

生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响

肖茜^{1,2}, 张洪培^{1,3}, 沈玉芳^{1,3*}, 李世清^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 为了揭示生物炭对黄土区不同质地土壤水分入渗、蒸发特性及硝态氮淋溶的影响规律及差异, 该研究选取黄土区 3 种典型土壤 (风沙土、黄绵土和黑垆土), 设置质量分数 0、0.5%、1%、2%、3% 和 5% 共 6 个比例的生物炭梯度, 进行室内土柱模拟试验。结果表明: 湿润锋进程与累积入渗量受生物炭添加量及土壤质地的影响。随着生物炭添加量的增大, 风沙土和黑垆土的水分入渗速度和累积入渗量逐渐降低 ($P<0.05$); 黄绵土水分入渗和累积入渗量呈先增大后减缓的趋势 ($P<0.05$)。生物炭未显著影响试验条件下黄绵土和黑垆土的累积蒸发量 (30 d), 但显著改变了风沙土的蒸发特征, 抑制前期蒸发。不同生物炭添加量下, 3 种土壤的湿润锋运移距离与运移时间均符合幂函数关系; Philip 入渗模型可描述添加生物炭土壤水分入渗变化过程。生物炭可减少黄土区 3 种质地土壤的硝态氮淋溶量, 表明适量生物炭添加能够增强土壤氮素固持能力, 降低硝态氮淋失及环境风险。该研究结果表明, 生物炭作为一种土壤改良剂能够提高土壤持水性和降低硝态氮淋失, 有利于黄土高原旱地作物的生长; 同时该研究可为农田选择合理生物炭施用量提供科学参考。

关键词: 土壤; 水分; 蒸发; 生物炭; 土壤质地; 入渗; 硝态氮淋溶

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.018

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0128-07

肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 李世清. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.018 http://www.tcsae.org

Xiao Qian, Zhang Hongpei, Shen Yufang, Li Shiqing. 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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.018 http://www.tcsae.org

0 引言

水资源紧缺和土壤肥力低下是影响黄土高原旱作区农业高产稳产的主要因素^[1-2]。田间土壤的水分入渗过程和蒸发特性决定着土壤对降雨和灌溉水的有效利用程度, 也决定着地表径流、土壤侵蚀程度^[3-4], 从而影响作物根区的水分分布和对水分的有效利用程度, 最终影响作物生长状况与产量。如何通过添加改良剂改善土壤结构, 增加降雨入渗, 调节土壤肥力状况, 提高土壤的水氮有效利用程度^[5-6], 是旱区备受关注的重要课题。

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一类高度芳香化的难溶性固态物质^[7], 具有较大的比表面积、高度发达的孔隙结构及较强的离子吸附交换能力^[8]。研究表明, 生物炭可作为一种新型土壤改良剂^[9-10], 施入土壤能够降低土壤容重^[11-12], 增大土壤孔隙度^[13], 改变土壤团聚体特性^[14-15], 进而影响土壤持水

能力与水分入渗特征^[16-17]。Dugan 等^[18]研究发现木屑和秸秆生物炭可提高土壤的持水能力, 但不同添加量间差异不显著。田丹^[19]进行的室内水平土柱试验结果却表明, 添加 0.05 和 0.1 g/g 花生炭降低粉砂壤土的持水, 而 0.15 g/g 增加其持水。齐瑞鹏等^[17]采用室内土柱模拟试验, 发现生物炭能够明显增加壤土入渗能力, 降低风沙土入渗能力。因此, 不同的生物炭及其添加量对不同质地土壤水分特性的影响差异显著。

氮素淋溶是目前造成农田土壤氮损失的主要途径之一^[20], 影响着氮肥利用率的提高, 造成资源浪费, 引起大气污染和地下水体富营养化等环境问题^[21]。探索减少农田氮淋溶损失的方法对于提高氮肥利用率和保护生态环境具有重要意义。已有研究表明, 生物炭影响土壤硝态氮、铵态氮和总氮的淋失^[22-25]。Güereña 等^[26]通过田间示踪研究表明, 向温带农田土壤中添加生物炭可增加对肥料中氮的贮留。Yao 等^[27]将花生壳炭和阔叶树炭添加砂质土壤后, 发现添加 2% 生物炭后, 土壤硝态氮淋溶量分别降低 14.4% 和 34.7%。杨放等^[28]也发现向盐碱土添加生物炭能明显减少硝态氮和总氮淋失, 增强土壤的持续供氮能力。因此, 生物炭施入土壤后可能会对氮素养分具有一定的持留效应, 提高氮肥利用, 减少土壤氮素损失。但不同生物炭由于生物质来源、工艺和热解温度等差异, 使其具有不同的理化特性, 对不同土壤中氮素的行为影响不一。

