

生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响

朱成立^{1,2} 吕雯² 黄明逸² 翟亚明^{1,2} 强超²

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学农业工程学院, 南京 210098)

摘要: 为探究生物炭对咸淡交替灌溉下滨海垦区土壤盐分分布以及不同生育期玉米生理生长的影响, 采用江苏省滨海垦区土壤开展玉米盆栽试验。设立不同生物炭与土壤炭土质量比(0, 5%)处理, 采用3种矿化度(1, 3, 5 g/L)微咸水在3个不同生育期(壮苗期、拔节抽雄期、灌浆期)进行咸淡交替灌溉(“咸淡淡”、“淡咸淡”、“淡淡咸”), 同时进行室内生物炭 Na⁺ 吸附试验, 研究不同矿化度下生物炭 Na⁺ 吸附能力变化。结果表明: 微咸水灌溉增加土壤析出液含盐量, 且增长幅度随矿化度增加而加大, 较高土壤含盐量引起的盐胁迫使得玉米光合参数与叶绿素含量在其盐分抗性较弱的营养阶段下降明显。“淡淡咸”的交替灌溉模式下株高和叶面积下降幅度较大, 显著影响玉米生长。高矿化度下生物炭的 Na⁺ 吸附能力显著提高。生物炭能缓解微咸水灌溉条件下土壤盐分表聚现象, 减轻玉米受盐胁迫的程度, 玉米各生长阶段光合参数与叶绿素含量以及株高和叶面积均有所增加, 在高矿化度微咸水处理下效果尤为显著。施加生物炭后, 玉米叶水势负值水平与叶片 Na⁺/K⁺ 比均降低, 说明生物炭可改善植物叶片水分状况并缓解盐胁迫造成的离子毒害。“咸淡淡”、“淡咸淡”交替灌溉模式不利于玉米生长, 导致干物质质量和产量大幅下降, “淡淡咸”灌溉模式下玉米产量最高; 生物炭通过促进玉米光合作用、减轻水分胁迫、避免离子毒害, 最终提高收获指数。研究表明, 生物炭能有效调控土壤盐分, 抑制土壤次生盐渍化, 有利于滨海垦区土地开垦; 同时, 相同微咸水轮灌模式下, 施加生物炭可减轻玉米敏感期的盐分胁迫影响。

关键词: 玉米; 滨海围垦区; 微咸水; 交替灌溉; 生物炭; 盐胁迫

中图分类号: S287; S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0226-09

Effects of Biochar on Coastal Reclaimed Soil Salinity Distribution and Maize Growth with Cycle Fresh and Saline Water Irrigation

ZHU Chengli^{1,2} LÜ Wen² HUANG Mingyi² ZHAI Yaming^{1,2} QIANG Chao²

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-drainage and Agricultural Soil-water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the way of rational utilization of soil and water resources in coastal reclamation area, the feasibility of improving saline soil and water for irrigation with biochar was studied. A pot experiment was carried out in the soil of Jiangsu Yancheng reclamation area. By setting up the different soil biochar contents (0 and 5%) with three kinds of salinity (1 g/L, 3 g/L and 5 g/L) in three growth stages (seedling, jointing and male stage, filling period), the cycle irrigation of fresh and saline water (“saline fresh fresh”, “fresh saline fresh” and “fresh fresh saline”) were carried out. The effects of biochar amendment and cycle irrigation on soil salt distribution and physiological growth of Maize (*Zea mays* L.) at different growth stages were studied. The results were as follows: maximum biochar Na⁺ adsorption was found at the highest salinity level. Under the three cycle irrigations of fresh and saline water, the salt content in the upper soil of 5% biochar treatment was significantly lower than that of the 0 biochar treatment. At the same time, the salt content in the lower layer was increased greatly, indicating that the biochar could alleviate the salt accumulation of surface soil and promote the soil salt moving to deep layer. The saline water irrigation reduced the maize photosynthesis capability parameters and chlorophyll content, because the salt resistance of maize was relatively weak in the nutrition stage, its

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)和国家自然科学基金青年基金项目(51409086)

作者简介: 朱成立(1966—), 男, 教授, 博士, 主要从事水土资源规划、高效灌排理论与技术研究, E-mail: clz@hhu.edu.cn

inhibition was more obvious than that in the reproductive stage, while the treatment of biochar improved the photosynthetic parameters and chlorophyll content in all growth stages, and the favorable effect was especially significant in 5 g/L saline water treatment. The plant height and leaf area of maize plant were decreased greatly and the maize growth was limited obviously under the “fresh saline fresh” alternate irrigation. Meanwhile, the amendment of biochar had a better gain effect on the plant height and leaf area of maize plant. The amendment of biochar improved the water condition of crops and mitigated the ion toxicity caused by salt stress. The leaves of maize showed lower leaf water potential and Na^+/K^+ . The cycle irrigation method of “saline fresh fresh” and “fresh saline fresh” was not beneficial to the growth of maize, resulting in a significant decrease in the dry matter and yield index; the biochar amendment effectively reduced the stress effect of saline irrigation and promoted maize growth, thus enhancing the efficiency of cycle irrigation with fresh and saline water. In conclusion, the addition of biochar into soil was beneficial to land reclamation in coastal reclamation area, effectively controlling soil salinity and inhibiting soil secondary salinization. Furthermore, biochar can also improve the feasibility of cycle irrigation with saline water. Biochar mitigated the effect of salt stress in the sensitive period of crops due to its adsorption ability, reduced production loss and improved the saline water use efficiency. The research result can provide scientific basis and theoretical support for the rational development and utilization of saline water and the sustainable development of agriculture in coastal reclamation area.

