

不同土层加入生物质炭对盐分淋洗的影响

岳燕, 林启美, 郭维娜, 李贵桐, 赵小蓉, 伍桂芳

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 生物质炭作为土壤调理剂, 能够显著地改良和培肥土壤, 但对盐渍化土壤盐分淋洗的影响缺乏研究和了解。本研究采用土柱模拟试验, 将蘑菇棒生物质炭以质量比 10%, 添加到内蒙古河套地区硫酸盐盐渍化土壤 0~20 cm, 0~35 cm 和 0~70 cm 的土层中, 并进行淋洗, 测定淋出液和土壤盐分及主要盐分离子含量, 以期了解生物质炭对土壤盐分和主要盐分离子洗脱的影响。结果表明: 加入生物质炭的土柱, 淋洗液出流的时间提前了 34~37 d, 电导率降低至 $< 5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 需要的时间缩短了 94~101 d; 比起 0~20 cm 和 0~70 cm 土层加入生物质炭处理, 0~35 cm 土层加入生物质炭淋出液出流时间最早, 盐分洗脱的效果最好。生物质炭对盐分离子淋洗也产生不同的影响, 促进 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的洗脱, 但抑制 Ca^{2+} 洗脱; 在淋洗初期生物质炭促进 Cl^- 和 SO_4^{2-} 洗脱, 后期促进了 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的洗脱。可见, 生物质炭可用作盐渍化土壤调理剂, 不仅缩短盐分洗脱时间, 而且还可以提高洗盐效率。

关键词: 生物质炭; 盐渍化土壤; 盐分淋洗; 盐分离子

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effect of biochar on salt leaching in different soil layers

YUE Yan, GUO Wei-na, LIN Qi-mei, LI Gui-tong, ZHAO Xiao-rong, WU Gui-fang

(College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing, 100193, China)

Abstract: Biochar, as a soil conditioner, is little known on its impacts on salt leaching of saline soil. In this experiment, 10% rates of mushroom medium biochar was added into different layers (0~20 cm, 0~35 cm, 0~70 cm) in a sulfate saline soil column collected from Hetao area in Inner Mongolia. Following washing with deionized water, the eluent was collected and measured for electrical conductivity (EC) and main ion contents. The study aims to investigate the effect of adding biochar into the different soil layers on leachings of salts and ions. The results showed that the eluent from biochar-amended columns appeared much earlier, by 34~37 days. The time for EC reduction to lower than $5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ was shortened by 94~101 days. Adding biochar into the soil layer of 0~35 cm achieved earlier eluent and better leaching effect compared with other two treatments in which biochar was added into 0~20 cm and 0~70 cm soil layer. Biochar addition had different impacts on ion leaching. It promoted leaching of Na^+ , K^+ and Mg^{2+} , but inhibited Ca^{2+} leaching out of soil. Biochar addition promoted the leaching of both Cl^- and SO_4^{2-} at early stage and the leaching of HCO_3^- and CO_3^{2-} at late stage. The obtained result may imply that the biochar amended into saline soil as a soil conditioners could shorten salt leaching time and increase salt leaching efficiency as well.

Keywords: biochar; saline soil; salt-leaching; salt ions

我国盐渍化耕地面积近 670 万 hm^2 , 约占全国耕地面积的 5%, 主要分布在干旱、半干旱地区^[1]。河套灌区是我国重要的粮食生产区, 由于地下水位高, 蒸发量大, 盐渍化是制约当地农业生产的重要因素之一, 改良盐渍化土壤成为当务之急^[2]。

改良盐渍化土壤首要的是降低盐分含量, 常用的方法和技术包括水利工程、农艺、化学和生物措施等, 其中水利工程措施是降低盐渍化土壤盐分含量最常用的方法。在河套地区春、秋季灌溉洗盐是常用的方法^[3-4]。但是, 由于盐渍化土壤通透性一般

收稿日期: 2014-04-29

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目(2013BAC02B06)

