聚丙烯酰胺改性生物质炭对盐碱化土壤盐分洗脱的影响

石 维[1,2,3]，王利书[1,2]，尹海魁[1]，郭海刚[1]，
程东娟[1,2]，杨建斌[1]，黄国铭[1]，徐治国[1]，侯 梁[1]
(1.河北工程大学水利水电学院，河北 邯郸 056038；2.河北省水资源高效利用工程技术研究中心，
河北 邯郸 056038；3.河北工程大学河北省智慧水利重点实验室，河北 邯郸 056038)

摘要：为了提升生物质炭对滨海盐碱土壤盐分的洗脱效率，以海兴县盐碱土为研究对象，利用聚丙烯酰胺(PAM)、小麦秸秆生物质炭(BC)、黏土矿物(M)等材料制备聚丙烯酰胺改性生物质炭(PAM－BC)，通过室内模拟淋溶试验研究对比不同环境材料对盐碱土盐分的洗脱效果。结果表明，相比于 CK 处理，PAM、BC 和 PAM－BC、$CaSO_4$(CS)处理均显著增加土壤盐分洗脱量，其中 PAM－BC 处理下增幅最高，达到 12.3%。进一步对淋洗液中主要盐分离子分析，添加 PAM－BC 显著促进土壤 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱，增幅分别为 11.0%～27.3%和 17.8%～42.3%。主成分分析表明，PAM－BC 增强对主要盐分离子的洗脱效果。土柱淋溶结束后，PAM－BC 添加处理土壤全盐量比其他处理显著降低 6.0%～16.7%。此外，土壤水分特征曲线表明，添加 PAM－BC 提升盐碱土壤的保水性。研究结果可为聚丙烯酰胺改性生物质炭应用于滨海盐渍化土壤的降盐改土提供理论依据。

关键词：生物质炭；聚丙烯酰胺；盐碱土；盐分洗脱；土柱模拟
中图分类号：S156.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2023)02-0371-06
DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.043

Effect of Polyacrylamide-modified Biochar on Salt Elution of Saline-alkali Soil

SHI Wei[1,2,3], WANG Lishu[1,2], YIN Haikui[1], GUO Haigang[1],
CHENG Dongjuan[1,2], YANG Jianbin[1], HUANG Guoming[1], XU Zhiguo[1], HOU Liang[1]
(1.*School of Water Conservancy and Hydroeletric Power, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei* 056038; 2.*Hebei Water Resources Efficient Utilization Engineering Technology Research Center, Handan, Hebei* 056038; 3. *Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei* 056038)

Abstract: In order to improve the water desalting efficiency of biochar on coastal saline-alkali soil, a granular biochar-polyacrylamide composite (PAM－BC) was obtained by blending biochar (BC), polyacrylamide (PAM), clay minerals in this study, while the effect of different environmental materials on the salt elution of saline soil from Haixing County was studied by a laboratory soil column simulation leaching experiment. The results showed that the treatments of PAM, BC and PAM－BC, $CaSO_4$(CS) significantly increased the elution amount of salt compared to CK, especially for the PAM－BC treatment with highest increase of 12.3%. The main salt ions in the eluent were further analyzed, the addition of PAM－BC significantly promoted the salt ions leaching of Na^+ and Cl^- by 11.0%～27.3% and 17.8%～42.3% than other treatments, respectively. Principal component analysis indicated that PAM－BC addition enhanced the elution of major salt ions. The total salt content of soil under PAM－BC treatment was significantly decreased by 6.0%～16.7% compared to other treatments after the leaching of soil column. Moreover, the soil water characteristic curves indicated that PAM－BC promoted the water retention of saline－alkali soil. These findings can provide a theoretical basis for the application of PAM modified biochar in the salt reduction and soil improvement in coastal saline-alkali soil.