Key words: maize; coastal reclaimed area; saline water; cycle irrigation; biochar; salt stress

0 引言

我国东部滨海滩涂资源是重要的后备土地资源^[1],为缓解人口与粮食压力,对其进行开垦是扩展土地资源的有效途径。但垦区土壤含盐量较高,利用率低下^[2],较高的含盐量使土壤具有高电导率、高钠吸附比、低有机质含量等化学特征,土壤物理结构差,保肥能力不强,同时较高含盐量会破坏植物光合系统反应中心,抑制光合作用,影响作物生长^[3-4],导致减产。由于海水入侵、对淡水过度开采以及降水时空分布不均,淡水资源短缺也是制约沿海滩涂资源开垦的另一个重要因素^[5]。滨海地区微咸水储量丰富,研究表明微咸水可以作为淡水替代品用于作物灌溉,然而微咸水灌溉会使作物受到不同程度盐胁迫^[6],采用淡水和微咸水交替灌溉被认为是微咸水资源科学合理的利用方式^[7]。提倡在作物抗盐胁迫能力较弱的生育前期灌溉淡水,在作物抗盐胁迫能力较强的生育后期灌溉微咸水,以减小高含盐量对作物的不利影响^[8]。然而滨海地区淡水资源短缺且时空分布不均匀,在作物生育前期无法完全保证充足的淡水灌溉,微咸水资源的农业利用受到较大限制。

生物炭具有多孔结构、大表面积和较高的阳离子交换能力,应用生物炭对盐渍土改良有助于降低土壤含盐量,减缓盐胁迫^[9-10]。生物炭还可以有效降低土壤容重,提高酸化土壤 pH 值,增加土壤通气透水性,从而促进作物生长^[11-13]。基于咸淡水交替灌溉和生物炭改良盐渍土的相关研究成果,本文以滨海垦区种植广泛且对盐分中度敏感的玉米^[14]为研究对象,通过不同微咸水矿化度、轮灌方式和生物

炭施用量组合试验,探究生物炭和不同咸淡交替灌溉模式共同作用对滨海垦区土壤盐分分布以及玉米生理生长的影响,以期对滨海垦区耕地和微咸水资源高效可持续利用提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与材料

试验于 2017 年 7—11 月在河海大学江宁校区南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室避雨棚内进行。试验区(31°86'N,118°60'E)属亚热带湿润气候。供试土壤于 2017 年 3 月取自江苏省盐城典型的滨海垦区耕作层,取土深度为 0~15 cm,质地属粉砂壤土,容重为 1.5 g/cm³,田间持水率为 34.4%,土壤电导率为 3.82 dS/m。生物炭改良剂由山东泰然生物工程有限公司生产,为木屑于 600℃ 下热解制成,容重 0.4 g/cm³, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量比分别为 3.8、3.0、34.4、2.4 g/kg。供试土壤自然风干后过 2 mm 筛,分层压实填入直径 30 cm、高 50 cm 的圆桶中,土体填装高度均为 40 cm。由于灌溉过程中土壤含水率均未超出田间持水率,故无排水与收集装置。施加生物炭处理的上层(0~20 cm)部分为生物炭与土壤按碳土质量比 5% 均匀混合填装。每桶上层 5 cm 为覆土,5~15 cm 为肥料混合层,将 25 g 尿素、10 g 硫酸钾和 10 g 磷酸二氢钾与土壤均匀混合。玉米品种选用“苏玉 29”,于 7 月 1 日播种,15 d 后开始咸淡轮灌处理。

1.2 试验设计

(1) 玉米咸淡轮灌盆栽试验

试验以不同炭土质量比(0、5%),不同咸淡水轮灌顺序及微咸水矿化度为控制变量。根据玉米生

长状态以及季节性干旱因素将玉米生长时期均匀划分为3个阶段,即第15~45天(壮苗期)、第46~75天(拔节抽雄期)、第76~105天(灌浆期),设置了3种咸淡水轮灌顺序:SF(壮苗期微咸水,拔节抽雄期和灌浆期淡水处理)、FS(拔节抽雄期微咸水,壮苗期和灌浆期淡水处理)、FF(灌浆期微咸水,壮苗期和拔节抽雄期淡水处理)。数字1、3、5表示矿化度,例如SF1表示在壮苗期使用1 g/L微咸水灌溉。壮苗期土壤含水率控制在田间持水率的65%~80%,拔节抽雄期和灌浆期土壤含水率控制在田间持水率的75%~90%,成熟期不灌水,灌溉水量通过对照组称量得到。淡水为试验区灌溉系统自来水,矿化度为0.12 g/L。微咸水由淡水与NaCl(AR)制备而成。试验各处理重复3次,共60个盆栽小区。

(2) 生物炭 Na⁺ 吸附试验

在试管中配置好3种矿化度(1、3、5 g/L)与CK灌溉水各40 mL,加入0.5 g生物炭,每个处理重复3次。试管在振荡器中匀速振荡12 h再放入离心机中高速离心10 min。沥去上层清液收集下层聚合物,并用X射线荧光光谱法测定Na⁺浓度。

1.3 灌水及其他管理措施

灌水管理:试验开始前在盆栽桶壁套上遮光网,防止其温度过高。灌溉水量通过对照组称量得到,无生物炭处理共灌水24 L(壮苗期4次,拔节抽雄期和灌浆期各6次,每次灌水1.5 L),施加生物炭处理共灌水31.5 L(壮苗期5次,拔节抽雄期和灌浆期各8次,每次灌水1.5 L),灌溉水于傍晚通过水壶均匀而缓慢洒入。

苗期管理:每桶撒3粒种,出苗后进行查苗补苗、定苗。

追肥管理:拔节抽雄期,每桶施尿素30 g,在植株旁打深穴,将肥料施入穴内然后培土。

除虫管理:出穗后用喷雾器喷洒农药,防治玉米螟危害。

1.4 指标测定方法

(1) 土壤析出液含盐量

灌溉结束后采用土钻分层取土(0~20 cm、20~40 cm),土样经自然风干、充分研磨后过1 mm筛,按水土质量比1:1配置,提取土壤饱和浸滴液,由DDBJ-350型电导率仪(上海INESA科学仪器有限公司)测定土壤析出液含盐量。

(2) 生物炭 Na⁺ 吸附能力

用X射线荧光光谱法测定Na⁺浓度,生物炭Na⁺吸附能力计算公式为

$$A = B / (0.5 \times 0.04) \quad (1)$$

式中 A——生物炭Na⁺吸附量,mg/g

B——Na⁺初始浓度与最终浓度差值,mg/L

(3) 玉米光合作用指标及叶绿素含量

从播种后每隔15 d测量玉米第3片完全展开叶片的光合气体交换参数。采用TPS-2型便携式光合作用测定系统(PP Systems,美国)在光强900~1 000 μmol/(m²·s)下测量各处理的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r),叶片水分利用效率(WUE)采用 P_n/T_r 计算。