作者简介: 岳燕(1987—), 山东省新泰市人, 博士研究生, 主要研究方向为生物质炭及其对土壤的改良和培肥作用。E-mail: yueyanandyueyan@163.com。

通信作者: 林启美(1961—), 湖北武穴人, 博士生导师, 主要从事土壤生物与生物过程研究。E-mail: linqm@cau.edu.cn。

都很差,不仅降低了灌溉洗盐效率,而且延长了灌溉洗盐时间,严重制约了正常的农事操作。提高灌溉洗盐效率,加快土壤脱盐进程,已成为本地区亟待解决的关键问题之一。

生物质炭是生物质材料热裂解反应的固态产物,一般含碳量高,具有多孔结构和巨大的比表面积^[5]。有研究表明,施用生物质炭能够降低土壤容重^[5-7],促进土壤矿物质颗粒团聚^[8],提高土壤通透性,加快水分入渗和再分配^[9]。但是,关于生物质炭是否会影响盐渍化土壤脱盐过程报道却很少。

鉴于此,本研究通过土柱模拟试验,向内蒙古河套地区常见的盐渍化土壤不同层次加入生物质炭,测定淋洗液和土壤盐分组成及其含量。本研究假设:生物质炭多孔结构能够改善土壤的物理结构,促进盐分离子的淋洗,提高灌溉洗盐效率。本研究的目的在于了解:(1) 不同土层加入生物质炭时,盐渍化土壤盐分淋洗过程的特征及差异;(2) 淋洗脱盐过程中,不同盐分离子淋洗运移的特点与差异;(3) 寻找合适的生物质炭加入土层。

1 材料与方 法

1.1 土壤

供试土壤采自内蒙古自治区鄂尔多斯市十二连城乡东不拉村黄河滩盐渍化耕地,土壤剖面层次为0~20、20~35、35~70 cm,粉沙质壤土,风干后过2 mm筛,基本化学性质见表1。

表1 供试土壤基本化学性质

Table 1 The basic chemical properties of soils

土层 Soil depth /cm	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	pH	电导率 EC /(mS·cm ⁻¹)	全盐量 Salt content /(g·kg ⁻¹)
0~20	6.54	9.67	1.60	10.04
20~35	6.03	9.74	0.70	5.86
35~70	5.06	9.45	0.31	3.86

1.2 生物质炭

生物质炭购自北京大兴区李家场生物质燃气站,原材料为蘑菇棒,裂解温度400℃~500℃,反应时间约为3 h。基础性状为:pH 8.94,C 43.83%,H 1.56%,O 2.25%,N 1.38%,阳离子K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺含量分别为1 238.97 mg·kg⁻¹、333.94 mg·kg⁻¹、80.00 mg·kg⁻¹、61.00 mg·kg⁻¹,阴离子Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻和HCO₃⁻含量分别为177.25 mg·kg⁻¹、316.80 mg·kg⁻¹、90.00 mg·kg⁻¹、701.50 mg·kg⁻¹。粉碎过2 mm筛备用。

1.3 土 柱

土柱用灰色的PVC管制成,厚度4 mm,高80 cm,内径15 cm。底部黏连PVC板,中间留直径为2 mm孔,塞入橡胶塞,并连接硬塑管,淋出液承接于烧杯中,并用保鲜膜封盖,以减少水分蒸发和尘土污染。

1.4 土柱淋洗试验

实验装置如图1所示。先在土柱底层放置双层纱布,然后添加1 cm厚的石英砂(<2 mm),再放置双层纱布。根据自然土壤剖面层次和厚度,按照土壤容重为1.50 g·cm⁻³,称取所需土壤,将生物质炭分别与0~20 cm,0~35 cm和0~70 cm的土层按照质量比10%混合均匀后依次装填土柱,每次装填厚度为10 cm,各处理分别记为B₁、B₂、B₃;不加生物质炭的处理记为B₀。为降低界面效应,在土层表面放置双层纱布,再添加1 cm厚的石英砂(2 mm),最后放置双层纱布。每个处理做3个土柱。

