

DOI: 10.11766/trxb202008130360

孙宁婷, 王小燕, 周豪, 倪珂, 崔璨. 生物质炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 722–732.
SUN Ningting, WANG Xiaoyan, ZHOU Hao, NI Ke, CUI Can. Effects of Kind and Incorporation Depth of Biochars on Water Movement and Nitrogen and Phosphorus Loss in Purple Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 722–732.

生物质炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响*

孙宁婷, 王小燕[†], 周豪, 倪珂, 崔璨

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 土壤中施加生物质炭对改善土壤墒情及提高土壤肥力具有重要作用。为探明生物质炭种类与混施深度对土壤水分运移和养分拦截的作用特征, 通过室内定水头土柱模拟试验, 设置 3 种生物质炭 (稻壳炭、玉米秸秆炭、竹炭) 和 2 种混施深度 (10 cm、20 cm), 以裸土为对照, 测定水分运移及氮磷流失变化过程。结果表明: 生物质炭对土壤孔隙结构的改变以及生物质炭比表面积和粒径分布可共同影响土壤水分运移。混施不同种类生物质炭能使土壤容重降低, 其中混施稻壳炭后容重降低幅度最大, 且稻壳炭能显著提高土壤总孔隙度与饱和含水量。混施稻壳炭能显著促进湿润锋运移, 提高入渗量, 其中稻壳炭混入 10 cm 土层后对炭-土层入渗的促进作用最大, 对水分渗漏影响较小; 而混入 20 cm 土层会促进渗漏, 提高饱和导水率。玉米秸秆炭比表面积与总孔体积最大, 吸持水分能力强; 玉米秸秆炭不含大于 1 mm 粒径的颗粒, 混施后对土壤总孔隙度影响较小, 土壤饱和含水量显著降低, 能抑制水分运移, 其中玉米秸秆炭混入 20 cm 土层对渗漏的抑制作用最强。混施竹炭对湿润峰运移和入渗过程影响不明显, 混入 20 cm 土层对渗漏有抑制作用。混施稻壳炭后, 全磷 (total phosphorous, TP) 流失量减少, 但会使全氮 (total nitrogen, TN) 流失量增加; 混施玉米秸秆炭对 TN 流失影响较小, 能使全磷流失量减少; 混施竹炭能吸附氮素, 但会使 TP 流失量增加。在田间开展应用时, 可选择将稻壳炭混入 10 cm 土层, 能有效减少地表径流与 TP 流失, 但需注意会增加 TN 流失; 玉米秸秆炭混入 20 cm 土层能降低水分运移速率, 有效减少水分渗漏与 TP 流失, 适用于砂土等透水性强的土壤。竹炭对水分运移的影响不如稻壳炭与玉米秸秆炭, 且增加了 TP 流失, 不适合实际应用。
关键词: 生物质炭; 土柱模拟; 紫色土; 入渗; 氮; 磷

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Effects of Kind and Incorporation Depth of Biochars on Water Movement and Nitrogen and Phosphorus Loss in Purple Soil

SUN Ningting, WANG Xiaoyan[†], ZHOU Hao, NI Ke, CUI Can

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

* 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2017B025)、重庆市技术创新与应用示范项目 (cstc2018jscx-mszd0340) 和西南大学本科科技创新“光炯”培育项目 (2018001) 资助 Supported by the Fundamental Research Funds of the Central Universities of China (No. XDJK2017B025), the Technology Innovation and Application Demonstration Project of Chongqing in China (No. cstc2018jscx-mszd0340) and the Undergraduate Science and Technology Innovation “Guang Jiong” Project of Southwest University (No. 2018001)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: youblue@swu.edu.cn

作者简介: 孙宁婷 (1997—), 女, 重庆涪陵人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 15608389571@163.com

收稿日期: 2020-08-13; 收到修改稿日期: 2020-12-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-03-02

Abstract: 【Objective】 Biochar applied in soil plays an important role in improving soil moisture and soil fertility. To explore effects of kind and incorporation depth of biochars on soil water movement and nutrient interception, an in-lab experiment was conducted. 【Method】 The experiment was designed to have a stable water potential, three kinds of biochars (biochar derived from rice husk, biochar derived from maize straw, and biochar derived from bamboo), two incorporation depths (10 cm and 20 cm), and a control plot of bare purple soil. During the experiment, water movement, total nitrogen (TN) loss and total phosphorus (TP) loss were monitored and changes in soil structure observed. 【Result】 Results show that application of biochars altered soil pore structure, which, together with the specific surface area and particle size distribution of biochars, affected the movement of soil water. The application of biochars reduced soil bulk density, to a varying extent relative to kind of the biochars applied. Among the three, rice husk biochar was the highest in the effect of reducing bulk density, and only rice husk biochar significantly increased total soil porosity and saturated soil water content. Rice husk biochar significantly promoted advance of the wetting front and enhanced soil water infiltration. The rice husk biochar incorporated into the soil 10 cm deep showed the greatest effect of promoting water infiltration in the biochar-soil layer and did not have much effect on water leakage, and when into the soil 20 cm deep, it promoted water leakage and increased saturated hydraulic conductivity. Maize straw biochar is the highest in specific surface area and in total pore volume, thus having a strong ability to retain soil water. Maize straw biochar does not have particles more than 1 mm in size. Once incorporated, it did not have much effect on soil total porosity, but did reduce soil saturated water content, thus inhibiting soil water migration. Maize straw biochar incorporated into the soil 20 cm deep showed the most significant inhibitory effect on water leakage. Bamboo biochar did not have much effect on wetting front movement and infiltration process, but did inhibit water leakage process when incorporated into the soil 20 cm deep. Moreover, it was found that rice husk biochar reduced total phosphorous loss, but increased total nitrogen loss; maize straw biochar did not have much effect on total nitrogen loss, but did have some effect of reducing total phosphorous loss; and bamboo biochar adsorbed nitrogen but enhanced total phosphorous loss. 【Conclusion】 When planning to incorporate biochars into the soil, rice husk biochar incorporated into the soil 10 cm deep is the best choice, for it can effectively reduce surface runoff and total phosphorous loss, but it should be remembered that it can increase total nitrogen loss, too. Maize straw biochar incorporated into the soil 20 cm deep can reduce soil water migration rate, thus effectively inhibiting soil water leakage and total phosphorous loss, so it is the best choice for use in sandy soil and other highly permeable soils. Bamboo biochar has less impact on water infiltration and leakage than rice husk biochar and maize straw biochar, and does increase TP loss, thus making it the worst choice for use in farmlands.

