

不同浓度梯度生物炭对土壤水分入渗的模型拟合研究

申江龙^{1,2,3,4}, 张 静^{1,2,3,4}

¹陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

²自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

³陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2022年7月13日; 录用日期: 2022年8月12日; 发布日期: 2022年8月19日

摘 要

针对粘质生土土壤水分入渗差、持水能力低、水分利用效率低等问题, 采用田间试验与室内模拟土柱实验结合的方法, 开展了生物炭对粘质生土土壤水分入渗响应的研究, 结果表明生物炭的添加明显提高了土壤持水性和保水性, 且生物炭添加量越高土壤持水性和保水性提高越明显且土壤水分入渗过程的模拟效果表现为Kostiakov模型最优, 为今后生物炭改良土壤以及生土快速熟化提供科学依据和理论支撑。

关键词

生物炭, 水分入渗, 模型拟合

Model Fitting of Biochar with Different Concentration Gradients on Soil Water Infiltration

Jianglong Shen^{1,2,3,4}, Jing Zhang^{1,2,3,4}

¹Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

³Institute of Land Engineering & Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 13th, 2022; accepted: Aug. 12th, 2022; published: Aug. 19th, 2022

Abstract

To address the problems of poor water infiltration, low water holding capacity and low water use efficiency of clayey raw soil, we conducted a study on the response of biochar to water infiltration in clayey raw soil by combining field experiments and indoor simulated soil column experiments. The results showed that the increase of soil water-holding and water-holding capacity was obvious with the addition of biochar, and the higher the amount of biochar added, the more obvious the improvement of soil water retention and water retention. The simulation effect of soil water infiltration process showed the best Kostiakov model. Biochar provides scientific basis and theoretical support for soil improvement and rapid soil aging.

Keywords

Biochar, Water Infiltration, Model Fitting

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生土一般肥力水平低下, 土体僵硬或过于松散, 土壤水分入渗率小, 远远不能满足作物生长所需要的养分和水分, 自然条件下, 生土熟化过程缓慢, 难以满足耕种者期望和农业发展需求[1]。因此, 通过土壤改良剂实现新增耕地和贫瘠土地质量的快速提升是现代农业发展的必然选择。水分入渗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接纳程度, 也影响着地表径流和土壤水蚀过程[2]。采取有效措施改善土壤入渗特性是提高土壤蓄水保墒能力, 促进作物高产稳产的有效途径。土壤质地对土壤水分的入渗能力有明显影响, 解文艳等[3]基于不同土壤质地条件下的大田土壤积水入渗试验资料, 分析讨论了土壤质地对大田土壤水分入渗能力, 发现土壤质地由轻变重, 土壤入渗速度稳定减小, 入渗能力递减。土壤黏粒含量越大, 相同入渗时间内, 土壤累积入渗量越小, 即土壤越黏重, 其入渗能力越差[4]。对于质地相对粘重, 土体紧实的生土而言, 由于缺乏团聚作用, 入渗率小, 影响对降水及灌溉水的接纳, 易产生地表径流, 造成生土质量退化, 因此, 如何提高其蓄水能力是提高粘质生土土壤质量的关键。

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[5]。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[6]。研究表明, 生物炭可以降低砂质土饱和导水率, 但可以提高壤土和黏土的导水能力[7]。齐瑞鹏等[8]通过土柱模拟试验发现生物炭可以降低沙土入渗能力, 但可明显增加壤土入渗能力。针对粘质生土, 生物炭的施加量和施加年限必然会改善土壤结构, 引起土壤容重和土壤孔隙度的变化[9], 从而导致土壤入渗能力和持水力的变化, 然而目前关于生物炭施用量及施用年限对粘质生土土壤水分入渗影响的研究还相对较少。

本研究基于室内土柱模拟试验, 考虑生物炭施加量对土壤容重的影响, 围绕不同生物炭施用量及施用年限, 探究生物炭施加量对土壤水分入渗的影响及其内在机理, 旨在确定应用生物炭改善粘质生土土壤水力特性的施用量以及生物炭连年施用对土壤水分入渗性能的影响, 丰富生物炭添加对粘质生土土壤水分效应影响的研究, 为应用生物炭改良粘质生土土壤提供科学依据与技术参考。

