

生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响

李帅霖¹, 王霞¹, 王朔², 张永旺¹, 王杉杉¹, 上官周平^{1*}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100;
2. 西藏农牧科学院蔬菜研究所, 拉萨 850032)

摘要: 研究生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗、蒸发特性的影响, 可为旱区农业与生态建设中应用生物炭改良土壤水文特性提供科学依据与技术支持。该文采用室内土柱模拟方法, 研究了 3 种生物炭施用方式 A (施在表层 0~10 cm)、B (施在下层 >10~20 cm) 和 C (施在耕层 0~20 cm) 和 4 种质量添加比例 (0、1%、2% 和 4%) 对土壤水分湿润峰、累积入渗量及蒸发的影响。结果表明: 生物炭对土壤水分入渗、蒸发的影响受施用方式和用量的共同制约。与对照 (不施生物炭) 相比, A 与 C 施用方式在 1% 和 2% 用量均可以减缓湿润峰运移速度, 而较高用量 (4%) 可以促进湿润峰运移; B 施用方式 2% 用量明显促进湿润峰运移, 1% 与 4% 用量无明显影响; 以入渗时间 50 min 为例, A4% 能显著增加累积入渗量, 增量达对照的 10.63% ($P < 0.05$), 而 B1%、A1%、C2%、C1%、C4% 可显著降低累积入渗量 ($P < 0.05$), 减少量分别达对照的 13.90%、12.46%、8.49%、5.32%、4.66%, 其余处理与对照相比差异不显著。在同一施用方式下, 除 C2% 和 C1% 外, 各处理累积入渗量均随生物质炭用量增加而呈上升趋势。各处理土壤湿润峰运移距离与时间之间呈幂函数关系, 且累积入渗量与时间关系可用 Kostiakov 入渗经验公式描述, Philip 入渗模型可用于描述耕层 (0~20 cm) 混合生物炭土壤累积入渗量变化过程。各处理 35d 累积蒸发量与对照相比差异不显著。A4% 可显著增加耕层土壤入渗能力, 在改良质地较黏土壤入渗性能时, 在土壤表层添加较高用量 (4%) 生物炭效果较好。

关键词: 土壤; 水分; 蒸发; 生物炭; 入渗; 旱地

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.019

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-14-0135-10

李帅霖, 王霞, 王朔, 张永旺, 王杉杉, 上官周平. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.019 <http://www.tcsae.org>
Li Shuailin, Wang Xia, Wang Shuo, Zhang Yongwang, Wang Shanshan, Shanguan Zhouping. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 135-144. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.019 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国旱作农业综合生产能力主要受降雨稀少、蒸发能力强、土壤保水能力差等因素制约, 发展以充分利用有限降水为中心的保育蓄水关键技术才能不断提高农田生产潜力。水分入渗与蒸发是农田土壤水分循环的重要环节, 入渗过程决定着土壤对降雨和灌溉水的有效利用程度, 也影响着地表径流和土壤水蚀过程^[1], 减少无效蒸发可以提高植物水分利用效率^[2], 优化水分资源利用。因此, 采取有效措施持续改善土壤入渗、蒸发特性是提高土壤蓄水保墒能力, 促进旱地作物高产稳产, 实现旱作农业可持续发展的有效途径。

生物炭是生物有机材料 (生物质) 在缺氧或无氧环境中经热裂解后产生的固体产物^[3], 生物炭以其良好的解

剖结构和理化性质, 广泛的材料来源和广阔的产业化发展前景, 成为当今农业、能源与环境等领域的研究热点^[4-6]。生物炭具有高度发达的孔隙结构和巨大的比表面积, 表面含有 (或可吸附) 多种有机官能团, 具有较强的离子吸附交换能力, 这些独特的理化性质使其可作为一种新型土壤改良剂施入土壤^[7], 起到增大土壤孔隙度^[8-9], 降低土壤容重^[10-13], 改变土壤团聚体特性等作用^[14-16], 然而生物炭对土壤持水力的影响与土壤质地和生物炭自身特性紧密相关。Tryon 等^[17]在研究生物炭对不同质地土壤水分影响时发现生物炭可增加沙土土壤有效水, 而黏质土壤有效水含量会随着生物炭的添加而减少。Lim 等^[18]向 4 种不同质地土壤 (粗砂土, 细砂土, 壤土和黏土) 中分别添加 4 种生物炭 (硬木粒, 硬木片, 燕麦壳和木屑), 发现生物炭可以降低砂质土饱和和导水率, 但可以增加壤土和黏土的导水能力。Liang 等^[19]在中国华北平原地区通过连续 3 a 田间试验发现添加生物炭可以显著增加石灰质土壤持水力。在中国半干旱地区, 王丹丹等^[20]发现生物炭可显著提高土壤持水性能, 且与生物炭添加量呈正相关关系; 而齐瑞鹏等^[21]通过土柱模拟试验发现生物炭降低沙土入渗能力, 但可明显增加壤土入渗能力。添加生物炭土壤的水力特性变化是土壤与生物炭综合作

收稿日期: 2016-03-01 修订日期: 2016-04-20

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2015BAD22B01)。

作者简介: 李帅霖, 男, 河北廊坊人, 主要从事生物炭改良旱作农田环境效应研究。杨陵 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。

Email: lishuailin007@163.com

*通信作者: 上官周平, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤-植物水分生态, 区域农业发展等方面的研究。杨陵 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: shangguan@ms.iswc.ac.cn

用的结果,受到土壤质地与生物炭性质的共同制约,而且在田间应用中,生物炭还田模式与后期耕作措施均能形成特殊的双层甚至多层土壤结构,而层状土壤水分运动明显不同于均质土壤^[22],因此不同生物炭还田模式对田间土壤水分循环的影响将更为复杂。生物炭“还田”方式及施入土壤以后的时空分布会受到人为因素与自然因素的影响。首先,向农田输入生物炭的添加方式、施用深度和用量以及后期不同的耕作方式均会直接改变生物炭在耕层土壤中的空间分布,而且生物炭输入土壤后,受降雨和生物物理扰动等作用,沿土壤剖面发生迁移,改变其空间分布^[23]。生物炭对于耕层土壤水分入渗、蒸发特性的影响必然受到其施用方式及后期迁移的影响。然而目前关于生物炭对土壤水分特征的研究多集中于水分数量方面,对于土壤水分动力学特征变化的研究存在不足,针对生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗和蒸发特性影响的研究亟待加强。因此,本文基于室内土柱模拟试验,考虑生物炭添加对土壤容重的影响,围绕不同生物炭施用方式及用量,探究不同生物炭还田模式对水分入渗和蒸发特性的影响及其内在机理,旨在确定应用生物炭改善旱地农田典型土壤水力特性的施用方式与用量,模拟生物炭迁移至下层土壤后土壤的入渗、蒸发特性,丰富生物炭添加对旱作区土壤水分效应影响的研究,为应用生物炭改良旱作区土壤提供科学依据与技术参考。

