

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

聂朝阳^{1,2}, 杨帆¹, 王志春¹, 郭亮亮^{1,2},
安丰华¹, 刘建波^{1,2}, 张释心³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 吉林农业大学农学院, 吉林 长春 130102)

摘要:为探究耕作协同物料添加对苏打盐碱化耕地土壤障碍消减及作物产量的影响,采用大田试验,设置9个处理:对照(CK),深松+脱硫石膏(SG),深松+腐植酸(SF),深松+复合调理剂(ST),深松+复合调理剂+腐植酸(STF),粉垄+脱硫石膏(FG),粉垄+腐植酸(FF),粉垄+复合调理剂(FT),粉垄+复合调理剂+腐植酸(FTF),脱硫石膏、复合调理剂和腐植酸施用量分别为15 000、22 500 kg·hm⁻²和6 000 kg·hm⁻²。试验结果表明:与CK相比,在0~40 cm土层,耕作协同物料添加处理的土壤容重降低2.7%~18.4%,土壤总孔隙度增加3.8%~25.3%,土壤三相比得到改善。与CK相比,耕作协同物料添加降低了0~40 cm土层土壤pH、钠吸附比(SAR)和总碱度,降低幅度分别为6.8%~21.3%、20.7%~78.3%和17.1%~47.7%;在0~40 cm土层,耕作协同物料添加处理增加了土壤有机质含量,增加幅度为2.5%~63.9%。玉米穗行数、行粒数和理论产量较CK分别提高4.8%~10.1%、8.9%~22.0%和9.8%~37.6%。综合改良效果及作物增产效果分析,粉垄40 cm配施复合调理剂22 500 kg·hm⁻²和腐植酸6 000 kg·hm⁻²效果最佳。

关键词:耕作方式;物料;苏打盐碱化土壤;土壤理化性质;土壤养分;玉米产量要素

中图分类号:S156.4;S341.2 **文献标志码:**A

Effects of tillage synergistic material addition on physical and chemical properties of cultivated sodic-saline soil

NIE Zhaoyang^{1,2}, YANG Fan¹, WANG Zhichun¹, GUO Liangliang^{1,2},
AN Fenghua¹, LIU Jianbo^{1,2}, ZHANG Shixin³

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130102, China)

Abstract: To explore the effect of tillage synergistic materials addition on soil barrier reduction and crop yield in cultivated sodic-saline soil, a field experiment was used with nine treatments of control treatment (CK), subsoiling with desulfurization gypsum (SG), subsoiling with humic acid (SF), subsoiling with compound conditioner (ST), subsoiling with compound conditioner and humic acid (STF), fenglong with desulfurization gypsum treatment (FG), smash-ridging with humic acid (FF), smash-ridging with compound conditioner (FT), and smash-ridging with compound conditioner and humic acid treatment (FTF). The application rates of desulfurization gypsum, compound conditioner and humic acid were 15 000 kg·hm⁻², 22 500 kg·hm⁻² and 6 000 kg·hm⁻². The results showed that compared with CK, in the 0~40 cm, the soil bulk density of tillage synergistic materials addition treat-

收稿日期:2022-02-22

修回日期:2022-05-18

基金项目:中国科学院黑土地保护与利用科技创新工程专项资助(XDA28010403);国家自然科学基金项目(41971066);通辽市科左中旗苏打盐碱化耕地改良技术模式研究与监测评价(202076);中国科学院黑土区农业生态重点实验室开放基金项目(2020ZKHT-03);中国科学院关键人才项目

作者简介:聂朝阳(1996-),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为盐渍土改良与调控。E-mail: niezhaoyang@iga.ac.cn

通信作者:杨帆(1972-),女,吉林长春人,研究员,主要从事土壤盐碱化退化机制研究。E-mail: yangfan@iga.ac.cn

ment decreased by 2.7%~18.4%, soil total porosity increased by 3.8%~25.3%, and soil three phase ratio improved. Compared with CK, the addition of tillage synergistic materials reduced soil pH, sodium adsorption ratio (SAR) and total alkalinity in 0~40 cm soil layer by 6.8%~21.3%, 20.7%~78.3% and 17.1%~47.7%, respectively. In 0~40 cm soil layer, tillage synergistic materials addition increased soil organic matter by 2.5%~63.9%. Compared with CK, the row number per ear, grain number per row and theoretical yield of maize increased by 4.8%~10.1%, 8.9%~22.0% and 9.8%~37.6%, respectively. Comprehensive improvement effect and crop yield effect analysis indicated that the 40 cm smash-ridging with compound conditioner 22 500 kg·hm⁻² and humic acid 6 000 kg·hm⁻² had the best effect.

Keywords: tillage method; material; sodic-saline soil; physical and chemical properties of soil; soil nutrient; corn yield elements

西辽河平原分布约 1.6×10^5 hm² 盐渍土, 约占其总面积的 9.3%, 其中多为苏打盐碱化土壤^[1]。苏打盐碱化土壤由于土壤胶体吸附大量的交换性钠, 破坏了团粒结构的稳定性, 增加了土壤黏性, 使土壤孔隙阻塞、通气不畅, 好气微生物和酶活性降低, 种类减少, 导致养分转化过程受阻, 土壤养分有效性降低, 有机质匮乏, 进而影响了植物生长发育^[2-4]。此外苏打盐碱化土壤中存在大量 NaCO₃ 和 Na₂HCO₃, 植株受到盐分胁迫, 导致生理干旱, 影响植物正常生理功能^[5]。因此, 通过采取合适的措施改良苏打盐碱化土壤, 对研究区农业可持续发展具有重要意义。

