

脱硫石膏与聚谷氨酸配施对盐碱化土壤的改良效果

张灵芝^{1,2}, 李蒙^{1,2}, 李洪义³, 殷俐娜^{1,4}, 王仕稳^{1,4}

(1.西北农林科技大学, 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省土地工程
建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075; 3.安康市汉滨区农业农村局, 陕西 安康 725000;
4.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究脱硫石膏与聚谷氨酸(γ -PGA)配施对盐碱化土壤的改良效果,为改良西北地区盐碱化土壤提供理论和技术依据。[方法] 通过土柱模拟淋溶试验和盆栽模拟生长试验,从促进盐分淋洗,降低土壤含盐量,降低土壤 pH 值,改善土壤养分状况,促进作物生长的角度对脱硫石膏和 γ -PGA 配合施用对盐碱地的改良效果进行研究。[结果] 脱硫石膏与 γ -PGA 配施能进一步降低淋后土壤的 pH 值,提高 Na^+ 淋洗;可降低淋洗后 HCO_3^- 和 Cl^- 的含量,但提高淋洗后土壤 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量;有效降低淋后土壤钠吸附比(SAR)值。盆栽试验表明脱硫石膏与 γ -PGA 配施可显著增加玉米的株高、叶面积和干重,其中生长 30 d 时该处理玉米干重达到最大值,较对照处理增加了 54.40%,较单施脱硫石膏和 γ -PGA 处理分别增加了 40.27% 和 29.47%。此外,脱硫石膏与 γ -PGA 配施植株收获后土壤的 pH 值更低,且土壤 N、P、K 养分含量和土壤酶活性更高。[结论] 脱硫石膏和 γ -PGA 配施能起到较好的互补增效作用,进一步促进了土壤离子交换,降低了 pH 值,提高了土壤养分含量,促进了作物生长。

关键词: 盐碱化; 土壤改良剂; 盐分淋溶; 土壤养分; 玉米

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0115-11

中图分类号: S156.4, X53

文献参数: 张灵芝, 李蒙, 李洪义, 等. 脱硫石膏与聚谷氨酸配施对盐碱化土壤的改良效果[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 115-125. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.015; Zhang Lingzhi, Li Meng, Li Hongyi, et al. Effects of desulfurized gypsum applied combined with polyglutamic acid on improving saline soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 115-125.

Effects of Desulfurized Gypsum Applied Combined with Polyglutamic Acid on Improving Saline Soil

Zhang Lingzhi^{1,2}, Li Meng^{1,2}, Li Hongyi³, Yin Lina^{1,4}, Wang Shiwen^{1,4}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 3. Agriculture and Rural Bureau of Hanbin District, Ankang City, Ankang, Shaanxi 725000, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of desulfurized gypsum and polyglutamic acid (γ -PGA) improves saline soil were studied in order to provide a theoretical and technical basis for improving saline soil in Northwest China. [Methods] Simulated leaching tests in soil columns and simulated growth tests in pots were used to determine the effect of combining desulfurized gypsum with γ -PGA on saline soils from the perspectives of promoting salt leaching, reducing soil salinity, lowering soil pH value, improving soil nutrient status, and promoting crop growth. [Results] The leaching tests showed that combining desulfurized gypsum with γ -PGA could further reduce soil pH value after leaching and increase Na^+ leaching; reduce HCO_3^- and Cl^-

收稿日期: 2023-05-22

修回日期: 2023-07-23

资助项目: 国家重点研发计划项目“典型区域中低产田土壤固碳与产能提升协同技术模式落地机制与示范应用”(2022YFD1901605)

第一作者: 张灵芝(1999—), 女(汉族), 陕西省商洛市镇安县人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养及土壤改良。Email: zlz313313@163.com。

通信作者: 殷俐娜(1980—), 女(汉族), 黑龙江省佳木斯市人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事植物水分养分高效利用的生理及分子机制研究以及基因克隆和功能方面的研究。Email: linayin@nwsuaf.edu.cn。

contents after leaching, but increase SO_4^{2-} , Ca^{2+} , and Mg^{2+} contents; and effectively reduce the sodium adsorption ratio (SAR) value of the soil. Desulfurized gypsum combined with γ -PGA significantly increased maize height, leaf area, and dry weight, with maximum dry weight at 30 days of growth increasing by 54.40% compared with the control treatment, and by 40.27% and 29.47% compared with desulfurized gypsum and γ -PGA treatments alone, respectively. In addition, soil pH value was lower and soil N, P, and K nutrient contents and soil enzyme activities were higher after the plants were harvested from the combined desulfurized gypsum and γ -PGA treatment. [Conclusion] The application of desulfurized gypsum and γ -PGA can produce complementary and synergistic effects, thereby further promoting soil ion exchange, lowering pH value, increasing soil nutrient content, and promoting crop growth.

Keywords: salinization; soil conditioner; salt leaching; soil nutrients; maize

土壤盐碱化是土壤退化的主要类型之一,严重影响着土地资源的开发和利用,威胁着耕地安全以及粮食生产。据统计,全世界现存盐碱化土地面积约为 $9.55 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占到世界陆地总面积的 10%, 其中盐碱化耕地面积 $3.45 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占全球耕地总面积的 23%^[1]。中国盐碱化土地面积约为 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中盐碱化耕地面积约为 $9.21 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[2]。盐碱化土地是重要的后备耕地资源。目前中国开发的盐碱土面积仅为 $6.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 不足全部盐碱土总面积的 1/5^[3]。西北地区盐碱土面积占到中国盐碱化土壤的 69.03%, 具有巨大的开发潜力^[4-5]。开发改良西北地区盐碱化对区域粮食增产乃至国家粮食安全都有重要意义。

土壤改良剂在盐碱化土壤改良中具有广泛的应用,含钙类改良剂是应用最广泛的土壤改良物质。美国学者 Hilgard 最早发现石膏可以用于盐碱土改良,并在 19 世纪末到 20 世纪初,建立了石膏改土的基本理论^[6-7],石膏类物质通过离子交换作用使钠质土转化为钙质土,是盐碱化改良中应用最广泛的一类改良剂^[8]。石膏类改良剂施入盐碱化土壤中不仅可以降低土壤 pH 值、促进土壤排盐,还能够为土壤提供 Ca, S, Si 等养分^[9-10]。来源于电厂等的脱硫石膏由于来源广泛、价格低廉,是应用最广泛的一类石膏类土壤改良剂。研究^[11-14]表明脱硫石膏可大幅度降低碱化土壤的 pH 值和土壤胶体钠饱和度。脱硫石膏在盐碱地改土增产效果已经在不同地区和多种作物得到了广泛的验证,其合适的用量及计算方法已经得到了确定^[15-16]。但石膏类改良剂在干旱地区施用仍存在一些问题,首先是石膏的溶解度较低,作用缓慢;其次是即使离子交换完成,仍需大量灌水排盐;石膏加入后有返盐和提高 pH 值的风险,以上因素限制了石膏类改良剂在干旱地区的推广和应用^[17]。新型的高分子有机改良剂,如聚谷氨酸(γ -PGA)、聚丙烯酰胺(PAM)等,在一定程度上模拟了土壤中有有机质特别