1 研究方法

1.1 试验材料

本研究以黄土高原南部关中壤土为供试土壤,采自陕西省杨陵区。土壤采用 Z 型采样方法,采集深度为 0~20 cm。土样去除杂质后,避光条件下自然风干,碾压过 2 mm 筛备用。土壤机械组成利用 MS2000 激光粒度分析仪(马尔文公司,英国)测定,土壤砂粒,粉粒,黏粒质量分数分别为 10.17%, 73.02% 及 16.81%,质地为粉黏壤土(国际制)。生物炭为苹果木炭(陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司),炭化温度为 450~480 °C,炭化时间为 8~10 h,碳质量分数为 83.2%,生物炭研磨后过 2 mm 筛。

1.2 试验设计

试验设置 3 种生物炭添加方式与 4 个生物炭梯度,共计 10 个处理,每个处理重复 3 次。生物炭添加方式分别为:0~10 cm(土柱最高土面处计为 0 cm)为生物炭与土壤混合样品,>10~20 cm 为土壤(A);0~10 cm 为土壤,>10~20 cm 为生物炭与土壤混合样品(B);0~20 cm 均为生物炭与土壤混合样品(C)。生物炭梯度按照生物炭占干土质量百分数设置为 0、1%、2% 和 4%,未施生物炭处理即全部为土壤样品,作为对照(CK)。根据前期预填装试验,确定土壤填装容重为 1.2 g/cm³,生物炭填装容重为 0.45 g/cm³。由于生物炭输入土壤会在一定程度上降低土壤容重,为尽可能模拟田间实际情况,故本试验采用保证填装土层体积一定,生物炭与土壤按

照各自容重和添加比例共同确定混合土层容重的方法填装(表 1)。

表 1 不同生物炭用量处理混合土层容重
Table 1 Bulk density of mixed soil layer with different amount of biochar

用量 Amount	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	容重变化 Change of bulk density/(g·cm ⁻³)
0 (CK)	1.20	0
1%	1.18	0.02
2%	1.16	0.04
4%	1.12	0.08

1.3 土柱制备

试验所用土柱为内径为 7 cm、高为 30 cm 的透明有机玻璃圆柱。装土前在土柱底部放置一层滤纸和两层纱布封口,防止土壤颗粒流失。管壁均匀涂一薄层凡士林,减少管壁效应对水分入渗的影响。各土柱按照 5 cm 一层分别计算并称量生物炭与土壤样品,混合均匀后装入土柱,分层界面处谨慎磨毛,保证土层之间紧密接触,避免试验过程出现分层现象。

1.4 测定方法

采用一维定水头垂直积水入渗法测定土壤入渗性。入渗装置由马氏瓶与土柱组成,水头高度为 3 cm,入渗开始后,连续记录一定时间内垂直湿润峰运移距离和马氏瓶水位的下降高度,当湿润峰运移至土柱底端时停止记录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^[24]。室内平均温度为 22 °C,平均相对湿度 27%,每日中午 12:00 用电子秤称量土壤蒸发水分损失量,持续记录 35 d。日蒸发量计算公式为

$$E = M_{\text{差}} \times 10 / (\pi r^2) \quad (1)$$

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。

1.5 数据处理与分析

试验中所有数据均为各重复测定的平均值,采用 Excel 2010 进行数据处理, SigmaPlot 10.0 软件作图, SPSS 20.0 软件进行土壤入渗参数模拟和统计分析, LSD 法进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

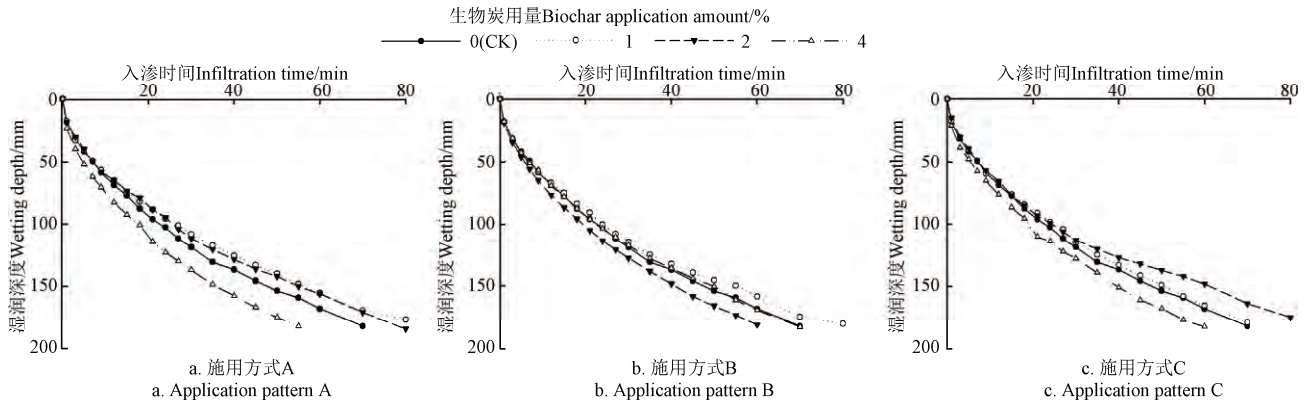
2.1 生物炭施用方式及用量对湿润峰运移的影响

土壤积水入渗过程中,土壤水剖面从上往下分为饱和层、延伸层、湿润层和湿润锋。湿润锋是指在湿润层下缘一个较为明显的干湿交界的锋面^[25],可表征水分在土壤基质吸力和重力作用下的运动特征。

生物炭施用方式及用量均会对土壤湿润峰运移特征产生明显影响(图 1),所有处理湿润峰的一维垂向运动均随入渗时间而逐渐增加,但行进至土柱底部所用时间不同,且各处理湿润峰运移距离随时间变化特征有所差异。与 CK 相比, A 类施用方式下,浓度 1% 和 2% 对湿润峰运移情况无明显影响,但均在一定程度上减缓湿

