

模拟酸雨下生物炭添加对土壤盐基离子淋失的影响

郑梅迎, 彭玉龙, 刘明宏, 李彩斌, 胡贲, 耿伟, 张久权, 杨继鑫, 郭先锋, 张继光

引用本文:

郑梅迎, 彭玉龙, 刘明宏, 等. 模拟酸雨下生物炭添加对土壤盐基离子淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 163–173.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0622>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

两种生物炭对两种质地土壤中阿特拉津淋溶与迁移的影响

曹美珠, 张超兰, 潘丽萍, 杨惟薇, 魏嘉鸣, 张飞龙, 韦艳红

农业环境科学学报. 2015, 34(1): 65–71 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.01.010>

生物炭对北京郊区砂土持水力和氮淋溶特性影响的土柱模拟研究

王燕, 庞卓, 贾月, 王庆海, 刘文菊, 谢祖彬, 郑瑞伦

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1820–1828 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0124>

养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 赖睿特, 张克强, 梁军锋, 沈丰菊, 王凤

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2363–2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471>

玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究

盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 王洪媛

农业环境科学学报. 2015(2): 310–318 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.015>

CO₂-N₂气氛下热解工艺对稻秆生物炭吸附Cd²⁺的影响

周红卫, 陈振焱, 胡超, 张亚平, 顾东清

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1605–1612 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1406>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑梅迎, 彭玉龙, 刘明宏, 等. 模拟酸雨下生物炭添加对土壤盐基离子淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 163–173.

ZHENG Mei-ying, PENG Yu-long, LIU Ming-hong, et al. Effects of biochar addition on soil-exchangeable base cations under simulated acid rain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 163–173.



开放科学 OSID

模拟酸雨下生物炭添加对土壤盐基离子淋失的影响

郑梅迎¹, 彭玉龙², 刘明宏², 李彩斌³, 胡贵³, 耿伟⁴, 张久权¹, 杨继鑫¹, 郭先锋¹, 张继光^{1*}

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 山东 青岛 266101; 2. 贵州省烟草公司遵义市公司, 贵州 遵义 563000; 3. 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州 毕节 551700; 4. 陕西省烟草公司安康市公司, 陕西 安康 725000)

摘 要:通过室内土柱试验,研究模拟酸雨淋洗下添加生物炭对土壤交换性盐基离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+})的影响。采用双因素全面试验法,在pH值3.5、5.6和7.0的3种模拟酸雨条件下,设置0、0.5%、1%和2%的4个生物炭添加量,测定淋出液及淋洗后土壤中4种盐基离子含量。结果表明:酸雨淋洗条件下,与无生物炭处理相比,较高生物炭添加量(2%和1%)会增加盐基离子的淋失总量。同一处理淋出液中, Ca^{2+} 的淋失总量最大, Mg^{2+} 最易淋失。相同生物炭添加量下,4种盐基离子淋出总量均随淋洗液pH值升高而降低,淋洗液pH值为3.5时各盐基离子的淋出总量均最高;相同pH值淋洗液下, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 的淋出总量为2%生物炭>1%生物炭>无生物炭处理>0.5%生物炭,而 Na^{+} 的淋出总量为2%生物炭>无生物炭处理>1%生物炭>0.5%生物炭。在酸雨淋洗条件下,与无生物炭处理相比,添加生物炭的处理可提高土壤pH值及交换性盐基离子的含量,生物炭添加量为2%时对土壤交换性盐基离子的提升效果最佳。淋洗后各处理土壤中4种盐基离子含量表现为 $\text{Ca}^{2+}>\text{K}^{+}>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^{+}$ 。研究表明,在生物炭添加下,酸沉降同样会加剧土壤盐基离子的淋洗损失。与无生物炭处理相比,模拟酸雨条件下,生物炭添加量增加提高了pH值及盐基离子含量,其中以添加2%生物炭的处理效果最佳。

关键词:生物炭;酸雨;淋溶作用;交换性盐基离子

中图分类号:S156;X517;X144 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)01-0163-11 doi:10.11654/jaes.2020-0622

Effects of biochar addition on soil-exchangeable base cations under simulated acid rain

ZHENG Mei-ying¹, PENG Yu-long², LIU Ming-hong², LI Cai-bin³, HU Ben³, GENG Wei⁴, ZHANG Jiu-quan¹, YANG Ji-xin¹, GUO Xian-feng¹, ZHANG Ji-guang^{1*}

(1. Tobacco Research Institute of CAAS, Qingdao 266101, China; 2. Zunyi Branch of Guizhou Provincial Tobacco Company, Zunyi 563000, China; 3. Bijie Branch of Guizhou Provincial Tobacco Company, Bijie 551700, China; 4. Ankang Branch of Shaanxi Provincial Tobacco Company, Ankang 725000, China)

Abstract: The effects of biochar addition on soil-exchangeable base cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , and Na^{+}) under simulated acid rain conditions were studied via a soil column simulated experiment. A two-factor comprehensive test of three pH (3.5, 5.6, and 7.0) eluents and four levels of biochar (0, 0.5%, 1%, and 2%) additives were used in this study; a total of 12 soil treatment tests were conducted to determine the four base ions in a leaching solution and soil after leaching. The results showed that: In comparison to the treatment without biochar, higher

收稿日期:2020-06-03 录用日期:2020-09-23

作者简介:郑梅迎(1992—),女,河南洛阳人,硕士研究生,从事烟田土壤生态调控研究。E-mail:641634611@qq.com

*通信作者:张继光 E-mail:zhangjiguang@caas.cn

基金项目:中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-TRIC06);贵州省烟草公司遵义市公司科技项目(201703);贵州省烟草公司毕节市公司科技项目(2018520500240059)

Project supported: Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (ASTIP-TRIC06); Science and Technology Project of Zunyi Company of Guizhou Tobacco Company (201703); Science and Technology Project of Bijie Company of Guizhou Tobacco Company (2018520500240059)

levels of biochar additives (i.e., 2% and 1%) increased the total amount of base ion leaching under simulated acid rain. It was also observed that, the leaching loss of Ca^{2+} was the highest and Mg^{2+} was the least resistant to leaching. Utilizing the same amount of biochar, the total leaching amount of the four base ions decreased with the increase in the pH value of the eluent, and the total leaching amount of each base ion was the highest when the eluent pH value was 3.5. In tests conducted using the same soil sample (pH: 3.5), the order of total leaching amounts of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and K^{+} was 2% biochar treatment > 1% biochar treatment > no biochar treatment > 0.5% biochar treatment, whereas that of Na^{+} was 2% biochar treatment > no biochar treatment > 1% biochar treatment > 0.5% biochar treatment. Under the influence of acid rain leaching, in comparison to the treatment without biochar, the treatment with biochar could increase the soil pH value and decrease the exchangeable base ion content. When the biochar dosage was 2%, the enhancement effect of soil-exchangeable base ions was the best. After leaching, the content of the four basic ions in soil was $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+}$. With biochar addition, acid deposition also increased the leaching loss of soil base ions. However, compared to the treatment without biochar, adding biochar increased the pH value and content of base ions under the simulated acid rain condition, and this confirmed that the treatment with 2% biochar was the most effective.

