

樊丽琴,沈婧丽,王旭,等.石膏配施有机物料对碱化盐土及玉米生长的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(4):79-87.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.008

石膏配施有机物料对碱化盐土及玉米生长的影响

樊丽琴,沈婧丽,王旭,吴霞,陈文茜

宁夏农林科学院农业资源与环境研究所/国家农业环境银川观测试验站,银川 750002

摘要 为探索重度盐碱地的节水降碱培肥技术,针对旱区碱化盐土盐碱并重、淡水资源短缺、作物生长困难的实际问题,选取有机肥、玉米秸秆、糠醛渣和生物炭4种有机物料与脱硫石膏配施,以无任何改良物料的处理为对照,在宁夏惠农区通过桶栽试验研究微咸水滴灌下石膏配施有机物料对碱化盐土性质及玉米生长的影响。结果表明:施用石膏增加了土壤交换性钙含量,有效降低土壤电导率和pH,电导率降幅为28.3%~57.9%,土壤全氮、碱解氮、速效钾、有机碳含量显著降低,但翌年春季单施石膏下土壤电导率会增加,土壤有效磷含量降低。在施用石膏和有机肥的基础上,配施0.56%的糠醛渣或生物炭可进一步降低土壤电导率并增加交换性钙含量,维持土壤全氮和速效钾含量不降低,显著增加土壤有机碳、碱解氮、有效磷含量。在施用石膏和有机肥的基础上,配施0.56%的糠醛渣在减轻翌年土壤盐碱危害,增加土壤有机碳、全氮、有效磷和阳离子交换量方面效果显著,可促进玉米株高和茎粗增加,增加玉米生物量。因糠醛渣比生物炭有更好的经济性,因此,脱硫石膏配施有机肥和糠醛渣适宜于改良碱化盐土。

关键词 碱化盐土;有机肥;糠醛渣;生物炭;脱硫石膏;玉米

中图分类号 S287 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0079-09

土壤盐碱化是造成土壤退化、粮食减产、影响农林生态健康的因素之一。我国盐碱地面积近1亿 hm^2 ,其中有3 300万 hm^2 具备开发潜力,主要分布在华北、东北、滨海及西北内陆干旱地区^[1-3]。宁夏地处我国西北内陆干旱区,北部引黄灌区具有蒸发量大、降水量少、地下水位高、盐分上移占优势等鲜明特征,导致土壤盐碱化严重,盐碱化耕地面积达14万 hm^2 ,占耕地总面积的1/3^[4]。盐碱地开发利用对保障国家粮食安全、守牢1.2亿 hm^2 耕地红线具有重要战略意义。然而干旱半干旱地区农业可持续发展面临淡水资源短缺、土壤肥力低下、盐渍化加剧等困境,因此,研发微咸水灌溉下的土壤降碱培肥技术具有重要的现实意义。

施用石膏在土壤降碱排盐、降低土壤交换性 Na^+ 含量、促进植物生长发育方面具有显著效果^[5-7]。利用微咸水灌溉和石膏改碱技术形成的“石膏-微咸水”复合灌溉技术,能降低土壤中 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 含量,提高 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量,实现淋盐改碱的双重效

果^[8-10]。通过有机物料的施用可减轻微咸水灌溉带来的不利影响,为作物生长提供适宜的环境。秸秆、有机肥、生物炭、糠醛渣是常用的有机物料,可改善土壤物理性质和水盐状况^[11-12]。施用有机肥可提高土壤肥力、降低耕层土壤盐分含量,提高耕地质量,但需要长期大量施用才能显现出效果来^[13-14]。生物炭可降低土壤容重提高土壤有机碳含量,在提高阳离子交换量和有机质方面有较好的效果,而且随施用量增加效果更显著^[15-17]。糠醛渣是生物质水解过程中产生的废弃物,含有大量的纤维素、半纤维素、木质素,pH值通常为3~4,呈酸性,既可降低土壤pH值,还可提高土壤缓冲性能、提升养分库容^[18]。但有研究指出,糠醛渣施用量会导致土壤盐分增多^[19]。孙军娜等^[20]通过室内模拟试验研究,发现在降低土壤pH值和提高土壤有效磷方面,糠醛渣作用较为显著,且与施用量呈正相关;而在提高土壤总有机碳含量、降低土壤碱化度方面,生物炭优于糠醛渣。在宁夏银北中重度盐碱地分布区,土壤 Na^+ 含量高,有机

收稿日期:2024-12-12

基金项目:宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-11-03);宁夏回族自治区重点研发项目(2023BCF01050);农业基础性长期性科技工作观测监测(NAES091AE18)

樊丽琴,E-mail: fanlqnx@126.com

通信作者:王旭,E-mail: wangxu640321@126.com

质含量低,且农业灌溉淡水资源紧缺,但地下水、农田退水等微咸水资源相对丰富,如何科学利用微咸水配施改良物料是消除当地盐碱障碍亟待突破的瓶颈。

以往研究多关注石膏或有机物料单独施用对土壤性质^[5,13]及微咸水灌溉对盐碱土壤的影响^[10],但微咸水滴灌下石膏配施不同有机物料对旱区碱化盐土及作物生长的影响还有待进一步研究。为此,本研究在宁夏惠农区,通过桶栽玉米试验研究微咸水滴灌下石膏配施有机物料对碱化盐土及玉米生长的影响,旨在为宁夏中重度盐碱地的节灌改良和高效生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及试验材料

供试土样采自宁夏石嘴山市惠农区燕子墩乡海燕村(39°03'N, 106°54'E)典型碱化盐土, 0~20、20~40 cm 土层电导率分别为 3.68、1.51 mS/cm, pH 分别为 8.78、9.52, 阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)分别为 12.05、12.39 cmol/kg, 土壤有机碳和全氮为 6.35 g/kg 和 0.54 g/kg, 土壤质地为砂质壤土, 土壤容重为 1.64 g/cm³。每 10 cm 为一层采集土样, 直至 40 cm 深, 每层均自然晾干后研磨过 3 mm 筛, 其中 0~10 和 10~20 cm 土层土壤混匀为 0~20 cm 土层备用。

