

网络出版时间:2025-04-02

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20250402.1335.002

深松下生物炭和羊粪对盐碱土壤改良及冬小麦耐盐特性的影响

赵迎^{1,3}, 王广恩², 郭丽^{1,3}, 李义红¹, 董伟欣⁴, 张敏^{1,3}, 张月辰³

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北石家庄 050051; 2. 河北省农林科学院棉花研究所, 河北石家庄 050051;

3. 河北农业大学农学院, 河北保定 071001; 4. 河北开放大学, 河北石家庄 050080)

摘要: 为了解秸秆还田下深松配施生物炭和羊粪对河北低平原内陆盐碱土壤改良效果及冬小麦耐盐性提升作用, 通过田间试验, 设置深松+秸秆还田(T1)、深松+生物炭 15 t·hm⁻²+秸秆还田(T2)、深松+羊粪 15 t·hm⁻²+秸秆还田(T3)、旋耕+秸秆不还田(T4)和旋耕+秸秆还田(T5)5个处理, 分析了不同处理下土壤理化性状及小麦耐盐能力。结果表明, 与T4、T5处理相比, T2处理0~20 cm土层的土壤容重和孔隙度分别显著下降和提高, 其中土壤孔隙度增幅为11.51%~12.51%; T3处理的土壤硝态氮、速效磷、速效钾含量均显著上升; T1与T4、T5处理间差异不显著。与T4、T5处理相比, T3处理下小麦灌浆前、中、后期旗叶超氧阴离子自由基积累量显著降低, 降幅为17.57%~28.30%; SOD、POD活性显著上升; NBT和DAB染色结果印证其活性氧积累减少效应最优; 可溶性蛋白和可溶性糖含量显著提高, 增幅分别为12.15%~25.51%和15.85%~31.81%; 灌浆前、后期游离氨基酸含量显著提高, 增幅为9.15%~22.81%; 冬小麦地上部氮、磷、钾总累积量显著提高。T3处理的冬小麦产量较T1、T4和T5处理分别提高了6.91%、15.44%和10.13%, 而T2、T3处理间无显著差异。结合生态效应和产能提升效果综合考虑, 优选深松+羊粪+秸秆还田作为河北低平原内陆盐碱土壤扩容增碳及冬小麦产量提升的关键技术。

关键词: 深松; 生物炭; 羊粪; 盐碱化土壤改良; 耐盐特性; 冬小麦产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)06-0808-10

Effects of Deep Tillage with Biochar and Sheep Manure on Saline-Alkali Soil Improvement and Salt Tolerance Characteristics of Winter Wheat

ZHAO Ying^{1,3}, WANG Guang'en², GUO Li^{1,3}, LI Yihong¹, DONG Weixin⁴,
ZHANG Min^{1,3}, ZHANG Yuechen³

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang,

Hebei 050051, China; 2. Cotton Research Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang,

Hebei 050051, China; 3. College of Agronomy, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China;

4. Hebei Open University, Shijiazhuang, Hebei 050080, China)

Abstract: To investigate the effects of deep tillage combined with biochar and sheep manure application under straw returning on the improvement of saline-alkali soil and the enhancement of salt tolerance in winter wheat in the inland plain of Hebei Province, a field experiment was conducted with five treatments: deep tillage + straw returning (T1), deep tillage + biochar 15 t·hm⁻² + straw returning (T2), deep tillage + sheep manure 15 t·hm⁻² + straw returning (T3), rotary tillage + no straw returning (T4), and rotary tillage + straw returning (T5). The soil physicochemical properties and wheat salt tolerance under different treatments were analyzed. The results showed that compared with T4 and T5 treatments, T2 treatment significantly reduced soil bulk density and increased soil porosity

收稿日期: 2024-06-13 修回日期: 2024-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901002-6)

第一作者 E-mail: zy07280323@163.com(赵迎)

通讯作者 E-mail: guolisoi@163.com(郭丽); 594037094@qq.com(王广恩)

in the 0–20 cm soil layer, with an increase rate of 11.51%–12.51% for soil porosity. T3 treatment significantly increased the contents of soil nitrate nitrogen, available phosphorus, and available potassium, while there were no significant differences between T1 and T4 or T5 treatments. Under the T3 treatment, the accumulation of superoxide anion radicals in flag leaves during the early, middle, and late grain-filling stages of wheat was significantly reduced by 17.57%–28.30% compared with T4 and T5 treatments, while the activities of SOD and POD were significantly increased. The NBT and DAB staining results confirmed the optimal reduction effect of reactive oxygen species accumulation. The contents of soluble protein and soluble sugar were significantly increased by 12.15%–25.51% and 15.85%–31.81%, respectively. The content of free amino acids was significantly increased during the early and late grain-filling stages by 9.15%–22.81%. T3 treatment significantly increased the total accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium in the aboveground parts of winter wheat compared with T4 and T5 treatments. The yield of winter wheat under the T3 treatment was increased by 6.91%, 15.44%, and 10.13% compared with T1, T4, and T5 treatments, respectively, while there was no significant difference between T2 and T3 treatments. Considering both ecological effects and productivity improvement, deep tillage + sheep manure + straw returning is recommended as a key technology for expanding soil capacity, increasing carbon sequestration, and improving winter wheat yield in the inland saline-alkali soil of the low plain in Hebei Province.

