

# 不同改良剂对滨海盐渍土盐分离子及玉米生长的影响

王涛, 李建国, 路迅, 徐璐

(江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏徐州 221116)

**摘要:** [目的] 分析不同改良剂对滨海盐渍土盐分离子的变化过程以及玉米生长的影响, 为进一步精细化滨海地区盐渍土脱盐改良管理措施提供理论依据。[方法] 在盐城大丰滨海垦区进行田间控制试验, 以玉米(蠶玉 88)为研究对象, 在常规施肥的基础上, 设置复合肥配施低(1)、中(2)、高(3) 3 个水平的生物炭(BC<sub>1</sub>-BC<sub>3</sub>)、脱硫石膏(DG<sub>1</sub>-DG<sub>3</sub>)、鸡粪(CM<sub>1</sub>-CM<sub>3</sub>)和对照(CK), 分析滨海盐渍土理化性质、盐分离子以及玉米生长的响应特征。[结果] ①不同改良剂均在一定程度上改善了土壤理化性质、盐分离子含量与组成, 脱硫石膏的添加能更有效地改善盐渍土的核心理化性质, 显著降低了土壤 pH 值与电导率。其中, 中等水平脱硫石膏(DG<sub>2</sub>)对土壤盐分离子的改良效果最优, 显著降低了 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>含量与 SAR(钠吸附比), 同时促进了 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的积累, 但对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>影响较小。②脱硫石膏添加对玉米生长的促进效果优于生物炭与鸡粪添加处理。在中等水平脱硫石膏(DG<sub>2</sub>)处理下, 玉米产量为 2 a 间所有处理的最高值, 分别为 2.337 t/hm<sup>2</sup>和 2.190 t/hm<sup>2</sup>。[结论] 不同水平改良剂中, 中等水平脱硫石膏(5 t/hm<sup>2</sup>)(DG<sub>2</sub>)对于滨海盐渍土脱盐效果、提升玉米产量效果最优, 在滨海盐渍土改良时可优先考虑。

**关键词:** 滨海盐渍土; 改良剂; 土壤理化性质; 盐分离子; 玉米

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0100-11

中图分类号: S151.9, S156

**文献参数:** 王涛, 李建国, 路迅, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土盐分离子及玉米生长的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 100-110. Wang Tao, Li Jianguo, Lu Xun, et al. Influence of different amendments on salt ions and maize growth in coastal saline soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 100-110.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.009

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.009

## Influence of different amendments on salt ions and maize growth in coastal saline soil

Wang Tao, Li Jianguo, Lu Xun, Xu Lu

(School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic variations in salt ions in coastal saline soil and the differences in maize growth indicators after the addition of different amendments were analyzed in order to provide scientific basis for the further refinement of management measures for desalination and amelioration of coastal saline soil. [Methods] A field-controlled experiment was conducted in the Dafeng coastal reclamation area of Yancheng City, with maize (Liyu 88) as the aboveground crop. A total of ten treatments were set up: control (CK), and compound fertilizer combined with low (1), medium (2), and high (3) levels of biochar (BC<sub>1</sub>-BC<sub>3</sub>), desulfurized gypsum (DG<sub>1</sub>-DG<sub>3</sub>), and chicken manure (CM<sub>1</sub>-CM<sub>3</sub>). The response characteristics of the physicochemical properties and salt ions of coastal saline soil, as well as maize growth, were analyzed. [Results] ① All amendments improved the soil physicochemical properties, salt ion contents, and ion composition to some extent. However, the addition of desulfurized gypsum was more effective in improving the core physicochemical properties of coastal saline soil, significantly reducing soil pH value and electrical conductivity (EC). The medium level of desulfurized gypsum

收稿日期: 2025-08-18

修回日期: 2025-10-27

采用日期: 2025-11-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“滨海地区种-养系统的碳排放及其补偿效应研究”(42271287), “基于土壤微阴影补偿的滨海农田盐渍化无人机遥感研究”(42371053); 江苏省碳达峰与碳中和技术创新专项资金(BE2023855); 江苏师范大学研究生科研与实践创新计划项目(2024XKT0074)

第一作者: 王涛(2001—), 男(汉族), 江苏省南京市人, 硕士研究生, 研究方向为滨海盐渍土改良。Email: 851434626@qq.com。

通信作者: 李建国(1986—), 男(汉族), 江苏省宿迁市人, 博士, 副教授, 主要从事滨海盐渍土改良研究。Email: lijianguo531@126.com。

(DG<sub>2</sub>) was most effective in ameliorating soil salt ions, significantly reducing the contents of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> and the sodium adsorption ratio (SAR). Additionally, this treatment promoted the accumulation of K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, but had little influence on NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. ② The promoting effect of maize growth by desulfurized gypsum addition was superior to that of biochar and chicken manure. Notably, the medium level of desulfurized gypsum (DG<sub>2</sub>) treatment resulted in the highest maize yield among all treatments over the two years, reaching 2.337 t/hm<sup>2</sup> and 2.190 t/hm<sup>2</sup>, respectively. [Conclusion] Among the different amendment levels tested, the medium-level addition of desulfurization gypsum (5 t/hm<sup>2</sup>) (DG<sub>2</sub>) is the most effective for enhancing soil desalination and increasing maize yield in coastal saline soil, and can be prioritized for the soil amelioration.

**Keywords: coastal saline soil; amendments; soil physicochemical properties; salt ions; maize**

长期以来,土壤盐渍化是限制农业发展的关键因素,对土壤健康、作物生长及农业可持续发展构成了严重威胁<sup>[1]</sup>。滨海地区在成陆过程中受到海水浸渍的影响,土壤普遍具有含盐量高、物理结构差和肥力低等特点<sup>[2]</sup>,是中国重要的盐渍化发生区。因此,快速降低土壤盐分、改善土壤理化性质是这一地区实现作物增产与农业开发的前提和基础。当前,治理滨海盐渍土的方法包括物理排盐、优化灌溉方式以及添加改良剂等<sup>[3]</sup>。因操作简便、成本低廉与效果显著等优势,添加改良剂已成为滨海地区农户改良盐渍化土壤的常用手段之一。

大量研究证实,添加改良剂对于滨海盐渍土的脱盐、增产具有良好的应用效果。例如,生物炭具有多孔结构,施用后可以改善盐渍土理化性质,提升土壤持水能力,从而缓解盐碱胁迫,实现作物增产<sup>[4]</sup>。Zhang Peng等<sup>[5]</sup>制备了一种新型生物炭(BPBC),发现其能通过酸碱中和反应显著降低盐渍土的电导率与含盐量,同时提升土壤养分水平,优化土壤微生物群落结构,进而促进玉米的萌发与生长。王莹等<sup>[6]</sup>采用两种生物炭(污泥水热炭、稻壳热解炭)对黄河三角洲的盐渍土进行改良,结果表明两种生物炭在改良土壤理化性质方面各有侧重,但都促进了植物的生长。此外,无机改良剂(硅酸钙、硫酸镁、石膏等)的施用可以有效减少Na<sup>+</sup>,Cl<sup>-</sup>等离子在土壤中的积累,其机理为无机改良剂中的Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>等离子将Na<sup>+</sup>置换出来,减少了Na<sup>+</sup>对盐渍化土壤的危害<sup>[7]</sup>。石婧等<sup>[8]</sup>与姜展博等<sup>[9]</sup>发现,施用脱硫石膏可以显著降低土壤pH值、交换性钠百分率以及盐基离子含量,同时增加土壤孔隙度,进而提升作物的产量。而有机改良剂的添加不仅能降低土壤盐分,还能提升土壤孔隙度、有机质含量以及微生物多样性,具有多重效益<sup>[10]</sup>。彭佳等<sup>[11]</sup>的研究表明,施用有机肥能显著改善盐渍土的养分状况与盐渍化程度,并有效降低作物患病率。其中,添加水平为15 t/hm<sup>2</sup>时,改良效果最为显著。综合而言,不同类型的改良剂在盐