润峰运移速度，A4%则明显增加湿润峰运移速度；B1%在入渗后期表现出减缓湿润峰运移速度的效果，B2%加快了湿润峰移动速率，B4%湿润峰运移情况却和CK较为一致；C1%表现出微弱减缓湿润峰运移速率的作用，C2%则在中后期表现出明显减慢湿润峰下移速度的作用，而C4%可以明显增加湿润峰运移速度。A与C施用方式在中低用量（2%，1%）条件下均可以减缓湿润峰运移速度，而在较高用量（4%用量）条件下均可以促进湿润峰向下运移，而B施用方式湿润峰运移速度随用量的增加出现减-增-减的波动趋势。在相同用量条件下，

施用方式的不同也会对湿润峰运移产生影响。与CK相比，A1%，B1%，C1%均可以减缓湿润峰行进速度，以A1%作用最明显；2%用量下只有B2%促进湿润峰运移速度，而A2%和C2%表现出一定减缓作用，以C减缓程度最大；而4%用量下，B4%与CK湿润峰运移情况基本一致，A4%和C4%表现出促进湿润峰运移的效果，以A促进程度最大。较低用量（1%）条件下，A、B、C三种施用方式均表现出抑制土壤水分下移的作用，而中高（2%、4%）用量对湿润峰运移速度的影响因施用方式的不同而表现出一定差异。



注：施用方式 A、B、C 分别指生物炭施在表层土壤（0~10 cm）、下层土壤（>10~20 cm）、耕层土壤（0~20 cm）。下同。
 Note: Application pattern A, B and C mean that adding biochar to surface layer soil (0-10 cm), underlying soil (>10-20 cm) and plough layer soil (0-20 cm) respectively. The same below.

图 1 不同生物炭施用方式及用量下湿润峰动态变化
 Fig.1 Dynamic changes of wetting front under different application patterns and amount of biochar

综合考虑施用方式与用量对湿润峰运移的影响，以入渗时间为 50 min 为例，与 CK 相比，C2% (137.0 mm)，A1% (139.8 mm)，A2% (142.0 mm)，B1% (145.0 mm)，C1% (149.0 mm)，B4% (150.0 mm)湿润峰运移距离依次小于 CK (153.5 mm)，且均达到显著性水平 ($P < 0.05$)，可以增加土体对土壤水分的吸持作用，一定程度上减缓水分在土体中的下移速度，以 C2% 作用最强。而 A4% (175.0 mm)，C4% (168.0 mm)，B2% (165.7 mm) 处理湿润峰运移距离依次显著大于 CK ($P < 0.05$)，均对土壤水分入渗起到促进作用，以 A4% 作用最强。

进一步地对湿润峰与时间二者的关系进行拟合，发现其符合幂函数： $F=at^b$ ，其中 a 和 b 为经验常数^[26]。表 2 拟合结果表明，幂函数可以很好地模拟不同生物炭用量及添加方式下混合土壤的湿润峰运移规律，各处理模拟决定系数 R^2 均大于 0.996，显著性检验 $P < 0.01$ 。A 和 C 施用方式下参数 a 随生物炭用量的增加呈现先减后增的趋势，而 B 施用方式出现先增大后减小的变化趋势。而各处理拟合参数幂指数 b 的变化情况未发现明显规律，说明生物炭施用方式和用量会对以基质势为主导的初始水分入渗进程产生较为明显的影响。

表 2 湿润峰深度与入渗时间拟合结果
 Table 2 Fitting results of wetting front depth and infiltration time

生物炭用量 Biochar application amount	施用方式 A Application pattern A			施用方式 B Application pattern B			施用方式 C Application pattern C		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
0 (CK)	17.75	0.551	0.999	17.75	0.551	0.999	17.75	0.551	0.999
1%	17.80	0.528	0.999	18.82	0.522	0.998	16.72	0.560	0.999
2%	17.07	0.543	0.999	19.92	0.542	0.999	19.41	0.503	0.996
4%	22.66	0.525	0.999	17.74	0.550	0.999	20.48	0.538	0.999

注： a 和 b 为公式 $F=at^b$ 的经验常数， R^2 为决定系数。施用方式 A、B、C 分别指生物炭施在表层土壤（0~10 cm）、下层土壤（>10~20 cm）、耕层土壤（0~20 cm）。下同。
 Note: a and b are the empirical parameters of $F=at^b$, R^2 is determination coefficient. Application pattern A, B and C mean that adding biochar to surface layer soil (0-10 cm), underlying soil (>10-20 cm) and plough layer soil (0-20 cm) respectively. The same below.

2.2 生物炭施用方式及用量对土壤累积入渗量的影响

累积入渗量是指入渗开始后一定时间内通过地表单位入渗到土壤中的总水量，是入渗率关于时间的积分。土壤入渗过程达到稳定之前，常用累积入渗量来表征土

壤入渗能力^[27]。从图 2 可以看出各处理累积入渗量均随时间增加而逐渐上升，但各处理对土壤累积入渗过程影响不一。与 CK 相比，A1% 累积入渗量明显低于 CK，A2% 入渗曲线与 CK 基本重合，而 A4% 累积入渗量明显高于

CK; B 施用方式下, 只有 B1% 可以明显降低累积入渗量, 而 B2% 和 B4% 对累积入渗过程无明显影响; C 施用方式下, 各处理均可以减少一定时间内的累积入渗量。而在同一用量条件下, 各施用方式对累积入渗量的影响存在不同, 1% 用量各添加方式均可减少累积入渗量, 且在入渗前期, A1% 和 C1% 情况较为一致, 在入渗过程中后期,

A1% 入渗曲线逐渐与 B1% 重合, 使累积入渗量减少幅度增大; 2% 用量条件下, 随着时间的增加, A2%, B2% 入渗量累积情况逐渐与 CK 一致, 而 C2% 累积入渗量从始至终均小于 CK; 在 4% 用量条件下, A4% 累积入渗量明显大于 CK, C4% 累积入渗量稍小于 CK, 而 B4% 与 CK 情况较为一致。

