

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.030

引用格式:陈娜,郭全恩,曹诗瑜,等.不同改良剂对河西盐碱地饲用玉米土壤养分及盐离子影响[J].草地学报,2026,34(7):2688—2697

CHEN Na, GUO Quan-en, CAO Shi-yu, et al. Effects of Different Amendments on Soil Nutrients and Salt Ions of Forage Maize in Saline-Alkali Land of Hexi[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2688—2697

不同改良剂对河西盐碱地饲用玉米土壤养分及盐离子影响

陈娜¹, 郭全恩², 曹诗瑜², 焦龙光¹, 南丽丽^{1*}

(1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/农业农村部饲草种质与新品种选育重点实验室(部省共建), 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃兰州 730070)

摘要:土壤盐碱化制约河西走廊农业发展,本研究以河西瓜州盐碱土为对象,通过设置不施改良剂(T_0)、秸秆颗粒肥(T_1)、免申耕(T_2)与禾康(T_3)4种处理,探究不同改良剂对饲用玉米生长、土壤养分及盐分离子的影响。结果表明:各处理下土壤有机质、速效氮、磷、钾、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、pH值及全盐总体呈先降后升趋势, Na^+ 先升后降, K^+ 递增, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 递减。随土层加深(0~100 cm),pH、全盐、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 升高, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 降低。在0~20 cm耕层, T_3 降低pH、全盐和 HCO_3^- 效果最好, T_2 抑制 Na^+ 和 SO_4^{2-} 积累最佳; T_1 显著提升土壤有机质、速效氮、有效磷和速效钾含量(增幅分别为13.76%,29.42%,244.59%,11.61%),且对玉米茎粗、株高和鲜草产量(增幅分别为33.47%,56.02%,72.28%)促进效果最好。综上,秸秆颗粒肥(T_1)为该地区盐碱地改良的最优选择。

关键词:盐碱土;玉米田;土壤改良剂;盐离子;全盐

中图分类号:S156.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2688-10

Effects of Different Amendments on Soil Nutrients and Salt Ions of Forage Maize in Saline-Alkali Land of Hexi

CHEN Na¹, GUO Quan-en², CAO Shi-yu², JIAO Long-guang¹, NAN Li-li^{1*}

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/Key Laboratory of Forage Gerplasm Germplasm Innovation and New Variety Breeding of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Co-sponsored by Ministry and Province), Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 2. Soil Fertilizer and Water-Saving Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: Soil salinization restricts the development of agriculture in the Hexi Corridor. In this study, the saline-alkali soil in Guazhou County was taken as the object, and four treatments were set up as no modifier (T_0), straw granular fertilizer (T_1), no-tillage (T_2) and Hekang (T_3) to explore the effects of different modifiers on the growth of forage maize, soil nutrients and salt ions. The results showed that soil organic matter, available nitrogen, phosphorus, potassium, Ca^{2+} , Mg^{2+} , pH and total salt decreased first and then increased under different treatments. Na^+ increased first and then decreased, K^+ increased, Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- decreased. With the deepening of soil layer (0-100 cm), pH, total salt, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} increased, while K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- decreased. In the 0-20 cm plough layer, T_3 had the best effect on reducing pH, total salt and HCO_3^- , and T_2 had the best effect on inhibiting Na^+ and SO_4^{2-} accumulation. T_1 significantly increased the contents of soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium (increased by 13.76%, 29.42%, 244.59% and 11.61%, respectively), and had the best effect on maize stem

收稿日期:2025-06-24;修回日期:2025-09-01

基金项目:甘肃省重大专项(25ZDNA005)资助

作者简介:陈娜(1996-),女,汉族,甘肃定西人,硕士研究生,主要从事牧草栽培研究,E-mail:2269044848@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:nanll@gsau.edu.cn

diameter, plant height and fresh grass yield (increased by 33.47%, 56.02% and 72.28%, respectively). In summary, straw granular fertilizer (T_1) is the best choice for the improvement of saline-alkali land in this area.

Key words: Saline-alkali soil; Corn fields; Soil amendments; Salt ions; Total salt

土壤盐碱化是全球性的土地退化过程,对农业生产系统和生态服务功能构成系统性威胁^[1]。据统计,目前全球范围内盐碱地总面积达 10 亿 hm^2 (占地球陆地总面积的 8.7%)^[2],且正以每年 1500 万 hm^2 的速度扩张,至少造成 20.0% 的农作物减产^[3]。我国盐碱地面积高达 1 亿 hm^2 ,居世界第三位,且有加重趋势,已成为制约生态环境改善和农业可持续发展的关键瓶颈^[4]。甘肃省盐碱地总面积超过 102 万 hm^2 ,集中分布在河西走廊地区^[5],涵盖武威、金昌、张掖、酒泉、嘉峪关等,该地区地域辽阔、光热资源充足,适合发展农业和畜牧业,是甘肃重要的粮食生产基地^[6]。然而,其深居内陆、气候干旱、蒸发强烈、降水稀少的自然环境和长期不合理的灌溉方式使土壤盐碱化问题十分突出^[7]。

盐碱土改良的最终目的是改善土壤特性,降低土壤中的盐分含量,为植物生长发育提供良好环境,土壤改良剂是修复退化土壤的重要途径^[8]。张莉等^[9]研究表明,秸秆颗粒可显著提高土壤有机质、碱解氮和有效磷的含量。马林等^[10]研究表明,施用“免申耕”和“禾康”可使土壤有机质和全氮含量显著增加,水溶性盐总量显著降低,提高土壤通透性。许世奇等^[11]研究表明,土壤改良剂能够在一定程度上缓解高 pH 环境和盐分给作物带来的伤害,显著增强耐盐性。土壤改良剂主要通过降低盐碱土的含盐量和碱化度,增加团聚体数量及孔隙度,提升

有机质和养分含量,改善土壤结构,加速微生物代谢,促进根系分泌物及根际微生物繁殖,最终达到提高土壤肥力的效果^[12-13]。按来源可分为 4 类^[14]:天然类(石灰、作物秸秆和绿肥等)、合成类(聚丙烯酰胺、脲醛树脂等)、天然-合成复合类(纤维素-丙烯酰胺)和生物类(微生物菌剂),均能改善土壤理化性质、调节土壤固-液-气三相比,增强植物抗逆性^[15]。然而我国不同地区盐碱地的土壤条件和特点各不相同,且盐碱土改良剂品种繁多,化学组成和作用机理不同,具有较强的地域性,盲目套用其他地区的盐碱土改良经验可能会产生不良后果。因此,选择适宜的土壤改良剂尤为重要。为此,本研究以饲用玉米为种植作物,选用新型盐碱土改良剂——秸秆颗粒肥,市面上常见土壤改良剂免申耕、禾康 3 种土壤改良剂,系统评价其对河西瓜州地区盐碱土的改良效果和饲用玉米产量的影响,以期在当地盐碱地改良提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在甘肃省酒泉市瓜州县双塔镇农业科学院试验基地($40^{\circ}52' \text{N}$, $96^{\circ}40' \text{E}$)进行,海拔 1331 m,试验区为大陆荒漠干旱性气候,土壤类型为灰棕漠土。气象数据和土层理化性质见表 1。