渍土改良中各具优势,不仅展现出良好的应用前景,也为后续深入开展盐渍土改良研究提供了基础。

基于此,本研究通过连续2 a的定位观测对比试验,结合低、中、高3个添加水平,同时考虑农户施用复合肥的特点与习惯,分析了生物炭、脱硫石膏、鸡粪与复合肥配施对滨海盐渍土盐分离离子及玉米生长的影响,旨在揭示不同改良剂添加后滨海盐渍土盐分离离子的动态变化过程以及玉米生长指标的差异,为制定精细化滨海地区盐渍土脱盐改良管理措施提供信息和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于江苏省盐城市大丰区,地处黄海之滨,是中国典型的滨海盐渍土分布区,年平均气温14.4℃,年降水量1 066.7 mm,年日照时数2 214.4 h。试验田土壤属于中度砂质盐渍土,位于围垦45 a左右的垦区。研究区土壤容重1.33~1.51 g/cm<sup>3</sup>,电导率1 547~5 340 μS/cm, pH值8.15~8.73,有机碳含量5.70~6.81 g/kg,全氮含量0.82~0.97 g/kg。

### 1.2 试验设计

试验设对照(CK)以及生物炭(BC)、脱硫石膏(DG)与鸡粪(CM)3个改良剂添加类型,每个类型设低、中、高3个添加水平,共计10个试验小区,每个小区面积24 m<sup>2</sup>(4 m×6 m),中间用深沟隔离。参照当地农户的长期施肥量以及前人研究<sup>[12-14]</sup>,确定各改良剂添加水平(表1)。

复合肥(氮磷钾肥)总养分≥45%,N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O含量百分比为15-15-15。生物炭原料为玉米秸秆,采购自河南星源环保材料有限公司,在400~600℃高温下经6~8 h热解炭化成黑色粉末状;脱硫石膏主要成分为二水硫酸钙CaSO<sub>4</sub>·2 H<sub>2</sub>O,采购自河北友盛耐火材料公司。鸡粪有机肥来自当地农户自养的家禽,在播种前进行充分的沤肥、晒干处理。改良剂部分理化性质如表2所示。试验小区内选择玉米(蠡玉

88)作为试验观测对象,种植方式为穴播,植株行距60 cm,株距25 cm,每穴播种2粒种子,约20 d间苗,每穴保留1株玉米。改良剂在播种前一次性撒入试验小区并与土壤充分混匀。并定期除草以保证试验结果的准确性。

表1 试验设计与改良剂添加水平  
Table 1 Experimental design and addition levels of amendments

试验设计	改良剂/(t·hm <sup>-2</sup> )			复合肥/(t·hm <sup>-2</sup> )
	低水平 (1)	中水平 (2)	高水平 (3)	氮磷钾肥
对照(CK)	0	0	0	0
生物炭(BC)	3	10	15	0.6
脱硫石膏(DG)	3	5	15	0.6
鸡粪(CM)	3	10	15	0.6

表2 不同改良剂的理化性质  
Table 2 Physicochemical properties of different amendments

改良剂	EC/ (μS·cm <sup>-1</sup> )	pH值	TOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )
生物炭(BC)	786.00	9.65	156.27	168.37
脱硫石膏(DG)	4 583.33	7.39	4.23	0.15
鸡粪(CM)	8 533.33	7.49	109.35	88.76

### 1.3 采样与测定

土壤样品的采集时间为2022年玉米的播种期(5月29日)、成熟期(9月10日),2023年玉米的播种期(4月9日)、成熟期(9月10日)。每个试验小区每次随机采集3个表层土壤样品(0—20 cm),所有土样带回后进行自然风干,去除植物残体等部分杂质后过2 mm及0.149 mm筛孔并装入密封袋备用。2 mm土样用于制备水土比5:1的浸提液,后用离子色谱仪测定K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,Cl<sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的含量,用电导率仪测定电导率,用pH计测定pH值。土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量用0.149 mm土样结合元素分析仪测定。土壤容重采用环刀法测定。玉米性状指标与产量于成熟期进行测定,株高为每个试验小区随机选取的3株玉米株高的平均值;地上生物量为每个试验小区随机采集的3株玉米植株充分晾晒后称重,并取平均值得到的单株生物量;玉米产量为对应试验小区内所有玉米果实脱粒后,称重,得到单位面积产量。其中,钠吸附比的计算公式为

$$SAR = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{1}{2}(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}})}} \quad (1)$$

式中:SAR为钠吸附比(mmol/L)<sup>0.5</sup>;C<sub>Na<sup>+</sup></sub>,C<sub>Ca<sup>2+</sup></sub>,C<sub>Mg<sup>2+</sup></sub>分别为浸提液中Na<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>的浓度(mmol/L)。

### 1.4 数据处理

采用Excel 2016进行数据初步处理与分析;使用SPSS 27进行不同处理间数据差异显著性分析(Duncan多重比较法);使用Origin 2024软件绘制图形;应用R软件进行Mantel分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同改良剂添加下土壤理化性质变化特征

改良剂添加对土壤容重(BD)含量的影响较小(图1a,1b),但经过2 a改良后,BD在各水平鸡粪处理下较CK显著降低;改良剂添加对pH影响不同(图1c,1d),高水平脱硫石膏处理(DG<sub>3</sub>)对于降低土壤pH值效果较为显著。不同水平的改良剂添加对电导率(EC)的影响大致体现为低水平的改良剂降低土壤EC效果较优,较高水平的改良剂会促进EC的升高(图1e,1f)。如2022年成熟期,EC在低水平生物炭处理(BC<sub>1</sub>)下均值为2 100 μS/cm,较CK下降了54.8%,而高水平鸡粪处理(CM<sub>3</sub>)下均值为5 456 μS/cm,较CK上升了17.4%。综合3种不同改良剂,降低EC效果表现为:生物炭>脱硫石膏>鸡粪。

改良剂对SOC含量的影响在玉米成熟期达到显著水平(图2a,2b)。2022年成熟期低水平脱硫石膏处理(DG<sub>1</sub>)与2023年成熟期低水平生物炭处理(BC<sub>1</sub>)下,SOC较CK显著升高,分别达到8.31 g/kg和9.3 g/kg。改良剂添加对TN含量影响不显著或有负向影响(图2c,2d)。其中,2022年播种期低水平脱硫石膏处理(DG<sub>1</sub>)下TN含量最低,均值为0.67 g/kg,较CK下降25.2%;2023年种植期各处理间TN差异并不显著。改良剂添加对C/N的影响在玉米成熟期时与CK达到显著水平(图2e,2f)。3种改良剂对提升C/N的效果表现为:生物炭>脱硫石膏>鸡粪。