是腐殖质的作用,使土壤具有保水、保肥的特性^[18]。如 PAM 加入土壤中可以使水分入渗量增加 15%, 有效减少土壤水分流失和蒸发^[19-20]。聚谷氨酸(poly- γ -glutamic acid, γ -PGA)是一种由 L-谷氨酸和 D-谷氨酸单体通过酰胺键聚合而成的多肽分子,其具有吸附性好、环境友好易降解、无有害物质产生等优点。 γ -PGA 多肽分子的主链上含有大量的羧基和肽键,可以直接与碱性物质作用降低土壤 pH 值; γ -PGA 具有强大的保水能力,能提高土壤的含水量降低土壤水分蒸发,其在保水的同时也促进了土壤表层盐分的淋洗,从而在节水的同时增强了盐碱地的改良效果; γ -PGA 且能改善土壤结构,促进土壤团聚体形成;此外,由于其主要成分是氨基酸,降解后可为土壤提供养分来源^[21]。Chen 等^[22]利用 γ -PGA 对沿海地区的盐渍土壤进行改良,发现 γ -PGA 处理的土壤含盐量降低了 39.93%, 总氮流失率降低了 65.37%。脱硫石膏由于其自身溶解度较低在干旱土壤中更加难以发挥离子交换作用,对盐碱土改良效果有限; γ -PGA 具有一定的改良效果,但其易降解的特性使改良效果难以长期维持,较高的成本也阻碍了其大面积的推广。但是从作用和功能上看石膏类改良剂与高分子有机物改良剂在盐碱化改良中可能具有一定的互补性。一方面高分子有机改良剂较低的 pH 值在一定程度上能促进石膏类物质的溶解进而促进离子交换作用,解决干旱地区脱硫石膏利用困难的问题;另一方面,高分子有机物质含有大量的酸性基团与脱硫石膏协同作用能更好地降低土壤 pH 值;此外,高分子有机物质的加入能够提供养分元素,弥补了石膏类改良剂养分单一的缺点。综上所述,复合改良剂能够解决单一改良剂改良效果差、作用单一、使用成本高等问题,这为西北地区盐碱土治理改良提供了新的选择。因此探索脱硫石膏和 γ -PGA 配合施用,对提高盐碱土的改良效果具有积极意义。为此,本研究通过模拟淋溶试验和盆栽试验,从离子淋溶、作物生长、养分供

应等角度探索脱硫石膏与 γ -PGA 配施对盐碱土改良效果,为改良西北地区盐碱化土壤提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采集于渭南市蒲城县刘家村,属于硫酸盐—氯化物型重度盐碱土,将去除杂质的盐碱土风干后过 1 mm 筛备用。土壤的盐分组成和基本性质详见表 1。脱硫石膏采购于河南郑州利源环保材料,硫酸钙含量达到 87.5%;农业级 γ -PGA 采购于西安万方生物,分子量 2 W 单位,含量 $\geq 20\%$ 。氮肥肥料为尿素(含 N 量 $\geq 46\%$),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥为硫酸钾(含 K_2O 50%)。供试作物为玉米,品种为郑单 958,播种前提前催芽。

表 1 供试盐碱土主要盐分组成和基本性质

Table 1 Main salt composition and basic properties of saline-alkali soil

土壤基本性质	数值	主要盐分组成/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	数值
电导率/($mS \cdot cm^{-1}$)	3.10	Na^+	1 180.0
水溶性盐/%	1.58	Ca^{2+}	130.0
钠饱和度/%	17.5	K^+	31.0
pH 值	8.70	Mg^{2+}	180.0
有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	6.00	CO_3^{2-}	1.80
全氮/($g \cdot kg^{-1}$)	0.44	HCO_3^-	173.9
速效磷/($mg \cdot kg^{-1}$)	7.61	Cl^-	397.0
速效钾/($mg \cdot kg^{-1}$)	169.8	SO_4^{2-}	1 040.0

1.2 试验设计

试验设有两个因素,分别为脱硫石膏(G)和 γ -聚谷氨酸使用量(P)(表 2)。脱硫石膏改良盐碱土的化学原理主要是石膏中的 Ca^{2+} 通过离子交换作用取代土壤溶液和土壤胶体上的 Na^+ [6]。该样品土壤溶液中水溶性 Na^+ 的含量为 5.13 cmol/kg,土壤胶体上吸附的 Na^+ 含量为 13.97 cmol/kg,则每千克土壤总共需要代换的 Na^+ 量为 19.10 cmol。根据离子代换原则,每千克盐碱土 Ca^{2+} 的需求量为 Na^+ 总量的 1/2,为 9.55 cmol,纯石膏的理论需求量为 12.98 g/kg。根据所购脱硫石膏的纯度为 87.5%,得到脱硫石膏的需求量为 14.84 g/kg 土壤,约为 2.22×10^4 kg/hm²,该计算结果是石膏的理论需求量,不设梯度。 γ -PGA 使用量设有 3 个梯度,为 1,2 和 4 g/kg,即 652,1 304 和 2 608 kg/hm²。为了验证改良剂的单一施用效果和脱硫石膏与 γ -PGA 配施效果。

表 2 脱硫石膏与 γ -PGA 配施试验设计
Table 2 Experimental design of γ -PGA and flue gas desulfurization (FGD) gypsum treatment

处理	脱硫石膏用量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	γ -PGA 用量 ($kg \cdot hm^{-2}$)
对照(CK)	0	0
脱硫石膏(G)	2.22×10^4	0
γ -PGA(P ₁)	0	652
γ -PGA(P ₂)	0	1 304
γ -PGA(P ₃)	0	2 608
脱硫石膏与 γ -PGA 配施(GP ₁)	2.22×10^4	652
脱硫石膏与 γ -PGA 配施(GP ₂)	2.22×10^4	1 304
脱硫石膏与 γ -PGA 配施(GP ₃)	2.22×10^4	2 608

1.3 试验方法

1.3.1 土柱淋溶模拟试验 试验地点在西北农林科技大学水土保持研究所干旱大厅。试验于 2021 年 5 月开展。使用高 40 cm 的 1 L 量筒作为土柱填充容器(下钻孔),填充柱前在底层铺设纱布和滤纸。过筛后的 1 kg 盐碱土分别与不同剂量的脱硫石膏和 γ -PGA 充分混合后充装入土柱填充容器中(填充高度约 35 cm),表面再覆盖两层滤纸防止干扰,在量筒底部放置玻璃瓶接收淋出液。在淋溶前,加 340 ml 去离子水使土壤水分接近饱和持水量,室温下放置 1 d,使土壤与改良剂充分反应。淋溶时加入 340 ml 去离子水,收集 24 h 淋出溶液。将淋溶土柱放置在室温条件下,自然蒸发,1 周后称重并进行第 2 次淋溶,每次淋溶过程相同,共淋溶 4 次。各处理重复 3 次,每次淋溶结束后用量筒直接测定淋溶液体积,混合均匀后取 100 ml 淋出液冷藏保存,待淋溶结束后,将土柱中土壤倒出,风干后过 1 mm 筛备用。

1.3.2 盆栽模拟试验 盆栽试验设计与淋溶试验相同。于 2021 年 7 月在人工气候室开展,培养条件设置为:光强 $600 \mu mol/(m^2 \cdot s)$,光照 14 h,温度 25 °C。使用直径 9.5 cm,高 13 cm 的花盆将过筛盐碱土按每 1 kg 土施入 0.43 g 尿素,0.625 g 过磷酸钙,0.20 g 硫酸钾,在分别与不同剂量的脱硫石膏和 γ -PGA 充分混合后充装入花盆中、浇水使得土壤中含水量达到田间持水量的 80% 左右。将提前催芽长势均匀的玉米种子穴播入土壤中,每盆均匀播种 3 粒玉米种子,待玉米出苗(2 片叶)后定苗,每盆保留 1 株,期间定期浇灌去离子水并称量。7 月 23 日播种,待播种后的第 10 d(5 叶期),20 d(6 叶期),30 d(7 叶期)测定相关指标并采样,重复 3 次(每个 3 盆 1 组为一个重复,且在温室中放置在相同位置;不同重复放置在不同位置)。待采样结束后收集土壤,晒干后过 1 mm 筛备用。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤淋出液和土壤指标测定

(1) 淋出液体积。将滤液倒入量筒中进行测定。

(2) 淋出液 pH 值。采用玻璃电极法测定。

(3) 淋出液和土壤电导率。电导率仪测定。

(4) 淋出液和土壤中离子含量。 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 测定采用火焰分光光度计。 K^+ , Na^+ 采用发射法, Ca^{2+} , Mg^{2+} 采用吸收法; 淋出液中 CO_3^{2-} , HCO_3^- 采用双指示剂中和滴定法, Cl^- 采用硝酸银滴定法, SO_4^{2-} 采用硫酸钡比浊—分光光度法。