Keywords: biochar; acid rain; leaching; exchangeable base cations

酸雨是当今世界最严重的环境问题之一^[1]。我国酸雨区面积约53万 km^2 ,尤以长江以南地区影响最为严重^[2]。酸雨是导致农田土壤酸化的一个重要诱因^[3],土壤酸化会加快土壤中盐基离子淋失,降低交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 等盐基离子的生物有效性,并增加铝和锰离子的累积,从而限制作物生长,并最终导致农作物减产^[4-5]。刘俐等^[6]通过酸雨淋溶试验发现,随着模拟酸雨pH值的降低,农田土壤盐基离子淋失量增加,且酸雨对交换性盐基离子的敏感性依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$ 。盐基离子对土壤性质及植物的生长发育极其重要^[7-8],如何采取有效措施降低土壤盐基离子淋失、改良酸性土壤以提高土壤保肥能力备受关注。

目前关于酸化土壤改良研究主要集中在改善土壤酸碱度方面,例如施用石灰等碱性物质直接中和土壤酸度。这种方法虽然有效,但长期使用会导致土壤板结、养分不平衡等问题。土壤酸碱度改良需要和土壤肥力提升一起实现。生物炭是农林废弃物等生物质在缺氧条件下热裂解形成的稳定的富碳产物,其具有孔隙结构丰富、比表面积大和理化性质稳定等特点,生物炭本身蕴含大量养分,非常适用于酸性土壤改良。近年来,生物炭已被广泛用于农田改良土壤和增加作物产量^[9]。生物炭的主要组分——灰分中含有大量的可溶态盐基离子,其被释放进入土壤可提高土壤的盐基饱和度,改良土壤酸性^[10]。目前,生物炭对土壤养分及肥力作用的研究大多集中在降低硝态氮、氨态氮和磷、钾等损失方面^[11-12],而酸雨对土壤的危害主要表现在加快土壤盐基离子淋失、降低土壤盐基离子饱和度等,但在酸雨淋洗下添加生物炭对土壤盐基离子的影响尚不明确。

贵州遵义是我国西南酸雨的主要分布区之一,同时也是我国优质烤烟的主产区,遵义烟田因酸雨及大

量施氮而导致的酸化等土壤退化问题较为严重^[13]。遵义烟田土壤主要以黄壤及黄壤性水稻土为主,其缓冲能力差,土质较松散,极易发生水土流失。为此,本研究以遵义烟区黄壤性水稻土为研究对象,通过室内土柱试验,研究不同pH值模拟酸雨条件下,添加生物炭对土壤及其淋出液中 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等交换性盐基离子的影响,旨在明确模拟酸雨条件下生物炭对盐基离子的持留效应,为我国西南酸雨区烟田土壤改良中生物炭的应用提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为遵义市湄潭县的典型烟田耕层(0~20 cm)土壤,土壤类型为黄壤性水稻土。样品采集后在室内自然风干,去除大石块和植物根茎等杂质,然后过2 mm筛保存备用。所取土壤的基本理化性质为:pH(H_2O) 6.37、有机质 $23.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总氮 $1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $36.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $265.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性钙 $2.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性镁 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性钾 $2.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性钠 $0.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试生物炭购自贵州时科金年生物科技有限公司,材料来源为废弃烟秆,热裂解炭化温度为 350°C ,热解时间为2 h, pH(H_2O) 8.48, 交换性钙 $11.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性镁 $4.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性钾 $6.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性钠 $5.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

室内土柱淋洗试验于2019年3—5月在中国农业科学院烟草研究所实验室内进行,采用双因素全面试验法,设置4种生物炭(过0.25 cm筛)添加量处理,分别为0(B0)、0.5%(B0.5)、1.0%(B1)和2.0%(B2);模拟酸雨按遵义当地酸雨的离子组成,采用浓 H_2SO_4 和

浓 HNO_3 按摩尔浓度比为 2.5:1 配制 pH 为 3.5(A3) 和 5.6(A5) 的酸雨淋洗液, 以及 pH 为 7.0(A7) 的蒸馏水分别进行模拟酸雨淋洗试验。试验共计 12 个处理, 每个处理 3 次重复。

室内土柱试验方法为: 将 3.0 kg 土壤样品与一定比例生物炭混合均匀后, 按照田间土壤容重 $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 装填入高 50 cm、半径为 5.5 cm 的圆柱形 PVC 管中, 每次装填 20 cm, 均匀装入柱内并压实, 以保证试验土柱的容重与田间土壤基本一致, 同时尽量减少边缘效应的产生, 最终形成 40 cm 的土柱。在土柱的上部和圆柱管底部(已打孔)分别铺一层尼龙网和一层(约 1 cm)干燥石英砂(经酸洗和去离子水洗净), 起到减少对表层土的扰动及过滤的作用。试验中 3 个生物炭添加量处理分别是 0.5%、1% 和 2%, 相当于向土壤带入的盐基离子含量分别为: Ca^{2+} 0.176、0.351 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.703 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; Mg^{2+} 0.064、0.128 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.255; K^+ 0.097、0.193 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.387 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; Na^+ 0.076、0.153 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.305 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土柱装填完成后, 加蒸馏水至 60% 田间持水量(田间持水量为 16.5%), 静置预培养 48 h。

淋洗方法参考田文杰等^[14]的方法并稍作修改, 淋洗液装入悬挂于土柱上方的玻璃瓶中, 并用医用输液器控制流速, 调节注射器的阀门使流速控制在约 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。根据遵义地区的年均降雨量(1 200 mm), 扣除实际降雨地表径流的流量损失, 确定模拟淋洗量为年平均降雨量的 60%, 一年实际淋溶量约为 720 mm, 按照土柱横截面计算后的总计淋溶量为 7 000 mL, 以每 24 h 淋溶一次, 每次 250 mL 计算, 共淋洗 28 次, 每 2 次淋洗后收集 1 次淋出液, 共收集 14 次淋出液, 测定淋出液的体积和电导率及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等盐基离子含量, 淋洗试验结束后将土柱里的土壤取出, 风干并过 2 mm 筛后用于土壤交换性盐基离子指标的测定。

1.3 测定指标及方法

淋出液的电导率采用电导率仪(DDS-11A 型)测定^[15]; 淋出液的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量参照彭瑞兴^[16]的方法, 采用火焰原子吸收分光光度法测定。土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 含量参照鲍士旦等^[17]的方法, 其中土壤交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用原子吸收法测定, 交换性 K^+ 和 Na^+ 采用火焰光度法测定。土壤 pH 值按照土壤和去离子水 1:2.5(m/V) 混匀后, 采用电位法测定^[18]; 而烟秆生物炭的 pH 值按照生物炭和去离子水 1:20(m/V) 混匀后, 采用电位法测定^[19]。土壤田间持

水量采用环刀法测定^[20]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 进行数据处理及图表制作, 采用 SPSS 19.0 进行双因素方差分析。

2 结果与分析

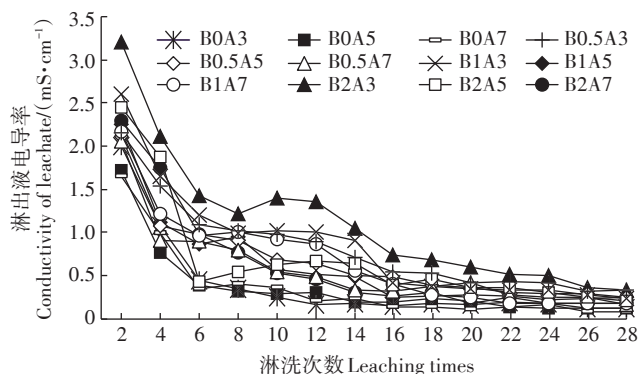
2.1 各处理土壤淋出液中电导率的变化

电导率可以反映土壤中水溶性离子的溶出状况。在模拟酸雨条件下, 烟田土壤添加生物炭后, 所有处理组合其淋出液的电导率随淋洗次数的增加呈下降趋势(图 1)。经前两次淋洗后 B2A3 处理下淋出液电导率最高, 为 $3.2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, B0A7 处理最低, 为 $1.65 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。相同 pH 值酸雨淋洗下, 添加生物炭的处理淋出液电导率大于无生物炭添加的处理, 且随生物炭添加量的增加淋出液电导率增加。B2 处理下淋出液电导率分别为 B0、B0.5、B1 处理下的 2.61、1.09、1.17 倍。相同生物炭添加量下, 随淋洗液 pH 值升高, 淋出液电导率降低, A3 处理下淋出液电导率分别为 A5 和 A7 处理的 1.37 倍和 1.58 倍。在淋洗结束时, 各处理淋洗液的电导率均处于 $0.5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下。

2.2 添加生物炭对淋出液中交换性盐基离子的影响

2.2.1 对淋出液中 Ca^{2+} 含量的影响

由图 2 可知, 整体上, 随淋洗次数的增加, 各处理淋出液 Ca^{2+} 含量呈降低的趋势。B1A3 和 B1A7 处理在第 4 次淋洗时 Ca^{2+} 淋出量达到最高点, 分别为



B0、B0.5、B1、B2 分别代表向土壤中添加质量比为 0、0.5%、1%、2% 的生物炭; A3、A5、A7 分别代表淋洗液的 pH 值为 3.5、5.6、7.0, 下同。
B0、B0.5、B1 and B2 respectively represent adding biochar with mass ratio of 0, 0.5%, 1% and 2% to the soil; A3, A5 and A7 respectively represent pH values of leaching solution of 3.5, 5.6 and 7.0 respectively.