脱硫石膏为燃煤电厂脱硫废弃物, 其 pH 为 7.85, CaSO₄·2H₂O、CaCO₃ 和 MgO 含量分别为 79.8%、5.46% 和 1.48%。有机肥为腐熟奶牛粪, 有机质含量为 34.0%, 总养分(N+P₂O₅+K₂O)为 5.0%, pH 为 7.7; 玉米秸秆的有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为 426.42、8.56、3.28 和 11.20 g/kg; 生物炭为玉米秸秆 550 °C 缺氧条件下制备, 其 pH 为 8.98, 有机碳 467.35 g/kg, 全氮 10.25 g/kg; 糠醛渣为玉米芯水解过程中产生的废弃物, pH 3.5, 有机碳、全氮和有效磷分别为 332.85、7.48 和 0.46 g/kg, 交换性钠、交换性钾、交换性钙和交换性镁分别为 265.74、745.28、191.54 和 78.32 mg/kg。

1.2 试验设计

试验使用直径 42 cm、高度 45 cm 的塑料桶, 底部均匀打有 7 个小孔, 以调节下层土壤通气状况和水分条件。装填土壤时由下而上分层装填土壤, 每次装填厚度为 5 cm, 每桶每次装填土壤质量保持一致, 逐层压实完毕用刷毛打毛土壤表层后再装填下一层,

以保证装填土层接触良好, 0~20 cm 土层土壤装填前按试验处理将改良材料与该层土样充分混合后再装填土柱, 对照(CK)未施用任何改良物料直接回填土壤, 共 10 个处理(表 1), 每个处理 4 次重复。装填好的塑料桶埋入土中静置 72 h 后开始试验。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

| 处理 Treatment | 石膏/% Gypsum | 有机肥/% Organic fertilizer | 玉米 秸秆/% Maize straw | 糠醛渣/% Furfural residue | 生物 炭/% Biochar |
|-----------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| CK | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| T1 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| T2 | 0.85 | 1.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| T3 | 0.85 | 1.13 | 0.17 | 0.00 | 0.00 |
| T4 | 0.85 | 1.13 | 0.34 | 0.00 | 0.00 |
| T5 | 0.85 | 1.13 | 0.00 | 0.28 | 0.00 |
| T6 | 0.85 | 1.13 | 0.00 | 0.56 | 0.00 |
| T7 | 0.85 | 1.13 | 0.00 | 0.00 | 0.28 |
| T8 | 0.85 | 1.13 | 0.00 | 0.00 | 0.56 |
| T9 | 0.85 | 1.13 | 0.00 | 0.00 | 0.85 |

注: 改良材料施用量以占 0~20 cm 土层土质量的百分比计。
Note: The application amount of modified materials is measured as a percentage of the soil weight of 0~20 cm soil layer.

改良材料施用量以占 0~20 cm 土层土质量的百分比计, 脱硫石膏施用量 0.85%, 有机肥施用量 1.13%, 玉米秸秆低施用量(玉米秸秆_L)和高施用量(玉米秸秆_H)分别为 0.17% 和 0.34%, 糠醛渣低施用量(糠醛渣_L)和高施用量(糠醛渣_H)分别为 0.28% 和 0.56%, 生物炭低(生物炭_L)、中(生物炭_M)和高(生物炭_H)施用量分别为 0.28%、0.56% 和 0.85%。每桶中间布设滴灌带, 两侧均匀播种 6 粒玉米种子。3~4 叶期时定苗, 滴灌带两侧保留 2 株。玉米苗期采用黄河水滴灌, 7 d 左右滴灌 1 次, 拔节期开始采用农田沟水灌溉, 农田沟中水质见表 2。至玉米抽雄期共滴灌 10 次, 每次灌水量 19~39 mm, 因降雨和玉米生长期而异。

1.3 样品采集与测定指标

桶栽玉米第 1 年苗后 34 d(拔节期)采集 0~20 cm 土样测定土壤电导率、pH、有机碳、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾、交换性钙、可溶性有机碳含量, 苗后 34、44 和 74 d 测定土壤电导率和 pH 值, 苗后 74 d(抽雄期)测定地上和地下生物量鲜质量。翌年播种前(4 月 15 日)采集 0~20 cm 土样测定土壤电导率、

| 表 2 微咸水水质 | | | |
|--|------------|--------------------|------------|
| Table 2 Mildly brackish water quality | | | |
| 指标 Item | 含量 Content | 指标 Item | 含量 Content |
| HCO ₃ ⁻ /(mg/kg) | 267.1 | 矿化度/(g/L) Salinity | 2.48 |
| Cl ⁻ /(mg/kg) | 582.3 | 总氮/(mg/L) TN | 1.752 |
| SO ₄ ²⁻ /(mg/kg) | 466.5 | 氨氮/(mg/L) AN | 0.067 |
| Ca ²⁺ /(mg/kg) | 121.02 | 化学需氧量/(mg/L) COD | 11.94 |
| Mg ²⁺ /(mg/kg) | 69.09 | 总磷/(mg/L) TP | 0.012 |
| Na ⁺ /(mg/kg) | 548.0 | 浊度 NTU | 1.395 |
| K ⁺ /(mg/kg) | 9.1 | 色度 Chromaticity | 17.69 |
| pH | 7.37 | 悬浮物/(mg/L) SM | 9.54 |

pH、有机碳、全氮、有效磷含量,苗后不定期(12、24、33、43、49、58、68、86 d)测定玉米株高和茎粗。土壤电导率按 1:5 土水质量比充分振荡 3 min 后,立即采用 DDS-307A 型雷磁电导率仪测定;灌水量采用流量计测定;水的矿化度采用电导率仪直接测定;土壤养分测定方法参照文献[21]。株高采用卷尺测定;茎粗采用游标卡尺测定。