表 1 试验地气象数据和理化性质

Table 1 Meteorological data and physical and chemical properties of the test site

气象数据 Meteorological data	数值 Numerical value	理化性质 Physicochemical property	数值 Numerical value
年均温度 Mean annual temperature/ $^{\circ}\text{C}$	9.9	pH 值 pH value	8.59
降水量 Precipitation/mm	49	全盐 Total dissolved salts/%	0.48
蒸发量 Evaporation capacity/mm	3139.5	有机质 Soil organic matter/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	10.60
日照时数 Hours of sunshine/h	3270	速效氮 Available nitrogen/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	88.20
无霜期 Frost-free period/d	154	速效磷 Available phosphorus/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	13.24
土层深度 Soil depth /cm	0~20	速效钾 Available potassium/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	119.95

1.2 试验设计

供试饲用玉米品种为‘武农科 1 号’(*Zea mays* ‘Wunongke No. 1’),试验设 4 个处理,即 T_0 :对照,不施盐碱土改良剂; T_1 :新型盐碱土改良剂—秸秆颗粒肥(颗粒),以玉米芯为主要原料,添加了 N,P,K 等营养元素及聚丙烯酰胺保水剂,经机械压缩造粒为颗粒状肥料,pH 值 6.0~7.0,施用量 $1500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,

由甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所提供; T_2 :免申耕(水剂),主要成分月桂醇乙氧基硫酸铵 $\geq 250 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、腐植酸 $\geq 5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 值 6.5~6.8,施用量 $30\,000 \text{ mL}\cdot\text{hm}^{-2}$,由成都新朝阳生物化学有限公司提供; T_3 :禾康(水剂),含聚马来酸 $1.1\sim 1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、固形物 $350\sim 430 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 值 2.0~3.0,施用量 $30\,000 \text{ mL}\cdot\text{hm}^{-2}$,由北京飞鹰绿地

科技发展有限公司提供。

试验采用随机区组设计,3次重复,小区面积为 176.4 m^2 (长 $\times$ 宽 $=49.0\text{ m}\times3.6\text{ m}$)。玉米播种前, T_1 撒施于地面, T_2 和 T_3 按 $30\,000\text{ mL}\cdot\text{hm}^{-2}$ 用量加水稀释100倍溶液均匀喷施于地面, T_0 按等量清水均匀喷施于地面。2023年5月10日采用宽窄行播种,宽、窄行距分别为80,30 cm,每膜种植4行玉米,株距26 cm,保苗 $90\,000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,灌溉采用大水漫灌,全生育期灌水4~6次,其余田间管理同当地大田。

2023年6月中旬、8月中旬、10月中旬,按“S”型采集0~20,20~40,40~60,60~80,80~100 cm土层土样,待自然风干后分别过1 mm和0.25 mm筛,其中土壤养分只测定0~20 cm土层,pH值、全盐和8大离子含量则测定所有土层。于青贮玉米籽粒乳线下降至籽粒1/2处时取样测定不同处理饲用玉米产量。

1.3 测定指标及方法

土壤测定参考鲍士旦^[16]的方法,有机质(Soil organic matter, SOM)、速效氮(Available nitrogen, AN)、速效磷(Available phosphorus, AP)、速效钾(Available potassium, AK)分别采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法、碱解扩散法、 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法、 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定。

pH值为土水比1:5悬液用pHS-4智能酸度计测定,全盐用电导法测定, K^+ 、 Na^+ 用火焰光度计法测定, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 用EDTA络合滴定法测定, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 用 H_2SO_4 滴定法测定, SO_4^{2-} 用 BaSO_4 比色法测定, Cl^- 用 AgNO_3 滴定法测定。

株高和茎粗:玉米收获前,每小区随机取10株,分别使用卷尺和游标卡尺测定。

鲜草产量:取样面积为 30 m^2 ,从地上部20 cm处全株收割,立即称重为鲜重。

1.4 数据统计分析

使用Excel 2019和SPSS 26.0软件进行数据整理分析,Origin 2024软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同盐碱土改良剂对饲用玉米生长特性的影响

由图1可知,与 T_0 相比,不同处理下玉米茎粗(除 T_2 外)、株高和鲜草产量均显著升高($P<0.05$)。不同处理下,茎粗和鲜草产量均表现为 $T_1>T_3>T_2>T_0$,株高为 $T_1>T_2>T_3>T_0$,其茎粗、鲜草产量和株高分别较 T_0 提高了7.68~33.47%,40.70~72.28%,26.98~56.02%。

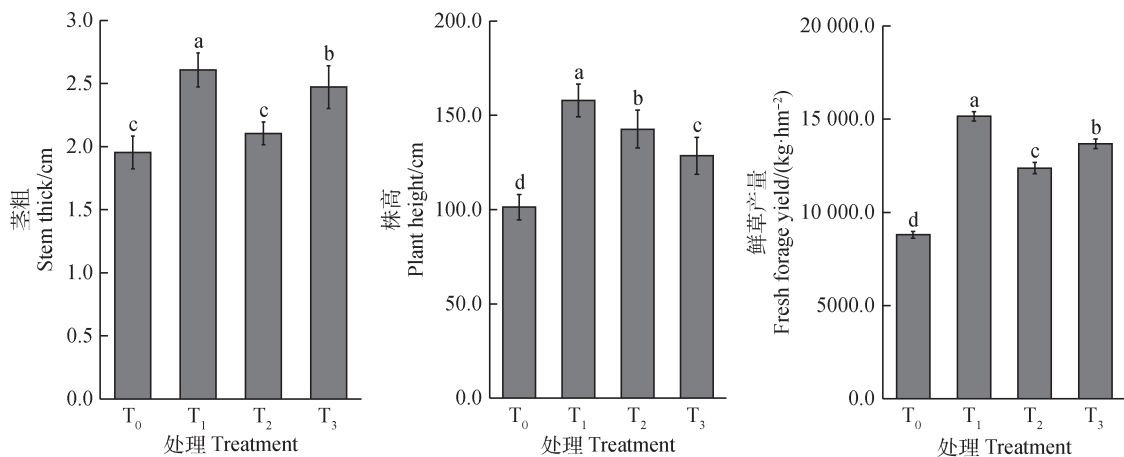


图1 不同处理茎粗、株高和鲜草产量变化

Fig. 1 Changes of stem diameter, plant height and fresh forage yield under different treatments