Keywords: biochar; PAM; saline soil; salt elution; soil column simulation

收稿日期：2022-07-23
资助项目：河北省自然科学基金项目(D2021402044)；河北工程大学创新基金博士专项基金项目(SJ2101003120)；河北省水资源高效利用技术创新中心绩效后补助项目(21567663H)；有机硅功能肥对盐碱土土壤水盐调控和作物增产机理研究项目
第一作者：石维(1989—)，男，讲师，博士，主要从事农业资源与环境相关研究。E-mail：weishiHBEU@aliyun.com
通信作者：程东娟(1975—)，女，教授，博士，主要从事节水灌溉与农业水土环境相关研究。E-mail：handanchengdongjuan@126.com

滨海盐渍土是我国主要的盐渍土类型之一，其盐碱化程度高、盐分毒害突出[1]，同时由于近年来化学肥料的大量施用、不合理灌溉等人为干扰活动和自然环境变化的不利影响，使得土壤盐碱化程度增加[2-3]，严重阻碍我国农业可持续性发展。沧州市海兴县位于河北省中东部，东临渤海，地碱水咸。沧州市总土地面积约 144 万 hm^2，盐碱地面积接近 34 万 hm^2。该地区盐碱土普遍存在理化性状较差，土壤质地黏重，透水性和保水性差[4-6]。利用灌溉洗盐是快速减少盐渍化土壤盐分含量的重要途径之一，其中改善土壤结构，尤其是增加土壤通透性对灌溉洗盐至关重要。

生物质炭是由生物质废弃物在限氧条件下经过热裂解产生的高度芳香化难分解的固态有机物质[7]，具有丰富的孔隙结构，可以降低土壤容重、改善土壤结构以及提升土壤通透性[8-11]，如大孔隙主要影响土壤通气性和保水性，而小孔隙主要影响分子在土壤中的固定和迁移。然而，生物质炭对土壤水盐运移的影响与生物质炭性质和施用量以及土壤质地密切相关[12-22]。已有的研究[1,23]表明，通过配施和改性优化可以进一步提升生物质炭的脱盐改土效应。本研究通过将生物质炭与其他材料掺混造粒对生物质炭进行改性处理，在造粒过程中不同材料之间由于发生物理和化学的相互作用建立生物质炭与其他材料的功能互补效应，同时可以减少运输和施用成本。聚丙烯酰胺是一种人工合成的线性高分子聚合物，可以增加细小土粒的团聚和土壤结构的稳定性，同时增加土壤保水性[24-27]。由此，利用聚丙烯酰胺改性生物质炭，可以实现利用生物质炭本身的孔隙结构增加土壤的通透性和孔隙度，同时通过聚丙烯酰胺促进土壤的团聚性进一步增加土壤的稳定性，从而实现对盐渍化土壤结构改善和盐分洗脱。

本研究基于不同材料的土壤调理剂，以沧州市海兴县盐碱土为研究对象，采用土柱淋溶试验方法，将聚丙烯酰胺(PAM)、小麦秸秆生物质炭(BC)、聚丙烯酰胺改性生物质炭(PAM－BC)以及硫酸钙(CS)、黏土矿物质(M)对盐碱土壤盐分洗脱效果进行比较分析，为聚丙烯酰胺改性生物质炭应用于滨海盐碱土壤的降盐改土提供参考。

1 材料与方法

1.1 聚丙烯酰胺改性生物质炭的制备

生物质炭的原料为小麦秸秆，使用去离子水将小麦秸秆清洗干净，进行干燥处理后经粉碎机粉碎并过 10 目筛。将小麦秸秆装入不锈钢圆柱体罐，然后放置于马弗炉内，通入氮气后以 20 ℃/min 升温速率加热，达到设定 500 ℃温度后维持 2 h，关闭马弗炉，冷却至室温，残留的黑色固态物质即为生物质炭，其基本理化性质见表 1，生物质炭材料过 20 目筛。

表 1 生物质炭和聚丙烯酰胺改性生物质炭的基本性质

生物质炭	pH	有机碳/($g \cdot kg^{-1}$)	CEC/($cmol \cdot kg^{-1}$)	表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	电导率/($mS \cdot cm^{-1}$)
生物质炭	9.5	580.20	38.03	16.21	2.85
聚丙烯酰胺改性生物质炭	7.4	172.40	—	—	6.15

