

生物质炭和果胶对再生水灌溉下玉米生长及养分、重金属迁移的影响

刘源^{1,2,3}, 崔二革^{1,2,3}, 李中阳^{1,2,3}, 杜臻杰^{1,2,3}, 高峰^{1,2,3}, 樊向阳^{1,2,3}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002; 3. 中国农业科学院农业水資源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453002)

摘要: 利用根箱试验方法比较了生物质炭和果胶对再生水灌溉下土壤—植物系统养分和重金属迁移特征的影响及差异性。结果表明, 再生水灌溉不利于植物的生长, 果胶和生物质炭两个处理相比, 虽然植株生长无显著差异, 但果胶处理植株的生长状况优于生物质炭处理; 再生水灌溉时, 果胶处理地上部生物量比对照增加了 59.32%。与蒸馏水灌溉相比, 再生水灌溉增加了根际土壤 pH; 灌溉水源相同时, 果胶处理根际土壤 pH 略低于生物质炭处理。生物质炭和果胶都增加了土壤养分的含量, 果胶对土壤碱解氮、有效磷和有机质的增加效果优于生物质炭, 生物质炭对土壤有效钾的增加幅度大于果胶。生物质炭增加了植株的养分含量, 果胶提高了养分的转运能力。生物质炭降低了土壤有效态 Fe、Mn、Cu、Ni 的含量, 果胶增加了土壤有效态 Fe、Mn、Cu、Pb、Ni 的含量。果胶处理植株根系重金属含量普遍高于生物质炭处理, 如蒸馏水灌溉下果胶处理根系 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 含量分别比生物质炭处理增加了 165.29%、113.01%、21.16%、92.74%、14.61%、26.86% 和 53.43%, 但 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 等元素在果胶处理的转运系数最低。该研究可为再生水灌溉下生物质炭和果胶在北方碱性土壤的农业安全利用提供理论依据。

关键词: 再生水; 生物质炭; 果胶; 植物生长; 养分; 重金属

中图分类号: S156; X53; A513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0242-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.038

Different Effects of Biochar and Pectin on Maize Growth, Nutrient and Heavy Metals Migration Irrigated by Reclaimed Water

LIU Yuan^{1,2,3}, CUI Erping^{1,2,3}, LI Zhongyang^{1,2,3},

DU Zhenjie^{1,2,3}, GAO Feng^{1,2,3}, FAN Xiangyang^{1,2,3}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 2. Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City of Henan Province of CAAS, Xinxiang, Henan 453002; 3. Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources of CAAS, Xinxiang, Henan 453002)

Abstract: Rhizobox culture method was employed to investigate the effects of biochar and pectin on nutrient and heavy metals migration in soil-plant system irrigated by reclaimed water. The results showed that reclaimed water irrigation did harm to the plant growth. Plant grew better in pectin treatments than biochar though there was no significant difference between the both. When irrigated with reclaimed water, the shoot biomass in pectin treatments were 59.32% higher than CK. Compared with distilled water irrigation, reclaimed water irrigation increased the soil pH. When the irrigation water was same, the soil pH of pectin treatments was a little lower than the biochar treatments. Both the biochar and pectin treatments raised the soil nutrient contents, and pectin performed better for the increase in soil available nitrogen, available phosphorous and organic matter, while biochar resulted in the higher increase in soil available potassium. Biochar enhanced the plant nutrient contents, and pectin improved the transport capacity of nutrients. Biochar decreased the soil available Fe, Mn, Cu, and Ni contents, but pectin increased the soil available Fe, Mn, Cu, Pb, Ni contents. The heavy metals contents in plant roots under pectin treatments were generally

收稿日期: 2017-07-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701265); 河南省科技攻关计划项目(172102110121); 中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)(FIRI2016-13、FIRI2017-14); “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0403503); 中国农业科学院科技创新工程; 国家自然科学基金项目(51479201)

第一作者: 刘源(1988—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事非常规水資源安全利用研究。E-mail: liuyuanfiri88@163.com

通信作者: 李中阳(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业水資源与水环境研究。E-mail: lizhongyang1980@163.com

higher than that of biochar treatments. Take the distilled water irrigation for example, the Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd, Ni contents in plant roots of pectin treatments were 165.29%, 113.01%, 21.16%, 92.74%, 14.61%, 26.86% and 53.43% higher than that of biochar treatments. Fortunately, the translocation factors of Cu, Zn, Pb, Cd, Ni in pectin treatments were lowest. This study could provide the theoretical basis for the agricultural safe utilization of biochar and pectin in north alkaline soil with reclaimed water irrigation.