2.2 不同盐碱土改良剂对土壤养分的影响

由图2可知,不同月份间,土壤SOM(除 T_1 外)、AN、AP和AK含量均在6月份最高,10月份次之,8月份最小。同一月份不同处理间,SOM和AN含量均值表现为 $T_1>T_3>T_2>T_0$,AP、AK含量均值表现为 T_1

$>T_2>T_3>T_0$,与 T_0 相比, T_1 处理土壤SOM(除10月外)、AN、AP和AK含量显著升高($P<0.05$),不同处理SOM含量较 T_0 提高了1.91%~17.76%,AN增加了3.00%~29.42%,AP含量上升了21.68%~244.59%,AK含量提升了3.47%~11.61%。

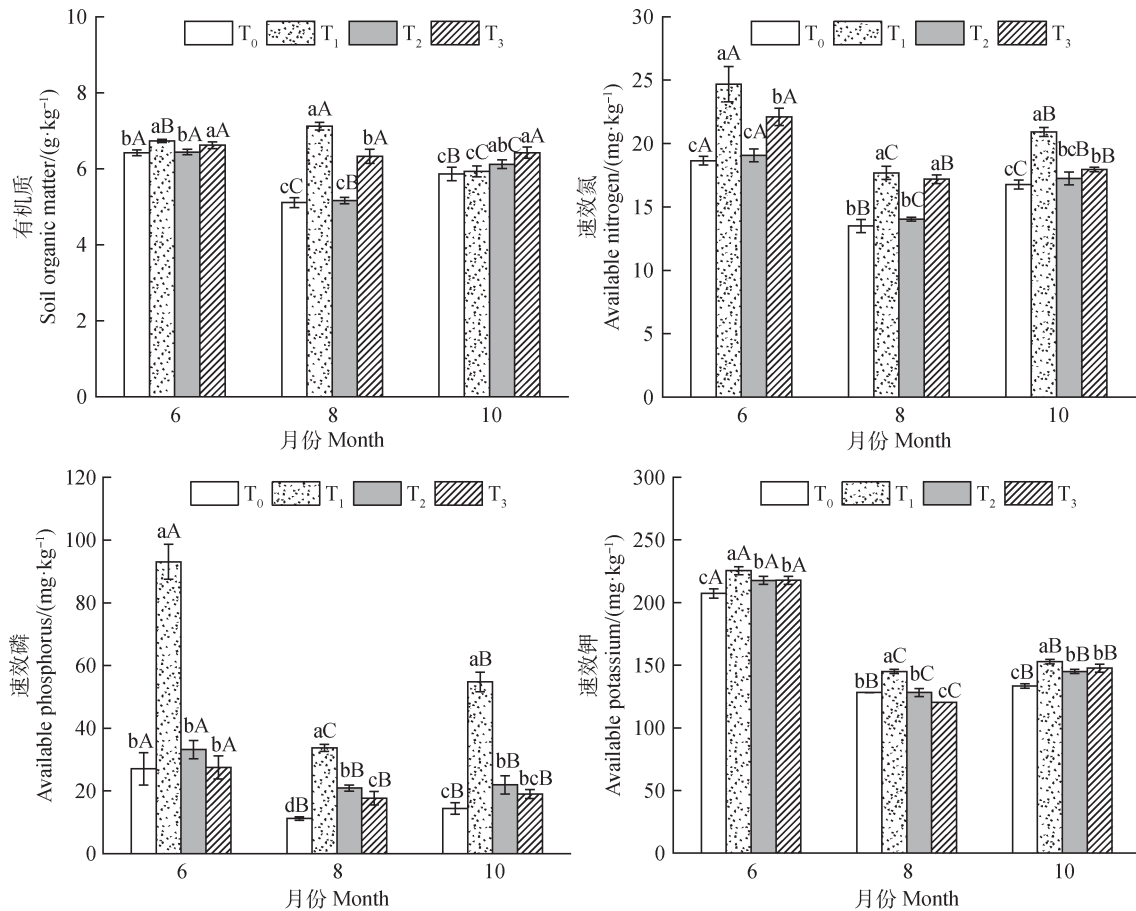


图 2 不同处理下土壤养分含量变化

Fig. 2 Changes of soil nutrient content under different treatments

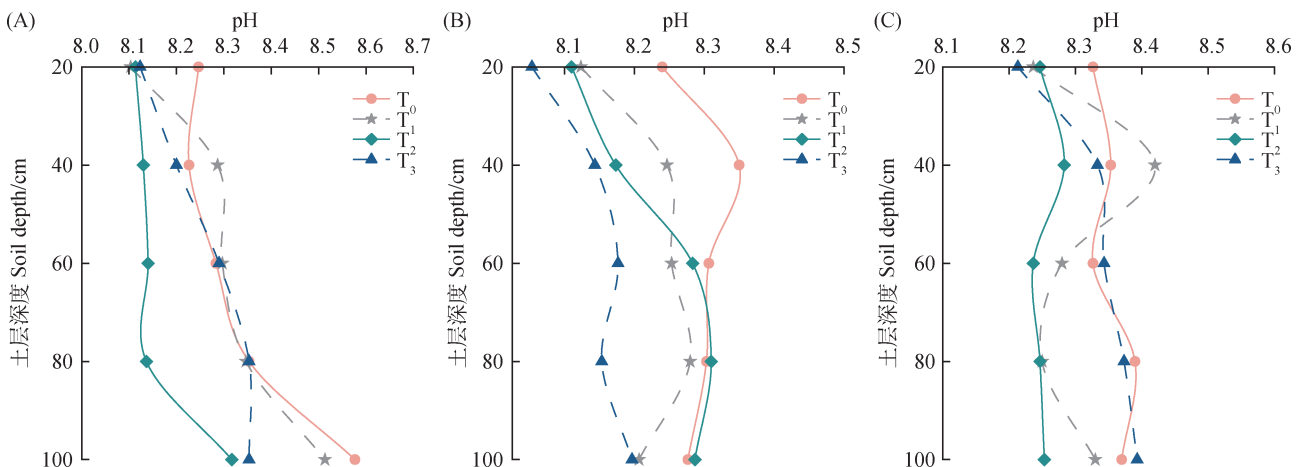
注:不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著($P < 0.05$),大写字母表示同一处理不同月份间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters represent significant differences among different treatments in the same month, and capital letters show significant differences in different months in the same treatment ($P < 0.05$)

2.3 不同盐碱土改良剂对土壤 pH 和全盐含量的影响

由图 3 可知,在 6—10 月,随时间推移,土壤表层(0~20 cm) pH 值和全盐含量均呈先降后升趋势。不同土层间,各处理土壤 pH 和全盐含量均随土层加深而增大。0~20 cm 土层,土壤 pH 值 T₃ 处理较

