

沙穴种植对盐碱土壤水盐运移和番茄生长特性的影响

孙慧慧¹, 屈忠义¹, 王凡², 王丽萍¹, 杨博¹

(1.内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018; 2.巴彦淖尔市水利科学研究所, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要: 为了探讨在滴灌条件下沙土及复配生物炭对盐碱土壤水盐运移和番茄生长特性的影响规律。通过田间小区试验, 设计对照组(CK)、沙穴(T1)和沙穴复配生物炭(T2)3个处理, 分析在滴灌条件下沙穴对盐碱土壤水分、盐分分布及番茄生长特性等方面的影响。结果表明: 不同处理土壤剖面水分、盐分分布极不均匀, 在沙区内各处理平均含水率和EC值均表现为CK>T2>T1, 土壤盐分主要向植株与植株之间的地表裸露区定向迁移, 呈现出EC的高值区, 且高值区位置不同。在滴灌带下方的剖面内, T1、T2处理在0—80 cm土壤内均脱盐, CK处理在0—40 cm土壤内积盐, 在40—80 cm土层脱盐。T2处理下的根系体积是CK处理的3.00倍, 且各处理表现为T2>T1>CK。T2处理下的产量最高, 为57.37 t/hm², 比CK处理增加80.78%, 各处理产量表现为T2>T1>CK, 且沙穴对番茄的品质有显著影响。综上所述, T2处理使得土壤入渗性能得到显著改善, 抑制土壤返盐, 改善土壤水盐状况, 促进作物生长, 为盐碱地的农业开发利用提供理论依据。

关键词: 沙穴; 生物炭; 盐碱地; 水盐运移; 番茄产量

中图分类号: S156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)01-0230-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.033

Impact of Sand Cave Planting on Water and Salt Transport and Tomato Growth Characteristics in Saline-alkali Soil

SUN Huihui¹, QU Zhongyi¹, WANG Fan², WANG Liping¹, YANG Bo¹

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018;

2. Bayanmaoer Institute of Water Conservancy Sciences, Bayanmaoer, Inner Mongolia 015000)

Abstract: In order to investigate the effects of sandy soil and mixed biochar on water and salt transport and tomato growth characteristics in saline-alkali soil under drip irrigation, field plot experiment was carried out with three treatments, including control (CK), sand hole (T1), and sand hole mixed with biochar (T2), analyze the effects of sand holes on soil moisture, salinity distribution and tomato growth characteristics under drip irrigation. The results showed that the distribution of soil moisture and salinity in different treatments was extremely uneven. The average water content and EC value of each treatment in the sand area were CK > T2 > T1. Soil salinity mainly migrated to the bare area between plant and plant, showing a high value area of EC, and the location of the high value area was different. In the section below drip irrigation belt, T1 and T2 all desalinated in 0—80 cm soil, CK accumulated salt in 0—40 cm soil and desalinated in 40—80 cm soil. Root volume under T2 was 3.00 times larger than that under CK, and showed trend as T2 > T1 > CK. The highest yield was 57.37 t/hm² under T2, which was 80.78% higher than that of CK. The yield of each treatment shown as T2 > T1 > CK, and sand hole had a significant effect on tomato quality. In conclusion, T2 can significantly improve soil infiltration, inhibit soil salt return, improve soil water and salt status, and promote crop growth. This study provides theoretical basis for agricultural development and utilization of saline-alkali land.

Keywords: sand hole; biochar; saline-alkali soil; salt and water transport; tomato yield

收稿日期: 2019-07-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41761050, 51809142); 国家重大科技专项(2016YFC0501301)

第一作者: 孙慧慧(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: 412292429@qq.com

通信作者: 屈忠义(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与区域水盐监测研究。E-mail: quzhongyi68@sohu.com

