对于土壤入渗和蒸发过程的影响研究多集中在生物炭的用量和粒径以及土壤类型方面,而针对不同材料来源的生物炭对土壤入渗和蒸发过程的影响研究较少。前人^[19-20]研究表明,不同秸秆材料制得的生物炭在比表面积、化学结构、元素组成、活性官能团组成等方面存在巨大的差异,生物炭的性质差异必然导致其土壤效应差异。青藏高原东部农业区是青海省主要的农作区,该区降水少蒸发大,干旱缺水是制约该区农业生产的主要因素之一,加之气候冷凉,秸秆腐解慢,大量秸秆得

不到有效利用^[21-22]。因此,本研究采用青海高原种植面积较大的油菜、马铃薯、藜麦秸秆为原料制备生物炭,基于室内定容重土柱模拟试验,探究不同材料生物炭对于土壤入渗和蒸发的影响,丰富生物炭对该区土壤水分效应的研究,为该区农业秸秆废弃物的炭化还田提供理论依据和技术参考,为该区水土资源高效利用提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为栗钙土,采自青海省西宁市城北区青海大学农林科学院试验园内,属于黏质壤土,采用“Z”形采样方法采集 0—20 cm 深度的土壤,去除杂质后,自然风干,过 2 mm 筛备用。土壤的全氮含量为 1.92 g/kg,全磷含量为 2.04 g/kg,全钾含量为 23.09 g/kg,有机质含量为 31.60 g/kg, pH 为 7.82。于 2018 年油菜、马铃薯、藜麦收获后采集作物秸秆,洗净烘干粉碎后过 1 mm 筛,采用雅马拓 FO810C 马弗炉进行高温热解制备相应材料的生物炭,制备温度为 400 °C,停留时间 150 min,以氮气为保护气。采用液氮静态吸附法(贝士德,3H—2000PS4 型)测定生物炭的比表面积,油菜、藜麦和马铃薯秆生物炭的比表面积分别为 7.85, 2.37, 1.60 m²/g。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 8—10 月进行,设置 3 种秸秆生物炭和 1 个对照处理,共计 4 个处理,3 次重复。选用内径为 10 cm、高度为 25 cm 的透明有机玻璃柱进行,装土高度为 20 cm。装土前在土柱底部放置 1 层 300 目的尼龙网和滤纸。为减少管壁效应,在土柱内侧涂抹 1 层凡士林。生物炭添加量为 5%,装土容重控制在 1.2 g/cm³,炭土混合均匀后,按每层 5 cm 填充,分层界面处打毛。装土完成后,土柱静置 24 h。

采用一维定水头垂直积水入渗法测定土壤的入渗过程,水头高度控制在 5 cm,采用马氏瓶供水,调整马氏瓶位置及内管高度,土壤表面加入 5 cm 水深的水量,开始入渗,观察湿润锋的深度和马氏瓶的水位,按照前密后疏的原则,记录相应时间下的运移深度和水位刻度。湿润锋到达土柱底部时,入渗过程结束。马氏瓶继续供水,待土柱底部流出溶液,观测相同时间内流出液体相等时,停止供水,所有土柱静置 24 h。

将所有土柱放置在环境相对稳定的室内测定蒸发,每天中午 12:00 称量土柱重量,测定土壤水分日损失量,蒸发过程持续 30 天,日蒸发量的计算公式参考肖茜等^[16]的研究结果。

1.3 土壤入渗和蒸发拟合

为进一步研究不同材料生物炭对土壤入渗过程的影响,采用 Philip 模型、Kostiakov 模型和 Horton

模型进行拟合,拟合公式^[4]为:

Philip 入渗模型为:

$$I(t)=S t^{0.5}+A$$
(1)

式中: $I(t)$ 为累积入渗量(mm); t 为入渗时间(min);
 S 为吸渗率(mm/min); A 为稳渗率(mm/min)。

Kostiakov 入渗公式为:

$$I(t)=k t^n$$
(2)

式中: k 为第 1 个计时单位的累积入渗量(mm); n 为拟合的经验常数。

Horton 入渗公式为:

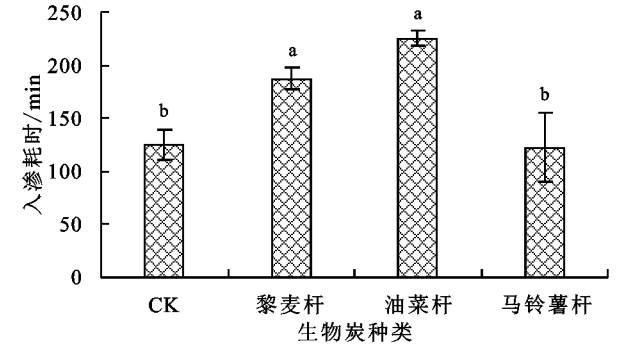
$$I(t)=a t+\frac{1}{c}(b-a)(1-e^{-c t})$$
(3)

式中: a 、 b 分别为假设的最终和初始的入渗速率(mm/min); c 为经验常数。

累积蒸发量与时间的关系采用 Rose 经验公式进行拟合,公式为:

$$Y(t)=\omega t+\beta \sqrt{t}$$
(4)

式中: $Y(t)$ 为累积蒸发量(mm); ω 为稳定蒸发参数;
 β 为水分扩散参数。参考宋日权等^[23]的研究结果。



注:图柱上方不同小写字母表示不同生物炭种类间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 湿润锋运移特征

土壤水分入渗过程中,湿润区前端与干土层形成的明显交界面称为湿润峰,表征水分在土壤基质吸力和重力作用下的运动特征。不同材料来源的生物炭对土壤湿润锋的运移有显著影响(图 2),随入渗时间增加,一维垂向运动逐渐增加,但运移速率逐渐减小。马铃薯杆炭明显增加了湿润锋运移速度,而藜麦杆和油菜杆炭在中后期明显减缓了湿润锋的运移速度。在入渗时间为 55 min 时,马铃薯杆炭湿润锋运移平均距离为 141.5 mm,其次为藜麦杆炭(110.5 mm)和 CK(106.5 mm)处理,油菜杆炭运移最慢为 102 mm,其中马铃薯杆炭运移距离显著大于其他 3 个处理($P<0.05$)。

湿润锋推进距离 F 与入渗时间 t 呈幂函数关系:
 $F=a t^b$ 。式中: a 为第 1 个计时单位后的湿润锋推进距离; b 为湿润锋进程的衰减程度。由图 2 可知,不同材料

1.4 数据处理

试验中所用数据均为 3 次重复的平均值,采用 Excel 2016 进行作图,数据拟合和统计分析采用 SPSS 22.0 软件进行,方差分析显著后采用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 入渗耗时和入渗总量

不同材料来源的生物炭对入渗耗时和总入渗水量有显著影响(图 1),入渗耗时指入渗水分到达土柱底部的时间,油菜杆炭和藜麦杆炭的入渗耗时明显大于不施炭和马铃薯杆炭处理,其中不加炭处理用时最短(125 min),油菜杆炭用时最长(225 min)。总入渗水量指湿润锋运移到土柱底部时的累积入渗量,藜麦杆炭的入渗水量最多(99.2 mm),其次为马铃薯杆炭(97.4 mm),然后是油菜杆炭(96.8 mm),不施炭处理入渗水量最少(90.8 mm)。综合入渗耗时和入渗水量来看,马铃薯杆炭入渗耗时较短,同时入渗水量较大,平均入渗速率最高,为 0.82 mm/min,而油菜杆炭入渗耗时最长,入渗水量较少,平均入渗速率最低,为 0.42 mm/min。

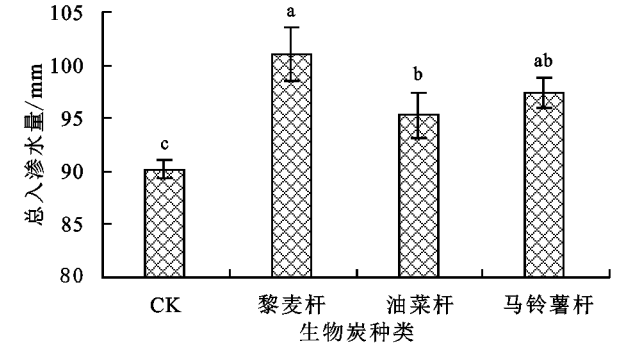


图 1 不同秸秆生物炭的入渗耗时和入渗总量

生物炭下湿润锋模拟的决定系数 R^2 均大于 0.99,说明此幂函数能较好地模拟不同生物炭添加下土壤湿润锋的运移规律。添加生物炭的处理,其系数 a 较不施炭处理明显增大,表明生物炭的添加增大了初始水分入渗速率,尤其是马铃薯炭,而系数 b 均减小表明湿润锋进程衰减增大(图 3)。生物炭添加显著改变了土壤水分入渗过程,而且不同材料生物炭的影响存在差异。