The same below

图 1 不同 pH 值酸雨淋洗下生物炭添加对淋出液电导率的影响

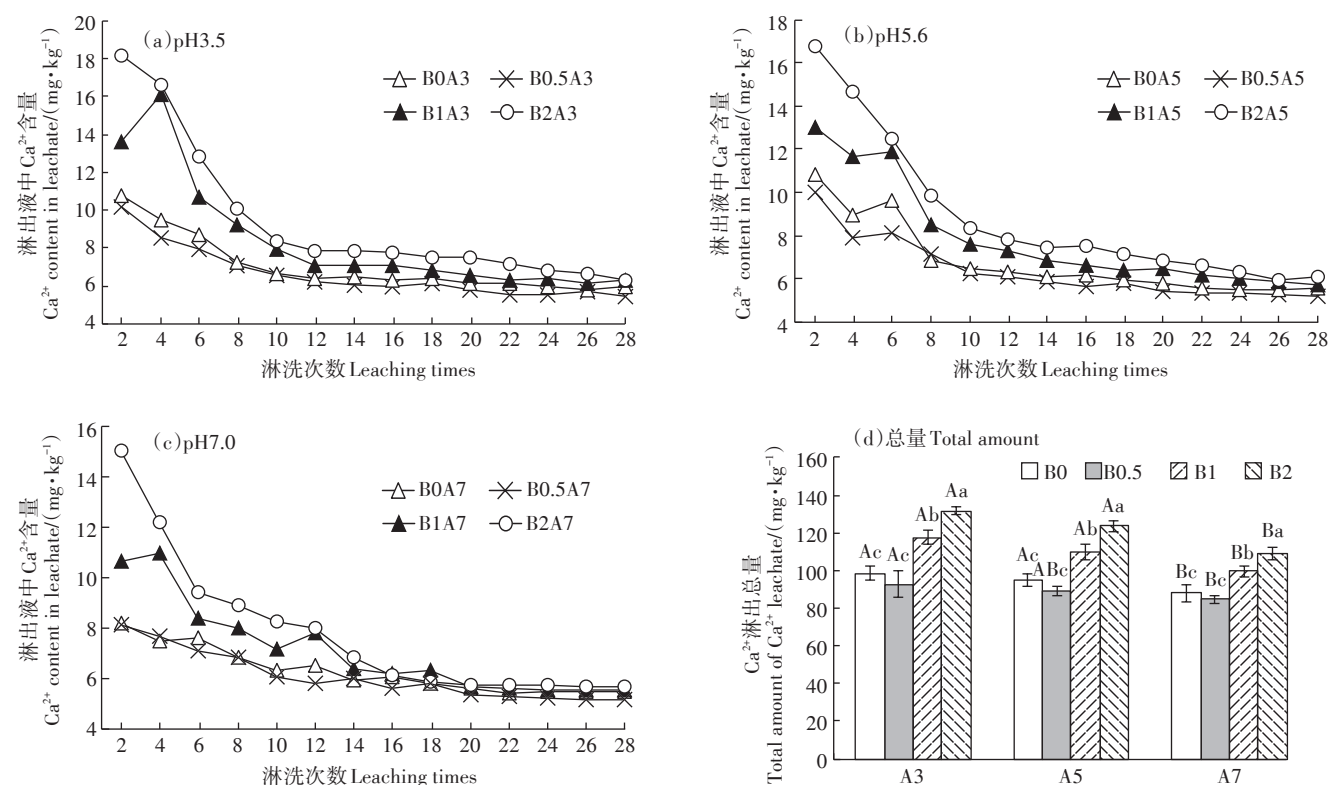
Figure 1 Effect of biochar addition on the conductivity of leachate under different pH acid rain

16.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 10.96 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其余处理均在第 2 次淋洗时达到最高点。淋洗前期(前 10 次淋洗), 淋出液 Ca^{2+} 含量随淋洗次数的增加变幅较大, 而淋洗后期(第 10 次后)淋出液 Ca^{2+} 含量趋于稳定, 各处理淋洗前期 Ca^{2+} 淋出量平均为淋洗后期的 1.68~2.91 倍。同一 pH 值处理下, 淋出液 Ca^{2+} 含量为 $\text{B2} > \text{B1} > \text{B0} > \text{B0.5}$, B0.5 与 B0 之间的差异不显著, 且均显著低于 B1 和 B2 处理。相同生物炭添加下, 随淋洗液 pH 值升高淋出液 Ca^{2+} 含量降低, A3 与 A5 处理 Ca^{2+} 淋出总量差异不显著, 分别为 A7 处理的 1.15 倍和 1.09 倍。与 B0 处理相比, B2A3 、 B2A5 、 B2A7 处理 Ca^{2+} 淋出总量分别升高 115.03%、114.09%、116.90%, B1A3 、 B1A5 、 B1A7 处理分别升高 65.94%、59.56%、64.66%, B0.5A3 、 B0.5A5 、 B0.5A7 处理分别降低 21.06%、23.38%、18.30%。

2.2.2 对淋出液中 Mg^{2+} 含量的影响

各处理淋出液 Mg^{2+} 含量均随淋洗次数的增加呈下降趋势(图 3), 且均在前两次淋洗后达到最大值,

前两次淋洗下, 各处理 Mg^{2+} 淋出量在 B2A3 处理中最大, 为 8.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, B0A3 中最小, 为 6.93 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。淋洗前期(前 10 次淋洗)各处理淋出液中 Mg^{2+} 含量为淋洗后期(第 10 次后)的 1.34~1.96 倍。相同 pH 值淋洗液处理下, B2 处理 Mg^{2+} 淋出量均显著高于 B0 、 B0.5 和 B1 处理, B2 处理下每两次 Mg^{2+} 淋出量平均为 B0 、 B0.5 、 B1 处理的 1.30、1.67、1.34 倍。 B2A3 、 B2A5 、 B2A7 处理中 Mg^{2+} 淋出总量平均为 84.94、82.87、81.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别为相同 pH 值淋洗液处理下 B0 处理的 1.54、1.24、1.14 倍, B0.5 处理的 1.51、1.61、1.58 倍, B1 处理的 1.34、1.32、1.29 倍。当淋洗液 pH 值为 3.5 时, B0 、 B0.5 和 B1 处理之间 Mg^{2+} 淋出总量无显著差异, 均显著低于 B2 处理。当淋洗液 pH 值为 5.6 和 7.0 时, Mg^{2+} 淋出总量为 $\text{B2} > \text{B0} > \text{B1} > \text{B0.5}$, 4 种生物炭处理之间均存在显著差异, B0A5 和 B0A7 处理中 Mg^{2+} 淋出总量分别为 B0.5A5 、 B1A5 和 B0.5A7 、 B1A7 处理的 1.29、1.06 倍和 1.39、1.13 倍。 B0 处理下, 不同 pH 值淋洗液