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理,采用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并以最小显著性差异法(least significant difference, LSD)进行多重比较(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤养分

由表 3 可见,玉米拔节期,0~20 cm 土层土壤 9 个处理的电导率值和 pH 均低于 CK,其中 T7、T8、T9 处理的电导率值最低,比 CK 低 52.3%~55.0%;T2 处理的电导率降低幅度最低,比 CK 低 25.8%,但 pH 降低幅度最大(9.0%)。有机碳含量 T1 处理最低,T9 和 T6 处理最高,较 CK 分别增加了 28.6% 和 25.3%,较 T2 处理分别增加了 21.3% 和 18.2%。T1 处理的全氮最低,T8、T9 处理的最高,但与 CK、T2 和 T4~T7 处理差异不显著。全氮含量 T1 处理最低,T8 和 T9 处理最高,但与 CK、T2 和 T4~T7 处理差异不显著。与 CK 相比,T1 处理的有效磷含量降低了 10.2%,而 T3~T9 处理下均显著增加,其中 T8 处理最高(87.98 mg/kg),但与 T5~T7 处理差异不显著,T5~T8 处理较 CK 增加幅度为 17.8%~23.2%,较 T2 处理增加幅度为 9.7%~15.6%。T1 处理的速效钾含量最低(384 mg/kg),CK 最高(450 mg/kg),CK 与 T2~T9 处理差异不显著。CK 处理的交换性钙最低(1.63 cmol/kg),T9 处理的最高(3.28 cmol/kg),9 个处理交换性钙较 CK 增加幅度为 36.6%~50.3%。

| 表 3 各处理土壤性质 | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|
| Table 3 Soil properties under different treatments | | | | | | | | |
| 处理 Treatment | EC/(mS/cm) | pH | SOC/(g/kg) | TN/(g/kg) | AN/(mg/kg) | AP/(mg/kg) | AK/(mg/kg) | Ex.Ca/(cmol/kg) |
| CK | 1.51±0.03a | 8.91±0.03a | 6.96±0.09ef | 0.63±0.01ab | 29.02±1.20cd | 67.56±3.94cd | 450.00±7.72a | 1.63±0.07e |
| T1 | 0.96±0.04cd | 8.15±0.02de | 6.52±0.11f | 0.53±0.02d | 23.86±0.50e | 60.68±2.23d | 384.00±3.27b | 2.88±0.10bcd |
| T2 | 1.12±0.03b | 8.11±0.02e | 7.38±0.22e | 0.64±0.02ab | 31.68±0.86abc | 74.25±2.65bc | 436.67±5.68a | 3.08±0.12ab |
| T3 | 1.04±0.04bc | 8.23±0.03bc | 7.19±0.26e | 0.62±0.02bc | 31.12±2.00bc | 78.13±3.45b | 427.00±9.53a | 2.57±0.12d |
| T4 | 0.84±0.03de | 8.19±0.03cd | 7.26±0.05e | 0.65±0.01ab | 33.84±1.20ab | 76.67±3.38b | 433.67±10.96a | 2.96±0.15abc |
| T5 | 0.93±0.04cd | 8.22±0.03cd | 7.93±0.08d | 0.64±0.01ab | 31.71±1.50abc | 85.63±1.70a | 448.33±5.08a | 2.62±0.07cd |
| T6 | 0.76±0.05e | 8.19±0.04cd | 8.72±0.14ab | 0.66±0.01ab | 35.49±0.73a | 82.22±1.06ab | 438.33±7.78a | 3.21±0.11ab |
| T7 | 0.72±0.03e | 8.19±0.02cd | 8.22±0.11bcd | 0.66±0.01ab | 32.40±1.81abc | 85.80±1.78a | 430.33±4.23a | 3.27±0.07ab |
| T8 | 0.68±0.02e | 8.19±0.02cd | 8.58±0.17abc | 0.67±0.02a | 32.64±1.13abc | 87.98±2.69a | 439.00±8.52a | 3.05±0.03ab |
| T9 | 0.72±0.01e | 8.18±0.01cd | 8.95±0.09a | 0.67±0.01a | 33.33±0.49ab | 77.81±1.67b | 433.00±7.59a | 3.28±0.01a |

注 Note:EC:电导率 Electric conductivity;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;TN:全氮 Total nitrogen;AN:碱解氮 Alkaline hydrolysis Nitrogen;AP:有效磷 Available phosphorus;AK:有效钾 Available potassium;Ex.Ca:可交换性钙 Exchangeable calcium。不同小写字母表示同一指标不同处理之间存在显著差异(P<0.05),下同。Different letters indicate significant difference among treatments in the same item at 0.05 level, the same as below.

