

水洗生物炭对 2 种类型土壤钾素淋失的影响

岳小松, 张影, 刘星, 程亚南, 王菲, 申长卫, 任秀娟, 吴大付

(河南科技学院资源与环境学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 为了探究生物炭对潮土和砂土钾素淋失的调控效应, 通过土柱淋溶模拟试验, 以水洗生物炭为研究对象, 比较生物炭水洗前后不同形态钾含量、表面形貌和含氧官能团变化, 进而探究不同用量水洗生物炭对 2 种类型土壤钾素淋失的阻控效应。结果表明: 水洗处理可使生物炭水溶性钾含量由 13.9 g/kg 降至 0.06 g/kg, 而对生物炭孔隙结构和表面含氧官能团影响较小。水洗生物炭对潮土和砂土水分淋失的影响受其施用量的影响, 表现为低量促进、高量抑制的趋势, 添加 1% 水洗生物炭显著增加了 2 种类型土壤水分淋失总量。生物炭对 2 种类型土壤钾素淋失的影响各异, 添加 2% 和 4% 水洗生物炭对砂土钾素淋失表现出显著的阻控效应 ($P < 0.05$), 钾素淋失量分别较不加生物炭处理降低了 21.2% 和 28.3%, 而添加 1% 水洗生物炭却增加了潮土钾素淋失量 ($P < 0.05$)。另外, 生物炭可提升土壤阳离子交换量和表层土交换性钾含量, 且提升幅度随生物炭施用量的增加而增加, 并且对砂土的提升效果更明显。因此, 从钾素淋失角度考虑, 生物炭更适用于阳离子交换量较低、保肥能力差的砂质土壤上。

关键词: 水洗生物炭; 钾素淋失; 土壤钾残留; 潮土; 砂土

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0108-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.016

Effects of Water-washed Biochar on Potassium Leaching in Two Types of Soil

YUE Xiaosong, ZHANG Ying, LIU Xing, CHENG Ya'nan,

WANG Fei, SHEN Changwei, REN Xiujuan, WU Dafu

(College of Resources and Environment, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003)

Abstract: In order to explore the regulation effect of biochar on potassium leaching loss in fluvo-aquic soil and sandy soil, a soil column leaching simulation test was conducted, and water washed biochar was used as the research object, the contents of different forms of potassium, surface morphology and oxygen-containing functional groups in biochar before and after washing were compared, and then explore the regulation effects of different amounts of washed biochar on potassium leaching loss in two types of soil. The results showed that the water-soluble potassium content in biochar was decreased from 13.9 g/kg to 0.06 g/kg by water-washed treatment, but the change of pore structure and surface oxygen-containing functional groups of biochar were less affected. Moreover, the effect of water-washed biochar on water leaching loss of fluvo-aquic soil and sandy soil was influenced by its application amount, which showed a trend of low amount of water-washed biochar promoted the water leaching loss, but high amount inhibited the water leaching loss, and adding 1% water-washed biochar significantly increased the total amount of water leaching loss in the two types of soil. The effects of biochar on potassium leaching in two types of soils were different. Adding 2% and 4% washed biochar showed significant inhibition and control effect on potassium leaching in sandy soil, and compared with the treatment without biochar, the total leaching amount of potassium decreased by 21.2% and 28.3%, respectively. While adding 1% washed biochar increased the total amount of potassium leaching in fluvo-aquic soil. In addition, biochar could improve soil cation exchange capacity and exchangeable potassium content of topsoil, and the increasing extent improved with the increasing of biochar application amount, and the improvement effect was more obvious in sand soil. Therefore, for the perspective of potassi-

收稿日期: 2021-04-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200600)

第一作者: 岳小松(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事生物炭特性及其对土壤改良效应研究。E-mail: sakyayue@163.com

通信作者: 张影(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤养分循环及调控研究。E-mail: yingzh2014@163.com

um leaching, biochar was more suitable for sandy soil with low cation exchange capacity and poor fertilizer retention capacity.

Keywords: water-washed biochar; potassium leaching; soil potassium residue; fluvo-aquic soil; sandy soil

作为植物必需的三大营养元素之一,钾在作物高产稳产和品质提升等方面起着不可替代的作用。我国土壤总钾含量丰富,但速效钾含量较低,90%~98%的钾素存在于风化程度较低的长石和云母类硅酸盐矿物中不能被植物直接吸收利用^[1]。随着农业产业结构升级,传统农业向高附加值和立体可持续方向转变,农业生产对土壤钾素的消耗强度与日俱增,使得我国缺钾土壤面积不断增加,农田钾平衡总体表现为亏缺^[2]。另外,降雨和灌溉对土壤钾素的淋溶作用也大大加剧了土壤钾亏缺的风险,尤其是在缓冲能力弱、保水能力差、阳离子交换量低的土壤上^[3]。因此,在保证钾肥高效利用的基础上,寻求减少土壤钾素淋失的科学方法,提高钾素在土壤中残留具有重要意义。