2. 材料与方法

试验区位于陕西省宝鸡市眉县汤峪镇上王村秦岭野外监测中心站, 该试验区地处东经 107°39'~108°00', 北纬 33°59'~34°19', 位于陕西省关中平原西部, 南依秦岭, 北临渭水, 属黄河中游川塬沟壑区。

2.1. 实验材料

供试生物炭拟采用陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司生产的生物炭, 生物炭粉碎过 2 mm 筛备用。供试作物为玉米, 供试土壤质地为粘土。室内进行土壤积水入渗试验, 所需设备为自制马氏瓶和内径 10 cm, 高 50 cm 的有机玻璃筒。

2.2. 实验设计

本研究采用模拟土柱与大田试验相结合的方法, 大田试验设置试验小区 15 个, 小区的规格为 1.5 m×3 m, 生物炭施加量按照 0、5、10、15、20 t/hm² (如下图 1, 以下标记为 B0、B5、B10、B15、B20) 设 5 个处理, 小区布置采用随机区组设计, 每一处理设置 3 次重复。将生物炭均匀撒在土壤表面, 经人工搅拌将其与耕层土壤(20 cm)混合均匀, 使土壤各处颜色均一, 起垄静置。试验小区均采用相同的 N、P、K 施肥方案, 与当地农民施肥习惯保持基本一致, 分别为 N: 150 kg/hm²; P₂O₅: 120 kg/hm²; K₂O: 90 kg/hm²。

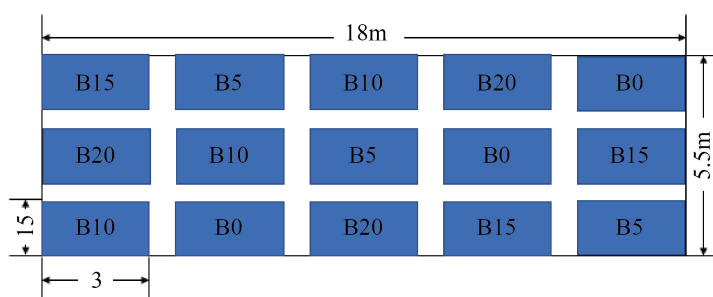


Figure 1. The layout of the field test plot
图 1. 田间试验小区布设图

室内采用土柱试验测定土壤水分入渗过程, 如下图 2, 土样为玉米成熟期的耕层(0~20 cm)土, 在每个生物炭小区与对照小区内采用环刀取原状土样测定土壤容重, 并取土样测定土壤含水量。同时取土在自然状态下风干后剔除杂草杂物, 研磨过 2 mm 筛后待用。

2.3. 模型选择

分别选取 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型 3 个入渗模型对土壤入渗速率和入渗时间的关系进行拟合, 分别为:

Philip 模型

$$f(t) = 0.5st^{-0.5} + f_c \quad (1)$$

式中 $f(t)$ 为土壤入渗率, f_c 为土壤稳定入渗速率, t 为时间, s 为模型参数。

Kostiakov 模型

$$f(t) = at^b \quad (2)$$

式中 a 、 b 为模型参数, a 表示土壤水分入渗开始第 1 时段的平均入渗速率, b 表示土壤水分速率随时间变化的快慢程度。

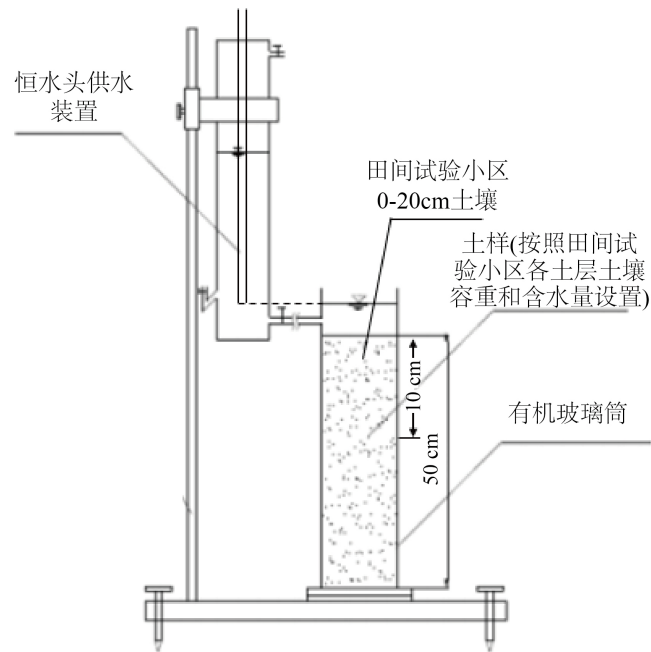


Figure 2. Schematic diagram of vertical soil column infiltration test device

图 2. 垂直土柱入渗试验装置示意图

Horton 模型

$$f(t) = f_c + (f_1 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (3)$$

式中 f_1 为土壤初始入渗速率, k 为衰减指数。

2.4. 观测指标及方法

土壤含水率和土壤容重: 采用烘干法测定玉米成熟期农田土壤 0~20 cm、20~40 cm、不同土层的土壤含水率, 并测定对应各层土壤的土壤容重。

土壤水分入渗性能参数: 严格按照田间耕层土壤容重配比土柱用土, 试验装置为内径 10 cm、高 50 cm 的有机玻璃土柱。积水入渗实验装土前, 在有机玻璃筒壁涂抹凡士林并将土柱内壁边缘土壤压实, 以确保无边缘效应。装土厚度为 50 cm, 土柱 0~20 cm 土层均取自对照和相应生物炭含量的田间小区土壤, 20~50 cm 土层均按相应田间小区各对应层位的土壤容重和含水量装填。为了保证土柱初始含水率均匀和密度均一, 扰动土样要经过风干、破碎和过筛, 按照耕层土壤的土壤含水率制备土样, 开始装土时首先要称取该层所要填土的重量, 每层装入土后都要先整平, 然后用击石器击实, 使得装入的土与该层事先标定好的线相平齐, 然后用适当的工具抛毛后进行下一层土的填装, 装土时须保证层与层之间良好接触, 不能出现明显的分层现象。土样填装完毕后, 在土样的上部放置一石棉网或者定性滤纸, 以防止装水时, 水冲刷土样表面。然后用橡胶软管将马氏瓶的出水口与有机玻璃桶进水口相连。取土样时, 每取完一个土样, 所用的取土器要擦干净, 然后再取下一个土样。

试验过程中, 利用马氏瓶供水, 保持土面 1.5 cm 的积水深度, 该装置能自动补水, 使水位保持不变。安装马氏瓶时须将马氏瓶进气口与有机玻璃桶中水面上边缘相平齐。分时段记录马氏瓶水位变化和湿润锋下移位置。0~5 min 每 30 s 记录 1 次, 5~15 min 每 1 min 记录 1 次, 15~30 min 每 3 min 记录 1 次, 30~60 min 每 5 min 记录 1 次, 60~120 min 每 10 min 记录 1 次, 120 min 后每 30 min 记录 1 次, 当湿润锋到达

40 cm 停止试验记录。每次在土柱上选取 6 个方向分别读取湿润锋距离, 将读取的 6 个湿润锋点数据取平均值作为最终湿润锋距离, 采用 0~5 min 土壤入渗速率均值作为初始入渗速率; 采用各时刻土壤入渗量之和作为土壤累积入渗量; 最终数据取 3 次重复的平均值。观测指标见表 1。