Key words: Biochar; Simulated soil column; Purple soil; Infiltration; Nitrogen; Phosphorus

水分入渗与渗漏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、壤中流和溶质迁移过程^[1-2]；水分渗漏过程影响着地下水的水质，将水分保持在耕作层，能够提高作物水分利用效率，并减少养分随渗漏流失^[3-4]。紫色土具有有机质含量低、抗旱性差、可蚀性高、养分缺乏等特点^[5]，易发生土壤侵蚀，从而导致紫色土持水能力减弱，抑制水分入渗^[6]。

生物质炭 (biochar) 常被用作土壤改良剂，是在无氧或缺氧的条件下，由农作物秸秆、木质材料、禽畜粪便等有机材料经热解 (通常低于 700℃) 碳化所产生的一类高度芳香化的难溶性固态物质^[7]。施加生物质炭能调节土壤的 pH，降低土壤容重，增大土壤孔

隙度^[8]，提高土壤团聚体有机碳含量^[9]，改善土壤团聚性^[10]，因此受到研究者的广泛关注。近年来，国内外学者针对生物质炭对土壤性质和环境的影响已经开展了诸多研究，不同种类生物质炭对水分运移与养分流失会产生不同影响。在紫色土耕作层施用秸秆炭能降低土壤容重，增加土壤有机质含量与土壤总有效孔隙度，提高土壤导水率，促进水分入渗^[11]；但也有研究表明，将芒果木炭混施于砂质土会生成更小的孔隙，从而降低水分入渗量^[12]。在紫色土坡耕地进行减肥配施生物质炭，能降低径流量和氮的流失通量^[13]；在黑土区坡耕地施用玉米秸秆炭也能减少降雨径流，减少氮、磷等养分流失^[14]。此外，张一等^[15]通过室内模拟淋溶土柱，发现施用苹果木屑炭增大了土壤中磷素的流失和迁移能力；而宋彬等^[16]表明施用柠条枝炭能减

少氮素和磷素的流失。

生物质炭种类和混施深度的差异会导致土壤物理结构发生改变^[17], 进而影响水分运移。目前的研究多集中于施用单一类型生物质炭对土壤污染物吸附与土壤生物化学特征的影响^[8], 而关于不同类型生物质炭-土混合物分层水分动力学变化方面的研究较少, 且耕层土壤水分入渗、养分流失特征必然受到生物质炭种类及混施深度的影响^[18]。因此, 本研究基于室内土柱模拟试验, 探究不同生物质炭种类及混施深度对紫色土水分运移与养分流失过程的影响, 旨在筛选生物质炭种类与混施深度的最佳模式, 为在田间的实际应用提供科学依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验以紫色土(中性紫色土亚类)为供试土壤, 采自重庆市北碚区西南大学紫色土地(106°24'23"E, 29°48'34"N), 土壤质地为细砂土(中国制), 有机质含量 8.54 g·kg⁻¹, 采集深度 0~40 cm, 土壤去除根系等杂质后自然风干, 碾压过 2 mm 筛备用。根据生物质炭在研究地区的可得性, 选用稻壳炭、玉米秸秆炭和竹炭为供试生物质炭, 每种生

物质炭均在 500℃左右不完全缺氧条件下热解得到, 生物质炭颗粒粒径在 0.02~7 mm 之间, 用筛分法测得每种生物质炭具体粒径分布。用滴水穿透时间法测定了斥水性, 土壤与生物质炭均无斥水性。生物质炭物理特征见表 1。

已提前将每种生物质炭按照 50 g·kg⁻¹、100 g·kg⁻¹ 的添加量与土壤均匀混合得到炭-土混合物, 发现对土壤入渗影响趋势相同, 其中 100 g·kg⁻¹ 添加量影响更加明显, 因此本研究选择 100 g·kg⁻¹ 的生物质炭含量进行分析。由于生物质炭与土壤混合后能降低土壤容重, 因此本试验保持填装土层体积一定, 生物质炭与土壤按照各自容重和添加比例得到炭-土层容重, 以尽可能模拟田间实际情况。

1.2 试验方法

试验共 7 个处理: (1) 裸土(对照); (2) 稻壳炭与 0~10 cm 土层混合(稻壳炭 10 cm); (3) 稻壳炭与 0~20 cm 土层混合(稻壳炭 20 cm); (4) 秸秆炭与 0~10 cm 土层混合(秸秆炭 10 cm); (5) 秸秆炭与 0~20 cm 土层混合(秸秆炭 20 cm); (6) 竹炭与 0~10 cm 土层混合(竹炭 10 cm); (7) 竹炭与 0~20 cm 土层混合(竹炭 20 cm)。各处理下层 20~40 cm 均控制为裸土, 每个处理设置 3 个重复。供试土壤及炭-土混合物的物理化学性质见表 2。

表 1 生物质炭物理特征

Table 1 Physical properties of the biochars used in the experiment

生物质炭 Biochar	颗粒组成 Particle composition/ (g·kg ⁻¹)									比表面积 Specific surface area/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔体积 Total pore volume / (mL·g ⁻¹)
	7~ 5 mm	5~ 3 mm	3~ 2 mm	2~ 1 mm	1~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.1 mm	0.1~ 0.05 mm	0.05~ 0.02 mm		
稻壳炭 ^①	1.93	6.67	33.45	78.63	499.60	234.30	64.21	66.21	15.05	87.86	0.073
秸秆炭 ^②	0.00	0.00	0.00	0.00	763.40	229.80	3.20	2.60	1.00	252.70	0.179
竹炭 ^③	0.00	63.33	288.30	217.40	303.30	72.16	21.31	29.88	4.36	186.20	0.095

①Rice husk biochar, ②Straw biochar, ③Bamboo biochar.