聚丙烯酰胺(PAM)为线性阴离子型，分子式为 $C_{3x}H_{5x}N_xO_x$，分子量为 800～1 000 万，购于上海麦克林生化科技有限公司。

矿物质膨润土和海泡石采购于上海瑞永生物科技有限公司，pH 为 9.21 和 7.15，CEC 为 1.0，18.0 cmol/kg，电导率为 983.0，81.4 uS/cm，容重为 2.65，1.75 g/cm^3。

无水硫酸钙购自于上海展云化工有限公司，为分析纯化学试剂，其主要成分 $CaSO_4$，含量为 97%，pH 为 6.63，电导率为 3.17 mS/cm。

供试木醋液由南京勤丰秸秆科技有限公司提供。该材料是玉米秸秆在 450～550 ℃无氧热裂解的副产品。将热解过程中挥发出的有机气体冷凝，滤除焦油和颗粒杂质，作为木醋原液储存在密闭的深色罐中。所用的木醋液主要性质为：pH 4.1，电导率 8.7 mS/cm，N、P、K 含量分别为 2.6 g/L，36.8，268.0 mg/L。

聚丙烯酰胺改性生物质炭的制备：首先将聚丙烯酰胺：生物质炭：膨润土：海泡石按照质量比 12：4：3：1 放入塑料器皿中，充分混合均匀，然后放置于实验室小型造粒机进行造粒，转速设置为 40～60 r/min，持续造粒 1 h，造粒过程中喷洒木醋液稀释溶液(木醋液：H_2O 为 1：200，体积比)。随后，将改性生物质炭置于 60 ℃下烘干 3 h，冷却至室温后将所用的颗粒进行过筛，保留直径为 2～3 mm 的黑色 PAM－BC 颗粒，其基本理化性质见表 1。

1.2 供试土壤

试验土壤取于河北省沧州市海兴县小山乡盐碱荒地表层土壤(0—15 cm)。海兴县耕地面积 30 000 hm^2，盐碱地近 20 000 hm^2。该地区地势低洼，地下水位浅且矿化度高，土壤盐碱化严重，属于暖温带亚湿润气候区，年均气温 12.1 ℃，年降水量 600 mm。供试土壤中砂粒、粉粒、黏粒的含量占比分别为 14.7%，83.0%，2.3%，按照国际制分类标准，土壤质地属于粉砂

质壤土,有机质含量为 6.37 g/kg,pH 为 8.7,全盐量为 1.91%,容重为 1.43 g/cm^3,土壤 Na^+ 为 5.35 g/kg,K^+ 为 0.02 g/kg,Ca^{2+} 为 0.12 g/kg,Mg^{2+} 为 0.13 g/kg,SO_4^{2-} 为 8.34 g/kg,Cl^- 为 4.29 g/kg。

1.3　试验方法

1.3.1　土柱淋溶试验　试验于 2020 年 9 月 10—25 日在河北工程大学土壤参数测定实验室内进行,试验装置见图 1。淋溶试验土柱材料为长 30 cm、内径 5 cm 的透明 PVC 管,底端装有引流条进行淋溶液收集。PVC 管底部装有 1 层 100 目的尼龙滤布,滤布上平铺 20 g 酸洗过的石英砂。试验处理包括聚丙烯酰胺(PAM)、生物质炭(BC)、聚丙烯酰胺改性生物质炭(PAM－BC)、硫酸钙(CS)、黏土矿物质(M,膨润土＋海泡石),同时设置不添加调理剂对照处理(CK),每个处理 3 个重复。添加剂施用量按照等量设计,施用量为 0.2%[28]。将过 20 目筛的土样与添加剂充分混合后,按照容重为 1.43 g/cm^3 装填压实,同时在土柱上下端分别装填酸洗石英砂 20 g。土壤压实过程中需注意边缘土壤压实,并涂抹凡士林,以降低管壁效应。土柱淋溶试验开始后,加入超纯水至土壤饱和含水量,静置 24 h,然后进行淋洗试验,分别在第 1,3,5,7,10,15 天进行淋洗,每次淋洗水量为 100 mL,淋溶液收集于 250 mL 容量瓶中,进一步经过 0.45 μm 滤膜过滤后冷藏保存,待测。