河套灌区光热资源丰富,近年来加工型番茄的种植规模迅速扩大,已成为我国第二大番茄生产基地,但当地土壤盐渍化和次生盐渍化问题加重,严重制约土地的高效利用和农业的可持续发展。在“不与民争粮,不与粮争地”的政策下,盐碱地治理契合国家生态安全战略,是推进生态环境与农业可持续发展的必要过程。长期以来,关于如何降低盐碱土壤盐分,寻求一种既节水控盐又提高作物产量的改良措施成为了众多专家学者^[1-4]研究的焦点,尝试不同改良措施,并取得了较多试验成果。由于盐碱程度较重地区土壤结构性差,偏黏性,不利于盐分的淋洗,尤其是根区土壤,因此考虑采用相应“沙土”物质加以改良盐碱地,能增大土壤的通气性,增加灌溉水的入渗面积,进而使土壤水分在非饱和状态下运动。已有研究^[5-6]表明,客土改良在降低盐渍土壤的 EC 和 pH、改善龟裂碱地土壤水分状况、促进作物生长等方面具有积极作用,同时使土壤水分入渗性能得到明显改善,作物产量达到当地良田水平^[7]。生物炭是面向未来、低成本、可再生的生物质资源,被誉为“黑色黄金”^[8],可以

改善土壤理化性质,提高土壤保水能力和肥力^[9-10]。Van 等^[11]和 Hossain 等^[12]研究发现,施加生物炭后萝卜和番茄的产量增幅均超过 50%。在沙穴内配施生物炭是否有利于盐分的运移和作物的生长目前研究较少^[5-6]。因此,本文通过在盐碱土壤滴头下方设置沙穴,在沙穴内混施生物炭,探讨在滴灌条件下沙土对盐碱地水盐运移和番茄生长特性的影响,为河套灌区盐碱地农业综合利用、加工型番茄的生产等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5—10 月在内蒙古杭锦后旗三道桥澄泥村改盐增粮试验基地(东经 106°54′27″—106°55′89″,北纬 40°48′92″—40°50′08″)开展。该地区属中温带大陆性气候,冬长寒冷,夏短温热,蒸发强烈,年均降水量 136.5 mm,年均蒸发量 1 953.9 mm。年日照时间 3 449.6 h,年均气温 8.7 °C,昼夜平均温差 13.2 °C,年均无霜期 152 d。供试土壤初始理化性质见表 1,番茄生育期地下水埋深 1 m 左右。

表 1 初始土壤物理参数

土层 深度/cm	pH	EC/ (dS · m ⁻¹)	土壤粒径组成/%			土壤质地	容重/ (g · cm ⁻³)
			沙粒	粉粒	黏粒		
0—20	7.97	3.37	6.15	36.83	57.02	粉壤土	1.40
20—40	8.13	2.80	11.68	63.16	25.17	粉壤土	1.46
40—80	8.15	1.72	11.06	55.26	33.69	粉壤土	1.55

注:EC 和 pH 为水土比 5 : 1 配置;土壤质地是根据美国制来划分。

1.2 试验设计

试验设置 3 个水平:对照处理(CK)、沙穴处理(T1)、沙穴复配生物炭处理(T2,生物炭量为 22.5 t/hm²^[13])。每个水平 3 个重复,共 9 个处理。在已有研究^[6]基础上,5 月中旬在滴头正下方将正方体形状(长宽高均为 15 cm)(图 1)的土壤置换成沙土,并在沙穴内移栽番茄幼苗,滴灌带间距为 1.4 m(图 1)。供试作物为加工番茄,品种是“屯河 16 号”,株距 40 cm,种植密度为 35 700 株/hm²。在缓苗和苗期阶段,每 2 天灌水 1 次,每次灌水量为 4 mm 左右。在进入生长阶段后按照张力计控制灌水,当张力计低于 -20 kPa 时开始灌水,每次灌溉 6 mm,共灌水 148 mm,整个生育期追肥量为 375 kg/hm²。底肥使用量:磷酸二胺($\omega(\text{P}_2\text{O}_5)=39\%$) 375 kg/hm²,复合肥($\omega(\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O})$ 为 30% : 5% : 5%) 75 kg/hm²。其余管理和当地农田管理一样。5 月中旬进行移栽,8 月初开始采摘,每隔 12 天采摘 1 次,共 3 次,全生育期 110 天。