将土样与炭-土混合物分层装入有机玻璃管内, 玻璃管内径 14.0 cm、厚 0.5 cm、高 50.0 cm, 底部均匀分布直径 2 mm、间距 2 mm 的圆形渗孔。填装土柱前在玻璃管底部放置滤纸, 防止土壤颗粒流失, 并在玻璃管内壁均匀涂抹一层凡士林, 以避免管壁效应的影响。各土柱按照 5 cm 一层分别计算并称量样品, 分层界面处进行磨毛, 避免出现分层现象。

填装完成后, 在土柱顶部放置一张滤纸, 避免水流扰动土壤。试验采用一维定水头垂直入渗法模拟土壤入渗与渗漏过程, 由高 50.0 cm、内径 14.0 cm 的马氏瓶持续供水, 每次入渗前控制水头为 1.0 cm。为了模拟田间施肥状态, 配置马氏瓶中溶液, 添加 50 mg·L⁻¹ KNO₃ 和 5 mg·L⁻¹ KH₂PO₄ 混合溶液, 即溶液中 TN 浓度为 6.93 mg·L⁻¹, TP 浓度为 1.14 mg·L⁻¹。

表 2 土壤与炭-土混合物物理化学性质

Table 2 Physical and chemical properties of the soil and the soil incorporated with biochar in the experiment

材料 Material	容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity/ %	毛管孔隙度 Capillary porosity/ %	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/ %	饱和含水量 Saturated water content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phosphorus/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
紫色土 ^①	1.25a	52.68b	35.03b	17.65a	415.9b	0.47c	0.46b	6.50b
稻壳炭-土壤混合 ^②	0.87c	62.45a	42.86a	19.59a	615.1a	0.61b	0.56a	6.85a
秸秆炭-土壤混合 ^③	1.18b	52.66b	34.95b	17.71a	382.7c	1.00a	0.50b	6.84a
竹炭-土壤混合 ^④	1.11b	54.50b	35.40b	19.10a	414.1b	0.84a	0.49b	6.80a

注：同一列中不同小写字母表示处理间存在显著性差异 ($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)。①Purple soil, ②Soil incorporated with rice husk biochar, ③Soil incorporated with straw biochar, ④Soil incorporated with bamboo biochar.

入渗过程开始后，记录马氏瓶的水面高度、湿润锋的深度，土柱饱和并开始渗漏后，记录渗漏液体积，时间间隔前密后疏，整个过程共测定约 10 h。过程结束后测定渗漏液 TN、TP 浓度。

1.3 分析测试方法

水样 TN 浓度采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定，TP 浓度采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法测定，TN、TP 浓度与渗漏量的乘积进行累加得到 TN 与 TP 累积流失量。

土壤及炭-土混合物的理化性质测定，主要参照《土壤理化分析》^[19]中有关土壤理化性质测定的常用方法，测定容重、毛管孔隙度、饱和含水量采用环刀法，总孔隙度由容重与密度计算得到，非毛管孔隙度为总孔隙度与毛管孔隙度之差；根据达西定律方程计算土壤饱和和导水率；使用全自动比表面积与孔隙度分析仪 (QUADRASORB SI, Quantachrome Instruments, 奥地利)，以 N_2 为吸附质，在液氮温度 77 K 下测定生物质炭比表面积及总孔体积。

1.4 数据处理

试验中所有数据均为各重复测定的平均值，采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 24.0 软件计算各变量的描述性统计特征值及方差分析；使用 OriginPro2018 和 Excel 2016 完成制图。

2 结果

2.1 生物质炭种类与混施深度对湿润锋运移的影响

湿润锋在一定程度上能直观地反映水分在土壤

基质吸力和重力作用下的运动特征，由表 3 可知，生物质炭类型对湿润锋触底时间有显著影响。图 1a 显示了各处理湿润锋随时间的运移情况，从图中可以看出，混施不同种类生物质炭后湿润锋运移情况有一定差异。与对照相比，仅混施稻壳炭使触底时间减少，对湿润锋运移的促进作用最大，而混施玉米秸秆炭的抑制作用最大。裸土对照的湿润锋运移平均速率为 $0.16 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，与对照相比，混施稻壳炭使整个土柱的湿润峰平均运移速率显著增加，稻壳炭 10 cm、稻壳炭 20 cm 处理的湿润峰平均运移速率相同，均为 $0.26 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，较裸土增加 62.5%。稻壳炭 10 cm、稻壳炭 20 cm 处理湿润峰触底时间较裸土分别减少 29%和 39% ($P<0.05$)。值得注意的是，稻壳炭 10 cm 处理的湿润峰接近 30 cm 裸土层时，其湿润锋运移深度曲线明显变缓，湿润峰运移速率降低。混施秸秆炭可抑制湿润锋运移，秸秆炭 10 cm 处理的抑制作用最强，湿润峰在整个土柱的平均运移速率较裸土减少 18.8%，触底时间较裸土增加 28% ($P<0.05$)；秸秆炭 20 cm 处理平均运移速率较裸土减少 12.5%，触底时间较裸土增加 16% ($P<0.05$)。混施竹炭后，湿润锋运移过程与对照基本一致，湿润峰触底时间与对照差异不显著。

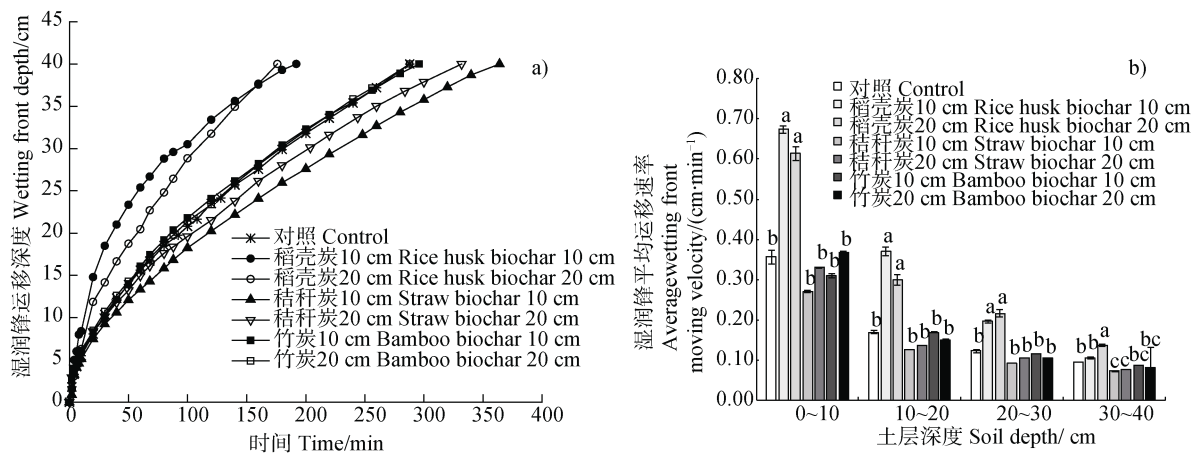
为进一步分析各处理湿润锋在不同深度土层时的运移情况，对湿润锋在不同深度土层的平均运移速率变化进行了统计，结果如图 1b 所示。从图中可以看出，各处理湿润锋平均运移速率随着运移深度增加而呈现减小趋势。湿润峰介于 0~10 cm 土层时，稻壳炭 10 cm 处理的平均运移速率最大，达到