T₀ 显著降低 ($P < 0.05$), 月均土壤 pH 值表现为 $T_0 > T_1 > T_3 > T_2$, 各处理较 T₀ 降低了 0.61%~1.35%; T₁, T₂, T₃ 处理全盐含量显著低于 T₀ ($P < 0.05$), 月均全盐含量表现为 $T_0 > T_1 > T_2 > T_3$, 各处理较 T₀ 下降了 28.37%~30.38%。



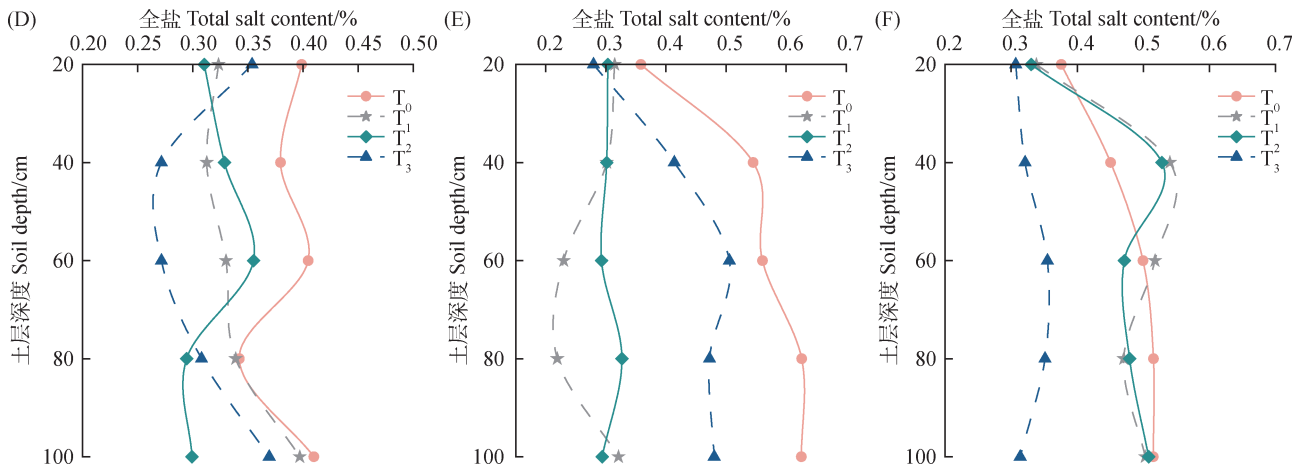


图3 不同处理土壤pH和全盐含量变化

Fig. 3 Changes of pH and total salt content in different soil depth under different treatments

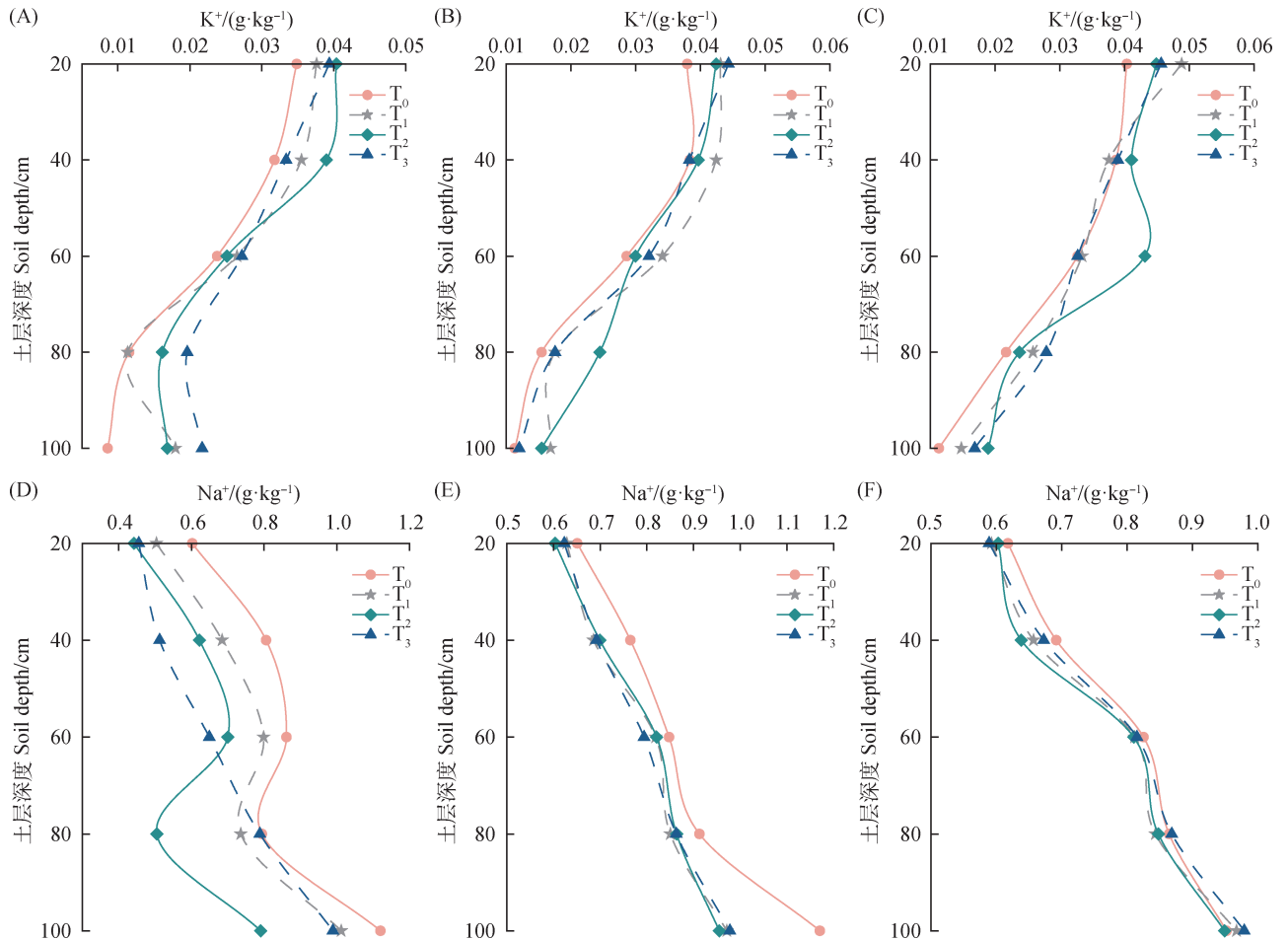
注:图A,D代表6月,B,E代表8月,C,F代表10月

Note: Panels A and D correspond to June; panels B and E correspond to August; panels C and F correspond to October