用医用吊瓶向土柱滴加去离子水(120滴·min⁻¹),保持约1 cm的静水头,记录淋出液出现的时间,淋洗液体积达到约10 ml时测定电导率,电导率基本不变时终止试验。根据相邻2次EC值平均值偏差最小,将急降(P1)、缓降(P2)与稳定(P3)三个阶段(见图2)的淋出液混合在一起,测定八大盐分离子含量。约2周后采取土柱中3层土壤样品,风干后,测定八大盐分离子含量。

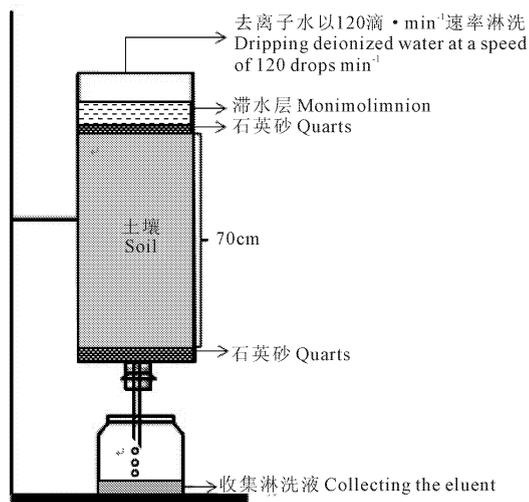


图1 土柱盐分淋洗装置

Fig.1 The apparatus of salt leaching in soil column

1.5 测定项目与方法

土壤电导率用5:1水土比浸提电导仪测定,淋出液电导率直接用电导仪测定。土壤盐分离子用去离子水浸提(5:1水土比),滤液中的K⁺、Na⁺用火焰光度计测定,Ca²⁺、Mg²⁺用EDTA滴定法,SO₄²⁻用EDTA间接络合滴定法,Cl⁻用硝酸银滴定法,

HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 用双指示剂 - 中和滴定法。阴阳离子之和粗略地视为土壤全盐量。淋出液过滤后, 直接用上述方法测定八大盐分离子浓度。

1.6 统计分析方法

所有数据为 3 次重复的平均值, 用单因素方差分析进行差异显著性检验, 用最小显著性差异表示 ($\text{LSD}_{0.05}$)。

2 结果与分析

2.1 淋洗液电导率

不加生物质炭的土柱 B_0 , 第 49 天收集到淋洗液, 淋出液的电导率下降到 $5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下, 即大约咸水标准以下 (全盐含量 $> 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 需要 120 d (图 2); 而加入生物质炭的土柱, 淋洗液出流的时间提前了 34 ~ 37 d, 即在第 10 ~ 15 天出流。电导率降低至 $5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下缩短了 94 ~ 101 d。不同土层加入生物质炭的 3 个处理中, 0 ~ 35 cm (B_2) 土层加入生物质炭的处理, 第 10 天就收集到出流, 第 29 天淋出液的 EC 值就降至 $5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下。通体加入生物质炭, 即 0 ~ 75 cm 土层加入生物质炭, 并没有表现出出流提前和淋出液 EC 快速降低的现象。淋洗结束时, 所有处理淋出液的 EC 值比较接近, $2.64 \sim 3.82 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

2.2 淋洗液离子浓度

所有土柱淋出液中阳离子主要是 Na^+ , 其次是

Mg^{2+} , 而 K^+ 和 Ca^{2+} 含量较低 (图 3)。淋出液 Na^+ 和 Mg^{2+} 浓度随着淋洗急剧下降, EC 缓慢下降阶段 (P2) 淋出液 Na^+ 和 Mg^{2+} 浓度, 分别是 EC 急剧下降阶段 (P1) 的 28% ~ 56% 和 10% ~ 34%, 而淋洗结束时 (P3) 分别只有 P1 的 16% ~ 6% 和 2% ~ 4%。淋洗过程中 K^+ 与 Na^+ 及 Mg^{2+} 呈相似的变化趋势, 而 Ca^{2+} 因处理而异, 其中 B_2 和 B_3 处理淋出液 Ca^{2+} 浓度随着淋洗而提高, 尤其是 B_2 处理, Ca^{2+} 浓度 P2 比 P1 提高了 14.23 倍, P3 比 P1 提高了 9.49 倍。总体来看, 加入生物质炭促进 K^+ 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的洗脱, 但抑制了 Ca^{2+} 的淋洗。