脱硫石膏配施有机物料比单一施用脱硫石膏效果更好,进一步提高了土壤交换性钙含量,更能促进水分入渗降低盐碱。单独石膏施用土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效钾含量会降低,但配施有机肥可维持土壤全氮、速效钾含量不降低,在施用石膏和有机肥的基础上,配施糠醛渣或生物炭可进一步降低土壤电导率、增加土壤有机碳、有效磷、速效钾、交换性钙含量并维持土壤碱解氮含量不降低。

第二年播种前(4月15日)采集土样分析不同处理对翌年土壤养分的影响。由表4可见,T9处理的有机碳最高(7.61 g/kg),T1处理的最低(5.36 g/kg);与CK相比,T4~T9增加幅度为17.7%~34.5%,与T2相比,T4~T9增加幅度为7.8%~23.1%。T8处理的全氮最高(0.78 g/kg),但与T5~T7处理差异不显著,T1处理的最低(0.63 g/kg);与CK相比,T5~T8处理增加幅度为12.3%~20.0%,与T2处理相比,T5~T8处理增加幅度为2.8%~8.3%。T6处理的有效磷最高(57.73 mg/kg),T1处理的最低(25.55 mg/kg),T5、T6处理均显

著高于CK和T1处理;T6处理比CK和T2处理分别增加36.1%和43.1%。CK处理的阳离子交换量最低(7.65 cmol/kg),CK和T1处理的阳离子交换量最低,T6和T8~T9处理的最高(8.63 cmol/kg),其中T2和T6~T9处理下土壤阳离子交换量增幅较大,较对照增加幅度为8.6%~12.4%。

与对照相比,T6处理下土壤有机碳、全氮、有效磷和阳离子交换量分别增加了29.5%、15.4%、36.1%和12.8%;与T2处理相比,T6处理下土壤有机碳、全氮和有效磷含量分别增加了18.6%、4.2%和43.1%。单独施用石膏在翌年作物播种前不会增加土壤有机碳、全氮含量,而在施用石膏和有机肥基础上,配施糠醛渣或生物炭土壤有机碳、全氮含量、阳离子交换量显著增加,随着生物炭用量的增加有增加趋势,配施糠醛渣还显著增加土壤有效磷含量,且随着糠醛渣用量的增加而增加。因此,“石膏+有机肥+糠醛渣_H”(T6)处理在增加翌年土壤有机碳、全氮、有效磷和阳离子交换量方面有较好的效果。

表4 不同处理下翌年春季土壤养分

Table 4 The soil nutrient in spring of the next year under different treatments

| 处理 Treatment | 有机碳/(g/kg) SOC | 全氮/(g/kg) TN | 有效磷/(mg/kg) AP | 阳离子交换量/(cmol/kg) CEC |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|
| CK | 5.66±0.16de | 0.65±0.01c | 42.41±1.68cd | 7.65±0.00b |
| T1 | 5.36±0.14e | 0.63±0.01c | 25.55±0.86e | 7.83±0.03b |
| T2 | 6.18±0.16cd | 0.72±0.02b | 40.35±2.04cd | 8.51±0.19a |
| T3 | 6.12±0.18cd | 0.73±0.02b | 42.93±3.14cd | 8.37±0.31ab |
| T4 | 7.60±0.02a | 0.71±0.01b | 45.91±0.79bc | 8.37±0.26ab |
| T5 | 6.66±0.11bc | 0.74±0.01ab | 51.09±1.90b | 8.31±0.31ab |
| T6 | 7.33±0.25a | 0.75±0.01ab | 57.73±1.10a | 8.63±0.17a |
| T7 | 7.21±0.23ab | 0.76±0.02ab | 41.73±2.71cd | 8.51±0.17a |
| T8 | 7.38±0.24a | 0.78±0.03a | 43.59±1.14cd | 8.59±0.13a |
| T9 | 7.61±0.19a | 0.73±0.02b | 42.00±1.43cd | 8.60±0.21a |

2.2 不同处理下土壤盐碱特性

种植玉米前,土壤电导率本底值为3.68 mS/cm,种植后土壤电导率值均低于本底值;玉米苗后34 d,与对照相比,9个处理均不同程度降低了土壤电导率,降低幅度为28.3%~57.9%,T2降低幅度最小,T9降低幅度最大,与T2相比,T6~T9土壤电导率降低幅度为29.4%~41.2%。玉米苗后44 d至玉米抽雄期则表现为各有机物料处理下的土壤电导率与对照之间的差异变小;在玉米抽雄期,单施石膏处理(T1)下土壤电导率较对照显著增加,而其他处理之

间的差异较小。翌年4月,T1处理最高(2.02 mS/cm),但与T2处理差异不显著,T8处理最低(1.51 mS/cm),但与T1、T2、T4、T5、T6处理之间差异不显著,与T2处理相比,T5~T9处理土壤电导率降低幅度为6.5%~18.4%(表5)。

种植玉米前,土壤pH本底值为8.78,施用石膏后土壤pH均显著降低,玉米苗后34 d,9个处理土壤pH比对照降低0.65~0.79个单位,T2处理降低幅度最大,与T2处理相比,T3~T9处理土壤pH增加了0.04~0.14个单位。玉米苗后44 d至玉米抽雄期均

表现为对照pH显著高于其他处理,T1~T2、T3~T8各处理间差异不显著。翌年4月,与对照相比,各处理均不同程度降低了土壤pH,降低幅度在0.51~0.76个单位,T9处理降低幅度最大,但与T4~T6和T8处理差异不显著,与T2处理相比,T4~T9处理降低了0.08~0.18个单位(表5)。

施用石膏及配施有机肥短期内可显著降低表层土壤电导率和pH,但随着时间延长土壤电导率会增加,至翌年春季盐分含量甚至高于对照,而在石膏和有机肥施用基础上,再配施高用量的秸秆、糠醛渣、生物炭土壤电导率降低效果更明显,并可维持翌年土壤电导率不升高。