2.4 不同盐碱土改良剂对土壤盐离子的影响

由图4可知,0~20 cm土层,不同处理下土壤剖面 K^+ 含量显著高于 T_0 ($P < 0.05$), Na^+ 含量显著低于 T_0 ($P < 0.05$)。其中, K^+ 含量月均表现为 $T_1 > T_3 > T_2 > T_0$,较 T_0 增加了12.84%~14.45%; Na^+ 含

量月均表现为 $T_0 > T_2 > T_3 > T_1$,各处理较 T_0 降低了8.48%~13.53%。随土层加深, K^+ 含量降低, Na^+ 含量升高。不同月份间,土壤剖面可溶性 K^+ 含量表现为10月>8月>6月, Na^+ 含量表现为8月>10月>6月。



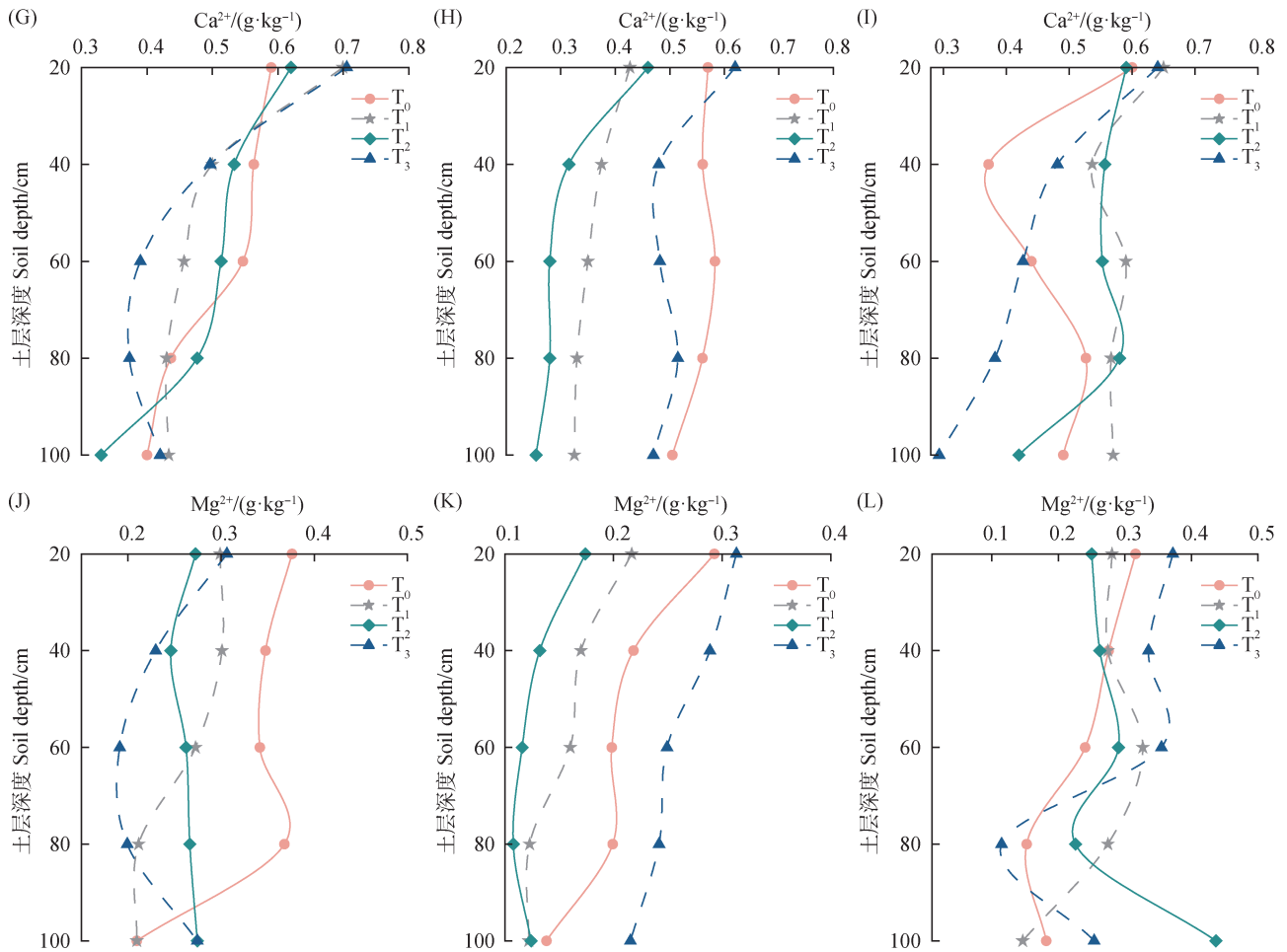


图4 不同处理土壤剖面阳离子含量变化

Fig. 4 The change of cation content in different soil depth under different treatments

注:图A,D,G,J代表6月,B,E,H,K代表8月,C,F,I,L代表10月

Note: Panels A, D, G, J correspond to June; panels B, E, H, K correspond to August; panels C, F, I, L correspond to October

0~20 cm 土层,不同处理 Ca^{2+} 含量6月表现为 $T_3 > T_1 > T_2 > T_0$, 8月表现为 $T_3 > T_0 > T_2 > T_1$, 10月表现为 $T_1 > T_3 > T_0 > T_2$, 月均表现为 $T_3 > T_0 = T_1 > T_2$, T_3 较 T_0 增加 11.70%。不同处理间,除8月、10月 T_3 处理外, Mg^{2+} 含量均低于 T_0 , 月均 $T_3 > T_0 > T_1 > T_2$, T_2 含量最低,较 T_0 降低 41.38%。随土层加深, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量总体上呈降低趋势。在6—10月,随时间推移, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量总体上表现为6月含量最高,10月次之,8月含量最低。

由图5可知,0~20 cm,不同处理间 Cl^- 含量月均表现为 $T_1 > T_3 > T_0 > T_2$, T_2 较 T_0 减小 37.75%; 月均 SO_4^{2-} 含量表现为 $T_0 > T_3 > T_1 > T_2$, T_2 较 T_0 减小 10.81%; HCO_3^- 月均表现为 $T_0 > T_2 > T_1 > T_3$, T_3 较 T_0 减小 10.02%。随土层加深, Cl^- 基本呈升高趋势, SO_4^{2-} 含量无明显规律, HCO_3^- 含量降低。在6—10月,随时间推移,土壤剖面 Cl^- , SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量均呈降低趋势, CO_3^{2-} 含量低未被检测出。