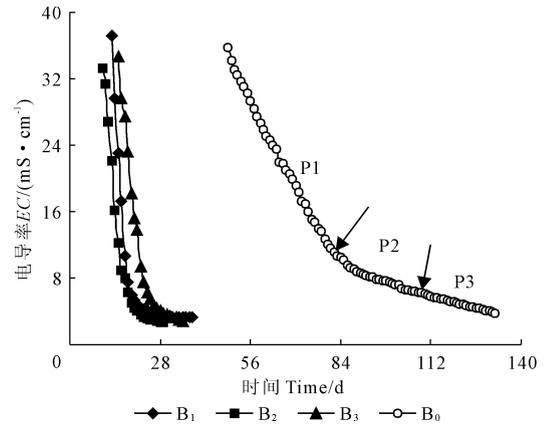
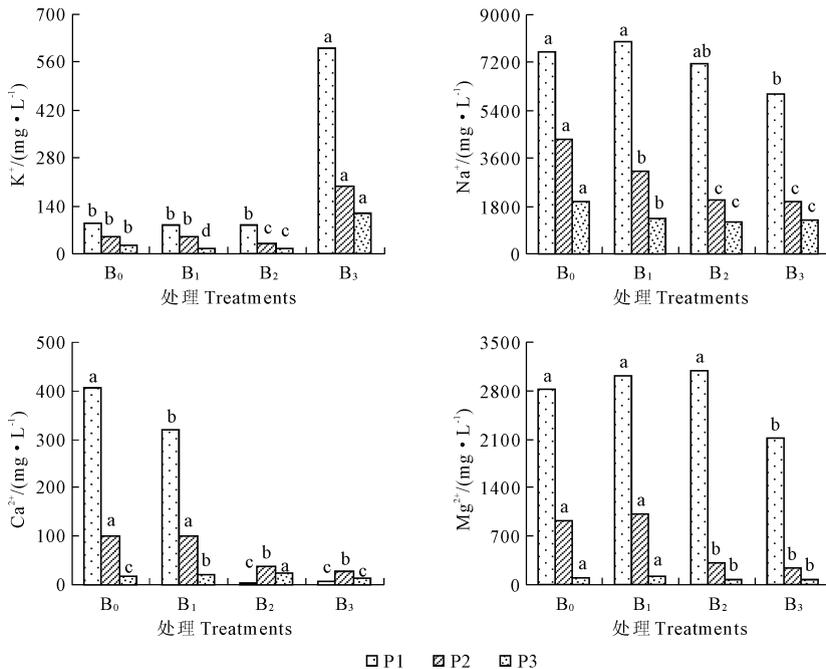


图 2 不同土层加入生物质炭后淋洗液电导率的动态变化

Fig. 2 The change of the eluent EC from the biochar-added saline soil column in different soil layers