生物炭是农林废弃物等生物质在缺氧条件下经高温裂解产生的一类高度芳香化的富碳产物^[4],其在土壤改良、农作物增产、环境污染治理等方面具有良好的应用前景,并在废弃物减量化的同时实现了资源的再利用^[5]。生物炭结构稳定,多孔隙,比表面积大,具有丰富的表面官能团及良好的保水、保肥能力,这就使得生物炭具备控制农田生态系统中土壤养分淋溶的功能^[6-7]。已有研究^[8-10]表明,生物炭可以提升土壤养分固持能力,降低土壤硝态氮、铵态氮和磷等元素在土壤的淋溶损失。目前关于生物炭对于土壤钾素迁移规律的研究相对较少,已有研究^[11-13]认为,添加外源生物炭会增加土壤钾素淋失,生物炭本身含有丰富的可溶性钾可能是造成这一结果的主要原因。如何排除生物炭自身可溶性钾的干扰,是探究生物炭对土壤钾素淋溶迁移调控效应的必要手段。水洗和酸洗是去除生物炭表面可溶性组分常用的2种前处理方法。已有研究^[14]发现,酸洗对生物炭钾素的去除效果较水洗更佳,但会破坏生物炭表面孔隙结构,增加生物炭酸性官能团,因而酸洗生物炭不能代表原始生物炭的表面理化特征。王耀锋等^[15]研究发现,水洗处理可以显著降低生物炭中可溶性组分,而对其表面比表面积(BET)、总孔容以及平均颗粒大小等影响较小。因此,水洗处理可作为生物炭对土壤钾素淋失调控作用研究的前处理方法,但目前相关研究还比较少。

因此,基于我国农田土壤钾素缺乏且存在淋失风险,本研究以生物炭为研究对象,探究其对潮土和砂土钾素纵向迁移的调控作用。鉴于生物炭的富钾特性,为了从本质上摸清生物炭对土壤和化学钾肥迁移的调控作用,本研究采用水洗措施,洗去生物炭中的

可溶性钾素,进而评估其对2种类型土壤钾素淋失的调控效应。本研究将为生物炭作为一种钾素淋失阻隔材料的田间应用提供帮助。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自河南省新乡市小麦/玉米一年两熟轮作主产区0—20 cm耕层,土壤类型分别为壤质潮土和黄河泛滥沉积物发育而成的砂土。潮土pH为8.01,有机质、全氮含量分别为12.6,0.92 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为75.5,24.8,192.3 mg/kg;砂土pH为8.25,有机质、全氮含量分别为8.3,0.78 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为63.0,39.5,146.2 mg/kg。生物炭为自制秸秆碳,首先将采集玉米秸秆烘干、粉碎,将粉末填满陶瓷坩埚并加盖,在限氧条件下升温至350℃,并保持4 h,自然冷却至室温,装袋备用。供试生物炭pH为8.47,有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为635.4,12.4,9.7,19.6 g/kg;碳氮比51.2。

1.2 试验方法

本研究采用自制淋溶装置,选用内径6 cm,高25 cm的PVC管作为淋溶装置,底部使用多层尼龙网、滤纸依次包扎,并铺填3 cm洁净石英砂,留有1个水分淋失口和带刻度接收容器。土壤上部放置2层滤纸防止表层土壤被淋溶水破坏。每个土柱按照潮土1.25 g/cm³和砂土1.35 g/cm³的土壤容重加入土壤,质量为600 g。为了去除生物炭自身钾素对试验的影响,采用水洗生物炭进行土柱淋溶试验。水洗生物炭制备方法参考王耀锋等^[15]介绍的方法并加以改良:把生物炭置于烧杯中,按生物炭和去离子水1:10的比例加入去离子水,定期搅拌均匀,放置过夜后过滤上清液,然后按照相同方法循环往复10次,将水洗生物炭烘干待用。测定水洗前后生物炭全钾含量、水溶性钾含量、速效钾含量、缓效钾含量,并利用扫描电镜和傅里叶红外光谱分析生物炭水洗前后表面形貌和官能团变化。

试验于2018年10—12月在河南科技学院遮雨棚内完成,试验设5个处理,分别为不施钾(CK)、硫酸钾(K)、硫酸钾+1%水洗生物炭(K+1%WBC)、硫酸钾+2%水洗生物炭(K+2%WBC)、硫酸钾+4%水洗生物炭(K+4%WBC),每个处理重复3次,硫酸钾投入量按照K₂O施用量300 mg/kg计算而来,生物炭添加量为土壤质量的百分数。生物炭与全