Keywords: reclaimed water; biochar; pectin; plant growth; nutrient; heavy metals

生物质炭是农业有机废弃物及其他废弃的生物质材料在厌氧条件下低温热解的产物^[1],由于富含K、Ca、Mg和P等养分元素及丰富的孔隙结构,可用作土壤改良剂,提高土壤肥力、促进作物生长、修复土壤中重金属、有机污染物等^[2-3]。果胶是一类天然高分子化合物,它主要存在于所有的高等植物中,是植物细胞间质的重要成分。果胶沉积于初生细胞壁和细胞间层,在初生壁中与不同含量的纤维素、半纤维素、木质素的微纤丝以及某些伸展蛋白相互交联,使各种细胞组织结构坚硬,表现出固有的形态,为内部细胞的支撑物质。同时果胶也是根系分泌物的重要成分^[4],可以增加土壤有机质含量,对养分和重金属的迁移转化有着重要影响。果胶可为固氮菌提供碳源和能源,其降解产物和发酵产物影响固氮酶的活性,从而影响氮的固定^[5];果胶能与Ca、Mg等阳离子相互作用缓解质子对拟南芥根系的毒害作用^[6]。烟草细胞壁果胶提供了Al的累积位点,并与Al发生络合^[7]。植物细胞壁的果胶含量可以与硼形成不溶的络合物,并决定了细胞壁对硼的需求量和移动^[8]。果胶能增强可变电荷土壤(砖红壤和红壤)对铜和镉的吸附,特别是在低pH的条件下^[9]。果胶能与重金属Cu等发生静电吸附和络合作用等,从而影响其在土壤中的活性和移动性^[4]。果胶主要是通过静电作用引起可变电荷土壤对镉吸附的增加。随着添加量的增加,可变电荷土壤对铜和镉的吸附量明显增加,砖红壤的增加量比红壤的增加更大。果胶增强了无定形铁铝氢氧化物对铜镉的吸附,为果胶促进可变电荷土壤吸附重金属提供了直接证据^[10]。果胶使得铝水解产物的晶体结构更加无序态,形成了结构中的缺陷,果胶降低了铝水解产物的等电点和表面正电荷,增加了其对铜的吸附,间接证明了果胶促进可变电荷土壤吸附重金属。果胶还会影响动物肠道形态学结构和养分运输^[11]。

再生水灌溉作为一种经济可行的废水循环利用途径,可有效缓解我国北方干旱半干旱地区农业水资源紧缺的压力。再生水中含有氮、磷、钾、有机物,但再生水也会向土壤中带入重金属和盐分并逐年累积,存在一定风险^[12]。从生物质炭和果胶两种物质的理化性质来看,二者均有可能对土壤养分和重金属的迁移转化起到调控作用。但目前关于生物质炭和果胶

对再生水灌溉下土壤—植物系统养分和重金属迁移特征的影响及差异性的研究较少。因此,我们选取新乡市郊区农田土壤为供试土壤,种植玉米,采用根箱试验方法,探讨生物质炭和果胶对再生水灌溉下土壤—植物系统养分和重金属迁移特征的影响及其差异性。该研究可为再生水的农业安全利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤为新乡市郊区农田耕层0—20 cm土壤,土壤类型为碱性砂壤土,基本性质为:pH 8.3,全N、全P、全K、有机质分别为1.42,1.18,18.32,7.17 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为103.64,25.05,235.00 mg/kg,交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别为0.499,0.391,35.93,4.80 cmol/kg,全Cu、全Zn、全Pb、全Cd、全Cr、全Ni、全As、全Hg、全Mn分别为31.96,88.77,27.07,0.31,50.1,30.76,11.5,0.12,743.45 mg/kg,全Fe 32.26 g/kg,均未超过土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)。土样风干磨碎后过2 mm筛备用。

生物质炭是由河南省商丘市三利新能源有限公司提供的小麦秸秆炭,总C、总N、总P、总K质量分数分别为625.84,5.24,0.89,44.24 g/kg,阳离子交换量为33.60 mmol/kg,Cu、Zn、Pb分别为26.51,42.50,9.25 mg/kg,其他重金属未检出。

果胶购买自阿拉丁试剂公司,半乳糖醛酸(干基计)含量不低于74%。试验所用再生水取自新乡市骆驼湾污水处理厂,基本性质为:pH 8.10,EC值为1.66 mS/cm,全N、全P、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 含量分别为9.43,1.78,8.30,217.50,399.42 mg/L,全Ca、全Mg含量分别为1.23,1.28 g/L,全Fe、全Mn、全Cu、全Zn、全Pb、全Cd、全Ni含量分别为10.8,0.010 6,0.006 7,0.046,0.013,0.004 1,0.006 6 mg/L。

供试玉米品种为浚单20。

1.2 根箱试验

试验于2016年8—10月在中国农业科学院农田灌溉研究所日光温室进行。采用长14 cm、高17 cm、宽12 cm的PVC根箱进行试验,沿长边把根箱用300目尼龙网分成5部分(5:1:2:1:5),两头为非根际,其次为过渡区,最中间为根际。每个处理肥料添加量均为:N(尿素)200 mg/kg,P(过磷酸钙,

P_2O_5 为 16%) 100 mg/kg, K (氯化钾) 200 mg/kg。生物质炭/果胶按 1% 的比例与土壤混匀, 不加炭和果胶的土壤为对照, 每个根箱装土 3 kg, 灌蒸馏水 400 mL, 第 2 天在根际播种玉米, 每个处理播 6 粒种子。种子发芽一周后每个处理间苗至 3 株, 然后开始进行再生水和蒸馏水灌溉, 共 6 个处理, 每个处理重复 3 次。试验期间灌溉水量为 100 mL/(盆·d)。试验共进行 60 天, 在第 60 天收获植物, 分为地上部分和根系, 取根际和非根际的土样。植物样用蒸馏水清洗后, 60 °C 烘至恒重, 称重, 地上部分成茎和叶, 研磨过 60 目筛备用。土样风干研磨过 60 目筛备用。