在距离叶片基部40%~60%的区域打圆形孔,孔径10 mm,避开叶脉,记录叶片质量 m (mg)。用95%乙醇浸泡法,定容到25 mL,用分光光度计在波长665 nm与649 nm下测定混合液上清液部分吸光度 A_{665} 、 A_{649} ,叶绿素总含量计算公式为

$$C = C_a + C_b \quad (2)$$

其中 $C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649}$ (3)

$$C_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (4)$$

式中 C_a ——叶绿素a含量,mg/L

C_b ——叶绿素b含量,mg/L

C——叶绿素总含量,mg/L

(4) 玉米生长指标

每隔15 d测量玉米植株株高、叶面积至全生育期结束。株高采用卷尺测量;叶面积采用LI-3000A型叶面积仪测定第2片展开叶。

(5) 玉米叶片水势与叶片 Na⁺/K⁺ 比

在3种灌溉模式下微咸水灌溉生育期结束后,取典型叶片,采用压力室法测叶片水势,采用火焰法测叶片中Na⁺、K⁺离子含量,并计算Na⁺/K⁺比。

(6) 玉米产量及其构成要素

收获时,测量玉米穗质量、籽粒质量,从穗粒中随机取100粒,称量得百粒质量;并收集玉米茎叶,105℃杀青后在70℃干燥箱中干燥至恒定质量,称量计算地上干物质质量。

(7) 耗水量与产量水分利用效率

玉米播种前和收获后,用称量法测定土壤含水率,由于玉米种在避雨盆栽中,且灌溉过程中土壤含水率不超过田间持水率,排水量可忽略不计,耗水量计算公式为

$$ET = I - \Delta W \quad (5)$$

式中 I——灌水量,mm

ΔW ——土壤储水量变化值,mm

玉米产量水分利用效率计算公式为

$$WUE = m_1 / ET \quad (6)$$

式中 WUE——玉米产量水分利用效率,g/L

m_1 ——单位面积籽粒质量,g/m²

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 进行记录与整理,使用 SPSS 20 统计程序对数据进行方差分析,采用 Duncan 法进行多重比较($\alpha = 0.05$),并采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤析出液含盐量与生物炭 Na⁺ 吸附能力变化

图 1(图中 B0 表示无生物炭处理, B5 表示 5% 生物炭处理,下同)为不同灌溉方式与不同生物炭处理下土壤析出液含盐量变化。微咸水灌溉增加土壤析出液盐分,且随矿化度增高累积量显著增加($P < 0.05$),其中上层土壤(0~20 cm)增幅更为明显。SFF5(B0)、FSF5(B0)与 FFS5(B0)的上层土壤析出液含盐量比 CK 分别增加 0.38、0.77、0.60 g/kg,下层析出液含盐量分别增加 0.46、0.27、0.20 g/kg。由于后期淡水灌溉的淋洗,SFF 模式上层盐分含量最低,下层盐分含量最高。FSF 与 FFS 模式下出现盐分表聚,需后续进行淡水淋洗以确保土壤可持续利用。施加生物炭后,在较高矿化度微咸水灌溉下,上层土壤析出液含盐量的增幅显著降低($P < 0.05$),下层土壤析出液含盐量增幅升高。SFF5(B5)、FSF5(B5)与 FFS5(B5)的上层土壤含盐量增幅比无生物炭施加时小,较 CK 分别增加 40.8%、43.1%、25.9%,下层土壤含盐量分别增加 24.9%、52.8%、63.3%。

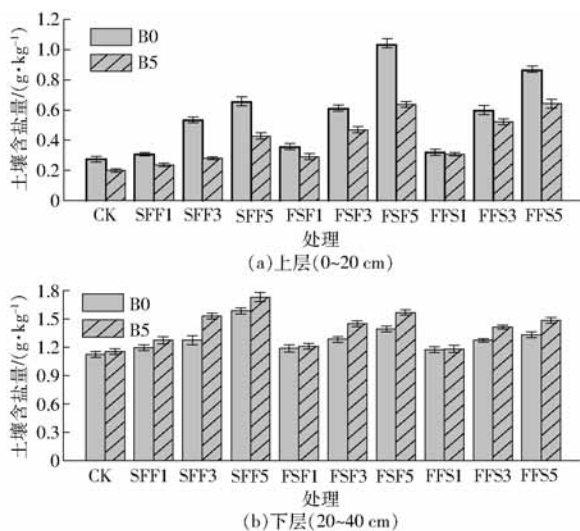


图 1 不同灌溉方式与不同生物炭处理下各土层土壤析出液含盐量变化

Fig. 1 Changes of salt content in different soil layers eluate under different irrigation methods and biochar treatments

图 2(图中不同小写字母表示不同矿化度下生物炭 Na⁺ 吸附能力差异显著($P < 0.05$))为在不同

矿化度下生物炭 Na⁺ 吸附能力。结果表明,在高矿化度下生物炭的 Na⁺ 吸附能力显著提高($P < 0.05$),更多的 Na⁺ 被生物炭吸附于固体聚合物中,在 5 g/L 矿化度下吸附能力最高,为 51.28 mg/g,这与 AKHTAR 等^[15]研究结果一致。由于生物炭较强的吸附作用,Na⁺ 被从土壤溶液中吸附并固定于生物炭土壤聚合物中,土壤溶液含盐量较低^[10]。Na⁺ 使土壤颗粒分散,粘粒膨胀,破坏土壤团聚体结构,导致土壤导水能力降低^[16],生物炭对 Na⁺ 的吸附作用可减少 Na⁺ 对土壤结构的破坏,降低微咸水灌溉引起滨海围垦区土壤发生次生盐渍化的风险。