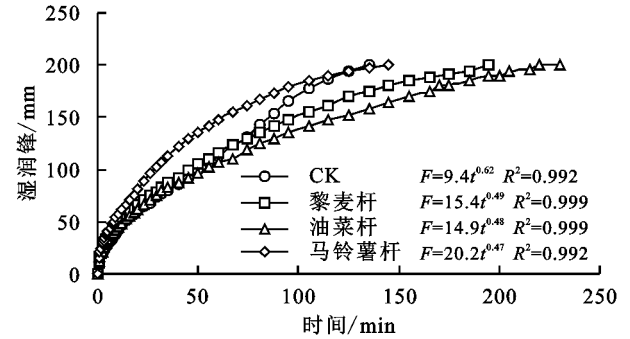


图 2 不同秸秆生物炭下湿润锋动态变化

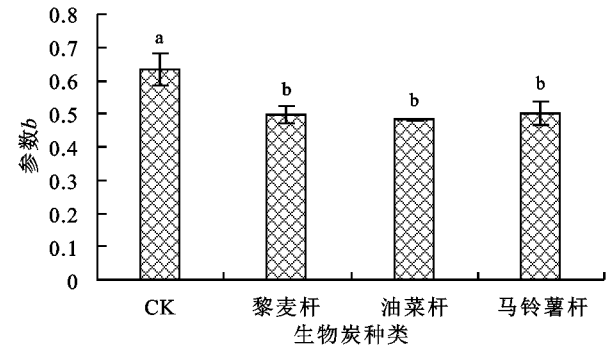
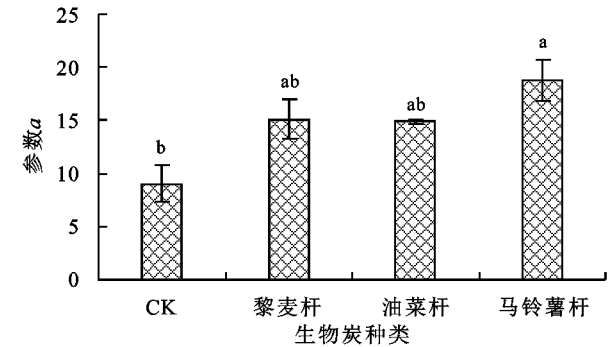


图 3 不同秸秆生物炭对湿润锋运移参数的影响

2.3 土壤累积入渗量

土壤入渗过程达到稳定后可用稳定入渗率来表征土壤入渗能力,但在达到稳定入渗之前,常用累积入渗量来表征土壤入渗能力。由图 4 可知,添加生物炭显著改变了土壤的入渗过程,在入渗的前 55 min,加炭处理的累积入渗量明显大于不加炭处理,当入渗时间为 55 min 时,累积入渗量表现为马铃薯杆炭(67.8 mm)>藜麦杆炭(54.8 mm)>油菜杆炭(48.1 mm)>不加炭处理(47.8 mm),其中马铃薯杆炭显著大于不加炭处理($P<0.05$)。在 55~95 min 这段时间,不加炭处理的累积入渗量开始大于油菜杆炭,到 95 min 时与藜麦杆炭相当,当入渗时间为 95 min 时,累积入渗量的表现为马铃薯杆炭(86.8 mm)>不加炭处理(72.3 mm)=藜麦杆炭(72.0 mm)>油菜杆炭(62.6 mm),其中马铃薯杆炭显著大于油菜杆炭($P<0.05$)。入渗超过 95 min 后,不加炭处理累积入渗开始大于藜麦杆炭,但是始终小于马铃薯杆炭。