表 3 生物质炭类型与混施深度对各因素的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA of kind and incorporation depth of biochar with different factors

影响因素 Influencing factors	湿润锋触底时间 Wetting front bottoming time/min	累积入渗量 Cumulative infiltration/cm	累积渗漏量 Cumulative leakage/mL	全氮累积流失量 Cumulative total nitrogen loss/mg	全磷累积流失量 Cumulative total phosphorus loss/mg
生物质炭类型 ^①	77.87**	44.34**	19.05**	337.5**	66.83**
混施深度 ^②	1.67 n.s.	0.56 n.s.	0.23 n.s.	11.12**	0.31 n.s.
生物质炭类型×混施深度 ^③	2.16 n.s.	0.65 n.s.	15.93**	34.44**	2.74 n.s.

注: **表示 $P < 0.01$ 水平上差异显著; n.s. 表示不显著。Note: ** means significant difference at 0.01 level; n.s. means non-significant difference. ① Kind of biochar, ② Incorporation depth, ③ Biochar kind × incorporation depth.



注: 不同小写字母表示在同一土层中, 不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the same soil layer among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 各处理湿润锋深度 (a) 与湿润锋平均运移速率 (b) 变化

Fig. 1 Dynamics of wetting front in depth (a) and average moving velocity (b) relative to treatment

$0.67 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, 高出对照 86.1% ($P < 0.05$), 稻壳炭 20 cm 处理次之, 平均运移速率高出对照 69.4% ($P < 0.05$); 在 10~40 cm 土层时, 稻壳炭 10 cm 处理湿润锋运移速率急剧减小, 并在 20~40 cm 土层时平均速率降至小于稻壳炭 20 cm 处理, 最终在 30~40 cm 裸土层时湿润锋平均速率降低至与对照无显著差异, 整个过程湿润锋速率减小幅度达 83.6%。稻壳炭 20 cm 处理在整个过程中湿润锋速率的减小幅度达 77.0%, 但最终在 30~40 cm 土层时, 其湿润锋平均速率显著大于对照 ($P < 0.05$)。混施秸秆炭处理在 30~40 cm 土层的湿润锋运移速度显著低于对照。混施竹炭对各土层湿润锋运移速率影响较小, 与对照的差异不显著。

2.2 生物质炭种类与混施深度对入渗过程的影响
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^[20]。在 180 min 时, 稻壳炭 20 cm 处理湿润锋已最先触底, 因此选择对 180 min 前累积入渗量进行分析, 此时各处理湿润锋均位于 20~40 cm 裸土层。由表 3 可知, 生物质炭类型对累积入渗量有显著影响。各处理累积入渗量随时间变化过程如图 2a 所示。由图可知, 随时间推移, 各处理累积入渗量上升趋势逐渐减缓, 入渗速率逐渐减小, 与湿润锋曲线变化趋势类似。与对照相比 ($t = 180 \text{ min}$), 稻壳炭 10 cm 与 20 cm 处理在整个入渗过程可显著提高入渗速率, 增加累积入渗量 ($P < 0.05$), 累积入渗量分别较裸土增加 14% 和 24%。玉米秸秆炭 10 cm 与 20 cm 处理可显著降低入渗速率, 减少累积入渗量 ($P < 0.05$), 累积入渗量分别较裸土减少 27%、26%。竹炭 10 cm、20 cm 处理的累积入渗量与对照差异不显著 ($P > 0.05$)。

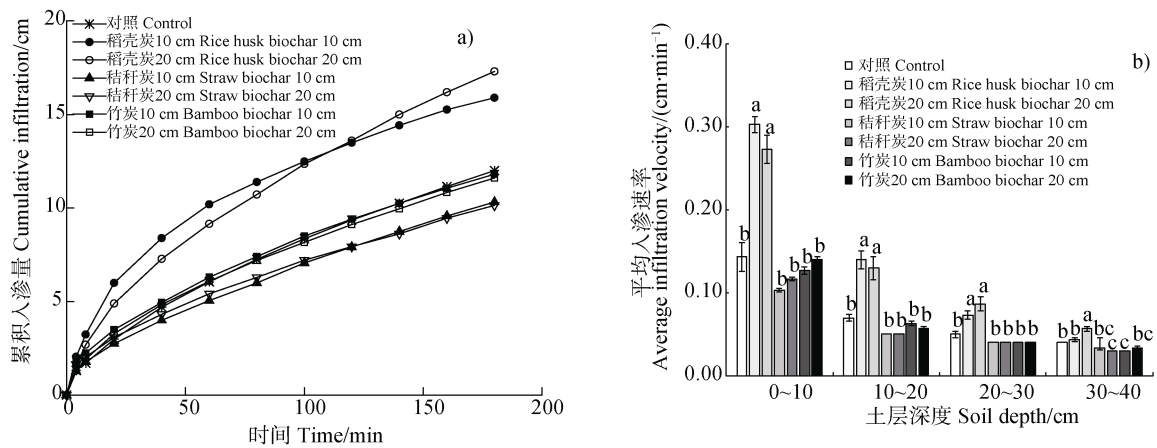


图 2 各处理累积入渗量 (a) 及平均入渗速率 (b) 变化

Fig. 2 Dynamics of cumulative infiltration (a) and average velocity (b) relative to treatment