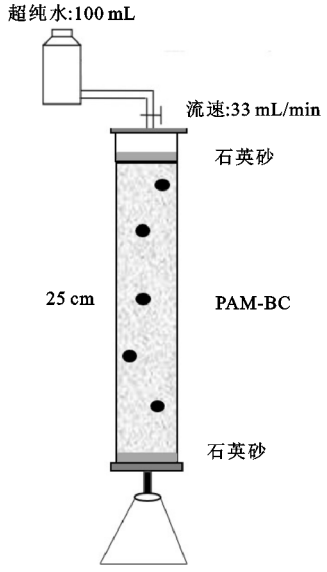

图 1　盐碱土壤淋溶试验装置

1.3.2　测定指标与方法　土壤淋洗液 pH 采用 pH 计直接测量。土壤 pH 通过对土样与 H_2O 按照 1∶5 比例加去离子水,使用 pH 计测量并记录[29]。

土壤淋溶液中盐分含量采用雷磁 DDBJ－350 电导率仪在 TDS 模式进行测定,读取土壤洗脱液盐分浓度(mg/L)。

土壤全盐量测定按照鲁如坤[29]方法测定,称取样品 10 g(过 20 目筛)于 250 mL 锥形瓶中,加入 50 mL 蒸馏水,25 ℃恒温振荡 30 min,取出锥形瓶静置 10 min。过滤后获得 25 mL 浸提液,在已知重量的蒸发皿中水浴蒸干(期间用 120 g/L 过氧化氢溶去除有机物时),之后烘干至恒重。

土壤淋溶液中 K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 浓度(mg/L)的测定采用离子色谱仪 883 Basic I Cplus,配 863 Compact Autosampler 自动样品处理系统、MetrosepC6－150 型阳离子分析柱、ASupp7－250 型阳离子分析柱。

土壤水分特征曲线采用基于蒸发法的 Hyprop 测试系统测定[30]。由德国 UMS 公司生的 Hyprop 土水测试系统主要配套元件包括:2 个张力计(长度分别为 25,50 mm)、传感器单元、土壤环刀(容量 250 mL)和电子天平。该仪器同时配套有数据采集软件和 Hyprop Fit 模拟软件,在 Windows 操作系统中运行。可以选用不同的模型对试验结果进行拟合,得到土壤水分特征曲线、非饱和渗透系数分别与含水率、基质吸力关系曲线。

1.3.3　数据处理　采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析;采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较,显著性水平 $p<0.05$,而生物质炭和聚丙烯酰胺之间的交互作用采用双因素方差(Two-way ANOVA)分析;用 Origin 9.0 软件作图和主成分分析。

2　结果与分析

2.1　盐分洗脱总量

土柱试验分别于第 1,3,5,7,10,15 天进行淋洗,试验结束后,CK、聚丙烯酰胺(PAM)、生物质炭(BC)、聚丙烯酰胺改性生物质炭(PAM－BC)、硫酸钙(CS)、矿物处理(M)淋洗液中盐分总量分别为 4.60,5.00,4.92,5.17,4.91,4.69 g。相比于 CK 处理,PAM、BC、PAM－BC、CS 处理淋溶液中盐分淋洗总量显著增加,增幅达6.6%～12.2%,而 M 与 CK 处理无显著差异。PAM－BC 处理下淋溶液盐分淋溶总量最高,为 5.17 g,显著高于 PAM 和 BC,增幅分别为 4.9%和 3.4%。此外,相比于传统添加剂硫酸钙,单独添加 PAM 和 BC 对淋溶液盐分无显著差异,但是 PAM－BC 显著增加盐分淋洗,增幅达 5.23%。

