



王国龙, 马一宁, 宋凡凡, 张海洋, 王素芬, 佟玲. 水盐胁迫下老化生物炭对玉米生长及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(03):50-62.
WANG Guolong, MA Yining, SONG Fanfan, ZHANG Haiyang, WANG Sufen, TONG Ling. Effects of aged biochar on maize growth and yield under water and salt stress[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03):50-62.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.05

水盐胁迫下老化生物炭对玉米生长及产量的影响

王国龙^{1,2} 马一宁^{1,2} 宋凡凡^{1,2} 张海洋^{1,2} 王素芬^{1,2} 佟玲^{1,2*}

(1. 甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站, 甘肃 武威 733009;
2. 中国农业大学 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要 针对河西走廊地区盐碱地降水量少、蒸发量大、返盐碱严重及水资源短缺等制约玉米生产的关键问题, 提出基于生物炭改良与节水滴灌协同的盐碱地综合改良技术。试验设置2个生物炭添加水平(0和60 t/hm²), 2个灌溉水含盐量(0.71和4 g/L), 2个灌溉水平(充分灌溉和亏缺灌溉), 共8个处理。通过测定玉米根系密度、根系形态、株高、叶面积指数、干物质积累量、冠层光能截获率、产量及其构成要素等相关参数, 探究老化生物炭对不同水盐处理下玉米生长及产量的影响。结果表明: 1) 与未添加生物炭处理相比, 施加老化生物炭后, 玉米总根长度密度、表面积密度、体积密度均有所增大, 在灌浆期分别增加了9%~36%、12%~29%和6%~29%, 成熟期分别增加了9%~15%、1%~4%和1%~5%; 2) 与未添加生物炭处理相比, 在水分亏缺条件下施加生物炭, 玉米干物质积累量提高了13%, 成熟期冠层辐射截获率提高了5%~15%; 施加老化生物炭后, 穗长增加了1%~8%、百粒重增加了1%~5%, 单株产量增加了1%~12%, 平均增产达6%。老化生物炭在土壤水盐胁迫下能有效促进玉米根系的生长, 降低水盐胁迫对作物产生的不利影响, 进而提高玉米产量。

关键词 老化生物炭; 微咸水灌溉; 根系形态; 冠层结构; 玉米产量

中图分类号 S513; S274

文章编号 1007-4333(2026)03-0050-13

文献标志码 A

Effects of aged biochar on maize growth and yield under water and salt stress

WANG Guolong^{1,2}, MA Yining^{1,2}, SONG Fanfan^{1,2}, ZHANG Haiyang^{1,2},
WANG Sufen^{1,2}, TONG Ling^{1,2*}

(1. National Field Scientific Observation and Research Station on Efficient Water Use of Oasis Agriculture in Wuwei of Gansu Province, Wuwei 733009, China;

2. Center for Agricultural Water research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Aimed at the key constraints on maize production in the Hexi Corridor region, low precipitation, high evaporation, severe soil salinization, and acute water shortage, this study proposes a comprehensive soil improvement technique combining biochar amendment with water-saving drip irrigation. The experiment was designed with two biochar application rates (0 and 60 t/hm²), two irrigation water salinity levels (0.71 and 4 g/L), and two irrigation regimes (full irrigation and deficit irrigation), resulting in a total of eight treatments. The effects of aged biochar on maize growth and yield under different water-salinity treatments were investigated by measuring parameters including root density, root morphology, plant height, leaf area index, dry matter accumulation, canopy light interception, yield, and yield components. The results indicated that: 1) Compared

收稿日期: 2025-04-03; 接受日期: 2025-11-19

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1900401)

第一作者: 王国龙(ORCID:0009-0001-1351-6335), 硕士研究生, E-mail: s20233092070@cau.edu.cn

通讯作者: 佟玲(ORCID:0000-0003-2672-603X), 教授, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: tongling2001@cau.edu.cn

with no-biochar control, the application of aged biochar increased corn root parameters including total root length density, surface area density, and volume density. During the grain filling stage, the above five parameters increased by 9%-36%, 12%-29%, and 6%-29%, respectively; at the maturity stage, increases were 9%-15%, 1%-4%, and 1%-5%, respectively. 2) Compared with the no-biochar control, applying biochar under water deficit conditions increased corn dry matter accumulation by 13% and canopy radiation interception by 5%-15% at maturity stage. Aged biochar application further increased ear length by 1%-8%, hundred-kernel weight by 1%-5%, and plant yield by 1%-12%, averaging a 6% yield increase relative to the no-biochar control. In conclusion, the aged biochar effectively promotes maize root growth under soil water-salt stress, mitigates adverse crop impacts from water-salt stress, and consequently enhances maize yield.

Keywords aged biochar; brackish water irrigation; root morphology; canopy structure; corn yield

西北地区是我国重要的农业生产区域,该地区气候干燥,降水稀少且蒸发强烈,农业用水资源短缺限制了当地的农业发展^[1];同时,西北内陆干旱地区的浅层地下水以微咸水为主^[2],由于灌溉和排水管理不当,导致土壤盐分积累,对农作物产量产生不良影响。已有研究表明盐胁迫水平随土层深度的增加而降低,此外,随着盐胁迫时间的增加,成熟期作物根系的根长度密度越低,与淡水灌溉相比,平均玉米相对产量降低8.6%^[3]。Yuan等^[4]研究表明,矿化度为3 g/L的微咸水在2/3充分灌水量条件下对玉米产量无显著影响,反而提高了玉米的水分利用效率。相反,Wei等^[5]发现矿化度为2 g/L的微咸水灌溉在试验第一年对作物产量和干物质积累量影响不显著,但第二年则显著降低了产量和干物质积累量;而矿化度超过2 g/L的微咸水从第一年开始显著降低了玉米产量和干物质质量积累量。刘祯媛等^[6]研究发现灌溉水电导率为9.24 dS/m时,冬小麦净光合速率、最大株高、最大叶面积、成熟期地上部干物质积累量、根系干物质量及产量与去离子水灌溉相比显著降低,并且利用FAO分段函数拟合计算得到的冬小麦灌溉微咸水电导率阈值为5.82 dS/m。超过该值,电导率每增加1 dS/m,冬小麦相对产量下降8.8%。综上,微咸水灌溉对作物的影响效果不一。可能是微咸水中盐离子引发水分胁迫,从而抑制作物生长;或是微咸水为作物生长提供了必要的水分条件。此外,微咸水灌溉的作用效果还受作物种类、微咸水矿化度、灌水量、灌水周期、灌水年、施肥类型等其他因素影响。

生物炭是高温厌氧碳化生物质制成的稳定产品,具有丰富的孔隙结构、较大的比表面积和多种表面官能团^[7-8]。生物炭能够有效改善土壤质量,优

化土壤的理化性质^[9]、改善微生物环境^[10]并提高土壤资源的可用性^[11-13]。已有研究表明生物炭能够增加甜玉米的浅根密度^[14],提高水稻的根生物量、根长、根表面积和根体积^[15]。Wang等^[16]发现,添加生物炭能够增加根长,但会降低平均根直径和根表面积。此外,生物炭的施用量对根系生长具有不同的影响,适量施用可以促进大豆根系的生长,而不适量施用则可能导致根系冗余和根直径的降低^[17]。在微咸水亏缺灌溉情况下,添加生物炭能够显著增加玉米干物质积累量,然而不同处理间增产效果不显著^[18]。目前,添加老化生物炭对玉米生长和产量的作用效果尚不明确,特别是其长期老化后对作物的影响,尤其是在玉米根系生长和作物生长方面,值得进一步研究。本试验拟采取2种灌溉方式和2种盐分添加水平,研究老化生物炭对玉米根系、冠层结构及产量的影响,以期为西北旱区盐碱地改良和玉米生产节水增效技术的实施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于2024年4月—9月在甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站(37°52'(N), 102°51'(E))开展。该地区典型特征为温带大陆性气候,降水稀少且蒸发强烈;多年平均降水量为164 mm,蒸发量2 000 mm;试验地年平均气温为19.87℃,累计降水量达200.2 mm,>10℃的活动积温为3 550℃,年日照时长超过3 000 h,无霜期约150 d。2024年日尺度气象条件见图1。试验地土壤类型为沙壤土,播种前,充分灌溉处理0~20 cm土层土壤容重为1.50 g/cm³,土壤电导率227.13 μS/cm,田间持水率0.31 cm³/cm³,有机质含量8.7 g/kg,pH 8.57^[19-20]。