为进一步探究各处理在不同深度土层的入渗情况, 对各处理湿润峰到达不同土层时的平均入渗速率变化进行了统计, 结果如图 2b) 所示。由图可知, 随着土层深度增加, 各处理平均入渗速率呈降低趋势。混施稻壳炭显著促进了炭-土层水分入渗 ($P < 0.05$), 稻壳炭 10 cm 与 20 cm 处理在 0~10 cm 土层的平均入渗速率分别高出对照 112%、91%。与湿润锋平均速率特征相似, 稻壳炭 10 cm 处理在炭-土层时平均入渗速率最大, 之后急剧下降, 在运移至 20~40 cm 土层时, 其平均入渗速率降至小于稻壳炭 20 cm, 且在 30~40 cm 土层入渗速率降至与对照无显著差异, 整个过程入渗速率下降幅度达到 86%。稻壳炭 20 cm 处理在整个过程入渗速率的减小幅度达 79.3%, 但最终在 30~40 cm 土层时, 其平均入渗速率显著高于对照 ($P < 0.05$)。秸秆炭 20 cm 处理在 30~40 cm 土层时, 平均入渗速率显著低于对照 ($P < 0.05$)。竹炭 10 cm、20 cm 处理在整个土柱平均入渗速率与对照差异较小。上述结果表明, 各处理入渗过程与湿润锋运移过程特征类似, 混施稻壳炭能显著促进水分入渗, 其中稻壳炭 10 cm 处理对上层 0~10 cm 土层入渗促进作用最大, 之后入渗速率急剧降低, 对 20~40 cm 土层入渗促进能力不如稻壳炭 20 cm 处理。秸秆炭 20 cm 处理对 30~40 cm 土层的水分入渗速率显著低于对照。混施竹炭对整个土柱水分入渗的影响不明显。

2.3 生物质炭种类与混施深度对水分渗漏的影响

当水分入渗至土柱基本饱和后, 水分开始渗漏出土柱, 渗漏是土壤和养分流失的途径之一, 根据土柱饱和后的稳定渗透速率可得到整个土柱饱和导

水率。由表 3 可知, 生物质炭类型及其与混施深度的交互作用对水分累积渗漏量有显著影响。各处理从湿润峰触底至土柱饱和, 经历的时间由大到小依次为: 秸秆炭 20 cm (41 min)、竹炭 20 cm (29 min)、竹炭 10 cm (28 min)、秸秆炭 10 cm (27 min)、稻壳炭 10 cm (18 min)、对照 (17 min)、稻壳炭 20 cm (12 min)。从渗漏阶段开始记录, 各处理累积渗漏变化过程与渗漏稳定后的饱和导水率比较如图 3 所示。由图 3a 可以看出, 各处理累积渗漏量随时间变化过程具有一定的线性特征, 渗漏速率有差异, 100 min 后各处理渗漏速率基本稳定。与对照相比 ($t = 240$ min), 仅稻壳炭 20 cm 处理对水分渗漏有促进作用, 渗漏速率在整个过程大于其他处理, 且饱和导水率与累积渗漏量显著高于对照 ($P < 0.05$), 累积渗漏量高出对照 34.0%; 而稻壳炭 10 cm 处理对水分渗漏影响不明显。秸秆炭 10 cm 与 20 cm 处理的渗漏速率小于对照, 对水分渗漏有抑制作用, 累积渗漏量分别低于对照 10.0%、31.0%, 其中秸秆炭 20 cm 处理抑制水分渗漏作用更大, 使饱和导水率显著降低 ($P < 0.05$)。竹炭 20 cm 处理能抑制水分渗漏过程, 累积渗漏量低于对照 13.0%, 且竹炭 20 cm 处理的饱和导水率显著低于对照 ($P < 0.05$)。

2.4 生物质炭种类与混施深度对氮、磷流失的影响

水分经过土壤和生物质炭后, 氮素、磷素随着水分渗漏而逐渐流失, TN 与 TP 流失量由水分渗漏量和渗漏液中 TN 与 TP 浓度所共同决定。由表 3 可知, 生物质炭类型、混施深度及两者交互作用对全氮流失量有显著影响。图 4 为各处理从渗漏过程开

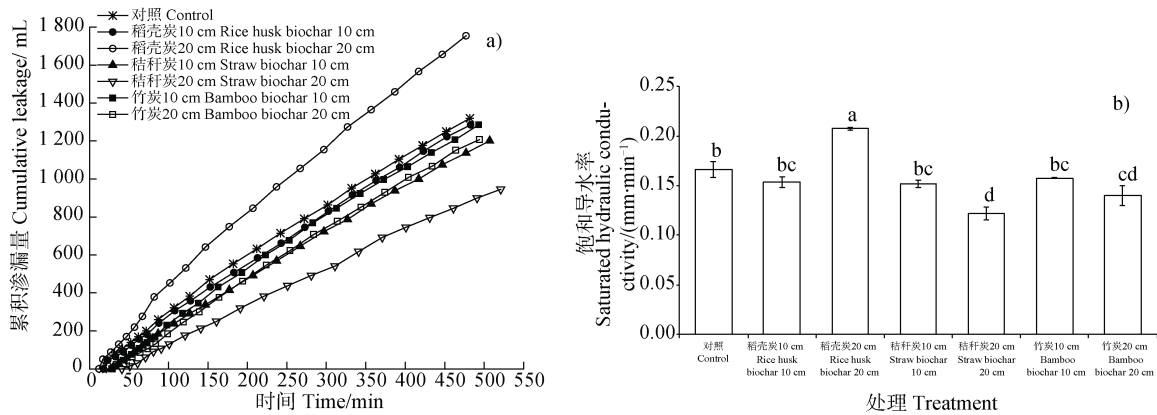


图3 各处理累积渗漏过程 (a) 与饱和导水率 (b) 比较

Fig. 3 Comparison between treatments in cumulative leakage process (a) and saturated hydraulic conductivity (b)

始时 TN 和 TP 累积流失量随时间的变化情况。从图中可以看出,在渗漏至 100 min 前,各处理 TN、TP 累积流失量增加速度较快,100 min 后累积流失量增加速度减缓。图 4a 显示,渗漏至 465 min 时,裸土对照的 TN 累积流失量为 31.40 mg,混施稻壳炭后, TN 累积流失量显著高于对照 ($P<0.05$),稻壳炭 10 cm 和 20 cm 处理的 TN 累积流失量分别高出对照 60.89 mg、102.6 mg。混施秸秆炭后 TN 累积流失量与对照差异不明显。竹炭 10 cm 处理 TN 流失量与对照差异不明显,而竹炭 20 cm 处理的 TN 流失量显著低于对照 ($P<0.05$),较对照减少 57.0%。