3 讨论

3.1 不同处理对饲用玉米生长特性的影响

施用适量土壤改良剂有益于农作物生长,可提高其产量和经济效益^[17]。郭世乾等^[18]研究表明,施用免耕土壤调理剂可有效促进植物生长,产量增幅达 33.2~46.52%。刘萍等^[19]研究表明,施用“禾康”(主要成分聚马来酸)和“康地宝”(主要成分柠檬酸)土壤调理剂均可提高棉花(*Gossypium hirsutum*)株高和产量。张恩等^[20]研究显示,施用‘脱硫石膏+新型改良剂+有机肥’处理可显著提升不同生育时期玉米株高、茎粗和产量。本研究中, T_1 , T_2 和 T_3 处理下玉米茎粗、株高和鲜草产量均高于 T_0 , 这与前人研究结果一致^[21], 说明土壤改良剂能够在改善土壤质量的同时保持作物增产,对土壤生态和农业经济可持续发展有积极作用;不同处理下, T_1 增产效果最好,这可能是因为秸秆颗粒肥可通过提供养分,更有效地改善土壤理化性质,为作物生长创造了更有利的环境^[22]。

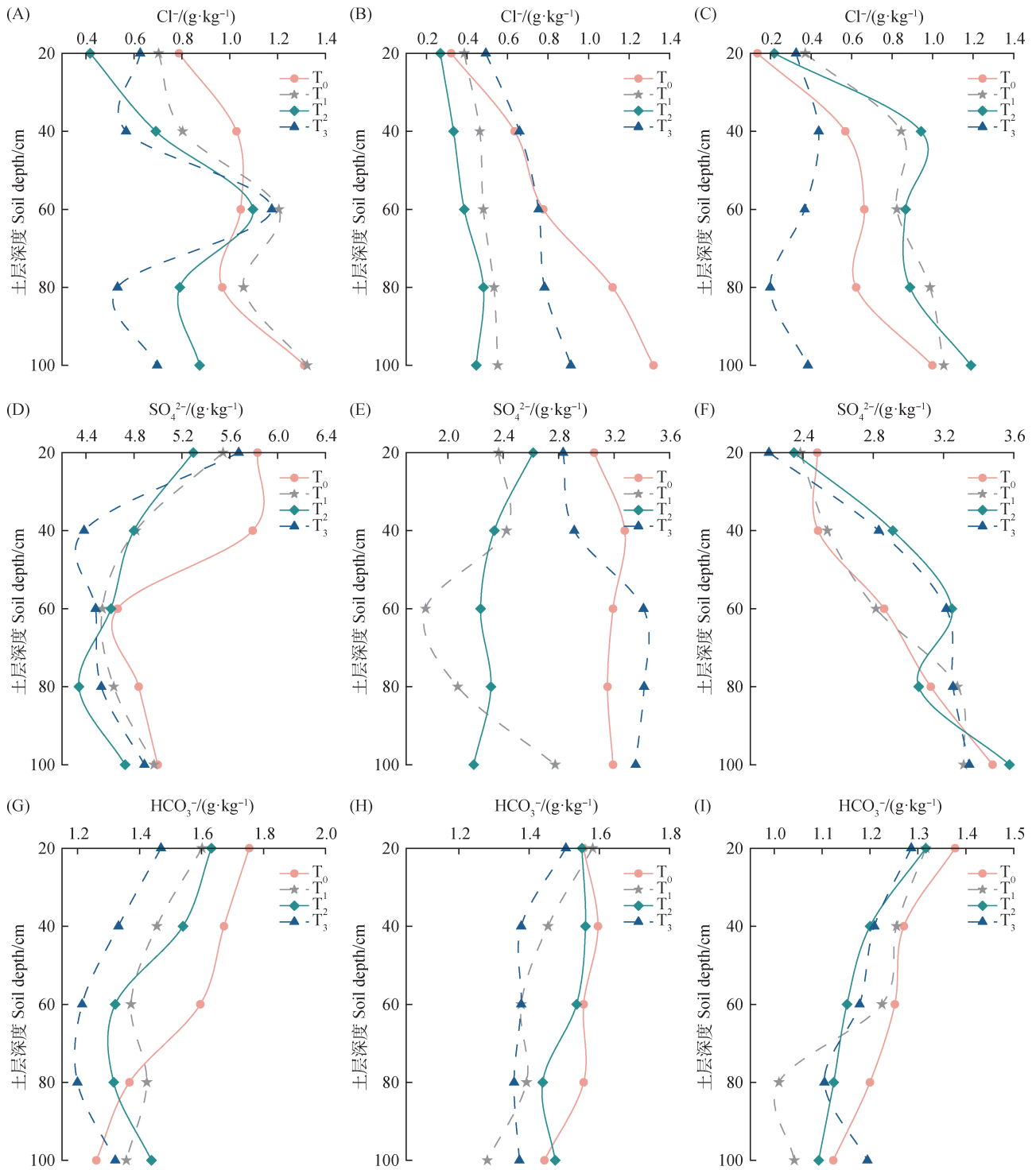


图5 不同处理土壤剖面阴离子含量变化

Fig. 5 Changes of anion contents in different soil depth under different treatments

注:图A,D,G代表6月,B,E,H代表8月,C,F,I代表10月

Note: Panels A, D, G correspond to June; panels B, E, H correspond to August; panels C, F, I correspond to October.

3.2 不同处理对土壤养分含量的影响

土壤速效养分含量高低可直接反映土壤矿质元素能被植物吸收转化能力大小,也可反映管理水平高低^[23]。本研究中,随着月份变化,AN,AP,AK含量呈现先降后升趋势,这与Ravishankara等^[24]研

究相符,这可能是与气候变化、植物生长周期及土壤微生物活动有关^[25]。6月份气温适宜,植物生长旺盛,根系分泌物增多,土壤微生物活性高,有利于土壤腐殖质的分解和养分的释放,从而使土壤养分含量达到峰值;8月份温度进一步增强,蒸发强烈,

土壤含水量低,导致其养分含量降低;10月份玉米进入收获期,生长逐渐减缓,有机物质开始积累,对土壤养分的消耗减少,使土壤养分含量有所上升^[26]。 T_1 处理的SOM含量均表现为8月最高, T_2 、 T_3 处理则6月含量最高,可能是相对于水剂,秸秆颗粒与土壤接触不充分,降解缓慢,前期含量低,降解后养分释放到土壤中,使土壤中碳源显著提高,SOM含量增加^[27]。

本研究中,不同处理间土壤SOM、AN、AP和AK含量均显著高于 T_0 ,且以 T_1 效果最好。这可能是因为施加秸秆颗粒肥显著提高土壤SOM含量,还可通过改善土壤结构、促进微生物活性,加速土壤养分的矿化与转化过程,导致土壤AN、AP、AK含量的积累^[9]。