### 2.2 不同改良剂对土壤盐离子及SAR的影响

不同改良剂对土壤Na<sup>+</sup>含量的影响差异显著( $p < 0.05$ )(图3a,3b)。其中,低水平脱硫石膏处理(DG<sub>1</sub>)对Na<sup>+</sup>含量的降低作用最为显著,基本为同时期最低值,如2023年播种期其均值为611.89 mg/kg,BC<sub>1</sub>,DG<sub>2</sub>处理次之。

高水平鸡粪处理(CM<sub>3</sub>)下,Na<sup>+</sup>含量表现出一定的上升趋势,但与CK差异不显著;改良剂添加对土

壤 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 含量的影响总体表现为中低水平的改良剂促进离子含量的降低,而高水平反之(图3c—3f),但与CK差异不显著( $p>0.05$ );高水平脱硫石膏添加

( $DG_3$ )显著( $p<0.05$ )提高了土壤 $Ca^{2+}$ 含量(图3g, 3h),2 a内其值均在950 mg/kg以上。其余处理与CK差异不显著( $p>0.05$ )。

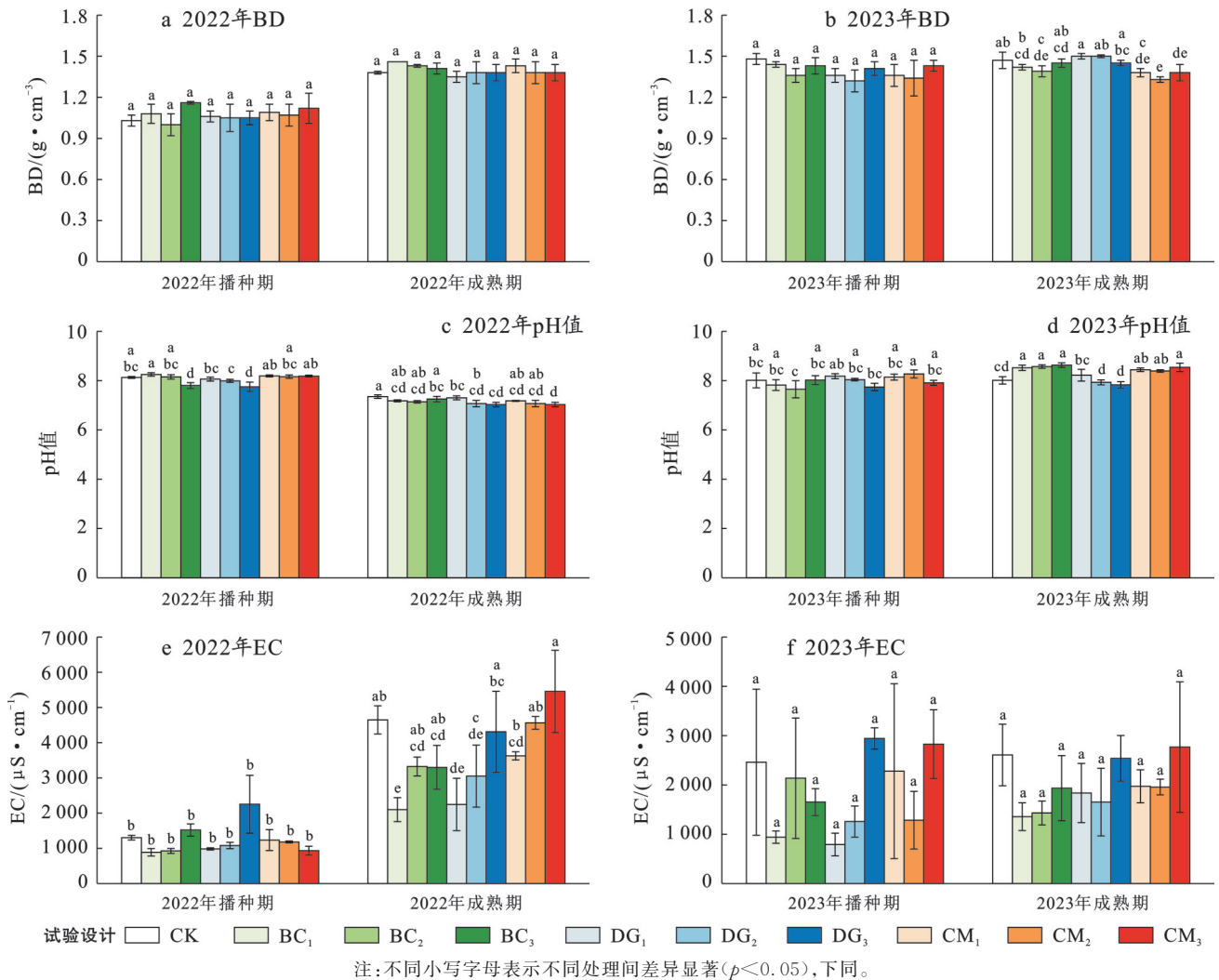


图1 不同改良剂添加对土壤容重(BD), pH值与电导率(EC)的影响

Fig.1 Influence of different amendments on soil bulk density (BD), pH value and electrical conductivity (EC)

中低水平的改良剂对 $Cl^-$ 含量降低效果明显(图4a, 4b)。其中,中低水平脱硫石膏处理对土壤 $Cl^-$ 含量降低效果最好,在2023年播种期,低水平脱硫石膏处理( $DG_1$ )的土壤 $Cl^-$ 含量为整个生长周期内的最低值(495.72 mg/kg)。改良剂对土壤 $NO_3^-$ 含量具有提升作用(图4c, 4d),其中高水平鸡粪处理( $CM_3$ )较CK上升效果最为显著,在所有时期(除2022播种期)均为最高值。高水平的脱硫石膏处理( $DG_3$ )显著提高了 $SO_4^{2-}$ 含量,部分时期 $SO_4^{2-}$ 含量超过5 000 mg/kg,表现出最强的促进效应(图4e, 4f)。

SAR值在脱硫石膏处理下较CK下降最为显著(图5a, 5b)。2023年玉米成熟期,在中等水平脱硫石膏处理( $DG_2$ )下的均值为 $4.18(\text{mmol/L})^{0.5}$ ,较CK降

低78.55%,是改良期间降幅最大的处理组。此外,SAR在高水平生物炭与鸡粪处理下较CK降低趋势不显著或有小幅上升趋势,且这一趋势随着改良时间的延长愈加明显。

### 2.3 不同改良剂对玉米生长性状的影响

在玉米成熟期,株高在脱硫石膏添加处理下的响应最为明显(图6a, 6b),其中,中等水平脱硫石膏处理( $DG_2$ )较CK显著升高,2 a株高均值分别为183 cm和166 cm。玉米生物量在生物炭处理(BC)与脱硫石膏处理(DG)中变化较大。2022年,中等水平生物炭( $BC_2$ )与低水平脱硫石膏( $DG_1$ )处理下的生物量较高,均值分别为135.37 g和129.17 g;2023年,中等水平脱硫石膏( $DG_2$ )与高水平脱硫石膏( $DG_3$ )处理

下的生物量较高,均值分别为 101.79 g 和 99.34 g (图 6c,6d)。改良剂的添加均提升了玉米产量(图 7a, 7b)。2022 年,中等水平脱硫石膏处理(DG<sub>2</sub>)相较于 CK 产量提升最为明显,产量为 2.337 t/hm<sup>2</sup>,是 CK 的 9.16 倍,其次为中等水平生物炭(BC<sub>2</sub>)、低水平生物炭