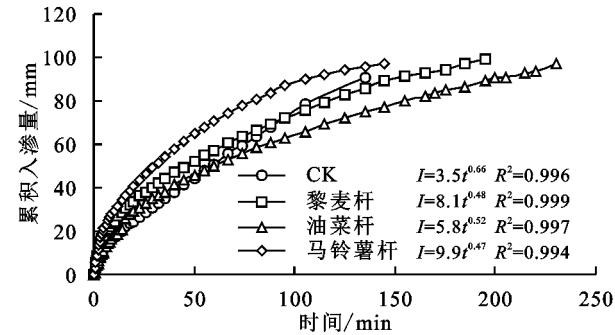


图 4 不同秸秆生物炭下的土壤累积入渗量动态变化

2.4 入渗过程模拟与入渗特征参数

为了进一步探究不同材料生物炭对土壤入渗过程的影响及入渗模型在青海东部农业区的适应性,本研究将土壤累积入渗量随时间变化的数据分别用 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型进行拟合,拟合结果见表 1。Philip 模型的决定系数 R^2 在 0.996~0.999, RMSE 在 0.78~4.28 mm,模型对入渗过程的拟合较好。吸渗率 S 能反映土壤前期的入渗能力,其值越大代表土壤入渗能力越强,施炭后土壤的 S 值均显著增大($P<0.05$),其中马铃薯杆炭增加最

多,是对照处理的 2.35 倍。稳渗率 A 反映土壤达到饱和时的入渗速率,施炭后土壤的 A 均显著减小,其中藜麦杆炭和油菜杆炭为负值,这与实际不符,表明 Philip 模型不适用于施炭土壤入渗过程的模拟。Kostiakov 模型的 R^2 在 0.994~0.999, RMSE 在 0.82~2.05 mm,对入渗过程的拟合很好。参数 k 反映土壤的初始入渗能力,加炭后土壤的 k 值均显著增大,其中马铃薯杆炭增加最多,为对照的 2.86 倍。Horton 模型的 R^2 在 0.988~0.998, RMSE 在 1.08~2.92 mm,模型对入渗拟合较好,但与另外 2 个模型相比,略差一点。参数 a 反映土壤的最终入渗速率,加藜麦和油菜杆炭后土壤的最终入渗速率显著降低($P<0.05$),其中油菜杆炭降低最多。参数 b 反映土壤初始入渗速率,其中马铃薯杆炭显著提高了 b 值,而油菜杆炭显著降低了 b 值。综上,添加生物炭处理均提高了土壤早期的入渗速率,降低了土壤后期的稳定入渗速率,其中马铃薯杆炭表现最好。在模拟施炭土壤的入渗过程方面, Kostiakov 模型表现最优。

表 1 不同秸秆生物炭下 3 种土壤入渗模型拟合结果

入渗模型	参数	CK	藜麦杆炭	油菜杆炭	马铃薯杆炭
Philip 模型	S	4.16c	7.79b	6.62b	9.78a
	A	0.32a	-0.04b	0.02b	-0.11b
	R^2	0.999	0.999	0.996	0.996
	RMSE	0.874	0.782	4.276	1.670
	k	3.48c	8.09a	5.77b	9.96a
Kostiakov 模型	n	0.66a	0.48b	0.52b	0.47b
	R^2	0.996	0.999	0.997	0.994
	RMSE	1.424	0.816	1.740	2.047
Horton 模型	a	0.61a	0.36bc	0.27c	0.42ab
	b	3.61b	3.87b	2.12c	4.34a
	c	0.23a	0.10b	0.05c	0.09b
	R^2	0.998	0.992	0.998	0.988
	RMSE	1.077	2.736	1.204	2.923

注:同行不同小写字母表示不同生物炭间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.5 土壤累积蒸发量

土壤蒸发和作物蒸腾是农田水分损失的主要途

径,抑制土壤的无效蒸发,对于提高农田水分利用效率具有重要意义。土壤蒸发过程能反映土壤的持水能力,不同秸秆生物炭添加对土壤蒸发过程的影响见图 5。随着时间的变化,土壤蒸发过程呈现明显的阶段性,在前期基本呈线性增加,后期增速变缓。由表 2 可知,在蒸发开始至第 19 天,各处理间的累积蒸发量差距增大,但无显著差异。连续蒸发 20 天后,藜麦杆炭(78.8 mm)和油菜杆炭(78.4 mm)的累积蒸发量显著大于不施炭处理(73.2 mm),分别高出 7.65%和 7.1%。蒸发 30 天后,施炭处理的累积蒸发量均显著高于不施炭处理(80.5 mm),马铃薯杆炭(84.7 mm)、油菜杆(87.9 mm)和藜麦杆(88.7 mm)分别比 CK 高 5.2%,9.2%和 10.2%,生物炭显著增大了后期的土壤蒸发量($P<0.05$)。