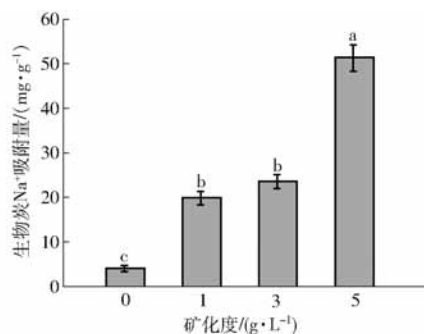


图 2 不同矿化度下生物 Na⁺ 吸附能力变化

Fig. 2 Changes of biochar Na⁺ adsorption capacity under different salinities

2.2 施加生物炭对咸淡轮灌下玉米叶片水分利用效率及叶绿素含量的影响

不同灌溉方式与不同生物炭处理下玉米叶片水分利用效率(WUEL)及叶绿素含量见图 3(图中*表示在 0.05 水平上差异显著,**表示在 0.01 水平上差异显著,折线上方标注表示不同生物炭处理下差异显著水平,下方标注表示在不同矿化度处理下差异显著水平,下同)。从图 3 中可知,低矿化度微咸水灌溉时轻微的盐分胁迫激发玉米光合系统保护机制,导致叶片气孔部分关闭,蒸腾速率(T_r)下降,叶绿素含量下降,但 WUEL 上升。SFF3(B0)与 FFS3(B0)处理下,WUEL 在壮苗期(第 45 天)、灌浆期(第 105 天)较 CK 上升 1.7%、1.8%,叶绿素含量则分别减少 12.0%、4.7%。FSF3(B0)处理下 WUEL 与叶绿素含量在拔节抽雄期(第 75 天)分别下降 4.4%、19.2%。高矿化度微咸水灌溉下非气孔限制增强,伴随着叶绿素退化, P_n 下降远大于 T_r ,所以 WUEL 较 CK 呈下降趋势。SFF5(B0)、FSF5(B0)、FFS5(B0)分别较 CK 下降 6.3%、11.5%、3.1%,叶绿素含量则分别下降 20.0%、19.2%、11.2%。施加生物炭后,WUEL 仍表现出低矿化度下增加、高矿化度下降的趋势,但减幅较小,SFF5(B5)、FSF5(B5)、FFS5(B5)处理的 WUEL 比 CK 减少 5.1%、11.2%、2.7%,叶绿素含量降幅也有所减

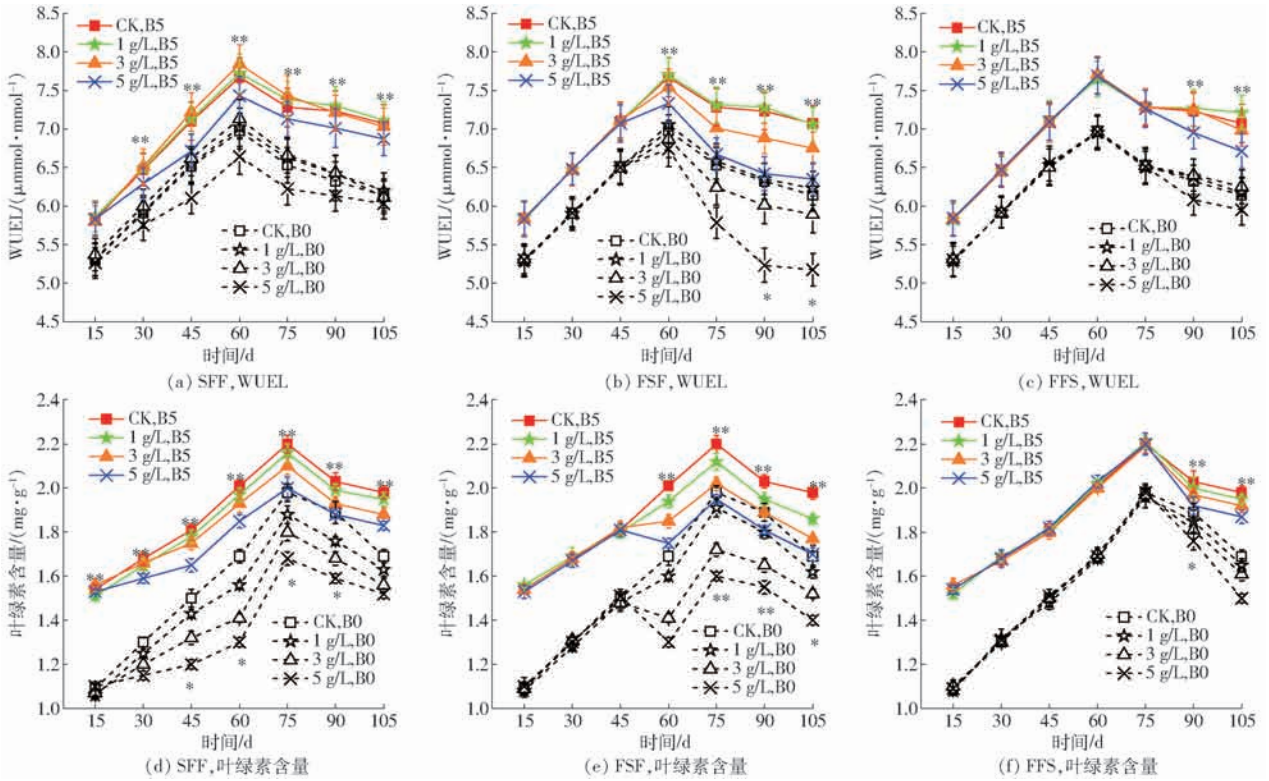


图3 不同灌溉方式与不同生物炭处理下玉米叶片水分利用效率与叶绿素含量的变化

Fig. 3 Changes of leaf water use efficiency and chlorophyll content of maize leaves under different irrigation methods and biochar treatments

小,为6.3%、11.5%、3.1%。微咸水灌溉在玉米营养阶段对其光合参数的抑制作用大于生殖阶段,生物炭的施加显著提高了各生长阶段的光合参数($P < 0.05$),且在高矿化度微咸水灌溉下改善效果更为突出。5 g/L 微咸水处理下光合参数上升10.0%~15.4%,叶绿素含量上升21.9%~37.5%。

2.3 施加生物炭对咸淡轮灌下玉米株高、叶面积的影响

不同灌溉方式与不同生物炭处理下玉米株高、叶面积动态变化见图4。随时间推移,株高与叶面积逐渐增大,并分别于第90、75天达到峰值。微咸水灌溉带入盐分影响玉米生长,且矿化度越大,抑制越严重。SFF5(B0)、FSF5(B0)、FFS5(B0)株高较CK最大下降分别为13.77、32.47、9.75 cm,叶面积最大下降分别为28.75、91.82、14.92 cm²。灌浆期灌溉微咸水对玉米株高和叶面积影响最小,这可能是因为玉米在灌浆期主要进行生殖生长,其盐分敏感程度较营养阶段小。加入生物炭后,株高和叶面积均有显著提高。SFF5(B5)、FSF5(B5)、FFS5(B5)株高最大降幅比无生物炭处理分别减小46%、8%、19.2%,叶面积最大降幅则分别减小48.4%、11.5%、22.4%。生育期结束后,最小株高和叶面积均出现于FSF模式下,FSF5(B5)处理的株高和叶面积比FSF5(B0)处理提高23.55%和16.8%,表明施加生物炭可以