3.3 不同处理对土壤pH、全盐和盐分离子的影响

土壤pH和全盐含量是反映土壤盐碱化程度的关键指标。已有研究表明,土壤改良剂可调节不同类型土壤的酸碱平衡,并显著降低土壤中的盐分含量^[28]。本研究中,不同土壤改良剂较对照(T_0)均降低了不同月份的土壤pH和全盐含量,且禾康和免申耕的效果优于秸秆颗粒肥。这可能是秸秆颗粒肥中含有大量的有机物质,其与土壤胶体结合,改变了表面电荷分布,导致土壤胶体对 H^+ 的吸附能力降低,对碱性阳离子的吸附增加,同时秸秆颗粒肥分解时会产生一些碱性物质,从而使土壤pH较高^[29]。10月各处理土壤pH值与全盐含量均呈上升趋势,其原因可能是后期降水减少、蒸发速率增强,导致水分流失而产生盐分富集效应^[30]。

本研究中,土壤阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主,阴离子以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 为主,这与魏兆辉等^[31]研究一致。在6—10月,随时间推移,不同离子的变化趋势各异,此现象与吕雯改等^[32]研究结果相符。其中, K^+ 含量增加, Na^+ 含量降低,且 T_1 处理对 K^+ 含量增加最显著, T_2 处理对 Na^+ 含量减少最显著,这是因为秸秆颗粒肥本身钾含量丰富,能缓慢释钾,通过改善土壤结构,促进微生物活动,风化矿物也会增钾^[33],免申耕能改善土壤团聚体结构,增加土壤孔隙度,促进 Na^+ 随水分淋溶排出^[34]。 T_3 处理的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 均为最高,可能是禾康的酸性成分促进矿物溶解,增强离子交换,直接补充钙镁,并活化微生物释放结合态钙镁^[35]。不同处理间, Cl^- 和 SO_4^{2-} 没有明显规律,这可能与不同改良剂对土壤结构的改善

程度不同,导致离子淋溶效率不一,影响了 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的迁移^[36]。不同处理下 HCO_3^- 整体低于 T_0 ,可能与外源物质输入降低土壤pH,促进碳酸盐分解,加快 HCO_3^- 淋溶,微生物活动或有机质分解产生的酸性代谢物中和消耗了部分 HCO_3^- ,因而含量降低^[37]。此外,本研究仅为一年期试验,缺乏验证,是本研究的不足之处,后续应开展多年期研究,明确土壤改良剂对土壤盐分动态、养分平衡的长期改良效果。

4 结论

在6—10月,随时间推移,土壤有机质(除 T_1 外)、速效氮、速效磷、速效钾、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、pH值和全盐含量均呈先降后升趋势, Na^+ 呈先升后降趋势, K^+ 呈递增趋势, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量均呈递减趋势。随着土层加深,土壤pH、全盐、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量升高, K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 含量降低。其中,0—20 cm土层, T_1 处理对土壤有机质、速效氮、速效磷、速效钾、 K^+ 的提升效果均最显著,对玉米茎粗、株高和鲜草产量增幅最大。综上,秸秆颗粒肥施用效果最好,可为盐碱地改良提供理论参考。

参考文献

- [1] LIU F, WU H Y, ZHAO Y G, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(3): 328-340
- [2] 魏盈, 焦乐, 张鹏, 等. 生物炭改良盐碱地研究与应用进展[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 940-951
WEI Y, JIAO L, ZHANG P, et al. Research and application progress of biochar in amelioration of saline-alkali soil[J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 940-951
- [3] PORCEL R, AROCA R, RUIZ-LOZANO J M. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32(1): 181-200
- [4] 高放, 洪煜, 孙燕, 等. 秸秆还田对盐碱地土壤有机碳库及其组分影响的研究进展[J]. 华北农学报, 2024, 39(S1): 143-149
GAO F, HONG Y, SUN Y, et al. Progress of research on the effect of straw return on soil organic carbon pools and its fractions in saline-alkali soils[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2024, 39(Sup1): 143-149
- [5] NAN L, GUO Q, CAO S. Archaeal community diversity in different types of saline-alkali soil in arid regions of Northwest China[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2020, 130(4): 382-389
- [6] 董艳, 章慧, 张慧芸, 等. 西北旱区农业水土资源空间变异特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 205-209

- DONG Y, ZHANG H, ZHANG H H, et al. Spatial variability of agricultural water and soil resources of northwest arid area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 205-209
- [7] 唐夫凯, 齐丹卉, 卢琦, 等. 中国西北地区农林复合经营的保护与发展[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1429-1439
- TANG F K, QI D H, LU Q, et al. Strategies of conservation and development of agroforestry ecosystem in northwest China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1429-1439
- [8] 合佳敏, 张永清, 梁萍, 等. 盐碱地施用脱硫石膏后藜麦生长生理特性及产量分析[J]. *草业科学*, 2025, 42(1): 152-161
- HE J M, ZHANG Y Q, LIANG P, et al. Growth, physiological characteristics, and yield of quinoa after application of desulfurized gypsum in saline-alkali land [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(1): 152-161
- [9] 张莉, 王婧, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1770-1778
- ZHANG L, WANG J, PANG H C, et al. Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1770-1778
- [10] 马林, 师伟杰, 丁亮, 等. 土壤调理剂对盐化潮土理化性状及玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2017, 6(03): 180-184
- MA L, SHI W J, DING L, et al. Effects of soil conditioner on salinized fluvo-aquic soil physio-chemical properties and maize yield [J]. *Soils and Crops*, 2017, 6(03): 180-184
- [11] 许世奇, 何彦臻, 李瑞, 等. 不同改良剂对盐渍土西瓜耐盐性和生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(10): 2301-2312
- XU S Q, HE Y Z, LI R, et al. Effects of different amendments on salt tolerance and growth of watermelon in saline soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2301-2312
- [12] 柳永强, 马廷蕊, 王方, 等. 马铃薯对盐碱土壤的反应和适应性研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(6): 1388-1392
- LIU Y Q, MA T R, WANG F, et al. Physiological response and adaptive capacity of potato to saline-alkali soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(6): 1388-1392
- [13] 冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 等. 不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1759-1767
- JI Z Y, ZHOU J X, ZHANG H, et al. Effect of soil conditioners on the soil chemical properties and organic carbon pool of saline-sodic soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1759-1767
- [14] 孙盛楠, 严学兵, 尹飞虎. 我国沿海滩涂盐碱地改良与综合利用现状与展望[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 1-13
- SUN S N, YAN X B, YIN F H. Current situation and prospect of improvement and comprehensive utilization for saline-alkali land of coastal tidal flats in China [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 1-13
- [15] 宋明璇, 周晨辉, 闫丙建, 等. 改良剂与沼液配施对中度苏打盐碱土的改良效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(1): 43-50
- SONG M X, ZHOU C H, YAN B J, et al. Study on improvement effects of combined application of amendment and biogas slurry on moderate soda salinealkali soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(1): 43-50
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114
- BAO S D. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25-114
- [17] 纪立东, 柳晓桐, 司海丽, 等. 生物炭对土壤理化性质和玉米生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(5): 114-120
- JI L D, LIU X T, SI H L, et al. Effects of biomass charcoal on soil physicochemical properties and corn growth [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(5): 114-120
- [18] 郭世乾, 崔增团, 刘好, 等. 甘肃省盐碱地改良技术模式试验研究[J]. *农业科技与信息*, 2013(14): 24-25
- GUP S Q, CUI Z T, LIU Y, et al. Experimental study on improvement technology model of saline-alkali land in Gansu province [J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2013(14): 24-25
- [19] 刘萍, 日孜旺古力·阿不都热合曼, 吴久赞, 等. 土壤调理剂对棉花生长发育及产量的影响[J]. *新疆农业科技*, 2023(3): 16-19
- LIU P, ABUDUREHEMAN R, WU J Y, et al. Effects of soil conditioner on growth and yield of cotton [J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2023, (3): 16-19
- [20] 张恩, 王彬, 白小龙, 等. 不同改良物料对内蒙河套平原盐碱土壤改良效果研究[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(32): 44-49
- ZHANG E, WANG B, BAI X L, et al. Effect of different modified materials on improvement of saline-alkali Soil in Hetao pPlain, Inner Mongolia [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(32): 44-49
- [21] 叶静, 陈影, 屈爽, 等. 不同微生物菌肥对滨海盐渍土土壤质量及玉米产量的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(7): 4279-4292
- YE J, CHEN Y, QU S, et al. Effects of different microbial fertilizers on soil quality and maize yield in coastal saline soil [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4279-4292
- [22] 牟云芳, 史海滨, 闫建文, 等. 秸秆和氮肥耦合管控对盐碱化土壤地力综合效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(8): 1771-1785
- MU Y F, SHI H B, YAN, et al. Effects of coupling control of straw and nitrogen fertilizer on comprehensive effect of soil fertility in salinized soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(8): 1771-1785
- [23] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 1839-1850
- HU H Q, LUO S S, LUO B Z, et al. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon in forest ecosystems: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1839-1850
- [24] RAVISHANKARA A R, DANIEL J S, PORTMANN R W. Nitrous Oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century [J]. *Science*, 2009, 326