1.3 指标测定

按 1:2.5 的固液比制备土壤悬液, 用电位法测定 pH, 用电导法测定 EC; 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤有效磷采用 $NaHCO_3$ 提取—钼锑抗比色法测定; 土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定; 土壤全磷含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定; 土壤全钾含量采用 NaOH 熔融—火焰光度法 (上海傲谱, HP1401) 测定; 土壤速效钾含量采用 NH_4AC 提取—火焰光度法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土壤交换态钾钠采用 NH_4AC 交换—火焰光度法测定; 土壤交换态钙镁采用 NH_4AC 交换—原子吸收分光光度法 (HITACHI, Z-5000) 测定; 土壤有效态金属采用 DTPA 提取—原子吸收分光光度法测定。植株经 H_2SO_4 和 H_2O_2 消解后分别采用凯氏定氮法、钒钼黄比色法和火焰光度法测定氮、磷、钾全量; 经微波 (MILESTONE, ETHOS One) 消解后采用原子吸收法测定植株 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 全量。

生物质炭和果胶的 zeta 电位采用电泳仪 (Zeta-plus 90, Brookhaven Instruments Corporation, Holtsville, NY, USA) 进行测定, 具体方法为: 称取 0.125 g 过 0.075 mm 筛的生物质炭或果胶于 1 000 mL 的锥形瓶中, 加入 500 mL 1 mmol/L NaCl 溶液作为支持电解质, 超声分散 1 h 后测定悬液 pH, 再把悬液分成 5 份, 用稀 HCl 或者 NaOH 溶液将悬液体系的 pH 调节至 4.0~8.0, 然后在 25 °C 下振荡 2 h, 根据需要再调节 pH 值, 放置 24 h 后保持恒定时进行 zeta 电位的测定^[4]。根据悬液体系的 pH 和 zeta 电位值制作 zeta 电位—pH 曲线。

1.4 数据分析及处理方法

采用 SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, Version 16.0) 对数据进行方差分析, 并采用 Duncan 多重检验法对各个处理进行差异显著性检验。土壤交换态钾钠钙镁之和计为土壤有效阳离子交换量 (CEC); 转运系数 = 叶中元素含量 / 根中元素含量。

2 结果与分析

2.1 果胶和小麦秸秆炭的带电特征

以 1 mmol/L NaCl 溶液作为支持电解质的 0.25 g/L 的生物质炭和果胶悬液 pH 分别为 9.17 和 4.31, 前者呈碱性, 后者呈酸性。两者 Zeta 电位测定结果见图 1。果胶带负电荷量高于小麦秸秆炭。本研究使用的土壤带负电荷量已经较高, 所以带负电生物质炭和果胶的加入对土壤带负电量影响较小。生物质炭和果胶的性质差异决定了两者在对养分和重金属等在土壤—植物系统的迁移转化中的不同表现。果胶富含半乳糖醛酸和部分发生甲氧基化的半乳糖醛酸, 其主要成分是部分甲酯化的 α -(1,4)-D-聚半乳糖醛酸。本供试土壤为恒电荷土壤, 这类土壤对有机酸的吸附能力很弱, 当有机酸与重金属离子形成络合物后, 离子所带的正电荷减小, 与土壤之间的吸附亲和力减弱, 也就是说有机酸与重金属离子形成可溶性络合物抑制了土壤对重金属的吸附^[13-14]。生物质炭表面有丰富的羧基和酚羟基等含氧官能团, 既可增加土壤表面的负电荷量, 增加土壤对重金属的静电吸附量, 又可与重金属发生络合反应, 增加土壤对重金属的专性吸附量。生物质炭还可以强有力地吸附铵^[15]和磷^[16]。生物质炭对 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等阳离子的吸附作用也避免了这些阳离子与磷产生沉淀, 增加了土壤中可提取态磷的量^[17]。

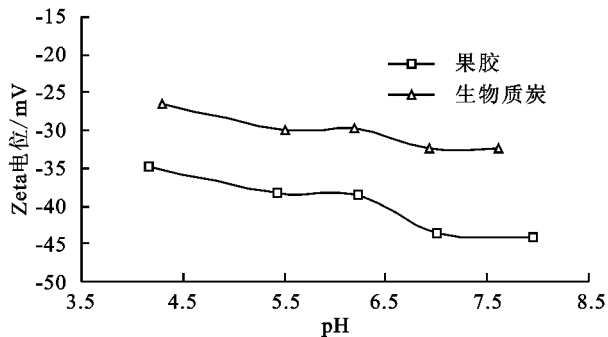
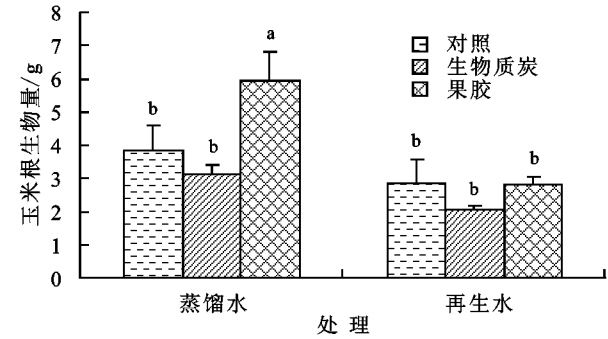


图 1 果胶和生物质炭的 Zeta 电位

2.2 生物质炭和果胶对再生水灌溉植株生物量的影响

与蒸馏水灌溉相比, 再生水灌溉抑制了玉米根系的生长 (图 2)。再生水灌溉时, 对照、生物质炭和果胶处理的根系生物量分别比蒸馏水灌溉时降低了 25.58%, 34.19% 和 52.47%。添加生物质炭对根系的生长无显著影响, 而在蒸馏水灌溉时添加果胶促使根系比对照显著增加了 53.94%。再生水灌溉也在一定程度上抑制了玉米地上部的生长, 对照、生物质炭和果胶处理的根系生物量分别比蒸馏水灌溉时降低了 54.13%, 61.87% 和 21.73%。也就是说, 再生水灌溉时, 添加果胶也促进了地上部的生长, 比对照增加了 59.32%; 但生物质炭处理的地上部生物量与对照相比稍有降低, 但无显著差