减小微咸水灌溉对玉米的盐胁迫影响程度。

2.4 施加生物炭对咸淡轮灌下玉米叶片水势、 Na^+/K^+ 比的影响

图5为不同灌溉方式与不同生物炭处理下玉米叶片水势与 Na^+/K^+ 比变化情况。微咸水灌溉带入大量 Na^+ ,并且限制玉米对 K^+ 的吸收,导致叶片中 Na^+/K^+ 比增加。5 g/L各处理在微咸水灌溉时期 Na^+/K^+ 比均出现最大增幅,无生物炭处理时较CK分别增加2.35、1.90、0.84,壮苗期最大。加入生物炭后,相同生育期内,各参数处理间差异显著($P < 0.05$),5%生物炭处理的叶片水势负值水平均小于0%生物炭处理。在3个生育期叶片最大 Na^+/K^+ 比较无生物炭处理分别减小64.6%、60.1%、63.9%,生物炭的施加显著降低玉米对 Na^+ 的吸收,并增加 K^+ 的吸收,有效缓解微咸水盐胁迫。灌溉水矿化度的增加导致叶片水势负值水平在各个生育期出现不同程度上升,升幅从小到大依次为灌浆期、拔节抽雄期、壮苗期,SFF5(B0)处理叶片水势负值水平最高,为-1.62 MPa,分别高于拔节抽雄期、灌浆期20.9%、27.0%,表明盐胁迫在壮苗期对玉米叶片水势影响更大。

2.5 施加生物炭对咸淡轮灌下玉米产量及产量水分利用效率的影响

表1列出了不同处理下玉米最终地上干物质物质

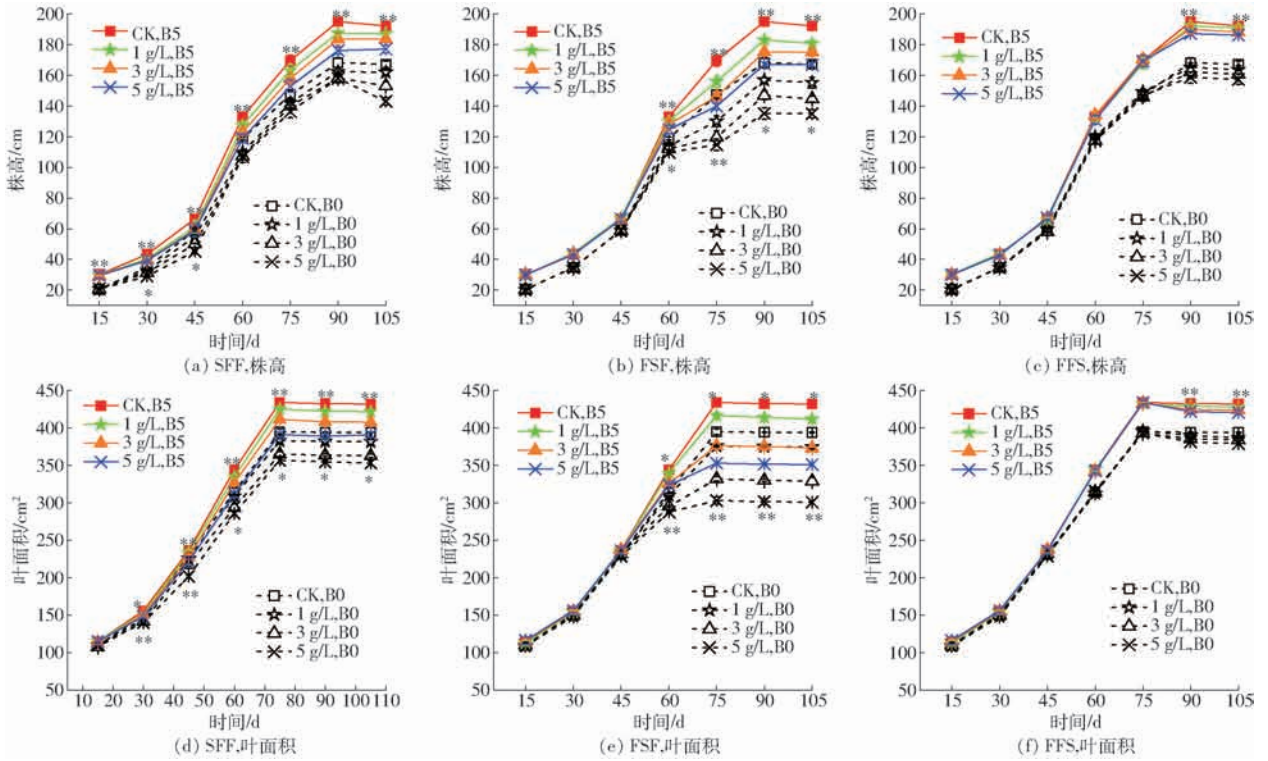


图 4 不同灌溉方式与不同生物炭处理下玉米株高、叶面积变化

Fig. 4 Changes of plant height and leaf area under different irrigation methods and biochar treatments