部土壤混匀后置于淋溶装置,钾肥与表层 200 g 土混匀后施于表层,然后每个装置加入 150 mL 蒸馏水使土壤水分接近饱和,稳定 3 天后,加入 50 mL 蒸馏水,2 种土壤均未见水分淋溶,静置 1 天后开始淋溶试验。每个装置加入 50 mL 蒸馏水,收集淋洗溶液并测量体积,记为第 1 次淋洗,重复 3 次,每次间隔 5 天。为了模拟田间环境土壤干旱后的强降雨或大水漫灌,收集前 3 次淋溶液后静置 21 天,加入 150 mL 蒸馏水,记为第 4 次淋洗,间隔 5 天后,按照每次 50 mL 蒸馏水,每次间隔 5 天的方法再淋洗 3 次,共收集 7 次淋洗液,并分别测量淋洗液体积和淋洗液中钾素含量。淋洗结束后,分上、中、下 3 层采集土壤样品,用于土壤水溶性钾和速效钾含量分析。

1.3 样品测定方法

土壤 pH 采用 pH 计测定,水土比为 2.5 : 1;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮采用硫酸加速剂消煮—凯氏定氮法测定;土壤碱解氮采用碱式扩散法测定;土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼蓝比色法测定;土壤阳离子交换量采用醋酸铵法测定;水溶性钾采用蒸馏水浸提—火焰光度计法测定;速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度计法测定,均参照鲍士旦^[16]的测定方法。

采用日立 SU8020 场发射扫描电子显微镜观察水洗前后生物炭表面形貌,利用 Nicolet iS 10 傅立叶变换红外光谱仪测定水洗前后生物炭表面官能团分布。水洗前后生物炭水溶性钾和速效钾测定方法同土壤样品,热

硝酸浸提钾采用 1 mol/L 热 HNO₃ 浸提—火焰光度计法测定,全钾采用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—火焰光度法测定。生物炭不同形态钾素含量计算公式为:

交换性钾(g/kg) = 速效钾(g/kg) - 水溶性钾(g/kg)

缓效钾(g/kg) = 热硝酸浸提钾(g/kg) - 速效钾(g/kg)

矿物态钾(g/kg) = 全钾(g/kg) - 热硝酸浸提钾(g/kg)

1.4 数据处理分析

所有数据用 Excel 2016 软件和 SPSS PASW Statistics 18.0 软件进行统计分析,Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 水洗前后生物炭表面特性及不同形态钾含量变化

由图 1 可知,水洗后生物炭中水溶性钾含量由水洗前的 13.9 g/kg 降至 0.06 g/kg,占比也由原先的 70.92%降低为 1.13%。交换性钾则由水洗前的 1.03 g/kg 减少为 0.59 g/kg;而缓效钾和矿物态钾变化不明显。此外,水洗后生物炭表面更加平整、洁净,表面细小颗粒和晶体明显减少,表面有鼓泡破裂现象,可能是表面可溶性组分分解或者是搅拌过程中生物炭颗粒碰撞所致。生物炭在水洗前后表现出相似的红外光谱吸收峰,并且各峰的高低差异不明显,说明水洗处理不会影响生物炭表面官能团及分布(图 2)。总体来看,水洗处理可大幅度降低生物炭可溶性钾含量,但对生物炭表面官能团影响较小,可作为生物炭前处理方法用于后续研究。