当番茄收获后测产量和品质、番茄根系指标、EC 以及含水率。

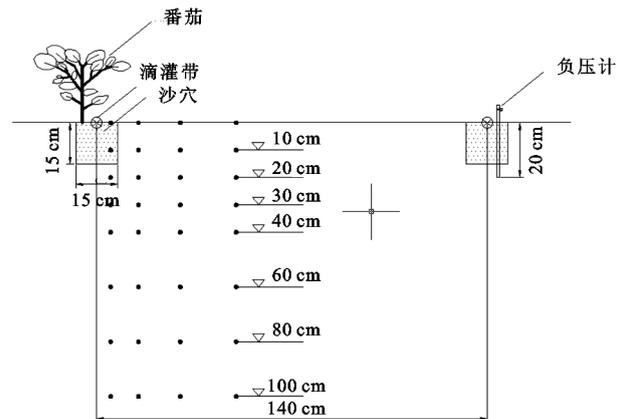


图 1 番茄种植模式及采样点

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤水分 在番茄生长末季(9 月中旬)进行剖面取土,各处理分别在距滴灌带水平距离 5, 15, 30, 50 cm 位置取土,垂直取样深度为 0—40 cm 每层 10 cm, 40—100 cm 每层 20 cm, 取样点设置见图 1。每个处理重复 3 次,用烘箱 105 °C 烘干测定含水率。

1.3.2 土壤盐分 分别在播前、收获后取土测定土壤盐分。播前盐分取土方法为:土层深度 0—40 cm 每层 10 cm, 40—100 cm 每层 20 cm, 收获后取土

方法同上述水分测试取土方法相同。风干土经碾磨、过 2 mm 筛后,用电导率仪测试水土质量比为 5 : 1 的土壤浸提液的电导率,土壤盐分通过测定八大离子之和得出。土壤积盐量 = 收获后的土壤盐分 - 播前土壤盐分。

1.3.3 番茄生长指标

(1) 番茄产量和品质的测定: 各试验小区随机取 3 个 12 m² (宽 3 m × 长 4 m) 面积收获, 得出 12 m² 的番茄总重量, 计算各处理平均单位面积的番茄重量。番茄的可溶性固形物采用 RHBO-90 型号手持折射仪 (LINK, Co.Ltd., Taiwan, China)^[14] 测定; 维生素 C 采用钼蓝比色法^[15] 测定; 番茄红素采用 EV300PC 型号紫外-可见分光光度计法 (Thermo Fisher, USA)^[16] 测定; 番茄蛋白质采用定氮仪^[17] 测定。

(2) 根系测定: 在番茄收获后, 每个处理选取长势一致的 3 株植株, 将根部用水冲洗, 去除杂物。采用 EPSON Perfection 4990 进行根系扫描、分析, 得到相应处理番茄的根长、根表面积、根体积等各项特征参数值, 并将根系烘干称重。

1.4 统计方法

利用 Microsoft Excel 软件对数据进行计算处理, 用 Origin 8.5 和 Sufer 12 软件进行绘图; 用 SPSS

22.0 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤水分特征

番茄收获后, 各处理土层剖面 (0—100 cm) 水分变化情况见图 2。图中“黑色框内”是在距滴灌带水平距离 7.5 cm, 垂直距离 15 cm 的沙穴区域, 笔者定义为沙区。在微观尺度下土壤沙区是所有水分的低值点, 理论上也是水分最低的点, 与沙的持水能力差有关。在沙区内各处理平均质量含水率大小为 CK > T2 > T1, 说明沙穴复配生物炭可以起到保水作用, 解决单一材料改良效果不全面和产生副作用等影响, 有利于作物的生长; T1 和 T2 处理在沙—土接触剖面部位 (距滴灌带水平距离 10 cm 左右) 的含水率大于沙穴内, 小于外部, 这是因为此部位的土壤饱和导水率小于沙, 高于黏土, 有利于番茄根系的生长。垂直方向的土壤水分含量随深度的增加逐渐增加, 表层含水率小于深层含水率, 0—40 cm 土层, 各处理变化剧烈, 40—100 cm 土层, 各处理土壤含水率保持稳定, 这是由于表层受到灌溉、降雨、蒸发等多重因素的影响, 深层土壤含水率受地下水的影响。水分在深度和水平方向扩展速度加快, 使得 0—40 cm 土层含水率相对减少, 说明土壤入渗性能得到显著改善。