表5 不同处理下桶栽玉米土壤电导率和pH
Table 5 The soil electric conductivity and pH of bucket planting maize under different treatments

| 处理 Treatment | 苗后34 d 34 d after emergence | | 苗后44 d 44 d after emergence | | 苗后74 d 74 d after emergence | | 翌年4月 April of the following year | |
|-----------------|--------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | EC/(mS/cm) | pH | EC/(mS/cm) | pH | EC/(mS/cm) | pH | EC/(mS/cm) | pH |
| CK | 1.52±0.05a | 8.90±0.03a | 1.13±0.07a | 9.15±0.03a | 1.00±0.14bc | 8.94±0.08a | 1.60±0.06c | 9.03±0.01a |
| T1 | 0.94±0.08bcd | 8.17±0.02e | 1.12±0.12a | 8.30±0.01cd | 1.35±0.07a | 8.34±0.10bc | 2.02±0.08a | 8.52±0.01b |
| T2 | 1.09±0.06b | 8.11±0.02f | 0.98±0.13ab | 8.25±0.09cd | 1.16±0.03b | 8.28±0.10c | 1.85±0.05ab | 8.45±0.04bc |
| T3 | 1.01±0.15bc | 8.25±0.04bc | 1.10±0.17a | 8.19±0.14d | 0.90±0.16c | 8.43±0.08b | 1.76±0.08bc | 8.37±0.01cd |
| T4 | 0.89±0.10bcd | 8.20±0.03cde | 0.96±0.07ab | 8.26±0.14cd | 1.04±0.03bc | 8.31±0.06bc | 1.57±0.09c | 8.28±0.06de |
| T5 | 0.86±0.13cd | 8.23±0.03cd | 1.01±0.09ab | 8.18±0.06d | 1.04±0.06bc | 8.36±0.04bc | 1.56±0.06c | 8.29±0.05de |
| T6 | 0.77±0.07de | 8.19±0.04de | 0.73±0.06cd | 8.30±0.09cd | 1.18±0.12ab | 8.23±0.06c | 1.58±0.07c | 8.34±0.02de |
| T7 | 0.72±0.05de | 8.19±0.02de | 0.83±0.10bcd | 8.25±0.10cd | 0.92±0.04c | 8.34±0.05bc | 1.63±0.06bc | 8.41±0.04cd |
| T8 | 0.72±0.07de | 8.15±0.02ef | 0.71±0.07d | 8.34±0.02bcd | 1.18±0.05ab | 8.29±0.00c | 1.51±0.03c | 8.30±0.02de |
| T9 | 0.64±0.10e | 8.18±0.02de | 0.71±0.07d | 8.38±0.07bc | 0.86±0.14c | 8.38±0.07bc | 1.73±0.02bc | 8.27±0.03e |

2.3 不同处理下桶栽玉米株高和生物量

与对照相比,单一施用石膏及配施其他有机物料玉米的株高、茎粗和生物量均有不同程度增加(图1、图2、表6),配施中量生物炭的T8处理玉米株高最高(121.6 cm),配施高量糠醛渣的T6处理玉米株高低于T5处理,配施高量秸秆的T4处理玉米株高低于T3处理。T5处理的玉米茎粗最大(27.72 mm),T3处理次之,T8处理玉米茎粗高于T7、T9处理。

T5处理的地上生物量、根生物量、总生物量均为最高。在施用石膏和有机肥基础上,随着糠醛渣、玉米秸秆和生物炭施用量的增加,玉米株高、地上生物量和总生物量均表现为先增加后降低趋势,均与糠醛渣、玉米秸秆和生物炭等有机物料施用量梯度之间呈二次抛物线形式,可定量计算出在施用石膏和有机肥基础上,配施玉米秸秆或糠醛渣或生物炭各改良材料的最大施用量,分别为0.34%、0.56%和

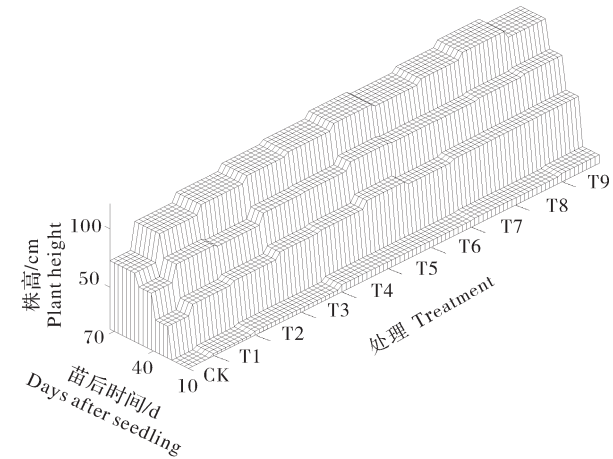


图1 不同处理下桶栽玉米翌年株高
Fig.1 The height of bucket planting maize under different treatments

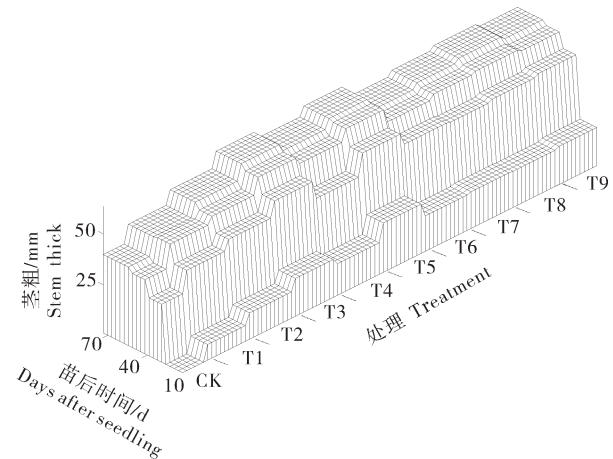


图2 不同处理下桶栽玉米翌年茎粗
Fig.2 The stem thick of maize in bucket planting under different treatments