注: 小写字母表示同一采样点不同处理土柱淋出液离子浓度之间显著性差异, $P < 0.05$ 。

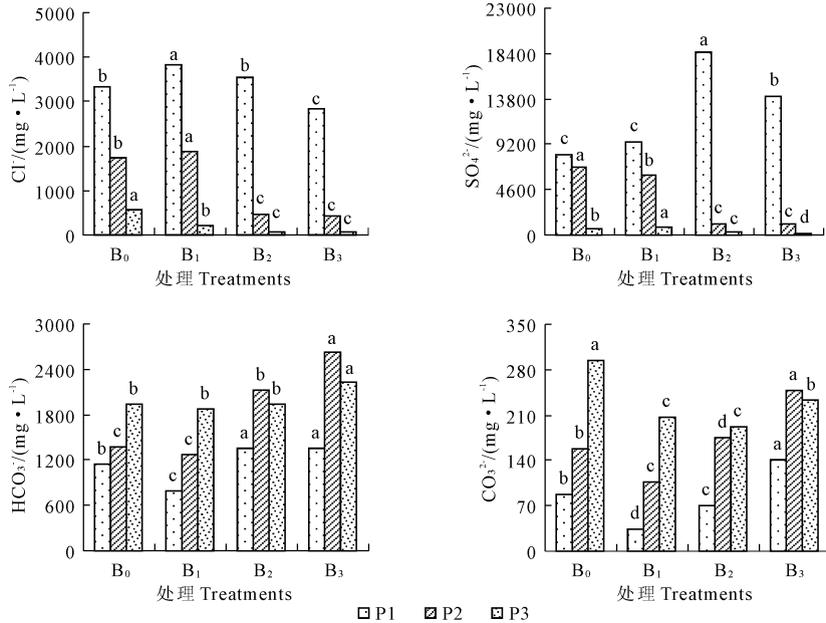
Note: Lowercase letters represent the significant difference at $P < 0.05$ among the different treatments in the same sampling date.

图 3 盐渍化土壤不同土层加入生物质炭后在 P1、P2、P3 淋洗阶段淋出液主要阳离子浓度

Fig. 3 The concentration of main cations during P1, P2, P3 stage of the biochar-added saline soil column in different soil layers

所有土柱淋洗液中阴离子主要是 SO_4^{2-} , 其次是 Cl^- 和 HCO_3^- , 而 CO_3^{2-} 浓度比较低, 说明供试土壤为硫酸盐类盐渍化土壤(图4)。淋出液 Cl^- 浓度随着淋洗逐渐下降, P2 淋出液 Cl^- 浓度为 P1 的 13%~52%, P3 仅有 P1 的 4%~10%; 而 SO_4^{2-} 浓度直到 P3 阶段才大幅度下降达 95% 以上。与之不

同, 淋出液 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 浓度则随着淋洗而提高, 尤其是 CO_3^{2-} 浓度, P2 比 P1 提高了 1.77~3.21 倍, P3 比 P1 提高了 1.67~6.27 倍。总体来看, 加入生物质炭在淋洗初期促进了土柱中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的洗脱, 而淋洗后期促进了土柱中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的洗脱。



注:小写字母表示同一采样点不同处理土柱淋出液离子浓度之间显著性差异, $P < 0.05$ 。

Note: Lowercase letters represent the significant difference at $P < 0.05$ among the different treatments in the same sampling date.

图4 盐渍化土壤不同土层加入生物质炭后在 P1、P2、P3 淋洗阶段淋出液主要阴离子浓度

Fig.4 The concentration of main anions during P1, P2, P3 stage of the biochar-added saline soil column in different soil layers

2.3 土壤剖面盐分含量

供试土壤盐分含量很高, 主要是硫酸钠, 还有可观的碳酸氢钠及氯化物。无论是哪个土层加入生物质炭, 淋洗结束时, 大部分处理各土层土壤的离子含量均显著降低, 尤其是表层土壤 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量降低的幅度最大, 分别比原始土壤降低了至少 87%, 93% 和 93%。例外的是, 所有土层土壤 CO_3^{2-} 含量增加了几十甚至几百倍; 而土壤 HCO_3^- 含量因处理而异, 仅 B_1 处理出现一定程度的升高, 而其余处理出现不同程度的降低。0~35 cm 土层土壤 K^+ 含量除 B_1 处理外, 其余各处理均出现一定程度的升高(图5, 图6)。