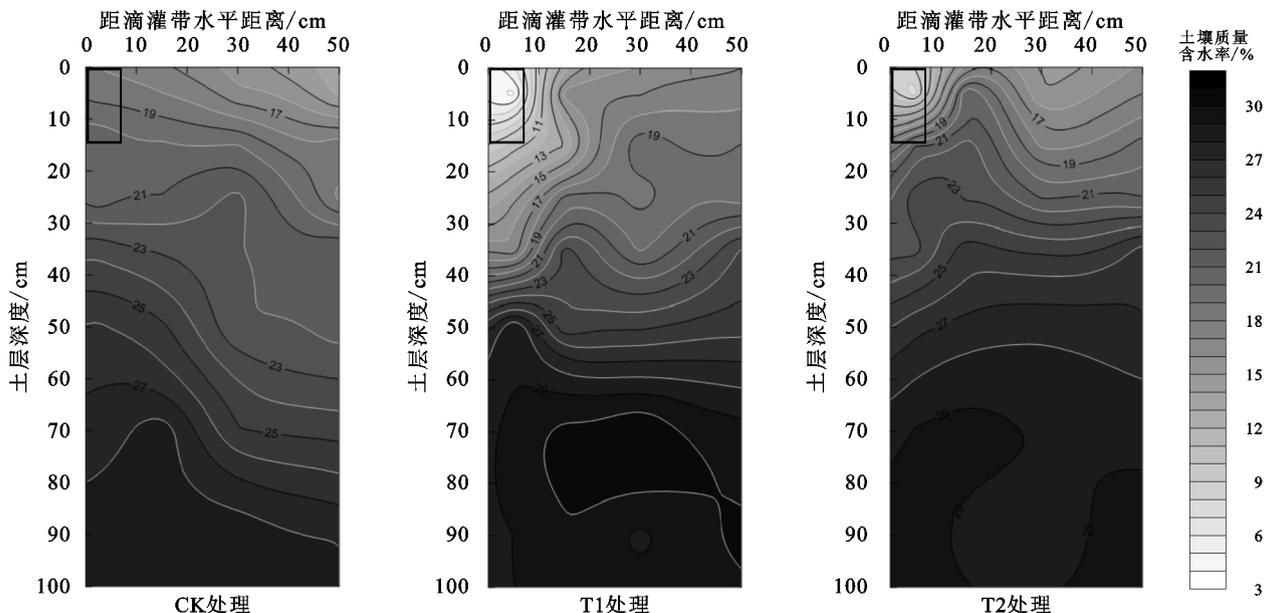


图 2 番茄收获后各处理含水率剖面上的分布

2.2 土壤盐分分布

番茄生育末期对应的土壤盐分剖面分布状况是整个生育期内土壤盐分随水分迁移运动积累的结果 (图 3)。图中“黑框区域”为沙区, 较其他位置的 EC 值均低, 呈现一个低值区, T1、T2 处理的 EC 值均低于 1.00 dS/m, 各处理 EC 的平均值为 CK > T2 > T1, 说明沙穴减少根区盐分的表聚现象。就各处理整个剖面而言, 除了少部分盐分向下层土壤中运移以

外, 土壤中的大部分盐分逐渐积累在植株与植株之间的上层土壤中, 呈现一个 EC 的高值区, 且各处理 EC 的高值区位置不同, T1 处理在沙土和壤土交界处 EC 值积累最多, T2 处理在根区以外积累最多, CK 处理在距滴灌带水平距离 30—50 cm。各处理在滴灌带下方垂向上土壤 EC 值总体变化是自上而下先增加后降低, 在植物与植物之间垂向上土壤 EC 值总体变化是自上而下逐渐降低。

研究表明,滴灌的水分入渗为点源入渗,所以各处理在滴头正下方形成一个低盐区,由于沙土不保水,土壤盐分随湿润峰向沙穴外迁移,使得沙穴内盐分相对于 CK 处理降低,而生物炭的吸附性,使 T2 处理的 EC 值略高于 T1 处理。土壤中多数盐分逐渐积累在植

株与植株之间的上层土壤中并形成一个高盐区,且此时水分较小,所以在高含盐量区域水分变化和盐分变化有着密切的关系,但在低含盐量区域,由于含盐量低,再加上盐分运动本就稍滞后于水分运动,水分和盐分变化关系相对较弱。这说明通过沙穴可抑制返盐现象。