由表 3 可知,生物质炭类型对全磷流失量有显著影响。图 4b) 显示,渗漏至 465 min 时,稻壳炭 10 cm 和稻壳炭 20 cm 的 TP 累积流失量分别低于对照 26%、42%,其中稻壳炭 20 cm 处理与对照差异显著 ($P<0.05$); 秸秆炭 10 cm 和秸秆炭 20 cm 处理的 TP 累积流失量分别低于对照 32%、53%,其中秸

秆炭 20 cm 处理与对照差异显著 ($P<0.05$)。竹炭 10 cm、20 cm 处理下的 TP 累积流失量均显著高于对照 ($P<0.05$),分别高出对照 0.10 mg、0.14 mg,尽管其渗漏量低于对照。

3 讨论

土壤层状结构的改变会对土壤水分运移过程产生影响,生物质炭的种类以及混施深度差异在不同程度上改变了土层结构和土壤理化性质,使土壤以双层或多层的结构存在^[17]。生物质炭对土壤水分入参与固持能力的影响存在较大差异,这是土壤与生物质炭之间诸多理化作用的结果^[18]。

生物质炭施入土壤后主要从三个方面影响土壤水分运移:一是生物质炭较低的堆积密度和较大的粒径会对土壤的物理结构特性产生直接影响,如降低土壤容重,改变孔隙状况,从而影响水分运移^[21]。

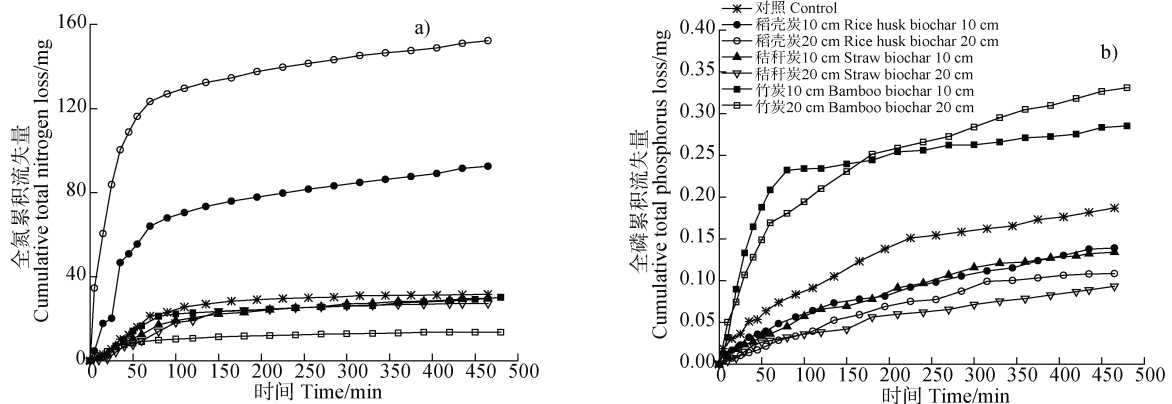


图4 各处理全氮 (a) 和全磷 (b) 累积流失量变化

Fig. 4 Dynamics of cumulative TN (a) and TP (b) losses relative to treatment

二是生物质炭本身特性的影响，其在制备过程中易在表面形成许多不同大小的孔隙，孔隙部分被烧蚀后易形成羧基、羟基、内酯基等含氧官能团，使生物质炭具有一定的极性，拥有良好的亲水性，加上生物质炭表面孔隙使比表面积增大，从而增强生物质炭对土壤水分的吸持能力，吸附能力越强，土壤的导水能力就越弱，抑制水分运移^[18]。但有学者^[22]认为，生物质炭本身通常含有疏水性官能团，且生物质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，而本研究中供试生物质炭均无斥水性。三是生物质炭颗粒对土壤孔隙的堵塞作用，可增大水分通道的曲折度，从而抑制水分运移^[23]。

3.1 入渗过程的影响因素

在本研究中，仅混施稻壳炭对水分入渗有显著的促进作用（图 2a），究其原因，由表 2 可知，稻壳炭与土壤混合后容重减小程度最大，仅稻壳炭显著增加了土壤总孔隙度、毛管孔隙度与饱和含水量。李卓等^[20]通过试验发现容重对入渗能力的影响本质上是通过对大孔隙数量的影响实现，随容重的逐渐增大，大孔隙含量呈下降趋势。这意味着混施稻壳炭后，土壤大孔隙含量增加程度最大。吴继强等^[24]研究表明，大孔隙的存在对水分入渗的优先迁移作用十分显著。另一方面，稻壳炭的比表面积和总孔体积小于玉米秸秆炭和竹炭，导致混施稻壳炭对水分吸附能力的增加作用不如大孔隙对导水能力的提升作用。稻壳炭 10 cm 处理在 10~40 cm 裸土层入渗速率急剧下降，该现象一定程度上与王艳阳等^[17]的研究结果一致，由于混施稻壳炭增大了土壤的孔隙度，所以上层炭-土混合层的入渗率高，到均质土层时入渗速率急剧下降，在炭-土交界面之上形成滞水层。稻壳炭 20 cm 处理对 0~20 cm 土层入渗的促进作用不及稻壳炭 10 cm 处理，而对 20~40 cm 土层入渗促进作用超过稻壳炭 10 cm 处理（图 2b），主要原因可能是稻壳炭混施深度增加，导致 10~20 cm 土层孔隙更多，而入渗初期孔隙中的空气对水分运移有一定的抑制作用，随着水分逐渐填满炭-土层孔隙，大孔隙对水分入渗的促进作用增强。

由图 1a 和图 2a 可知秸秆炭对水分入渗的抑制能力最强，原因之一在于秸秆炭比表面积与总孔体积大于稻壳炭与竹炭（表 1），其比表面积大、多孔的特性所主导的吸附能力增加作用更显著。且施用秸秆炭对土壤总孔隙度影响不显著，但显著降低了