表 2 不同时期土壤累积蒸发量及蒸发模拟参数的多重比较

生物炭 种类	累积蒸发量/mm			ω	β
	10 天	20 天	30 天		
CK	50.2a	73.2b	80.5c	0.63b	12.91b
藜麦杆炭	48.2a	78.8a	88.7a	0.81ab	12.50b
油菜杆炭	47.8a	78.4a	87.9ab	1.13a	11.56b
马铃薯杆炭	48.4a	75.9ab	84.7b	0.34c	14.12a

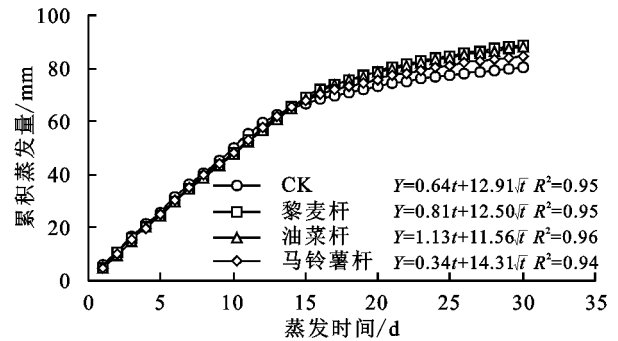


图 5 不同秸秆来源生物炭对土壤累积蒸发量的影响

本研究中各处理累积蒸发量与蒸发时间的 Rose 模型拟合的决定系数 R^2 在 0.94~0.96,模拟误差 RMSE 在 6.2~8.3 mm(图 5)。不同秸秆生物炭对稳定蒸发参数 ω 的影响不同,其中油菜杆生物炭显著增大了 ω ,马铃薯杆炭使其显著减小(表 2)。同时,马铃薯杆炭显著增大了水分扩散参数 β ($P<0.05$)。当土层比较干燥时,土壤蒸发主要以水汽扩散为主,马铃薯杆炭降低了稳定蒸发参数,但是提高了水分扩散系数。

3 讨论

3.1 生物炭改变土壤入渗的作用机理

土壤入渗过程受土壤质地、容重、初始含水量等因素的影响,入渗开始,土壤含水量较低,基质势较大,初始入渗速率较大,随着入渗的进行,土壤含水量

增加,基质势变小,土壤入渗速率降低,入渗曲线呈先陡峭后平缓的趋势变化。

生物炭具有多孔性和较大的比表面积,加入土壤后能改变土壤的孔隙结构和分布,进而影响土壤的入渗和蒸发过程^[2]。同时生物炭表面的含氧官能团和疏水性官能团对水分的吸持和入渗有影响^[24-25]。有研究^[13,26]表明,生物炭添加到土壤后,能减少中孔数量,增大小孔和大孔数量,大孔增加能促进水分入渗,但中孔减少可能降低土壤的有效孔隙,使水分通道曲折复杂,抑制土壤水分入渗,到底是促进还是抑制水分入渗,主要取决于土壤质地、生物炭种类和制备温度等。本研究中生物炭均在入渗初期增大了土壤入渗速率,这可能是由于生物炭促进了微团粒形成,土壤孔隙度增大,增加了土壤有效孔隙和过水断面,促进水流通道形成,这与魏永霞等^[27]、刘易等^[28]的研究结果一致。魏永霞等^[27]进行了 3 年施炭的大田试验,结果表明,施炭增大了黑土的累积入渗量和入渗速率,促进湿润锋运移,施炭使初始入渗速率增加 70%,生物炭施用当年效果最好。李帅霖等^[2]的研究也表明,在黏壤土上添加 4%的生物炭能显著促进了湿润锋的运移,提高土壤的入渗能力。本研究中添加生物炭处理显著降低了土壤后期的入渗速率,土壤的稳定入渗速率显著下降,这与 Novak 等^[29]的研究结果一致。肖茜等^[16]研究表明,添加 5%的生物炭,降低了风沙土、黑垆土和黄绵土的稳定入渗率。Spokas 等^[30]研究表明,造粒后的生物炭在水中筛动会破碎成碎片,这些碎片通常在几微米甚至几纳米大小范围内,电镜结果显示这些碎片有锯齿状边缘,这些碎片可能悬浮在土壤水中,随水势梯度向下运移,从而阻塞土壤孔隙,降低入渗速率^[31]。Wang 等^[32]研究表明,施炭降低了风沙土的入渗能力,提高了壤土的入渗能力。本研究中 3 种生物炭均在入渗初期提高了土壤的入渗速率,而后期降低了稳定入渗速率,可能的原因有 2 个:一种是炭改善了土壤的孔隙结构,但随上层土壤逐渐饱和,生物炭的孔隙充满水分,发生物理性破碎,生物炭本身质地较轻,炭碎片阻塞土壤孔隙,从而降低了后期的入渗速率^[29];另一种是入渗初期主要是炭改善了土壤孔隙结构的,但到了入渗后期,生物炭形成的微团聚体和含氧官能团对水分的吸持能力增强,造成水分的阻滞,影响水分下渗^[33]。