目前不同生物炭添加量对黄土区旱地不同质地农田

收稿日期: 2015-06-29 修订日期: 2015-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(51279197, 50809068); 中央高校基本科研业务费专项 (YQ2013009); 杨凌示范区科技计划项目 (2014NY-30)。

作者简介: 肖茜, 女, 山西运城人, 博士生, 主要从事农田土壤-作物生态效应评价研究。杨凌 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: xiaoqian074@126.com

*通信作者: 沈玉芳, 女, 江苏建湖人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤-植物系统水分养分动态过程研究。杨凌 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: shenyufang@nwsuaf.edu.cn

土壤水分入渗过程、蒸发特性及氮素淋溶影响的定量比较研究并不多见。本研究基于室内定容重土柱模拟试验, 研究黄土高原 3 种主要质地土壤添加玉米秸秆生物炭后, 土壤入渗性能、蒸发特性和硝态氮淋溶特征, 旨在为揭示黄土区旱地农田表层添加生物炭后的土壤水氮运移规律提供科学依据, 也可为黄土区土壤改良提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和生物炭

土柱试验在西北农林科技大学国家重点实验室干旱大厅进行。3 种供试土壤分别采自陕西神木(风沙土),

陕西安塞(黄绵土)和陕西长武(黑垆土)。土壤采用 Z 形采样方法分层采集, 采样深度均为 0~20 cm 和 ≥20~40 cm。土样经去除杂质后, 自然风干, 碾压过 2 mm 筛备用。用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测定土壤的颗粒组成。试验用生物炭材料来自河南商丘三利新能源有限公司, 采用连续竖式生物炭化炉生产, 其原料是玉米秸秆, 炭化温度 400℃。生物炭研磨后过 2 mm 筛, 采用液氮静态吸附-BET (brunauer-emmett-teller equation) 法测定比表面积 53.03 m²/g, 硝态氮质量分数 1.60 mg/kg, 铵态氮质量分数 1.11 mg/kg。供试 0~20 cm 土壤和生物炭的基本性质见表 1。

表 1 供试 3 种土壤 (0~20 cm) 和生物炭的基本性质
Table 1 Properties of three experimental soils (0-20 cm) and biochar

土壤类型 Soil type	粒径分布 Particle size distribution/%			土壤质地 Soil texture	土壤容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)
	≥0.02~2 mm	≥0.002~0.02 mm	<0.002 mm			
风沙土 Aeolian soil	97.33	1.52	1.14	砂土	1.64	0.06
黄绵土 Cultivated loessial soil	60.74	24.54	14.71	砂质壤土	1.46	0.36
黑垆土 Dark loessial soil	41.87	36.34	21.79	黏壤土	1.38	1.01
生物炭 Biochar	77.76	18.78	3.46		0.40	9.77

注: 按照国际制土壤分级标准。

Note: According to the international soil classification system.

1.2 试验设计与方法

试验共设 6 个生物炭梯度, 即将生物炭与处理好的 0~20 cm 供试土样按添加质量比例 0、0.5%、1%、2%、3% 和 5% 充分混合。试验共 18 个处理, 每处理重复 3 次。试验选用内径 10 cm, 高 50 cm 的透明有机玻璃柱进行, 装土前在土柱底部放置两层 40 目尼龙网和一层滤纸, 防止土样颗粒流失并利于管内通气排气。将风沙土, 黄绵土和黑垆土分别按照田间采样原状土容重 1.64, 1.46 和 1.38 g/cm³ 分层 (每层 5 cm) 均匀填装, 分层界面处刨毛。试验装土高为 40 cm, 土柱下层 ≥20~40 cm 为原土层土样 (未与生物炭混合), 上层 0~20 cm 为生物炭均匀混合土样 (0~5 cm 土层添加 225 kg/hm² (以 N 计) 硝酸铵, 充分混合)。

采用一维定水头垂直积水入渗法测定土壤入渗性状。入渗装置由土柱和马氏瓶组成, 水头均控制为 1cm, 入渗过程中观测马氏瓶水位和垂直湿润锋深度随入渗时间的变化。待入渗至各处理土柱饱和后, 用烧杯收集相同时间内的淋溶液, 采用连续流动分析仪测定淋溶液中硝态氮含量。入渗和淋溶试验结束后, 将所有土柱放入人工气候室中测定其在一定环境下的蒸发, 控制温度为 30℃, 相对湿度保持在 50%±2%, 早上 8 点到下午 6 点开启光照, 每天早上 10:00 用电子秤称量土壤蒸发水分损失量, 蒸发过程持续 30 d。各处理的日蒸发量计算公式为:

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

式中: E 为土柱的日蒸发量, mm; $M_{\text{差}}$ 为前后两天称量土柱的差值, 即土柱的日质量变化值, g; r 为土柱的半径, cm。

1.3 数据处理与分析

所有试验数据均为 3 次重复的平均值, 采用

SigmaPlot10.0 软件作图, SPSS19.0 和 STATISTICA 10.0 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 生物炭对不同质地土壤水分入渗过程和蒸发特性的影响

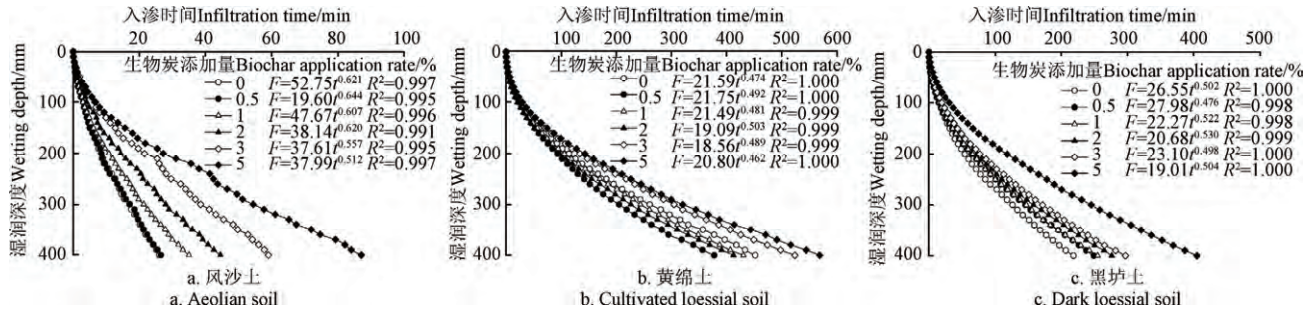
2.1.1 生物炭对湿润锋运移的影响

土壤水分下渗过程中, 湿润区前端与干土层形成的明显交界面称作湿润锋^[29], 可表征水分在土壤基质吸力和重力作用下的运动特征。从图 1 可以看出, 试验 3 种土壤的湿润锋一维垂向运动均随入渗时间逐渐增加, 但行进至土柱底部 (40 cm 深度) 所用时间不同, 未添加生物炭时, 风沙土用时最短 (26 min); 其次为黑垆土, 所用时间为 218 min; 黄绵土湿润锋随时间变化最缓, 行进至 40 cm 深度所用时间最长 (452 min)。

不同生物炭添加量对 3 种土壤的湿润锋进程有明显影响, 但影响趋势因土壤质地而异。随生物炭添加量的增加, 风沙土和黑垆土湿润锋到达 40 cm 深度所需要的时间延长, 0.5%, 1%, 2%, 3%、5% 生物炭处理风沙土所用时间分别为 27、35、45、59、87 min; 黑垆土按照生物炭梯度各处理所用时间依次为 249、255、276、297、405 min。这说明对这两种土壤而言, 适量的生物炭添加均能减缓水分在土体中的下移速度, 增加土壤对水分的吸持。但黄绵土的湿润锋在低生物炭添加量下 (0.5%、1%、2%) 随时间变化加快, 到达 40 cm 深度所需时间减少, 分别为 378、431、435 min, 在高量添加下 (3% 和 5%) 随时间减缓, 到达 40 cm 深度所需时间增加, 分别为 524 和 570 min。这可能与黄绵土的质地和生物炭的颗

粒大小和孔隙特征以及添加量有关,低生物炭添加量下,增大了黄绵土(砂质壤土)大孔隙的比例,促进了水分的入渗,从而增加湿润锋的运移速率;但随生物炭添加量的增加,生物炭的多孔、表面积大的特性所主导的吸水能力增加作用更显著,减缓了水分入渗,从而降低湿润锋的运移速率。

对试验湿润体湿润距离 F (mm) 与入渗时间 t (min) 二者关系进行拟合,发现其符合幂函数: $F=at^b$, 其中 a :



注: F 代表湿润距离, t 代表入渗时间。

Note: F indicated wetting distance, t indicated infiltration time.