异。总的来说,再生水灌溉条件下,相较于生物质炭,果



注:图柱上方不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 生物质炭和果胶对再生水灌溉植株生物量的影响

2.3 生物质炭和果胶对再生水灌溉土壤 pH 的影响

与蒸馏水灌溉相比,再生水灌溉增加了对照和果胶处理根际和非根际土壤的 pH(表 1),且在根际差异显著($P<0.05$),分别增加了 0.08 和 0.09 个 pH 单位。蒸馏水灌溉条件下,与对照根际土壤 pH 相比,果胶显著降低了 0.05 个 pH 单位($P<0.05$);生物质炭处理根际土壤的 pH 分别比果胶和对照高了 0.08 和 0.03 个 pH 单位,前者达到显著水平。再生水灌溉条件下,生物质炭和果胶处理根际土壤 pH 比对照有所降低,但无显著差异。所有处理非根际土壤 pH 无显著差异。根际 pH 均高于非根际,可能由于根际活跃的微生物活动促进了有机氮的矿化^[18]。

表 1 生物质炭和果胶对再生水灌溉土壤 pH 的影响

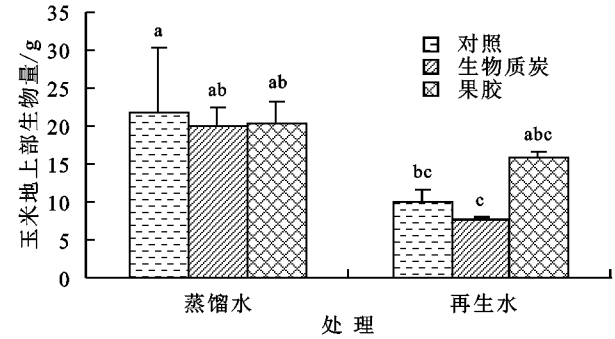
处理		根际	非根际
对照	蒸馏水	8.19±0.01b	8.14±0.04a
	再生水	8.27±0.02a	8.16±0.02a
生物质炭	蒸馏水	8.22±0.01ab	8.15±0.01a
	再生水	8.24±0.02ab	8.12±0.04a
果胶	蒸馏水	8.14±0.02c	8.20±0.04a
	再生水	8.23±0.01ab	8.23±0.05a

注:同一列数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),表中数据形式为均值±标准差。下同表 4 和表 5。

2.4 生物质炭和果胶对再生水灌溉土壤和植株养分含量的影响

再生水处理各养分含量和蒸馏水处理基本无显著差异(表 2)。再生水灌溉下,与对照相比,生物质炭增加了根际土壤大量元素全 N、全 P、全 K 的含量,但无显著差异;果胶也增加了根际土壤全 N、全 P 的含量,但无显著差异。两者对土壤中量元素全 Ca 含量无显著影响,增加了根际土壤全 Mg 含量,蒸馏水灌溉时生物质炭和果胶处理分别比对照增加了 1.34%和 5.92%,再生水灌溉时分别增加了 3.90%和 7.33%($P<0.05$)。对于微量元素有效态 Fe、Mn 来说,生物质炭处理根际土壤两者含量低于对照,蒸馏水处理两者分别比对照降低了 2.84%和 3.92%,再生水处理分别降低了 5.39%和 18.41%;果胶增加了两者在根际土壤的含量,蒸馏水处理两者分别比对照增加了 71.31%($P<0.05$)

胶可以促进植株的生长。



和 89.56%($P<0.05$),再生水处理分别增加了 30.88% ($P<0.05$)和 9.44%。生物质炭和果胶的添加对土壤有效阳离子交换量无显著影响。与对照相比,生物质炭对土壤中碱解氮、有效磷含量无显著影响,而果胶增加了两者的含量,且果胶的作用更强。以根际土壤为例,果胶处理土壤碱解氮含量在蒸馏水和再生水灌溉时比对照分别增加了 24.58%和 12.24%,有效磷含量显著增加($P<0.05$),增加幅度分别达到了 205.21%和 208.13%。尽管如此,相比于果胶,生物质炭显著提高了土壤有效钾的含量($P<0.05$),蒸馏水和再生水灌溉时根际比对照分别增加了 19.19%和 42.86%,非根际土壤分别增加了 38.99%和 42.51%。生物质炭和果胶均增加了土壤有机质含量,且在根际差异显著。生物质炭处理土壤有机质含量在蒸馏水和再生水灌溉时比对照分别增加了 12.82%和 3.69%,果胶处理分别增加了 16.48%和 6.69%。

添加生物质炭和果胶对再生水灌溉植株养分含量的影响见表 3。再生水处理植株养分含量和蒸馏水相比基本无显著差异。植株地上部氮、磷、钾含量均高于根系。与对照相比,生物质炭处理对植株根、茎和叶中氮含量无显著影响,果胶处理除再生水灌溉时叶中氮含量下降不显著外,根、茎、叶中氮含量在两种水灌溉下均显著下降($P<0.05$)。除蒸馏水灌溉时果胶处理茎中磷含量显著降低外,生物质炭和果胶的添加对植株 P 含量无显著影响。虽然果胶处理氮磷含量较低,但再生水灌溉时氮磷转运系数最高,分别为 1.78 和 2.82;再生水灌溉时生物质炭处理氮磷转运系数分别为 1.63 和 1.96,对照分别为 1.04 和 1.45。生物质炭和果胶均增加了植株地上部钾含量;生物质炭处理茎中钾含量在蒸馏水和再生水灌溉时分别比对照增加了 156.14%和 138.76%,叶中分别增加了 7.09%和 53.21%;果胶处理茎中钾含量在蒸馏水和再生水灌溉时分别比对照增加了 57.61%和 19.96%,叶中分别增加了 23.34%和 5.12%。同氮磷一样,再生水灌溉时果胶处理的钾转运系数依然最高为 6.14,生物质炭处理和对照的分别为 1.62 和 3.29。