图中不同小写字母表示相同 pH 值酸雨淋洗下添加不同量生物炭后各盐基离子总量之间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示相同生物炭添加量下不同 pH 值酸雨淋洗后各盐基离子淋出总量之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters in the figure indicate that there is significant difference between the total amount of each base ion after adding different amount of biochar under the same pH value acid rain leaching ($P < 0.05$); different capital letters in the figure indicate that the total amount of each base ion leached by acid rain with different pH value under the same amount of biochar is significantly different ($P < 0.05$). The same below

图 2 淋出液中 Ca^{2+} 含量

Figure 2 Ca^{2+} content in leachate

Mg^{2+} 淋出总量均无显著差异;B0.5和B1处理下,A5与A3和A7处理之间均无显著差异,但A3处理显著高于A7处理;B2处理下, Mg^{2+} 淋出总量表现为A3>A5>A7。

2.2.3 对淋出液中 K^+ 含量的影响

各处理淋出液 K^+ 含量均随淋洗次数的增加呈下降趋势(图4)。B2A3在前两次淋洗后淋出液 K^+ 含量最高,为 $7.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,B0.5A7最低,为 $1.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相同pH值淋洗液处理下,淋洗前期(淋洗前10次)B2处理淋出液中 K^+ 含量随淋洗次数的增加降幅最大,分别比B0、B0.5、B1处理显著提高146.48%、199.82%、108.96%,B0、B0.5、B1处理随淋洗次数的增加淋出液 K^+ 含量降低缓慢。相同生物炭添加量处理中,随淋洗液pH值升高 K^+ 淋出总量降低,A3处理下 K^+ 淋出总量分别比A5和A7处理平均提高12.85%和39.14%。B0和B0.5处理下,A3和A5处理 K^+ 淋出总量差异不显著且均高于A7处理;B1和B2处理下, K^+ 淋出总量表现为A3>A5>A7,且不同pH值淋洗液之间存在显著差异。相同pH值淋洗液处理下, K^+ 淋出总量为B2>B1>B0>B0.5,B2处理 K^+ 淋出总量均显著高于B0、B0.5和B1处理。A3处理下, K^+ 淋出总量表现为B2>B1>B0>

B0.5,且不同生物炭添加量下 K^+ 淋出总量均存在显著差异;A5和A7处理下,B1处理显著高于B0.5处理,B0和B0.5处理之间无显著差异;A7处理下,B1处理显著高于B0处理,B0和B0.5处理之间无显著性差异。B2A3、B2A5、B2A7处理中 K^+ 淋出总量平均为26.99、21.32、18.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为无生物炭添加处理中的2.16、1.86、2.00倍,为添加0.5%生物炭处理的2.88、2.23、2.43倍,为添加1%生物炭处理的1.85、1.72、1.76倍。

2.2.4 对淋出液中 Na^+ 含量的影响

如图5所示, Na^+ 淋出量随淋洗次数的增加而降低,各处理在前两次淋洗后 Na^+ 淋出量达到最大值,前两次淋洗下,各处理 Na^+ 淋出量在B2A3处理中最大,为 $2.57\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,B0.5A7中最小,为 $1.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相同pH值淋洗液处理下,每两次淋洗后B2处理淋出液中 Na^+ 含量均最高,平均为B0、B0.5、B1处理的1.31、2.48、1.50倍。A3处理下, Na^+ 淋出总量表现为B2>B0>B1>B0.5,不同生物炭添加量之间存在显著差异,B2处理下淋出液 Na^+ 淋出总量分别为B0、B0.5、B1处理的1.25、2.11、1.31倍;A5处理下, Na^+ 淋出总量表现为B2>B0>B1>B0.5;A7处理下, Na^+ 淋出总量表现为B2>