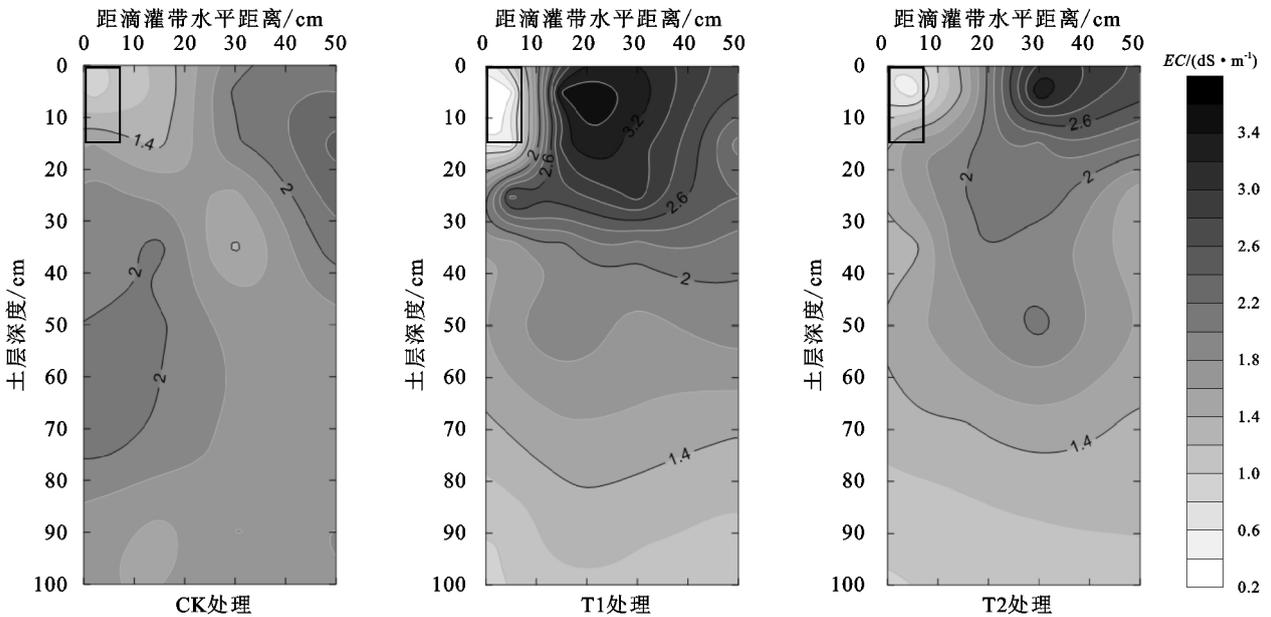


图 3 番茄收获后各处理 EC 值剖面上的分布

土壤盐分累计情况是反映土壤盐渍化程度的重要指标,番茄移栽前和收后各处理滴管带下方 0—80 cm 土层积盐情况见图 4。在 0—80 cm 土壤内,T1 和 T2 处理均脱盐,CK 处理在 0—40 cm 土层内积盐,在 40—80 cm 土层内脱盐。在表层 0—20 cm,T1 处理脱盐量最大,且各处理差异性显著,这是因为该层土壤类型发生变化,沙穴的土壤毛管作用力小,盐分很难向上迁移,减少根区盐分积累。在 20—40 cm 土层内,脱盐量明显降低,且 T2 处理脱盐量大于 T1 处理,CK 处理继续积盐,这是因为该层受到上层土壤蒸发和灌溉的影响,T1 和 T2 处理仍处于脱盐状态,且 T2 处理中生物炭会随水迁移到该层,减少该层盐分。说明沙穴处理能改善作物根区盐分的积累量,使根区处于低盐状态,促进作物的生长发育,且在沙穴复配生物炭后能更好地改善深层土壤的积盐量。

2.3 沙穴对番茄生长特性的影响

2.3.1 沙穴对盐碱地番茄根系特征的影响 根系从土壤中吸收水分和养分,为作物生长发育提供动力,对植株生长发育起至关重要的作用。不同处理下的番茄根系特征对比见表 2,CK 处理的根系长度最大,为 1 064.60 cm,各处理表现为 CK>T2>T1,说明壤土中的根系分布比沙土多,且生物炭有利于提高根系深度下扎,促进根系纵向生长。T2 处理下根系的总表面积、平均直径、体积和干重均为最大,分别是 CK 处理的 2.02,1.98,4.00,1.91 倍,不同处理之间差异显著,表现为 T2>T1>CK。由此可见,沙穴有利