Table 1. Observation indicators and methods

表 1. 观测指标及方法

指标类型	测定指标	测定方法(设备)	测定周期
试验田土壤 物理指标	容重	利用环刀采集试验田土样, 测定土壤容重	玉米收获后
	含水量	采用烘干法测定土壤含水量	
土壤水分入渗 性能参数	入渗速率	室内模拟土柱实验观察	玉米收获后
	累积入渗量	室内模拟土柱实验观察	
	湿润锋运移距离	室内模拟土柱实验观察	
	饱和导水率	利用定水头法测定	

3. 结果

3.1. 不同生物炭添加方式对土壤容重、土壤含水量、土壤孔隙度的影响

图 3 描述了深度分别为 0~20 和 20~40 的土壤在不同处理下的土壤容重, 含水量以及孔隙度的变化情况。针对 0~20 cm 土层深度的土壤, 随着生物炭施用量的增加, 土壤的容重持续减小, 土壤含水量未表现出明显的梯度特征, 土壤孔隙度随着生物炭施用量的增加逐步增加, 具体的数值在表 2 中可以查看。

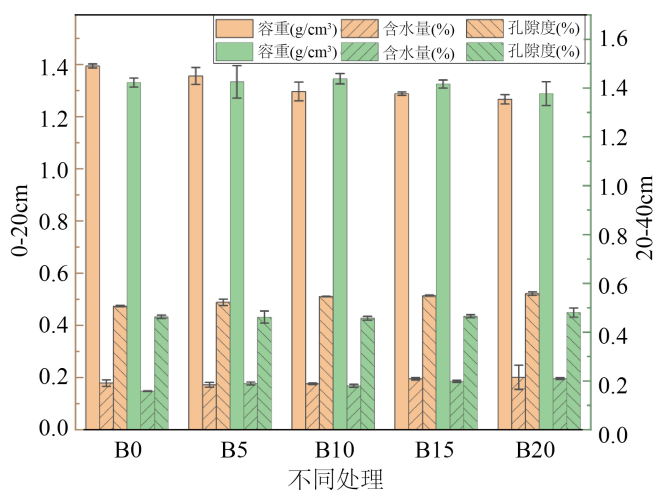


Figure 3. Soil physical properties under different treatments

图 3. 不同处理下土壤物理性质

Table 2. Soil physical properties of different treatments

表 2. 不同处理土壤物理性质

不同处理	深度(cm)	土壤容重(g/cm ³)	土壤含水量(%)	土壤孔隙度(%)
B0	0~20	1.39431 ± 0.0077	0.17871 ± 0.01262	0.47384 ± 0.00291
	20~40	1.42269 ± 0.01892	0.15825 ± 0.00183	0.46314 ± 0.00714

Continued

B5	0~20	1.35578 ± 0.03235	0.17266 ± 0.00904	0.48839 ± 0.01221
	20~40	1.42587 ± 0.0665	0.18987 ± 0.00611	0.46193 ± 0.0251
B10	0~20	1.29648 ± 0.0361	0.17633 ± 0.00273	0.51076 ± 0.00136
	20~40	1.43827 ± 0.02102	0.18006 ± 0.00594	0.45726 ± 0.00793
B15	0~20	1.28809 ± 0.00651	0.19525 ± 0.00483	0.51393 ± 0.00246
	20~40	1.41681 ± 0.01652	0.19832 ± 0.00458	0.46535 ± 0.00623
B20	0~20	1.26649 ± 0.01756	0.20095 ± 0.0462	0.52208 ± 0.00663
	20~40	1.37759 ± 0.04909	0.20993 ± 0.00342	0.48016 ± 0.01853

3.2. 生物炭含量对湿润锋进程的影响

湿润锋进程反应土壤水分入渗规律。图4是湿润锋随时间变化的规律，图中各处理湿润锋进程呈现相似趋势，即随入渗时间推移湿润锋进程曲线斜率逐渐减小。相同入渗时刻各处理湿润锋进程差异明显，B0湿润锋进程明显快于添加生物炭处理，且生物炭添加量越多湿润锋进程越慢。从图4可知，B0、B5、B10、B15和B20入渗用时分别为150、175、192、223和298 min，也说明生物炭添加量越多湿润锋进程越慢。