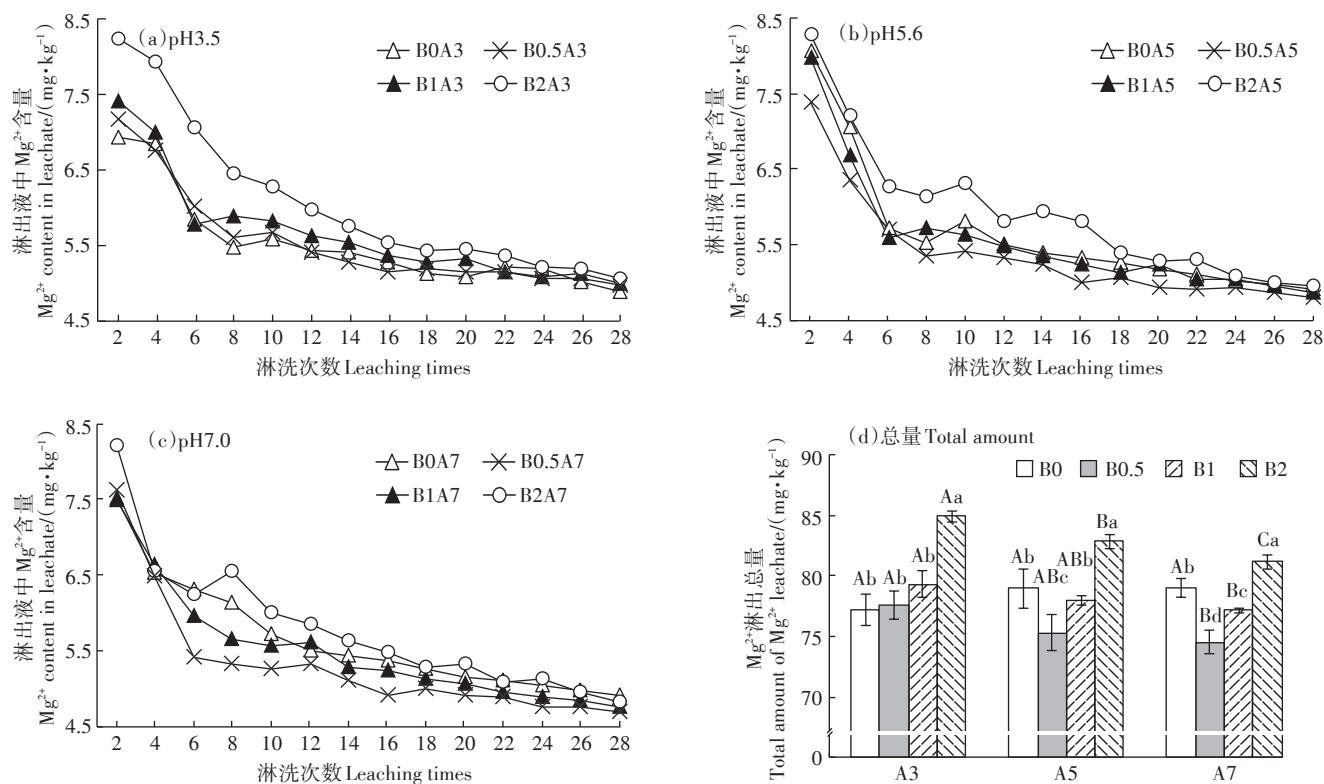
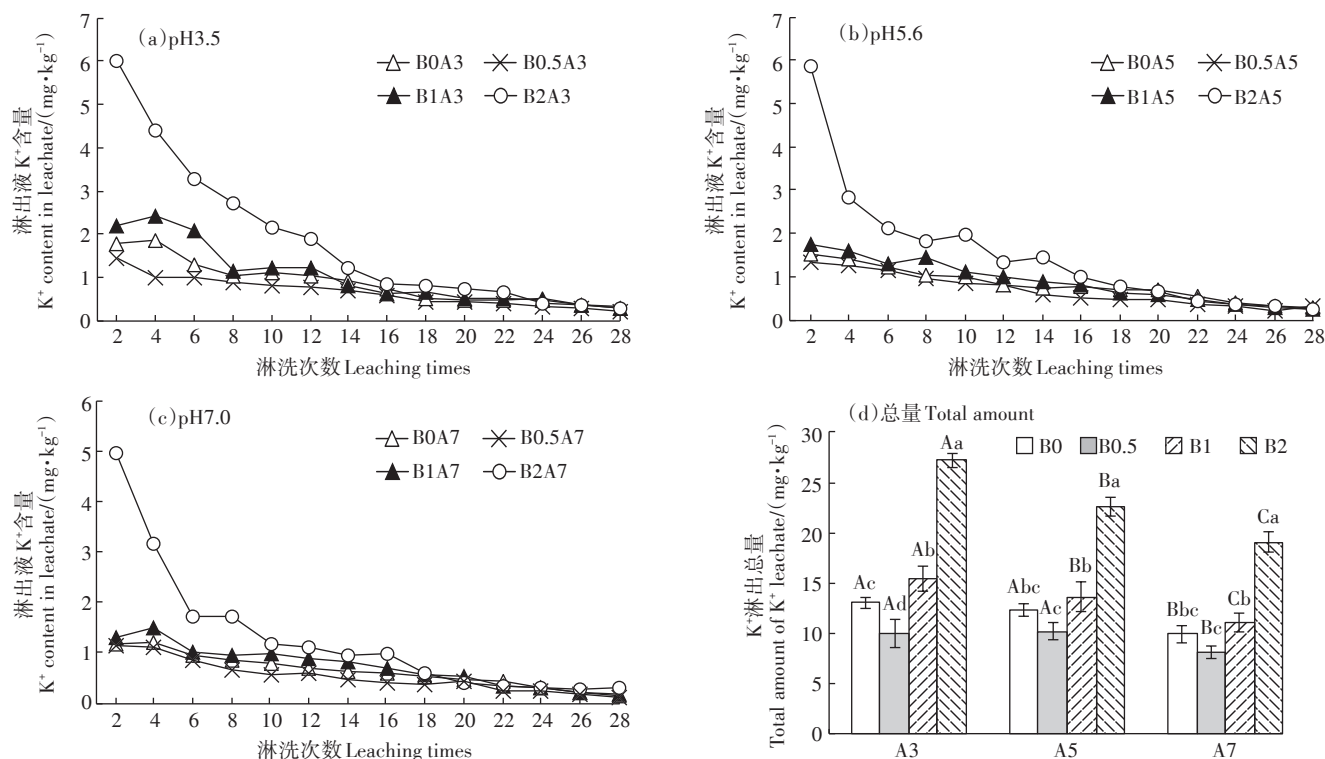
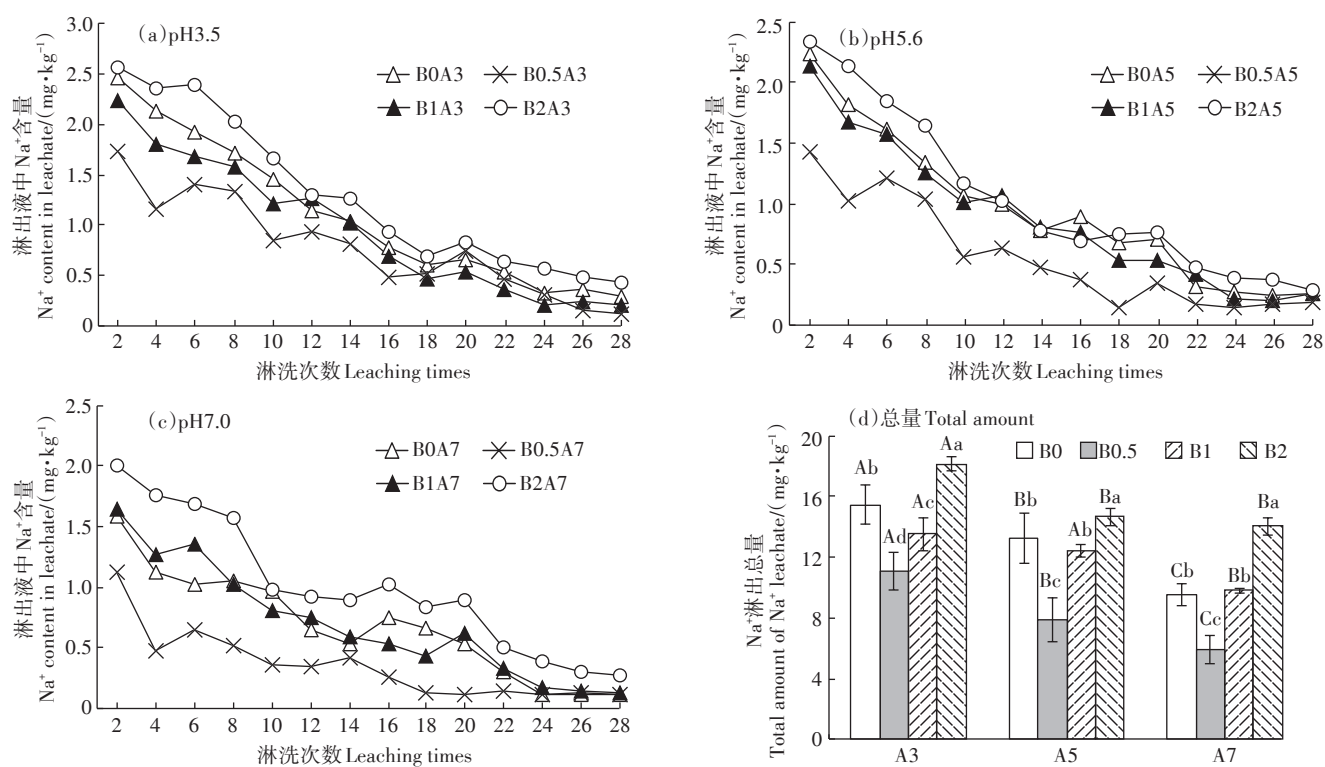


图3 淋出液中 Mg^{2+} 含量

Figure 3 Mg^{2+} content in leachate

图4 淋出液中 K^+ 含量Figure 4 K^+ content in leachate图5 淋出液中 Na^+ 含量Figure 5 Na^+ content in leachate

B1>B0>B0.5;同时,A5和A7处理下,B1与B0间不存在显著差异。相同生物炭添加量处理中,随淋洗液

pH值升高 Na^+ 淋出总量降低,A3处理下 Na^+ 淋出总量分别比A5和A7处理平均提高22.31%和63.59%。B0

和B0.5处理下,Na⁺淋出总量表现为A3>A5>A7,且不同pH值淋洗液之间存在显著差异;B1处理下,A3与A5之间不存在显著差异且均显著高于A7处理;B2处理下,A5与A7处理之间不存在显著差异且均显著低于A3处理。

2.3 生物炭添加量与酸雨pH值对4种元素迁移的影响

对淋出液中4种盐基离子总量及迁移率进行分析,结果见图6。从离子迁移量来看,经不同pH值淋洗液及不同生物炭添加量处理后,Ca²⁺的淋失总量最大,Mg²⁺次之,K⁺与Na⁺的淋失总量差异不显著,同时各处理盐基离子的迁移量均小于原土中各离子的含量。各元素迁移率(淋出液中各离子含量与原土及不同生物炭添加量向土壤中输入的离子之和的比值),表现为Mg²⁺>Ca²⁺>Na⁺>K⁺,各处理均以Mg²⁺最易淋失,并且随生物炭添加量增加,生物炭向土壤中带入的盐基离子量增加,各元素迁移率降低。

2.4 添加生物炭对淋洗后土壤pH值的影响

经不同pH值淋洗液淋洗后,添加生物炭的处理土壤pH值整体上均高于无添加生物炭的处理(图7)。相同生物炭添加量处理下,A3和A5处理下土壤pH值无显著差异且均显著低于A7处理。相同pH值淋洗液处理下,土壤pH值表现为B2>B1>B0.5>B0,B0.5和B0处理之间无显著差异。与B0处理相比,经pH值为3.5、5.6和7.0的淋洗液淋洗后,添加0.5%生物炭的土壤pH值分别上升0.24、0.04个和0.14个单位,呈现小幅上升的趋势;而添加1%生物炭的土壤pH值分别上升1.20、1.22个和1.24个单位,添加2%生物炭的土壤pH值分别上升2.16、2.09个和1.74个单位。添加2%生物炭的处理在不同pH值淋洗液处理下对土壤pH值的提升效果最好,添加1%生物炭