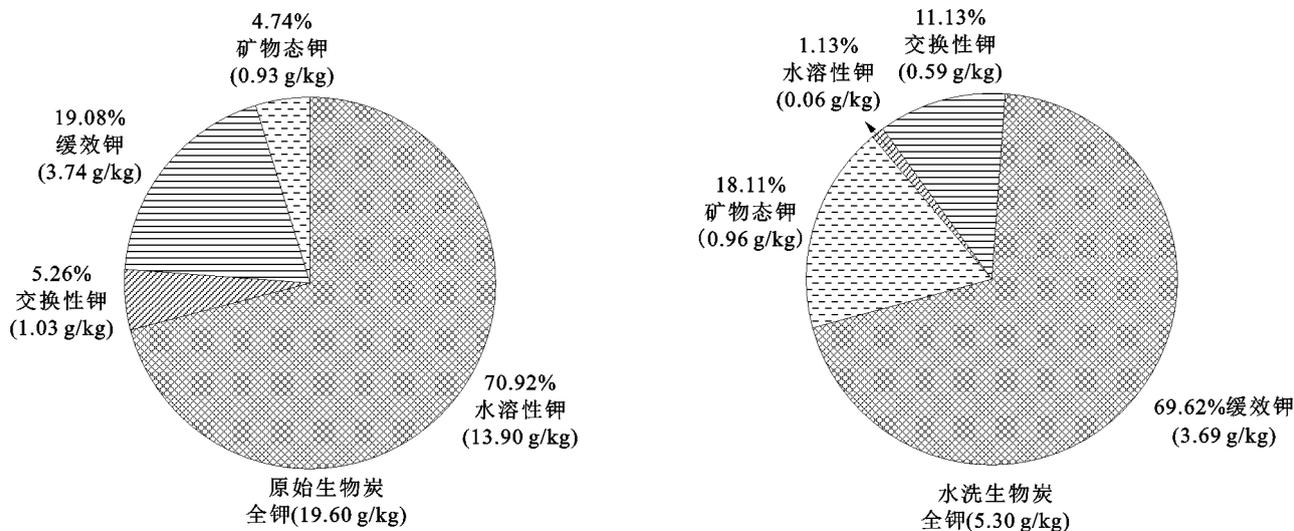


图 1 水洗前后生物炭不同形态钾含量及占比变化

2.2 水洗生物炭对潮土和砂土水分淋失量的影响

由图 3 可知,各处理淋洗液体积均表现出前 3 次淋洗逐渐降低,第 4 次增加灌水量后显著增加,而后逐渐降低的趋势。在潮土上,添加 4% 水洗生物炭处理的第 1 次和第 4 次水分淋失量显著低于其他处理 ($P < 0.05$),而添加 1% 水洗生物炭的第 4 次水分淋

失量则表现出明显增加效应 ($P < 0.05$)。由图 4 可知,砂土水分淋失量显著高于潮土,添加 1% 水洗生物炭可显著增加 2 种类型土壤水分淋失总量,且随着水洗生物炭施用量的增加,水分淋失量逐渐降低。总体来看,水洗生物炭对土壤水分淋失的影响受其施用量的影响,表现为低量促进、高量抑制的趋势。

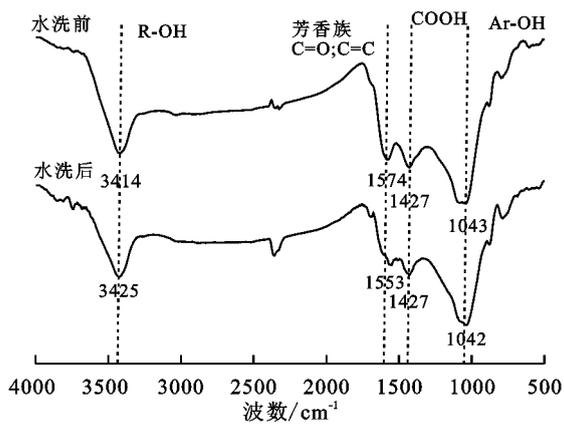


图 2 水洗前后生物炭 FTIR 红外光谱

2.3 水洗生物炭对潮土和砂土钾素淋失的影响

由图 5 可知,在 2 种类型土壤上,各处理的钾素淋失量随着淋洗次数的变化趋势与淋洗液体积的变化趋

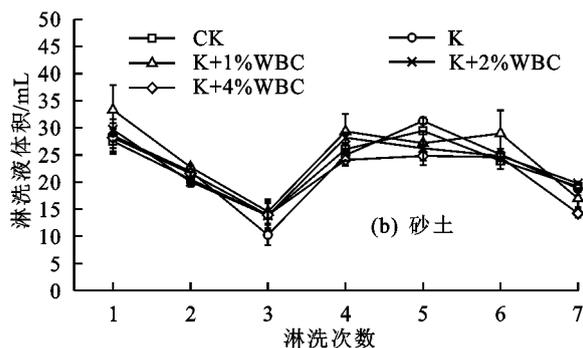
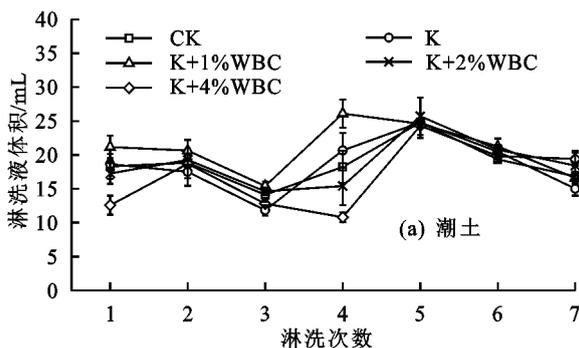
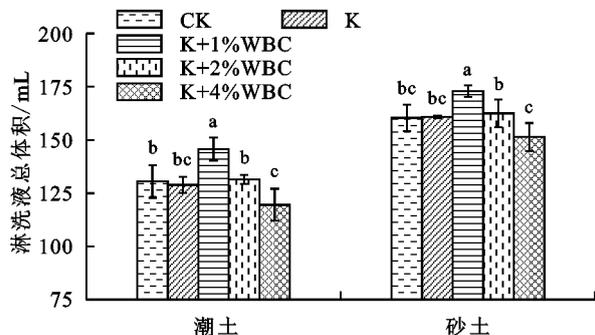