Keywords: Deep tillage; Biochar; Sheep manure; Saline soil improvement; Salt tolerance characteristics; Winter wheat yield

据统计,中国盐碱土面积约有 3.69×10^7 hm^2 ,约占全国可利用土地面积的 5.01%^[1]。目前,河北省盐碱耕地总面积为 7.8×10^5 hm^2 ,占全省总耕地面积的 10.4%,其中冀东南低平原内陆盐碱地区源自海河,受区域低洼、地下水位较浅、浅层地下微咸水丰富等因素的影响,该区域土壤结构差,盐碱障碍明显,会抑制作物根系营养吸收,阻碍作物生长发育^[2-4],最终降低产量,是制约农作物生长和区域农业可持续发展的重要影响因素。

深松耕作具有疏松土壤、改善耕层结构的作用,且能防止土壤盐分向上运移,有助于耕层土壤盐分淋溶,促进作物扎根和生长,进而实现盐碱地改良的目的^[5-6]。研究发现,深松可减轻苏打盐碱化土壤容重,促进作物根系发育^[7],显著降低 0~30 cm 土层的土壤电导率及盐分含量^[8]。深松改善土壤物理性质的效果较明显,对土壤养分影响较小,但施加有机物料可扩大土壤养分储备,提高土壤肥力^[9-10]。深松配合秸秆还田是改良滨海盐碱地土壤的优化措施^[11]。单施或配施有机物料可活化土壤中的氮、磷、钾元素,促使被固定养分的释放,显著增加土壤有机质含量,降低土壤 pH 值,有利于降碱排盐^[12-13]。此外,盐碱土壤上单施有机肥或与磷石膏混施能够有效促进作物叶片糖分累积,提高 SOD、POD 活性,降低叶片膜质过

氧化程度,延缓叶片衰老过程^[14-15]。可见,深松配施有机物料对盐碱障碍土壤的改良及作物产量提升具有明显效应。

前人在内蒙古河套及滨海盐碱区开展了深松、增施有机物料或深松+有机物料对盐碱土壤改良及作物抗盐能力系列研究^[7,10-11],但深松配施生物炭或羊粪对河北低平原内陆盐碱障碍区土壤扩容增碳阻盐效果及作物产能提升的影响尚缺乏系统探讨。基于此,本研究在深松耕作下配施生物炭或羊粪,探究其对盐碱化土壤理化特性及冬小麦旗叶生理特性和冬小麦产量的影响,以期为该地区盐碱障碍粮田土壤改良提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

河北省衡水市故城县北堤口村农业示范园区 ($37^{\circ}28'N, 116^{\circ}00'E$),该地区为亚热带半湿大陆性季风气候区,四季分明,雨热同期。年平均气温 12.9°C ,年日照时间 2 608.5 h,年平均降水量 480.5 mm,全年无霜期 190 d 左右。试验开始前土壤 pH 值为 7.34,土壤 EC 值为 $894.25 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,有机质含量 $15.45 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮含量 $19.21 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $14.87 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $120.3 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验于 2022 年 10 月 19 日播种,设置深松+秸秆还田(T1)、深松+生物炭 15 t·hm⁻²+秸秆还田(T2)、深松+羊粪 15 t·hm⁻²+秸秆还田(T3)、旋耕+秸秆不还田(T4)和旋耕+秸秆还田(T5)5 个处理,每处理重复 3 次,共 15 个小区。小区采用随机排列,小区面积为 90 m²(9 m×10 m)。当 0~20 cm 土壤相对含水量为 75%时播前整地,先将生物炭或羊粪结合基肥均匀撒施于地表,然后进行深松或旋耕,深松深度为 40 cm,旋耕深度为 15 cm。生物炭总碳含量 620 g·kg⁻¹,总氮含量 13.3 g·kg⁻¹,pH 值为 9.2;羊粪有机肥有机质含量 39.5%,全氮、全磷和全钾含量分别为 1.24%、0.46%和 1.71%。供试小麦品种为衡 9966,播种量为 337.5 kg·hm⁻²,采用种肥一体机条播,行距 15 cm。各处理基施纯 N、P₂O₅、K₂O 分别为 150、150 和 75 kg·hm⁻²,结合春季第一次灌水追施纯氮 75 kg·hm⁻²。春季当 0~40 cm 土壤相对含水量低于 65%时补灌,每次灌溉量为 675 m³·hm⁻²,灌溉水为地上河水,含盐量为 1.4 g·L⁻¹,病虫害防治等田间管理措施所有处理一致。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤理化性质和养分的测定

在小麦成熟期(2023 年 6 月 16 日),按照 5 点混合取样法采集各小区 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土样,采用 KCL-紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量;分别通过 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗分光光度法、NH₄OAc 浸提-火焰光度计法和重铬酸钾氧化外加热法测定土壤速效磷、速效钾和有机质含量;土壤 pH 和 EC 值分别采用 PHS-3C 酸度计和电导仪测定;土壤容重和总孔隙度采用环刀法测定,将容积 100 cm³ 的环刀插入表层土壤采集土样,经 105~110 °C 烘干 24 h 后得到干土重,计算土壤容重和总孔隙度^[16]。

1.3.2 旗叶生理生化指标的测定

灌浆前期、中期、后期于各小区随机采集小麦旗叶 10~15 片,用于相关生理指标测定。可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸和超氧阴离子自由基(O₂⁻)含量测定分别通过蒽酮法、考马斯亮蓝 G-250 蛋白染色法、茚三酮显色法和羟胺氧化反应法测定。超氧化物歧化酶(SOD)及过氧化物酶(POD)活性分别采用氮蓝四唑法和愈创木酚法^[17]测定,并进行硝基蓝四氮唑(NBT)和二氨基

联苯胺(DAB)化学染色^[18]。

1.3.3 小麦养分含量测定

成熟期每小区随机取 15 株小麦,分为籽粒、茎叶、颖壳,在 80 °C 烘箱烘干后称重并粉碎备用。通过 H₂SO₄-H₂O₂ 消解定容后分别采用半微量凯氏定氮仪、钼锑抗吸光度法和火焰光度计测定小麦各器官全氮(N)、全磷(P)和全钾(K)含量^[16]。