的处理次之,添加0.5%生物炭的处理对土壤pH值的提升效果最低。

2.5 添加生物炭对淋洗后土壤中交换性盐基离子的影响

整体上,土壤中4种交换性盐基离子含量均随淋洗液pH值升高和生物炭添加量的增加而增加(图8)。B2A7处理土壤的交换性Ca²⁺含量最大,为5.03 g·kg⁻¹,B0A3处理最低,为1.90 g·kg⁻¹。相同pH值淋洗液处理下,B2处理土壤交换性Ca²⁺含量平均比B0处理提高71.31%,比B0.5和B1处理平均提高77.98%和44.74%。A7处理中土壤交换性Ca²⁺含量为B2>B1>B0.5>B0,B0.5和B1处理之间无显著差异;A5处理中土壤交换性Ca²⁺含量为B2>B1>B0>B0.5,A3处理为B2>B1>B0.5>B0,且A5和A3处理中B0和B0.5处理之间差异不显著。相同生物炭添加量中,A3处理下土壤交换性Ca²⁺含量平均比A5和A7处理降低40.57%和56.81%。B2和B1处理下,土壤交换性Ca²⁺含量为A7>A5>A3,且不同pH值淋洗液处理之间均存在显著差异;B0.5处理下,A3和A5之间差异不显

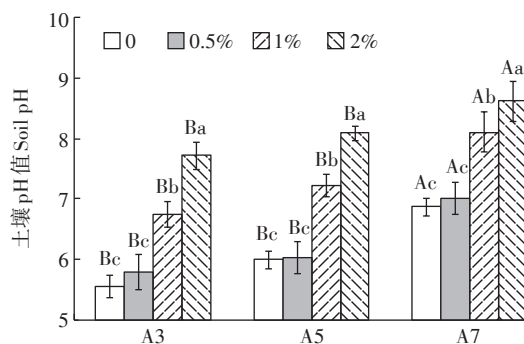
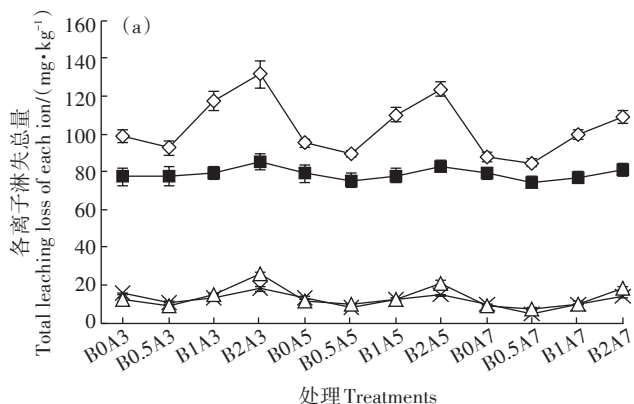


图7 淋洗后土壤pH

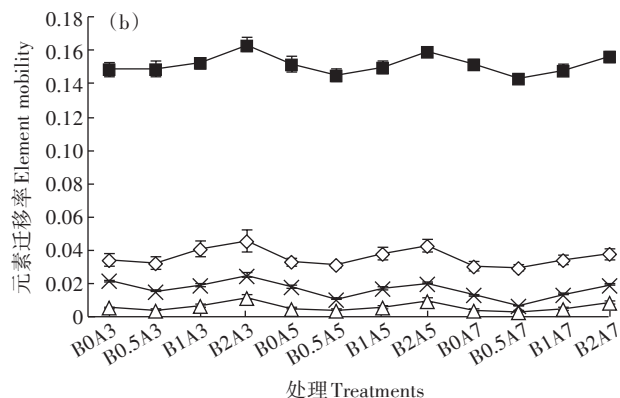
Figure 7 Soil pH after leaching



◇ Ca²⁺ ■ Mg²⁺ △ K⁺ × Na⁺

图6 淋出液中各离子迁移情况

Figure 6 Migration of ions in leachate



著;B0处理下,A5和A7处理之间差异不显著。

当淋洗液pH值为7.0时,不同生物炭添加量之间交换性 Mg^{2+} 含量均存在显著差异,B2处理最高,为 $0.58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比B0、B0.5和B1处理平均提高140.57%、28.69%和16.87%。当淋洗液pH值为5.6时,B2和B1及B1和B0.5处理之间差异不显著,B2处理土壤交换性 Mg^{2+} 含量较B0、B0.5和B1处理分别提高67.76%、21.63%和11.07%。淋洗液pH值为3.5时,B2处理土壤交换性 Mg^{2+} 含量均值为 $0.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比B0、B0.5和B1处理分别提高61.33%、44.84%和34.70%,B0、B0.5和B1之间差异不显著。相同生物炭添加量下,A3处理比A5和A7处理土壤交换性 Mg^{2+} 含量平均降低35.92%和49.80%。B0处理下,A7和A5处理差异不显著;B0.5、B1和B2处理下,不同pH值淋洗液之间差异显著。

B2A7处理下土壤交换性 K^+ 含量最高,为 $2.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较B2A3和B2A5处理提升了106.08%和39.43%。相同pH值淋洗液处理下,土壤交换性 K^+ 含量均表现为 $B2>B1>B0.5>B0$,B2处理土壤交换性 K^+ 含量平均比B0、B0.5、B1处理提高331.69%、204.73%、137.41%。A3处理下,B0、B0.5和B1处理之间差异不显著;A5处理下,不同生物炭添加量之间均

存在显著差异;A7处理下,B0和B0.5处理之间差异不显著。相同生物炭添加量下,A3处理土壤交换性 K^+ 含量平均比A5和A7处理降低32.43%和51.13%。B0和B0.5处理下,A3和A5处理之间差异不显著;B1处理下,A5和A7处理之间差异不显著;B2处理下,不同pH值淋洗液之间均存在显著差异。

相同pH值淋洗液淋洗下,土壤交换性 Na^+ 含量均表现为 $B2>B1>B0.5>B0$,B2处理中土壤交换性 Na^+ 含量平均为B0、B0.5、B1处理的3.13、2.13、1.73倍。A3和A5处理下,不同生物炭添加量之间均存在显著差异;A7处理下,B0.5和B1之间差异不显著。相同生物炭添加量下,土壤交换性 Na^+ 含量为 $A7>A5>A3$,A7处理土壤交换性 Na^+ 含量平均为A3和A5处理的1.31倍和1.15倍。B0处理下,A5和A7处理之间差异不显著;B0.5、B1和B2处理下,A3和A5处理之间差异不显著。

综上,与无生物炭添加处理相比,土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量整体上均随生物炭添加量的升高而升高。