0.85%。结合试验结果,兼顾盐碱地改良成本,施用石膏和有机肥并配施0.56%的糠醛渣处理(T6)最好,短期内可显著促进玉米生长。

表6 不同处理下桶栽玉米生物量(干质量)

| 处理 Treatment | 地上生物量 Dry weight of aboveground biomass | 根生物量 Dry weight of root biomass | 总生物量 Total biomass dry weight |
|-----------------|---|---------------------------------------|-------------------------------------|
| CK | 3.15±5.46f | 0.57±0.99e | 3.73±6.45f |
| T1 | 35.44±3.25e | 6.27±0.24d | 41.71±3.29e |
| T2 | 35.75±1.98e | 6.26±0.05d | 42.01±1.97e |
| T3 | 39.94±1.77cde | 6.84±0.16bc | 46.78±1.83cde |
| T4 | 38.22±2.24de | 6.50±0.17cd | 44.72±2.40cde |
| T5 | 45.79±1.99a | 7.50±0.50a | 53.29±2.43a |
| T6 | 39.12±2.61cde | 6.44±0.16cd | 45.56±2.76cde |
| T7 | 40.68±2.09bcd | 7.43±0.30ab | 48.11±1.97bcd |
| T8 | 45.11±3.50ab | 6.92±0.32abc | 52.03±3.49ab |
| T9 | 43.04±2.92abc | 6.41±0.23cd | 49.46±3.05abc |

3 讨论

3.1 不同处理对土壤盐碱特性的影响

本研究结果表明,微咸水滴灌条件下单一施用石膏虽然短期内可降低表层土壤盐分,但会在翌年作物播种前增加土壤盐分,即使在配施有机肥条件下土壤盐分也未能显著降低,说明单施石膏或者与有机肥配施改良碱化盐土均有增加土壤盐化的风险,但在石膏与有机肥配施的基础上,再配施高用量的秸秆、糠醛渣或生物炭则可进一步降低土壤盐分,且在翌年不会增加表层土壤盐分。这是由于石膏和有机肥都含有一定量的盐分,施入土壤会增加土壤含盐量,微咸水灌溉促进了水盐向下迁移至20~40 cm土层,翌年春季由于表层土壤强烈蒸发导致盐分向地表迁移累积,Wu等^[8]的研究结果也证实了这一点。脱硫石膏配施粉碎秸秆可通过降低土壤容重和紧实度、增加水稳性团聚体含量和脲酶活性进而降低土壤含盐量^[9]。李可晔等^[22]研究表明,单施玉米秸秆对提高土壤脱盐效果优于腐熟牛粪,单施有机肥对于提高盐碱地地力、提高植株成活率、促进植株生长效果明显,秸秆与有机肥1:1配施既可达到脱盐效果又能提高地力、促进植株生长。

添加糠醛渣或生物炭不会增加土壤盐分,与糠醛渣、生物炭的特性有关,糠醛渣和生物炭含有相对

较低的盐分和更高的有机质,在改善土壤结构方面效果更显著;此外,有研究表明,糠醛渣可显著促进0.25~0.5和0.5~1 mm水稳性团聚体数量增加,但不能过量施用^[23],在宁夏龟裂碱土上施用脱硫石膏和糠醛渣可降低土壤pH、电导率和碱化度^[24],也证实了糠醛渣改良盐碱土的效果。糠醛渣呈酸性,施入土壤后大量的H⁺促进石膏溶解,产生较多可交换性Ca²⁺,可进一步改善土壤结构,在灌溉作用下促进盐分向土体深处运移。配施秸秆生物炭后,一方面秸秆生物炭中含有的高凝聚力金属离子,如Ca²⁺、Mg²⁺等,能够交换土壤胶体中吸附的Na⁺,促进盐碱土中胶体的絮凝和团聚体的形成,改善土壤结构,增加土壤渗透性^[25];另一方面生物炭可显著提高土壤的孔隙度和比表面积,增加土壤持水量,促进土壤中钠盐的淋溶^[26],缓解土壤盐胁迫。

3.2 不同处理对土壤性质和作物生长的影响

在玉米拔节期,仅施用脱硫石膏,土壤全氮、碱解氮、速效钾、有机碳含量显著降低,在翌年春季土壤有效磷含量也降低,这是由于施用石膏促进了水分入渗,全氮、碱解氮、速效钾、有机碳随水容易淋失,而有效磷由于易被固定,淋失相对滞后。在本试验中,脱硫石膏配施有机肥、糠醛渣或生物炭短期内均可维持土壤全氮和速效钾含量不降低,显著增加土壤有机碳、有效磷,并在翌年春季显著提升土壤有机碳和全氮含量,且提升效果与施用量成正比。也有研究表明,石膏、有机肥和生物炭共同施用下,土壤中的有机分子能够被生物炭吸附,促进形成腐殖质,加快有机质的聚合与形成^[27]。翌年春季,配施糠醛渣仍可显著增加土壤有效磷含量,而配施生物炭处理则持平,这是由于糠醛渣本身有效磷含量较高,且呈强酸性,有活化土壤中固定态磷的作用。秸秆类生物炭一般呈碱性,一方面通过改变土壤理化性质、团聚体稳定性、有机酸含量、酶活性、关键功能基因和微生物群落结构来提高盐碱地磷的生物利用率;另一方面,生物炭中的Ca²⁺在土体中会生成磷酸钙沉淀从而降低土壤有效磷含量^[28]。田间试验也证明根区施用生物炭和脱硫石膏并未显著增加土壤耕层有效磷含量^[29]。

盐碱土中施用糠醛渣、粉碎秸秆和生物炭时都需要适量,糠醛渣过量施用可能会因为抗氧化酶的过度应激,导致土壤酶活性下降^[30],秸秆过量施用不仅会影响作物出苗和根系生长,还会导致土壤氮素缺乏。生物炭过量施用一方面增加土壤改良成本,

另一方面,生物炭中的高挥发性物质、持久自由基会阻碍作物吸收养分,抑制植物生长^[31]。此外,生物炭原料多样,原料不同生物炭性质会有差异,同一原料碳化温度和碳化速度不同,生物炭的特性也存在差异^[32]。在施用石膏和有机肥的基础上,配施0.56%的生物炭在当年可显著促进玉米生长,配施0.56%的糠醛渣显著增加玉米生物量,在翌年也可显著促进玉米株高和茎粗增加。因此,在施用石膏和有机肥的基础上,配施糠醛渣在促进玉米生长、提高生物量方面效果显著,配施生物炭次之,配施粉碎秸秆效果最差。笔者前期的研究表明,在银北灌区盐碱地上,秸秆还田在提高作物产量方面存在滞后效应^[31],这是由于还田时间较短,秸秆尚未完全腐解的缘故。