(5) 土壤钠吸附比 (SAR) 的计算, 参考宋新山^[23] 和吴忠东等^[24] 的方法。

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / \sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2}$$

1.4.2 土壤养分 土壤养分指标测定参考《土壤农化分析》^[25], 有机质测定采用重铬酸钾外加热法; 速效磷测定采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法; 速效钾测定采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法; 全氮测定采用半微量凯氏定氮法。

1.4.3 玉米相关指标测定

(1) 玉米株高和叶面积测定: 玉米的株高、叶长和叶宽用卷尺进行测量, 玉米叶面积按照公式叶面积 = 叶长 × 叶宽 × 0.75 计算。

(2) 生物量测定: 玉米生长期共进行 3 次取样, 每次取样先用天平测得鲜重, 105 °C 杀青, 75 °C 烘干至恒重。

1.5 数据处理

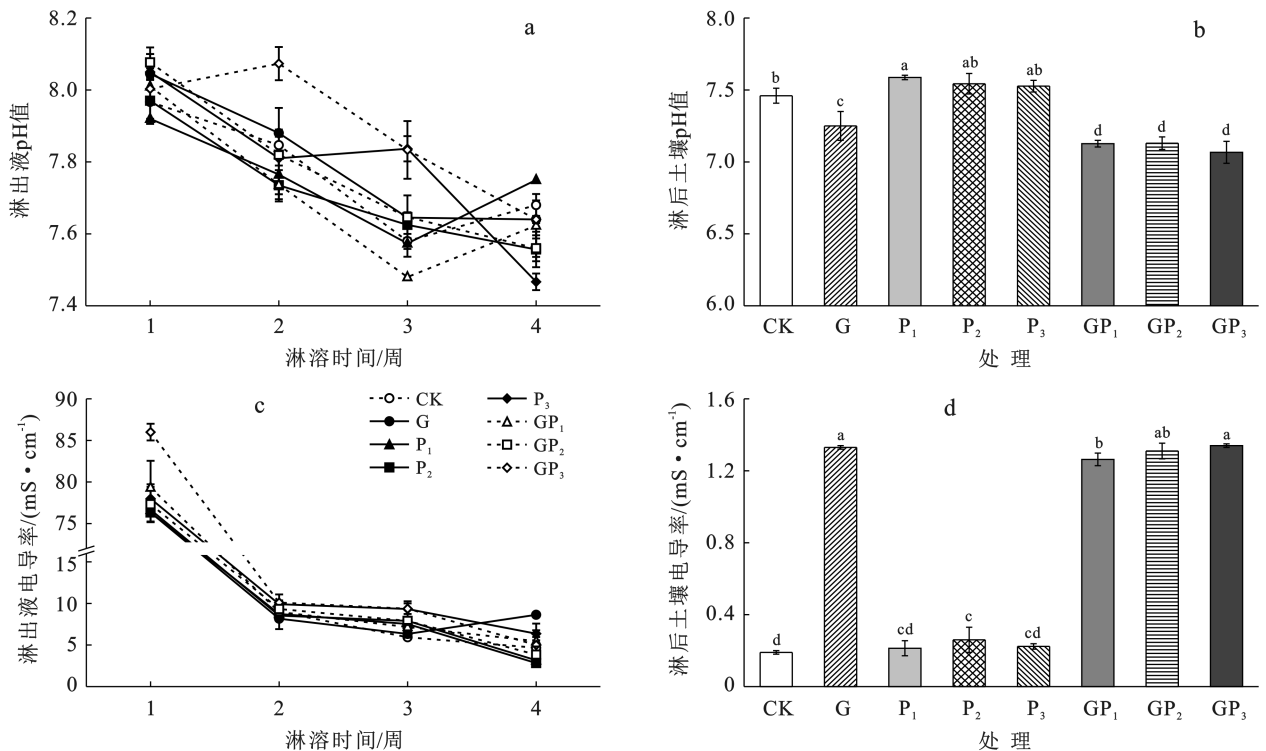
数据处理采用 Microsoft Excel 2016, 方差分析采用 SPSS 20 统计软件, LSD 法进行显著性差异比

较, 显著性水平设为 0.05。

2 结果与分析

2.1 脱硫石膏与 γ -PGA 配施处理对盐碱化土壤盐分淋溶效果及机理

2.1.1 淋出液及淋后土壤 pH 和电导率 (EC) 如图 1a 所示, 盐碱土经过 4 次淋溶后土壤淋出液的 pH 值在前 3 次都显著下降, 最大下降幅度为 0.6 个单位。图 1b 所示为淋后处理土壤 pH 值, 单施脱硫石膏淋溶后土壤 pH 值降低了 0.25, 单施 γ -PGA 淋溶后土壤 pH 略微增加, 脱硫石膏和 γ -PGA 配施, GP_3 处理的 pH 值最低, 相较于对照处理降低了 0.4 个以上单位。改良剂施用后淋出液的电导率 (EC) 随淋溶次数逐渐减小 (图 1c), 在第一次淋溶后大幅下降, 表明盐分的淋溶主要集中在第 1 次。第 1 周淋溶时, GP_3 处理淋出液 EC 最高, 为 86 mS/cm , 较 CK 处理高 29.65%, 其他处理的 EC 也显著高于 CK 处理。随着淋溶的持续进行, 淋出液的 EC 值会逐渐减小。由图 1d 可知淋后各处理土壤 EC 的情况, 脱硫石膏是土壤盐分的主要提供者, 由于施入量大, 施加脱硫石膏的处理淋溶后土壤的 EC 值大幅高于不施脱硫石膏处理, 单独施入 γ -PGA 淋溶后土壤 EC 和对照比也略有增加, 脱硫石膏和 γ -PGA 配合施用后, 淋溶后土壤电导率也大幅增加。



注: 不同小写字母代表显著性差异 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 γ -PGA 与脱硫石膏处理对淋出液及土壤 pH 值和电导率的影响

Fig.1 Effects of γ -PGA and FGD gypsum treatment on leachate and soil pH value and EC

2.1.2 对淋出液和淋后土壤 Na^+ 含量的影响 图 2 为 γ -PGA 与脱硫石膏处理对淋出液及土壤 Na^+ 的影响图。由图 2 可知, Na^+ 的淋出主要集中在首次, 随着淋溶的进行, Na^+ 的淋出量逐渐降低。单独施用脱硫石膏以及高浓度的 γ -PGA, 其淋出量均高于对照, 脱硫石膏配施 γ -PGA, 淋出液 Na^+ 含量更高。单独施用脱硫石膏处理能够降低淋后土壤中 Na^+ 含量, 相较于

CK, G 处理降低了 16.66%。在单施 γ -PGA 的处理中也能有效降低淋后土壤中 Na^+ 含量, 并随着 γ -PGA 使用量的增加土壤中残留的 Na^+ 含量越高。当脱硫石膏与 γ -PGA 配施时, Na^+ 淋出量较高, 但最终在土壤中残留量也较高, 并随着 γ -PGA 施用量升高而增大, 可能是 γ -PGA 与脱硫石膏结合后, 提高了对土壤 Na^+ 的交换能力。