(BC<sub>1</sub>)。鸡粪处理(CM)对于产量提升的效果相对较弱。2023 年,中等水平脱硫石膏处理(DG<sub>2</sub>)表现最佳,产量为 2.190 t/hm<sup>2</sup>,是 CK 的 8.82 倍,其次为低水平脱硫石膏(DG<sub>1</sub>)、高水平脱硫石膏(DG<sub>3</sub>)处理。各水平的生物炭处理对产量提升的效果相对较弱。

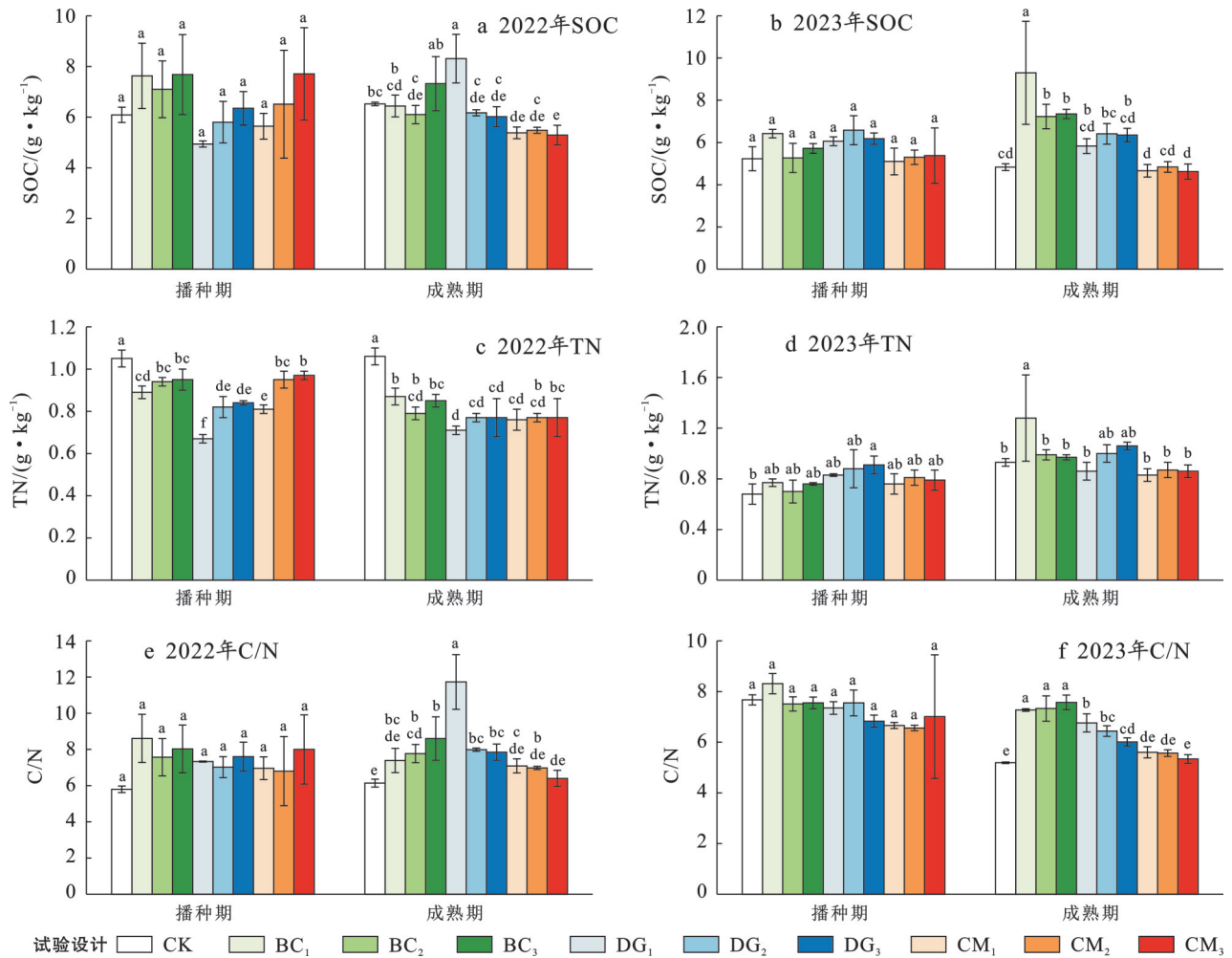


图 2 不同改良剂添加对土壤 SOC, TN 及 C/N 的影响

Fig.2 Influence of different amendments on soil SOC, TN and C/N

## 2.4 盐渍土性质变化与玉米生长性状相关性分析

Mantel 分析结果表明,玉米生长性状指标与部分土壤理化性质、盐离子指标相关性较强(图 8)。其中,EC 与除 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>外的所有离子呈显著正相关,与 pH 值呈显著负相关;SAR 与 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>相关性较强;pH 值与所有盐离子呈负相关;BD 与除 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>外的所有离子呈负相关,与 TN 呈正相关;SOC 与 TN 与盐离子呈负相关;C/N 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>呈显著正相关;盐离子之间总体呈显著正相关性。株高与 SAR, pH 值, BD, C/N 显著相关 (Mantel's  $p < 0.05$ ), 生物量与 pH 和 C/N 显著相关 (Mantel's  $p < 0.05$ ), 产量与 SAR 和 BD 显著相关 (Mantel's  $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 不同改良剂添加对土壤理化性质和盐离子的影响

本研究中,随着改良剂施用量增加,各盐离子与 EC 总体呈现同步上升趋势。这可能是由于大量施用改良剂形成的较厚土表覆盖层阻碍了土壤水分的渗透和蒸发,并改变了土壤结构和通气性,从而导致 EC 增大。

此外,改良剂本身所携带的外源物质(鸡粪中较高的可溶性盐分和养分、脱硫石膏中的 Ca<sup>2+</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等)在高施用量下容易引起土壤盐分累积,导致土壤 EC 升高。