1.3.4 产量测定

成熟期在各小区随机抽取长势均匀一致 30 个麦穗测量穗粒数;取 1 m 双行穗数,折合成单位面积穗数;收获 1 m² 的小麦植株测单位面积籽粒产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行整理分析和绘图,采用 DPS 软件进行统计分析,采用最小显著极差法 LSD 进行差异显著性检验($\alpha=0.05$),采用 Origin 2022 进行相关性分析。

2 结果与分析

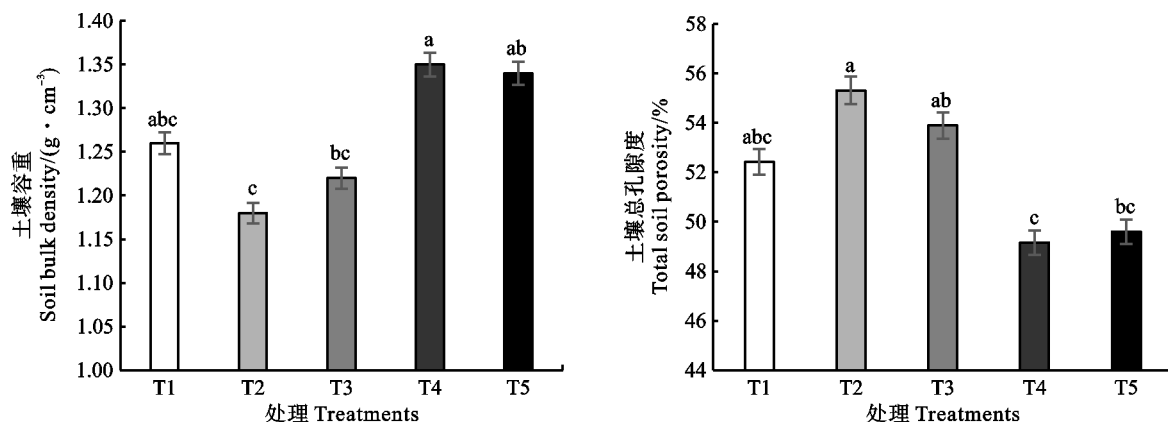
2.1 深松下生物炭和羊粪对盐碱障碍粮田土壤理化性状和土壤养分的影响

2.1.1 深松下生物炭和羊粪对盐碱障碍粮田土壤物理性质的影响

T1 处理土壤容重和土壤总孔隙度与 T4、T5 处理均无显著差异(图 1)。与 T4、T5 处理相比,T2 处理的土壤容重分别降低 12.59%和 11.94%,土壤孔隙度分别提高 6.15 和 5.71 个百分点,差异均显著,但 T2 处理土壤容重和土壤总孔隙度与 T3 处理差异均不显著。这说明,秸秆还田条件下深松结合施用生物炭或羊粪可在一定程度上降低土壤容重,提高土壤孔隙度。

2.1.2 深松下生物炭和羊粪对盐碱障碍粮田不同土层土壤化学性质和土壤养分的影响

由表 1 可知,在 0~20 cm 土层不同处理间土壤 pH 值和有机质含量差异均不显著;T1 与 T4、T5 处理间土壤 EC 值、硝态氮、速效磷和速效钾含量差异也均不显著,但 T3 处理的土壤 EC 值较 T1、T4 和 T5 处理均显著降低,降幅为 9.40%~12.53%;T2、T3 处理的土壤硝态氮和速效磷含量较 T1、T4 和 T5 处理均显著提高,两个指标增幅分别为 9.26%~21.84%和 6.59%~14.83%;T3 处理的土壤速效钾含量较 T1、T4 和 T5 处理均显著提高,增幅为 10.71%~13.84%。在 20~40 cm 土层,不同处理间土壤 pH 值、EC 值及各养分含



图柱上不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同。

Different letters above the columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in figures 2 and 3.

图 1 不同处理对盐碱障碍粮田土壤容重和孔隙度的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil bulk density and porosity in saline-alkali field

表 1 不同处理对不同土层土壤化学性质和土壤养分的影响

Table 1 Effects of different treatments on chemical properties and soil nutrients in different soil layers

指标 Index	土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment				
		T1	T2	T3	T4	T5
pH	0~20	7.32a	7.31a	7.29a	7.35a	7.34a
	20~40	7.35a	7.34a	7.34a	7.37a	7.35a
EC/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	0~20	989.33ab	932.34bc	896.32c	1 024.67a	994.29ab
	20~40	1 153.28a	1 134.67a	1 152.55a	1 194.36a	1 157.11a
有机质 Organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0~20	15.44a	15.46a	15.48a	15.41a	15.45a
	20~40	6.66a	6.83a	6.98a	6.32a	6.51a
硝态氮 Nitrate nitrogen/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0~20	20.51b	22.41a	23.04a	18.91b	19.22b
	20~40	15.59a	15.74a	16.12a	15.35a	15.49a
速效磷 Available phosphorus/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0~20	15.17b	16.17a	16.57a	14.43b	14.87b
	20~40	7.04a	7.13a	7.30a	6.72a	6.97a
速效钾 Available potassium/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0~20	128.43bc	137.08ab	142.18a	124.89c	127.10bc
	20~40	84.10a	84.43a	84.54a	83.57a	83.66a

同行数值后不同小写字母表示不同处理间的差异显著($P < 0.05$)。

Different letters after the values in the same rows indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

量均无显著差异。这表明,秸秆还田条件下深松结合施用生物炭或羊粪可显著增加盐碱障碍田 0~20 cm 土壤养分,有助于培肥土壤力。

2.2 深松下生物炭和羊粪对盐碱障碍粮田冬小麦旗叶生理特性的影响

2.2.1 深松下生物炭和羊粪对冬小麦旗叶可溶性蛋白、可溶性糖、游离氨基酸和超氧阴离子含量的影响

在灌浆前期 T3 处理冬小麦旗叶可溶性蛋

白含量较 T1、T4 和 T5 处理均显著提高,增幅为 9.65%~12.15%;灌浆中、后期较 T4、T5 处理均显著提高,两个时期增幅分别为 12.89%~16.69%、24.45%~25.51%;各时期与 T2 处理均无显著差异(图 2a)。在灌浆前、后期 T3 处理冬小麦旗叶可溶性糖含量较 T1、T4 和 T5 处理均显著提高,两个时期增幅分别为 24.49%~31.81%、12.67%~26.00%,灌浆中期 T3 处理较 T4、T5 处理分别增加了 23.92%和 15.98%,差异均显