于根系的分生,促进根系整体发育,吸收更多的水分和养分,而生物炭本身富含多种养分和微生物不乏是作物生长所需,能更好地使根系固持和伸展,促进根系的发育。综合比较,T2 处理对番茄根系特征的影响最大。

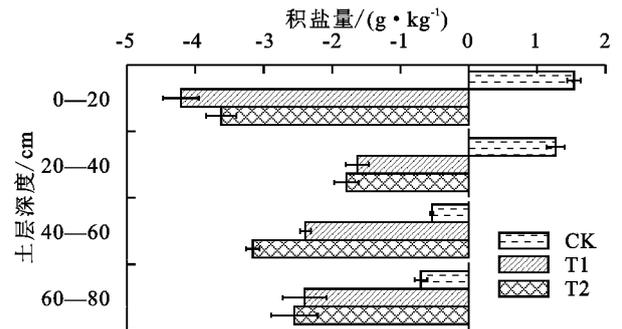


图 4 各处理滴管带下方不同土层内的积盐量

2.3.2 沙穴对加工番茄产量的影响 各处理分 3 次收获,主要是因为番茄果实是阶段性成熟,所以收获番茄宜分多次进行,避免不合理的收获方式造成减产。由图 5 可知,不同处理下,T2 处理的番茄总产量最高,为 57.37 t/hm²,各处理之间差异显著,表现为 T2>T1>CK,且相对于 CK 处理,T1 和 T2 处理的总产量分别增加 31.89% 和 80.78%。沙穴能改善盐碱土壤的理化性质,减少番茄根区盐分,促进番茄根系生长,增加番茄的产量,生物炭能增强土壤吸附性,在土壤中能有效保持水分,吸附 NH₄⁺、NO₃⁻ 等水溶性离子,提高土壤中保水保肥能力,弥补沙土的缺点,从而提高产量。由此可知,T2 处理对作物产量影响最大。

表 2 各处理对加工番茄根系特征的影响

处理	根长/ cm	总表 面积/cm ²	平均 直径/mm	体积/ cm ³	干重/ g
CK	1064.60b	204.83a	0.61a	3.14a	3.16a
T1	743.76a	270.83b	1.16b	7.84b	5.45b
T2	1001.21b	414.80c	1.21b	12.59c	6.04b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

2.3.3 沙穴对加工番茄品质的影响 可溶性固形物、VC 含量以及蛋白质含量是评价番茄口感风味与营养价值的重要指标。由图 6 可知, T1 处理下的可溶性固形物和 VC 含量最高, 分别为 8.97% 和 18.36 mg/100 g, 与 CK 相比增加了 9.92% 和 18.30%, T2 处理下的可溶性固形物和 VC 含量与 CK 相比降低了 2.45% 和 7.86%; 与 CK 处理相比, T1 和 T2 处理下的蛋白质含量均增加, 分别增加了 61.54% 和 28.85%; 番茄红素

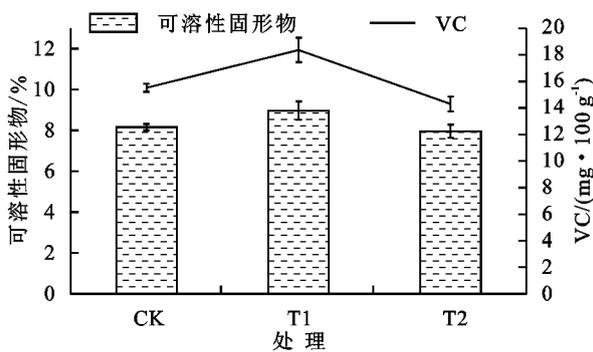
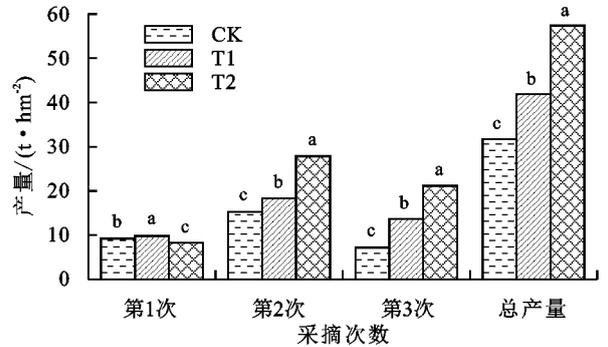