图 1 不同生物炭添加量下风沙土、黄绵土和黑垆土湿润锋动态变化

Fig.1 Effects of different biochar application amount on dynamic changes of wetting front in aeolian soil, cultivated loessial soil and dark loessial soil

2.1.2 生物炭对土壤累积入渗量的影响

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^[31]。从图 2 可以看出,生物炭对 3 种不同质地土壤的累积入渗过程均有明显影响,但影响规律不一。其中砂质土壤的保水能力弱,对于砂质含量最高的风沙土效果更为明显。对风沙土,相同水分入渗时间内,随生物炭添加量增加土壤累积入渗量逐渐减少。当入渗时间为 20 min 时,各处理累积入渗量依次表现为未添加生物炭 (105.6 mm) > 0.5% (98.9 mm) > 1% (85.0 mm) > 2% (74.5 mm) > 3% (56.3 mm) > 5% (52.0 mm); 与对照处理相比,高添加量对风沙土累积入渗量减幅显著。对黄绵土,0.5% 和对照处理在入渗初期差异不明显,随入渗时间的推移,0.5% 处理的累积入渗量逐渐高于对照处理。1% 和 2% 处理的累积入渗量随时间变化曲线与对照处理差异不明显。在相同入渗时间内,3% 和 5% 处理的

第 1 个计时单位后的湿润锋的推进距离; b : 湿润锋进程的衰减程度^[30]。图 1 结果表明,3 种土壤模拟的决定系数 R^2 均大于 0.99, 显著性检验 $P < 0.01$, 说明此幂函数能较好地模拟混合生物炭土壤湿润锋的运移规律。在湿润锋与时间变化过程中,随生物炭添加比例的增加,幂指数 b 无明显变化规律,而系数 a 出现减小趋势,这主要是由于生物炭的添加不同程度减缓了初始水分入渗速度,说明生物炭对土壤水分运移速度有比较明显的影响。

累积入渗量显著低于对照处理。对黑垆土,生物炭的添加均减少相同时间内的累积入渗量,但 0.5% 和 1% 处理间的累积入渗量随时间变化曲线无明显差异,其他处理间差异显著。以入渗时间 200 min 为例,0、0.5%、1%、2%、3%、5% 生物炭添加量处理的累积入渗量分别为: 149.3、139.4、141.3、134.9、127.7、108.2 mm,降低累积入渗量达 6.6%~27.5%。由上述结果可知,风沙土和黑垆土的累积入渗量随生物炭添加量的增加而减少,且不同处理间风沙土减幅差异较黑垆土显著;但添加生物炭对黄绵土累积入渗量的影响却表现为低添加量影响不显著甚至增加,而进一步增加生物炭添加量(3%和 5%),土壤累积入渗量开始逐渐减小。黄土区 3 种典型土壤累积入渗的差异可能与土壤物理特性(质地和结构)和生物炭的粒径分布特征与比表面积吸附能力有关;这与高海英等^[10]和田丹^[19]对生物炭添加到不同质地土壤后土壤持水性变化趋势的研究结果相似。

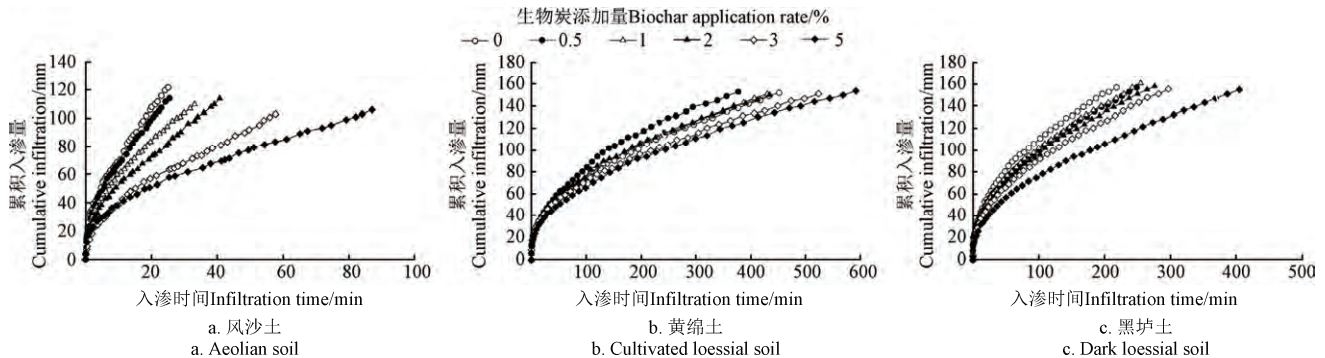


图 2 不同生物炭添加量对风沙土、黄绵土和黑垆土的累积入渗量的影响

Fig.2 Effects of different biochar application amount on cumulative infiltration of aeolian soil, cultivated loessial soil and dark loessial soil

2.1.3 生物炭对土壤入渗参数的影响

本研究为描述生物炭对土壤水分入渗过程的影响, 采用 Philip 入渗模型^[32]对各处理入渗过程的参数进行拟合, 该模型数学表达式如下:

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

式中: $I(t)$ 为累积入渗量, mm; S 为吸渗率, mm/min^{0.5}; A 为稳渗率 (mm/min, 通常小于饱和导水率); t 为入渗时间, min。通过非线性最小二乘法回归拟合及参数的显著性比较可知, 各处理的决定系数 R^2 在 0.991~0.999 之间, 拟合度较好。3 种土壤的吸渗率和稳定入渗率大小表现的规律与累积入渗量规律基本一致, 表明添加生物炭的土壤入渗状况适合 Philip 入渗模型模拟。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; 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^[17,33]。从表 2 可以看出, 风沙土初始入渗率最大, 达到稳定入渗的时间最短, 而且稳渗率也最大。生物炭降低风沙土和黑垆土的吸渗率, 并随着生物炭添加量的增加而降低; 而黄绵土的吸渗率随着生物炭添加量的增加呈现先增加后降低的特点。与未添加处理相比, 低生物炭添加量处理 (0.5%) 未显著改变风沙土的稳渗率, 高生物炭添加量处理则显著降低风沙土的稳渗率; 黑垆土的稳渗率随着生物炭添加量的增加而降低; 而黄绵土的稳渗率随着生物炭添加量的增加呈先增加后降低的特点。综合上述结果, 生物炭可以有效降低风沙土和黑垆土的吸渗率和稳定入渗率, 保持较多的水分在耕层土壤, 有效地改善了风沙土过强的释水性而导致漏水现象; 而对黄绵土, 不同的生物炭添加量对入渗过程的影响不同。因此, 在田间实际应用中, 要发挥生物炭的持水效果, 应根据土壤质地选择合适的添加量或生物炭种类。

表 2 各处理土壤水分入渗模拟参数

Table 2 Soil water infiltration simulation parameters in different treatments

生物炭添加量 Biochar application rate/%	风沙土 Aeolian soil			黄绵土 Cultivated loessial soil			黑垆土 Dark loessial soil		
	吸渗率 Permeability rate/ (mm·min ^{-0.5})	稳渗率 Stable infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	决定系数 determination coefficient R^2	吸渗率 Permeability rate/ (mm·min ^{-0.5})	稳渗率 Stable infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	决定系数 determination coefficient R^2	吸渗率 Permeability rate/ (mm·min ^{-0.5})	稳渗率 Stable infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	决定系数 determination coefficient R^2
0	22.56a	0.238ab	0.993	8.12c	0.053bc	0.996	12.61a	0.146a	0.998
0.5	20.93a	0.265a	0.998	9.26a	0.072a	0.999	11.30b	0.102b	0.995
1	19.84b	0.201c	0.998	8.42bc	0.063ab	0.996	11.29b	0.092c	0.997
2	15.98c	0.182cd	0.995	8.57bc	0.070a	0.999	10.59bc	0.074c	0.996
3	11.84d	0.169cd	0.998	8.01c	0.070a	0.992	9.82c	0.056d	0.997
5	12.37d	0.162d	0.991	7.24d	0.042d	0.996	7.96d	0.022e	0.997

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference at 0.05 level among treatments.

2.1.4 生物炭对土壤蒸发特性的影响

图 3 给出了 3 种土壤添加生物炭后的土壤累积蒸发量随蒸发天数的变化趋势。从 3 图可以看出, 在模拟稳定蒸发条件下, 随着时间的推移, 黑垆土的土壤累积蒸发量最高, 其次为黄绵土, 风沙土最低。对黄绵土和黑垆土, 添加生物炭有增加不同时期累积蒸发量的趋势, 但差异不显著。对风沙土, 添加生物炭改变了土壤的蒸发规律, 表现为显著减少蒸发前期土壤累积蒸发量: 蒸

发 5 d 后, 不同添加处理比对照处理显著减小累积蒸发量 10.4%~17.6% ($P < 0.05$); 蒸发 10 d 后, 显著减小累积蒸发量 9.4%~15.0% ($P < 0.05$); 蒸发 15 d 后, 显著减小累积蒸发量 8.0%~11.0% ($P < 0.05$); 随蒸发时间的推移, 相对百分比数值 ((生物炭处理累积蒸发量-对照处理累积蒸发量)/对照处理累积蒸发量) 逐渐减小, 到 30 d 蒸发试验结束时, 生物炭处理与对照处理间土壤累积蒸发量差异不显著。究其原因可能是蒸发前期, 生物炭较