Ca 在根中含量最高,而 Mg 在叶片中含量最高。除蒸馏水灌溉时,叶中 Ca 含量显著低于对照外,生物质炭对植株 Ca 含量无显著影响;而果胶的添加显著降低了植株的 Ca 含量。除了蒸馏水灌溉时,叶中 Mg 含量显著低于对照外,生物质炭对植株 Mg 含量无显著影响;果胶对植株 Mg 含量也无显著影响。Fe 和 Mn 主要积累在植株根中。果胶处理植株茎和叶

中 Fe、Mn 含量与生物质炭处理的对照无显著差异,但根中 Fe、Mn 含量高于生物质炭处理和对照。在蒸馏水灌溉时,果胶处理根中 Fe 含量分别比生物质炭处理和对照高了 165.29%($P<0.05$)和 91.76%,Mn 含量分别高了 113.01%和 9.91%;再生水灌溉时,根中 Fe 含量分别比生物质炭和对照高了 32.34%和 35.04%,Mn 含量分别高了 54.01%和 17.40%。

表 2 生物质炭和果胶对再生水灌溉土壤养分含量的影响

土壤 养分	根区	对照		生物质炭		果胶	
		蒸馏水	再生水	蒸馏水	再生水	蒸馏水	再生水
全 N/(g·kg ⁻¹)	根际	1.31±0.07a	1.31±0.07a	1.39±0.05a	1.38±0.04a	1.38±0.05a	1.38±0.03a
	非根际	1.20±0.02b	1.30±0.01a	1.32±0.03a	1.30±0.01a	1.28±0.03a	1.26±0.02ab
全 P/(g·kg ⁻¹)	根际	1.25±0.01a	1.31±0.06a	1.47±0.15a	1.47±0.12a	1.54±0.02a	1.53±0.02a
	非根际	1.37±0.04a	1.43±0.12a	1.40±0.05a	1.37±0.03a	1.48±0.06a	1.48±0.08a
全 K/(g·kg ⁻¹)	根际	17.96±0.28c	18.59±0.20b	19.13±0.04a	18.87±0.14ab	17.87±0.05c	17.52±0.17c
	非根际	17.92±0.21a	17.81±0.14ab	18.16±0.13a	18.12±0.02a	18.15±0.11a	17.43±0.15b
全 Ca/(g·kg ⁻¹)	根际	34.69±0.40a	33.49±0.24a	34.56±0.55a	36.31±1.12a	34.84±0.80a	34.49±0.82a
	非根际	34.96±0.64a	35.11±1.63a	35.06±1.14a	36.89±2.02a	33.23±0.53a	36.57±0.40a
全 Mg/(g·kg ⁻¹)	根际	9.66±0.12bc	9.62±0.10c	9.79±0.13abc	9.99±0.17abc	10.23±0.20ab	10.32±0.15a
	非根际	10.53±0.12a	10.49±0.27a	9.70±0.19ab	10.28±0.47a	8.73±0.32b	8.97±0.31b
有效 Fe/(mg·kg ⁻¹)	根际	3.43±0.07c	3.48±0.16c	3.33±0.09c	3.30±0.13c	5.87±0.03a	4.56±0.26b
	非根际	2.56±0.08c	2.09±0.30c	2.60±0.09c	2.30±0.00c	5.04±0.07a	4.16±0.44b
有效 Mn/(mg·kg ⁻¹)	根际	15.80±0.50b	12.56±1.77bc	15.18±1.15bc	10.25±0.20c	29.96±2.82a	13.74±0.56bc
	非根际	7.02±0.93c	7.36±0.26ab	8.01±0.43ab	9.26±0.58a	7.73±0.74ab	9.47±0.60a
ECEC/(cmol(+)·kg ⁻¹)	根际	41.01±0.56ab	39.99±1.60ab	41.63±0.89a	38.31±1.08b	41.25±0.70ab	39.85±0.44ab
	非根际	37.87±8.36a	39.40±1.87a	39.30±1.08a	37.54±1.10a	33.68±0.54a	36.46±0.49a
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	根际	92.81±1.41a	92.81±7.07a	97.03±3.81a	99.94±7.77a	115.62±16.63a	104.16±0.69a
	非根际	79.14±3.77c	86.68±3.77bc	92.75±3.29abc	96.99±1.00ab	109.92±1.66a	103.64±9.30ab
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	根际	43.20±2.95b	41.87±0.10b	42.79±1.22b	43.17±1.37b	131.86±3.69a	129.02±6.55a
	非根际	46.96±1.66b	47.57±1.81b	50.33±1.43b	49.70±1.93b	130.21±8.90a	126.73±14.39a
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	根际	165.00±5.00cd	175.00±5.00c	196.67±3.33b	250.00±8.66a	153.33±3.33d	156.67±4.41cd
	非根际	265.00±0.00b	272.50±2.50b	368.33±6.01a	388.33±8.82a	231.67±6.67c	268.33±8.33b
有机质/(g·kg ⁻¹)	根际	7.71±0.24b	8.46±0.50b	8.70±0.06a	8.77±0.08a	8.99±0.28a	9.02±0.25a
	非根际	6.87±0.25c	7.27±0.13bc	8.79±0.61ab	8.97±0.72a	8.03±0.06abc	8.08±0.31abc