针对盐碱化土壤改良和利用所面临的一系列问题, 国内外进行了大量的研究, 其核心方式主要为物理改良、化学改良、生物改良和工程措施^[6]。其中, 物理改良和化学改良因其操作简易和改良效果稳定, 在盐碱化土壤改良利用中具有广阔的前景。深松和粉垄是重要的土壤物理改良措施, 研究表明粉垄措施疏松了表层土壤, 降低了表层土壤容重, 同时切断土壤毛细管, 提高淋洗效果, 防止反盐作用, 对盐碱化土壤物理性质改善作用明显^[7]。深松可以松动犁底层, 增加土壤透气性和土壤水分, 提高土壤蓄水保水能力, 降低容重^[8-9]。深松和粉垄能够有效改善土壤物理性质, 利于耕层降碱脱盐, 但仅通过深松和粉垄措施降碱脱盐速率较低, 改良周期长, 且无法有效补充和提高土壤养分含量, 因此需要与化学改良相结合。腐植酸类物质和脱硫石膏在盐碱化土壤化学改良中应用广泛。腐植酸类物质作为一种构成土壤有机无机复合体的有机胶体物质和有机大分子物质^[10], 能够提高土壤养分含量, 促进土壤团聚体形成, 使土壤的保水保肥能力得到改善^[11]; 同时, 腐植酸类物质具有含氧酸性官能团, 如羧基、酚羟基和磺酸基等^[12], 拥有较强的阳离子交换性和缓冲能力, 能够提高土壤缓冲性能。脱硫石膏是

通过钙离子置换土壤胶体表面吸附的钠离子, 降低土壤的钠离子含量, 改善土壤盐碱障碍。

综上所述, 前人的研究已经证实, 使用化学措施和物理措施能够改善盐碱化土壤的理化性质, 提高作物产量, 但多以单一改良措施进行研究, 将物理和化学措施结合的综合改良盐碱化耕地土壤的研究较少。因此, 本文以苏打盐碱化耕地土壤为对象, 以腐植酸、复合调理剂、脱硫石膏为改良物料并结合深松和粉垄耕作措施, 研究其对苏打盐碱化耕地土壤理化性质的影响, 以期对西辽河平原苏打盐碱化耕地土壤改良和规模化利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2020 年在内蒙古通辽市科尔沁左翼中旗花吐古拉乡三家子村盐碱化耕地改良试点示范区 (43°49'18"N, 122°09'24"E) 进行, 该示范区位于西辽河平原东部, 海拔低, 地势平坦开阔, 属平原地貌; 气候为中温带大陆性季风气候, 冬季严寒, 夏季炎热, 气温日较差和年较差均较大, 全年最高气温 35.8℃, 最低气温 -25.1℃, 年均温 7℃, 降雨多集中在夏季, 雨热同期, 年降水量为 300~400 mm, 而年蒸发量达 1 000 mm。西辽河平原现有耕地 137.74 万 hm², 但由于自然和人为因素的综合影响, 发生土壤盐渍化的耕地面积占现有耕地面积一半以上。供试土壤为西辽河平原苏打盐碱化土壤, 其盐分离子组成为: Na⁺ 2.14 cmol·kg⁻¹, Ca²⁺ 0.54 cmol·kg⁻¹, Mg²⁺ 0.19 cmol·kg⁻¹, CO₃²⁻ 0.09 cmol·kg⁻¹, HCO₃⁻ 2.00 cmol·kg⁻¹, 其他土壤基本性质见表 1。

1.2 供试材料

供试作物为玉米, 品种为‘迪卡 159’, 由当地合作社提供。试验采用 3 种改良物料: 脱硫石膏由通辽市热电厂提供, 主要成分是 CaSO₄·2H₂O, 含量为 74.3%; 腐植酸采购自黑龙江丰亨生物科技有限

表 1 试验区土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soil in the test area

| pH | 含盐量 Salt content /(g · kg ⁻¹) | 有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹) | 全氮 Total N /(g · kg ⁻¹) | 有效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹) | 速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹) | 碱化度 Exchangeable sodium percentage/% |
|-----|---|---|---|---|---|--|
| 9.1 | 2.44 | 17.4 | 0.95 | 10.01 | 93.59 | 10.2 |

公司,是从褐煤中提取的大分子有机物质,主要成分为腐植酸(≥75%)、可溶物质(≥95%);复合调理剂由黑龙江丰亨生物科技有限公司提供,呈黑色颗粒状,主要成分为腐植物质、复合钙源和微量元素等,有机质≥80%,活化腐植酸≥80%,N+P₂O₅+K₂O≥5%。

1.3 试验设计

采用随机区组设计,设置 9 个改良处理,试验处理如表 2 所示。每个处理 3 次重复,共 27 个试验区,每个试验小区面积为 24 m×45 m=1 080 m²,整个试验区面积约 29 334.8 m²。玉米于 2020 年 5 月 3 日种植,同年 10 月 12 日收获。种植前平整土地,均匀施撒腐熟牛粪 75 m³ · hm⁻²和复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 20:20:5)450 kg · hm⁻²作为底肥。改良物料使用撒肥机进行撒施,撒施完毕后按照处理分别进行 30 cm 深松和 40 cm 粉垄,并统一进行 25 cm 浅翻。对照处理仅施入底肥和浅翻 25 cm,底肥施用量与各处理相同。玉米株行距 30 cm×60 cm,种植密度 55 558 株 · hm⁻²。灌溉方式为浅埋滴灌,其他田间管理措施均与当地常规管理方式一致。

1.4 测试指标和方法

1.4.1 土壤理化性状 土壤样品于 2020 年秋季玉米成熟期采集,使用土钻分层取样,取样深度为 0~20、20~40 cm,按照对角线取样法,每个小区 3 个取样点,分层混合后,使用四分法从中取 1 kg 风干研磨后过 2 mm 筛备用。土壤 pH 按照土水比 1:5 浸提后采用上海雷磁 PHSJ-3F 实验室 pH 计测定,土壤含盐量采用电导法测定。水溶性 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 采用双指示剂-中和滴定法测定,水溶性 Na⁺ 采用火焰光度计法测定,水溶性 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 采用 EDTA 滴定法测定。土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定,土壤全氮(TN)采用紫外分光光度法测定,土壤有效磷(AP)利用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定,土壤速效钾(AK)利用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。

土壤钠吸附比(SAR)和总碱度计算公式如下:

$$SAR(\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}) = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+} + Mg^{2+}]}{2}}}$$