3.2 生物炭改变土壤蒸发的作用机理

土壤蒸发过程可以分为 2 个阶段,第 1 阶段土壤蒸发以相对较高和较稳定的速率蒸发,主要靠毛管水分蒸发;第 2 个阶段土壤蒸发速率逐渐降低,转为水

汽扩散阶段^[34]。本研究中土壤累积蒸发量随时间的变化呈现明显的阶段性,在第1个阶段土壤蒸发速率基本恒定,累积蒸发量线性增加。第2个阶段蒸发速率降低,累积蒸发量缓慢增加。

生物炭的多孔性和较低的堆积密度影响了土壤孔隙的结构和数量,再加上其本身含有羧基、羟基、内酯基等含氧官能团,具有一定的极性,必然会影响土壤水的蒸发过程。生物炭对土壤水分蒸发过程的影响受土壤类型、生物炭种类、用量和粒径等的影响而存在显著的差异。肖茜等^[16]研究表明,生物炭能抑制风沙土前期蒸发,但对黄绵土和黑垆土无显著影响。李帅霖等^[2]研究表明,添加生物炭对壤土蒸发无显著影响。许健等^[33]研究表明,添加适量的生物炭能有效抑制土壤蒸发,添加量超过5%则会促进蒸发。Wang等^[34]研究表明,施炭增加了土壤第2阶段的蒸发量,尤其是风沙土。Zhang等^[35]研究表明,施炭量为4%和6%时,土壤表面出现裂缝的时间提前,且土壤的抗拉伸强度降低,黏性土壤蒸发速率增加了2.11%和17.20%^[36]。本研究中添加生物炭对于前期土壤蒸发无显著影响,但显著增加了后期的土壤水分蒸发。可能的原因:(1)生物炭改变了土壤孔隙数量和分布,降低了土壤大孔隙,形成更多的中微孔隙,提高了水汽扩散率,从而导致后期更大的蒸发^[37];(2)土壤水分蒸发使土壤受到不同方向的拉伸应力,从而导致裂缝产生,生物炭添加后,会降低土壤的抗拉强度,使土壤形成更多更深的裂缝,从而促进水汽扩散,后期土壤蒸发增大^[35];(3)加炭使土壤颜色加深,增加了土壤表层的温度,水的黏滞性和表面张力减小,从而促进了蒸发^[33]。

本研究基于室内土柱模拟试验初步探讨了不同材料来源的生物炭对于青海东部地区典型土壤的入渗和蒸发过程的影响,与田间实际情况有所差异,未考虑气象、作物、土壤空间变异等因素,所得结论有待于在田间做进一步验证。此外,需要进一步开展生物炭的长期效应试验,探究不同生物炭种类、用量和粒径下的土壤水分运动特征,深入阐明生物炭的应用对于旱作农田土壤水分循环的影响。

4 结论

(1)藜麦杆和油菜杆生物炭显著增加了土柱的入渗耗时和总水分入渗量,马铃薯杆炭入渗耗时增加不显著,但显著增加了总水分入渗量。

(2)马铃薯杆炭促进了湿润锋的运移,而藜麦杆和油菜杆炭在中后期减缓了湿润锋的运移速度,马铃薯杆炭的累积入渗量在整个入渗过程中始终高于对

照处理。

(3)添加生物炭处理均提高了土壤早期的入渗速率,降低了土壤后期的稳定入渗速率,其中马铃薯杆炭促进早期入渗,而且后期入渗降低少,表现最好。在模拟施炭土壤的入渗过程方面,Kostiakov模型表现最优。