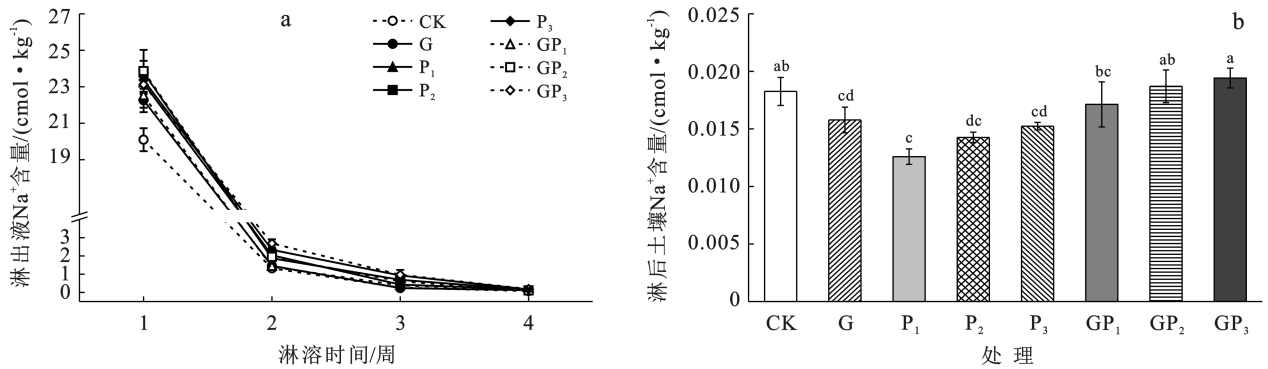


图 2 γ -PGA 与脱硫石膏处理对淋出液及土壤 Na^+ 的影响

Fig.2 Effect of γ -PGA and FGD gypsum treatment on leachate and soil Na^+

2.1.3 对淋出液和淋后土壤 HCO_3^- , Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量的影响 由图 3a 可知, 两种改良剂对碳酸氢根淋溶的影响, 经过前 3 次淋溶后淋出液中 HCO_3^- 含量大幅度减少。如图 3b 所示, γ -PGA 与脱硫石膏配施后能够显著降低淋后土壤中的 HCO_3^- 含量, 其中 GP_2 处理中含量最低为 0.30 cmol/kg 。单施 γ -PGA 时, 随着改良剂的施用量增加土壤中 HCO_3^- 含量呈现出增加的趋势。由图 3c 可知, Cl^- 的淋出主要集中在第一周。改良剂的 Cl^- 的淋溶与改良剂之间的作用无明显关系, 其主要原因是 Cl^- 极易溶于水, 且在土壤垂直方向活跃移动, 只要土壤水分充足 Cl^- 就能大量地随水淋溶。由图 3d 可知, CK 处理淋后土壤 Cl^- 含量最高, 为 0.45 cmol/kg , 其他处理 Cl^- 含量明显低于 CK 处理。 P_1 , GP_2 处理 Cl^- 含量较低, 为 $0.26, 0.25 \text{ cmol/kg}$ 。由图 3e 可知, SO_4^{2-} 的淋溶也主要集中在第一周。土壤淋出液中的 SO_4^{2-} 来自于两部分, 一部分是土壤本身含有的大量可溶性的 SO_4^{2-} , 另一部分是由于脱硫石膏的添加后溶解的一部分脱硫石膏产生的 SO_4^{2-} 。由图 3f 可知, γ -PGA 单施时也能促进土壤中原有 SO_4^{2-} 的溶解淋溶, 所以添加改良剂后 SO_4^{2-} 的淋出量较高。施加脱硫石膏的处理淋后土壤中 SO_4^{2-} 含量较其他处理显著提高, 达到 5.73 cmol/kg 。单施 γ -PGA 的处理与 CK 处理间无明显差

异, γ -PGA 与脱硫石膏配施的处理中 GP_2 处理土壤中 SO_4^{2-} 含量相较于 G 处理显著降低。

2.1.4 对淋出液和淋后土壤 Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 K^+ 含量的影响 由图 4a 可知, 施加脱硫石膏的处理在四周的淋溶过程中 Ca^{2+} 淋出量随着淋溶的进行有增加的趋势, 而未施加脱硫石膏的处理则在波动中降低。 γ -PGA 在对 Ca^{2+} 的淋溶中并没有明显的规律。如图 4b 所示, 单施 γ -PGA 处理与 CK 处理间无明显差异, 而相较于 CK 和单施 γ -PGA 或脱硫石膏, 脱硫石膏配施 γ -PGA 可以显著增加土壤中 Ca^{2+} 的含量。如图 4c 所示, 镁的淋溶主要集中在前两周。由图 4d 可知, 施加脱硫石膏处理较其他不施脱硫石膏处理淋后土壤中 Mg^{2+} 的含量显著增加, 这可能是因为脱硫石膏中含有一定的 Mg^{2+} , 随着脱硫石膏的溶解 Mg^{2+} 被释放, G 处理相较于和 CK 处理提高了 133%。由图 4e 可知, 淋出液中 K^+ 的淋出量较小, 这与原土壤中 K^+ 含量较低有关。钾淋溶主要集中在前 2 周。由图 4f 可知, 施加 γ -PGA 可显著提高淋后土壤中 K^+ 含量, 而且在脱硫石膏配施的情况下提高幅度更高, P_3 和 GP_3 处理分别为 $0.015, 0.028 \text{ cmol/kg}$ 。由于原土壤中 K^+ 含量低, 而 CK 处理 K^+ 淋出量大, 最终在淋后土壤中 CK 处理含量较低, 为 0.006 cmol/kg 。

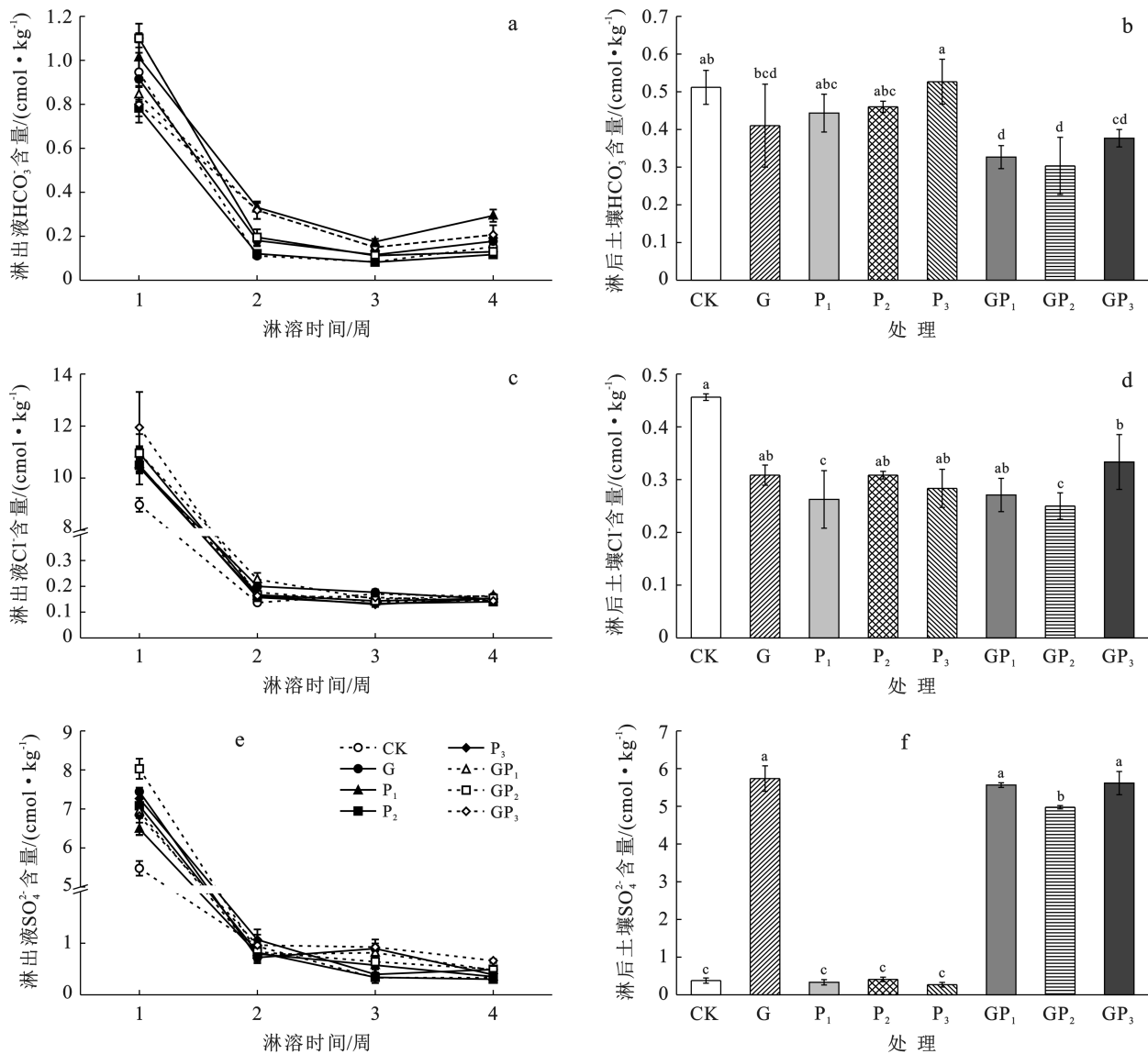


图 3 γ -PGA 与脱硫石膏处理对淋出液及土壤 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的影响