2.2　盐分离子洗脱量

土柱试验结束后,6 次淋溶液中主要阳离子总量和主要阴离子总量见表 2。相比于 CK,添加 PAM、BC、CS 和 M 处理对 6 次淋溶液中 Na^+ 总量无显著影响,但是

添加 PAM—BC 比 CK 处理显著增加 20.5%，同时比其他处理显著增加 11.0%～27.3%。在 6 次淋溶过程中，相比于 CK，添加 PAM、PAM—BC、BC 和 CS 处理显著增加淋溶液中 K^+，其中 PAM 和 CS 处理下增幅最高，分别为 436.1%和 455.1%。在 6 次淋溶过程中，相比于 CK，添加 PAM 减少 Ca^{2+} 淋溶量，但是其他添加剂处理均无显著影响。在 6 次淋溶液中 Mg^{2+} 的淋溶总量结果显示，PAM—BC 比 CK 显著提高 18.6%，但其他处理与 CK 无显著差异。综合上述阳离子淋溶量，通过对 6 次淋溶液中主要阳离子 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 总量分析可知，相比于 CK 处理，添加 PAM、PAM—BC 和 CS 处理均显著提高土壤主要阳离子总量的淋溶，增幅分别达到 15.5%，22.8%，8.3%，其中 PAM—BC 处理下主要阳离子淋溶总量最高，分别比 PAM、BC 和 CS 处理显著增加 6.3%，19.5%和 7.4%。

在 6 次淋洗过程中，Cl^- 和 SO_4^{2-} 淋溶总量见表 2。相比于 CK 处理，添加 PAM 和 PAM—BC 均显著提高 Cl^- 淋溶量，其中 PAM—BC 增幅最高，且比其他处理增幅达 17.8%～42.3%。在 6 次淋洗过程中，SO_4^{2-} 淋溶总量显示添加剂处理与 CK 处理之间无显著差异。综合上述阴离子淋溶量，相比于 CK 处理，添加 PAM—BC 和 PAM 均显著提高主要阴离子淋溶量，增幅分别达到 17.4%和 10.1%，其中 PAM—BC 分别比 PAM 和 BC 提高 6.6%和 10.3%。

表 2 不同处理下 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^- 淋溶总量 单位：mg

处理	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-
CK	819.42±77.08b	33.98±3.07d	243.94±1.88ab	268.15±19.63b	1992.01±54.02a	903.32±12.98c
PAM	889.49±21.82b	182.18±13.51a	233.87±1.81c	271.71±1.74b	2108.53±15.14a	1079.15±11.96b
BC	817.47±19.92c	64.73±12.82c	245.41±3.95ab	275.61±17.41b	2163.24±129.90a	916.80±16.44c
PAM—BC	987.18±51.83a	122.42±36.01b	249.73±3.97a	318.08±7.12a	2128.46±14.26a	1270.94±44.13a
CS	840.22±28.80bc	188.61±24.23a	238.29±0.87bc	293.83±20.76ab	2122.64±42.20ba	967.40±63.47c
M	775.12±39.50c	34.26±16.71d	240.12±4.64bc	253.53±18.91b	2094.24±44.16a	893.17±39.37c

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（$p<0.05$）。

通过对 6 次淋溶液中主要阳离子和阴离子淋溶总量的主成分分析（图 2）表明，由 PC1 和 PC2 轴可知，各处理间呈现出明显的分离（分别占总方差的 56.7%和 25.5%），同时 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^- 淋溶量与 PAM—BC 呈现正相关，且 Na^+、Mg^{2+}、Cl^- 淋溶量的相关程度高于其他离子。