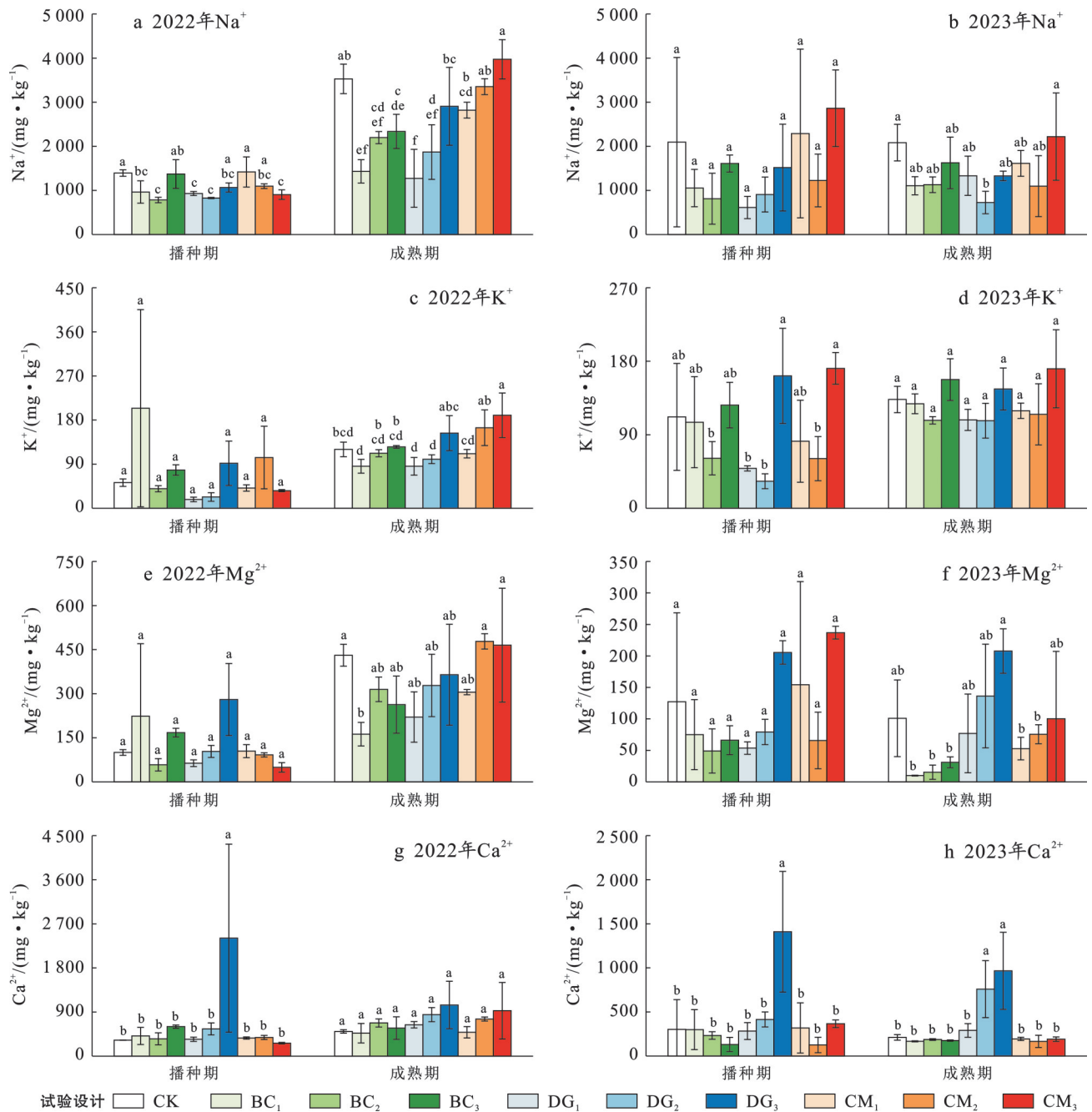


图 3 添加不同改良剂对土壤阳离子含量的影响

Fig.3 Influences of different amendments on soil cation content

添加生物炭对土壤 pH 值的影响在不同阶段表现出不同的变化趋势。施用初期,生物炭可能促进了有机质的快速分解,导致 pH 值下降。随着施用量的增加,后期 pH 值会由于生物炭本身的高稳定性与碱性<sup>[15]</sup>而有所回升。EC 在生物炭施用下较 CK 总体呈降低趋势,这主要归因于生物炭较大的孔隙度和比表面积,促进了土壤水分的渗透<sup>[4]</sup>,减少了土壤表面的蒸发。生物炭的施用可直接提高 SOC 含量,机制在于其本身含有大量稳定的碳源,这与张进红等<sup>[16]</sup>的研究结果相似。在不同水平生物炭处理下,土壤 TN 含

量较 CK 减小,主要是因为生物炭对氮素具有吸附能力,可能导致短期内根区土壤 TN 下降<sup>[17]</sup>,且盐渍土的高盐分促进了土壤中铵态氮的硝化,加速了氮素的挥发<sup>[18]</sup>,这也是其他改良剂添加下 TN 下降的主要原因。而由于土壤中的碳含量相对增加且氮含量相对减少,导致土壤 C/N 增加。以往的研究表明,生物炭能显著降低盐渍土中部分盐分离子(尤其是 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>)的含量<sup>[19-20]</sup>,本研究结果与之相符。生物炭的施用增强了土壤的吸附及离子交换能力,有利于 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>的固定与快速淋滤,同时改善了作物生长

与根系活力,增强了对土壤中Na<sup>+</sup>的吸收。生物炭的施用对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>表现为一定的促进作用,可能是由于生

物炭通过影响矿化速率、减少反硝化或改变淋洗损失等途径,在短期内提高了土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量。