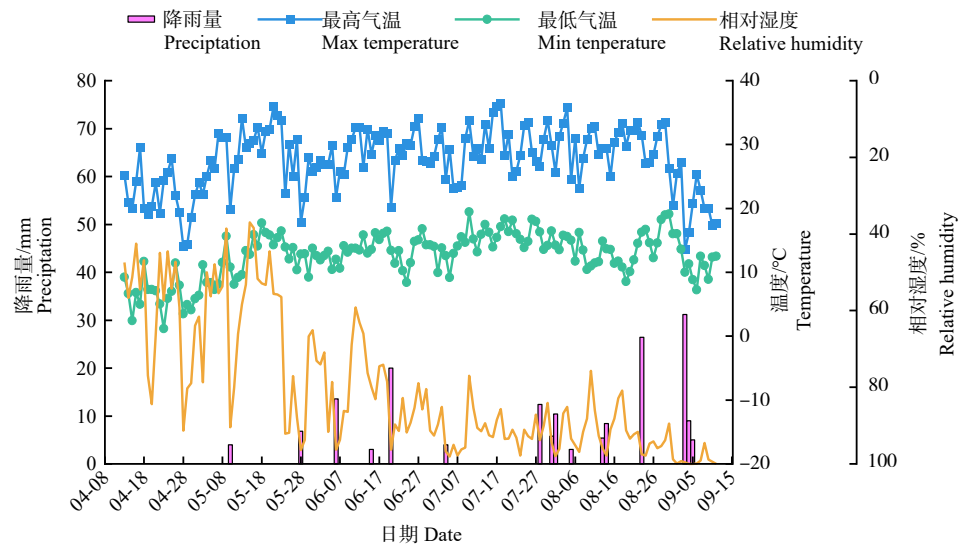


图1 2024年试验期间试验地日尺度气象条件

Fig. 1 Daily-scale meteorological conditions at the experimental site during the 2024 trial period

1.2 试验设计

试验设置 24 个测坑,每个测坑长、宽、深分别为 3.3、2.0、3.0 m。测坑之间以 20 cm 厚混凝土层隔开,底部封闭并设有排水廊道。

试验设置 2 个灌溉水平,包括充分灌溉(W1)和亏缺灌溉(W2);2 个灌溉水含盐量($w_{\text{盐}}$),分别为淡水($w_{\text{盐}}=0.71\text{ g/L}$,S0)和微咸水($w_{\text{盐}}=4\text{ g/L}$,S1);2 个生物炭添加水平,分别为 0 t/hm^2 (F0)和 60 t/hm^2 (F1),试验共 8 个处理(表 1)。

灌溉用水中淡水取自当地地下水,微咸水是在地下水加入 NaCl、MgSO₄ 和 CaSO₄(质量比为 2:2:1)配制而成,含盐量为 4 g/L。老化生物炭为玉米秸秆经平遥县晟弘生物质能源开发有限公司处理,在 500 °C 下缺氧热解 10 h 制成,播种前将生物炭与 0~20 cm 土壤混合均匀,且在田间自然老化 5 年,测得其颗粒粒径为 0~150 μm,pH 9.47,电导率 730.2 μS/cm,总氮质量分数 9.9 g/kg。

表 1 不同处理玉米生育期内的灌水量

Table1 Irrigation water volume during different treatment growth periods for corn

处理 Treatment	含盐量/(g/L) Salt content	灌水量/mm Irrigation amounts					总灌水量/mm Total irrigation amounts
		苗期 Corn seedling period	拔节期 Jointing period	抽穗期 Flowering period	灌浆期 Filling period	成熟期 Maturity period	
W1S0F0	0.71	40	140	100	138	72	490
W1S0F1	0.71	40	140	100	138	72	490
W1S1F0	4.00	40	140	100	138	72	490
W1S1F1	4.00	40	140	100	138	72	490
W2S0F0	0.71	40	70	50	79	36	275
W2S0F1	0.71	40	70	50	79	36	275
W2S1F0	4.00	40	70	50	79	36	275
W2S1F1	4.00	40	70	50	79	36	275

注:W1,充分灌溉;W2,亏缺灌溉;S0,淡水;S1,微咸水;F0,未施加生物炭;F1,施加生物炭。下表同。

Note: W1, fully irrigated; W2, deficit irrigation; S0, freshwater; S1, slightly saline water; F0, no biochar applied; F1, biochar applied. The same applies to the table below.

以春玉米‘先玉335’为试验对象,种植密度82 500株/hm²,行距40 cm,株距30 cm。采用膜下滴灌方式,播种后用40 mm淡水灌溉作为出苗水。灌溉处理从拔节期开始,以充分灌溉处理(W1S0F0)0~60 cm土层的平均含水率达到田间持水率70%为标准,计算得到每次灌水量,共灌水6次。不同处理玉米生育期内灌水量见表1。试验于4月18日播种,9月10日收获,生育期为151 d。玉米全生育期施用复合肥,P₂O₅、K₂O和N肥的施用量分别为226.5、54.0和221.5 kg/hm²,其他管理方法与当地种植模式保持一致。

2 测定指标与方法

2.1 根系表型

在玉米灌浆期和成熟期进行根系取样。采用直径10 cm螺旋根钻对0~100 cm土层深度的根系进行取样,每隔20 cm为1层,共计5层;随后对各土层根系进行挑选、清洗。使用根系扫描仪(Epson Perfection V700)对根系进行图片扫描,获取根系图片后用根系分析软件(WinRHIZO, Regent instruments in Canada)分析根长密度、根表面积密度和根体积密度等根系形态指标。

2.2 冠层结构及生物量

在玉米拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期选择晴朗天气,采用AccuPAR冠层分析仪(LP-80, Decagon, USA)于12:00—14:00测量玉米冠层顶部上方0.5 m处和冠层底部地面上方0.05 m处的冠层辐射,其中冠层底部辐射采用十字交叉的方法测定(东西向和南北向各选2个测点观测)。冠层辐射截获率计算公式^[21]如下:

$$\text{冠层截获率} = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_1 为冠层顶部辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; M_2 为冠层底部辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

在玉米成熟期利用卷尺测量株高、叶面积。在每个小区获取有代表性的3株玉米,置于烘箱中,在105℃条件下杀青0.5 h,调至85℃恒温烘干至恒重,称量获得玉米地上部干物质重量。

2.3 产量

在玉米收获期将各小区所有玉米果穗全部收获,每个小区选取6个大小均匀的果穗测定产量构成要素(穗长、穗粗、穗粒数和百粒干重),随后将果穗全部脱粒,将籽粒放置于45℃的烘箱中烘干至恒