- (5949):123-125
- [25] 史帆,李文广,易树生,等. 有机无机肥配施下旱地麦田土壤有机碳组分含量的变化特征[J]. 中国农业科学,2025,58(4):719-732
- SHI F, LI W G, YI S S, et al. The variation characteristics of soil organic carbon fractions under the combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(4):719-732
- [26] 罗玲,钟奇,刘伟,等. 地面覆盖对避雨葡萄园土壤水分、温度及酶活性的影响[J]. 核农学报,2020,34(12):2839-2849
- LUO L, ZHONG Q, LIU W, et al. Effects of mulching on soil moisture, temperature and enzyme activities in rain-sheltered vineyard[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(12):2839-2849
- [27] 郎冬梅,宫诚,朱紫檀,等. 麦秸配施纤维素降解细菌对果园土壤有机碳库及生化特性的影响[J]. 土壤通报,2023,54(2):317-327
- LANG D M, GONG C, ZHU ZI T, et al. Effects of the combined application of wheat straw and cellulose degrading bacteria on soil organic carbon pool and biochemical properties in orchards[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2):317-327
- [28] 余高,赵仕龙,孙约兵,等. 覆盖材料对云贵高原柑橘园土壤理化性质和细菌群落特征以及柑橘品质的影响[J]. 生态学报,2024,44(8):3408-3422
- YU G, ZHAO S L, SUN Y B, et al. Effects of mulching materials on soil physio-chemical properties, bacterial community characteristics, and citrus quality in orange orchards on the Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8):3408-3422
- [29] 刘玲,苏莹,王洪杰,等. 芦苇基外源碳输入对土壤性质及有机碳矿化的影响[J]. 水土保持通报,2024,44(5):251-261
- LIU L, SU Y, WANG H J, et al. Effects of reed-based exogenous carbon input on soil properties and organic carbon mineralization[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(5):251-261
- [30] 程万莉,郭帅杰,蔡立群,等. 河西绿洲灌区土壤调理剂改良盐碱土的效果初探[J]. 寒旱农业科学,2023,2(2):131-138
- CHENG W L, GUO S J, CAI L Q, et al. Preliminary study on the effects of soil conditioners on saline-alkali soil improvement in Hexi oasis irrigation area[J]. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2023, 2(2):131-138
- [31] 魏兆辉,武均,蔡立群,等. 不同改良措施对甘肃邓马营湖盐碱区农田土壤水溶性离子的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021,(5):156-162
- WEI Z H, WU J, CAI L Q, et al. Effects of different improvement measures on water-soluble ions of farmland soil in the saline-alkali area of Dengmaying Lake, Gansu province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021, (5):156-162
- [32] 吕雯改,江宇威,马兴羽,等. 昆仑山北坡车尔臣河流域平原区地表水和地下水水化学特征[J]. 干旱区地理,2024,47(10):1617-1627
- LÜ W G, JIANG Y W, MA X Y, et al. Chemical characteristics of surface water and groundwater in plain area of the Qargan River Basin on the north slope of Kunlun Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(10):1617-1627
- [33] 盛丰,沈新霞,盛鑫斌. 不同粉碎程度的秸秆还田对红壤理化性质和水流运动特征的影响[J]. 水土保持研究,2025,32(2):131-139
- SHENG F, SHEN X X, SHENG X B. Effects of the returned straws with different crushing degrees on the physical and chemical properties and water flow characteristics of red soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):131-139
- [34] 佟长福,侯洪飞,李瑞平,等. 保水剂和蒸腾抑制剂对玉米生长和水肥耦合的影响[J]. 节水灌溉,2024(6):63-68,76
- TONG C F, HOU H X, LI R P, et al. Effects of water-holding agent and transpiration inhibitor on growth and water-fertilizer coupling in maize[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(6):63-68,76
- [35] 范贝贝,丁帅,张田田,等. 周期性淹水-落干和施用秸秆对白云石改良棕壤磷素流失风险的模拟研究[J]. 生态环境学报,2024,33(8):1203-1213
- FAN B B, DING S, ZHANG T T, et al. Simulation study on phosphorus loss risk with periodic flooding-drying and straw incorporation in a dolomite-amended brown soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(8):1203-1213
- [36] 郭丽琢,陈文涛,高玉红,等. 不同改良剂对土壤盐碱化特性及燕麦生物排盐作用的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(12):1619-1629
- GUO L Z, CHEN W T, GAO T H, et al. Effects of amendments on soil salinization characteristics and biological salt removal of oat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(12):1619-1629
- [37] 张洋,李素艳,孙向阳,等. 不同改良剂对滨海盐渍土的改良效果[J]. 灌溉排水学报,2016,35(5):67-73
- ZHANG Y, LI S Y, SUN X Y, et al. Improvement effects of different amendments on the coastal saline-alkali soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(5):67-73

(责任编辑 付宸)