著;各时期与 T2 处理差异均不显著(图 2b)。在灌浆前、后期 T3 处理冬小麦旗叶游离氨基酸含量较 T4、T5 处理均显著提高,增幅为 9.15%~15.67%和 20.69%~22.81%,在灌浆中期 T3 处理与 T4 处理差异显著,但与其他处理间均无显著差异(图 2c)。在灌浆前、中期 T3 处理冬小麦旗叶 O₂⁻ 含量较 T4、T5 处理均显著下降,两个

时期降幅分别为 24.00%~28.30%、16.44%~17.57%;灌浆后期较 T1、T4 和 T5 处理均显著下降,降幅分别为 15.31%、22.43%和 19.42%;各时期与 T2 处理均无显著差异(图 2d)。上述结果表明,秸秆还田条件下深松结合施用生物炭或羊粪可显著提高盐碱胁迫下冬小麦碳氮代谢能力,增强其抗逆性。

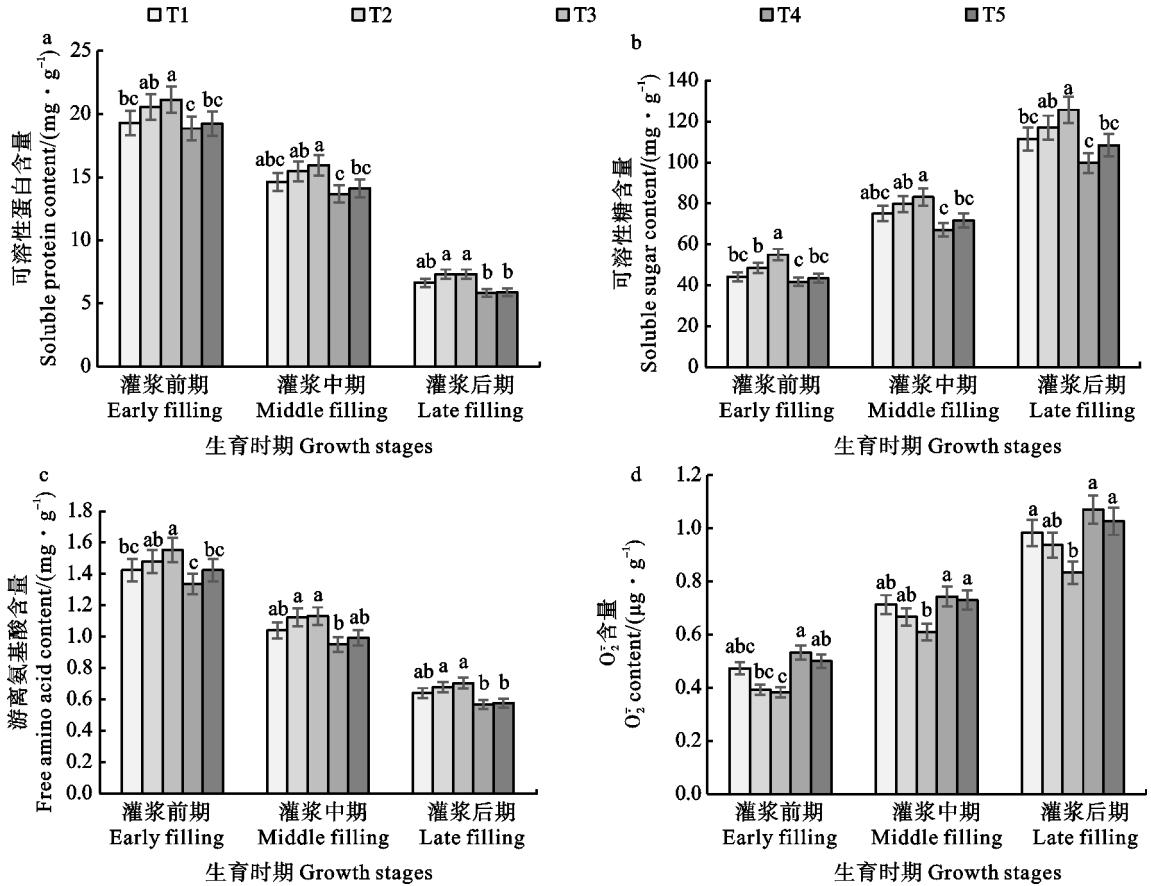


图 2 不同处理对冬小麦旗叶可溶性蛋白、可溶性糖、游离氨基酸和 O₂⁻ 含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on contents of soluble protein, soluble sugar, free amino acid and O₂⁻ contents in flag leaves of winter wheat

2.2.2 深松下生物炭和羊粪对冬小麦旗叶 SOD 和 POD 活性及 NBT 和 DAB 染色特征的影响

在灌浆前、中期 T3 处理冬小麦旗叶 SOD 活性较 T4、T5 处理显著提高,两个时期增幅分别为 13.75%~15.62%、13.11%~15.72%;灌浆后期较 T1、T4 和 T5 处理分别提高了 12.74%、16.20%、15.23%,差异均显著;各时期与 T2 处理均无显著差异(图 3a)。通过 NBT 染色(图 4a)进一步证明,T2、T3 处理明显减少了 H₂O₂ 的积累,尤其 T3 处理更为明显,而 T4、T5 处理则表现出较大的 H₂O₂ 积累。在灌浆前、中期 T3 处