图 3 水洗生物炭对潮土和砂土水分淋失量的影响

2.4 水洗生物炭对潮土和砂土阳离子交换量的影响

由图 7 可知,潮土阳离子交换量显著高于砂土,并且 2 种土壤阳离子交换量均随水洗生物炭施用量的增加而增加。添加 4% 水洗生物炭对潮土阳离子交换量表现出显著提升效应,较不添加生物炭处理增加 12.39%,而添加 2% 和 4% 水洗生物炭均显著提高了砂土阳离子交换量,增幅分别为 26.04% 和 43.09%。说明生物炭对阳离子交换量低、缓冲性能弱的砂土的阳离子交换量的提升效果更明显。



注:柱上方不同小写字母表示差异性达到显著水平($P < 0.05$)。下同。

图 4 水洗生物炭对潮土和砂土水分淋失总量的影响

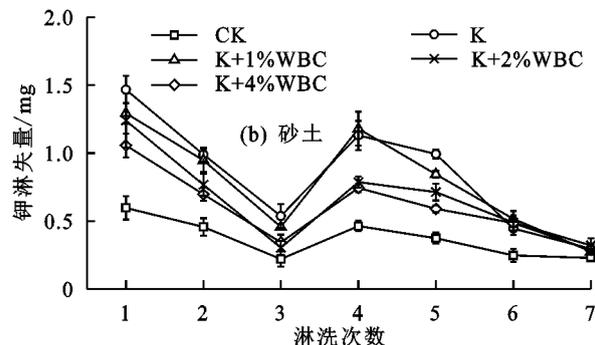
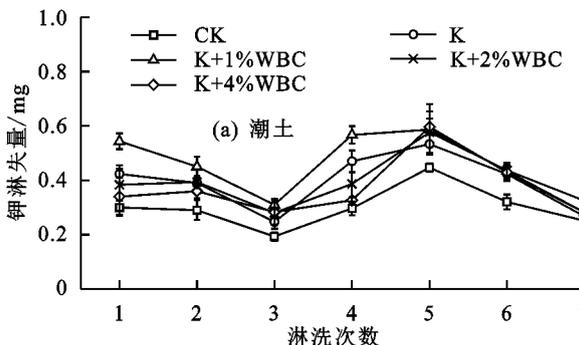


图 5 水洗生物炭对潮土和砂土钾素淋失的影响

2.5 水洗生物炭对潮土和砂土水溶性钾和交换性钾残留的影响

在潮土上,各施钾处理上层土壤水溶性钾和交换

势相似,与不添加水洗生物炭处理相比,添加 1% 水洗生物炭可显著增加潮土第 1,2,4 次淋洗的钾素淋失量($P < 0.05$),添加 2% 和 4% 水洗生物炭则显著降低了砂土第 2,3,4,5 次淋洗的钾素淋失量($P < 0.05$)。对于钾素淋失总量,在潮土上,与不加水洗生物炭处理(K)相比,添加 1% 水洗生物炭显著增加了钾素淋失总量,增幅为 15.1%,添加 2% 和 4% 水洗生物炭影响不显著。在砂土上,与不加水洗生物炭处理(K)相比,添加 1% 水洗生物炭对土壤钾素淋失总量影响不显著,添加 2% 和 4% 水洗生物炭则显著降低土壤钾素淋失总量,分别较不加水洗生物炭处理降低了 21.2% 和 28.3% (图 6)。总体来看,水洗生物炭对土壤钾素淋失的调控作用受土壤类型和施用量的影响,对砂土的钾素淋失阻控效应明显优于潮土,并且效果随着水洗生物炭施用量的增加而增加。