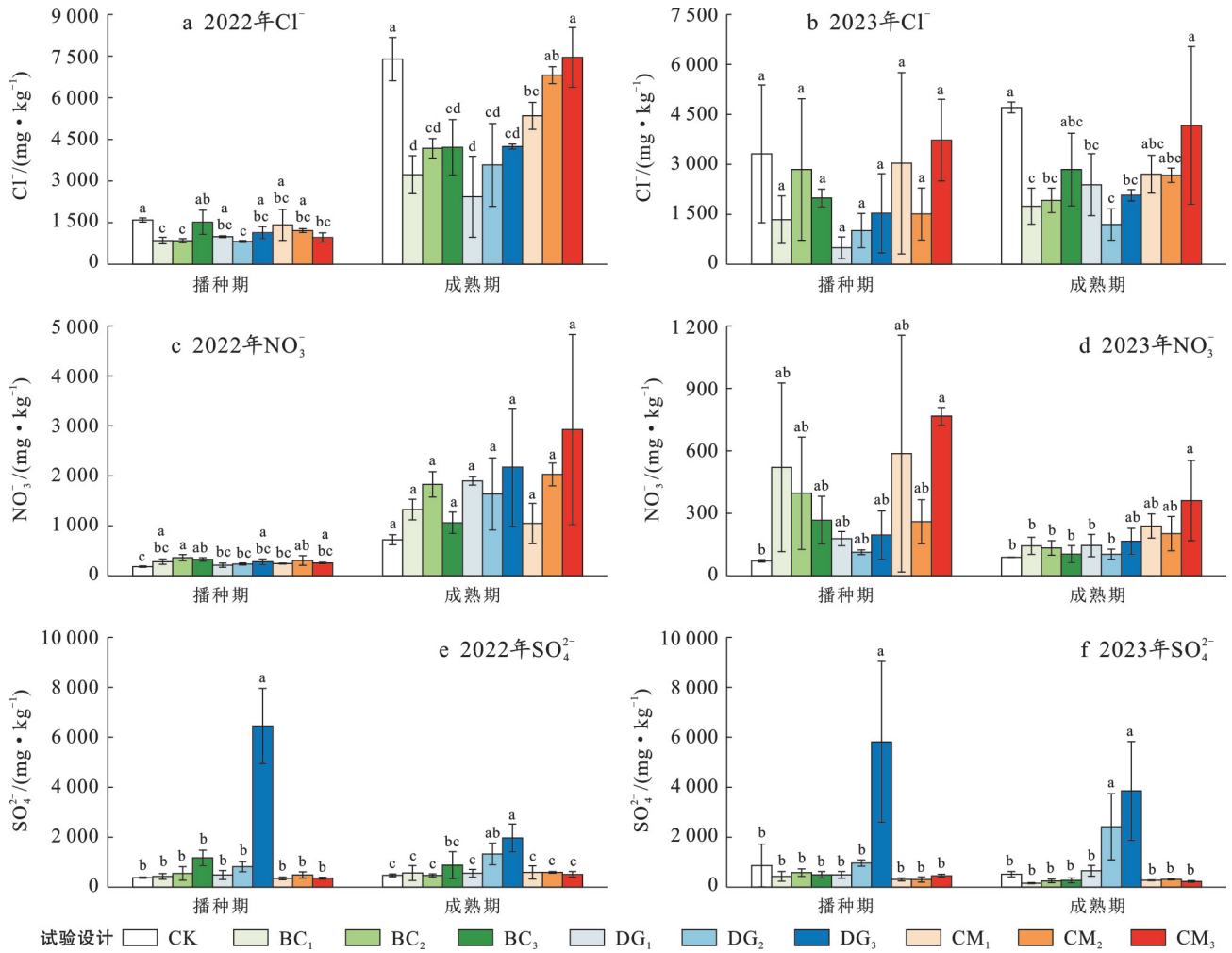


图4 添加不同改良剂对土壤阴离子含量的影响

Fig.4 Influence of different amendments on soil anions content

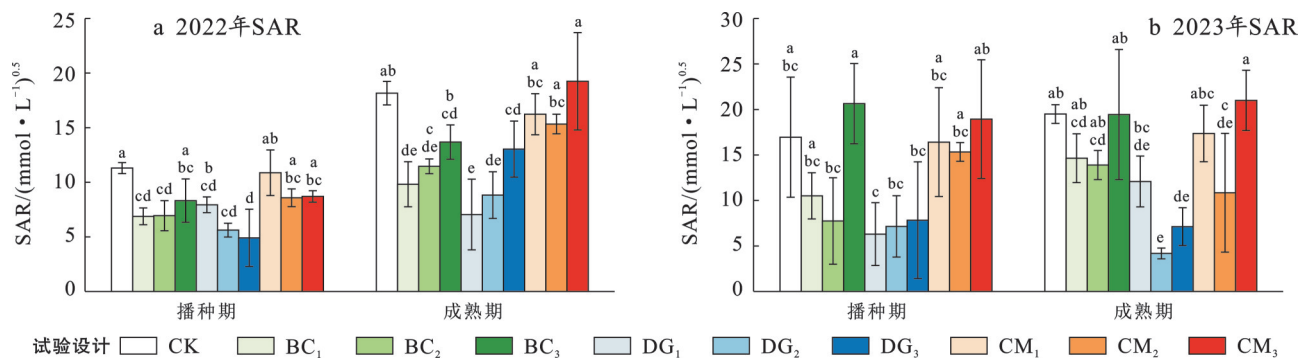


图5 添加不同改良剂对土壤钠吸附比(SAR)的影响

Fig.5 Influence of different amendments on soil sodium adsorption ratio (SAR)

脱硫石膏在改良土壤理化性质及盐分离子方面的总体效果明显优于生物炭和鸡粪,但其主要改良的是土壤的化学性质而非物理性质,因此各水平脱硫石膏的施用对土壤BD影响较小,而对降低pH值,EC与SAR的作用明显。

脱硫石膏施用后,大量Ca<sup>2+</sup>将土壤中的Na<sup>+</sup>置换形成Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>等中性盐,从而降低了pH值<sup>[7]</sup>,Na<sup>+</sup>随着Ca<sup>2+</sup>的置换而减小,EC和SAR也随之降低。同时,植物生长增加了地表有机质的输入,而Ca<sup>2+</sup>与土壤有机质发生反应<sup>[7]</sup>,有利于SOC的固定,这也是

SOC 和 C/N 在脱硫石膏的添加下增加的主要影响因素。研究表明<sup>[21]</sup>, 脱硫石膏能显著降低土壤 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>

含量, 增加 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等离子含量, 本研究也得出类似的结论。

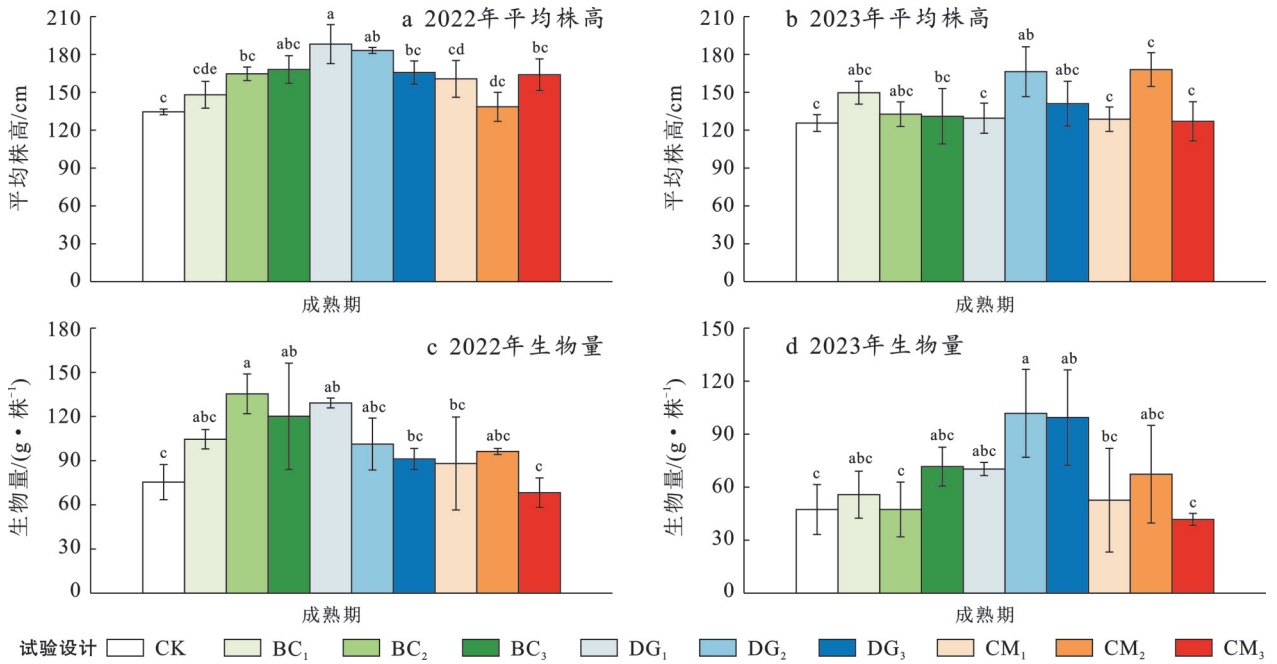


图 6 添加不同改良剂对植株高度及地上生物量的影响  
Fig.6 Influence of different amendments on plant height and aboveground biomass