理冬小麦旗叶 POD 活性较 T1、T4 和 T5 处理均显著提高,两个时期增幅分别为 9.83%~21.84%、13.70%~24.04%;灌浆后期较 T4、T5 处理分别提高了 25.83%和 24.18%,差异均显著;各时期与 T2 处理差异均不显著(图 3b)。通过 DAB 染色(图 4b)观察可知,T4、T5 处理表现出较大的 H₂O₂ 积累,说明 T4、T5 叶片清除 H₂O₂ 能力低,T2 和 T3 处理的 POD 活性强。由此可见,秸秆还田条件下深松结合施用生物炭或羊粪可提高盐碱障碍粮田冬小麦旗叶 SOD 和 POD 活性,有助于增强冬小麦植株抗氧化和抵御盐胁迫能力。

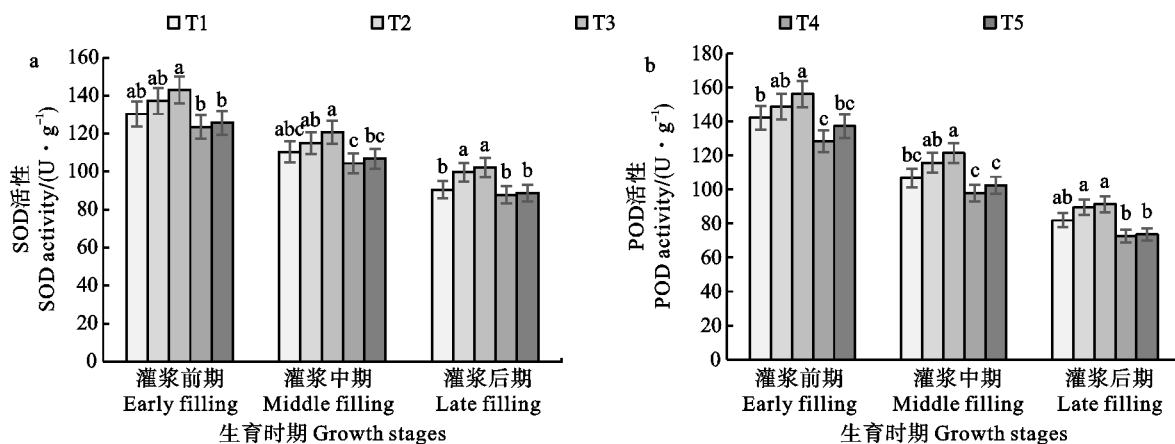


图 3 不同处理对冬小麦旗叶抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on antioxidant enzyme activities in flag leaves of winter wheat

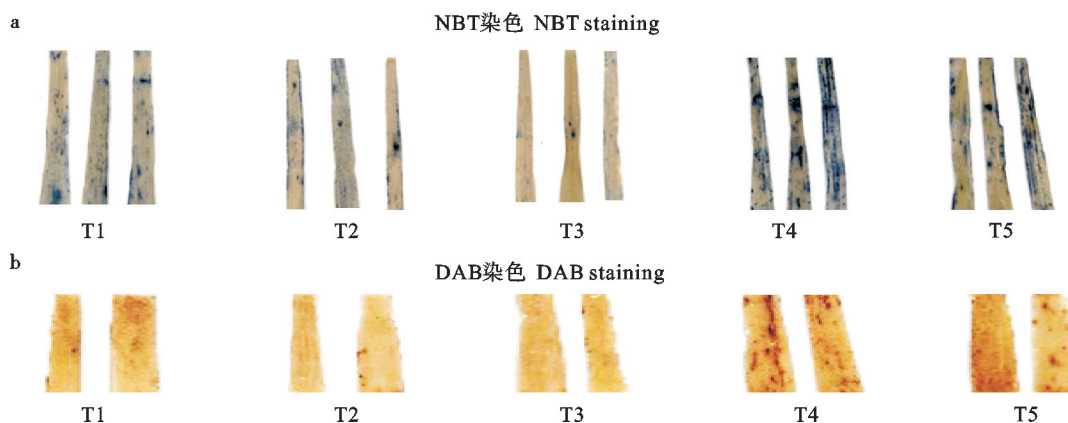


图 4 不同处理下冬小麦旗叶 NBT 和 DAB 染色情况

Fig. 4 NBT and DAB staining of winter wheat flag leaves under different treatments

2.3 深松下生物炭和羊粪对盐碱障碍粮田冬小麦植株各器官养分累积的影响

T1、T4 和 T5 处理间冬小麦各器官氮、磷、钾含量均无显著差异(表 2)。与 T4 处理相比, T3 处理籽粒、茎叶和颖壳 3 种养分累积量均显著增加,氮、磷、钾累积量在籽粒中的增幅分别为 8.86%、28.01%、15.85%,在茎叶中增幅分别为 17.44%、24.15%、8.85%,在颖壳中增幅分别为 21.68%、22.47%、21.71%。T3 处理下冬小麦地上部氮、磷总累积量分别较 T1、T4 和 T5 处理显著提高,增幅分别为 6.17%~11.55%、18.32%~27.06%,钾总累积量较 T4、T5 处理分别提高 10.87%和 7.98%,差异均显著;T2 处理下冬小麦地上部氮总累积量较 T4、T5 处理均显著提高,增幅分别为 7.85%、5.04%,磷、钾总累积量较

T4 处理分别提高 15.81%、6.99%,差异均显著。T2、T3 处理间各器官氮、磷、钾总累积量均无显著性差异。这表明秸秆还田条件下深松结合施用生物炭或羊粪有利于冬小麦地上部氮磷钾的累积。