本研究结果表明,施用石膏显著增加土壤交换性钙含量,降低土壤电导率和pH,促进土壤盐向下运移,土壤电导率降低幅度为28.3%~57.9%,土壤全氮、碱解氮、速效钾、有机碳含量也显著降低,但在翌年春季会增加土壤盐分,土壤有效磷含量也降低。在施用石膏和有机肥的基础上,配施0.56%的糠醛渣或生物炭可进一步降低土壤电导率,增加土壤交换性钙含量,维持土壤全氮、碱解氮和速效钾含量不降低,显著增加土壤有机碳、有效磷,且配施0.56%的糠醛渣在减轻翌年土壤盐碱危害、增加土壤有机碳、全氮和有效磷含量方面有较好的效果。在施用石膏和有机肥的基础上,配施0.56%的生物炭或糠醛渣可显著促进玉米株高和茎粗增加,增加玉米生物量。因此,脱硫石膏配施有机肥和糠醛渣适宜于改良碱化盐土。

参考文献 References

- [1] 王全九,邓铭江,宁松瑞,等.农田水盐调控现实与面临的问题[J].水科学进展,2021,32(1):139-147. WANG Q J, DENG M J, NING S R, et al. Reality and problems of controlling soil water and salt in farmland [J]. Advances in water science, 2021, 32(1): 139-147 (in Chinese with English abstract).
- [2] OSTER J D. History of the roles of gypsum in soil reclamation and establishment of SAR/EC water quality guidelines [C]// WANG Z C, TÓTH T. Abstracts of the First IUSS Conference on Sodic Soil Reclamation. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2021: 38-39.
- [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 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): 10-27 (in Chinese with English abstract).
- [4] WANG X, SHEN J L, FAN L Q, et al. Research on salt drainage efficiency and anti-siltation effect of subsurface drainage pipes with different filter materials [J/OL]. Water, 2024, 16(10): 1432 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.3390/w16101432>.
- [5] WANG J, ZHAO A Q, MA F, et al. Amendment of saline-alkaline soil with flue-gas desulfurization gypsum in the Yinchuan Plain, northwest China [J/OL]. Sustainability, 2023, 15(11): 8658 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.3390/su15118658>.
- [6] 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 R R, WANG S J, LIU J, 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 CSAE, 2024, 40(5): 148-157 (in Chinese with English abstract).
- [7] ZHAO Y G, WANG S J, LIU J, et al. Fertility and biochemical activity in sodic soils 17 years after reclamation with flue gas desulfurization gypsum [J]. Journal of integrative agriculture, 2021, 20(12): 3312-3322.
- [8] WU L, SHEN J L, WANG X, et al. Effect of desulfurization gypsum on saline-alkali soil in Ningxia under ridge cultivation and drip irrigation [J]. Carpathian journal of earth and environmental sciences, 2024, 19(2): 401-410.
- [9] 樊丽琴,李磊,吴霞,等.不同水质淋洗与改良剂施用对银北灌区碱化盐土水盐运移的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):369-376. FAN L Q, LI L, WU X, et al. Effects of leaching with different quality water and soil amendments application on soil water and salt transport in alkalize solonchaks in Yinbei Irrigation District [J]. Journal of soil and water conservation 2020, 34(6): 369-376 (in Chinese with English abstract).
- [10] 郑永乐,姚荣江,杨劲松,等.改良材料对微咸水滴灌农田土壤盐分分布与离子组成的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(8):60-71. ZHENG F L, YAO R J, YANG J S, et al. The effects of soil amendment with different materials on soil salt distribution and its ion composition under brackish-water drip irrigation [J]. Journal of irrigation and drainage, 2020, 39(8): 60-71 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张曼玉,杨海昌,张凤华,等.秸秆还田对棉花全生育期土壤水盐分布及产量的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(5):113-121. ZHANG M Y, YANG H C, ZHANG F H, et al. Effects of returning straw to field on distribution of water and salt in soil and yield throughout whole growth period of cotton [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5): 113-121 (in Chinese with English abstract).
- [12] FENG W Y, YANG F, CEN R, et al. Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn [J/OL]. Journal of environmental management, 2021, 277: 111331 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.jenv>