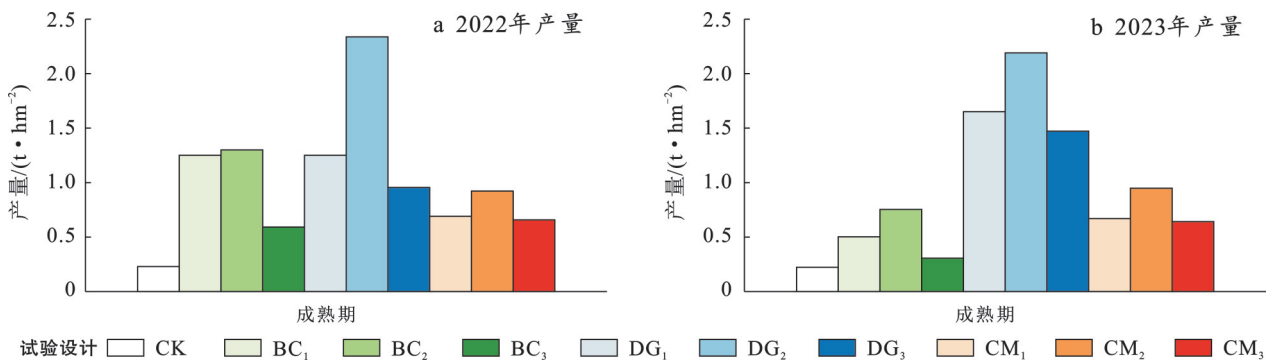


图 7 添加不同改良剂对植株产量的影响  
Fig.7 Influence of different amendments on maize yield

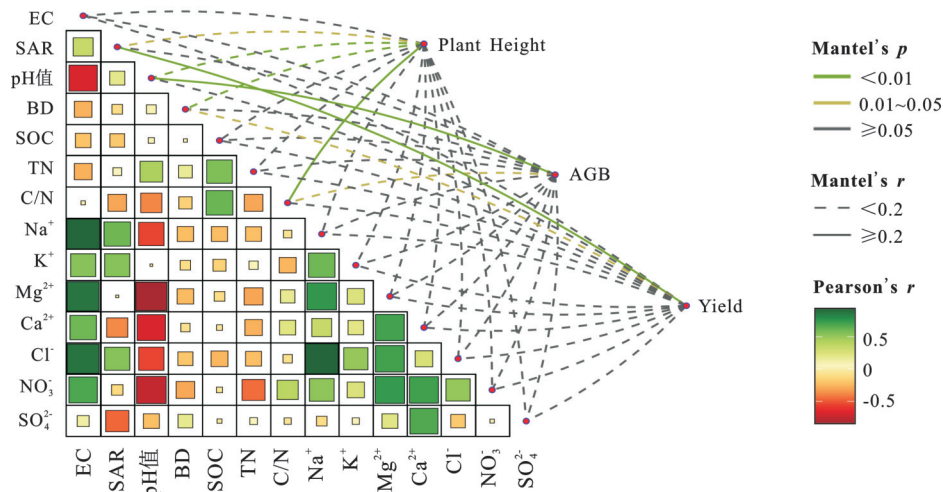


图 8 盐渍土性质与玉米植株性状 Mantel 分析  
Fig.8 Mantel analysis of properties of saline soil and traits of maize plants

中低水平鸡粪添加对降低土壤 EC 具有一定的作用,主要是因为鸡粪中丰富的有机物质在土壤中分解产生大量的有机酸,这些有机酸可有效促进土壤中盐分的淋洗,从而降低 EC。充分发酵后的鸡粪呈现弱碱性,因此在鸡粪处理下 pH 值随改良时间推进总体较 CK 呈上升趋势,与汪吉东等<sup>[22]</sup>的结论类似。改良初期,鸡粪处理对于提升 SOC 具有一定优势,但随着改良时间延长,其效果逐渐弱于生物炭,原因可能是鸡粪中有机质以易分解的活性有机碳为主,分解速度较快,而生物炭结构稳定,在中长期的改良过程中表现出更显著的 SOC 提升效果。鸡粪处理虽然对土壤中  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  含量降低具有一定作用,但由于其本身含有一定量的  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ <sup>[23]</sup>, 导致施用效果不及生物炭或脱硫石膏。此外,作为热性肥料<sup>[24]</sup>, 鸡粪可为土壤提供丰富的有机氮和钾元素,因此  $\text{K}^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的增加趋势更为显著。

Mantel 分析表明, EC 与大部分盐分离子呈显著正相关,尤其是  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ 。高浓度的  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  会抑制土壤微生物活性、减少植物残体的输入,而微生物是土壤有机质分解和转化的主要驱动力,其活性下降可能导致 SOC 积累减少,这在以往大多数研究中得到印证<sup>[25-26]</sup>。因此,滨海盐渍土改良主要目标之一是降低土壤中  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量。SAR 与  $\text{Ca}^{2+}$  呈显著负相关,主要是由于土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^+$  存在拮抗关系<sup>[27]</sup>。在盐渍土改良过程中,适当增加  $\text{Ca}^{2+}$  含量有助于改善土壤结构,减少  $\text{Na}^+$  的不利影响。土壤 pH 值是反映土壤酸碱状态的重要指标,本研究中,除  $\text{K}^+$  外, pH 值与其他盐分离子均呈显著负相关,这与王丽娜等<sup>[28]</sup>的研究略有差异。pH 值与阳离子中的  $\text{Mg}^{2+}$ 、阴离子中的  $\text{NO}_3^-$  呈极显著负相关,这可能是由于土壤 pH 的升高导致  $\text{Mg}^{2+}$  以难溶形式存在,降低了其有效性和作物吸收量,从而导致负相关;在较高碱性土壤中,微生物活性的变化可能会抑制氮素的转化过程,尤其是硝化作用,因此 pH 值与  $\text{NO}_3^-$  呈显著负相关。

### 3.2 不同改良剂添加对玉米生长的影响

盐渍土改良的最终目的是实现作物增产,因此作物的生长状况是评估改良效果的重要指标。研究结果表明,不同改良剂的添加均促进了玉米生长。生物炭在改良第 2 年对于提升株高和生物量的效果弱于第 1 年,可能是生物炭的积累导致 pH 值升高,影响了作物对养分的吸收, Mantel 分析中株高、生物量与 pH 的显著相关也证实了这一点。脱硫石膏的施用效果总体优于生物炭与鸡粪。一方面,其对降低土壤 SAR 效果更显著,缓解了土壤碱化对玉米根系生长的抑制作用,促进了根系对水分和养分的吸收。

另一方面,  $\text{Ca}^{2+}$  是玉米植株细胞壁的重要组成部分,其含量增多有利于增强细胞壁的稳定性,从而影响了玉米茎秆的生长以及地上生物的总质量,这一点在付尧<sup>[29]</sup>的研究中也得以印证。改良剂的施用均提升了玉米的产量,这在以往的研究中得以证明<sup>[30]</sup>。生物炭主要通过改善土壤物理性质(容重等)促进根系下扎和水分控制、缓解土壤盐结皮和板结状况,从而提升作物产量。脱硫石膏与鸡粪能够改善土壤的离子组成与养分输送状况,具体而言,脱硫石膏施用后显著降低了土壤中  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  含量和 pH 值,并通过输入  $\text{Ca}^{2+}$  降低 SAR,缓解盐分胁迫与土壤碱化;鸡粪施用则通过增加有机质,直接为作物提供了养分,提高了玉米产量。

## 4 结论

(1) 不同水平的生物炭、脱硫石膏和鸡粪添加均在一定程度上改善了土壤的理化性质,但不同的改良剂与不同施加水平的影响效果存在差异。生物炭的添加对土壤 SOC, C/N 的增加以及 BD 与 EC 降低效果较优,且持续性较好。脱硫石膏能显著降低土壤 pH 值, EC, SAR,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , 并提高  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  以及其他离子的含量,较为全面地改善了盐渍土的核心指标。鸡粪添加对土壤  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$  增加以及 BD 降低有一定作用。此外,随着改良剂施用水平的增加,土壤各盐分离子浓度与 EC 也基本呈增加趋势。

(2) 不同改良剂均提升了玉米株高、生物量以及产量,其中脱硫石膏的施用效果最优,生物炭次之。综合 3 种不同水平的改良剂,中等水平脱硫石膏( $5 \text{ t}/\text{hm}^2$ )对滨海地区盐渍土脱盐以及作物增产效果最佳。

### 参考文献 (References)

- [1] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.  
Li Jianguo, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [2] 周佳逸, 宁琪, 李祥, 等. 不同有机物料施用对滨海盐渍土降盐培肥及大豆促生抗逆的影响[J]. 土壤, 2025, 57(3): 612-620.  
Zhou Jiayi, Ning Qi, Li Xiang, et al. Effects of different organic materials on salinity, fertility and soybean growth in coastal saline soil [J]. Soils, 2025, 57(3): 612-620.
- [3] 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): 10-27.  
Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Wang Xiangping, et al.

- Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1):10-27.
- [4] Drake J A, Cavagnaro T R, Cunningham S C, et al. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(1):52-59.
- [5] Zhang Peng, Bing Xue, Jiao Le, et al. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431:133904.
- [6] 王莹,曹世伟,朱义,等.2种生物炭施用对滨海盐渍土土壤及植物影响的对比分析[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(9):2556-2566.
- Wang Ying, Cao Shiwei, Zhu Yi, et al. Comparative analysis of the effects of two types of biochar application on coastal saline soil and plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(9):2556-2566.
- [7] 赵惠丽,于金艺,刘涛,等.秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质[J]. *环境科学*, 2023, 44(7):4119-4129.
- Zhao Huili, Yu Jinyi, Liu Tao, et al. Application of desulphurized gypsum with straw to improve physico-chemical properties of saline-alkali land in Yellow River delta [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(7):4119-4129.
- [8] 石婧,黄超,刘娟,等.脱硫石膏不同施用量对新疆盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(6):1800-1807.
- Shi Jing, Huang Chao, Liu Juan, et al. Effects of different application amount of flue gas desulfurization gypsum on amelioration of saline-alkali soil and crop yield in Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(6):1800-1807.
- [9] 姜展博,宁松瑞,王全九.脱硫石膏改良盐碱土壤综合评价研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(3):699-713.
- Jiang Zhanbo, Ning Songrui, Wang Quanjiu. A comprehensive evaluation of the effect of desulfurized gypsum for improving saline-alkali soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(3):699-713.
- [10] 黄婷,李媛,甘泉峰,等.生物基复合改良剂对滨海盐渍土综合地力的提升作用[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4):99-106.
- Huang Ting, Li Yuan, Gan Quanfeng, et al. Effects of bio-based compound amendments on overall soil fertility of coastal saline soils [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4):99-106.
- [11] 彭佳,汤俊瑜,王豪吉,等.不同生物有机肥改良次生盐渍化土壤及对洋桔梗生长的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2025(2):128-135.
- Peng Jia, Tang Junyu, Wang Haoji, et al. Effects of different bio-fertilizers on the improvement of secondary salinized soil and the growth of *Eustoma grandiflorum* [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2025(2):128-135.
- [12] Zhu Hai, Yang Jingsong, Yao Rongjiang, et al. Interactive effects of soil amendments (biochar and gypsum) and salinity on ammonia volatilization in coastal saline soil [J]. *Catena*, 2020, 190:104527.
- [13] 高婧,杨劲松,姚荣江,等.不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(3):524-529.
- Gao Jing, Yang Jinsong, Yao Rongjiang, et al. Effects of different soil amendments on properties and fertilizer utilization efficiency for coastal heavily-salinized soil [J]. *Soils*, 2019, 51(3):524-529.
- [14] 解雪峰,吴涛,沈洪运,等.滨海新围滩涂不同改良方式对土壤盐渍化调控效应及其主控因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2):340-347.
- Xie Xuefeng, Wu Tao, Shen Hongyun, et al. Regulatory effect of different amelioration methods on soil salinization and its main control factors in a newly reclaimed coastal tidal land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2):340-347.
- [15] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16):3324-3333.
- Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.
- [16] 张进红,吴波,王国良,等.生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(8):285-294.
- Zhang Jinhong, Wu Bo, Wang Guoliang, et al. Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8):285-294.
- [17] 钱婧,蔡青松,黄显怀,等.茶渣生物炭对茶园酸性土壤氮吸附-解吸特征及土壤酸性改良的影响[J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(5):922-932.
- Qian Jing, Cai Qingsong, Huang Xianhuai, et al. Effect of tea residue biochar on nitrogen adsorption-desorption characteristics and improvement of soil acidity of an acidic tea garden soil [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(5):922-932.
- [18] 梁飞,田长彦.土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氨挥发的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(14):3999-4006.

- Liang Fei, Tian Changyan. Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3999-4006.
- [19] He Kang, He Guo, Wang Congpeng, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline-alkali soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103674.
- [20] Sudratt N, Faiyue B. Biochar mitigates combined effects of soil salinity and saltwater intrusion on rice (*Oryza sativa* L.) by regulating ion uptake [J]. *Agronomy*, 2023, 13(3): 815.
- [21] 田荣荣, 王淑娟, 刘嘉, 等. 根区施用生物炭和脱硫石膏提高盐碱土壤质量及向日葵产量[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 148-157.
- Tian Rongrong, Wang Shujuan, Liu Jia, et al. Applying biochar and flue gas desulfurization gypsum in the root zone to improve saline-alkali soil quality and sunflower yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(5): 148-157.
- [22] 汪吉东, 张辉, 张永春, 等. 连续施用不同比例鸡粪氮对水稻土有机质积累及土壤酸化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1178-1185.
- Wang Jidong, Zhang Hui, Zhang Yongchun, et al. Effect of different ratios of chicken manure N on organic matter accumulation and acidification of paddy soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1178-1185.
- [23] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 等. 连续施用鸡粪与鸽粪土壤次生盐渍化风险研究[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 67-72.
- Yao Lixian, Li Guoliang, He Zhaohuan, et al. Risk potential of secondary soil salinization by repeated application of chicken and pigeon manure [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(5): 67-72.
- [24] 孟庆龙, 吴景贵, 李建明, 等. 长期施用畜禽粪对黑土有机无机复合体动态变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 277-283.
- Meng Qinglong, Wu Jinggui, Li Jianming, et al. Effects of long-term application of livestock and poultry manure on the dynamic changes of phaeozem organic-mineral complex [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 277-283.
- [25] Singh P, Sharma S, Nisar S, et al. Structural stability and organic matter stabilization in soils: Differential impacts of soil salinity and sodicity [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(2): 1751-1773.
- [26] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(3): 364-372.
- Dong Xinliang, Wang Jintao, Tian Liu, et al. Review of relationships between soil aggregates, microorganisms and soil organic matter in salt-affected soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(3): 364-372.
- [27] 吴洪生, 陈小青, 周晓冬, 等. 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1262-1266.
- Wu Hongsheng, Chen Xiaoqing, Zhou Xiaodong, et al. Effects of soil amendment phosphogypsum on physical and chemical properties of and wheat growth in coastal saline soil in Rudong, Jiangsu [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1262-1266.
- [28] 王丽娜, 张玉龙, 范庆锋, 等. 淋洗状态下保护地土壤 pH 与盐分含量及其组成关系的研究[J]. *节水灌溉*, 2009(6): 8-11.
- Wang Lina, Zhang Yulong, Fan Qingfeng, et al. Study on relationship between pH value of protected field soil and its salinity content and composition under leach condition [J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(6): 8-11.
- [29] 付娆. 不同改良措施对区域苏打盐碱土及玉米生长影响[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- Fu Rao. Effect of different improvement measures on regional soda saline soil and maize growth [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [30] 李旭霖, 刘庆花, 柳新伟, 等. 不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 219-224.
- Li Xulin, Liu Qinghua, Liu Xinwei, et al. Improving effect of different amendment treatments in coastal saline-alkali soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 219-224.