表 2 试验设计

Table 2 Experiment design

| 耕作措施 Tillage measure | 处理 Treatment | 物料 Material | 施用量 Application amount /(kg · hm ⁻²) |
|------------------------------------|-----------------|--|--|
| | CK | | |
| 深松 30 cm Subsoiling 30 cm | SG | 脱硫石膏 Desulfurization gypsum | 15000 |
| | SF | 腐植酸 Humic acid | 6000 |
| | ST | 复合调理剂 Compound conditioner | 22500 |
| | STF | 复合调理剂+腐植酸 Compound conditioner+ humic acid | 22500+6000 |
| 粉垄 40 cm Smash-ridging 40 cm | FG | 脱硫石膏 Desulfurization gypsum | 15000 |
| | FF | 腐植酸 Humic acid | 6000 |
| | FT | 复合调理剂 Compound conditioner | 22500 |
| | FTF | 复合调理剂+腐植酸 Compound conditioner+ humic acid | 22500+6000 |

$$\text{总碱度} = \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$$

式中,Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 单位均为 mmol_c · L⁻¹。

试验区按照 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 分层采用环刀法进行土壤容重、总孔隙度的测定,通过计算获得土壤三相比^[13]。

1.4.2 玉米生长指标及产量 在玉米成熟期,每个小区随机选取有代表性的 10 m 双行,每隔 5 穗取 1 穗,共取 10 穗,每个处理 3 次重复,测定玉米产量构成要素,计算各处理区的理论产量。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 对数据进行整理,采用 SPSS 25 和 Origin 2019 进行数据处理和作图,显著性分析采用邓肯单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 耕作协同物料添加对土壤物理性质的影响

2.1.1 土壤容重 容重是评价土壤质量的重要指标之一。由图 1 可知,0~30 cm 土层,不同处理均表现为随着土壤深度的增加土壤容重增加,且不同处

理间差异显著。不同耕作协同物料添加处理均降低了耕层土壤容重,其中粉垄协同物料添加处理的土壤容重均小于深松。各处理的土壤容重从小到大排列为:FG>FT>FF>FTF>SG>STF>SF>ST>CK,FG 处理土壤容重降低最为显著($P<0.05$),较 CK 平均降低 21.4%。

2.1.2 土壤总孔隙度 根据土壤容重对土壤总孔隙进行计算,由图 2 可知,与土壤容重的变化规律相反,耕作协同物料添加处理均提高了土壤总孔隙度。0~30 cm 土层,不同处理的土壤总孔隙度均随

着土壤深度的增加而下降,粉垄协同物料添加处理的土壤总孔隙度大于深松,土壤总孔隙度从大到小排列为:FG>FT>FF>FTF>SG>STF>SF>ST>CK,FG 处理土壤总孔隙度提高最为显著($P<0.05$),较 CK 平均提高 30.2%。

2.1.3 土壤三相比 耕作协同物料添加对土壤三相比影响较大,主要表现为各处理均较对照降低了 0~40 cm 土层土壤固相比,提高了土壤液相比,在 10~40 cm 土层粉垄协同物料添加处理的土壤气相比高于深松(图 3)。10~20 cm 和 20~30 cm 土层,

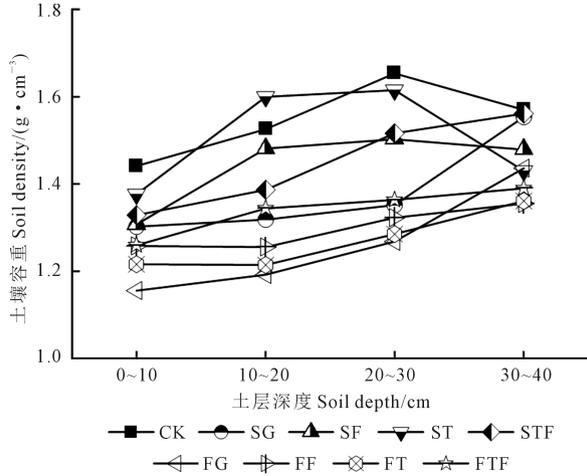


图 1 耕作协同物料添加对土壤容重的影响
Fig.1 Effects of tillage synergistic materials addition on soil bulk density

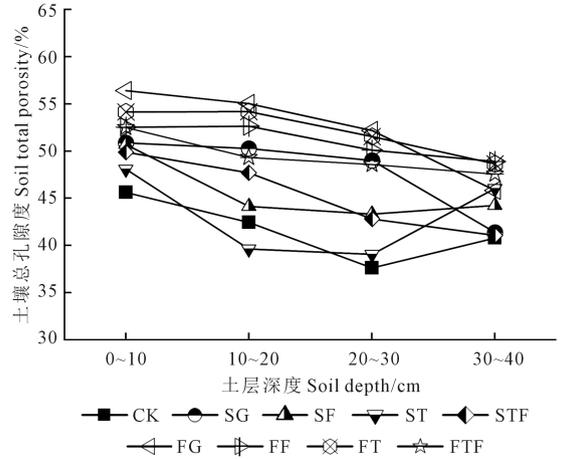
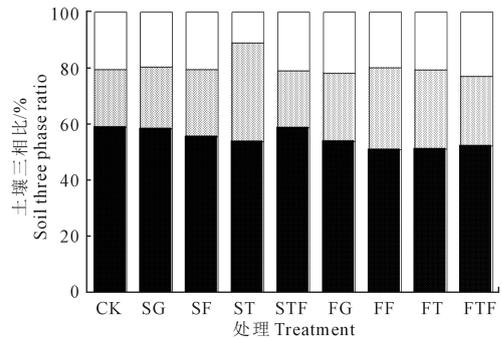
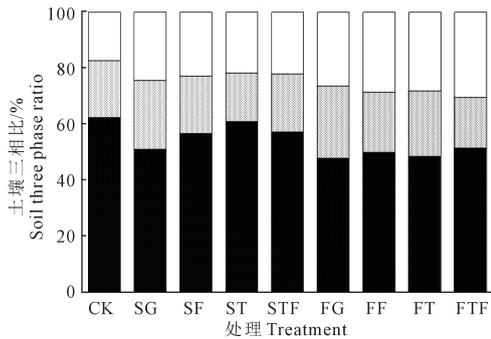
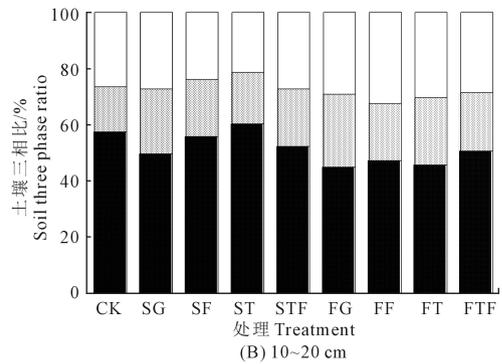
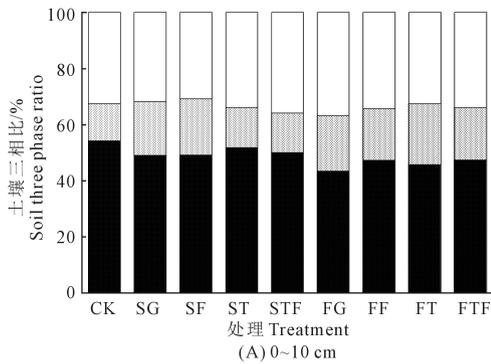