性钾含量均显著高于中层和下层土壤。与不添加水洗生物炭(K)处理相比,添加水洗生物炭对上层土壤水溶性钾含量影响不显著,而添加 2% 和 4% 水洗生

物炭对上层土壤交换性钾含量表现出显著提升效应。此外,添加 1% 和 2% 水洗生物炭显著降低了下层土壤水溶性钾含量和 中层土壤交换性钾含量,添加 4% 水洗生物炭显著增加了下层土壤交换性钾含量(图 8)。在砂土上,各施钾处理土壤水溶性钾和交换性钾含量表现为上层 > 中层 > 下层。添加 4% 水洗生物炭显著增加了上层土壤交换性钾含量,添加 2% 和 4% 水洗生物炭显著降低了中层土壤水溶性钾含量(图 9)。总体来看,添加水洗生物炭表现出增加施肥土层交换性钾含量,并降低中下层土壤水溶性钾含量的趋势,且该效应受水洗生物炭施用量的制约。

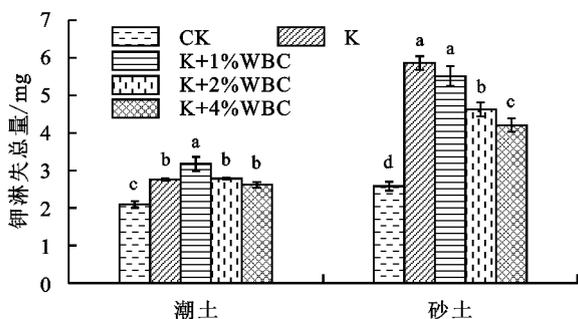


图 6 水洗生物炭对潮土和砂土钾淋失总量的影响

3 讨论

生物炭对水分淋失的影响是制约钾素淋溶的关键

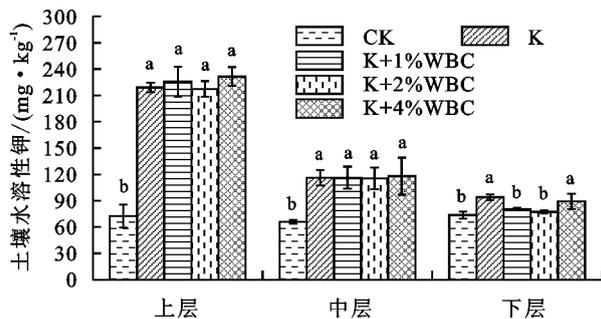


图 8 水洗生物炭对潮土水溶性钾和交换性钾含量的影响

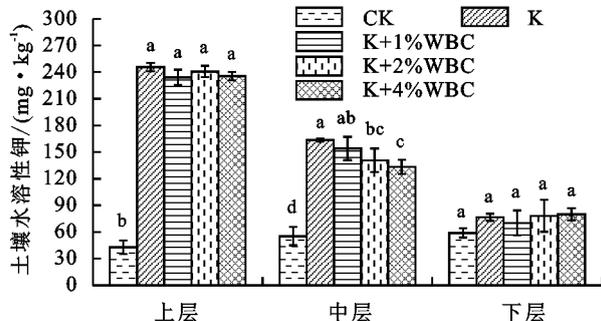


图 9 水洗生物炭对砂土水溶性钾和交换性钾含量的影响

水洗生物炭表现出增加 2 种类型土壤阳离子交换量的趋势,并且提升幅度随着水洗生物炭施用量的增加而增加(图 7)。这主要归因于生物炭表面丰富的含氧官能团,其具有类似于土壤胶体阳离子交换位点的功能^[19]。陈红霞等^[20]研究也得出相似的结论。但由于潮土本身的阳离子交换量要远高于砂土,所以

因素,本研究发现,水洗生物炭对 2 种类型土壤水分淋失量均表现出低量(1% 添加量)促进、高量(4% 添加量)抑制的趋势(图 4)。颜永毫等^[17]同样发现,生物炭对土壤持水能力的提升幅度与其施用量呈正比。生物炭对土壤保水能力的影响可能是其对土壤蒸发、入渗、吸附能力的综合体现,低量生物炭可能对土壤水分入渗的促进作用更明显,而高量生物炭对土壤水分吸附能力为主要影响因素。本研究发现,淋溶过程中潮土和砂土水分淋失量对生物炭输入表现出相似的响应趋势,而肖茜等^[18]研究发现,随着生物炭添加量的增加,黄土区 3 种典型土壤的入渗速度和累积入渗量变化趋势各异。因此,生物炭作为一种土壤改良剂提高土壤持水性时,需要考虑供试土壤质地和生物炭施用量。