图 6 各处理对加工番茄品质的影响

3 讨论

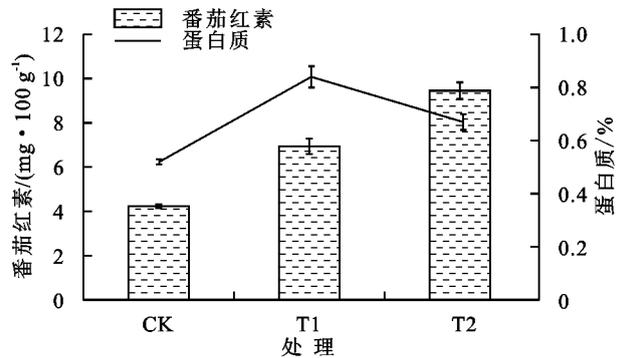
盐碱土壤结构性差, 孔隙度、通气性和透水性显著降低, 甚至表层土壤结皮, 使得植物生长受到限制。一方面, 盐碱地中存在大量的易于淋失的 Na^+ 和 K^+ , 交换性钠增加了团聚体变湿时破碎或崩解的趋势, 崩解团聚体释放的黏粒和粉粒在剖面中向下淋洗时, 堵塞了土壤孔隙, 这是盐碱地渗透性差的主要原因^[18]; 另一方面, 干旱地区强蒸发量, 使得土壤盐分表聚, 作物根区积累盐分, 不能很好地生长。由于滴灌能够精确控制土壤水分供应, 在滴头下方设置沙穴, 并填充优质沙土, 沙穴一方面能够扩大水—土接触面, 即增加灌溉水的入渗面积, 另一方面, 沙穴内还能存储未入渗的水分、延长入渗时间, 促进土壤入渗, 使得土壤入渗性得到显著改善, 这与张体彬等^[5]研究一致。沙土能增大土壤饱和和导水率, 而土壤盐分淋洗效果随饱和和导水率提高而增强^[7], 有效降低盐分表聚现象。而生物炭是由许多紧密堆积且高度扭曲的芳香环片层组成, 所以具有多孔性、比表面积大等特点。同时, 生物炭含有的羟基、苯环等官能团使其具有强大吸附能力和较大的离子交换量, 这为改良土壤、提高水肥利用效率提供了可能。在沙土内添加生物炭

是番茄重要的外观品质指标, T2 处理的最大, 比 CK 处理增加 123.40%。由此可知 T1 处理对番茄的品质有显著影响, 而 T2 处理对番茄可溶性固形物和 VC 的形成影响效果不显著。



注:图中小写字母不同表示同一次采摘下不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

图 5 各处理对加工番茄产量的影响



能使土壤有效含水量增加, 供作物可吸收利用水分增加^[19], 解决单一材料改良效果不全面和产生负作用等影响, 同时施加生物炭能增加作物产量^[20]。

盐碱土的不良理化性质致使作物的生长受到不同程度的抑制。本研究表明, 沙穴处理能促进作物根系生长, 同时增加作物产量, 这与薛铸等^[21]的研究一致。勾芒芒等^[22]研究表明, 生物炭具有丰富的微观孔隙结构和理化性质, 能改善土壤微环境, 为根系提供了良好的生长空间, 同时也增加作物产量, 进而在沙穴内添加生物炭更有利于作物根系的生长和产量的增加。本研究表明, 沙穴对番茄品质有显著影响, 沙穴复配生物炭对番茄品质无影响, 这与 Ashinie 等^[23]研究结果一致, 水分亏缺下番茄果实的品质有增加趋势。Yang 等^[24]研究表明, 随着土壤含盐量增加, 番茄品质得到显著提高, 轻度和中度水分胁迫下, 番茄品质也显著提高, 这与本试验结果有差异, 可能是因为土壤理化性质发生改变, 沙穴内水分减少, 进而影响番茄品质。