重称重,按14%含水率计算产量。

玉米灌溉水分利用效率(IWUE)的计算公式为:

$$\text{IWUE} = Y / W \quad (2)$$

式中: Y 为产量,kg/hm²; W 为灌水量,m³/hm²。

玉米水分利用效率(WUE)的计算公式为:

$$\text{WUE} = Y / \text{ET} \quad (3)$$

式中:ET为蒸散发量,m³/hm²。

氮肥偏生产力(PFP_N)的计算公式为:

$$\text{PFP}_N = Y / N \quad (4)$$

式中: N 为施加氮素量,kg/hm²。

2.4 数据处理及分析

试验数据分析采用Microsoft Excel 2019和SPSS 21.0软件进行分析,图片绘制使用Origin 2021。

3 结果与分析

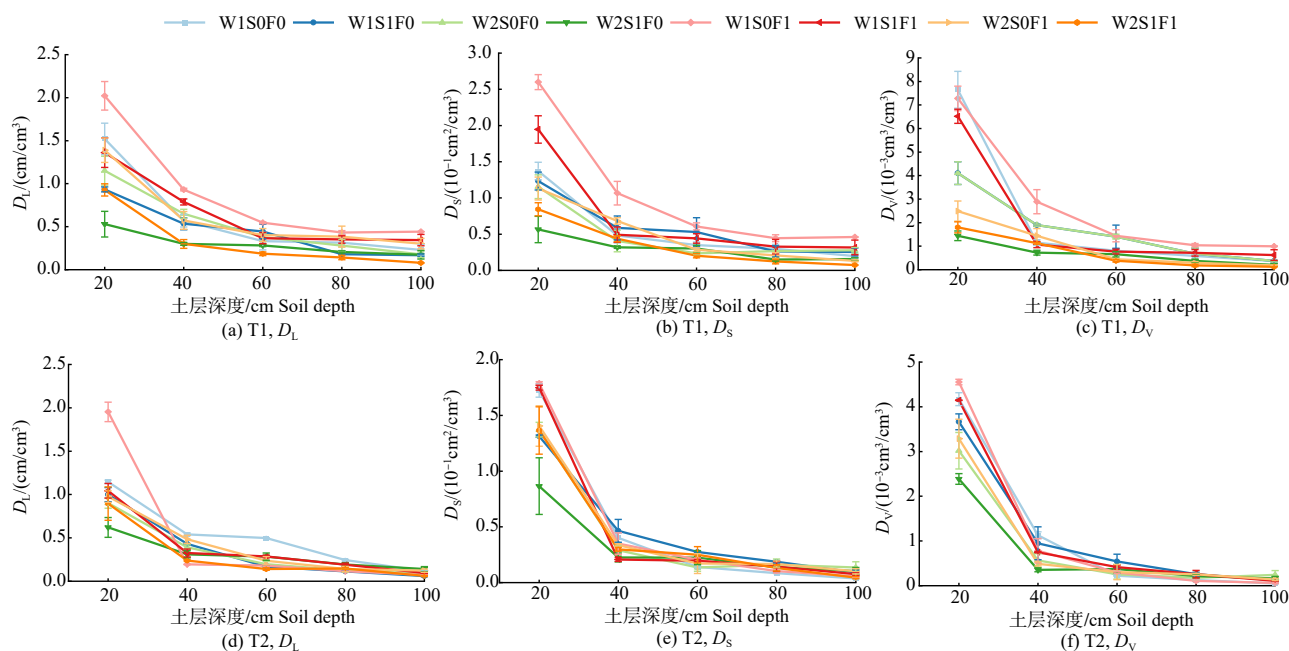
3.1 根系形态

总体而言,生物炭对玉米根系生长具有显著的促进作用。不同土层根长密度、根表面积密度和根体积密度均随土层加深而逐渐减小(图2)。水分和盐分胁迫会导致根系体积密度、表面积密度和体积密度呈现不同程度下降。在微咸水充分灌溉处理下,根系主要分布于土壤中上层;而在微咸水亏缺处理下,根系则更多分布在土壤中下层。

施加生物炭后,玉米的总根系长度、根系表面积和根系体积均明显增大(图3)。具体表现为,在灌浆期和成熟期,生物炭处理使根系长度分别增长9%~36%和9%~15%,根系表面积分别增长12%~29%和1%~4%,根系体积分别增长6%~29%和1%~5%。在微咸水亏缺条件下,成熟期根系表面积和体积的增幅可达30%。

灌水量对总根长密度、总根表面积密度和总根体积密度的形成起决定性作用($P < 0.001$)。施加老化生物炭的处理,表面积密度和体积密度有所增加,表明其有助于根系的伸长、体积和表面积的增加。方差分析表明,在根系形态形成过程中,水分、盐分与生物炭三者之间存在显著差异,且其交互作用在灌浆期对根系表面积和体积的影响达到显著水平($P < 0.001$)。

在灌浆期到成熟期,随着土层深度向下增大,各土层根系质量占总根系质量比例逐渐降低,成熟



T1, 灌浆期; T2, 成熟期。W1, 充分灌溉; W2, 亏缺灌溉; S0, 淡水; S1, 微咸水; F0, 未施加生物炭; F1, 施加生物炭。各测点上垂直线代表标准差 ($n=3$), n 为样本重复测量数量。图 3、5、6 同。

T1, filling period; T2, Maturity period. W1, fully irrigated; W2, deficit irrigation; S0, freshwater; S1, slightly saline water; F0, no biochar applied; F1, biochar applied. Vertical lines at each measurement point represent standard deviation ($n=3$), where n denotes the number of sample replicates. Fig. 3, 5, and 6 follow the same convention.

图 2 不同处理玉米灌浆期及成熟期各土层根系分层长度密度 (D_L)、表面积密度 (D_S) 和体积密度 (D_V)

Fig. 2 Root layered length density (D_L), surface area density (D_S), and volume density (D_V) in different soil layers during the filling and maturity period under varying treatments

期根系主要集中在 0~40 cm 土层, 其中 0~20 cm 土层占比达到 70% 以上(图 4)。在胁迫条件下, 根系呈现纵向生长的趋势, 向深层土壤延伸, 摄取深层土壤水分以供自身生长。生物炭的施加加速表层的根系生长, 其保水性和吸附性缓解了水分和盐分对玉米根系生长产生的胁迫作用。

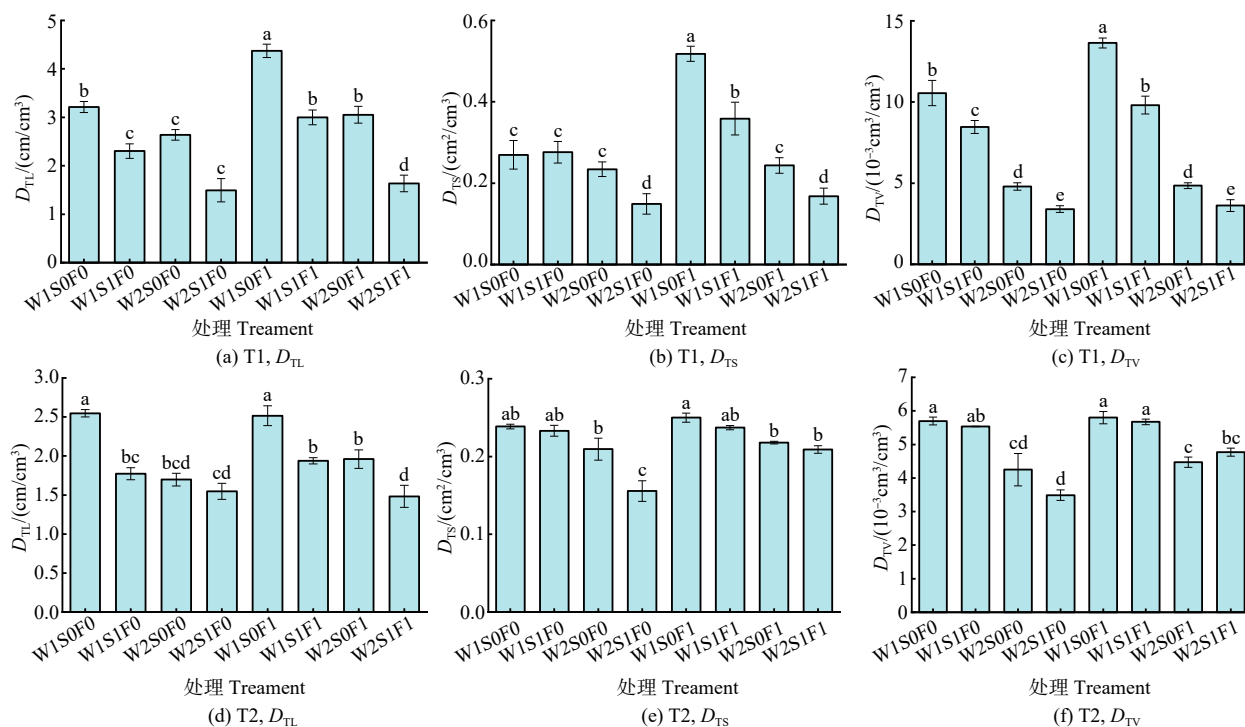
玉米灌浆期和成熟期根冠比见图 5。在灌浆期, 淡水充分灌溉条件下, 相比于无生物炭添加处理, 添加生物炭后, 玉米根冠比显著提高。在不同水分处理条件下, 相对对照处理, 添加生物炭后, 根冠比平均提高了 22%。根冠比随着玉米生育进程的推进而逐渐降低。在微咸水亏缺灌溉下, 添加生物炭后, 根冠比显著增大。水分胁迫、盐分胁迫对根冠比表现出一定的抑制作用, 微咸水充分灌溉添加生物炭处理后根冠比显著降低, 微咸水和生物炭耦合在充分灌溉条件下表现出一定的负面作用。