3 讨论与结论

3.1 生物质炭对盐渍化土壤盐分淋洗的影响

内蒙古河套地区地势平缓, 天然排水能力很差, 蒸发量是降水量的十余倍, 具有极易形成盐渍化土壤的自然条件, 大部分土壤都存在不同程度的盐渍

化^[10]。春季和秋季灌溉洗盐不仅起到冲水压盐的作用, 而且有利于土壤储水保墒^[3-4]。但是, 由于盐渍化土壤通透性一般都很差, 不仅降低了灌溉洗盐效率, 而且延长了灌溉洗盐时间, 严重制约了当地正常的农事操作。提高灌溉洗盐效率, 加快土壤脱盐进程, 已成为本地区亟待解决的关键问题之一。

灌溉洗盐效率受多种因素影响, 土壤饱和和导水率是最重要的决定因素之一。一般说来, 土壤饱和和导水率越高, 洗盐效果越好, 用水量也就越少。土壤饱和和导水率受多种因素影响, 其中土壤有机质含量、容重、孔隙度、质地等是最重要的决定因素^[11-12]。在一定范围内, 土壤饱和和导水率随有机质提高而增加; 提高孔隙度、降低土壤容重等, 均能够提高土壤饱和和导水率, 从而提高洗盐效率。

生物质炭是一种高度芳构化的疏松多孔富碳物质, 不仅具有很大的表面积, 而且带有大量的正负两种电荷, 具有强烈的吸附性能^[13]。越来越多的研究表明, 生物质炭能够提高土壤有机碳含量^[14-15], 降

低土壤容重^[8],增加土壤孔隙结构^[16],提高土壤中水稳定性团聚体的数量^[8]。本研究结果显示,向盐渍化土壤加入生物质炭,盐分洗脱速率大幅度提高,而且 0~35 cm 土层加入生物质炭盐分的洗脱效果最好。生物质炭这种作用的原因和机理十分复杂,主要包括:一是生物质炭降低土壤容重,改善土壤孔隙结构,主要是因为生物质炭的多孔性且容重较低,

能够增加土壤的总孔隙度及大孔隙度^[7],从而改善土壤的物理性状促进土体盐分离子的淋洗。二是生物质炭能够增加土壤水稳性团聚体的数量,可能与生物质炭表面含有多种酸性和碱性基团有关^[17-18],这些官能团促进土壤颗粒团聚作用,从而改善盐渍化土壤结构,促进盐分淋洗。

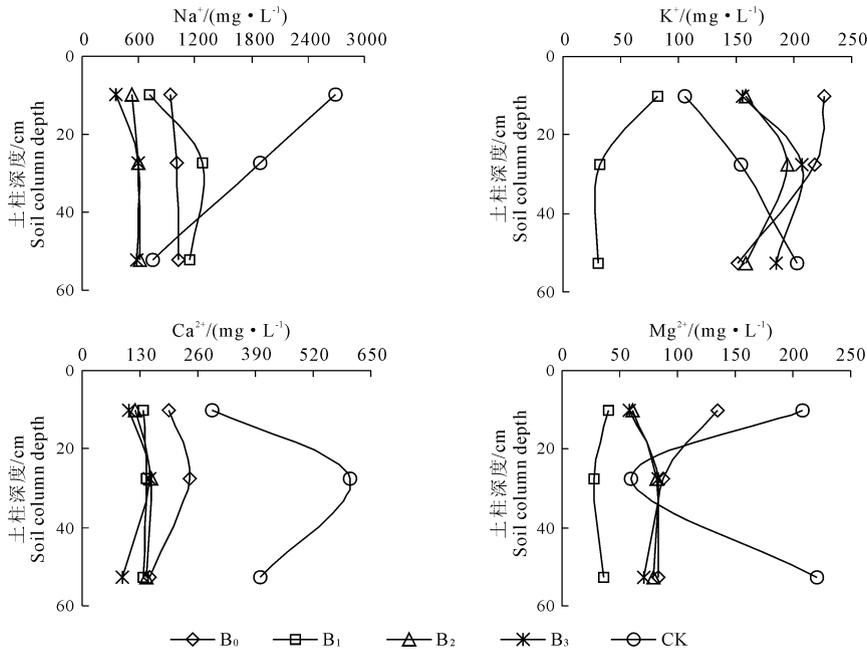


图 5 盐渍化土壤不同土层加入生物质炭淋洗后土壤剖面主要阳离子含量

Fig.5 The contents of main cations in the leached saline soil profile of the biochar-added saline soil column in different soil layers