2.4 深松下生物炭和羊粪对盐碱障碍粮田冬小麦产量及其构成因素的影响

不同处理间冬小麦穗粒数和千粒重均无显著差异(表 3)。T3 处理的穗数较 T1、T2、T4 和 T5 处理分别提高了 6.40%、5.13%、13.68%和 8.47%,差异均显著;产量较 T1、T4 和 T5 处理均显著提高,增幅分别为 6.91%、15.44%和 10.13%,但与 T2 处理差异不显著。这说明秸秆还田条件下深松结合施用生物炭或羊粪主要通过增加盐碱障碍田冬小麦穗数来提高产量。

表 2 不同处理对盐碱障碍粮田冬小麦各器官氮、磷、钾养分含量的影响
Table 2 Effects of different treatments on the content of nitrogen, phosphorus, and potassium in organs of winter wheat in saline-alkali field

植株养分 Plant nutrient	处理 Treatment	各器官含量 Content in organ/%			各器官累积量 Accumulated amount in organ/(kg·hm ⁻²)			总累积量 Total Accumulation/ (kg·hm ⁻²)
		籽粒 Grain	茎叶 Stem leaf	颖壳 Glume	籽粒 Grain	茎叶 Stem leaf	颖壳 Glume	
氮 Nitrogen	T1	2.16ab	0.57a	0.87a	141.55bc	36.87ab	19.11ab	197.53bc
	T2	2.19ab	0.58a	0.87a	145.25ab	37.55ab	19.95ab	202.75ab
	T3	2.23a	0.60a	0.86a	149.42a	39.86a	20.43a	209.71a
	T4	2.14b	0.54a	0.84a	137.26c	33.94b	16.79b	187.99c
	T5	2.15ab	0.56a	0.88a	139.06c	35.71ab	18.24ab	193.01c
磷 Phosphorus	T1	0.32a	0.045a	0.131a	20.96b	2.92ab	2.87bc	26.75bc
	T2	0.34a	0.049a	0.137a	22.51ab	3.22ab	3.11ab	28.85ab
	T3	0.37a	0.049a	0.138a	25.09a	3.29a	3.27a	31.65a
	T4	0.31a	0.043a	0.133a	19.60b	2.65b	2.67c	24.91c
	T5	0.32a	0.045a	0.137a	20.94b	2.84ab	2.83bc	26.62bc
钾 Potassium	T1	0.57a	2.53a	0.87a	37.34ab	163.83ab	19.07ab	220.24abc
	T2	0.58a	2.56a	0.86a	38.11ab	167.03ab	19.66ab	224.81ab
	T3	0.59a	2.58a	0.89a	39.61a	172.16a	21.19a	232.96a
	T4	0.53a	2.54a	0.86a	34.19b	158.17b	17.41b	210.12c
	T5	0.55a	2.54a	0.87a	35.87ab	161.84ab	18.04ab	215.75bc

同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。下同。

Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in table 3.

表 3 不同处理对冬小麦产量及其构成因素的影响
Table 3 Effects of different treatments on yield and its components of winter wheat

处理 Treatment	穗数 Spike number/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
T1	578b	34.74a	38.69a	6 608.03b
T2	585b	34.8a	38.75a	6 711.57ab
T3	615a	34.77a	38.84a	7 064.51a
T4	541c	34.55a	38.52a	6 119.74c
T5	567b	34.49a	38.59a	6 414.72bc

3 讨论

盐碱障碍土壤存在钠离子、硫酸根、氯离子含量高,结构差,供肥能力下降等问题。本研究中,T3 处理较 T4、T5 处理显著提高盐碱化土壤 0~20 cm 土层土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量,但不同处理间 20~40 cm 土层速效养分含量的差异较小,这与徐国凤等^[19]在卤阳湖盐碱地区施用羊粪显著提高了 0~20 cm 耕层土壤速效氮、速效钾含量,对 20~40 cm 耕层均无显著影响的研究结果一致。T3 处理较 T4、T5 处理显著降低了 0~20 cm 土层 EC 值,但土壤 pH 值和有机质含量均

无显著性差异,这与张贵芹等^[20]将有机物料的投入可显著降低土壤 pH 值,提高土壤有机碳含量的研究结果不一致,可能是由于试验年限、有机物料养分特征及土壤缓冲特性不同所致。此外在本研究中,T2 处理中生物炭含有较大的表面积和孔隙结构,提升了盐碱地土壤的孔隙度,降低了土壤容重,这与 Yan 等^[21]认为添加生物炭会引起土壤物理性质的变化,进而改善土壤结构的研究结果相一致。综上所述,深松+生物炭+秸秆还田可改善盐碱土壤物理性状,深松+羊粪+秸秆还田则增强土壤肥力,降低土壤耕层含盐量,从而改良盐碱障碍土壤。

可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸是植物碳氮代谢重要调节物质^[22-23]。SOD、POD是植物体内抗氧化酶,盐胁迫下通过协同作用清除H₂O₂,维持植物体内自由基含量稳态水平保护细胞免受毒害^[24]。本研究发现,在灌浆前、中、后期T3处理的冬小麦旗叶可溶性蛋白和可溶性糖含量较T4、T5处理均显著提高;而游离氨基酸的含量则在灌浆前、后期显著高于T4、T5处理;T3处理的超氧阴离子自由基含量在灌浆前、中、后期显著低于T4、T5处理,同一灌浆时期T3处理的SOD和POD活性最大,这与卢培娜等^[25]得出腐熟秸秆配施菌肥有利于燕麦调节渗透生理以适应生长和Lashari等^[26]发现添加腐熟秸秆可增强其渗透调节能力的研究结论一致,也与萨如拉等^[27]认为秸秆还田配施腐熟剂可提高作物SOD和POD活性和刘艳等^[28]提出在盐碱条件下随着有机肥的施入SOD、POD的活性呈逐渐增加趋势的观点相似。由此可见,深松+羊粪+秸秆还田对提高小麦旗叶抗氧化酶活性具有促进作用,可有效降低盐碱胁迫对植株造成的损害。