3.2 冠层结构

表 2 和表 3 分别示出不同水盐及添加生物炭处理对玉米生长指标和冠层辐射截获率的影响。

水分和盐分胁迫均会导致株高和叶面积指数显著下降。在充分灌溉情况下, 施加生物炭使得株高降低, 叶面积指数增大, 亏缺灌溉情况下, 株高没有显著的规律性变化。在生物炭作用下, 玉米叶面积指数显著增大了 1%~7%。随着生育期的推进, 干物质积累量逐步增加, 成熟期干物质积累量受水分和盐分胁迫的显著影响, 各处理间差异较为明显。水分和盐分胁迫下, 玉米干物质积累量普遍下降, 而二者共同作用时, 未添加生物炭的处理相较于亏缺灌溉处理的干物质积累量提升了 7%。施用生物炭显著提高了亏缺灌溉处理干物质积累量, 特别是在只存在水分胁迫条件下, 干物质积累量提高了 13%。

灌水量和含盐量在拔节期及抽穗期对冠层光能截获产生了显著影响 ($P<0.001$)。水分和盐分胁迫导致冠层结构紧疏松, 冠层辐射截获率下降。施用生物炭显著提高了成熟期的冠层辐射截获率, 但对拔节期的冠层辐射截获率有抑制作用。总体分析表明充分灌溉处理的冠层辐射截获率普遍高



柱上不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 图 5、6、7 同。

Different lowercase letters denote significant differences at the $P < 0.05$ level. Fig. 5, 6 and 7 follow the same convention.

图 3 不同处理玉米灌浆期 (T1) 及成熟期 (T2) 总根长密度 (D_{TL})、表面积密度 (D_{TS}) 和体积密度 (D_{TV})

Fig. 3 Total root length density (D_{TL}), surface area density (D_{TS}), and volume density (D_{TV}) during the filling and maturity period under different treatments

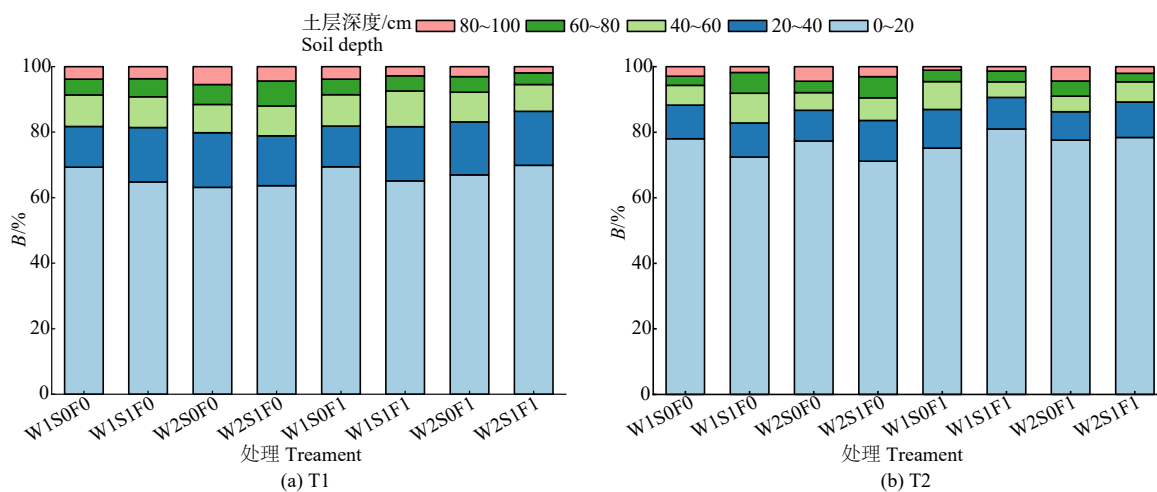


图 4 不同处理玉米灌浆期 (T1) 及成熟期 (T2) 各土层根系质量占总根系质量的比例 (B)

Fig. 4 Proportion of root mass in each soil layer relative to total root mass during the grain filling stage (T1) and maturity stage (T2) of corn under different treatments (B)

于亏缺灌溉。在成熟期, 充分灌溉添加生物炭处理的冠层辐射截获率最高为 94%, 最低的亏缺灌溉处理为 81%。生物炭的添加对冠层辐射截获率的影响尤为显著, 在淡水充分灌溉条件下, 添加生物炭

后辐射截获率由 92% 提升至 94%。

交互作用分析结果表明, 灌溉量和含盐量共同作用以及灌溉量、含盐量和生物炭添加量三者的共同作用对叶面积指数、冠层辐射截获率产生显著的

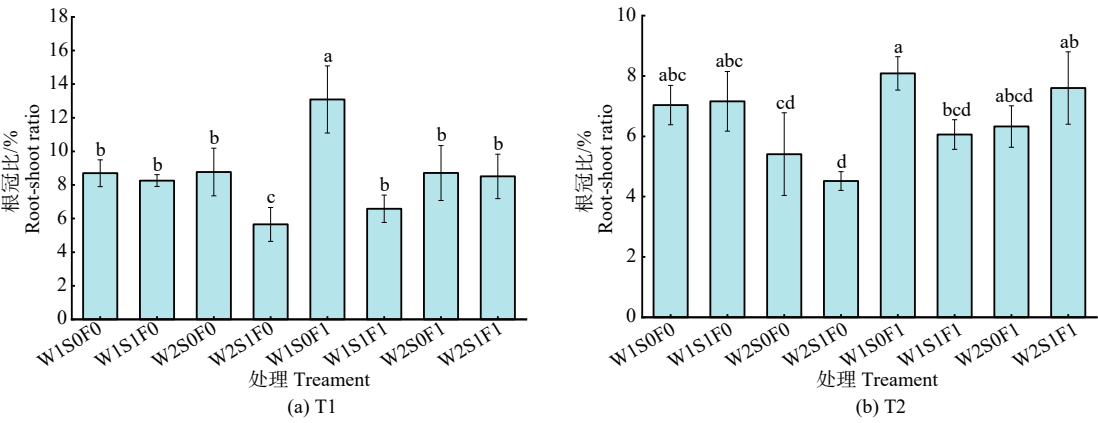


图5 不同处理玉米灌浆期(T1)及成熟期(T2)根冠比

Fig. 5 Root-shoot ratio during the filling period and maturity period of corn under different treatments

表2 不同水盐及添加生物炭处理玉米生长指标

Table 2 Corn growth parameters under different water-salt conditions and biochar addition treatments

处理 Treatment	株高/cm Plant height	叶面积指数 Leaf area index	干物质积累量/g Dry matter accumulation
W1S0F0	300.71±2.99 a	5.45±0.21 b	400.24±35.48 ab
W1S1F0	255.57±6.24 c	5.11±0.03 bc	368.62±17.70 abc
W2S0F0	233.37±3.77 d	4.46±0.15 d	301.71±21.44 abc
W2S1F0	226.40±6.72 d	4.61±0.12 d	325.47±11.27 ab
W1S0F1	275.05±18.19 b	5.86±0.18 a	422.68±29.3 a
W1S1F1	275.22±3.76 b	5.24±0.23 b	363.36±31.72 abc
W2S0F1	235.83±13.01 d	4.54±0.04 d	343.07±25.36 abc
W2S1F1	208.14±6.75 e	4.80±0.29 cd	323.92±43.30 bc

注:同列不同小写字母表示不同处理 $P<0.05$ 水平差异显著。下表同。
Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences at the $P<0.05$ level. The same applies to the Table below.