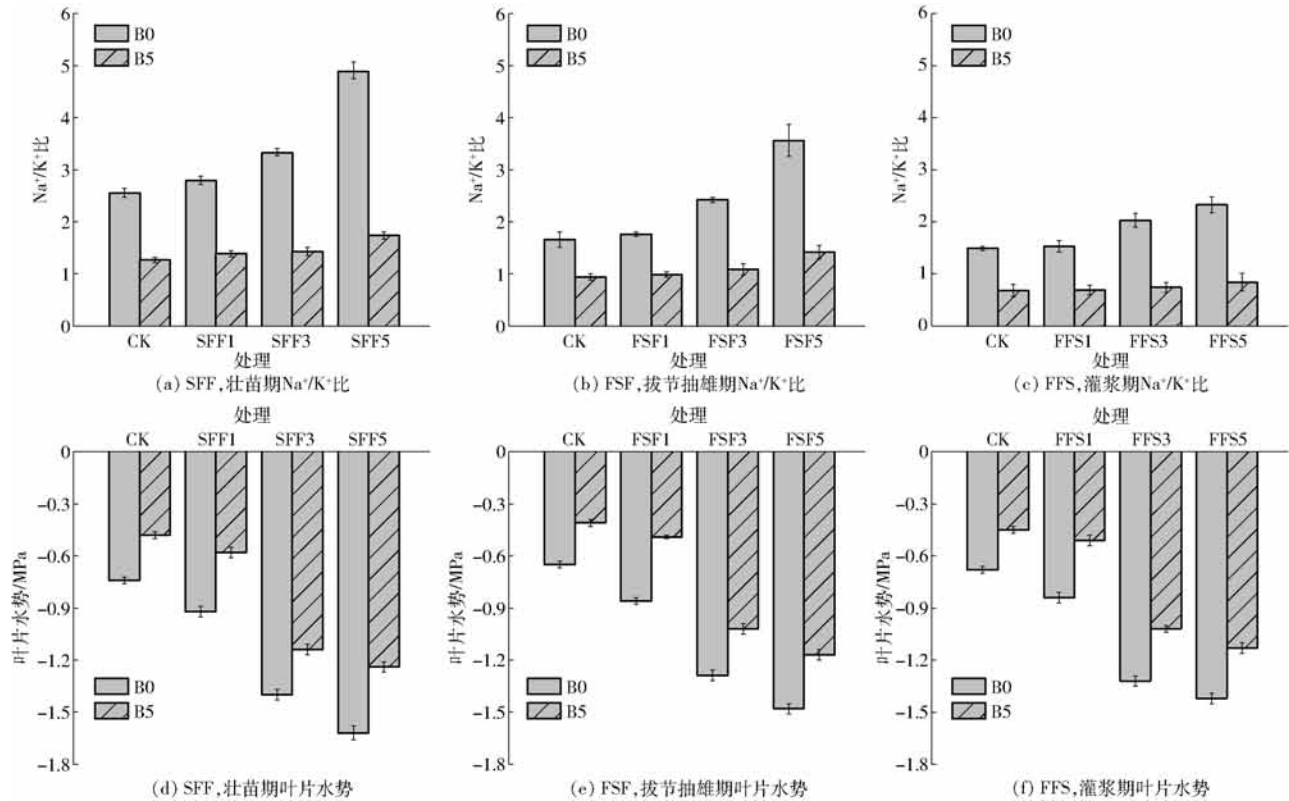


图 5 不同灌溉方式与不同生物炭处理下玉米叶片水势与 Na⁺/K⁺ 比变化

Fig. 5 Changes of leaf Na⁺/K⁺ and water potential under different irrigation methods and biochar treatments

量、穗质量、百粒质量以及产量水分利用效率 (WUE)。从表 1 中可以看出,玉米地上干物质质量、穗质量、百粒质量随微咸水矿化度的增加而降低,且最小值均在 FSF5 (B0) 出现,与 CK 相比分别

降低 14.30%、11.54%、26.63%。施加生物炭处理所有指标均有大幅上升,与未施加生物炭相比,地上干物质质量、穗质量、百粒质量分别增加 40.82%、39.48%、41.95%。壮苗期、拔节抽雄期灌溉 5 g/L

微咸水显著降低玉米的最终产量,施加生物炭能显著提高玉米的收获指数,一定程度上缓解玉米减产。WUE 与地上干物质质量呈现出相似的规律,无论是否施加生物炭,最小值均出现在 FSF5 处理。施加生物炭后,最小值比未施加生物炭时增加 45.75%。壮苗期、拔节抽雄期灌溉微咸水 WUE 下降更为明

显,进一步验证了玉米在其营养阶段比生殖阶段对盐分更为敏感的结论。不同交替灌溉顺序中,施加生物炭均能提高玉米 WUE。SFF5 (B0)、FSF5 (B0)、FFS5 (B0) 的 WUE 较 CK 分别下降 25.30%、35.74%、24.1%,施加生物炭后降幅减小为 10.4%、14.5%、7.06%。

表 1 不同灌溉方式与不同生物炭处理下玉米产量构成要素及产量水分利用效率

Tab. 1 Yield and yield water use efficiency under different irrigation methods and biochar treatments

处理	地上干物质质量/(g·株 ⁻¹)	穗质量/g	百粒质量/g	WUE/(g·L ⁻¹)	
CK	(145.31 ± 2.29) ^a	(66.37 ± 2.37) ^{ab}	(19.45 ± 0.37) ^a	(2.49 ± 0.12) ^a	
SFF1	(140.83 ± 3.39) ^{ab}	(64.67 ± 4.22) ^{ab}	(16.01 ± 1.09) ^b	(2.34 ± 0.08) ^{ab}	
SFF3	(120.92 ± 1.64) ^f	(56.46 ± 2.07) ^d	(13.67 ± 0.65) ^d	(1.99 ± 0.08) ^{cd}	
SFF5	(108.00 ± 4.83) ^g	(49.34 ± 2.57) ^e	(13.31 ± 0.45) ^d	(1.86 ± 0.08) ^d	
0% 生物炭	FSF1	(129.41 ± 4.31) ^{cd}	(60.82 ± 2.02) ^{bc}	(14.68 ± 0.49) ^{bcd}	(2.19 ± 0.13) ^{bc}
	FSF3	(102.45 ± 1.74) ^g	(48.13 ± 2.52) ^e	(13.29 ± 0.27) ^d	(1.97 ± 0.13) ^{cd}
	FSF5	(86.00 ± 4.08) ^h	(40.17 ± 2.73) ^f	(11.73 ± 0.16) ^e	(1.60 ± 0.10) ^e
	FFS1	(145.87 ± 5.17) ^a	(68.07 ± 3.35) ^a	(19.42 ± 1.25) ^a	(2.48 ± 0.13) ^a
	FFS3	(133.94 ± 4.60) ^{bc}	(60.71 ± 2.48) ^{bc}	(15.61 ± 0.24) ^{bc}	(2.17 ± 0.09) ^{bc}
	FFS5	(124.53 ± 2.12) ^{df}	(58.71 ± 0.21) ^d	(14.27 ± 0.67) ^{cd}	(1.89 ± 0.06) ^d
5% 生物炭	CK	(199.92 ± 2.57) ^a	(93.94 ± 2.59) ^{ab}	(20.27 ± 0.94) ^a	(2.69 ± 0.10) ^a
	SFF1	(194.53 ± 3.15) ^{ab}	(92.73 ± 3.26) ^{ab}	(19.39 ± 0.55) ^{ab}	(2.68 ± 0.07) ^a
	SFF3	(186.94 ± 2.82) ^{bc}	(88.44 ± 3.06) ^{bc}	(18.57 ± 0.51) ^{bc}	(2.62 ± 0.09) ^{ab}
	SFF5	(176.81 ± 2.49) ^{cd}	(82.57 ± 3.78) ^{cd}	(17.68 ± 0.25) ^{cd}	(2.42 ± 0.04) ^{cd}
	FSF1	(185.72 ± 5.06) ^{bc}	(87.24 ± 0.86) ^{bc}	(18.44 ± 0.47) ^{bc}	(2.54 ± 0.09) ^{abc}
	FSF3	(172.62 ± 3.58) ^d	(81.68 ± 1.93) ^{cd}	(17.26 ± 0.26) ^d	(2.37 ± 0.06) ^{cd}
	FSF5	(161.20 ± 1.97) ^e	(76.91 ± 3.21) ^e	(16.12 ± 0.32) ^e	(2.30 ± 0.07) ^d
	FFS1	(203.81 ± 2.19) ^a	(97.15 ± 2.93) ^a	(20.31 ± 0.39) ^a	(2.69 ± 0.07) ^a
	FFS3	(194.25 ± 3.72) ^{ab}	(93.16 ± 1.43) ^{ab}	(19.42 ± 0.22) ^{ab}	(2.54 ± 0.12) ^{abc}
	FFS5	(186.57 ± 3.39) ^{bc}	(91.40 ± 2.79) ^{ab}	(18.58 ± 0.12) ^{bc}	(2.50 ± 0.05) ^{bc}