有机物料的投入可提高盐碱胁迫下小麦不同时期地上部氮磷钾含量^[29]。在本研究中,T3处理籽粒氮、磷、钾累积量均高于其他处理,其中氮、磷累积量差异均显著。这说明在本研究下,深松+羊粪+秸秆还田促进了植株氮、磷、钾营养的吸收和运转,为盐逆境下冬小麦植株提供充足养分,进而形成较高的光合产物,这与郑福丽等^[30]认为增施有机肥,可增加作物养分累积量的研究结果相似。

耕作方式和施用有机物料的交互作用对作物的产量构成因素及籽粒产量具有一定调控作用。翟云龙等^[31]研究认为,深松条播的冬小麦成穗数和产量均高于旋耕条播,且穗粒数、千粒重差异不显著;但也有研究发现,盐胁迫下小麦产量的提高主要是因为粒重及穗粒数增加^[32];王丹等^[33]认为脱硫石膏配施有机物料可显著提高盐碱地作物产量,且比单一施用脱硫石膏或有机物料的增产效果好。本研究结果显示,T3处理的小麦穗数显著高于其他处理,不同处理间穗粒数和千粒重均无显著差异,T3处理的产量较T4、T5处理显著增加,与薛远赛等^[34]在盐碱地得出的研究结论基本一致。本研究中T3处理对小麦的增产、增穗效应可能与深松配施羊粪在优化耕作质量的同时,促进土壤有效养分和小麦有效分蘖增加相关。

此外,此研究仅是冀东南地下水位较浅的盐碱区1年试验初步结果,有关连续多年深松配施生物炭或羊粪对该区盐碱土壤改良及作物产量提升效果有待进一步研究。

4 结论

本研究条件下,土壤容重和总孔隙度对T2处理响应优于其他处理。与T4、T5处理相比,T3处理显著降低了0~20 cm土层EC值,提高了土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量,显著提升了冬小麦旗叶可溶性蛋白和可溶性糖的含量,增强了冬小麦旗叶SOD、POD的活性,有效缓解了超氧阴离子自由基的氧化伤害,促进植株氮、磷、钾素累积,通过提高单位面积穗数进而实现冬小麦的增产。从生态效应和作物产能提升效果综合考虑,优选深松+羊粪+秸秆还田作为河北低平原盐碱障碍粮田土壤改良和产量提升的耕作措施。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10.
- [2] YANG J S, YAO R J, WANG X P, *et al.* Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10.
- [3] 冯伟,刘忠宽,刘振宇,等.河北省盐碱地分布成因及改良利用技术研究[J].河北农业科学,2015,19(1):56.
- [4] FENG W, LIU Z K, LIU Z Y, *et al.* Study on the distribution, causes and improvement technology of saline-alkali land in Hebei Province [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2015, 19(1): 56.
- [5] MAHMOUD E, EL-BESHESHY T, EL-KADER N A, *et al.* Impacts of biochar application on soil fertility, plant nutrients uptake and maize (*Zea mays* L.) yield in saline sodic soil [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(23): 719.
- [6] SODA N, EPHRATH J E, DAG A, *et al.* Root growth dynamics of olive (*Olea europaea* L.) affected by irrigation induced salinity [J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1): 305.
- [7] 高鹏,孙继颖,高聚林,等.深松对春玉米田土壤贮水性能及玉米籽粒水分利用效率的影响[J].玉米科学,2022,30(4):90.
- [8] GAO P, SUN J Y, GAO J L, *et al.* Response mechanism of soil moisture storage characteristics and kernel water use efficiency to subsoiling regulation in spring maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(4): 90.
- [9] YU X, QU J, HU S, *et al.* The effect of tillage methods on soil physical properties and maize yield in Eastern Inner Mongolia [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 147: 126852.
- [10] 于晓芳,高聚林,尹斌,等.春季深松对内蒙古西部农田土壤结构及玉米产量的影响[J].内蒙古农业科技,2012,40(3):