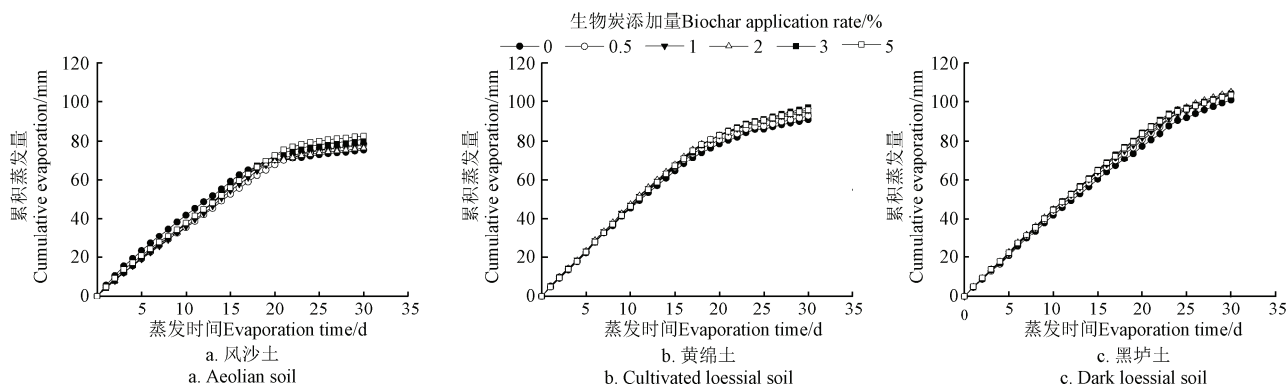


图 3 不同生物炭处理下累积蒸发量与时间的关系

Fig.3 Relationships between soil cumulative evaporation and time under different biochar treatments

强的吸持水分的能力及其对土壤结构的改善,降低了风沙土的蒸发,使添加生物炭处理的日累积蒸发量减小;而蒸发后期,对照处理土壤表层出现干层,且厚度随蒸发日期逐渐增加,降低了其以毛管水向上运动为主的土壤蒸发。总体来说,试验条件下生物炭未显著影响黄绵土和黑垆土的累积蒸发量(30 d);但改变了风沙土的蒸发特征,抑制其前期蒸发;有利于增加旱地作物对风沙土贮存水分的利用^[30]。

2.2 生物炭对不同质地土壤硝态氮淋溶的影响

旱地土壤硝化作用较强,硝态氮难被土壤颗粒吸附,遇降水极易发生淋失。本研究发现生物炭不同程度地减少了试验 3 种质地土壤的淋溶损失体积和土壤硝态氮(NO_3^- -N)淋溶总损失质量(12 h)(图 4)。与对照相比,添加生物炭显著减少风沙土,黄绵土和黑垆土淋溶液体积达 24.8%~78.8%, 7.0%~41.2%和 7.0%~37.7% ($P<0.05$)。与对照相比,0.5%、1%、2%、3%、5% 生物炭处理风沙土的 NO_3^- -N 损失量分别减少 18.1%、20.2%、13.5%、28.7%、37.2%;黄绵土分别减少 37.8%、10.1%、33.8%、74.6%、87.7%;黑垆土分别减少 30.2%、14.7%、13.8%、39.8%、80.8%;这与 Sika 和 Hardie^[34]在施硝酸铵肥料下,添加生物炭显著降低硝态氮淋失的结果一致,表明生物炭的添加对减少黄土区旱地土壤氮素淋溶损失有积极作用。硝态氮的淋溶质量由淋溶液体积和淋溶液中 NO_3^- -N 浓度所共同决定。究其原因,一方面是因为生物炭影响土壤的持水能力(图 2),从而显著减少试验土壤的淋溶体积;另一方面,生物炭发达的孔隙结构和巨大的比表面积也可通过物理和化学吸附作用直接吸附土壤中氮素,减少总 NO_3^- -N 淋溶量。本研究中,添加不同量生物炭对不同质地土壤硝态氮淋溶的减少规律不一:风沙土的降幅为 2%处理最低,黄绵土的降幅为 1%处理最低,而黑垆土的降幅在 1%和 2%处理时均显著低于其他添加处理,这可能受生物炭的吸附特性及生物炭本身氮含量的共同影响;但均表现出添加 5%处理减少最显著

($P<0.05$)。这与 Larid 等^[11]研究结果一致,表明在旱地土壤上生物炭的施用要达到一定量才能达到显著降低氮淋失和提高稳定持续效应氮的目的^[35]。

3 结 论

本文通过室内土柱模拟试验,系统研究了 0~20 cm 土层添加生物炭对水分运动、保持(土壤水分入渗、蒸发)和氮素损失的影响,分析生物炭对不同质地土壤的改良效应,得出如下结论:

1) 生物炭对湿润锋进程与累积入渗量的影响受添加量及土壤质地的影响。不同生物炭添加量减缓风沙土和黑垆土水分的入渗速度(初始入渗率和稳定入渗率减小,湿润锋运移深度降低),延缓土壤水分达到稳定入渗的时间,同时降低累积入渗量。对于黄绵土,0.5%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。