注:数据为平均值 ± 标准差。每列数值后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

盐胁迫是影响作物正常生长的重要因素,水土中盐分过高是农业发展不可避免的障碍^[17]。生物炭是一种在无氧环境条件下缓慢高温分解而成富含碳的有机质,因其具有较大的氧化表面积以及特殊的多孔结构而对土壤有较好的改良作用^[18]。生物炭包含大量 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ^[19],一方面可作为作物矿物质养分的来源,另一方面其含有的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 可交换盐渍化土壤胶体吸附的 Na^+ ^[20]。生物炭呈负电荷且具有多孔隙结构,其较高的 Na^+ 吸附能力可减少 Na^+ 对土壤结构的破坏,促进土壤颗粒的胶结与团聚作用,改善土壤团粒结构^[21-22],提高土壤透水性^[23],促进滨海围垦区土地开垦活动^[24-25]。在轮灌淡水过程中,无生物炭处理上层土壤溶液含盐量仍保持较高水平,导致盐胁迫持续时间较长,而 5% 生物炭处理中,大量盐分随淡水运移到土壤下层,进一步降低了表层土壤溶液含盐量,从而减少盐胁迫持续时间。

光合作用为玉米主要生理过程之一,对盐胁迫反应敏感。低矿化度微咸水激发玉米保护机制,气孔关闭,WUEL 升高,高矿化度微咸水灌溉下非气孔限制增强,WUEL 下降^[26]。高矿化度下光合性能改变与叶绿素降解有关^[27],叶绿素含量也随矿化度增高而降低。受限的光合作用影响了玉米的生长,玉米在营养阶段(壮苗期、拔节抽雄期)对盐胁迫更为敏感,株高和叶面积受抑制,且矿化度越高抑制作用越大^[28]。灌浆期玉米主要进行生殖生长,抗盐胁迫能力较强,盐胁迫的抑制效果不明显。生物炭的施加减轻了微咸水灌溉对玉米光合系统的不利影响^[29],施加生物炭处理的玉米表现出较高 WUEL,叶绿素含量也较高,且在敏感阶段,这种缓解作用更为有效。

有研究表明,高矿化度下非气孔限制所导致光合作用降低的原因是离子胁迫对植物光合机制或碳反应酶活性的影响^[30]。MUNNS^[31]也提出盐胁迫对植物生长影响的两阶段模型:第 1 阶段为水分胁迫,第 2 阶段植株吸收 Na^+ 增多,造成离子毒害。在本

研究中,施加生物炭处理的玉米叶片水势负值水平较低,表明生物炭通过其较高的盐吸附能力缓解渗透胁迫并能改善植物水分状况。此外,因为玉米在营养阶段对 Na^+ 抗斥能力差,所以在壮苗期和拔节抽雄期灌溉微咸水更易产生离子胁迫, Na^+/K^+ 比较高。施加生物炭处理下,由于生物炭吸附土壤溶液中的 Na^+ ,显著降低玉米对 Na^+ 吸收,通过释放矿物质养分提高对 K^+ 吸收,辅助调节离子平衡^[32]。

生物炭的施加可改善滨海盐渍土盐分状态,减少 Na^+ 对土壤结构的破坏,促进玉米光合作用,减轻水分胁迫,避免离子毒害,最终增加地上干物质质量、穗质量、百粒质量以及产量水分利用效率,提高咸淡轮灌的效率与可行性。由于玉米在营养阶段对盐分更为敏感,此时灌溉微咸水对玉米生长不利,导致水分利用效率低,造成减产。已有交替灌溉研究倡导在生长前期用淡水,在耐盐度较高的生长后期用微咸水灌溉。本研究发现,生物炭改良作用使高矿化度微咸水在敏感阶段可供灌溉,壮苗期灌溉微咸水的玉米在后期生长过程中各参数明显增长,最终比无生物炭改良处理具有更高的地上干物质质量、穗质量、百粒质量以及产量水分利用效率。

4 结论

(1) 在高矿化度下生物炭表现出较高的 Na^+ 吸

附能力,在 5 g/L 矿化度下吸附量最高为 51.28 mg/g。生物炭将 Na^+ 从土壤溶液中固定,缓解土壤盐分表聚,减小 Na^+ 对土壤结构的破坏。同时施加生物炭可改善植物水分状况并缓解盐胁迫造成的离子毒害,玉米叶片最大 Na^+/K^+ 比下降 64.6%。