21.
YU X F, GAO J L, YIN B, *et al.* Effect of subsoiling in spring on farmland soil structure and maize yield in Western Inner Mongolia [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2012, 40(3): 21.
- [8] CASAS R R, BARIDÓN J E. Salinity dynamics in subsoiled soils of the northwest of the Argentine pampean plain [J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2021, 51.
- [9] 霍琳, 王成宝, 逢焕成, 等. 有机无机肥配施对新垦盐碱荒地土壤理化性状和作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 105.
HUO L, WANG C B, PANG H C, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on physical and chemical properties and crop yields in alkali-saline soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 105.
- [10] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 脱硫石膏与有机物料配施对河套灌区土壤改良及向日葵生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 85.
GAO H M, WANG X P, QU Z Y, *et al.* Combining desulfurization gypsum and organic materials to improve soil quality and sunflower growth in Hetao irrigation district [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 85.
- [11] 闫晓宇, 郭文君, 秦都林, 等. 滨海盐碱地棉花秸秆还田和深松对棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(5): 1235.
YAN X Y, GUO W J, QIN D L, *et al.* Effects of cotton stubble return and subsoiling on dry matter accumulation, nutrient uptake, and yield of cotton in coastal saline-alkali soil [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(5): 1235.
- [12] KELESHYAN S K, KARAPETYAN Z V, TOPLAGHALTSYAN A G, *et al.* Obtaining osmo-resistant mutants in nitrogen-fixing bacteria isolated from saline soils [J]. *Current Microbiology*, 2022, 79(9): 251.
- [13] 聂朝阳, 杨帆, 王志春, 等. 耕作协同物料添加对苏打盐碱化耕地土壤理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 235.
NIE C Y, YANG F, WANG Z C, *et al.* Effects of tillage synergistic material addition on physical and chemical properties of cultivated sodic-saline soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(1): 235.
- [14] 张盼盼, 高立城, 李晓敏, 等. 磷石膏和有机肥对盐碱地糜子产量和叶片生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(15): 26.
ZHANG P P, GAO L C, LI X M, *et al.* Phosphogypsum and organic fertilizer: Effects on yield and leaf physiological characteristics of broomcorn millet in saline-alkali soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(15): 26.
- [15] 刘佳辰, 张盼盼, 高立城, 等. 磷石膏和有机肥对盐碱地糜子叶片抗氧化系统的影响[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(12): 1.
LIU J C, ZHANG P P, GAO L C, *et al.* Effects of phosphogypsum and organic fertilizers on anti-oxidation system of broom corn millet leaves in saline-alkaline land [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 64(12): 1.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 42-183.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 42-183.
- [17] 路文静, 李奕松. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017: 54-106.
LU W J, LI Y S. Experimental course of plant physiology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017: 54-106.
- [18] HUANG X S, LIU J H, CHEN X J. Overexpression of *PtrABF* gene, a bZIP transcription factor isolated from *Poncirus trifoliata*, enhances dehydration and drought tolerance in tobacco *via* scavenging ROS and modulating expression of stress-responsive genes [J]. *BMC Plant Biology*, 2010, 10: 230.
- [19] 徐国凤, 同延安. 不同改良措施对卤阳湖盐碱地土壤性质及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 232.
XU G F, TONG Y A. Effect of soil properties and maize yield in different improvement measures of saline-alkali soil in Luyang Lake [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 232.
- [20] 张贵芹, 王洪章, 郭新送, 等. 有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(9): 2323.
ZHANG G Q, WANG H Z, GUO X S, *et al.* Effects of organic materials input on soil physical and chemical properties and summer maize yield formation in coastal saline-alkali land [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(9): 2323.
- [21] YAN T, XUE J, ZHOU Z, *et al.* The trends in research on the effects of biochar on soil [J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7810.
- [22] 朱金方, 陆兆华, 夏江宝, 等. 盐旱交叉胁迫对柽柳幼苗渗透调节物质含量的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(2): 357.
ZHU J F, LU Z H, XIA J B, *et al.* Changes of osmotic adjusting substances in leaves of *Tamarix chinensis* seedlings under salt and drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(2): 357.
- [23] 宋士伟, 焦德志, 杨允菲. 东北草地野大麦对混合盐碱胁迫的生理响应及转录组分析[J]. 草业科学, 2019, 36(5): 1379.
SONG S W, JIAO D Z, YANG Y F. Physiological response and transcriptome analysis of *Hordeum brevisubulatum* under mixed salt and alkaline stress [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(5): 1379.
- [24] 薛远赛, 孟祥浩, 刘义国, 等. 盐胁迫下不同小麦品种(系)旗叶衰老特性分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(24): 37.
XUE Y S, MENG X H, LIU Y G, *et al.* Flag leaf senescence characteristic of different wheat varieties (lines) under salt stress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(24): 37.
- [25] 卢培娜, 白健慧, 米俊珍, 等. 菌肥与腐熟秸秆对盐碱地燕麦渗透生理特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43

- (6):753.
- LU P N, BAI J H, MI J Z, *et al.* Effects of bio-fertilizer and rotten straw on osmotic physiological characteristics and yield of oats in the saline-alkaline environment [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(6):753.
- [26] 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 and Agriculture*, 2015, 95(6):1321.
- [27] 萨如拉, 杨恒山, 邵继承, 等. 不同改良措施对碱化土壤特性及玉米生长的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(6):97.
- SA R L, YANG H S, TAI J C, *et al.* Effects of different improvement measures on alkaline soil characteristics and maize growth [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(6):97.
- [28] 刘艳, 李波, 孙文涛, 等. 生物有机肥对盐碱地春玉米生理特性及产量的影响[J]. 作物杂志, 2017(2):98.
- LIU Y, LI B, SUN W T, *et al.* Effects of bio-organic fertilizer on physiological characteristics and yield of maize in saline-alkali soil [J]. *Crops*, 2017(2):98.
- [29] 韩一诺, 赵梦帅, 吴星宏, 等. 改性秸秆保水剂对盐碱地小麦养分含量及相关基因表达量的影响[J]. 耕作与栽培, 2024, 44(2):34.
- HAN Y N, ZHAO M S, WU X H, *et al.* Effects of modified straw water retaining agent on nutrient content and related gene expression of wheat in saline alkali land [J]. *Tillage and Cultivation*, 2024, 44(2):34.
- [30] 郑福丽, 刘苹, 李国生, 等. 有机-无机肥协同调控小麦-玉米两熟作物产量及土壤培肥效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21):4355.
- ZHENG F L, LIU P, LI G S, *et al.* Organic-inorganic coordinated regulation to wheat-maize double crop yield and soil fertility [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21):4355.
- [31] 翟云龙, 魏燕华, 张海林, 等. 耕种方式对华北地区冬小麦群体质量及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(9):1174.
- ZHAI Y L, WEI Y H, ZHANG H L, *et al.* Effect of seeding and tillage methods on population quality and yield of winter wheat in North China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(9):1174.
- [32] 谢娟娜, 房琴, 路杨, 等. 增施有机肥提升作物耐盐能力研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3):42.
- XIE J N, FANG Q, LU Y, *et al.* Increasing organic fertilizers on improving salt resistance of crop [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(3):42.
- [33] 王丹, 黄超, 李小东, 等. 脱硫石膏配施不同量有机物料对盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1):34.
- WANG D, HUANG C, LI X D, *et al.* Effects of different amount of organic materials combined with desulfurized gypsum on soil improvement and crop yield in saline-sodic soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1):34.
- [34] 薛远赛, 刘志鹏, 林琪, 等. 不同种植方式对盐碱土壤盐分变化及耐盐品种青麦6号耐盐生理特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(3):338.
- XUE Y S, LIU Z P, LIN Q, *et al.* Effects of different planting methods on soil salinity content and salt tolerance physiological characteristics of salt tolerant cultivar Qingmai 6 [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(3):338.