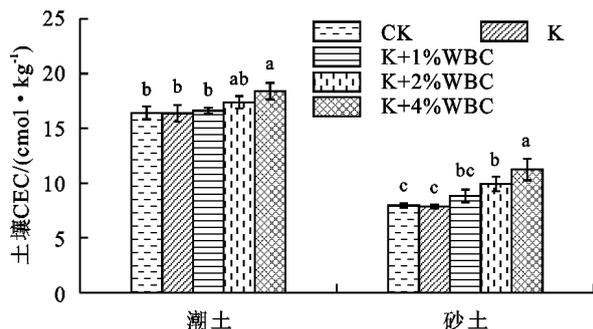
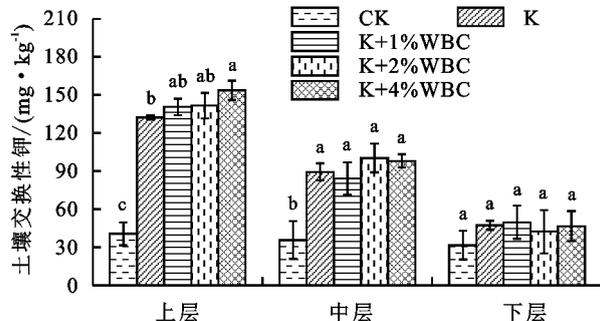
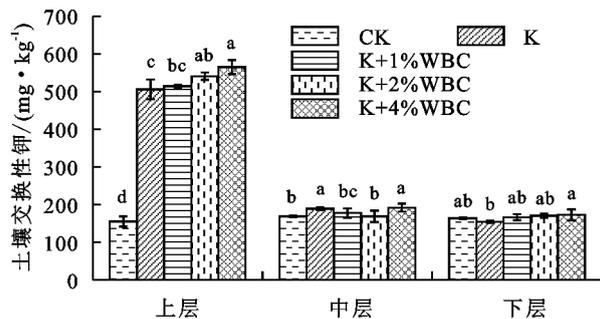


图 7 水洗生物炭对潮土和砂土阳离子交换量的影响



水洗生物炭对砂土阳离子交换量的提升幅度较潮土大更明显。

鉴于水洗生物炭对土壤水分淋失和阳离子交换量的影响,水洗生物炭表现出改变土壤钾素淋失的作用,但在 2 种类型土壤上表现出不同的影响趋势。本研究发现,水洗生物炭总体并未降低潮土钾素淋失总量,反

而添加1%水洗生物炭显著增加了潮土钾素淋失;而在砂土上,水洗生物炭对钾素淋失表现出良好的阻控效应,并且随着生物炭施用量的增加土壤钾素淋失总量逐渐降低(图6)。李文娟等^[21]研究同样发现,生物炭对不同质地土壤中可溶态养分的影响不同,可以促进质地较粗土壤的保肥能力,却不利于质地较为黏细土壤硝态氮养分的保持。生物炭对土壤钾素淋失的调控机理包括:首先,生物炭可改变土壤阳离子交换量,其表面吸附点位可以直接对阳离子产生吸附作用^[22];其次,生物炭改变土壤水分入渗、运移和淋失量,进而影响钾素淋失量^[23]。由于生物炭表面具有丰富的孔隙结构、含氧官能团和较高的比表面积,其对土壤养分淋失的调控效应可能是其对土壤阳离子交换量和离子吸附能力以及水分运移规律影响的综合体现^[24]。对于阳离子交换量较高的潮土,尽管添加4%水洗生物炭显著增加了土壤阳离子交换量和表层土交换性钾含量,但其土壤钾素淋失总量的影响并不显著,而1%水洗生物炭显著增加了水分和钾素淋失总量,因此其对潮土水分运移的影响可能是主要控制因子。而对于砂土,整个淋溶过程中,添加2%和4%水洗生物炭对水分淋失总量影响不显著,却可以显著增加土壤阳离子交换量,并显著降低钾素淋失量,说明水洗生物炭对阳离子交换量和钾固持能力的提升是其对砂土钾素淋失的表现良好阻控效应的主要控制因子。因此,从钾素淋失角度考虑,应该优先将生物炭施用到阳离子交换量较低、保肥能力差的砂质土壤上。

4 结论

(1)水洗处理可以大幅降低生物炭中水溶性钾、交换性钾等速效钾含量,对生物炭表面形貌、孔隙结构和含氧官能团影响较小。此外,水洗生物炭可提升2种类型土壤的阳离子交换量,提升幅度随生物炭施用量的增加而增加,并且对阳离子交换量低、缓冲性能弱的砂土提升效果更明显。

(2)水洗生物炭对土壤水分淋失的影响受其施用量的影响,在潮土和砂土均表现为低量促进、高量抑制的趋势。水洗生物炭对土壤钾素淋失的调控效应在2种类型土壤上表现各异,添加2%和4%水洗生物炭可显著降低砂土钾素淋失总量,而添加1%水洗生物炭增加了潮土钾素淋失。因此,从钾素淋失角度考虑,生物炭更适用于阳离子交换量较低、保肥能力差的砂质土壤上,在成本允许范围内,适当增加生物炭施用量效果更佳。

参考文献:

- [1] 张亦驰,李林,史喜林,等.土壤钾素形态及有效性的研究进展[J].吉林农业科学,2013,38(6):52-54,61.
- [2] 冀宏杰,张怀志,张维理,等.我国农田土壤钾平衡研究进展与展望[J].中国生态农业学报,2017,25(6):920-930.
- [3] 董艳红,王火焰,周健民,等.不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J].土壤,2014,46(2):225-231.
- [4] Sohi S P, Krull E, Lopezcapel E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[J].Advances in Agronomy,2010,105(1):47-82.
- [5] 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.
- [6] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: Results from a short-term pilot field study[J].Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011,140(1):309-313.
- [7] Lu H L, Zhang W H, Yang Y X, et al. Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar[J].Water Research,2012,46(2):854-862.
- [8] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al. Phosphorus Sorption and Availability from Biochars and Soil/Biochar Mixtures[J].Clean-Soil Air Water,2014,42(5):626-634.
- [9] 邢英,李心清,王兵,等.生物炭对黄壤中氮淋溶影响:室内土柱模拟[J].生态学杂志,2011,30(11):2483-2488.
- [10] 王耀,张蕾,焦晓光,等.添加生物炭对设施菜田土壤氮迁移的影响[J].中国农学通报,2020,36(16):91-95.
- [11] Altland J E, Locke J C. Biochar affects macronutrient leaching from a soilless substrate[J].Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science,2012,47(8):1136-1140.
- [12] Buecker J, Kloss S, Wimmer B, et al. Leachate composition of temperate agricultural soils in response to biochar application[J].Water, Air and Soil Pollution, 2016,227(2):1-13.
- [13] Hardie M A, Oliver G, Clothier B E, et al. Effect of biochar on nutrient leaching in a young apple orchard[J].Journal of Environmental Quality,2015,44(4):1273-1282.
- [14] 林庆毅,姜存仓,张梦阳.生物炭老化后理化性质及微观结构的表征[J].环境化学,2017,36(10):2107-2114.
- [15] 王耀锋,刘玉学,吕蒙蒙,等.水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报, 2015,21(4):1049-1055.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999.
- [17] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等.生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):120-124,190.

- vegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2010, 81(3): 226-233.
- [4] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 759-768.
- [5] Tang Y Q, Li J, Zhang X H, et al. Fractal characteristics and stability of soil aggregates in karst rocky desertification areas[J]. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 2013, 65(1): 563-579.
- [6] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6326-6336.
- [7] 张新荣, 刘林萍, 方石, 等. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 2013-2021.
- [8] Dorji T, Field D J, Odeh I O A. Soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon under different land use or land cover types[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(2): 308-319.
- [9] Kabir E B, Bashari H, Mosaddeghi M R, et al. Soil aggregate stability and organic matter as affected by land-use change in central Iran[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(13): 1823-1837.
- [10] 王进, 刘子琦, 鲍恩侯, 等. 喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 249-256.
- [11] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 971-978.
- [12] 鲍仕旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 42-50.
- [13] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 853-865.
- [14] 胡乐宁, 苏以荣, 何寻阳, 桂西北喀斯特地区典型土壤在不同筛分强度下团聚体的稳定性[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 236-241.
- [15] 俞月凤, 卢凌霄, 杜虎, 等. 不同类型森林石灰土的团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(5): 1011-1019.
- [16] 任娇娇, 周运超, 刘兵, 等. 石灰岩发育土壤团聚体形成机制研究[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 722-728.
- [17] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- [18] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 等. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6991-6999.
- [19] 徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1523-1529.
- [20] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- [21] 董起广, 曲少东, 黎雅楠, 等. 碎石风化物对土壤理化性质及稳定性的影响[J]. *南方农业*, 2020, 14(16): 20-23.
- [22] 王秀丽, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 北京山区土壤有机碳分布及其影响因素研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(6): 1152-1158.
- [23] Wei X R, Li X Z, Jia X X, et al. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(6): 637-646.
- [24] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 161-167.
- [25] 王兴, 钟泽坤, 韩新辉, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2416-2424.
- (上接第 113 页)
- [18] 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.
- [19] 郑庆福, 王永和, 孙月光, 等. 不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(4): 962-966.
- [20] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [21] 李文娟, 颜永毫, 郑纪勇, 等. 生物炭对黄土高原不同质地土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运移特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 60-63, 68.
- [22] 林婉嫔, 夏建国, 肖欣娟, 等. 不同热解温度茶渣生物质炭对茶园土壤吸附解吸 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 326-331.
- [23] 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.
- [24] 刘国子, 杨凤根, 许斌. 生物炭对土壤氮素淋失影响的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(4): 139-149.