图 2 耕作协同物料添加对土壤总孔隙度的影响
Fig.2 Effect of tillage synergistic materials addition on soil total porosity



固相 Soil phase 液相 Liquid phase 气相 Gas phase

图 3 耕作协同物料添加对不同土层土壤三相比的影响

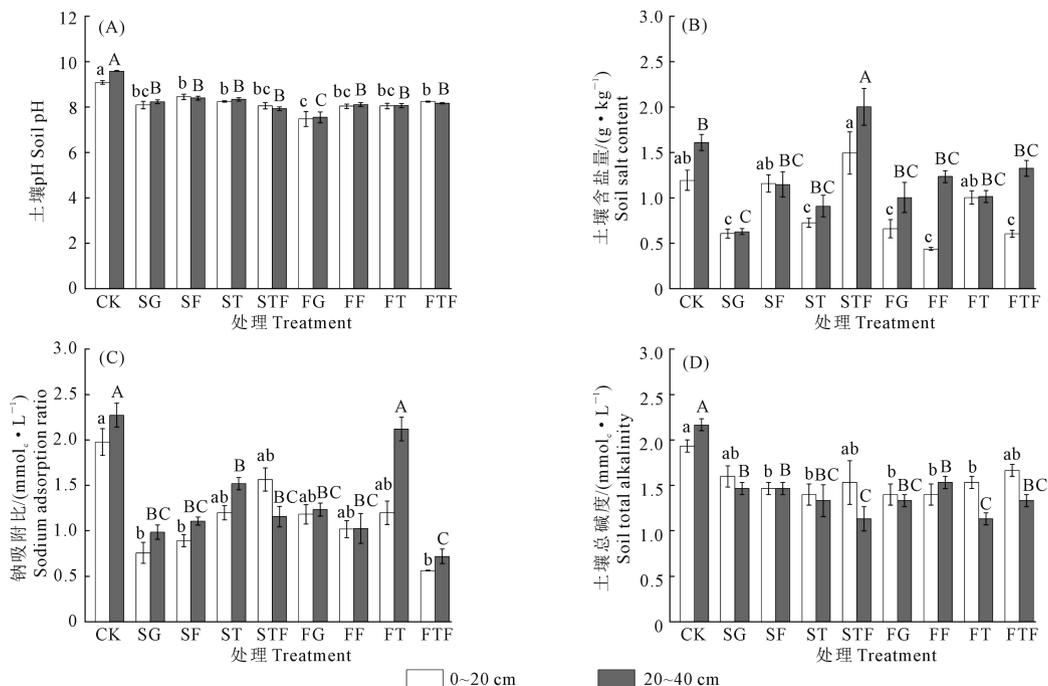
Fig.3 Effect of tillage synergistic materials addition on soil three phase ratio of different soil depth

土壤三相相比变化显著。10~20 cm 土层,除 ST 处理外,其他处理土壤固相比较 CK 均降低,其中 FG 和 FT 处理下降幅度最大,较 CK 分别下降 21.9% 和 20.4%;各处理均提高了土壤液相比,其中 FG 和 FT 处理的土壤液相比提高幅度高于其他处理;除 SF 和 ST 处理的土壤气相比较 CK 降低外,其他处理均不同程度提高。与 CK 相比,20~30 cm 土层各处理均降低了土壤固相比,气相比则不同程度增加,其中 FG 处理的土壤固相比较 CK 下降 23.3%,下降幅度最大,FTF 处理的土壤气相比较 CK 提高 76.4%,提高幅度高于其他处理;土壤液相比各处理之间及其 CK 之间差异显著,其中 SG、FG、FF 和 FT 处理均提高了土壤液相比。整体而言,粉垄协同物料添加对土壤三相相比的改善作用优于深松。

2.2 耕作协同物料添加对土壤化学性质的影响

2.2.1 土壤 pH

与 CK 相比,耕作协同物料添加显著降低了 0~40 cm 土层土壤 pH ($P<0.05$) (图 4A),其中 20~40 cm 土层降低幅度(12.4%~21.3%)大于 0~20 cm 土层(6.8%~17.7%)。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,FG 处理的土壤 pH 显著低于 CK 及其他改良处理 ($P<0.05$),较 CK 分别降低 17.7% 和 21.3%;其次为 FTF 处理,较 CK 分别降低了 9.3% 和 14.8%。除 FG 处理外,其余各改良处理之间土壤 pH 在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层并无显著差异。



注:不同小写字母表示 0~20 cm 土层不同处理之间在 0.05 水平差异显著;不同大写字母表示 20~40 cm 土层不同处理之间 0.05 水平差异显著。

Note: Difference lowercase letters mean significant difference between treatments in 0~20 cm soil depth at 0.05 level, and difference capital letters mean significant difference between treatments in 20~40 cm soil depth at 0.05 level.