(2) 微咸水灌溉导致玉米光合参数与叶绿素含量下降,且在盐分抗性相对薄弱的营养阶段,抑制作用较生殖阶段更为明显。施加生物炭处理后,玉米各生长阶段的光合参数与叶绿素含量较无生物炭处理显著上升,5 g/L 微咸水处理增益最大,光合参数上升 10.0% ~ 15.4%,叶绿素含量上升 21.9% ~ 37.5%。

(3) 由于玉米在灌浆期主要进行生殖生长,灌溉微咸水对玉米株高和叶面积影响最小,施加生物炭在各个生育阶段均有显著增加。淡咸淡模式下用最高矿化度灌溉,株高和叶面积最小,加入生物炭后分别增加 23.55%、16.8%。

(4) 相较于“淡淡咸”模式,“咸淡淡”与“淡咸淡”灌溉模式下玉米产量及其构成要素下降更为明显,加入生物炭后有显著提高。最小值均出现在“淡咸淡”模式下 5 g/L 微咸水灌溉处理,与未施加生物炭相比,地上干物质质量、穗质量、百粒质量和产量水分利用效率分别增加 40.82%、39.48%、41.95%、43.75%。

参 考 文 献

- [1] 许艳,濮俊杰. 江苏海岸带滩涂围垦区土地利用类型变化研究:以江苏省如东县为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 643 - 652.
XU Yan, PU Lijie. The variation of land use pattern in tidal flat reclamation zones in Jiangsu coastal area: a case study of Rudong county of Jiangsu province[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(4): 643 - 652. (in Chinese)
- [2] YAO R J, YANG J S, ZHANG T J, et al. Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of eastern China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131(1): 115 - 123.
- [3] QADIR M, SHARMA B R, BRUGGEMAN A, et al. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(1): 2 - 22.
- [4] KALAJI H M, JAJOO A, OUKARROUM A, et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(4): 102.
- [5] 闵勇,朱成立,舒慕晨,等. 微咸水-淡水交替灌溉对夏玉米光合日变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 9 - 17.
MIN Yong, ZHU Chengli, SHU Muchen, et al. Effects of alternate fresh and slight saline water irrigation on the diurnal variation of photosynthesis of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 9 - 17. (in Chinese)
- [6] 王全九,单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117 - 126. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151217&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 12. 017.
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with slight saline water irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117 - 126. (in Chinese)
- [7] 郑君玉,朱成立,翟亚明. 微咸水-淡水交替灌溉对玉米生长指标及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 37 - 41.
ZHENG Junyu, ZHU Chengli, ZHAI Yaming. Impact of alternating irrigation using saline and fresh water on maize growth and its yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 37 - 41. (in Chinese)
- [8] LIU X W, FEIKE T, CHEN S Y, et al. Effects of saline irrigation on soil salt accumulation and grain yield in the winter wheat-summer maize double cropping system in the low plain of North China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(12): 2886 - 2898.
- [9] LASHARI M S, YE Y, JI H, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 95(6): 1321 - 1327.
- [10] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, LIU F. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress[J]. Agricultural Water Management, 2015, 158: 61 - 68.

- [11] 魏永霞,张翼鹏,张雨凤,等. 黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 284 - 291, 312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036.
WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of two consecutive years supply of biochar on soil improvement, water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 284 - 291, 312. (in Chinese)
- [12] 张娜,李佳,刘学欢,等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1569 - 1574.
ZHANG Na, LI Jia, LIU Xuehuan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1569 - 1574. (in Chinese)
- [13] 张晗芝,黄云,刘钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713 - 2717.
ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2713 - 2717. (in Chinese)
- [14] KANG Y H, MING C, WAN S Q. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. *ceratina Kulesh*) in North China plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(9): 1303 - 1309.
- [15] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, LIU F. Biochar mitigates salinity stress in potato[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2015, 201(5): 368 - 378.
- [16] 吴忠东,王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008(1): 231 - 236.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008(1): 231 - 236. (in Chinese)
- [17] XIE X, PU L, WANG Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607 - 608: 1419.
- [18] 吴昱,赵雨森,刘慧,等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 247 - 256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170731&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031.
WU Yu, ZHAO Yusen, LIU Hui, et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 247 - 256. (in Chinese)
- [19] 何绪生,耿增超,余雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1 - 7.
HE Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 1 - 7. (in Chinese)
- [20] 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 Weina, LIN Qimei, et al. Salt leaching in the saline soil relative to rate of biochar applied [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 914 - 919. (in Chinese)
- [21] 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 & Soil Science, 2008, 171(4): 591 - 596.
- [22] BELYAEVA O N, HAYNES R J. Comparison of the effects of conventional organic amendments and biochar on the chemical, physical and microbial properties of coal fly ash as a plant growth medium[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(7): 1987 - 1997.
- [23] WHALLEY W R, CLARK L J, GOWING D J G, et al. Does soil strength play a role in wheat yield losses caused by soil drying? [J]. Plant & Soil, 2006, 280(1 - 2): 279 - 290.
- [24] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 128 - 134.
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 128 - 134. (in Chinese)
- [25] 黄超,刘丽君,章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439 - 445.
HUANG Chao, LIU Lijun, ZHANG Mingkui. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Science), 2011, 37(4): 439 - 445. (in Chinese)
- [26] 徐俊增,彭世彰,魏征,等. 节水灌溉水稻叶片胞间CO₂浓度及气孔与非气孔限制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 76 - 80.
XU Junzeng, PENG Shizhang, WEI Zheng, et al. Intercellular CO₂ concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 76 - 80. (in Chinese)
- [27] KOYRO H W, HUSSAIN T, HUCHZERMEYER B, et al. Photosynthetic and growth responses of a perennial halophytic grass *Panicum turgidum* to increasing NaCl concentrations[J]. Environmental & Experimental Botany, 2013, 91: 22 - 29.
- [28] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 220 - 228, 201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171027&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.027.
ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 220 - 228, 201. (in Chinese)
- [29] AGBNA G H D, SHE D, LIU Z, et al. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 222: 90 - 101.
- [30] KHAN H A, SIDDIQUE K H, MUNIR R, et al. Salt sensitivity in chickpea: growth, photosynthesis, seed yield components and tissue ion regulation in contrasting genotypes[J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 182: 1 - 12.
- [31] MUNNS R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 16(1): 15 - 24.
- [32] HAIDER G, STEFFENS D, MOSER G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 237: 80 - 94.