注:同一行数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),表中数据形式为均值±标准差。下同表 3 和表 6。

表 3 生物质炭和果胶对再生水灌溉植株养分含量的影响

营养 元素	植株不 同部分	对照		生物质炭		果胶	
		蒸馏水	再生水	蒸馏水	再生水	蒸馏水	再生水
N/(g·kg ⁻¹)	根	10.52±1.59ab	12.32±0.23a	12.96±0.37a	12.68±0.61a	5.69±0.73c	8.49±1.54bc
	茎	14.81±0.19a	15.10±0.48a	13.48±1.12a	16.59±2.32a	6.40±1.24b	6.98±1.69b
	叶	17.10±0.58a	13.15±0.76abc	14.14±0.83abc	16.08±1.96ab	10.36±0.95c	12.68±1.12bc
P/(g·kg ⁻¹)	根	0.76±0.03a	0.82±0.05a	0.93±0.10a	0.83±0.05a	0.68±0.03a	0.71±0.09a
	茎	1.26±0.21a	1.10±0.04a	1.05±0.16ab	1.44±0.06a	0.67±0.10c	1.12±0.12a
	叶	1.53±0.13a	1.38±0.18a	1.18±0.10a	1.48±0.20a	1.39±0.07a	1.61±0.18a
K/(g·kg ⁻¹)	根	1.68±0.06bc	2.13±0.05abc	2.48±0.19ab	2.01±0.29abc	2.66±0.36a	1.35±0.12c
	茎	3.60±0.53b	5.42±0.65b	9.23±4.04ab	12.95±0.82a	5.68±0.94ab	6.51±1.32ab
	叶	7.33±0.55b	7.16±1.60b	7.85±1.35ab	10.97±1.12a	9.04±0.81ab	7.53±0.29ab
Ca/(g·kg ⁻¹)	根	18.58±0.50a	18.81±0.11a	18.55±1.52a	18.85±0.87a	15.51±0.24b	15.48±0.41b
	茎	11.19±0.19a	11.24±0.46a	11.35±0.71a	12.82±0.03a	5.96±0.45c	7.81±0.48b
	叶	12.91±0.00a	12.09±0.91a	9.20±0.40b	11.58±0.48a	8.30±0.51bc	7.16±0.59c
Mg/(g·kg ⁻¹)	根	2.73±0.22a	3.03±0.11a	3.07±0.15a	3.06±0.19a	2.80±0.24a	2.88±0.26a
	茎	2.89±0.13a	2.93±0.08a	2.91±0.05a	2.95±0.09a	2.50±0.09a	2.92±0.27a
	叶	3.55±0.05ab	3.40±0.06abc	3.10±0.15c	3.71±0.12a	3.22±0.05bc	3.44±0.15abc
Fe/(mg·kg ⁻¹)	根	4362.82±1531.08ab	3254.68±448.19b	3153.58±699.26b	3321.04±119.95b	8365.99±970.38a	4395.09±2267.18ab
	茎	79.62±7.62a	74.21±5.89a	98.58±11.14a	101.84±19.67a	80.74±11.38a	97.70±11.60a
	叶	223.14±2.14a	236.63±13.08a	182.26±43.24a	182.26±24.51a	190.58±3.54a	193.65±1.97a
Mn/(mg·kg ⁻¹)	根	170.45±64.34ab	131.22±31.11b	123.24±23.65b	140.15±8.21ab	262.52±30.19a	154.05±53.73ab
	茎	34.55±9.40a	24.48±0.37a	30.93±1.61a	25.11±1.23a	23.05±3.00a	22.34±4.83a
	叶	53.25±9.42a	46.37±4.09abc	38.67±3.88bc	39.14±4.73abc	50.84±1.63ab	34.70±0.33c

2.5 生物质炭和果胶对再生水灌溉土壤盐渍化的影响

与蒸馏水灌溉相比,再生水灌溉增加了根际和非根际土壤电导率,除了对照根际土壤差异不显著,其他条件均差异显著(表 4)。这是因为再生水含盐量较高,随着再生水的频繁灌溉,土壤中盐分逐渐积累^[19-20]。灌溉水源相同时,生物质炭、果胶处理和对照三者之间的土壤电导率无显著差异。

2.6 生物质炭和果胶对再生水灌溉土壤和植株重金属含量的影响

再生水中重金属含量较低,所以再生水灌溉条件下根际、非根际土壤重金属含量跟蒸馏水相比基本无明显变化(表 5)。与对照相比,生物质炭降低了有效 Cu 在根际和非根际($P<0.05$)土壤的含量以及根际土壤($P<0.05$)有效 Ni 含量,对土壤有效 Zn、Pb、Cd

的含量无显著影响。与生物质炭不同的是,果胶显著增加了根际和非根际土壤有效 Cu、Pb、Ni 的含量($P<0.05$),以根际土壤为例,土壤有效 Cu 含量在蒸馏水和再生水灌溉时分别比对照增加了 23.15%和 3.18%,有效 Pb 分别增加了 25.70%和 22.53%,有效 Ni 分别增加了 35.16%和 2.72%。