图 4 耕作协同物料添加对不同土层土壤化学性质的影响

Fig.4 Effects of tillage synergistic materials addition on soil chemical properties of different soil depth

2.2.2 土壤含盐量

由图 4B 可知,与 CK 相比,0~40 cm 土层除 STF 处理的土壤含盐量升高外,其他处理均不同程度降低,不同土层深度各处理之间存在显著差异。0~20 cm 土层,SG、ST、FG、FF 和 FTF 处理的土壤含盐量较 CK 显著降低 ($P<0.05$),降低幅度为 39.5%~63.5%。20~40 cm 土层,SG 处理的土壤含盐量较 CK 显著降低 ($P<0.05$),除 STF 处理外,其他处理的土壤含盐量较 CK 降低,差异未达显著水平。

2.2.3 土壤钠吸附比

由图 4C 可知,耕作协同物料添加降低了 0~40 cm 土层土壤钠吸附比(SAR)。0~20 cm 土层,SG、SF、FTF 处理的土壤 SAR 较 CK 显著下降 ($P<0.05$),其中 FTF 下降幅度最为显著 ($P<0.05$),较 CK 下降 71.5%。20~40 cm 土层,与 CK 相比,除 FT 处理无显著差异外,其他处理均显著降低了土壤 SAR,其中 FTF 处理较 CK 下降 78.3%,下降最为显著 ($P<0.05$)。

2.2.4 土壤总碱度

由图 4D 可知,耕作协同物料添加处理的土壤总碱度在 0~40 cm 土层均较 CK 不同程度降低。0~20 cm 土层,SF、ST、FG、FF 和 FT 较 CK 显著下降 ($P<0.05$),下降幅度为 20.7%~27.6%;20~40 cm 土层,各处理较 CK 均显著下降 ($P<0.05$),其中 STF 和 FT 下降最为显著,均较 CK 降低 47.9%。

2.3 耕作协同物料添加对土壤养分的影响

表 3 为不同改良处理对土壤养分的影响,由表 3 可知,与 CK 相比,耕作协同物料添加增加了土壤有机质和有效磷含量,不同改良处理对土壤全氮和速效钾影响具有显著差异。

2.3.1 土壤有机质 通过对土壤有机质分析发现,0~20 cm 土层,与 CK 相比,各处理均提高了土壤有机质含量,其中 SF 较 CK 提高最大,增幅为 51.5%,其次为 STF,较 CK 提高 36.5%;20~40 cm 土层,除 FF 处理的土壤有机质含量较 CK 无显著差异外,其他处理均显著提高土壤有机质含量($P<0.05$),提高幅度为 34.2%~63.9%。

2.3.2 土壤全氮 通过对土壤全氮分析发现,0~20 cm 土层,不同改良处理对土壤全氮影响不同,除 FG 和 FF 处理的土壤全氮含量较 CK 下降外,其他处理较 CK 增加 8.8%~20.4%,其中 ST 处理较 CK 提高

最为显著;20~40 cm 土层,除 FF 处理的土壤全氮含量较 CK 降低,其他处理与 CK 相比土壤全氮含量增加 2.7%~16.4%。

2.3.3 土壤有效磷 通过对土壤有效磷分析发现,与 CK 相比,不同改良处理显著提高土壤有效磷含量($P<0.05$),0~20 cm 土层,各改良处理土壤有效磷含量较 CK 增加 75.0%~314.0%,其中 FTF 处理的增幅最大;20~40 cm 土层,FT 和 FF 处理的土壤有效磷含量较 CK 增加 3 倍以上,其他处理较 CK 也均不同程度提高。

2.3.4 土壤速效钾 通过对土壤速效钾分析发现,0~20 cm 土层,各处理的土壤速效钾含量较 CK 增加 20.7%~81.0%,其中 ST 和 FG 处理较 CK 增加显著($P<0.05$);20~40 cm 土层,STF、FG 和 FT 处理的土壤速效钾含量较 CK 显著提高,分别提高 17.6%、18.4%和 22.1%。

表 3 耕作协同物料添加对不同土层土壤养分的影响

Table 3 Effects of tillage synergistic materials addition on soil nutrients of different soil depth

| 处理 Treatment | 有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹) | | 全氮 Total N /(g·kg ⁻¹) | | 有效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹) | | 速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹) | | |
|------------------------------------|--|--------------|--------------------------------------|--------------|--|-------------|--|--------------|--------------|
| | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | |
| | CK | 20.0±0.88e | 15.5±0.92D | 1.38±0.07bcd | 1.28±0.05A | 10.0±0.42f | 3.5±0.12E | 139.9±7.17e | 105.1±6.08C |
| 深松 30 cm Subsoiling 30 cm | SG | 22.1±1.28cde | 25.2±0.98A | 1.55±0.01abc | 1.33±0.08A | 17.5±1.04e | 5.2±0.31D | 142.8±3.64e | 102.8±3.33CD |
| | SF | 30.3±2.36a | 22.4±1.16BC | 1.64±0.03a | 1.32±0.07A | 27.9±0.67bc | 4.2±0.12DE | 171.9±2.11cd | 102.6±3.67CD |
| | ST | 24.3±1.35bcd | 24.4±1.08BC | 1.66±0.04a | 1.32±0.05A | 30.5±1.84ab | 4.7±0.17D | 220.9±7.43b | 112.5±5.09BC |
| | STF | 27.3±1.71ab | 23.9±0.81BC | 1.60±0.05ab | 1.39±0.04A | 18.8±1.07e | 7.6±0.35C | 187.7±4.9cd | 123.6±3.67AB |
| 粉垄 40 cm Smash-ridging 40 cm | FG | 20.7±0.97de | 20.8±1.18C | 1.33±0.07cd | 1.32±0.01A | 21.4±0.58de | 14.9±0.23A | 253.2±7.01a | 124.4±2.72AB |
| | FF | 20.5±1.11de | 16.0±1.15D | 1.16±0.08d | 0.96±0.10B | 24.6±2.45cd | 5.3±0.38D | 174.2±4.27cd | 90.1±2.78D |
| | FT | 25.8±0.62bc | 25.4±1.24B | 1.52±0.03abc | 1.49±0.06A | 21.6±0.61de | 13.3±0.78B | 164.3±3.46d | 127.3±4.75A |
| | FTF | 25.2±1.05bc | 23.8±1.77DC | 1.50±0.17abc | 1.36±0.01A | 33.2±1.22a | 4.1±0.43DE | 191.4±4.78cd | 104.9±6.51C |

注:不同小写字母表示 0~20 cm 土层不同处理之间在 0.05 水平差异显著;不同大写字母表示 20~40 cm 土层不同处理之间 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters mean significant difference between 0~20 cm soil depth and 0.05 level, and different capital letters mean significant difference between 20~40 cm soil depth and 0.05 level.