表3 不同水盐及添加生物炭处理冠层辐射截获率

Table 3 Radiation interception rate with different water salinity and biochar addition treatments

处理 Treatment	拔节期 Jointing period	抽穗期 Flowering period	灌浆期 Filling period	成熟期 Maturity period
W1S0F0	68±1 a	88±4 ab	94±1 a	92±1 ab
W1S1F0	62±1 abc	80±1 c	92±1 ab	91±1 abc
W2S0F0	55±3 c	78±1 c	90±3 b	81±2 d
W2S1F0	58±4 c	80±5 c	92±1 ab	86±2 c
W1S0F1	67±4 ab	89±1 ab	92±1 ab	94±1 a
W1S1F1	60±2 bc	91±1 a	95±1 a	90±4 abc
W2S0F1	54±5 cd	82±7 bc	95±1 a	88±1 bc
W2S1F1	48±4 d	68±3 d	92±1 ab	87±2 bc

影响。其中,水分和盐分交互影响对叶面积指数产生显著影响($P<0.001$)。三因素交互作用对成熟期冠层辐射截获率产生显著影响($P<0.01$),表明生物炭的添加在盐分胁迫条件下对灌浆期和成熟期光能利用效率具有一定的补偿作用。

3.3 产量及其构成要素

不同水盐及添加生物炭处理对玉米穗长、穗粗、秃尖长、穗粒数、百粒重、单株产量及单位面积

产量的影响见表4。灌水量对穗长、穗粗和秃尖长产生显著影响($P<0.001$),相比于充分灌溉处理,亏缺灌溉下的玉米秃尖长增加了91.6%,表明水分胁迫对玉米籽粒发育产生不利影响。穗粒数变化范围为545.23~650.63,各处理间差异明显($P<0.001$),其中淡水亏缺灌溉和微咸水亏缺灌溉处理穗粒数最低,水分、盐分胁迫对玉米穗粒数产生显著的负面作用。

表4 不同水盐及添加生物炭处理玉米产量和产量构成要素
Table 4 Yield and yield components under different water salts and biochar treatments

处理 Treatment	穗长/mm Ear length	穗粗/mm Ear diameter	秃尖长/mm Length of tip	穗粒数 Number of kernels per ear
W1S0F0	198.16±3.72 ab	48.02±0.41 a	6.16±0.91 d	650.63±7.86 a
W1S1F0	196.33±3.88 ab	47.71±0.08 ab	8.63±0.31 bc	624.832±11.72 a
W2S0F0	178.73±6.57 d	46.199±0.78 cd	11.8±1.51 a	545.16±31.71 b
W2S1F0	183.43±5.84 cd	44.91±1.29 d	9.96±1.17 ab	546.53±8.1 b
W1S0F1	199.83±3.11 ab	47.71±0.36 ab	6.36±0.98 cd	632.36±14.76 a
W1S1F1	202.66±3.36 a	47.74±0.19 ab	8.86±1.5 b	557.73±1.12 a
W2S0F1	194.13±2.82 abc	45.94±0.88 cd	10.51±0.49 ab	565.51±25.04 b
W2S1F1	190.36±2.43 bc	46.47±0.1 bc	9.96±1.08 ab	565.51±14.14 b

处理 Treatment	百粒重/g Hundred-kernel weight	单株产量/g Single plant yield	单位面积产量/(t/hm ²) Yield per unit area	收获指数 Harvest index
W1S0F0	29.05±0.45 ab	182.13±5.78 b	15.18±0.48 b	0.5±0.02 ab
W1S1F0	28.67±0.91 b	184.35±3.19 ab	15.36±0.26 ab	0.55±0.01 a
W2S0F0	27.87±0.27 b	162.22±7.31 c	13.51±0.61 c	0.51±0.05 a
W2S1F0	26.35±0.51 c	144.65±4.84 d	12.05±0.41 d	0.42±0.01 b
W1S0F1	30.03±0.3 a	194.62±4.89 a	16.21±0.41 a	0.51±0.02 a
W1S1F1	29.15±0.53 ab	187.61±2.05 ab	15.63±0.17 ab	0.58±0.04 a
W2S0F1	28.2±0.67 b	169.96±6.01 c	14.16±0.51 c	0.55±0.06 a
W2S1F1	27.87±0.55 b	163.19±6.88 c	13.59±0.57 c	0.52±0.04 a

生物炭的施用显著提高了穗长、百粒重、单株产量、单位面积产量和收获指数等产量要素。施加生物炭使得穗长增加了1%~8%,百粒重增加了1%~5%,单株产量增加了1%~12%,收获指数增加了2%~24%,各项指标在不同处理间差异显著。水分胁迫对穗长、穗粗、穗粒数、百粒重、单株产量、单位面积产量和秃尖长产生了显著负面影响,盐分胁迫显著降低了充分灌溉条件下百粒重和单株产量。在多因素方差分析中,水分、盐分和生物炭的两两交互作用对各指标没有显著影响。

施加生物炭显著提高了亏缺灌溉处理灌溉水分利用效率、产量水分利用效率(图6)。灌溉量对作物的氮肥偏生产力具有决定性的作用,水分胁迫使得氮肥偏生产力显著下降;盐分胁迫对作物的氮肥偏生产力未产生显著影响;添加生物炭的充分灌溉处理的氮肥偏生产力相较于充分灌溉处理有明显提高了6.8%。

成熟期根系形态指标、单株产量及产量构成要素的相关性分析结果见图7。单株产量与穗长、穗粗、穗粒数、百粒重、根系总根长、根系总根表面积、

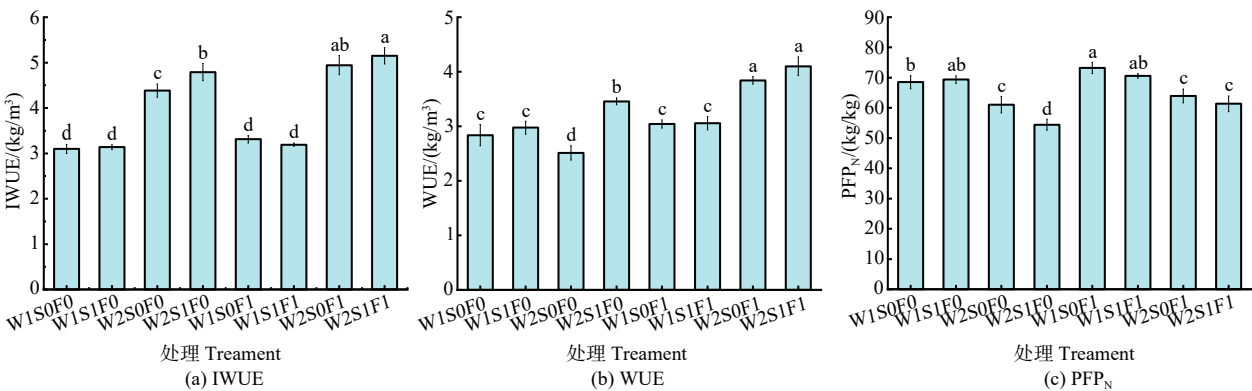


图6 不同处理玉米灌溉水分生产率(IWUE)、产量水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力(PFP_N)