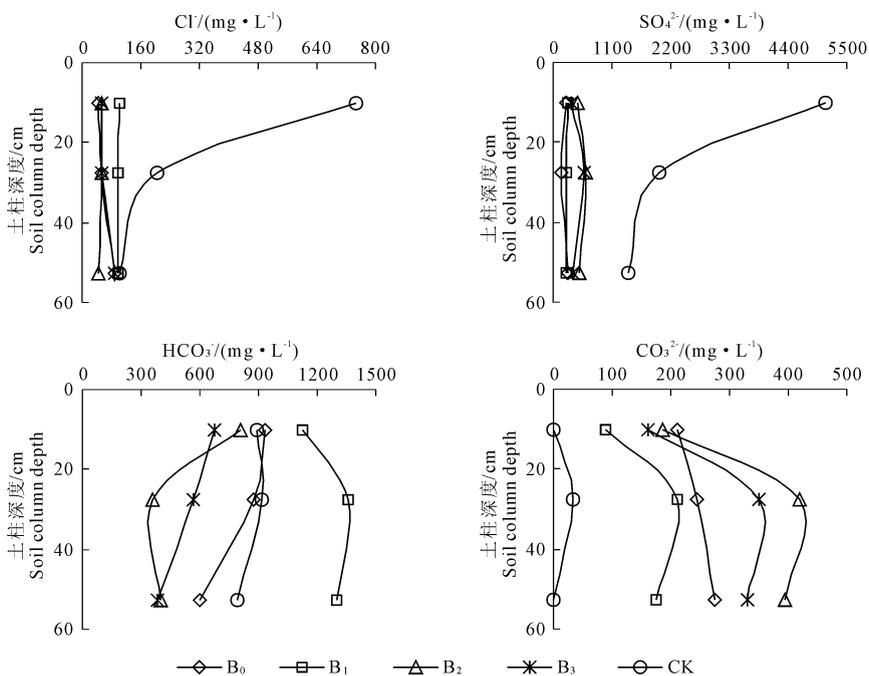


图 6 盐渍化土壤不同土层加入生物质炭淋洗后土壤剖面主要阴离子含量

Fig.6 The contents of main anions in the leached saline soil profile of the biochar-added saline soil column in different soil layers

3.2 生物质炭对不同盐分离子淋洗的影响

不同类型盐渍化土壤,其盐分离子组成差异很大,对作物的影响存在差异,其中碳酸(氢)钠危害最大,改良盐渍化土壤时,应优先降低土壤中碳酸(氢)钠的含量,即降低 Na^+ 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的含量。

盐渍化土壤离子洗脱的先后顺序及其速率受多种因素的影响,主要取决于离子与土壤胶体的相互作用强度。一般说来,与土壤胶体亲和力比较高的离子,如磷酸根和高价阳离子,比较难以洗脱出土体;而亲和力比较弱的离子,如 Cl^- 和 Na^+ , 则比较容易洗脱^[19-20]。

供试土壤主要是硫酸钠,其次是碳酸氢钠和氯化物。从 P1、P2 和 P3 三个阶段的离子浓度差异,生物质炭促进 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的洗脱,但抑制 Ca^{2+} 洗脱;在淋洗初期生物质炭促进 Cl^- 和 SO_4^{2-} 洗脱,后期促进了 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的洗脱。