以上结果揭示了盐碱地上通过沙穴和沙穴复配生物炭能增加土壤水分渗透能力, 进而改善了土壤中的水分状况, 使得土壤入渗性能得到显著改善, 土壤

表层返盐现象得到显著抑制,且沙穴复配生物炭还有利于保水和保肥作用,弥补沙土的不足,同时沙穴能促进作物根系生长,增加作物产量,且沙穴复配生物炭效果更好。但对于在沙穴内添加生物炭的量没有进一步研究,在今后的试验中应设置不同生物炭的水平,确定在沙穴内最佳生物炭的量,进一步对盐碱土剖面的水分和盐分运动及分布进行分析研究,以进一步说明沙土复配生物炭改良盐碱地的试验结论。

4 结论

(1)沙穴和沙穴复配生物炭处理均可有效淋洗0—80 cm的土壤盐分,降低番茄根系周围的盐分含量,抑制表层土壤的盐分积聚和板结;沙穴复配生物炭处理保水效果较好,土壤返盐现象得到显著抑制,使根区处于低盐状态。

(2)沙穴处理均能促进番茄根系的生长,对番茄的品质有显著影响,沙穴复配生物炭处理总产量提高80.78%。

综上所述,沙穴复配生物炭(22.5 t/hm²)处理对盐碱土壤的改善效果和番茄生长影响最大。

参考文献:

[1] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(4):1227-1234.

[2] 刘娟,张风华,李小东,等.滴灌条件下脱硫石膏对盐碱土改良效果及安全性的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(11):87-93.

[3] 王静,肖国举,张峰举,等.秸秆还田配施腐熟剂对银北盐碱地改良效果研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):209-215,283.

[4] 韩剑宏,李艳伟,张连科,等.生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J].环境工程学报,2017,11(9):5291-5297.

[5] 张体彬,展小云,康跃虎,等.浅层填沙滴灌种植枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地研究[J].农业机械学报,2016,47(10):139-149.

[6] 薛铸,万书勤,康跃虎,等.龟裂碱地沙质客土填深对蔬菜作物生长的影响[J].节水灌溉,2014(1):5-8.

[7] 迟春明,王志春.客土改良对碱土饱和和导水率与盐分淋洗的影响[J].农业系统科学与综合研究,2011,27(1):98-101.

[8] Emma M. Putting the carbon back: Black is the new green [J]. Nature,2006,442(7103):624-626.

[9] 王凡,屈忠义.生物炭对盐渍化农田土壤的改良效果研究进展[J].北方农业学报,2018,46(5):68-75.

[10] 勾芒芒,屈忠义,杨晓,等.生物炭对砂壤土节水保肥及

番茄产量的影响研究[J].农业机械学报,2014,45(1):137-142.

[11] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil,2010,327(1/2):235-246.

[12] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Nelsona agronomic properties of waste water sludge biochar and bio availability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon Esculentum*) [J]. Chemosphere, 2010,78(9):1167-1171.

[13] 高利华,屈忠义.膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J].土壤,2017,49(3):614-620.

[14] 陈秀香,马富裕,方志刚,等.土壤水分含量对加工番茄产量和品质影响的研究[J].节水灌溉,2006(4):1-4.

[15] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:248-249.

[16] 张连富,丁霄霖.番茄红素简便测定方法的建立[J].食品与发酵工业,2001,27(3):51-55.

[17] 张旭.凯氏定氮仪分析植物样品中蛋白质的研究[J].黑龙江科技信息,2014(9):90.

[18] 土壤学与生活[M].北京:科学出版社,2015:400-401.

[19] 勾芒芒,屈忠义,王凡,等.生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J].农业机械学报,2018,49(7):1-12.

[20] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. Soil Use and Management,2011,27(2):205-212.

[21] 薛铸,万书勤,康跃虎,等.龟裂碱地沙质客土填深和秸秆覆盖对作物生长的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(1):38-41.

[22] 勾芒芒,屈忠义.土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J].生态环境学报,2013,22(8):1348-1352.

[23] Ashinie B, Wolfram S, Setegn G, et al. Alternate furrow irrigation of four fresh-market tomato cultivars under semi-arid condition of Ethiopia-Part I: Effect on fruit yield and quality [J]. Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics, 2016,17(2):269-282.

[24] Yang H, Du T S, Mao X M, et al. A comprehensive method of evaluating the impact of drought and salt stress on tomato growth and fruit quality based on EP-IC growth model [J]. Agricultural Water Management,2019,213:116-127.