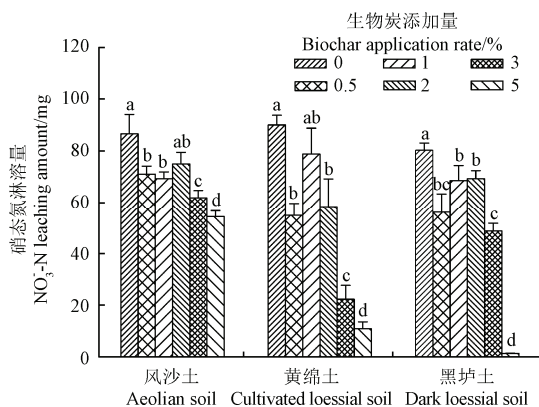
2) 添加生物炭土壤的湿润锋运移距离与运移时间均符合幂函数关系; Philip 入渗模型可用于描述混合生物炭的土壤水分累积入渗量变化过程。

3) 生物炭未显著影响试验条件下黄绵土和黑垆土的累积蒸发量(30 d);但改变了风沙土的蒸发特征,抑制其前期蒸发。

4) 生物炭可减少黄土高原 3 种质地土壤的硝态氮淋洗,与未添加生物炭相比,添加 0.5%~5%生物炭处理显著降低风沙土硝态氮淋溶量达 18.1%~37.2% ($P<0.05$),黄绵土硝态氮淋溶量达 33.8%~87.7% ($P<0.05$),黑垆土硝态氮淋溶量达 13.8%~80.8% ($P<0.05$);3 种质地的土壤在低生物炭添加量(0.5%)和高生物炭添加量(3%和 5%)下的硝态氮淋溶量均显著降低;表明适量生物炭能够增强土壤氮素固持能力、降低硝态氮淋失及环境风险。

[参 考 文 献]

- 王麒翔,范晓辉,王孟本. 近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5512-5523. Wang Qixiang, Fan Xiaohui, Wang Mengben. Precipitation trends during 1961-2010 in the Loess Plateau region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5512-5523. (in Chinese with English abstract)
- 俄有浩,施茜,马玉平,等. 未来 10 年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5542-5552. E Youhao, Shi Qian, Ma Yuping, et al. The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5542-5552. (in Chinese with English abstract)
- 赵西宁,吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 42-45. Zhao Xining, Wu Faqi. Developments and reviews of soil infiltration research[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 42-45. (in Chinese with English abstract)
- 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499. Lü Gang, Wu Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science



注: 同种土壤不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different small letters in the same soil mean significant difference at 0.05 level among treatments.

图 4 生物炭添加量对风沙土、黄绵土和黑垆土硝态氮淋溶量的影响

Fig.4 Effects of biochar application amount on NO_3^- -N leaching amount of aeolian soil, cultivated loessial soil and dark loessial soil

- Bulletin, 2008, 24(7): 494—499. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1282—1289.
Chen Yiqiong, Dong Yuanhua. Progress of research and utilization of soil amendments[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 1282—1289. (in Chinese with English abstract)
- [6] 方圆, 冯浩, 操信春, 等. 活性炭对土壤入渗、蒸发特性及养分淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 23—26.
Fang Yuan, Feng Hao, Cao Xinchun, et al. Influence of active carbon on soil infiltration and evaporation characteristics and nutrient leaching loss[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 23—26. (in Chinese with English abstract)
- [7] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 403—427.
- [8] 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.
Wang Xin, Yin Daixia, Zhang Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 248—257. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.
- [10] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207—213.
Gao Haiying, He Xusheng, Geng Zengchao, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 207—213. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhang Q Z, Du Z L, Lou Y L, et al. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions[J]. Catena, 2015, 127: 26—31.
- [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] 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 till 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)
- [17] 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.
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]. 2014, 25(8): 2281—2288. (in Chinese with English abstract)
- [18] Dugan E, Verhoef A, Robinson S, et al. Biochar from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana[C]//19th World Congress of Soil Science, Symposium 4.2.2, Soil and water global change, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia. 2010-08-01: 9—12.
- [19] 田丹. 生物炭对不同质地土壤结构及水力特征参数影响试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
Tian Dan. The Experimental Study of Influence of Biochar on Different Texture Soils Structure and Hydraulic Characteristic Parameters[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [20] Zheng Hao, Wang Zhenyu, Deng Xia, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. Geoderma, 2013, 206: 32—39.
- [21] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade[J]. Bioscience, 2003, 53(4): 341—356.
- [22] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54—61.
Gao Decai, Zhang Lei, Liu Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(6): 54—61. (in Chinese with English abstract)
- [23] Lehmann J, da Silva Jr. J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343—357.
- [24] Laird D A, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 436—442.
- [25] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Nutrient leaching in a Colombian savanna Oxisol amended with biochar[J]. J Environ Qual, 2012, 41(4): 1076—1086.
- [26] Güereña D, Lehmann J, Hanley K, et al. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system[J]. Plant Soil, 2013, 365(1/2): 239—254.
- [27] Yao Ying, Gao Bin, Zhang Ming, et al. Chemosphere effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2012, 89(11): 1467—1471.
- [28] 杨放, 李心清, 刑英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972—977.
Yang Fang, Li Xinqing, Xing Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(5): 972—977. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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)
- [30] 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(13): 109—114.
Song Ri quan, Chu Guixin, Ye Jun, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(13): 109—114. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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.
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)
- [32] 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.
- [33] 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)
- [34] Sika M P, Hardie A G. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 113—119.
- [35] Zhang Afeng, Bian Rongjun, Pan Genxing, 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(2): 153—160.

Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area

Xiao Qian^{1,2}, Zhang Hongpei^{1,3}, Shen Yufang^{1,3*}, Li Shiqing^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Water scarcity and low use efficiency of nitrogen are the major limiting factors for agriculture sustainable development in dryland areas of the Loess Plateau. Biochar has been widely proposed as a promising novel alternative of soil amendment to improve soil quality and increase crop productivity, but limited quantitative work has been addressed on the soil water infiltration process, evaporation characteristics and nitrate leaching. A better understanding of these characteristics can provide the solid basis for the evaluation of the effect of biochar amendment on soil hydrology and nitrogen retention in arid and semi-arid regions. In the present study, by using the soil column simulation investigation, biochar derived from maize stover (pyrolysis temperature of 400°C) was applied to 3 different types of soil samples (aeolian soil, cultivated loessial soil and dark loessial soil) collected from the Loess Plateau at 6 rates of 0, 0.5%, 1%, 2%, 3% and 5% (w/w) with triplicate. The wetting process, the cumulative infiltration amount, the permeability and the stable infiltration rate were determined. The water infiltration analysis showed that the advancement of wetting front and the cumulative infiltration amount changed with the biochar addition amount and soil texture. The migration rate of water was the fastest in aeolian soil and the slowest in cultivated loessial soil due to the soil texture and structure. The migration rate of wetting front in aeolian soil and dark loessial soil was decreased after the biochar addition. As the rate of biochar addition increased, the cumulative infiltration amount of aeolian soil and dark loessial soil gradually declined. For cultivated loessial soil, the higher biochar addition rates (3% and 5%) increased the time of the wetting front to the bottom of the column, while the lower rates (0.5%, 1% and 2%) increased the wetting front migration rate; the cumulative infiltration amount was not decreased at the rate of 0.5%, 1% and 2%, but reduced significantly at the rates of 3% and 5%. Overall, biochar addition reduced the water infiltration capacity and increased the water holding capacity for aeolian soil and dark loessial soil; the lower rates of biochar addition in cultivated loessial soil were not conducive to the water retention, while the higher rates of biochar addition favored. There were extremely significant power function relationships between wetting front distance and infiltration time under different rates of biochar treatments with the determination coefficient of greater than 0.99. Philip infiltration model was suitable for the simulation of soil water infiltration process under biochar treatments with the determination coefficient ranging from 0.991 to 0.999. During the successive evaporation of 30 days, biochar addition had no significant effects on the cumulative evaporation in cultivated loessial soil and dark loessial soil. However, biochar amendment changed the evaporation characteristics of aeolian soil: the evaporation was inhibited in the early stage; due to the continuous supply of water, the evaporation gradually increased in the later stage, but not significantly. The nitrate leaching was determined by the volume and the concentration of the leaching solution. The 2% addition rate of biochar in aeolian soil and the 1% addition rate of biochar in loessial soil had no significant effects on the total amount of nitrate leaching ($P>0.05$), when compared with the levels of the control (0%). Biochar addition reduced nitrate leaching by 18.1%-37.2% in aeolian soil, 33.8%-87.7% in cultivated loessial soil and 13.8%-80.8% in dark loessial soil, which may lead to increase the capacity of nitrogen holding in soil, reduce the nitrogen leaching risk in environment. Our results suggest that the use of biochar as soil amendment in agricultural soils plays an important role in increasing soil water holding capacity, improving available nitrogen and helping crop development in dryland areas of the Loess Plateau. However, more studies are needed to understand the mechanisms through which these benefits are achieved.

Key words: soils; moisture; evaporation; biochar; soil texture; infiltration; nitrate leaching