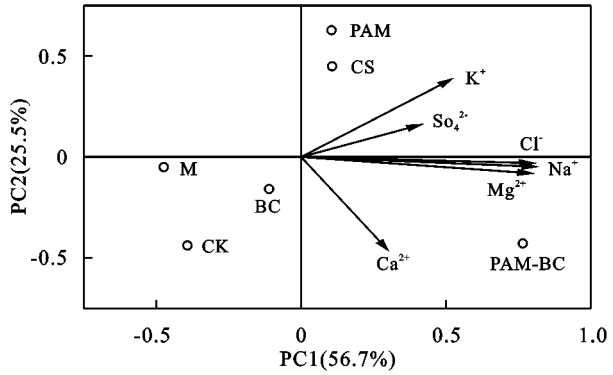

图 2 不同处理下 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^- 淋溶量主成分分析

2.3 土壤残留全盐量

在土柱试验结束后，CK、PAM、BC、PAM—BC、CS、M 各处理土壤残留盐分分别为 0.77%，0.75%，0.81%，0.67%，0.75%，0.77%。相比于 CK 处理，添加 PAM、BC、CS 和 M 处理对土壤残留全盐量无显著影响，但是添加 PAM—BC 处理显著降低土壤全盐量，比 CK 处理减少 13.18%，同时比 PAM 和 BC 处理减少 11.59%和 20.30%。进一步通过双因素方差分析，PAM、BC 和 PAM—BC 处理下土壤全盐量中聚丙烯酰胺对土壤残留全盐量影响作用极显著（$p<0.01$），但生物质炭对土壤残留全盐量无显著影响，同时聚丙烯酰胺与生物质炭之间对土壤残留全盐量的影响存在显著的交互作用（$p<0.05$）。

2.4 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线见图 3。添加 PAM、BC 和 PAM—BC 使土壤水分特征曲线较 CK 整体上移，即相同 pF 值下施入 PAM、BC 和 PAM—BC 的土壤含水率较 CK 处理明显提高，其中单独添加 PAM 下土壤含水率高于 BC 处理，但是 PAM—BC 与 PAM 的土壤含水率变化趋势基本保持一致。

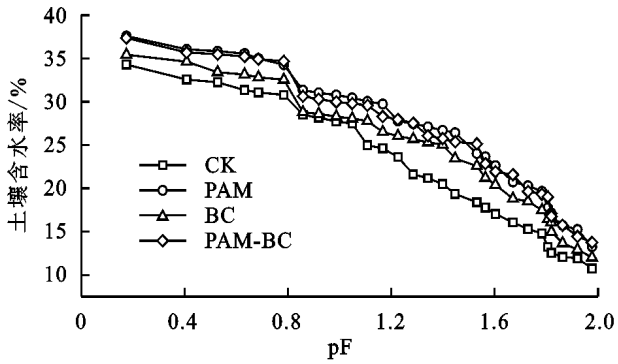

图 3 添加 PAM、BC 和 PAM—BC 对土壤水分特征曲线的影响

3　讨 论

相较于单独添加生物质炭和聚丙烯酰胺,添加聚丙烯酰胺改性生物质炭促进盐碱土壤盐分的洗脱。在土柱淋溶试验过程中,虽然单独添加生物质炭增加 6 次淋溶液盐分总量,但是土壤残留盐分与空白对照处理之间无显著差异,这可能与生物质炭的添加量以及生物质炭对于土壤离子的交换吸附有关。岳燕等[22]在研究中通过土柱试验对比分析不同施用量(0,2%,5%,10%)下蘑菇棒生物质炭对盐渍化土壤的盐分洗脱效率,结果表明,添加量为 2%处理下脱盐效率较高。此外,有研究[20-21]表明,添加较低用量的生物质炭(<1%)对水分入渗可能起到抑制作用。然而,聚丙烯酰胺改性生物质炭有效促进盐分洗脱和土壤残留全盐量的降低。王起凡[31]在研究中通过单施和混施生物质炭与聚丙烯酰胺降低盐碱土壤的电导率值,但是混施与单施效果无显著差异;金梦野等[23]通过土柱淋溶模拟试验对比脱硫石膏、改性腐植酸、聚丙烯酰胺及其复合材料对盐碱土壤理化性能的改良效果发现,单独添加改性腐植酸、聚丙烯酰胺降低淋溶后盐渍化土壤的水溶性盐含量,而添加脱硫石膏、复合材料增加土壤含盐量,但是复合材料促进盐碱土壤团聚体的形成。与上述研究结果不同,本试验结果显示,土壤残留全盐量在生物质炭和聚丙烯酰胺共同作用下显著低于单施处理,说明生物质炭和聚丙烯酰胺在掺混造粒过程中发生相互作用,其造粒后的微观表征有待进一步研究。