Fig.3 Effect of γ -PGA and FGD gypsum treatment on leachate and soil HCO_3^- 、 Cl^- and SO_4^{2-}

2.1.5 淋后土壤 SAR 值 土壤 SAR 值是指土壤钠吸附比,是衡量土壤中 Na^+ 危险程度的重要标准,也是衡量土壤碱化程度的重要指标。如图 5 所示,所有添加改良剂的处理均能够有效的降低土壤的 SAR 值。其中单施脱硫石膏处理最低,单施用 γ -PGA 也可以有效降低土壤的 SAR 值,但 SAR 值高于单独的脱硫石膏, γ -PGA 和脱硫石膏配合施用,SAR 值处于单施脱硫石膏和单施 γ -PGA 中间。

2.2 脱硫石膏与 γ -PGA 配施对盐碱化土壤改良及玉米苗期生长的影响

2.2.1 脱硫石膏与 γ -PGA 配施对玉米生长的影响

由图 6 可知,施加改良剂的处理均能够显著促进玉米的生长。在玉米生长 10 d 时,各处理差异显著,相较于 CK 处理,单施 γ -PGA 在中低浓度随着施用量的

增加,株高逐渐增高,但最高浓度时出现严重的抑制生长现象。当 γ -PGA 与脱硫石膏配施时,各处理相较于单施 γ -PGA 其株高均有明显增长,玉米叶面积明显增大;玉米干重明显增加,其中 GP_2 处理较对照处理增加了 78.63%,较单独脱硫石膏和 γ -PGA 处理分别增加了 45.64% 和 13.25%。当玉米生长 20 d 时,与 10 d 时变化规律类似, γ -PGA 与脱硫石膏配施处理时明显优于其他处理效果,配施处理时株高、叶面积和干重均显著增加,其中 GP_2 处理干重较对照处理增加了 60.20%,较单独脱硫石膏和 γ -PGA 处理分别增加了 75.68% 和 43.43%。玉米生长 30 d 时,株高、叶面积和干重均达到最大值。与 10 d 时类似, γ -PGA 与脱硫石膏配施处理玉米株高明显高于其他处理, GP_2 处理最高。此外,单施脱硫石膏仍能够提

高玉米的叶面积和干重,而在 γ -PGA 与脱硫石膏配施时,玉米干重最大,其中 GP₂ 处理较对照处理增加

了 54.40%,较单独脱硫石膏和 γ -PGA 处理分别增加了 40.27%和 29.47%。

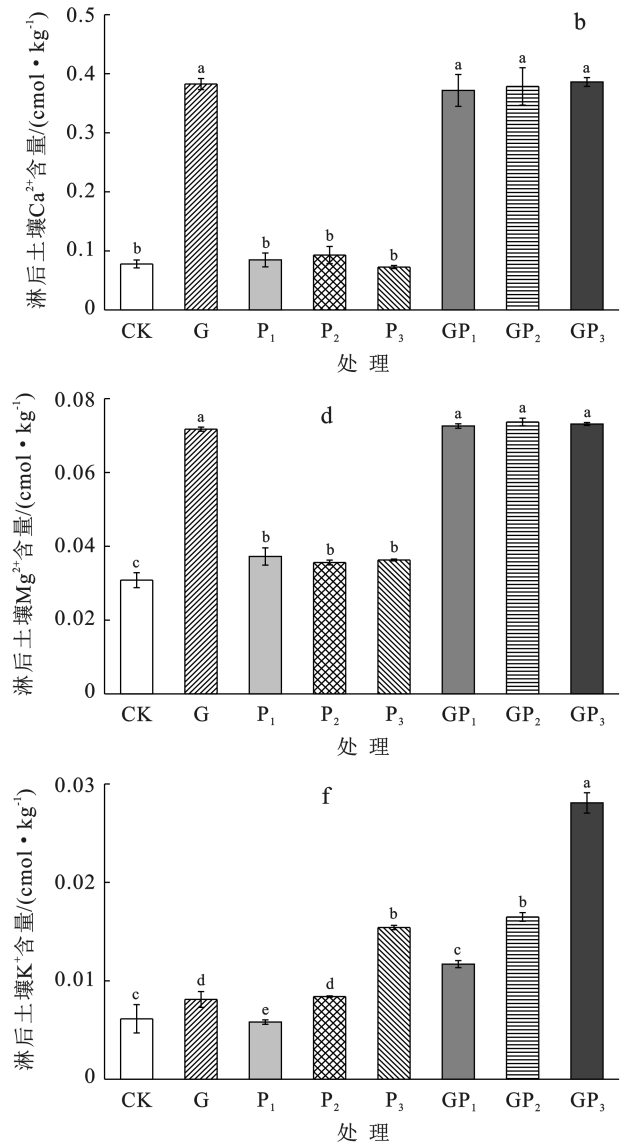
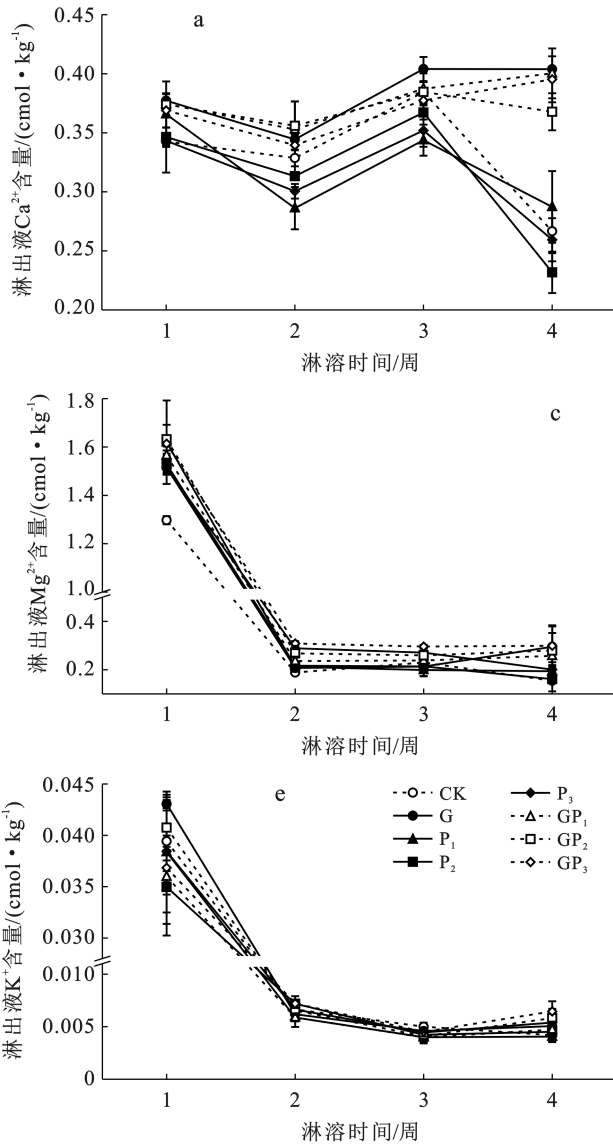


图 4 γ -PGA 与脱硫石膏处理对淋出液及土壤 Ca²⁺, Mg²⁺ 和 K⁺ 的影响

Fig.4 Effects of γ -PGA and FGD gypsum treatment on leachate and soil Ca²⁺, Mg²⁺ and K⁺