饱和含水量（表 2），因此孔隙度导水能力较小。另一方面，生物质炭颗粒粒径对入渗能力也有影响，有学者^[12]将通过 63 μm 筛的芒果木炭与土壤混合进行入渗模拟，发现添加生物质炭后形成了更小的孔隙，抑制了入渗。齐瑞鹏等^[21]通过模拟土柱入渗，发现在一定条件下累积入渗量随生物质炭粒径的减小呈递减趋势。相关研究^[25]发现，仅有 1~5 mm 生物质炭可显著降低壤质砂土容重和增加总孔隙率。从表 1 可以看出，仅秸秆炭不含大于 1 mm 粒径的颗粒，导致秸秆炭对大孔隙含量的提升作用较小，不能显著影响土壤总孔隙度。肖茜等^[26]将秸秆炭与土壤混施并模拟入渗，发现添加秸秆炭能减少入渗量，减缓湿润锋运移，与本研究图 1a、图 2a 中混施秸秆炭结果类似。混施竹炭对土壤总孔隙度和饱和含水量提升作用小于稻壳炭，而比表面积与总孔体积小于秸秆炭，因此，竹炭导水作用和吸附水分能力处于稻壳炭和秸秆炭之间，导致其对水分入渗影响较小。综合而言，本研究中生物质炭对土壤孔隙的改变、生物质炭比表面积和粒径分布可共同影响土壤水分入渗特性。

3.2 水分渗漏的影响因素

土柱饱和后，生物质炭对土壤水分渗漏和固持特征也有影响。张一璇等^[27]对不同林分类型的土壤饱和导水率进行了研究，发现饱和导水率与饱和含水量呈极显著正相关，与容重表现为极显著负相关关系，而与毛管孔隙度和非毛管孔隙度相关性较小。杨坤等^[28]发现大孔隙密度与饱和导水率呈显著正相关关系，控制土壤水分垂直运移。李叶鑫等^[29]通过试验发现紫色丘陵区弃土弃渣下垫面渗透性能与容重呈显著负相关，与总孔隙度、非毛管孔隙度呈显著正相关。在本研究中，仅施用稻壳炭能显著增加土壤饱和含水量与总孔隙度，因此，稻壳炭 20 cm 处理显著提高了饱和导水率和渗漏量（图 3）。土壤所吸持的水分包含两部分：颗粒物的分子引力引起所吸持的水分和土壤孔隙中毛管引力所吸持的水分^[30]。施用稻壳炭同时也使土壤毛管孔隙度与比表面积增大，稻壳炭 10 cm 处理由于混施深度更小，孔隙含量低于稻壳炭 20 cm 处理，渗漏过程中对水分的吸持作用与孔隙的导水作用结合，导致其饱和导水率和渗漏量与对照差异较小（图 3）。由于秸秆炭使土壤饱和含水量降低，加上较大的比表面积对土壤持水强度具有促进作用^[30]，能显著减少渗漏。混施深度增

加, 渗漏量和饱和导水率进一步减少(图3)。综合而言, 本研究中生物质炭主要通过总孔隙度、饱和含水量影响饱和导水率, 水分固持作用主要受毛管孔隙度和比表面积影响。

3.3 氮、磷流失的影响因素

在养分流失方面, 不同种类生物质炭比表面积与电荷基团特性不同, 导致其对养分的吸附作用有差异^[31]。彭启超等^[32]研究了三种不同原料生物质炭对氮、磷的吸附特性, 发现生物质炭对氮的吸附方式主要为物理性吸附, 对磷的吸附作用主要为化学性吸附。由于稻壳炭比表面积及总孔体积小于秸秆炭和竹炭, 对氮素的物理性吸附能力弱, 且稻壳炭本身的氮素随水分渗漏, 导致其渗漏液中 TN 浓度较大, 使 TN 流失量增加, 而稻壳炭对磷素有一定的吸附作用(图4)。混施秸秆炭也有利于减少磷素流失; 混施竹炭会使 TP 流失量增加。不同类型的生物质炭对不同土壤氮、磷流失影响差异较大, 而生物质炭对氮、磷的吸附机制十分复杂, 尚需在下一步工作中开展研究。

本研究采用的紫色土质地较粗, 黏粒含量较低, 但紫色土土层较薄, 有机质含量低, 研究地区夏季降雨较频繁, 遇强降雨容易产生地表径流, 加剧土壤侵蚀与面源污染。稻壳炭 10 cm 处理对炭-土层水分入渗的促进作用最大, 能有效减少地表径流, 同时增大饱和含水量, 减少磷素流失, 适合在田间开展进一步研究, 更适用于黏土地区, 田间应用时需注意混施稻壳炭会增加 TN 流失量, 应控制氮肥的投入。稻壳炭 20 cm 处理尽管能促进入渗, 但对水分渗漏也有促进作用, 使 TN 流失量更大, 且成本较稻壳炭 10 cm 处理高, 不适合实际应用。混施秸秆炭对水分入渗与渗漏过程的抑制作用较大, 其中秸秆炭 20 cm 处理抑制渗漏作用最大, 能减少 TP 流失, 适用于砂土等透水性强的土壤。竹炭对水分运移影响不如稻壳炭与秸秆炭, 且增加了 TP 流失, 不适合实际应用。

4 结 论

生物质炭比表面积和粒径分布以及对土壤孔隙结构的改变可共同影响土壤水分运移。本研究中, 混施生物质炭使土壤容重降低, 其中稻壳炭降低幅度最大, 且能显著提高总孔隙度与饱和含水量。混

施稻壳炭能促进水分入渗, 其中稻壳炭 10 cm 处理对炭-土层入渗的促进作用最大, 土柱饱和后对渗漏影响较小; 而稻壳炭 20 cm 处理能增加渗漏量。玉米秸秆炭比表面积与总孔体积最大, 吸持水分能力强, 且不含大于 1 mm 粒径的颗粒, 混施后使饱和含水量显著降低, 水分运移速度减缓, 其中秸秆炭 20 cm 处理能显著降低饱和导水率。混施竹炭对水分入渗过程影响不明显, 竹炭 20 cm 处理能降低饱和导水率。混施稻壳炭会增加 TN 流失量, 混施秸秆炭能减少 TP 流失量, 混施竹炭对氮素有一定吸附作用, 但明显增加了 TP 流失量。总体而言, 在田间应用时, 可选择将稻壳炭混入 0~10 cm 土层, 能提高饱和含水量, 减少地表径流和磷素流失, 但应控制氮肥的投入。秸秆炭混施于 0~20 cm 土层适用于砂土等透水性强的土壤。