Fig. 6 Irrigation water use efficiency, crop water use efficiency, and nitrogen fertilizer productivity under different treatments

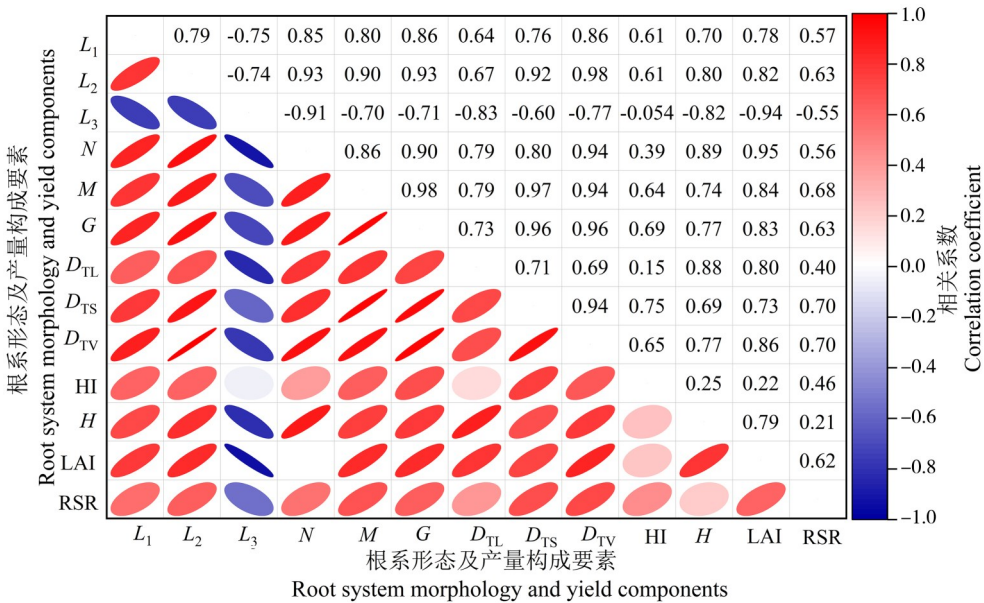


图7 玉米根系形态构成与单株产量及其构成要素的相关性

Fig. 7 Correlation between root morphology of maize and plant yield and its constituent elements

根系总根体积、收获指数、株高、叶面积指数、根冠比皆表现出显著的正相关关系;与秃尖长则呈负相关关系。

4 讨论

4.1 灌水量、灌溉水含盐量和老化生物炭对玉米根系形态的影响

玉米的抗逆性主要包括抗旱、耐盐和耐重金属等,这些特性与根系形态有密切关系。根系是植物获取土壤水分和养分的关键器官,根系长度的增加有助

于作物吸收深层土壤中的水分和养分,根系表面积扩大能够增加总吸收面积和活跃吸收面积,对水分和养分的循环起着至关重要的作用^[22-23]。相关性分析表明,总根系长度密度、表面积密度、体积密度三者具有良好正相关关系,其中总根系表面积密度与体积密度的相关性高达0.94,表明当玉米具有较大的根系表面积时,其根系向四周延展,根系体积也随之增大。充分灌溉添加生物炭处理总根系长度密度、表面积密度、体积密度均高于其他处理,这与已有研究一致^[24]。玉米根系主要分布在0~40 cm土层内,水分

胁迫下,根系表现出向深层土壤延伸的趋势,这可能是植物为了获取更多水分的一种适应性策略。然而,盐分胁迫则显著抑制了根系的纵向伸长和横向扩展,导致其活性显著降低。

盐分胁迫导致产生离子毒性、渗透失衡和pH增大,对根系的形态发育造成不利影响,严重限制作物生长。盐分胁迫下,根系长度、体积、表面积和质量显著降低,改变了根系的组成和形态^[25-27],这些变化限制了根系对养分和水分的吸收,抑制了根系呼吸,最终影响地上部分的生长并导致产量下降^[28]。本研究结果表明,盐分胁迫使得根系分层长度密度、表面积密度、体积密度与未施加盐胁迫处理的2种灌溉处理相比显著下降,但在成熟期添加生物炭的微咸水亏缺灌溉处理中,施加盐分胁迫下根系体积有所增长,这可能是由于施加生物炭能够提高土壤保水性,调节土壤酸碱度,并且改善土壤的通气性,促进根系的呼吸作用,良好的通气性可以提高根系的活力,增强根系对水分和养分的吸收能力,从而减轻盐分和亏水对根系生长的抑制^[29]。

本研究进一步验证了生物炭在缓解盐分胁迫对根系形态负面影响的显著作用。在微咸水灌溉条件下,施用生物炭显著改善了玉米在灌浆期和成熟期的根系形态特征,提高了根系长度、体积和质量。与未施用生物炭的处理相比,施用生物炭处理后根系发育显著增强,其根本原因可能在于生物炭的物理和化学性质使其在盐碱土壤中发挥了重要作用。一方面,生物炭作为一种高度多孔材料,能够有效改善土壤的总孔隙率、容积密度及持水能力,显著提高了土壤的渗透系数,改善了盐碱土壤的物理结构^[30-32];另一方面,生物炭可以缓释必需元素和微量营养素(如Ca、K、N和P),有效缓解盐碱胁迫对根系发育的不利影响^[33]。

本研究发现,施用生物炭显著提高了根系对土壤深层水分和养分的摄取能力,增强了养分的转移效率和吸收效率,从根本上促进了地上部分生物量的积累,进而提高了玉米的产量,表明生物炭能够在盐碱胁迫情况下优化根系形态和提升作物生产力^[34]。

4.2 灌水量、灌溉水含盐量和老化生物炭对玉米冠层结构的影响

土壤中含盐量过高显著影响作物生长,导致株高、叶面积指数降低。盐胁迫情况下,株高、叶面积指数、干物质积累量呈下降趋势。亏缺灌溉和微咸

水灌溉产生的胁迫限制了玉米的光合作用,显著抑制了株高、叶面积指数、产量和干物质质量的积累量,这可能与水盐胁迫导致的光合效率下降、光合色素减少以及气孔导度降低有关^[35-36]。老化生物炭对作物生物量和产量的促进作用随时间延续表现出一定的累积效应。例如,Major等^[37]的玉米和大豆轮作试验结果表明,施用20 t/hm²生物炭后,产量在随后的3年中逐年递增,分别比对照提高了28%、30%和14%。本研究表明,不同处理下生物炭促进了玉米的生长,显著增加了干物质积累量,这可能是由于生物炭的施用增加了土壤中根系的长度、表面积和体积,从而促进了玉米的生长^[38]。

4.3 灌水量、灌溉水含盐量和老化生物炭对玉米产量及其构成要素的影响

水分和盐分胁迫对玉米产量及其构成要素产生显著影响。试验结果表明,在未添加生物炭的处理组中,水分胁迫显著降低了穗长、穗粗、穗粒数、百粒重和单株产量,增大了秃尖长度,盐分胁迫进一步加剧了单株产量的下降趋势,特别是在灌浆期,水分胁迫引起穗长、穗重、穗粒数及千粒重的显著减少^[39-40],这可能与光合作用能力的削弱及花和籽粒发育过程的受阻有关^[41-43]。