3 讨论

土壤对酸碱的敏感性通常与盐基离子的淋洗损

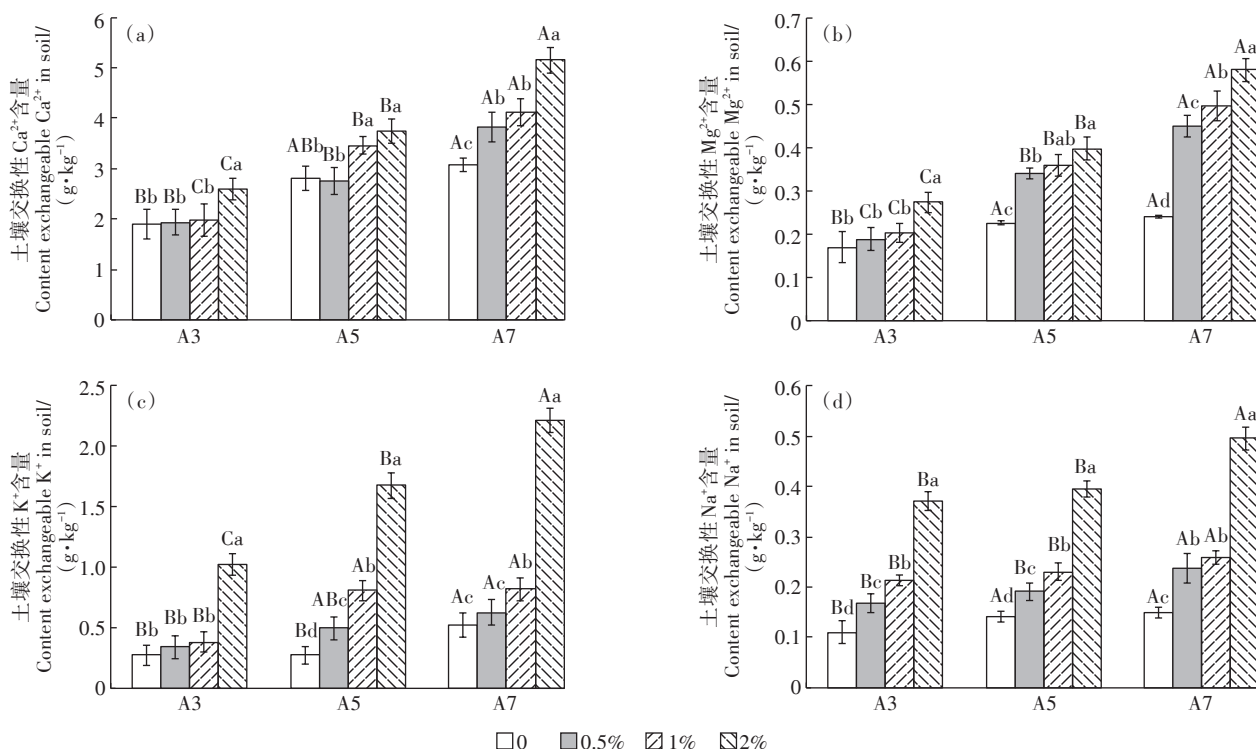


图8 土壤中交换性盐基离子含量变化

Figure 8 Change of exchangeable base ion content in soil

失密切相关^[21-22]。有研究表明,土壤中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 4种盐基离子的溶出量常随酸雨pH值的升高而降低,并且 Ca^{2+} 变化最明显且溶出量最大^[23-24]。本试验中,相同生物炭添加量下,4种盐基离子淋出总量均随淋洗液pH值升高而降低,淋出液中 Ca^{2+} 的淋失总量最大,但 Mg^{2+} 最易淋失。而凌大炯等^[25]对砖红壤的模拟酸雨淋溶试验表明,在不同pH值酸雨淋洗下 K^+ 最易淋失,这可能与土壤本身盐基离子含量及生物炭添加有关, Ca^{2+} 的淋失总量虽最高,但土壤本身及由生物炭向土壤输入的 Ca^{2+} 含量也最高,而 Mg^{2+} 在土壤样品中含量最低,虽然由生物炭向土壤输入的 Mg^{2+} 含量也最低,但 Mg^{2+} 的淋失总量仅次于 Ca^{2+} ,综合来看, Mg^{2+} 的淋失率较高。

淋洗结束后,土壤中4种交换性盐基离子含量均随淋洗液pH值降低而降低,且当淋洗液pH值一定时,土壤中各交换性盐基离子在2%生物炭处理时最高。李九玉等^[26]的研究结果表明,生物炭增加土壤交换性盐基离子的能力主要由生物炭本身盐基离子的总量所决定。淋洗后各处理土壤中4种盐基离子含量基本表现为 $Ca^{2+}>K^+>Mg^{2+}>Na^+$,而土壤初始为 $Ca^{2+}>K^+>Na^+>Mg^{2+}$,由生物炭带入土壤的盐基离子为 $Ca^{2+}>K^+>Na^+>Mg^{2+}$,生物炭与初始土壤中 Na^+ 含量均高于 Mg^{2+} ,但淋洗后土壤中 Na^+ 含量低于 Mg^{2+} ,这可能是由于酸雨淋洗下,导致土壤及生物炭某些矿物风化释放出盐基离子所致,并且有研究表明 Na^+ 在酸性降雨淋洗下不发生矿物风化作用^[24],因此导致淋洗后土壤 Mg^{2+} 的含量大于 Na^+ 。同时本研究中 Ca^{2+} 在土壤及生物炭中含量均最高,淋失总量也最大,淋洗后在土壤4种盐基离子中占比最高。袁金华等^[27]研究发现,生物炭中交换性 Ca^{2+} 含量能解释86.1%的土壤交换性盐基总量升高原因,且其在提高土壤交换性盐基总量中作用为93.7%,在生物炭改良土壤中起重要作用。

生物炭含有丰富的碱性物质,其用于改良酸性土壤时,土壤中盐基离子含量通常取决于生物炭中的盐基离子含量^[28]。岳燕等^[29]研究了不同添加量生物炭对盐渍化土壤盐分淋洗的影响,结果表明生物炭可显著提高表层土壤的盐分淋洗量。本研究中,与无生物炭添加的处理相比,生物炭添加显著提高淋出液和土壤中各盐基离子含量,且不同用量生物炭对盐基离子的淋洗损失和土壤留存量具有重要影响。当淋洗液pH值一定时,淋出液 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 的淋出总量为 $B2>B1>B0>B0.5$, $B0.5$ 与 $B0$ 处理之间3种离子的淋出总量差异不显著;而 Na^+ 的淋出总量为 $B2>B0>B1>B0.5$,

$B0$ 与 $B1$ 处理之间差异不显著。因此,整体来看, $B2$ 处理4种盐基离子的淋失总量均最高, $B0.5$ 处理均最低; $B0$ 处理淋出液中4种盐基离子含量均高于 $B0.5$ 处理,可能是因为少量生物炭添加对盐基离子的吸附作用大于由淋洗引起的阳离子交换作用,而随着生物炭添加量的增加,由生物炭向土壤输入的盐基离子增加,其阳离子交换作用增加。在相同生物炭添加量下,淋洗液pH值为3.5时各盐基离子的淋出总量均最高,表明在生物炭添加下,酸沉降同样会加剧土壤盐基离子的淋洗损失。

生物炭可提高土壤pH值和盐基离子含量已被很多研究所证实^[9,11,27],生物炭除了本身含有丰富的盐基离子外,其较大的比表面积和丰富的有机官能团能吸附较多的盐基离子。Yuan等^[30]的研究表明,生物炭可极大提高土壤对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 NH_4^+ 的吸附能力。本研究表明,酸雨淋洗条件下,较高生物炭添加量(2%和1%)会增加盐基离子的淋失总量,但与无生物炭的处理相比,在模拟酸雨条件下,随淋洗液pH值升高和生物炭添加量的增加,土壤pH值及各盐基离子含量增加,其中以 $B2A7$ 处理的效果最佳。试验结果初步表明,在我国西南酸雨地区,可以通过施用生物炭来改善农田缓冲性能并保持土壤肥力。

4 结论

(1)酸雨淋洗条件下,较高生物炭添加量(2%和1%)会增加盐基离子的淋失总量。相同处理下,淋出液中 Ca^{2+} 的淋失总量最大, Mg^{2+} 最易淋失。

(2)相同生物炭添加量下,4种盐基离子淋出总量均随淋洗液pH值升高而降低,淋洗液pH值为3.5时各盐基离子的淋出总量均最高,表明在生物炭添加下,酸沉降同样会加剧土壤盐基离子的淋洗损失。相同pH值淋洗液下, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 的淋出总量为2%生物炭>1%生物炭>无生物炭处理>0.5%生物炭,而 Na^+ 的淋出总量为2%生物炭>无生物炭处理>1%生物炭>0.5%生物炭。

(3)在酸雨淋洗条件下,与无生物炭处理相比,添加生物炭的处理可提高土壤pH值及交换性盐基离子的含量,生物炭添加量为2%时对土壤交换性盐基离子的提升效果最佳。淋洗后各处理土壤中4种盐基离子含量表现为 $Ca^{2+}>K^+>Mg^{2+}>Na^+$ 。