2.4 耕作协同物料添加对玉米产量及产量构成要素的影响

由表 4 可知,耕作协同物料添加处理玉米产量较 CK 显著提高($P<0.05$),处理间比较,FTF 处理产量最高,较 CK 提高 37.6%;FG 处理产量最低,较 CK 提高 9.8%;其他处理与 CK 无显著差异。产量构成要素比较,玉米穗行数和行粒数均表现为耕作协同物料添加处理显著高于 CK($P<0.05$),处理间无显著性差异。SF 和 FT 处理的玉米百粒重显著低于 CK($P<0.05$),其他处理与 CK 无显著差异。

表 4 耕作协同物料添加对玉米产量及产量构成要素的影响

Table 4 Effects of tillage synergistic materials addition on maize yield and yield components

| 处理 Treatment | 穗行数 Row number per ear | 行粒数 Grains per row | 百粒重 Hundred- grain weight/g | 理论产量 Theoretical yield /(kg·hm ⁻²) | |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---|-----------------|
| CK | 20.7±0.4b | 33.6±0.6b | 29.8±1.0ab | 9787.9±226.3d | |
| 深松 30 cm Subsoiling 30 cm | SG | 21.9±0.1a | 39.7±0.3a | 28.9±0.3bc | 11865.3±94.8b |
| | SF | 21.8±0.4a | 38.5±0.3a | 27.9±0.2c | 11109.7±358.4bc |
| | ST | 21.7±0.2a | 38.7±1.4a | 29.2±0.3bc | 11592.9±597.3bc |
| | STF | 21.7±0.4a | 38.9±1.0a | 29.9±0.3ab | 11911.1±285b |
| 粉垄 40 cm Smash-ridging 40 cm | FG | 21.9±0.3a | 36.6±1.0a | 28.5±0.5bc | 10749.8±195cd |
| | FF | 21.7±0.1a | 39.6±0.1a | 29.4±0.3abc | 11930.4±84.4b |
| | FT | 22.8±0.2a | 39.4±0.5a | 28.0±0.3c | 11866.9±62.7b |
| | FTF | 22.5±0.3a | 41.0±0.7a | 30.8±0.3a | 13466.6±523.1a |

3 讨论

3.1 耕作协同物料添加对土壤物理性质的影响

苏打盐碱化土壤物理性质恶劣,主要表现为土壤水分升高时不透水,水分易从地表流失;当土壤水

分含量下降时,土壤会形成坚硬的结壳,影响作物生长发育。耕作措施通过对土壤耕层进行机械扰动以松动耕层,使土壤颗粒重新排列组合来改善土壤物理性质,进而对土壤水、肥、气、热进行调节^[14]。本研究表明,深松、粉垄分别与物料施加综合处理均显著降低了土壤容重,增加了土壤总孔隙度,土壤结构得到改善。一方面,深松和粉垄对土壤物理性质改善作用显著,巨兆强等^[15]通过对比传统旋耕处理和深松处理对土壤性质的影响发现,深松耕作能够明显改善耕层土壤的物理性质,降低土壤容重,增加总孔隙度和土壤含水率;孙美乐等^[16]通过研究发现,与传统翻耕相比,粉垄耕作降低了土壤耕作层的容重,增加了土壤含水量。本研究还发现,施用相同物料情况下,粉垄处理对土壤容重、总孔隙度、硬度和三相相比的改善效果优于深松处理,0~40 cm 土层深度进行粉垄处理的土壤容重与深松处理相比平均降低 10.5%,土壤总孔隙度平均提高 12.6%,这是因为粉垄耕作通过专用机械垂直螺旋型钻头将土壤进行粉碎且自然悬浮成垄,可起到深松和旋耕的双重作用^[17-19]。另一方面腐植酸类物质、脱硫石膏对改善土壤结构具有积极作用,Nan 等^[20]通过研究发现,向盐碱土中施加褐煤腐植酸显著降低了土壤容重,改善土壤孔隙结构;石婧等^[21]研究发现脱硫石膏有利于降低盐碱化土壤容重,增加土壤总孔隙度,这与本研究结果相似。

3.2 耕作协同物料添加对土壤化学性质的影响

本研究表明,耕作与物料添加可以有效降低苏打盐碱化土壤耕层盐分含量。孙在金^[22]通过研究发现,与无任何物料施用的对照相比较,向盐碱化土壤中施用腐植酸和脱硫石膏均能降低土壤含盐量,这与本研究的结果相似。在本研究中,土壤含盐量 20~40 cm 土层大于 0~20 cm 土层,这是因为深松和粉垄的耕作措施疏松了表层土壤,改善了土壤结构,利于耕层脱盐;腐植酸、脱硫石膏和复合调理剂通过离子置换、吸附等作用加速脱盐过程,在土壤水分的作用下土壤盐分向深层运移。与对照相比,耕作和物料添加有效改善了苏打盐碱化耕地土壤的盐碱障碍,土壤 pH、SAR 和总碱度分别降低 6.8%~21.3%、20.7%~78.3%和 17.1%~47.7%。一方面深松和粉垄改善耕层土壤结构,促进耕层土壤降碱排盐,李瑞平^[23]研究发现与免耕相比,深松降低了 10~30 cm 土层土壤 pH。另一方面腐植酸类物质和脱硫石膏对耕层土壤降碱作用显著,脱硫石