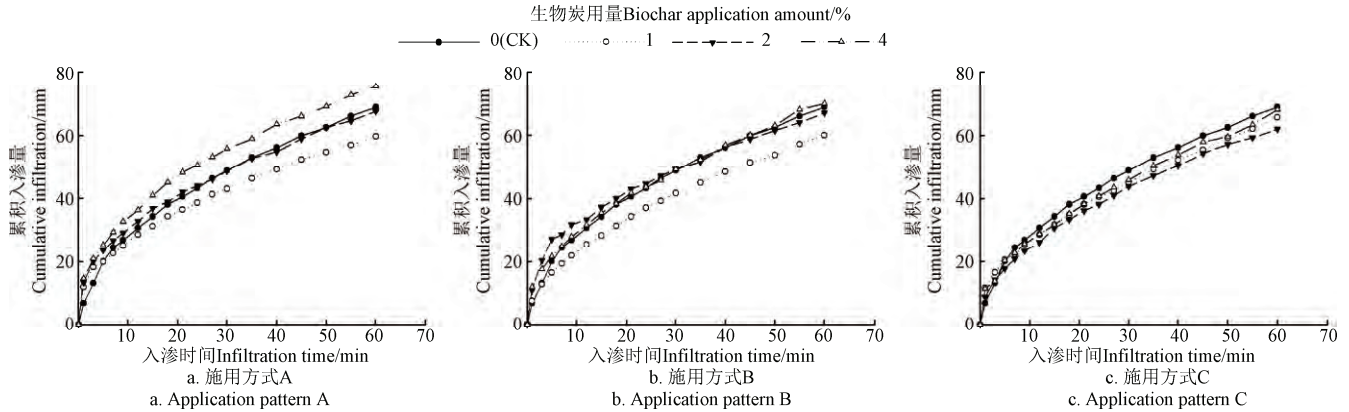


图 2 生物炭施用方式及用量对累积入渗量的影响

Fig.2 Effects of different application patterns and amount of biochar on soil cumulative infiltration

综合考虑生物质炭施用方式及用量与对累积入渗量的影响, 同样以入渗时间为 50 min 为例, A 施用方式, 累积入渗量表现为 A1% (54.68 mm) < A2% (62.46 mm) = CK (62.46 mm) < A4% (69.10 mm); B 施用方式, B1% (53.78 mm) < B2% (61.44 mm) < CK (62.46 mm) < B4% (63.02 mm); C 施用方式, C2% (57.16 mm) < C1% (59.14 mm) < C4% (59.55 mm) < CK (62.46 mm)。所有处理中只有 A4% 可显著增加累积入渗量 ($P < 0.05$), 增加量达对照的 10.63%。B1%、A1%、C2%、C1%、C4% 可显著降低累积入渗量 ($P < 0.05$), 减少量分别为对照的 13.90%、12.46%、8.49%、5.32%、4.66%。值得注意的是, 除 C2% 累积入渗量小于 C1% 外, 各处理累积入渗量均随生物炭用量的增加呈现上升趋势。

2.3 生物质炭施用方式及用量对土壤入渗参数的影响

为进一步研究生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗过程的影响, 本研究分别采用 Philip 理论入渗模型和 Kostikov 入渗经验公式对实测结果进行拟合。

2.3.1 Philip 入渗模型拟合结果

Philip 入渗模型数学表达式为

$$I(t) = St^{0.5} + At \tag{2}$$

式中 $I(t)$ 为累积入渗量, mm; S 为吸渗率, $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$; A 为稳渗率, mm/min ; t 为入渗时间, min。

土壤吸渗率 (S) 指土壤依靠毛管力吸收或释放液体的能力, 是反映土壤前期入渗能力的一个重要指标, 对土壤入渗初期入渗率的大小起主要作用^[28]; 而稳渗率 (A) 为土壤的稳定下渗强度或稳定入渗率, 衡量土壤的渗透性能并随入渗时间的增加, 参数 A 对土壤入渗率的大小起主要作用^[29]。通过各处理实测数据与 Philip 入渗模型进行拟合, 发现只有 C 施用方式下各用量处理与之拟合效果较好, 决定系数 R^2 在 0.996~0.999 之间, 而 A、B

两种施用方式下的实测数据拟合效果较差, 故本研究只对 C 添加方式下各处理拟合结果进行分析, 拟合参数、参数的显著性比较、决定系数比较结果见表 3。

表 3 生物炭 C 施用方式 Philip 入渗模型拟合参数

Tbale 3 Parameters of Philip model for application pattern C of biochar

处理 Treatment	吸渗率 Permeability rate/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-0.5}$)	稳渗率 Stable infiltration rate/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	决定系数 Determination coefficient R^2
CK	8.816a	0.013d	0.998
C1%	8.266b	0.021c	0.996
C2%	7.745c	0.037b	0.999
C4%	8.233b	0.046a	0.997

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lower-case letters in the same column mean significant difference at 0.05 level among treatments.

C 添加方式, 不同生物炭用量处理的吸渗率与稳渗率与 CK 相比差异均显著, 且各处理之间稳渗率差异也显著。表明 C 施用方式下, 生物质炭的不同用量会明显影响土壤水分入渗进程。由表 1 得知, 各处理的吸渗率均小于 CK, 表明各用量处理可以显著降低土壤毛管吸力, 其吸收或释放液体的能力弱于 CK, 抑制入渗前期土壤水分的下移, 其中以 C2% 抑制作用最强。但各用量处理均可显著提高土壤稳渗率, 且随着生物炭用量的增加而逐渐增大, 各处理均可在一定程度上改善土壤的入渗性能, 提升土壤后期渗透性能, 其中以 C4% 效果最明显。

2.3.2 Kostikov 入渗经验公式拟合结果

Kostikov 入渗经验公式表达式为

$$I(t) = Kt^n \tag{3}$$

式中 $I(t)$ 为累积入渗量, mm; K 和 n 为经验常数。

各处理与 Kostikov 入渗经验公式拟合的决定系数 R^2 分布在 0.996~0.999 之间, 拟合度均较好 (表 4)。在

累积入渗量与时间的变化关系中，A、B、C 3 种施用方式下参数 K 、 n 随生物质炭用量增加呈现不同的变化规律。在 A 添加方式下，各处理参数 K 均大于 CK，且随生物质炭用量增加而呈递增趋势，而各处理间参数 n 相差不大但均小于 CK。在 B 施用方式下，只有 B1% 拟合的 K 小于 CK，而 n 大于 CK，同时 B2% 拟合的 K 最大， n 值最小。在 C 添加方式下，参数 K 随着生物质炭用量的递增整体呈现出递减的趋势，其中 C2% 和 C4% 拟合的参数 K 均小于 CK 拟合 K 值，这与上述 Philip