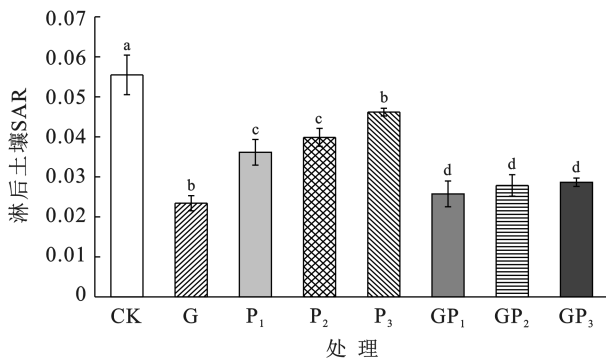


图 5 γ -PGA 与脱硫石膏处理对淋后土壤 Na⁺ 吸附比(SAR)的影响

Fig.5 Effect of treatments on leachate soil sodium adsorption ratio (SAR)

2.2.2 不同处理盆栽收获后土壤 pH 值和电导率
盆栽试验结束后收集各处理的土壤,其 pH 值如图 7a 所示,施加改良剂能够明显降低盐碱土壤的 pH 值,尤其是施加脱硫石膏的处理。当 γ -PGA 与脱硫石膏配施时,相较于 CK 处理,GP₁ 和 GP₂ 处理的土壤 pH 降低了 7.12%和 7.04%;相较于单施石膏处理,pH 值有所上升,其中 GP₁ 和 GP₂ 处理的土壤 pH 值上升了 3.15%和 3.24%;相较于单施 γ -PGA 处理,GP₁ 和 GP₂ 处理的土壤 pH 值降低了 6.66%和 7.71%。由图 7b 可知,盆栽收获后各处理土壤电导率差异明显,其中 CK 处理电导率最低,土壤电导率随着 γ -PGA

的施用量的而增加;相较于 CK 和单施处理,脱硫石膏与 γ -PGA 配施处理电导率明显降低。

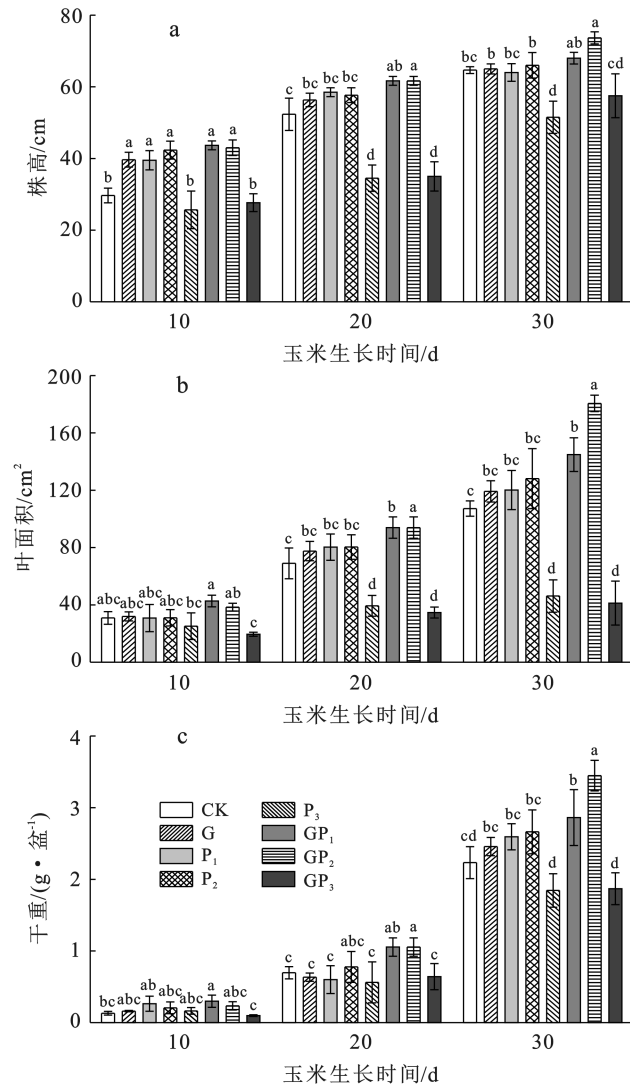


图 6 盆栽试验中各处理对玉米生长的影响

Fig.6 Effects of treatments on maize growth in pot trial

2.2.3 不同处理盆栽收获后土壤养分含量 由图 8a 可知, γ -PGA 施入土壤后能够显著提高土壤的全氮

含量。此外, γ -PGA 与脱硫石膏配施处理较单施 γ -PGA 处理有所下降。由图 8b 可知,由于盐碱土含磷量较低,相比于 CK 处理,施加脱硫石膏后 G 处理速效磷含量降低了 7.8%,是因为脱硫石膏溶解产生的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 会对磷产生固定作用。此外,当 γ -PGA 与脱硫石膏配施时土壤中过多的磷素会被固定,GP₃ 处理速效磷含量相比于 P₃ 处理降低了 38%。由图 8c 可知,随着 γ -PGA 施用量的增加,土壤中 K^{+} 的含量也随之增加。相较于单施 γ -PGA 处理, γ -PGA 与脱硫石膏配施处理时速效钾含量显著降低,其中 GP₃ 最高。如图 8d 所示,添加有机改良剂的处理土壤有机质含量有不同程度的增加,而添加石膏对土壤有机质含量的影响并不明显。单施 γ -PGA 处理土壤有机质含量随着施用量增加而增加,此外, γ -PGA 与脱硫石膏配施时相较于单施没有表现出明显变化。

2.2.4 不同处理盆栽收获后土壤酶活性 土壤脲酶是土壤中酶的重要组成部分,能够反映出土壤的微生物活性以及土壤肥沃程度。如图 9a 所示,施加脱硫石膏后土壤脲酶活性较 CK 处理明显提高 11.36%。 γ -PGA 与脱硫石膏配施后能够更好地提高土壤脲酶活性,相比于单施 γ -PGA 处理 GP₁, GP₂, GP₃ 处理的脲酶活性分别提高了 5.88%, 9.26%, 19.5%。碱性磷酸酶是一类重要的土壤酶,其中盐碱土中的磷酸酶属于碱性磷酸酶。由图 9b 可知,相较于 CK 处理,单施 γ -PGA 土壤碱性磷酸酶活性显著增加。当脱硫石膏与 γ -PGA 配施处理,酶活性显著低于单施 γ -PGA 处理。土壤蔗糖酶是根据其酶促基质为蔗糖而得名的一类土壤酶。由图 9c 可知,单施脱硫石膏能够降低土壤中蔗糖酶的活性;单施 γ -PGA 处理时,随着施用量的增加蔗糖酶活性快速下降。在 γ -PGA 与脱硫石膏配施的处理中 GP₂, GP₃ 处理相较于 P₂, P₃ 处理酶活性分别提高了 6.42% 和 58.12%,说明脱硫石膏能够缓解高浓度 γ -PGA 对酶活性的抑制作用。

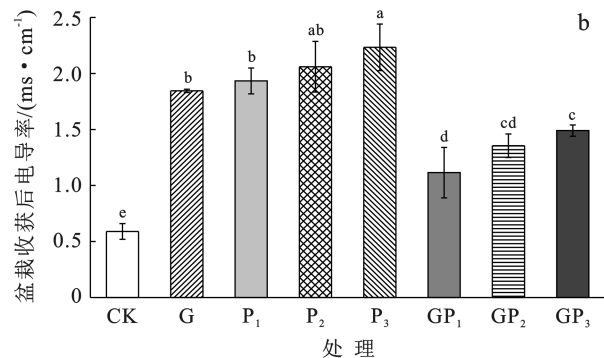
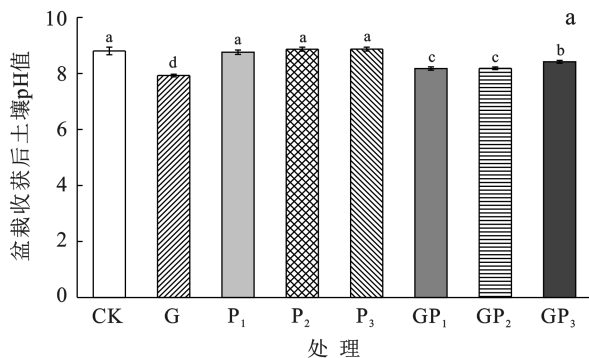