膏的离子置换作用,产生易溶中性盐,降低土壤 pH 值和 SAR^[24];而腐植酸是一类多环稠环有机化合物,可以通过吸附、交换和酸碱中和等作用使土壤 pH 和 SAR 降低^[25];复合调理剂以腐植酸物质和复合钙源为主要组成物质,同时具有离子置换以及腐植酸的吸附、交换和酸碱中和作用,高慧敏等^[26]发现腐植酸和脱硫石膏配施能够显著降低土壤 pH 且改良效果优于腐植酸和脱硫石膏单施,这是因为腐植酸和石膏配施可加大石膏的溶解量,进而提升 Na⁺ 置换能力,强化了改土效果,这与本研究结果相似。

3.3 耕作协同物料添加对土壤养分和玉米产量的影响

有机质是土壤的重要组成部分,对改善土壤理化性质、调节土壤养分循环具有重要作用,是评价土壤生产力的关键指标^[27]。在本研究中,腐植酸、脱硫石膏以及复合调理剂均提高了耕层土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量,其中土壤有机质增加 2.5%~63.9%。这与张晓东等^[4]研究表明向盐渍土中施用腐植酸、有机肥、石膏和秸秆能够显著提高耕层土壤有机质、有效磷和碱解氮含量的研究结果一致,也与王福友等^[28]通过研究发现向盐渍土中增加腐植酸能够有效提高土壤有机质含量的研究结果一致。大量研究表明,脱硫石膏和腐植酸单施或配施以及腐植酸的衍生品施用均能促进作物生长,提高作物产量^[29-31]。王丹等^[32]通过研究发现,脱硫石膏与有机物料配施可有效提高棉花产量,增产效果优于脱硫石膏和有机物料单施。孙在金^[22]研究发现腐植酸和脱硫石膏施用均能显著提高棉花的产量,且腐植酸和脱硫石膏配施促进植物生长效果更佳。本试验中不同综合措施均有效提高了玉米产量,其中深松 30 cm 并施用复合调理剂 22 500 kg·hm⁻²和腐植酸 6 000 kg·hm⁻²处理及粉垄 40 cm 并施用复合调理剂 22 500 kg·hm⁻²和腐植酸 6 000 kg·hm⁻²处理的玉米产量较对照分别提高 21.7%和 37.6%。一方面,深松和粉垄降低了耕作层土壤容重,增加土壤孔隙度,改善了根系的生长条件,利于作物根系生长和深扎,形成良好的根系体系^[7],进而促进作物生长,提高作物产量;另一方面,土壤中的腐植酸类物质对植物生长产生直接和间接的影响^[33]。腐植酸能够刺激植物根系生长,提高根系养分吸收能力,促进植物生长发育^[34];还能通过调控土壤与肥料中养分的有效性,影响土壤微生物数量结构,改善土壤环境,间接促进了植物的生长^[35]。

3 结 论

耕作协同物料添加改善了土壤理化性质。一方面,各改良处理均降低了土壤容重、提高土壤总孔隙度,改善土壤结构,粉垄施用物料处理对土壤结构的改善作用优于深松施用物料处理。另一方面,深松和粉垄结合物料施用均降低了土壤 pH、SAR 和总碱度,其中粉垄 40 cm 并施用复合调理剂 22 500 kg · hm⁻²和腐植酸 6 000 kg · hm⁻²处理显著降低了 0~40 cm 土层 pH 和 SAR,较对照分别降低 12.1% 和 74.9%。

耕作协同物料添加提高了苏打盐碱化土壤养分含量和作物产量。各处理均提高了土壤有机质和有效磷含量,其中粉垄并施用复合调理剂 22 500 kg · hm⁻²和腐植酸 6 000 kg · hm⁻²提高显著,分别较对照提高 39.5% 和 124.6%。粉垄并施用复合调理剂 22 500 kg · hm⁻²和腐植酸 6 000 kg · hm⁻²处理的玉米穗行数、行粒数和理论产量均显著高于对照,较对照分别提高 8.7%、35.8% 和 37.6%。综上所述,粉垄并施用复合调理剂 22 500 kg · hm⁻²和腐植酸 6 000 kg · hm⁻²处理为西辽河平原苏打盐碱化耕地最优土壤改良措施。

参 考 文 献:

- [1] 杨恒山,李华,李志刚,等. 内蒙古西辽河平原生态环境问题与农业持续发展对策[J]. 中国农学通报, 2000, 16(6): 45-47.
YANG H S, LI H, LI Z G, et al. Ecological environment problems in West Liaohe Plain of Inner Mongolia and countermeasures for sustainable agricultural development[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2000, 16(6): 45-47.
- [2] 廖栩,杨帆,王志春,等. 腐解秸秆和脱硫石膏添加对苏打盐渍土淋洗脱盐效率的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(1): 74-82.
LIAO X, YANG F, WANG Z C, et al. Effects of decomposed straw and desulfurized gypsum on salt leaching in saline-sodic soils[J]. Soils and Crops, 2020, 9(1): 74-82.
- [3] 宋静茹,杨江,王艳明,等. 黄河三角洲盐碱地形成的原因及改良措施探讨[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(27): 95-97, 234.
SONG J R, YANG J, WANG Y M, et al. Exploration of the reason and improvement measures of saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(27): 95-97, 234.
- [4] 张晓东,李兵,刘广明,等. 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1744-1754.
ZHANG X D, LI B, LIU G M, et al. Effect of composite soil improvement agents on soil amendment and salt reduction in coastal saline soil [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2019, 27(11): 1744-1754.
- [5] ZHANG J L, SHI H Z. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance[J]. Photosynthesis Research, 2013, 115(1): 1-22.
- [6] 牛东玲,王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449-455.
NIU D L, WANG Q J. Research progress on saline-alkali field control