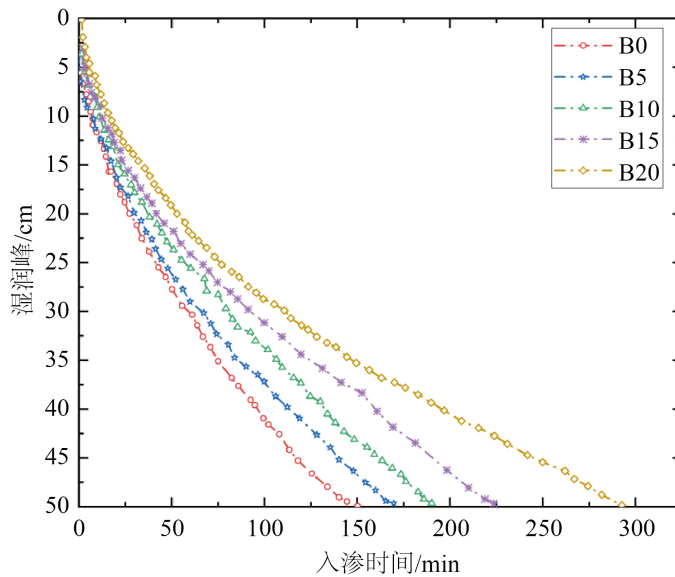


Figure 4. Time course of wetting front under different biochar contents

图4. 不同生物炭含量下湿润锋随时间变化过程

3.3. 生物炭含量对土壤累计入渗量的影响

图5反应不同生物炭含量下的累计入渗量与入渗时间之间的关系，各处理的累计入渗量均随入渗时间的推移而增加，但不同入渗时刻累计入渗量增加程度有明显差异。初始入渗阶段累计入渗量曲线斜率较大，进入稳定入渗阶段后土壤入渗速率降低，累积入渗量曲线斜率减小，即累积入渗量与入渗历时呈正比、与生物炭添加量呈反比。选取150 min的累积入渗量来定量分析土壤水分入渗特性，120 min时B0、B5、B10、B15和B20累积入渗量分别为17 cm、15.65 cm、14.35 cm、12.87 cm和11.34 cm。

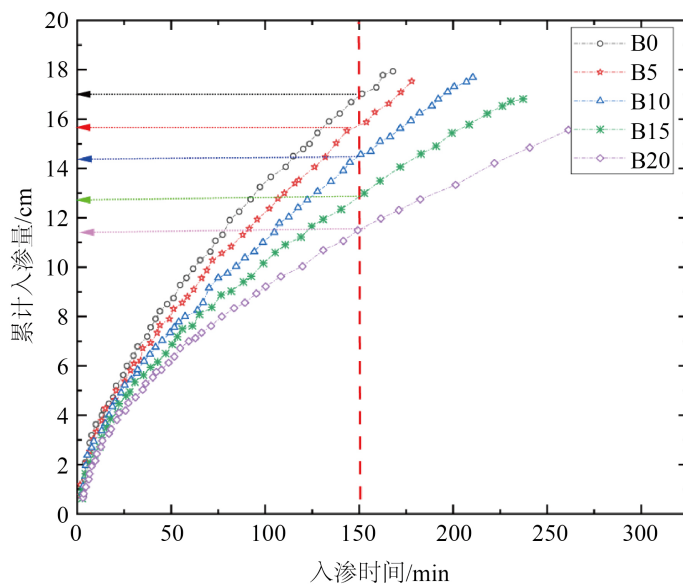


Figure 5. Variation characteristics of cumulative infiltration with different biochar contents