图 7 γ -PGA 与脱硫石膏处理对盐碱土土壤 pH 值和 EC 的影响

Fig.7 Effects of γ -PGA and FGD gypsum treatment on pH value and EC of saline soils

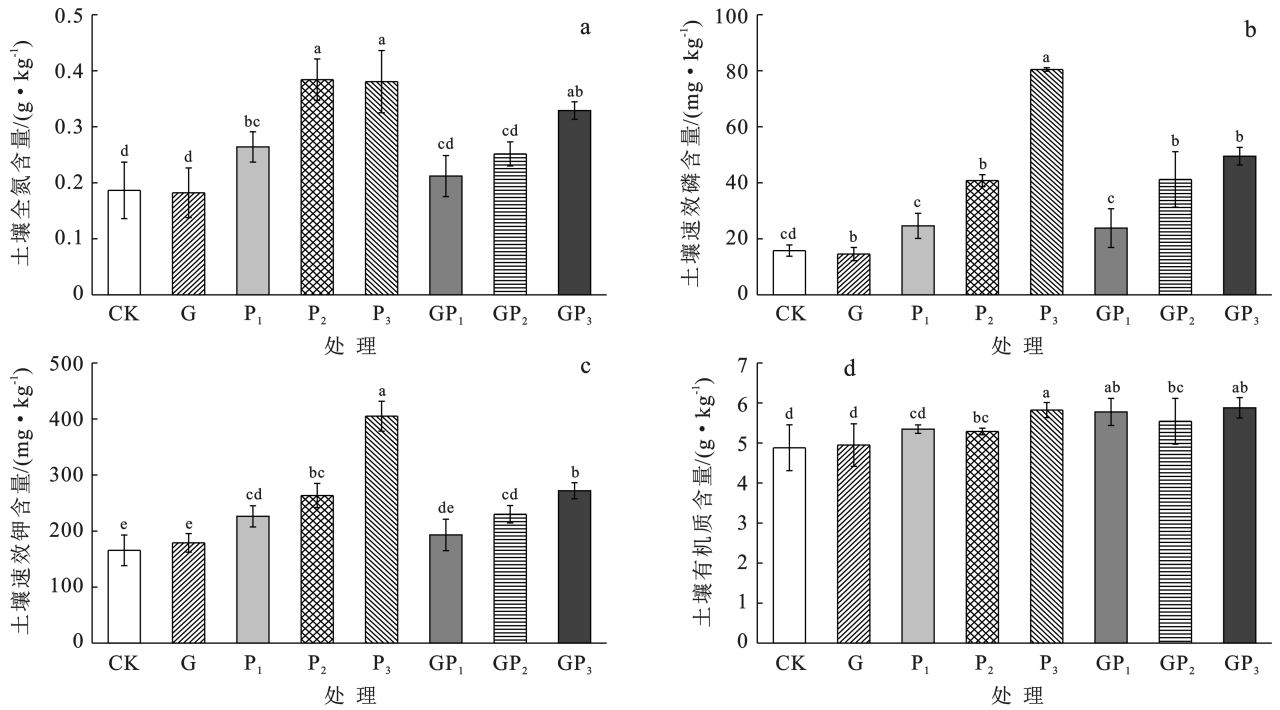


图 8 盆栽试验中各处理对盐碱土养分的影响

Fig.8 Effects of treatments on nutrients in saline soils in pot trial

3 讨论

脱硫石膏主要通过离子交换作用使钠质土转化为钙质土,从而改良盐碱化土壤,其交换出钠,从而 Na^+ 更容易淋洗出来。但是在西北旱区,单施脱硫石膏改良效果通常较差,主要由于水分不足导致脱硫石膏溶解慢,溶解度低,产生的水溶性 Ca^{2+} 较少,难以大量交换土壤中大量存在的 Na^+ 。同时,如不能保证大量水分淋溶,大量施入脱硫石膏还有增加土壤盐含量的潜在风险^[26]。因此,在盐碱土改良中脱硫石膏往往与其他改良剂配合施用,如利用有机肥、pH值较低的腐植酸,增大离子交换量从而提高脱硫石膏的改良作用。孙在金^[8]将脱硫石膏与腐植酸应用于海滨盐碱土的改良,结果表明相较于单独施用,脱硫石膏与腐植酸配施处理对盐碱土pH值降低作用更显著。本试验中,单施及配施两种改良剂时淋出液的pH都较对照低,说明并没有出现明显的脱碱过程;但是,单施脱硫石膏降低了淋洗后土壤的pH值,单施 γ -PGA轻微增加了土壤的淋洗后pH值,而二者配施则显著降低土壤pH值,且低于单施脱硫石膏。脱硫石膏依赖于离子代换作用,而 γ -PGA则依赖于羟基直接与土壤碱性物质反应。添加脱硫石膏处理,淋后土壤的盐分含量大幅度增加,虽然淋溶能够减少土壤盐分,但当施用量高时,离子残留量也大,最终会提高土壤盐分含量,导致脱硫石膏处理相较于对照处理,

土壤电导率提高了6倍;而单施 γ -PGA时,由于其本身具有一定的电导率,还具有一定的离子吸附力,最终导致土壤电导率略微升高; γ -PGA与脱硫石膏配施时电导率略有下降。说明脱硫石膏配施 γ -PGA虽然可以增加离子的淋洗量,但是不能降低土壤电导率,这可能是由于其增加了离子的交换量,使得整个过程处于动态平衡中。

本研究中,单施及配施两种改良剂时都增加了对 Na^+ 的淋洗,但是土壤中的 Na^+ 在单施脱硫石膏和低剂量施用 γ -PGA时均低于对照,二者配施则和对照无显著差异,说明 γ -PGA确实促进了 Na^+ 的交换,同时可能又对 Na^+ 有较好的结合能力。施用脱硫石膏可以显著的增加淋出液和土壤中 Ca^{2+} 的浓度,而 γ -PGA则无论在配施还是单独施用时都不会影响淋出液和土壤中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,说明 Ca^{2+} , Mg^{2+} 主要受施用脱硫石膏影响。当脱硫石膏和 γ -PGA配施时增加了土壤中 K^+ 的含量,说明其增加土壤中钾主要是由于增加了土壤钾的解离和交换,而不是由 γ -PGA带入。以上结果进一步表明,脱硫石膏配施 γ -PGA可进一步促进 Na^+ , K^+ 一价阳离子的代换。二价阴离子 SO_4^{2-} 主要受到脱硫石膏的影响,石膏处理后,虽然淋出量有增加,但是其淋洗后土壤的 SO_4^{2-} 大幅升高,并且不受到 γ -PGA的影响。单施及配施两种改良剂,都增加了对 Cl^- , HCO_3^- 离子的淋洗,降低了其在土壤中的含量。而 Cl^- 的移动性强,在土壤中残

留量很低,施加改良剂处理能显著降低其含量但差异不大,因此 Cl^- 的淋失更可能取决于淋溶次数或灌水量的多少。土壤的钠吸附比是衡量盐碱土壤中 Na^+ 相对含量和危害程度的重要指标。