在土柱盐分淋溶的过程中,相比于 CK 处理,添加生物质炭减少 Na^+ 的淋溶效率。周文志等[1]通过室内淋溶试验分析施用果木炭和园林废弃物堆肥对滨海盐碱土盐分洗脱的影响,结果表明,施用生物质炭增加 Na^+ 的洗脱。该结果与本试验结果不同,这可能主要由于生物质炭性质和施用量以及土壤性质的差异有关。相比于单独施用生物质炭,添加聚丙烯酰胺改性生物质炭有效促进土壤盐分离子中 Na^+、Mg^{2+} 和 Cl^- 洗脱。研究[32-34]表明,施用聚丙烯酰胺有利于土壤团聚和增加总孔隙度,同时通过聚丙烯酰胺与生物质炭混合造粒可以减小生物质炭中较小粒径颗粒对土壤孔隙的阻隔作用。滨海土壤盐分主要为氯化钠型[35],而高浓度的 Na^+ 造成土壤板结和抑制土壤水分入渗,以至于盐碱土壤淋洗脱盐效率低[36],因此,施用聚丙烯酰胺改性生物质炭可有效改善盐碱土壤结构,增加土壤水分入渗,这与本试验土壤水分特征曲线结果一致。土壤水分特征曲线显示添加生物质炭和聚丙烯酰胺均能提高土壤持水性,但是聚丙烯酰胺的提升效果最为明显,并且生物质炭在聚丙烯酰胺改性下持水性能也获得进一步提升。员学锋等[28]在土壤中加入 0.005%~0.01% PAM 后发现,相比于空白对照组,土壤中>0.25 mm 的团聚体总量增加 30.2%,同时施用聚丙烯酰胺可以有效提高土壤的持水能力,增加土壤入渗以及抑制水分蒸发。然而,本试验局限于聚丙烯酰胺改性生物质炭对盐碱土降盐和持水性变化的短期影响,需要进一步对土壤脱盐效率和土壤结构进行长期的试验研究。

4　结 论

通过土柱淋溶试验发现,相比于生物质炭和聚丙烯酰胺单独添加处理,利用聚丙烯酰胺改性生物质炭显著促进土壤盐分的洗脱,并且主要影响 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱。土壤残留盐分在聚丙烯酰胺与生物质炭的交互作用下显著低于其他添加剂处理。相较于生物质炭,聚丙烯酰胺改性生物质炭进一步提升土壤持水能力。然而,聚丙烯酰胺改性生物质炭对盐碱地土壤结构的长期影响以及土壤固碳潜力有待进一步研究。

参考文献:

[1] 周文志,孙向阳,李素艳,等.生物炭和园林废弃物堆肥对滨海盐碱土淋溶的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(3):23-30.

[2] Wang S J, Jing Y Z, Zhao C P, et al. Effects of saline-alkali soil conditioner on the recovery of growth and physiology of Chinese seabuckthorn[J].Plant Physiology Reports,2021,26:301-310.

[3] 于宝勒.盐碱地修复利用措施研究进展[J].中国农学通报,2021,37(7):81-87.

[4] 冯伟,刘忠宽,刘振宇,等.河北省盐碱地分布成因及改良利用技术研究[J].河北农业科学,2015,19(1):56-60.

[5] Zhang J B, Yang J S, Yao R J, et al. The effects of farmyard manure and mulch on soil physical properties in a reclaimed coastal tidal flat salt-affected soil[J].Journal of Integrative Agriculture,2014,13(8):1782-1790.