图 5. 不同生物炭含量累积入渗量变化特征

3.4. 土壤水分入渗过程拟合及入渗性能分析

为了充分了解生物炭添加量对土壤水分入渗的影响、确定入渗模型的适用性,采用 Philip、Kostiakov、Horton 三种模型对土壤水分入渗过程进行拟合(表 3) Philip 模型中 s 值范围: 0.532~1.026 且 s 随着生物炭含量的增加而减小, 而 s 越大, 土壤入渗曲线的斜率也越大, 瞬时入渗率则衰减越快, 瞬时入渗率快慢顺序为 $B0 > B5 > B10 > B15 > B20$ 。 ic 范围: 0.148~0.502 且随着生物炭含量的增加显著增加, 表现出显著的正相关特征。 Kostiakov 模型中 a 值范围: 0.589~1.09, a 随着生物炭含量的增加而增大, Horton 模型中 ic 值范围: 0.825 ~ 12.99 且与生物炭含量呈现正相关, α 值范围: 0.375~0.532 且与生物炭添加量呈负相关。综合三个模型的拟合结果, 可以发现 Kostiakov 模型的拟合效果最好。

Table 3. Fitting results of different infiltration model parameters

表 3. 不同入渗模型参数拟合结果

模型	参数	不同处理				
		B0	B5	B10	B15	B20
Philip	s	0.902 ± 0.124	0.873 ± 0.133	0.81 ± 0.112	0.75 ± 0.124	0.642 ± 0.11
	ic	0.176 ± 0.028	0.213 ± 0.0101	0.32 ± 0.016	0.39 ± 0.0012	0.49 ± 0.012
	R^2	0.943	0.953	0.943	0.896	0.88
	RRMSE	0.0275	0.0264	0.0257	0.051	0.055
Kostiakov	a	0.980 ± 0.111	0.896 ± 0.017	0.812 ± 0.135	0.73 ± 0.032	0.71 ± 0.121
	b	0.569 ± 0.025	0.587 ± 0.012	0.571 ± 0.021	0.592 ± 0.011	0.572 ± 0.014
	R^2	0.988	0.992	0.976	0.986	0.986
	RRMSE	0.0136	0.0115	0.021	0.031	0.015

Continued

	<i>ic</i>	0.927 ± 0.102	6.198 ± 0.330	8.21 ± 0.261	9.57 ± 0.36	12.74 ± 0.25
Horton	α	0.495 ± 0.037	0.438 ± 0.013	0.412 ± 0.011	0.411 ± 0.019	0.396 ± 0.021
	R^2	0.92	0.96	0.94	0.91	0.94
	RRMSE	0.0386	0.033	0.043	0.046	0.031

4. 结论与讨论

1) 随土壤中生物炭添加量增加, 初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和累积入渗量逐渐减小、湿润锋进程减缓, 即粘质生土中添加生物炭可以减缓水分快速入渗、增加水分在土壤中的滞留时间, 有效解决土壤水分渗漏过快的问题。

2) 结合 R^2 值和模型参数综合比较 3 种入渗模型, 生物炭添加下的粘质生土土壤水分入渗过程的模拟效果依次为 Kostiakov 模型、Philip 模型及 Horton 模型。

3) 通过拟合生物炭添加后土壤水分特征曲线, 发现生物炭的添加明显提高了土壤持水性和保水性, 且生物炭添加量越高土壤持水性和保水性提高越明显。

基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2022-25, DJNY2022-32)。

参考文献

- [1] 李泓辉, 姚鹏飞, 李肯唐, 等. 渭北地区新修农田生土熟化技术试验研究[J]. 中国农业信息, 2014(3):120.
- [2] 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.
- [3] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(5): 537-540.
- [4] 梁春娣. 丘陵区不同类型土壤入渗特性试验研究[J]. 山西水利科技, 2016(3): 84-86.
- [5] 包维斌, 白一茹, 赵云鹏, 等. 生物炭添加对宁夏中部旱区土壤水分入渗及持水性的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1326-1332.
- [6] 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.
- [7] Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G. and Novak, J.M. (2016) Predicting the Impact of Biochar Additions on Soil Hydraulic Properties. *Chemosphere*, **142**, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069>
- [8] 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.
- [9] 吴昱, 赵雨森, 刘慧. 不同的生物炭施用量和施用年限对土壤结构性指标的影响[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(3): 5-11.