陈阳^[19]在2020和2021年相同试验过程中发现,施加生物炭第一年起到了增产效果,增产范围为1%~5%,但是在第二年的试验中,微咸水亏缺灌溉处理表现为负面效果,添加生物炭减产16%。随后,戴永辉^[20]于2022和2023年开展的试验中微咸水亏缺灌溉处理施加生物炭亦表现为负面效果,表现为大幅度的减产。生物炭对于产量的促进可能得益于其多孔结构和较大的比表面积,降低土壤容重并增加土壤的总孔隙率,有效改善了根系发育,增强了植物养分吸收能力,从而促进了玉米的生长和产量^[44]。生物炭是在限氧条件下高温热解生产的,可能含有可诱导植物毒性和细胞毒性的污染物^[45],其表面带负电,可以吸附阳离子营养物质,导致它们不能被植物完全利用,这可能会对植物生长产生负面影响^[46]。综上,施加生物炭提高微咸水亏缺灌溉处理玉米产量可能是由于生物炭在自然老化过程中pH降低,缓解施用大量碱性生物炭引起的土壤pH过高产生的负面影响。其次,在自然老化过程中,土壤矿物质积累在生物炭表面,形成有机矿物复合物,堵塞生物炭表面的裂缝和通道,

降低其吸附能力,使植物能够有效吸收养分,实现同样试验条件下的增产。在施用生物炭第5年的处理组中,玉米产量得到了显著改善,尤其在微咸水亏缺灌溉处理下,生物炭的施用显著提高了单株产量。相关性分析中,单株产量与总根系体积密度呈现良好的正向相关关系(0.96),在微咸水亏缺灌溉处理下,添加生物炭显著提高了玉米根系体积,增大了玉米成熟期的根冠比。综上,添加生物炭可以促进胁迫条件下根系的生长、干物质积累,实现产量的提升^[47]。

本研究表明,施用老化生物炭后,相较于未添加老化生物炭处理玉米的穗长、穗粗和穗粒数有所提高,同时百粒重、水分利用效率也有所提高。这种改善归因于施加生物炭对水盐胁迫的缓解作用,生物炭改善了土壤的物理结构,显著提高了土壤孔隙度和水稳性团聚体的比例,从而改善了土壤的导水性和通气性能,增强了土壤在微咸水灌溉条件下的保水能力和盐分淋洗效果。生物炭作为一种高度多孔的材料,其较大的表面积和孔隙体积显著提高了土壤的保水能力,确保了土壤在胁迫条件下能够维持足够的有效水分供应^[48]。另外,生物炭释放 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 等必需营养元素,提高盐渍土壤中离子的有效含量,这些离子不仅有助于降低土壤溶液中的盐分浓度,还增强盐分淋洗作用,减轻了盐分胁迫对根系生长和发育的抑制作用。生物炭的施用有效降低了土壤中高盐浓度导致的离子毒性和渗透胁迫,使得植物根系能够更高效地吸收水分和养分,进一步提升玉米的产量。

5 结 论

本研究基于甘肃武威地区进行的膜下滴灌春玉米试验,探讨了不同灌溉量和水分含盐量条件下老化生物炭对玉米根系形态、冠层结构及产量的影响,得出以下结论:

1)老化5年的生物炭在不同水盐处理下对玉米根系形态及作物生长具有明显的改善作用,在根系发育和作物抗旱抗盐碱方面表现出较好的效果。

2)玉米灌浆期和成熟期根系长度、表面积、体积相较于未添加生物炭的处理有所增大。老化生物炭对不同灌溉水量和盐分处理的玉米产量具有显著促进效应。老化生物炭提高了微咸水亏缺灌溉处理玉米根系体积和单位面积产量。

参考文献 References

- [1] Kang S Z, Hao X M, Du T S, Tong L, Su X L, Lu H N, Li X L, Huo Z L, Li S E, Ding R S. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 5-17
- [2] 王小芳, 李毅, 姚宁, 刘洪光, 樊向阳, 张选. 生物炭改良棉花-甜菜间作土壤理化性质与盐分效果分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 352-362
Wang X F, Li Y, Yao N, Liu H G, Fan X Y, Zhang X. Effects of biochar on soil physical and chemical properties and salt in cotton-sugarbeet intercropping field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(4): 352-362 (in Chinese)
- [3] Zhang Y H, Li X Y, Wang J, Shi H B, Chen N, Hu Q. Improved yield-salinity relationship considering salt and root distribution dynamics[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 151: 127003
- [4] Yuan C F, Feng S Y, Huo Z L, Ji Q Y. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 424-432
- [5] Wei C C, Ren S M, Yang P L, Wang Y, He X, Xu Z A, Wei R, Wang S J, Chi Y B, Zhang M T. Effects of irrigation methods and salinity on CO_2 emissions from farmland soil during growth and fallow periods[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141639
- [6] 刘媛媛, 张体彬, 梁青, 胡行路, 程煜, 闫慧慧, 冯浩. 不同浓度微咸水灌溉对土壤盐分分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 378-386
Liu Z Y, Zhang T B, Liang Q, Hu X L, Cheng Y, Yan S H, Feng H. Effects of saline water irrigation with different concentrations on soil water and salt distribution and growth of winter wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 378-386 (in Chinese)
- [7] Mohan D, Sarswat A, Ok Y S, Pittman C U. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent-A critical review[J]. *Bioresour technol*, 2014, 160: 191-202
- [8] Song B, Almatrafi E, Tan X F, Luo S H, Xiong W P, Zhou C Y, Qin M, Liu Y, Cheng M, Zeng G M, Gong J L. Biochar-based agricultural soil management: An application-dependent strategy for contributing to carbon neutrality[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 164: 112529
- [9] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, Nehls T, de Macêdo J L V, Blum W E H, Zech W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1): 275-290
- [10] Laird D, Fleming P, Wang B Q, Horton R, Karlen D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010 (3-4), 158: 436-442
- [11] Wang Y, Li W Q, Du B H, Li H H. Effect of biochar applied with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on soil microbial community composition and nitrogen utilization in tomato[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(6): 872-881
- [12] Yang R, Wang X F. Effects of nitrogen fertilizer and irrigation rate on nitrate present in the profile of a sandy farmland in Northwest China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11: 726-732
- [13] Zhang G X, Meng W H, Pan W H, Han J, Liao Y C. Effect of soil water content changes caused by ridge-furrow plastic film mulching on the root distribution and water use pattern of spring maize in the Loess Plateau[J].

- Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107338
- [14] Singh M, Singh S, Deb S, Ritchie G. Root distribution, soil water depletion, and water productivity of sweet corn under deficit irrigation and biochar application[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 279: 108192
- [15] Wen Z H, Chen Y X, Liu Z Q, Meng J. Biochar and arbuscular mycorrhizal fungi stimulate rice root growth strategy and soil nutrient availability[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2022, 113: 103448
- [16] Wang Q, Duan C J, Liang H X, Ren J W, Geng Z C, Xu C Y. Phosphorus acquisition strategies of wheat are related to biochar types added in cadmium-contaminated soil: Evidence from soil zymography and root morphology[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159033
- [17] Li Q L, Fu Q, Li T X, Liu D, Hou R J, Li M, Gao Y. Biochar impacts on the soil environment of soybean root systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153421
- [18] 佟玲,戴永辉,陈阳,王璐,刘丽平. 水盐胁迫下老化生物炭对温室气体与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9):386-395
- Tong L, Dai Y H, Chen Y, Wang L, Liu L P. Effect of aged biochar on greenhouse gases and maize growth under water and salt stress [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 386-395 (in Chinese)
- [19] 陈阳. 水-盐-炭处理调控土壤生态环境和作物生长的机理及效益评估[D]. 北京:中国农业大学, 2024
- Chen Y. Mechanisms and benefit evaluation of soil ecological environment and crop growth regulated by water-salt-carbon treatment [D]. Beijing: China Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [20] 戴永辉. 水盐胁迫下老化生物炭对温室气体排放与玉米生长的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2024
- Dai Y H. Effects of aged biochar on greenhouse gas emissions and maize growth under water and salt stress [D]. Beijing: China Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [21] Hipps L E, Asrar G, Kanemasu E T. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat [J]. *Agricultural Meteorology*, 1983, 28(3):253-259
- [22] 张伟明,孟军,王嘉宇,范淑秀,陈温福. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8):1445-1451
- Zhang W M, Meng J, Wang J Y, Fan S X, Chen W F. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445-1451 (in Chinese)
- [23] 夏桂敏,王宇佳,王淑君,杨情峰,迟道才. 灌溉方式与生物炭对花生根系、磷素利用及产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022(2): 316-326
- Xia G M, Wang Y J, Wang S J, Yang Q F, Chi D C. Effects of irrigation methods and biochar on peanut root, phosphorus utilization and yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(2): 316-326 (in Chinese)
- [24] Xiang Y Z, Deng Q, Duan H L, Guo Y. Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(10): 1563-1572
- [25] Zhang X Y, He P Y, Guo R Y, Huang K F, Huang X Y. Effects of salt stress on root morphology, carbon and nitrogen metabolism, and yield of Tartary buckwheat[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12483
- [26] A Hakim M, S Juraimi A, Begum M, M Hanafi M, Mohd R I, Selamat A. Effect of salt stress on germination and early seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, 9(13): 1911-1918
- [27] 刘丹阳,王伯豪,李君,马合巴丽·奥腊孜别克,张翰申,朱新萍,杨再磊,贾宏涛,徐万里. 生物炭对中重度盐胁迫下棉花苗期根系形态及根系分泌物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1):50-58
- Liu D Y, Wang B H, Li J, Mahebal O, Zhang H S, Zhu X P, Yang Z L, Jia H T, Xu W L. Effects of biochar on cotton seedling root morphology and root exudates under moderate and severe saline stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(1):50-58 (in Chinese)
- [28] Zhou Y X, Feng C, Wang Y N, Yun C X, Zou X Q, Cheng N, Zhang W P, Jing Y, Li H Y. Understanding of plant salt tolerance mechanisms and application to molecular breeding[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(20): 10940
- [29] 杜衍红,蒋恩臣,王明峰,许细微,郭信辉,史冬冬,李世博. 炭基缓释肥对玉米生长的影响研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(12):72-76
- Du Y H, Jiang E C, Wang M F, Xu X W, Guo X H, Shi D D, Li S B. Study on growth and yield of maize with charcoal based slow-release fertilizer[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(12): 72-76 (in Chinese)
- [30] Yao T X, Zhang W T, Gulaqa A, Cui Y F, Zhou Y M, Weng W A, Wang X, Liu Q T, Jin F. Effects of peanut shell biochar on soil nutrients, soil enzyme activity, and rice yield in heavily saline-sodic paddy field[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(1): 655-664
- [31] Abrishamkesh S, Gorji M, Asadi H, Bagheri-Marandi G H, Pourbabaee A A. Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2015, 61(11): 475-482
- [32] Sun C X, Chen X, Cao M M, Li M Q, Zhang Y L. Growth and metabolic responses of maize roots to straw biochar application at different rates[J]. *Plant and Soil*, 2017, 416(1): 487-502
- [33] 陈泽林,林逸帆,陈国豪,刘琪琪,刘鹏,张志新,何学青. 饲用玉米氮素分配与根系特征对不同生物炭施加深度的响应[J]. 草业科学, 2024, 41(1):143-150
- Chen Z L, Lin Y F, Chen G H, Liu Q Q, Liu P, Zhang Z H X, He X Q. Response of nitrogen distribution and roots of forage maize to biochar application at different depths[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(1): 143-150 (in Chinese)
- [34] Chew J, Zhu L L, Nielsen S, Graber E, Mitchell D R G, Horvat J, Mohammed M, Liu M L, van Zwieten L, Donne S, Munroe P, Taherymoosavi S, Ben P C, Rawal A, Hook J, Marjo C, Thomas D S, Pan G X, Li L Q, Bian R J, McBeath A, Bird M, Thomas T, Husson O, Solaiman Z, Joseph S, Fan X R. Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136431
- [35] 毋海梅,闫浩芳,张川,黄松, Sam Acquah Joe. 温室滴灌黄瓜产量和水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9):84-93
- Wu H M, Yan H F, Zhang C, Huang S, Joe S. Responses of yield and water use efficiency of drip-irrigated cucumber in greenhouse to water stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 84-93 (in Chinese)
- [36] 张效星,樊毅,贾悦,崔宁博,赵璐,胡笑涛,龚道枝. 水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):143-150
- Zhang X X, Fan Y, Jia Y, Cui N B, Zhao L, Hu X T, Gong D Z. Effect of water deficit on photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency in Shiranui Citrus under drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(3): 143-150 (in Chinese)
- [37] Major J, Rondon M, Molina D, Riha S J, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 117-128
- [38] Kamau S, Karanja N K, Ayuke F O, Lehmann J. Short-term influence of biochar and fertilizer-biochar blends on soil nutrients, fauna and maize growth [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(7): 661-673
- [39] Bodner G, Nakhforoosh A, Kaul H P. Management of crop water under drought: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 401-442

- [40] Elshamarka S, Ali O, El-Nahas M M, Ghazy M, Habiba K. Evaluation of some maize-teosinte hybrids and their parents under water stress conditions [J]. *Menoufia Journal of Plant Production*, 2024, 9(3): 109-141
- [41] Seleiman M F, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dindaroglu T, Abdul-Wajid H H, Battaglia M L. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects [J]. *Plants*, 2021, 10(2): 259
- [42] Yousaf M I, Riaz M W, Jiang Y R, Yasir M, Aslam M Z, Hussain S, Sajid Shah S A, Shehzad A, Riasat G, Manzoor M A, Akhtar I. Concurrent effects of drought and heat stresses on physio-chemical attributes, antioxidant status and kernel quality traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 898823
- [43] Ibrahim A, Marie H A M E, Elfaki J. Impact of biochar and compost on aggregate stability in loamy sand soil [J]. *Agricultural Research Journal*, 2021, 58(1): 34-44
- [44] Graber E R, Tsechansky L, Mayzlish-Gati E, Shema R, Koltai H. A humic substances product extracted from biochar reduces *Arabidopsis* root hair density and length under P-sufficient and P-starvation conditions [J]. *Plant and Soil*, 2015, 395(1): 21-30
- [45] Yao Y, Gao B, Zhang M, Inyang M, Zimmerman A R. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471
- [46] Ren T B, Wang H H, Yuan Y, Feng H L, Wang B, Kuang G, Wei Y W, Gao W K, Shi H Z, Liu G S. Biochar increases tobacco yield by promoting root growth based on a three-year field application [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 21991
- [47] Niu Y H, Chen Z M, Müller C, Zaman M M, Kim D, Yu H Y, Ding W X. Yield-scaled N_2O emissions were effectively reduced by biochar amendment of sandy loam soil under maize - wheat rotation in the North China Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 58-70
- [48] Singh R, Srivastava P, Singh P, Sharma A K, Singh H, Raghubanshi A S. Impact of rice-husk ash on the soil biophysical and agronomic parameters of wheat crop under a dry tropical ecosystem [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 505-515

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 王国龙, 中国农业大学水利与土木工程学院农业水土工程专业硕士研究生, 主要研究方向为灌溉排水理论与技术。



通讯作者简介: 佟玲, 女, 1979年5月生, 工学博士, 教授, 博士生导师。国家大宗蔬菜产业技术体系岗位科学家, 现任甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站常务副站长。先后主持国家自然科学基金项目2项、主持与参加国家重点研发计划课题3项、主持国家科技基础资源调查课题1项、主持与参加国家科技支撑计划课题子题各1项、主持与参加水利部公益性行业科研专项经费项目4项、中国农业大学科研启动基金1项、中国农业大学基本科研业务费专项资金项目3项, 并参加国家“863”计划项目、国家自然科学基金重点项目、海外青年学者合作研究基金项目、公益性行业(农业)科研项目等20余项课题。在国内外刊物上发表(含合作发表)学术论文120余篇, 其中SCI/EI收录90余篇。