[6] 贾利梅,毛伟兵,孙玉霞,等.不同改良材料对粘质盐土物理性状和棉花产量的影响[J].中国农学通报,2017,33(13):81-87.

[7] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation[M]. New York: Earthscan,2015.

[8] Ábrego J, Arauzo J, Sánchez J L, et al. Structural changes of sewage sludge char during fixed-bed pyrolysis[J].Industrial and Engineering Chemistry Research, 2009,48(6):3211-3221.

[9] Zabaniotou A, Stavropoulos G, Skoulou V. Activated carbon from olive kernels in a two-stage process: Indus-

trial improvement[J].Bioresource Technology,2008,99(2):320-326.

[10] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3):3488-3497.

[11] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J].Water, Air, and Soil Pollution,2010,213(1/4):47-55.

[12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J].Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1719-1730.

[13] Barnes R T, Gallagher M E, Masiello C A, et al. Biochar induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments[J].PLoS One,2014,9(9):e108340.

[14] Major J, Lehmann J, Rondon M, et al. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration[J]. Global Change Biology, 2010, 16(4):1366-1379.

[15] Zhang J, Chen Q, You C F. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil[J].Pedosphere,2016,26(2):265-272.

[16] Dan T, Zhong Y Q, Mang M G, et al. Experimental study of influence of biochar on different texture soil hydraulic characteristic parameters and moisture holding properties[J]. Polish Journal of Environmental Studies,2015,24(3):1435-1442.

[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.

[18] Lim T J, Spokas K A, Feyereisen G, et al. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties[J].Chemosphere,2016,142:136-44.

[19] Tryon E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. Journal of Ecological Monographs,1948,18(1):81-115.

[20] 董心亮,林启美.生物质炭对土壤物理性质影响的研究进展[J].中国生态农业学报,2018,26(12):88-96.

[21] Blanco C H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal,2017,81(4):687-711.

[22] 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.

[23] 金梦野,黄娟,黄占斌,等.三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究[J].农业环境科学学报,2020,39(1):118-124.

[24] 张蕊,于健,白岗栓.聚丙烯酰胺在农业生产中的应用及研究进展[J].安徽农业科学,2012,40(10):6093-6095.

[25] 杨一松,王兆骞,成欣,等.南方红壤坡地不同利用模式的水土保持及生态效益研究[J].水土保持学报,2004,18(5):84-87.

[26] 李晶晶,白岗栓.聚丙烯酰胺的水土保持机制及研究进展[J].中国水土保持科学,2011,9(5):115-120.

[27] 王小彬,蔡典雄.土壤调理剂 PAM 的农用研究和应用[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):457-463.

[28] 员学锋,汪有科,吴普特,等.PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J].水土保持学报,2005,19(2):37-40.

[29] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:科学出版社,2000:205-226.

[30] 周浩.蒸发法测定土壤水分特征参数的试验及数值模拟[D].北京:中国地质大学,2018.

[31] 王起凡.生物炭和聚丙烯酰胺对盐渍化土壤中向日葵生长的影响[D].呼和浩特:内蒙古大学,2018.

[32] 杨艳丽,李秀军,陈国双,等.生物质炭与盐酸配施对苏打盐渍土理化性状的影响研究[J].土壤与作物,2015,4(3):113-119.

[33] 郑敏娜,梁秀芝,韩志顺,等.不同措施对苏打型盐碱土土壤盐分淋洗特征的影响[J].山西农业科学,2021,49(3):318-323.

[34] 赵迪,黄爽,黄介生.生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响[J].农业工程学报,2015,31(17):136-143.

[35] 赵秀芳,王振宇,张振,等.不同吹填年限围海吹填土的障碍特征分析[J].中国农学通报,2016,32(17):91-97.

[36] 李素艳,翟鹏辉,孙向阳,等.滨海土壤盐渍化特征及土壤改良研究[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(6):1069-1078.