参考文献 (References)

- [1] Li X Y, Li Z X, Wang T W, et al. Rock interbed containment effect on infiltration processes in purple soil regions[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 662—669. [李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 662—669.]
- [2] Wang X Y, Li Z X, Cai C F. Hydrological processes on sloped farmland in purple soil regions with rock fragment cover[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 38—45. [王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 38—45.]
- [3] Li X P, Sun Y, Shi X J. Characteristics of phosphorus leaching and its impact on groundwater in purple paddy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(9): 1832—1838. [李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(9): 1832—1838.]
- [4] Zhang J, Yi J, Liu M X, et al. Characteristics of soil water percolation and conservation in different aged paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 90—95. [张君, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分渗漏与保持特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 90—95.]
- [5] He Y R. Purple soils in China (II) [M]. Beijing: Science Press, 2003: 42—43. [何毓蓉. 中国紫色土 (II) [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 42—43.]
- [6] Lou Y B, Shi D M, Jiang N, et al. Effects of soil erosion on soil moisture and infiltration characteristics of slope farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1399—1410. [娄义宝, 史东梅, 江娜, 等. 土壤侵蚀对

- 坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1399—1410.]
- [7] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management[M]. London: Earthscan, 2009: 271—287.
- [8] Wu Y, Xu G, Lü Y C, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 68—79. [武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68—79.]
- [9] Wang F H, Huang R, Gao M, et al. Effect of combined application of biochar and straw on organic carbon content in purple soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 929—939. [王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 929—939.]
- [10] Jiang X Y, Zhang Q Q, Shen H J, et al. Effects of biochar on soil aggregate stability and microbial community in paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1564—1573. [蒋雪洋, 张前前, 沈浩杰, 等. 生物质炭对稻田土壤团聚体稳定性和微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1564—1573.]
- [11] Wang H L, Tang X Y, Zhang W, et al. Effects of biochar application on tilth soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 107—112. [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.]
- [12] Villagra-Mendoza K, Horn R. Changes in water infiltration after simulated wetting and drying periods in two biochar amendments[J]. *Soil Systems*, 2019, 3(4): 63.
- [13] Wang S, Wang Z F, Long Y, et al. Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2406—2415. [王舒, 王子芳, 龙翼, 等. 生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2406—2415.]
- [14] Wu Y, Liu H, Yang A Z, et al. Influences of biochar supply on water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 287—294. [吴昱, 刘慧, 杨爱峥, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 287—294.]
- [15] Zhang Y, Li H H, He X S, et al. Effect of different external materials on the leaching and movement characteristics of soil phosphorus[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(5): 151—156, 222. [张一, 李厚华, 何绪生, 等. 不同外源添加物质对土壤磷素淋溶和迁移特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 151—156, 222.]
- [16] Song B, Sun R R, Liang H X, et al. Effects of lignin and biochar addition on soil nitrogen and phosphorus nutrients and water loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 227—232, 241. [宋彬, 孙茹茹, 梁宏旭, 等. 添加木质素和生物炭对土壤氮、磷养分及水分损失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 227—232, 241.]
- [17] Wang Y Y, Wei Y X, Sun J P, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 113—119. [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.]
- [18] Li S L, Wang X, Wang S, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 135—144. [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.]
- [19] Institute of Soil Science, CAS. Analysis of soil physicochemical properties[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978. [中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.]
- [20] Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(6): 40—45. [李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40—45.]
- [21] Qi R P, Zhang L, Yan Y H, 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. [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.]
- [22] Ahmad M, Lee S S, Dou X M, 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.
- [23] Verheijen F G A, Jeffery S, Bastos A, et al. Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions[M]. Luxembourg: European Commission Publication Office, 2010.
- [24] Wu J Q, Zhang J F, Gao R. Physical simulation experiments of effects of macropores on soil water infiltration characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10): 13—18. [吴继强, 张建丰, 高瑞. 大孔隙对土壤水分入

- 渗特性影响的物理模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (10): 13—18.]
- [25] Obia A, Mulder J, Martinsen V, et al. *In situ* effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 35—44.
- [26] Xiao Q, Zhang H P, Shen Y F, 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, 2015, 31 (16): 128—134. [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.]
- [27] Zhang Y X, Shi C Q, Yang H, et al. Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of guanting reservoir in Yongding River Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (18): 6681—6689. [张一璇, 史常青, 杨浩, 等. 永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和导水率研究[J]. 生态学报, 2019, 39 (18): 6681—6689.]
- [28] Yang K, Zhao Y Y, Wang K Q, et al. Effects of planting Pu'er tea on macropores in typical red soil in south of Yunnan[J]. Soils, 2019, 51 (3): 586—593. [杨坤, 赵洋毅, 王克勤, 等. 普洱茶种植对滇南红壤大孔隙的影响[J]. 土壤, 2019, 51 (3): 586—593.]
- [29] Li Y X, Guo H Z, Shi D M, et al. Infiltration characteristics and its influencing factors of different underlying surfaces from disturbed soils in purple hilly area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (5): 1292—1297. [李叶鑫, 郭宏忠, 史东梅, 等. 紫色丘陵区不同弃土弃渣下垫面入渗特征及影响因素[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (5): 1292—1297.]
- [30] Su Y, Zhu J, Wang P, et al. Research progress on soil water holding capacity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29 (14): 140—145. [苏杨, 朱健, 王平, 等. 土壤持水能力研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29 (14): 140—145.]
- [31] Wang Z, Li Y K, Xu Z G, et al. Research progresses in effects of biochar on soil physiochemical properties and nitrogen transformation[J]. Soils, 2019, 51 (5): 835—842. [王湛, 李银坤, 徐志刚, 等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. 土壤, 2019, 51 (5): 835—842.]
- [32] Peng Q C, Liu X H, Luo P Y, et al. Absorption and desorption characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium by biochars from different raw materials[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25 (10): 1763—1772. [彭启超, 刘小华, 罗培宇, 等. 不同原料生物炭对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (10): 1763—1772.]

(责任编辑: 陈荣府)