- [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(6): 449-455.
- [7] 韦本辉,申章佑,周佳,等. 粉垄耕作改良盐碱地效果及机理[J]. 土壤, 2020, 52(4): 699-703.
WEI B H, SHEN Z Y, ZHOU J, et al. Study on effect and mechanism of improving saline-alkali soil by fenlong tillage[J]. Soils, 2020, 52(4): 699-703.
- [8] 赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2489-2503.
ZHAO Y L, LIU W L, CHENG S X, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(13): 2489-2503.
- [9] 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子粒水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(4): 90-96.
GAO P, SUN J Y, GAO J L, et al. Response mechanism of soil moisture storage characteristics and kernel water use efficiency to subsoling regulation in spring maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(4): 90-96.
- [10] 岳殷萍,李虹瑜,张伟华. 脱硫石膏与腐殖酸改良盐碱土的效果研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2016, (14): 85-87, 89.
YUE Y P, LI H Y, ZHANG W H. Study on the effect of desulfurization gypsum and humic acid on improving saline and alkaline soil[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2016, (14): 85-87, 89.
- [11] 徐东耀,徐小方,王岩,等. 提取褐煤中腐殖酸的新方法[J]. 煤炭加工与综合利用, 2007, (2): 29-32.
XU D Y, XU X F, WANG Y, et al. A new method for extraction of humic acid from lignite[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2007, (2): 29-32.
- [12] 李艳红,庄锐,张政,等. 褐煤腐殖酸的结构、组成及性质的研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(8): 3147-3157.
LI Y H, ZHUANG R, ZHANG Z, et al. Research on the structure, chemical composition and characterization of humic acid from lignite [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(8): 3147-3157.
- [13] 李娜,龙静泓,韩晓增,等. 短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 99-107.
LI N, LONG J H, HAN X Z, et al. Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 99-107.
- [14] 徐璐,王志春,赵长巍,等. 东北地区盐碱土及耕作改良研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(27): 23-31.
XU L, WANG Z C, ZHAO C W, et al. A review of saline-sodic soil and tillage amelioration in Northeast of China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(27): 23-31.
- [15] 巨兆强,刘小京. 干旱盐碱区耕作方式改变对土壤性状和作物产量的影响[J]. 河北农业科学, 2012, 16(7): 6-10.
JU Z Q, LIU X J. Effects of different tillage methods on soil properties and crop yields in arid saline region[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2012, 16(7): 6-10.
- [16] 孙美乐,蔺国仓,回经涛,等. 粉垄耕作对新疆盐碱土理化性质及棉花生长影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (6): 58-64.
SUN M L, LIN G C, HUI J T, et al. Effects of smash-ridging cultivation on physical and chemical properties of saline-alkali soil and cotton growth in Xinjiang[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,

- 2020, (6): 58-64.
- [17] 聂胜委, 张玉亭, 张巧萍, 等. 粉垄耕作技术研究展望[C]//中国农学会耕作制度分会2016年学术年会论文集, 乌鲁木齐: 中国农学会耕作制度分会, 2016: 43.
- NIE S W, ZHANG Y T, ZHANG Q P, et al. Research prospect of smashing ridge tillage [C]//Proceedings of the 2016 Annual Academic Conference of the Farming System Branch of the Chinese Agricultural Society, Urumqi: Farming System Branch of China Agricultural Society, 2016: 43.
- [18] 聂胜委, 张玉亭, 张巧萍, 等. 粉垄耕作对小麦玉米产量及耕层土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 930-936.
- NIE S W, ZHANG Y T, ZHANG Q P, et al. Effect of smashing ridge tillage on grain yields of winter wheat and summer maize and contents of soil nutrients[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(4): 930-936.
- [19] 韦本辉. “粉垄定律”的确立及其科学意义初探[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(12): 1-4, 8.
- WEI B H. “The law of fenlong” and its scientific significance[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(12): 1-4, 8.
- [20] NAN J K, CHEN X M, WANG X Y, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum and humic acid on soil physicochemical properties and rapeseed yield of a saline-sodic cropland in the eastern coastal area of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(1): 38-50.
- [21] 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 J, HUANG C, LIU J, 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.
- [22] 孙在鑫. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D].北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- SUN Z J. Research on effects and the mechanism of desulfurization gypsum and humic acid on coastal saline-alkali soil improvement[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [23] 李瑞平. 吉林省半湿润区不同耕作方式对土壤环境及玉米产量的影响[D].哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- LI R P. Effects of different tillage methods on soil environment and maize yield of semi-humid region in Jilin Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [24] 刘祖香, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土离子组成的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(3): 83-88.
- LIU Z X, CHEN X M, LI X L, et al. Effect of different amendments combined with gypsum application on ion composition in coastal saline soil[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(3): 83-88.
- [25] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 128-132.
- WANG X Y, CHEN X M, LI X L, et al. Improvement effects of combined application of different amendments and gypsum on a coastal saline soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 128-132.
- [26] 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): 85-92.
- 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): 85-92.
- [27] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 140-148.
- ZHAO Y T, CHANG Q R, LI Z P, et al. Spatial characteristics of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land of Weibei Tableland area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 140-148.
- [28] 王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 89-94.
- WANG F Y, WANG C, LIU Q Q, et al. Improved effect of humic acid, earthworm protein fertilizer and vermicompost on coastal saline soils[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(5): 89-94.
- [29] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同肥料与石膏配施对滨海盐渍土养分的培肥效果评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 149-154.
- WANG X Y, CHEN X M, LI X L, et al. The fertilizing effect evaluation of different fertilizers combined with gypsum application on coastal saline soil nutrients [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1): 149-154.
- [30] 王倩姿, 王玉, 孙志梅, 等. 腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1227-1234.
- WANG Q Z, WANG Y, SUN Z M, et al. Amelioration effect of humic acid on saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1227-1234.
- [31] 高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1219-1229.
- GAO S, YANG J S, YAO R J, et al. Effects of soil amelioration measures mitigating soil salinity and improving crop P uptake in coastal area of north Jiangsu [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1219-1229.
- [32] 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): 34-40.
- 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): 34-40.
- [33] CHEN Y, AVIAD T. Effects of humic substances on plant growth [M]//MACCARTHY P, CLAPP C E, MALCOLM R L, et al. Humic substances in soil and crop sciences: selected readings. Madison: American Society of Agronomy, 1990: 161-186.
- [34] CALVO P, NELSON L, KLOEPPER J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. Plant and Soil, 2014, 383(1): 3-41.
- [35] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1065-1076.
- ZHANG S Q, YUAN L, LIN Z A, et al. Advances in humic acid for promoting plant growth and its mechanism[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4): 1065-1076.