拟合结果相一致，而参数 n 则未表现出明显变化规律。根据各处理拟合结果，A 添加方式各用量水平均有利于促进初期土壤水分入渗，且随生物质炭用量增加而加强，同时各用量均可减缓累积入渗量衰减程度，改善土壤入渗性能，其中以 A4% 作用最为明显，明显提高土壤初期入渗速率，增加一定时间内的累积入渗量，而这与实测结果相一致。而 B、C 两种施用方式对初期土壤水分入渗性能与后期累积入渗量衰减程度的影响需结合用量水平具体分析。

表 4 Kostiakov 模型参数
Table 4 Parameters of Kostiakov model

生物炭用量 Biochar application amount	施用方式 A Application pattern A			施用方式 B Application pattern B			施用方式 C Application pattern C		
	K	n	R^2	K	n	R^2	K	n	R^2
0 (CK)	8.705	0.506	0.998	8.705	0.506	0.998	8.705	0.506	0.998
1%	9.939	0.434	0.997	6.999	0.524	0.999	8.854	0.483	0.997
2%	11.648	0.425	0.998	12.739	0.401	0.996	7.713	0.509	0.999
4%	12.850	0.431	0.999	9.819	0.476	0.998	8.300	0.507	0.997

注： K 和 n 为公式 $I(t)=Kt^n$ 经验常数， R^2 为决定系数。
Note: K and n are the empirical parameters of $I(t)=Kt^n$, R^2 is determination coefficient.

2.3.3 累积入渗量与湿润峰动态变化关系

在生物炭不同施用方式与用量条件下，土壤水分湿润锋动态变化与累积入渗量变化过程都可用时间 t 的幂函数来描述。理论上同一处理两个拟合函数之比应该是一个常数，即孔隙度乘以土柱的横截面积，而实际两者拟合结果之比仍是关于时间 t 的幂函数。这是由于入渗过程湿润峰存在优势流，湿润峰位置由从管壁外观察到的最前端湿润点确定，此时湿润峰上方土壤并未完全饱和，而理论上认为湿润峰上方土壤已完全饱和。同时，生物炭施用对土壤孔隙度和比表面积的改变以及生物炭自身特性均可以对土壤水分运移产生影响，而且 A、B 施用方式使土壤以不同层状结构存在，其水分入渗过程较均质土壤更为复杂。加之入渗初期土壤基质势较大，湿润峰运移速度与水分入

渗速度均较快，导致虽然已经用量筒瞬时加入设定水头高度所需水量也无法避免马氏瓶初始供水时状态不稳定，从而在一定程度上影响入渗初期试验精度。综上，由于本试验水分入渗过程不完全满足理论假设条件，生物炭不同施用模式对土壤层状结构的改变和试验系统误差等因素，导致虽然湿润峰和累积入渗量动态变化过程均可以用幂函数来描述，但同一处理拟合结果的幂指数并不完全一致，拟合结果之比仍是一个关于时间 t 的幂函数。

2.4 生物炭施用方式及用量对土壤蒸发的影响

地表蒸发是土壤水分散失的主要途径之一，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。图 3 给出了不同处理土壤累积蒸发量随蒸发天数的变化趋势。

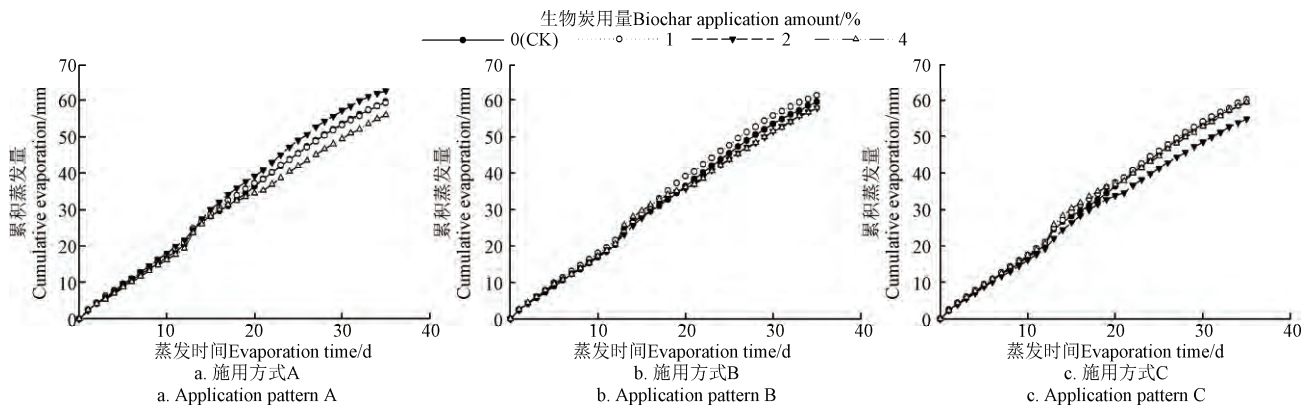


图 3 生物炭施用方式及用量对土壤累积蒸发量的影响

Fig.3 Effects of different application patterns and amount of biochar on soil cumulative evaporation

从图 3 可以看出，随着时间的推移，同一施用方式下不同生物炭用量与同一用量水平不同施用方式处理的累积蒸发量差距变大，但均与对照 (CK) 无明显差异 ($P>0.05$)。连续蒸发 20 d 后，A2% 与 C2%，A2% 与 A4% 的累积蒸发量差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。蒸发 35 d

后，A2% (62.67 mm) 与 C2% (54.86 mm)，A2% 与 A4% (59.53mm)，C1% (60.18mm) 与 C2% 之间的累积蒸发量差异显著 ($P<0.05$)。生物炭不同施用方式与用量处理对土壤中后期蒸发存在一定影响。35 d 蒸发试验结束时，虽然各处理与对照处理间的累积蒸发量在统计学角度差异

均未达到显著水平,但 A4%与 C2%处理分别可减少对照累积蒸发量的 5.96%, 7.84%。这对于应用生物炭减少田间土壤无效蒸发,提高土壤持水能力为目的生物炭施用方式与用量组合选择仍具用一定启示作用。

3 讨论

土壤入渗过程主要受到供水强度和土壤入渗能力的影响,供水强度属于外部因素,而土壤入渗能力主要受土壤自身特性的影响,如土壤容重、质地、结构、前期含水量等^[30]。此外,土壤层状结构的改变也会对土壤入渗和蒸发过程产生影响,层状土壤水分运动不同于均质土壤^[31],其孔隙结构的不同也会影响到土层含水率、水力梯度和传导度等。