(4)施炭对于前期土壤蒸发无显著影响,但显著提高了后期的土壤蒸发量。蒸发30天后,马铃薯杆、油菜杆和藜麦杆炭分别比CK高5.2%,9.2%,10.2%。

参考文献:

- [1] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:126-156.
- [2] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [3] 文治强,杨健,尚松浩.基于双作物系数法的干旱区覆膜农田耗水及水量平衡分析[J].农业工程学报,2017,33(1):138-147.
- [4] 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.
- [5] Li H C, Zhao X N, Gao X D, et al. Effects of water collection and mulching combinations on water infiltration and consumption in a semiarid rainfed orchard [J]. Journal of Hydrology,2018,558:432-441.
- [6] Jeffery S, Verheijen F, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J].Agriculture Ecosystems & Environment,2011,144(1):175-187.
- [7] Gul S, Whalen J K, Thomas B W, Sachdeva V, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015,206:46-59.
- [8] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review [J].Plant and Soil,2010,337(1/2):1-18.
- [9] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
- [10] Heredia S M A, Tarelho L A C, Matos A, et al. Thermo-economic analysis of integrated production of biochar and process heat from quinoa and lupin residual biomass [J].Energy Policy,2018,114:332-341.
- [11] Githinji L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam [J]. Archives of Agronomy and Soil Science,2014,60(4):

- 457-470.
- [12] Głab T, Palmowska J, Zaleski T, et al. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil [J]. *Geoderma*, 2016, 281: 11-20.
- [13] 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.
- [14] 吉恒莹, 邵明安, 贾小旭. 水质对层状土壤入渗过程的影响 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 183-188.
- [15] Arthur E, Tuller M, Moldrup P, et al. Effects of biochar and manure amendments on water vapor sorption in a sandy loam soil [J]. *Geoderma*, 2015, 243: 175-182.
- [16] 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.
- [17] Abrol V, Ben-Hur M, Verheijen F G, et al. Biochar effects on soil water infiltration and erosion under seal formation conditions: Rainfall simulation experiment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(12): 2709-2719.
- [18] Sun J N, Yang R Y, Li W X, et al. Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(11): 3271-3279.
- [19] Lei O, Zhang R. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(9): 1561-1572.
- [20] 刘朝霞, 牛文娟, 楚合营, 等. 秸秆热解工艺优化与生物炭理化特性分析 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 196-203.
- [21] 于东平, 张鑫, 何毅, 等. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 66-71.
- [22] 马仁萍. 青海省农作物秸秆综合利用现状问题及对策 [J]. *农业与技术*, 2016, 36(20): 25.
- [23] 宋日权, 褚贵新, 冶军, 等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊 1): 109-114.
- [24] Kinney T J, Masiello C A, Dugan B, et al. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2012, 41: 34-43.
- [25] Ahmad M, Lee S S, Dou X, et al. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118: 536-544.
- [26] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(5): 801-807.
- [27] 魏永霞, 王鹤, 刘慧, 等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 290-299.
- [28] 刘易, 黄建, 马彦茹, 等. 生物质炭输入对盐化灰漠土壤水分运移的影响 [J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(2): 343-351.
- [29] Novak J, Sigua G, Watts D, et al. Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer [J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 160-167.
- [30] Spokas K, Novak J, Masiello C, et al. Physical disintegration of biochar: An overlooked process [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014, 1(8): 326-332.
- [31] Joseph S, Graber E, Chia C, et al. Shifting paradigms: Development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components [J]. *Carbon Management*, 2013, 4(3): 323-343.
- [32] Wang T, Stewart C E, Ma J, et al. Applicability of five models to simulate water infiltration into soil with added biochar [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(5): 701-711.
- [33] 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.
- [34] Wang T, Stewart C E, Sun C, et al. Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils [J]. *Catena*, 2018, 162: 29-39.
- [35] Zhang Y P, Gu K, Li J W, et al. Effect of biochar on desiccation cracking characteristics of clayey soils [J]. *Geoderma*, 2020, 364: e114182.
- [36] Zong Y T, Xiao Q, Lu S G. Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic Ultisol amended with biochars derived from different feedstocks [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 16(1): 177-190.
- [37] Or D, Lehmann P, Shahraeeni E, et al. Advances in soil evaporation physics: A review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4): 1-16.