淋出液中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 含量在淋洗过程中均逐渐增加,这一方面可能与土壤离子吸附与交换平衡有关^[21],另一方面可能关系到 CaCO_3 沉淀与溶解平衡。当 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等阴离子淋洗出土体,为平衡土壤中的电荷,来自所加入的生物质炭和土壤中丰富的碳酸盐类可能解离,产生 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 并且随着淋洗的进行,其他阴离子逐渐减少,需要产生更多 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 以平衡土壤电荷。淋洗过程中碳酸盐解离所产生的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 也将被淋洗出土体,致使淋出液的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 随着淋洗进程而增加^[22,22-23]。另外, CO_2 溶解形成 HCO_3^- , 从而使土壤及淋滤液中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的含量增加;因受 CaCO_3 溶度积的支配, Ca^{2+} 淋失将促进 CaCO_3 沉淀溶解,产生更多的 HCO_3^- 。

4 结 论

向盐渍化土壤加入生物质炭,显著地促进盐分淋洗,大大缩短盐分洗脱时间,其中 0~35 cm 土层加入生物质炭,盐分洗脱最快。生物质炭促进 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的洗脱,但抑制 Ca^{2+} 洗脱;在淋洗初期生物质炭促进 Cl^- 和 SO_4^{2-} 洗脱,后期促进了 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的洗脱。因此,考虑到生物质炭对土壤物理、化学和生物学性质的有益作用,利用生物质炭加快盐渍化土壤脱盐进程,改良培肥盐渍化土壤,具有很大的潜力。

参 考 文 献:

[1] 褚冰倩,乔文峰.土壤盐碱化成因及改良措施[J].现代农业科技,2011,(14):309-311.

[2] 刘霞,王丽萍,张圣微,等.内蒙古河套灌区灌排水离子组成及淋洗盐分用水量评价[J].中国生态农业学报,2011,19(3):500-505.

[3] 郭全恩,王益全,南丽丽,等.灌水定额对旱区苹果园土壤盐盐再分布的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1863-1870.

[4] 李瑞平,史海滨,王长生,等.秋灌定额对冬期土壤盐运移分布的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(6):43-46.

[5] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management[M]. Science and Technology. London: Earthscan, 2009.

[6] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008:591-596.

[7] Lairda 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(3/4):443-449.

[8] 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,(11):2930-2934.

[9] George C, Wagner M, Kücke M, et al. Divergent consequences of hydrochar in the plant-soil system: arbuscular mycorrhiza nodulation, plant growth and soil aggregation effects[J]. Applied Soil Ecology, 2012,59:68-72.

[10] 曹惠提,罗玉丽.宁夏灌区土壤盐碱化综述[J].水利科技与经济,2010,16(3):267-268.

[11] 李孝良,陈效民,周炼川,等.西南喀斯特地区土壤饱和导水率及其影响因素研究[J].灌溉排水学报,2008,27(5):74-86.

[12] 姚淑霞,赵传成,张铜会.科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究[J].土壤学报,2013,50(3):469-477.

[13] Al-Wabel M I, Al-Omran A, El-Naggar A H, et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes[J]. Bioresource Technology, 2013,131:374-379.

[14] Lehmann J, Rillig M C, Masiello C A, et al. Biochar effects on soil biota - A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011,43(9):1812-1836.

[15] 张雯,耿增超,陈心想,等.生物质炭对盐土改良效应研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):73-77.

[16] 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.

[17] Mukherjee A, Zimmerman A R, Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars[J]. Geoderma, 2011,163:247-255.

[18] 谢祖彬,刘琦,许燕萍,等.生物炭研究进展及其研究方向[J].土壤,2011,43(6):857-861.

[19] 陈巍,陈邦本,沈其荣.滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究[J].土壤学报,2000,37(4):521-528.

[20] 刘贯群,朱良超,孙蓓蓓,等.内蒙李井灌区土壤盐分淋洗过程的室内模拟及分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(9):109-116.

[21] 李韵珠,李保国.土壤溶质运移[M].北京:科学出版社,1998.

[22] 曾文治,黄介生,徐驰,等.KCl 溶液对土壤入渗及氯离子运移特性影响研究[J].灌溉排水学报,2013,32(1):32-35.

[23] Chip A, Ma L. Concentration, pH and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils[J]. Journal of environmental quality, 2002,31(2):581-589.