生物炭作为一种外源物质输入土壤,其多孔性和较低的堆积密度会对土壤的物理结构特性产生直接影响,可通过降低土壤容重、增加土壤孔隙度、改变土壤孔隙结构和数量,影响土壤质地等物理机制来影响土壤水分入渗与蒸发特性。而且生物炭本身特性也可能对土壤入渗和蒸发特性产生影响,由于生物炭在制备过程中极易形成微孔结构,微孔受热扩大就会形成许多孔径大小不同的孔隙,而孔隙表面部分会被烧蚀,结构出现不完整加之灰分的存在,容易形成羧基、羟基、内酯基等含氧官能团^[32-33],使生物炭具有一定的极性,拥有良好的亲水性,从而增强生物炭对土壤水分的吸持能力。但有学者指出生物炭本身通常含有疏水性官能团,且疏水作用普遍存在,同时认为生物炭疏水性官能团是否存在及其存在数量与制备原料和温度密切相关^[34-35]。由此可见生物炭对土壤水分入渗与固持能力的影响存在较大差异,这是土壤与生物炭之间诸多理化作用的结果。

生物炭的施用方式以及后期耕作方式会不同程度改变生物炭在土层中的空间分布,改变土壤理化性质,使土壤以双层或多层的结构存在。本研究中 A4%能明显促进土壤水分入渗, A1%、B1%可以在一定程度上减缓土壤水分入渗, A2%、B2%对土壤水分入渗的抑制作用较 A1%、B1%有所下降,而 C1%、C2%、C4%均会起到减缓土壤水分入渗的作用。王艳阳等^[36]采用室内与田间试验相结合的方法研究了积水入渗条件下生物炭对土壤水分入渗特性的影响,结果显示生物炭-土壤双层结构水分入渗过程表现为斜率由大到小的两段非线性曲线,转折点为入渗峰面到达生物炭-土壤交界面,但添加生物炭土壤的入渗率、饱和导水率和临界吸力与未添加生物炭土壤相比均有所提高,同时可也显著增强上下层土壤的持水性能。本试验中 A 施用方式土壤分层形式与王艳阳的研究相似,且结果较为一致。A、B 两种施用方式是模拟耕层土壤分层施用生物炭或在表层添加生物炭后因人或自然因素生物炭迁移至下土层的情况,C 施用方式模拟耕层土壤全部混合生物炭的情况。A、B 施用方式使得耕层土壤以两种完全不同的分层结构存在,与 C 施用方式相比,除考虑生物炭与土壤相互作用外,还要注意分层界面孔隙及毛管连通性的改变对水分入渗的影响。添加

较低用量(1%)生物炭对于土壤质地、土壤容重、孔隙度的影响较小,同时粒径较小的生物炭还会填充部分土壤孔隙^[37],分层土壤还可能致土层界面存在毛管障碍^[38],加之生物炭自身丰富的孔隙结构和亲水特性从而产生抑制土壤水分入渗的作用,这是导致三种施用方式在 1%用量条件下均会减缓土壤水分入渗速度的主要原因。随着生物炭用量的增加,生物炭以其良好孔隙结构、较低的堆积密度、加之与土壤颗粒形成的微小团粒^[39],使混合土层孔隙度有所增加,容重减小,增大混合土层与纯土层质地差异,进一步影响土壤水分入渗特性。在 A 施用方式下,当湿润峰到达炭-土界面时,由于炭土混合土壤的进水吸力小于纯土壤的进水吸力,导致湿润峰处的基质吸力变大,将会促进湿润峰下移与水分下渗。在表层(0~10 cm)添加较高量(4%)生物炭,大孔隙促进水分入渗的作用强于生物炭亲水作用与土壤水分通道曲折等对土壤水分入渗抑制作用之和,加快表层土壤水分入渗速度,加之炭-土界面基质势差距较大,可以促进初段下层土壤吸渗,最终提高耕层土壤(0~20 cm)水分入渗能力,所以 A4%可以明显促进单位历时长内累积入渗量。在 B 施用方式下,当湿润峰到达炭-土界面时,下层混合土壤的进水吸力小于上层进气吸力,导致湿润峰处基质吸力不能满足水分快速下渗的要求,但随着水量的供给,湿润峰处的基质吸力不断降低达到混合土层进水吸力时,湿润峰开始进入混合土层^[40],但此时上层土壤含水率较高^[41],会在一定程度上促进湿润峰穿过炭-土界面后的入渗速度,所以 B 施用方式在中高用量(2%、4%)时对水分入渗并没有表现出抑制作用,却在较低用量(1%)时表现出最强的抑制作用。C 施用方式在中高(2%、4%)用量下均表现出降低水分入渗能力的作用,导致这一结果的主要原因是生物炭改变了土壤孔隙度与孔隙分布特征,减少了中孔隙总体积,增加了小孔隙和大孔隙的总体积^[42],虽然混合土层大孔隙数量增加,但有效孔隙可能减小,水分运动通道曲折复杂,大孔隙的产生会促进水分入渗,而土壤有效孔隙减小,水分运动通道曲折复杂会限制水分入渗,当前者效应小于后者时,单位入渗历时长内的累积入渗量就会减小^[43]。综合看来,当向土壤添加较高用量生物炭时,生物炭对于土壤孔隙数量和分布的改变与土层的不同组合方式可共同影响土壤水分入渗特性。

本研究采用的供试土壤质地较黏(壤土),黏粒含量高,土壤紧实,大孔隙和水分传导孔隙都较少且土壤孔隙弯曲,遇较强降雨或灌溉时,水分在土体中往往难以下渗而易形成地表径流,加快农田施用肥料的流失,不但影响作物生长还加剧土壤侵蚀与污染。因此可以采用在较黏土壤表层(0~10 cm)添加较高用量(4%)生物炭来改善耕层土壤入渗性能,使有限水资源得到高效利用。本试验针对 3 种生物炭施用方式及 4 种用量组合对土壤入渗和蒸发的影响进行了研究,显示不同施用方式和用量均会对湿润峰深度、累积入渗量、累积蒸发量随时间变化的关系产生影响,添加生物炭能否改善研究