表 4 生物质炭和果胶对再生水灌溉土壤电导率的影响

			单位: $\mu\text{S}/\text{cm}$
处理		根际	非根际
对照	蒸馏水	563±22ab	486±55b
	再生水	653±46ab	772±57a
生物质炭	蒸馏水	531±37b	456±22b
	再生水	700±72a	814±37a
果胶	蒸馏水	530±16b	404±13b
	再生水	688±20a	695±46a

表 5 生物质炭和果胶对再生水灌溉对土壤有效态重金属含量的影响

		单位: mg/kg									
处理		Cu		Zn		Pb		Cd		Ni	
		根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际
对照	蒸馏水	2.13±0.01b	2.23±0.03bc	1.00±0.03a	0.83±0.04d	1.86±0.04b	1.71±0.04b	0.20±0.01bc	0.19±0.01b	0.38±0.00b	0.24±0.00c
	再生水	2.15±0.01b	2.30±0.03b	0.99±0.01a	0.91±0.00b	1.82±0.05b	1.55±0.07b	0.22±0.01a	0.19±0.01b	0.39±0.03b	0.24±0.03c
生物质炭	蒸馏水	2.11±0.04b	2.16±0.04c	1.01±0.04a	0.90±0.01b	1.78±0.07b	1.73±0.05b	0.20±0.00bc	0.18±0.00b	0.32±0.01c	0.24±0.01c
	再生水	2.13±0.07b	2.19±0.01bc	0.98±0.02a	0.97±0.01a	1.83±0.05b	1.63±0.00b	0.21±0.00ab	0.21±0.00a	0.28±0.01c	0.26±0.01bc
果胶	蒸馏水	2.63±0.07a	2.51±0.00a	0.97±0.03a	0.85±0.01cd	2.34±0.01a	2.23±0.02a	0.20±0.00bc	0.18±0.00b	0.52±0.03a	0.31±0.01ab
	再生水	2.22±0.02b	2.47±0.07a	0.94±0.02a	0.89±0.01bc	2.23±0.08a	2.12±0.13a	0.19±0.00c	0.20±0.01a	0.40±0.00b	0.34±0.02a

Cu、Zn、Pb、Ni 主要积累在植物根部,Cd 主要积累在叶片中(表 6),这与王宁等^[21]和王兵等^[22]对油菜的研究结果一致。与土壤中重金属有效态含量大小相呼应,再生水灌溉与蒸馏水灌溉下植株重金属含量基本无显著差异,果胶处理植物根中几种重金属含量基本最高。以蒸馏水灌溉为例说明,果胶处理根 Cu 含量分别比对照和生物质炭处理增加了 1.56%和 21.16%,Zn 含量分别增加了 29.32%和 92.74% ($P<0.05$),Pb 含量分别增加了 58.82% ($P<0.05$)

和 14.61%,Cd 含量分别增加了 34.82%和 26.86%,Ni 含量分别增加了 75.75% ($P<0.05$)和 53.43% ($P<0.05$)。与对照相比,生物质炭处理降低了植株根 Cu、Zn 含量,且在蒸馏水灌溉时 Zn 含量显著差异。虽然果胶处理根中重金属含量高,但是运输到地上尤其是叶子中的重金属含量并不高。再生水灌溉时,对照植株 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 的转运系数分别为 0.72,0.89,1.37,3.29,0.25,生物质炭处理分别为 0.57,0.96,0.70,3.12,0.18,果胶处理分别为 0.60,0.58,0.57,2.07,0.13。

表 6 生物质炭和果胶对再生水灌溉对植株重金属含量的影响

		单位: mg/kg							
元素	植株不同部分	对照		生物质炭		果胶			
		蒸馏水	再生水	蒸馏水	再生水	蒸馏水	再生水		
Cu	根	15.93±2.68a	17.40±0.10a	13.35±2.37a	15.13±0.73a	16.17±1.11a	16.87±2.12a		
	茎	5.89±0.31b	5.96±0.16b	7.70±0.51a	7.40±0.43a	4.55±0.49b	8.59±0.27a		
	叶	11.50±1.50ab	12.50±2.07a	9.80±0.51ab	8.67±0.66b	8.11±1.05b	9.87±0.65ab		
Zn	根	25.87±4.06ab	22.75±3.22bc	17.36±1.58c	19.92±0.11bc	33.45±3.49a	31.95±0.73a		
	茎	16.56±0.47a	14.30±0.96a	15.82±1.78a	16.25±1.02a	8.67±0.56b	10.26±0.30b		
	叶	23.61±1.69a	20.32±2.88ab	19.68±0.44ab	19.08±1.38b	12.27±0.59c	18.37±0.44b		
Pb	根	7.93±2.27c	7.38±3.31bc	10.99±1.07abc	12.12±0.85abc	12.59±0.23ab	13.62±1.50a		
	茎	1.88±0.01c	1.86±0.02c	2.98±0.06b	2.78±0.17b	2.82±0.24b	4.08±0.14a		
	叶	6.42±0.21ab	8.08±0.06ab	6.05±0.92b	8.35±0.19a	6.92±0.66ab	7.64±0.42ab		
Cd	根	0.39±0.02b	0.41±0.09b	0.42±0.10b	0.47±0.04b	0.53±0.04ab	0.73±0.06a		
	茎	0.27±0.05d	0.22±0.00d	0.48±0.01bc	0.55±0.03ab	0.40±0.05c	0.65±0.05a		
	叶	1.30±0.17a	1.32±0.15a	1.19±0.04a	1.48±0.15a	1.39±0.05a	1.49±0.12a		
Ni	根	5.48±0.02b	5.68±0.08b	6.28±1.05b	6.07±0.38b	9.63±0.28a	9.93±1.03a		
	茎	1.24±0.41a	1.22±0.07a	1.01±0.07a	1.06±0.25a	0.89±0.17a	1.46±0.09a		
	叶	1.52±0.02a	1.41±0.04a	1.09±0.15a	1.05±0.21a	1.17±0.15a	1.35±0.39a		