- man.2020.111331.
- [13] PENG Y Y, ZHANG H, LIAN J S, et al. Combined application of organic fertilizer with microbial inoculum improved aggregate formation and salt leaching in a secondary salinized soil [J/OL]. *Plants*, 2023, 12 (16) : 2945 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.3390/plants12162945>.
- [14] WANG X W, CAI H, LIU Y L, et al. Addition of organic fertilizer affects soil nitrogen availability in a salinized fluvo-aquic soil [J]. *Environmental pollutants and bioavailability*, 2019, 31 (1):331-338.
- [15] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain [J/OL]. *Science of the total environment*, 2020, 722: 137428 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137428>.
- [16] GUAN X W, CHEN J L, LIU G M, et al. Soil phosphorus forms in saline soil after the application of biomass materials [J/OL]. *Agronomy*, 2024, 14 (2) : 255 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020255>.
- [17] ALOTAIBI K D. Use of biochar for alleviating negative impact of salinity stress in corn grown in arid soil [J]. *Canadian journal of soil science*, 2022, 102 (1) : 187-196.
- [18] SHEN J L, CAI J J, WANG X, et al. Impact of furfural residue combined with desulphurized gypsum on saline-alkali soil water - salt and infiltration characteristics [J/OL]. *Water*, 2025, 17 (4) : 563 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.3390/w17040563>.
- [19] 张美娟, 王冰, 黄升财, 等. 糠醛渣改良土壤增强苕子对盐碱土的适应性 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (6) : 115-121. ZHANG M J, WANG B, HUANG S C, et al. Enhancing the adaptation of *Vicia villosa* Roth to salinity-alkalinity soils improved using furfural residues [J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36 (6) : 115-121 (in Chinese with English abstract).
- [20] 孙军娜, 董陆康, 徐刚, 等. 糠醛渣及其生物炭对盐渍土理化性质影响的比较研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (3) : 532-538. SUN J N, DONG L K, XU G, et al. Effects of furfural and its biochar additions on physical-chemical characteristics of a saline soil [J]. *Journal of agro-environment science*, 2014, 33 (3) : 532-538 (in Chinese with English abstract).
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [22] 李可晔, 薛志忠, 王文成, 等. 滨海盐碱地土壤改良添加物筛选研究 [J]. *北方园艺*, 2014 (19) : 165-168. LI K Y, XUE Z Z, WANG W C, et al. Study on screening of suitable additives on coastal saline soil [J]. *Northern horticulture*, 2014 (19) : 165-168 (in Chinese with English abstract).
- [23] LI S, YAO Y Y, YANG M C, et al. Effects of different amendments on aggregate stability and microbial communities of coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta [J]. *Land degradation & development*, 2023, 34 (6) : 1694-1707.
- [24] ABBAS G, ABRAR M M, NAEEM M A, et al. Biochar increases salt tolerance and grain yield of quinoa on saline-sodic soil: multivariate comparison of physiological and oxidative stress attributes [J]. *Journal of soils and sediments*, 2022, 22 (5) : 1446-1459.
- [25] EGAMBERDIEVA D, MA H, ALAYLAR B, et al. Biochar amendments improve licorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) growth and nutrient uptake under salt stress [J/OL]. *Plants*, 2021, 10 (10) : 2135 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.3390/plants10102135>.
- [26] LI Y F, LI G H. Mechanisms of straw biochar's improvement of phosphorus bioavailability in soda saline-alkali soil [J]. *Environmental science and pollution research international*, 2022, 29 (32) : 47867-47872.
- [27] ZOU Y P, AN Z F, CHEN X L, et al. Effects of co-applied biochar and plant growth-promoting bacteria on soil carbon mineralization and nutrient availability under two nitrogen addition rates [J/OL]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2023, 266: 115579 [2024-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115579>.
- [28] UZOMA K C, INOUE M, ANDRY H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil use and management*, 2011, 27 (2) : 205-212.
- [29] BUSS W, GRAHAM M C, SHEPHERD J G, et al. Risks and benefits of marginal biomass-derived biochars for plant growth [J]. *Science of the total environment*, 2016, 569: 496-506.
- [30] ALBURQUERQUE J A, SALAZAR P, BARRÓN V, et al. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels [J]. *Agronomy for sustainable development*, 2013, 33 (3) : 475-484.
- [31] 樊丽琴, 李磊, 吴霞, 等. 不同培肥措施对银北灌区土壤盐碱特性、玉米生长及产量指标的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (6) : 120-128. FAN L Q, LI L, WU X, et al. Effect of different fertility-building practices on the characteristics of soil salt and alkali, and the index of maize growth and yield [J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2021 (6) : 120-128 (in Chinese with English abstract).
- [32] 徐国风, 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) : 232-237. 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) : 232-237 (in Chinese with English abstract).

Effects of gypsum combined with organic materials on alkalized solonchaks and growth of maize

FAN Liqin, SHEN Jingli, WANG Xu, WU Xia, CHEN Wenqian

Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Station of Observation and Experiment, National Agricultural Environment in Yinchuan, Yinchuan 750002, China

Abstract The techniques of saving water, reducing alkalinity and enhancing soil fertility in heavily saline-alkaline areas in Ningxia were developed to solve practical problems including equal emphasis on saline and alkali in soil, shortage of freshwater resources, and difficulties in the growth of crops in arid areas. Four organic materials including organic fertilizer, maize straw, furfural residue, and biochar were selected for combination with desulfurization gypsum. The treatment without any improved materials was used as a control. A series of bucket cultivation experiments were conducted in Huinong District, Ningxia to study the effects of gypsum irrigation with slightly salty water droplets combined with organic materials on the properties of alkaline and saline in soil and the growth of maize. The results showed that the application of gypsum increased the content of exchangeable calcium in the soil, significantly decreased the conductivity and pH in soil, with a decrease in conductivity of 28.3%-57.9%. The content of total nitrogen, alkali hydrolyzed nitrogen, available potassium, and organic carbon in the soil was significantly decreased, but the conductivity in soil increased and the content of available phosphorus decreased in the following spring. The combination of gypsum and organic fertilizer with 0.56% furfural residue or biochar further decreased the electrical conductivity in soil and increased the content of exchangeable calcium, maintaining the content of total nitrogen and available potassium in soil, significantly increasing the content of organic carbon, alkali hydrolyzed nitrogen, and available phosphorus in soil. The addition of 0.56% furfural residue combined with gypsum and organic fertilizer significantly mitigated the salinity and alkalinity in soil in the following year, while significantly increasing the content of organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and the cation exchange capacity in soil to significantly increase the plant height, stem diameter of maize, ultimately increasing the biomass of maize. It is indicated that the economic benefit of furfural residue is better than that of biochar, therefore, the combination of desulfurization gypsum combined with organic fertilizer and furfural residue is suitable for improving the alkalized solonchaks soil.

Keywords alkalized solonchak; organic fertilizer; furfural residue; biochar; desulfurization gypsum; maize

(责任编辑:张志钰)