区壤土入渗能力受施用方式与用量的共同制约。这与齐瑞鹏等^[21]在定容重条件下开展生物炭对土壤水分入渗研究得出生物炭显著促进壤土入渗能力的结论并不完全一致，本研究充分考虑到生物炭添加对土壤容重变化的影响，这可能是导致结论不一致的主要原因，另外本试验所用生物炭原料来源及粒径与齐瑞鹏等研究所用不同也是原因之一。Castellini 等^[44]在生物炭对黏土水力学特性影响的研究中得出较高生物炭用量会显著增加土壤表层(0~10 cm)水分含量的结论，并强调因生物炭添加造成土壤容重的微小变化会在很大程度上制约土壤液相与气相孔隙的平衡，对土壤持水力产生可观的影响。这与本试验的变容重土柱填装设计相呼应，且研究结果较为一致。然而，本研究通过一定容积下固定生物炭容重与土壤容重来确定混合土壤容重的方法同样具有一定局限性。不同种类及用量的生物炭输入不同质地土壤，其容重变化有着怎样的规律，进一步明确生物炭添加比例对混合土壤容重的影响对于提高室内模拟试验精度，缩小与田间试验结果差异有重要意义。生物炭的材料来源与制备工艺均会对其理化性质产生重要影响，不同种类生物炭输入土壤后会对土壤水分动力学特征产生怎样的影响有待进一步探索，生物炭以不同施用模式输入不同质地旱作土壤对土壤持水能力和水力传导率等影响的相关研究将在下一步工作中开展。本试验为初步探索生物炭施用方式与用量对于土壤水分动力学特性影响的室内模拟试验，与田间土壤生态系统实际情况有所不同，今后需开展系统长期大田试验工作，研究应用生物炭改良土壤效果，集成相应耕作技术体系，进而综合评价生物炭改良旱作农田土壤质量的效应。

4 结 论

1) 生物炭施用方式与用量会对湿润峰进程与累积入渗量产生影响。施用方式 A (施在表层 0~10 cm) 和施用方式 C (施在耕层土壤 0~20 cm) 在 1% 和 2% 用量条件下均可以减缓湿润峰运移速度，而以较高用量(4%) 均可以促进湿润峰向下运移，施用方式 B (施在下层土壤 >10~20 cm) 在 2% 用量条件下可明显促进湿润峰行进速度，所有处理中 C2% 的减缓作用最强，而 A4% 的促进作用最明显。以入渗时间 50 min 为例，A4% 能显著增加累积入渗量，增量达对照的 10.63%，改善土壤入渗性能效果最优，B1%、A1%、C2%、C1%、C4% 可显著降低累积入渗量 ($P < 0.05$)，减少量分别达对照的 13.90%、12.46%、8.49%、5.32%、4.66%，其余处理影响不显著 ($P < 0.05$)。在同一施用方式下，除 C2% 和 C1% 外，各处理累积入渗量均随生物炭用量增加而呈上升的趋势。

2) 以不同施用方式与用量添加生物炭的土壤湿润峰运移距离与运移时间均符合幂函数关系。Philip 入渗模型可用于描述以 C 施用方式混合生物炭土壤水分累积入渗量变化过程，而生物炭不同施用方式与用量处理的土壤的累积入渗量与时间关系可用 Kostikov 入渗经验公式描述。

3) 生物炭施用方式及用量会对 35 d 土壤累积蒸发量

产生一定影响，但与对照相比差异均不显著。在土壤表层(0~10 cm) 添加较高用量生物质炭改良质地较黏耕层土壤(0~20 cm) 入渗特性效果较好。

[参 考 文 献]

- [1] 白文波, 宋吉青, 李茂松, 等. 保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 18—23.
Bai Wenbo, Song Jiqing, Li Maosong, et al. Effect of super absorbent polymer on vertical infiltration characteristics of soil water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(2): 18—23. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李娟, 李军, 程科, 等. 渭北旱塬玉米田保护性轮耕土壤固碳效果与增产增收效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 104—111.
Li Juan, Li Jun, Cheng Ke, et al. Soil organic carbon sequestration, yield and income increment of rotational tillage measures on Weibei highland maize field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 104—111. (in Chinese with English abstract)
- [3] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46: 437—444.
- [4] Kleiner K. The bright prospect of biochar[J]. Nature Reports-Climate Change, 2009, 3(6): 72—74.
- [5] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. Nature Communications, 2010, 1(3): 118—124.
- [6] 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.
Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3324—3333. (in Chinese with English abstract)
- [7] Genesio L, Miglietta F, Baronti S, et al. Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 201: 20—25.
- [8] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2008, 13: 991—1002.
- [9] Tammeorg P, Simojoki A, Mäkelä P, et al. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 191: 108—116.

- [10] 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(3): 443—449.
- [11] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153—160.
- [12] Devereux R C, Sturrock C J, Mooney S J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2012, 103: 13—18.
- [13] 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.
- [14] Ouyang L, Wang F, Tang J, et al. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13: 991—1002.
- [15] Mukherjee A, Lal R, Zimmerman A R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 26—36.
- [16] Zhang Qingzhong, Du Zhangliu, Lou Yilai, et al. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macro aggregate fractions [J]. *Catena*, 2015, 127: 26—31.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Liang Feng, Li Guitong, Lin Qimei, et al. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13: 525—532.
- [20] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永豪, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 101—104.
Wang Dandan, Zheng Jiyong, Yan Yonghao, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 101—104. (in Chinese with English abstract)
- [21] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永豪, 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.
Qi Ruipeng, Zhang Lei, Yan Yonghao, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2281—2288. (in Chinese with English abstract)
- [22] Miller D E, Gardner W H. Water infiltration in ostrati field soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1962, 26(2): 115—119.
- [23] Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management*[M]. London: Earthscan, 2009: 271—287.
- [24] 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.
Xiao Qian, Zhang Hongpei, Shen Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(16): 128—134. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张启昌, 孟庆繁, 兰晓龙. 黄土低山丘陵区湿润锋运动的实验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(4): 84—88.
Zhang Qichang, Meng Qingfan, Lan Xiaolong. Study on damp-surface motion in Loess Low Hill Area[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, 2(4): 84—88. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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.
Xie Qian, Wang Limei, Qi Ruipeng, et al. Effects of biochar on water infiltration and water holding capacity of loessial soil[J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(1): 66—76. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响的模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40—45.
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(6): 40—45. (in Chinese with English abstract)
- [28] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. *土壤学报*, 2001, 38(4): 579—583.
Yuan Jianping, Zhang Suli, Zhang Chunyan, et al. Spatial variation of steady water infiltration rates of small watershed in hilly and gully loess region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 579—583. (in Chinese with English abstract)