3 讨论

与蒸馏水灌溉相比,再生水灌溉未对土壤和植株养分及重金属含量有显著影响,这与前人研究结果一致^[20]。但再生水灌溉增加了土壤 pH 和 EC,这可能是导致玉米生长不良的主要原因。不管是蒸馏水灌溉还是再生水灌溉,果胶处理的玉米生长情况优于生物质炭。生物质炭和果胶性质的差异决定了两者对土壤化学性质和植株养分及重金属影响的差异性。生物质炭和果胶自身作为有机物质,可以增加土壤中养分元素和有机质含量,在这点上两者是基本一致的,但是果胶对土壤有效养分的增加效果优于生物质炭,果胶对养分的转运能力也优于生物质炭,在增加了土壤有效养分的同时,又提高了养分的利用效率,并生产出了更大的生物量。虽然生物质炭呈碱性,果胶呈酸性,但两者的添加并未引起土壤的 pH 的显著变化,可能由于土壤中碳酸盐的缓冲作用。生物质炭和果胶的添加对土壤电导率均无显著影响,均不会增加土壤发生次生盐碱化的风险。生物质炭富含羧基、酚羟基等含氧官能团,果胶也富含羧基、醛基、羟基等含氧官能团,两者都会和重金属发生静电吸附和络合作用。已有研究表明生物质炭可以有效降低碱性土壤中有效态重金属含量^[23],这与本研究结果一致。而已有的关于果胶的研究集中在南方酸性土壤,研究表明,在较低的 pH 下,果胶可以增加土壤的负电荷量,增加 Cu(II)的静电吸附,同时和 Cu(II)形成络合物并吸附到土壤颗粒表面^[4]。但在北方的碱性土壤,果胶很难被土壤颗粒吸附,并与重金属形成络合物增加了土壤中有效态重金属的含量,同时也使果胶处理的植物根系积累了较多的重金属。但值得庆幸的是,果胶处理对重金属的转运系数较低,避免了重金属在土地部的积累。果胶趋利避害的优良表现值得进一步研究,但是对于食用根系的作物来说,在北方碱性土壤中添加果胶增加了农产品的安全风险。同时,对于重金属修复植物来说,果胶可能会提高修复效率。根系分泌果胶的能力与其吸收养分和重金属能力之间的关联性有待我们进一步研究。养分和重金属总量平衡分析对于了解生物质炭和果胶添加对再生水灌溉下养分和重金属迁移特征、摸清养分和重金属的地球化学循环规律具有重要意义,同样有待于我们进一步研究。

4 结论

再生水可作为替代水源缓解农业水资源的紧缺压力。在本试验条件下,再生水灌溉提高了土壤 pH,增加了土壤盐分,对土壤—植物系统养分和重金属的迁移无显著影响。生物质炭可以增加土壤和植株养分含量,降低土壤有效态重金属和植株重金属含

量。相比于生物质炭,果胶增加了土壤有效养分的含量,提高了养分的利用效率,增加了土壤有效态重金属的含量,降低了重金属从植株根系向地上部的转运,促进了植物的生长。该研究可为再生水、生物质炭和果胶的农业安全利用提供参考。

参考文献:

- [1] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105(1): 47-82.
- [2] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105-112.
- [3] 徐仁扣. 秸秆生物质炭对红壤酸度的改良作用: 回顾与展望[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(4): 303-309.
- [4] Wang R, Zhu X, Qian W, et al. Effect of pectin on adsorption of Cu(II) by two variable-charge soils from southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(24): 19687-19694.
- [5] Khammas K M, Kaiser P. Pectin decomposition and associated nitrogen fixation by mixed cultures of *Azospirillum* and *Bacillus* species[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1992, 38(8): 794-797.
- [6] Koyama H, Toda T, Hara T. Brief exposure to low-pH stress causes irreversible damage to the growing root in *Arabidopsis thaliana*: Pectin-Ca interaction may play an important role in proton rhizotoxicity[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(355): 361-368.
- [7] Chang Y C, Yamamoto Y, Matsumoto H. Accumulation of aluminium in the cell wall pectin in cultured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) cells treated with a combination of aluminium and iron[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999, 22(8): 1009-1017.
- [8] Hu H, Brown P H, Labavitch J M. Species variability in boron requirement is correlated with cell wall pectin[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(2): 227-232.
- [9] Wang R, Zhu X, Qian W, et al. Adsorption of Cd(II) by two variable-charge soils in the presence of pectin[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(13): 12976-12982.
- [10] Wang R H, Zhu X F, Qian W, et al. Pectin adsorption on amorphous Fe/Al hydroxides and its effect on surface charge properties and Cu(II) adsorption[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(10): 2481-2489.
- [11] Sigleo S, Jackson M J, Vahouny G V. Effects of dietary fiber constituents on intestinal morphology and nutrient transport[J]. *American Journal of Physiology*, 1984, 246(1): 34-39.
- [12] 赵全勇, 李冬杰, 孙红星, 等. 再生水灌溉对土壤质量影响研究综述[J]. *节水灌溉*, 2017, (1): 53-58.