参考文献:

[1] Wang X Q, Liu Z, Niu L, et al. Long-term effects of simulated acid

- stress on a staple forest plant, *Pinus massoniana*, Lamb: A Proteomic analysis[J]. *Trees*, 2013, 27(1):297-309.
- [2] 2018年《中国生态环境状况公报》(摘录一)[J]. 环境保护, 2019(11):47-53. 2018《Bulletin of China's ecological environment》(extract 1)[J]. *Environmental Protection*, 2019(11):47-53.
- [3] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2):238-244. XU Ren-kou. Research progress of soil acidification and its regulation[J]. *Soil*, 2015, 47(2):238-244.
- [4] 于天仁. 我国农业持续发展和生态环境中重大土壤问题的化学机理研究建议[J]. 土壤, 2001, 33(3):119-122. YU Tian-ren. Suggestions on chemical mechanism of major soil problems in agricultural sustainable development and ecological environment in China[J]. *Soil*, 2001, 33(3):119-122.
- [5] Berge T W, Muras A. Predicting recovery from acid rain using the micro-spatial heterogeneity of soil columns downhill the infiltration zone of beech stem flow: Introduction of a hypothesis[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2016, 2(3):154-160.
- [6] 刘俐, 周友亚, 宋存义, 等. 模拟酸雨淋溶下红壤中盐基离子释放及缓冲机制研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2):49-55. LIU Li, ZHOU You-ya, SONG Cun-yi, et al. Release of basic cations in red soil under simulated acid rain and buffering mechanism[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2):49-55.
- [7] 贾润语. 施加盐基离子对土壤中Cd生物有效性及水稻Cd累积的影响[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2019. JIA Run-yu. Effects of base ions on bioavailability of Cd in soil and Cd accumulation in rice [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.
- [8] 李青峰, 邢旭光, 马孝义. 盐基离子对土壤持水及收缩特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2):107-112. LI Qing-feng, XING Xu-guang, MA Xiao-yi. Effects of base ions on soil water holding capacity and shrinkage[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2018, 36(2):107-112.
- [9] 张林, 林庆毅, 张梦阳, 等. 生物炭对不同土壤改良及生态效应影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15):54-58. ZHANG Lin, LIN Qing-yi, ZHANG Meng-yang, et al. Research progress on effects of biochar on soil improvement and ecological effects[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(15):54-58.
- [10] 郭春雷, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5):1205-1213. GUO Chun-lei, LI Na, PENG Jing, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(5):1205-1213.
- [11] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2):468-475. YUAN Jing-jing, TONG Yan-an, LU Shao-hui, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer application on soil fertility and jujube yield and quality[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2):468-475.
- [12] 宋丹丹. 生物炭施用对喀斯特地区黄壤理化性质的影响[D]. 重庆:西南大学, 2018. SONG Dan-dan. The effects of biochar on soil physical and chemical in karst area[D]. Chongqing:Southwestern University, 2018.
- [13] 彭玉龙, 郑梅迎, 刘明宏, 等. 遵义烟田土壤pH的空间分布与演变特征[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(3):47-54. PENG Yu-long, ZHENG Mei-ying, LIU Ming-hong, et al. Distribution and evolution characteristics of soil pH in Zunyi tobacco planting area[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2019, 40(3):47-54.
- [14] 田文杰, 王小庆, 李冬, 等. 模拟酸雨作用下红壤中多环芳烃的释放及纵向迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):1928-1932. TIAN Wen-jie, WANG Xiao-qing, LI Dong, et al. Release and vertical migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in red soil under simulated acid rain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1928-1932.
- [15] 东亚地区酸沉降监测网中国分中心. 东亚地区酸沉降监测技术指南[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:11-16. China branch of East Asia acid deposition monitoring network. Technical guidelines for monitoring acid deposition in East Asia[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 2002:11-16.
- [16] 彭瑞兴. FAAS法测定大气降水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} [J]. 福建分析测试, 2004(1):1908-1909. PENG Rui-xing. Determination of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in rainfall by FAAS[J]. *Fujian Analytical Test*, 2004(1):1908-1909.
- [17] 鲍士旦, 江荣风, 杨超光. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2016. BAO Shi-dan, JIANG Rong-feng, YANG Chao-guang. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2016.
- [18] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第2部分:土壤pH的测定: NY/T 1121.2—2006[S]. 北京:农业部, 2006:3-5. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil Testing Part 2: Method for determination of soil pH: NY/T 1121.2—2006[S]. Beijing:Ministry of Agriculture, 2006:3-5.
- [19] Wu W X, Yang M, Feng Q B, et al. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012(47):268-276.
- [20] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量[J]. 中国新技术新产品, 2014, 5(9):184. YUAN Na-na. Determination of soil field water holding capacity by indoor ring knife method[J]. *China New Technologies and Products*, 2014, 5(9):184.
- [21] 廖雪菊, 刘甜, 韦宜慧, 等. 模拟酸雨对桉树人工林土壤养分流失的影响[J]. 广西林业科学, 2016, 45(4):397-403. LIAO Xue-ju, LIU Tian, WEI Yi-hui, et al. Effects of simulated acid rain on soil nutrient loss of eucalyptus plantation[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2016, 45(4):397-403.
- [22] 俞元春, 丁爱芳, 胡筋, 等. 模拟酸雨对土壤酸化和盐基迁移的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2001, 25(2):39-42. YU Yuan-chun, DING Ai-fang, HU Jia, et al. Effects of simulated acid rain on soil acidification and base ions transplant[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2001, 25(2):39-42.
- [23] 梁骏, 郑有飞, 李璐, 等. 模拟酸雨对油菜大田土壤酸化及K、Na、Ca、Mg溶出的影响[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2):56-62. LIANG

- Jun, ZHENG You-fei, LI Lu, et al. Effect of simulated acid rain on acidification and dissolution of potassium, sodium, calcium and magnesium in the rape plantation soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2):56-62.
- [24] 张月全, 张海燕, 谢书妮, 等. 酸雨区杉木人工林土壤盐基离子含量动态[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(2):188-194. ZHANG Yue-quan, ZHANG Hai-yan, XIE Shu-ni, et al. Dynamics of the soil base cations in Chinese fir plantations in acid rain region[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2016, 36(2):188-194.
- [25] 凌大炯, 章家恩, 黄倩春, 等. 模拟酸雨对砖红壤盐基离子迁移和释放的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3):444-450. LING Da-jiong, ZHANG Jia-en, HUANG Qian-chun, et al. Influences of simulated acid rain on leaching and release of base ions in latosol[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3):444-450.
- [26] 李九玉, 赵安珍, 袁金华, 等. 农业废弃物制备的生物质炭对红壤酸度和油菜产量的影响[J]. 土壤, 2015, 47(2):334-339. LI Jiu-yu, ZHAO An-zhen, YUAN Jin-hua, et al. Amelioration effects of crop residue-derived biochars on soil acidity and canola yield in red soil[J]. *Soil*, 2015, 47(2):334-339.
- [27] 袁金华, 徐仁扣, 俄胜哲, 等. 生物质炭中盐基离子存在形态及其与改良酸性土壤的关系[J]. 土壤, 2019, 51(1):75-82. YUAN Jin-hua, XU Ren-kou, E Sheng-zhe, et al. Forms of base cations in biochars and their roles in acid soil amelioration[J]. *Soil*, 2019, 51(1):75-82.
- [28] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification: A critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581/582:601-611.
- [29] 岳燕, 郭维娜, 林启美, 等. 加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(4):914-919. YUE Yan, GUO Wei-na, LIN Qi-mei, et al. Salt leaching in the saline soil relative to rate of biochar applied[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4):914-919.
- [30] Yuan J H, Xu R K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China[J]. *Soil Research*, 2012, 50(7):570-578.