- [29] 原林虎. PHILIP 入渗模型参数预报模型研究与应用[D]. 太原, 太原理工大学, 2013.
Yuan Linhu. Research and Application of Philip Infiltration Model Parameters Prediction[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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.
- [31] 李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 493—502.
Li Yunzhu, Hu Kelin. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 493—502. (in Chinese with English abstract)
- [32] 孟冠华, 李爱民, 张全兴. 活性炭的表面含氧官能团及其对吸附影响的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2007, 23(1): 88—94.
Meng Guanhu, Li Aimin, Zhang Quanxing. Studies on the oxygen-containing groups of activated carbon and their effects on the adsorption character[J]. Ion Exchange and Adsorption, 2007, 23(1): 88—94. (in Chinese with English abstract)
- [33] Nguyen B T, Lehmann J, Hockaday W C, et al. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation[J]. Environment Science Technology, 2010, 44: 3324—3331.
- [34] Kinney T, Masiello C, Dugan B, et al. Hydrologic properties of biochar produced at different temperature[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 41: 34—43.
- [35] 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.
- [36] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113—119.
Wang Yanyang, Wei Yongxia, Sun Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(8): 113—119. (in Chinese with English abstract)
- [37] 赵迪, 黄爽, 黄介生. 生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 136—143.
Zhao Di, Huang Shuang, Huang Jiasheng. Effects of biochar on hydraulic parameters and shrinkage-swelling rate of silty clay[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 136—143. (in Chinese with English abstract)
- [38] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 105—111.
Ren Lidong, Huang Mingbin, Fan Jun. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 105—111. (in Chinese with English abstract)
- [39] 文曼, 郑纪勇. 生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 46—50.
Wen Man, Zheng Jiyong. Effects of different sizes of biochar and their addition rates on soil shrinkage characteristics[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61—67.
Wang Chunying, Mao Xiaomin, Zhao Bing. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 61—67. (in Chinese with English abstract)
- [41] 赵沛伦. 母质的两层性对土壤持水性能的影响[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, 2: 30—46.
Zhao Peilun. The effect of double-layer of parent material on water-holding capacity of soils[J]. Memoir of the Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1985, 2: 30—46. (in Chinese with English abstract)
- [42] 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.
Wang Honglan, Tang Xiangyu, Zhang Wei, et al. Effects of biochar application on tith soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 107—112. (in Chinese with English abstract)
- [43] 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.
Zhou Beibei, Shao Ming'an. Effect of content and size of rock detritus on infiltration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 801—807. (in Chinese with English abstract)
- [44] Castellini M, Giglio L, Niedda M. et.al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 1—113.

Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation

Li Shuailin¹, Wang Xia¹, Wang Shuo², Zhang Yongwang¹, Wang Shanshan¹, Shangguan Zhouping^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. Institute of Vegetables, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa, 850032, China)

Abstract: Water scarcity is one of the major limitations to agriculture sustainable development in dryland areas. Biochar as a promising novel alternative of soil amendment to improve soil quality has received a wide attention. Understanding the effects of biochar on soil water infiltration process and evaporation characteristics will provide the scientific basis and technical support for the biochar applying in dry farming regions. Aiming to study the soil water infiltration and evaporation characteristics of different application patterns with different addition amount, the soil column simulation experiment was conducted under the condition of ponding infiltration. Biochar (pyrolysis temperature of 450-480 °C, carbonization time of 8-10 h) derived from apple wood was applied to soil (Eum-Orthric) in 3 patterns (A (surface layer soil 0-10 cm), B (underlying soil 10-20 cm), and C (plough layer soil 0-20 cm)) and 4 application amounts (0, 1%, 2% and 4% (w/w)), all treatments with triplicate. Compared with control group, the wetting front migration rate of all application patterns of biochar at the rate of 1%, the application pattern A or C at the rate of 2% and the application pattern B at the rate of 4% were decreased, however, the application pattern A and C at the rate of 4% and the application pattern B at the rate of 2% could increase the migration rate. After 50 min since infiltration starting, the wetting front depths of the application pattern C at the rate of 2%, the application pattern A at the rate of 1%, the application pattern A at the rate of 2%, the application pattern B at the rate of 1%, the application pattern C at the rate of 1% and the application pattern B at the rate of 4% were 137.0, 139.8, 142.0, 145.0, 149.0 and 150.0 mm respectively, lower than control group (153.5 mm) significantly ($P<0.05$). But the wetting front depths of application pattern A and C at the rate of 4% and application pattern B at the rate of 2% were 175.0, 168.0 and 165.7 mm respectively, significantly higher than control (153.5 mm) ($P<0.05$). While after 50 min since infiltration starting, adding 4% biochar with application pattern A, the cumulative infiltration amount increased significantly ($P<0.05$) by 10.63% compared with the control. At 1% biochar application rate, the cumulative infiltration amount decreased significantly ($P<0.05$) by 12.46%, 13.9% and 5.32% compared with the control under application pattern A, B and C, respectively. Adding biochar with application pattern C at the rate of 2% and 4%, the infiltration amount significantly decreased by 8.49% and 4.66% respectively ($P<0.05$) compared with the control. The relationships of wetting front distance and infiltration time in all treatments could be described by the power function with the determination coefficient greater than 0.996. The Philip infiltration model only suited to describe the soil water infiltration process of application pattern C, with the determination coefficient ranging from 0.996 to 0.999. The Kostikov infiltration model was suitable for all treatments with the determination coefficient ranging from 0.996 to 0.999. During the successive evaporation of 35 d, all treatments had no significant difference in the cumulative evaporation compared to the control ($P<0.05$). But there were significant differences ($P<0.05$) about the cumulative evaporation between the application pattern A at the rate of 2% (62.67 mm) and application pattern C at the rate of 2% (54.86 mm), the application A at the rate of 2% (62.67 mm) and the rate of 4% (59.53 mm), the application pattern C at the rate of 1% (60.18 mm) and 2% (54.86 mm). Notably, the application pattern A at the rate of 4% and application pattern C at the rate of 2% decreased the cumulative evaporation by 5.96% and 7.84% respectively compared to the control. Our results show that both biochar application pattern and amount can affect the soil infiltration capacity and evaporation characteristics. Adding higher rate (4%) biochar in surface layer soil can improve hydrologic characteristics of argillaceous soil.

Keywords: soils; water; evaporation; biochar; infiltration; dry land