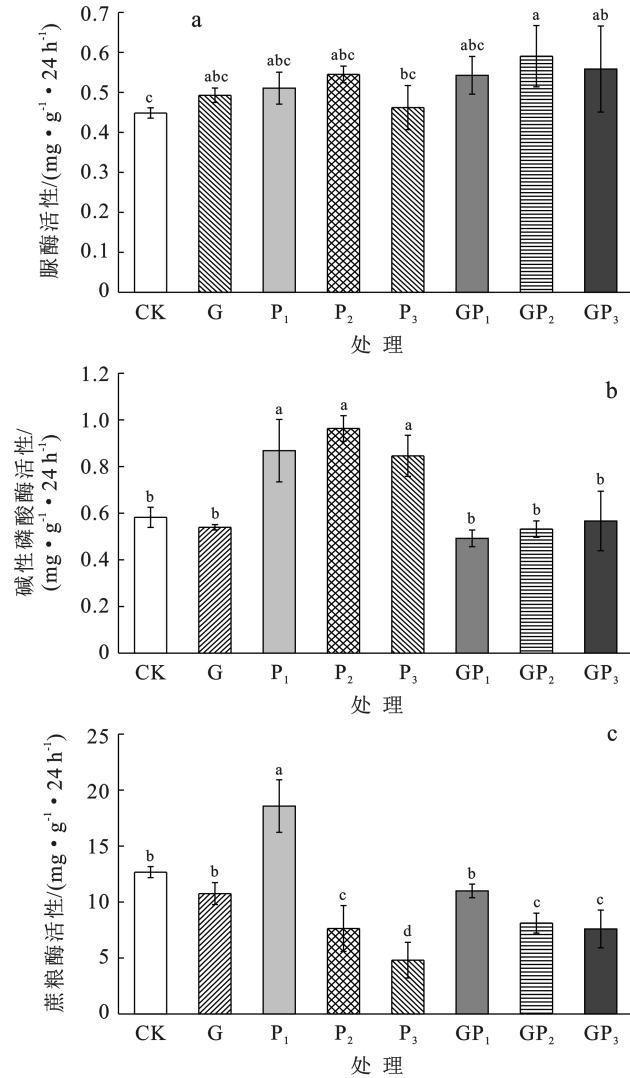


图9 盆栽试验中各处理对盐碱土酶活性的影响

Fig.9 Effects of treatments on enzyme activity in saline soils in pot trial

当土壤中存在大量的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 时, Na^+ 很难被胶体吸附,降低了土壤发生盐碱化的可能性,使其危害性大大降低,适当灌水后 Na^+ 就可淋失。试验结果与预期一致,脱硫石膏处理的 SAR 值最低,而脱硫石膏与 γ -PGA 处理的 SAR 值略高于脱硫石膏处理,但差异并不明显。综上所述,在盐碱土土柱淋溶模拟试验中当脱硫石膏与 γ -PGA 配施时,土壤较低 pH 值和较高的 EC、有害离子的淋溶增加和土壤碱化风险的降低都有较好的效果。说明高分子有机物质含有大量的酸性基团与脱硫石膏协同作用能更好地降低土壤 pH,因此配施两种改良剂时较低的 pH 值在一

定程度上能促进石膏类物质的溶解进而促进离子交换作用,从而为解决干旱地区脱硫石膏利用困难的问题提供方案。

此外,盐碱土改良中,减轻对作物生长的抑制和促进作物生长是盐碱土改良的重要目标。邹璐^[27]在施加脱硫废弃物的盐碱土壤中种植油葵,施加脱硫石膏后显著增加了油葵的株高,相比于对照最高提高了 59.4%,株径最大提高了 36.3%。孙在金^[8]的研究表明,将脱硫石膏与腐植酸配合施用能取得比单施更好的效果,棉花的株高、叶面积、鲜重最大提高了 22.2%, 5.17% 和 17.87%。本研究盆栽试验中取得的结果与前人研究结论一致,将脱硫石膏与 γ -PGA 配施时,盆栽玉米的株高、叶面积和干重提高最为明显,其中 GP₂ 处理的株高、叶面积和干重相较于对照分别提高了 13.91%, 68.47% 和 54.26%,并且高于单独的脱硫石膏与 γ -PGA 处理。但是当 γ -PGA 过量施用时会明显抑制作物生长,这可能是因为有机改良剂具有保水作用,大量使用时会影响植物根系的呼吸和生长。此外,盆栽试验中,施加 γ -PGA 的处理显著增加了土壤中全氮、磷和钾含量。总体而言,随着有机改良剂施用量的增加,有机质和全氮含量也随之增加,单施处理和配施处理间差异并不显著,单施脱硫石膏并不能对土壤全氮和有机质产生影响,这可能是因为盆栽试验周期较短,土壤结构无明显变化。施加 γ -PGA 处理能够显著增加土壤中的磷钾含量,可能是 γ -PGA 促进了磷钾的活化。此外,盆栽试验中,施加 γ -PGA 能够显著提高土壤酶活性,这主要是因为有机改良剂含有大量的养分,为微生物提供了能量来源,并改善了土壤环境,使土壤微生物的活性提高。单施脱硫石膏和有机改良剂均能够有效提高土壤脲酶活性,配施效果更好,GP₂ 处理最高,较 CK 处理提高了 34.09%;单施脱硫石膏会略微降低土壤碱性磷酸酶活性,因为石膏会降低土壤 pH 值。施加 γ -PGA 能够显著提高土壤碱性磷酸酶的活性,这与其较低的速效磷含量有关。 γ -PGA 与脱硫石膏配施时,相比于单施处理则会降低酶活性。较低浓度的有机改良剂能够显著提高土壤蔗糖酶的活性,而其他处理则有所抑制,这可能是因为土壤含水量较高抑制了酶活性。

4 结论

施用脱硫石膏和 γ -PGA 都能不同程度地改良盐碱化土壤,其中脱硫石膏与 γ -PGA 配施效果最好。配施后能够进一步降低土壤 pH 值,促进 Na^+ , Cl^- , HCO_3^- 等有害离子的淋洗,增加 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+}

和 K^+ 离子浓度;此外,该处理还可以提高土壤中全氮,磷含量和土壤酶活性。本研究验证了脱硫石膏和 γ -PGA 配施可以发挥较好互补作用。施用脱硫石膏和 γ -PGA 能显著改良盐碱化土壤,其中脱硫石膏与 γ -PGA 配施效果最好。脱硫石膏施用量为 2.22×10^4 kg/hm^2 ; γ -PGA 施用量为 $652 \sim 1\ 304$ kg/hm^2 时对盐碱土的改良效果最显著。

[参 考 文 献]

- [1] Pan Chengchen, Zhao Halin, Feng Qi, et al. Temporal variations of ground-dwelling arthropods in relation to grassland salinization [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 68(1): 25-32.
- [2] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].*土壤学报*, 2008, 45(5): 837-845.
- [3] 胡炎,杨帆,杨宁,等.盐碱地资源分析及利用研究展望[J].*土壤通报*, 2023, 54(2): 489-494.
- [4] 石玉林.关于《中国 1/100 万土地资源图土地资源分类工作方案要点》(草案)的说明[J].*资源科学*, 1982, 1(1): 63-69.
- [5] 胡敏.河套灌区盐渍化土壤节水改良技术及土壤水盐运移规律研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
- [6] 俞仁培,尤文瑞.中国科学院黄淮海平原综合治理研究(1986—1990)土壤盐化,碱化的监测与防治[M].北京:科学出版社, 1993.
- [7] 赵锦慧.对石膏改良碱化土壤过程中发生的化学过程和物理过程的研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2001.
- [8] 孙在金.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.
- [9] Clark R B, Zeto S K, Ritchey K D, et al. Growth of forages on acid soil amended with flue gas desulfurization by-products [J]. *Fuel*, 1997, 76(8): 771-775.
- [10] Chun S, Nishiyama M, Matsumoto S. Sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulfurization: corn production and soil quality [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 453-459.
- [11] Sansom J J, Chanasyk D S, Naeth M A, et al. In situ amelioration of sodic minespoil with chemical amendments and crop management: II. Soil physical properties, soil moisture and plant growth [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78(4): 667-674.
- [12] 李焕珍,张玉龙.脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果的研究[J].*生态学杂志*, 1999, 18(1): 25-29.
- [13] Steduto P, Albrizio R, Giorio P, et al. Gas-exchange response and stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation of sunflower under salinity [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2000, 44(3): 243-255.
- [14] 李跃进,乌力更,芦永兴,等.燃煤烟气脱硫副产物改良碱化土壤田间试验研究[J].*华北农学报*, 2004, 19(12): 10-15.
- [15] 吴保庆,郭洪海.烟气脱硫石膏对盐胁迫下紫花苜蓿生理的影响[J].*山东农业科学*, 2008, 1(2): 45-47.
- [16] 肖国举,罗成科,张峰举,等.犁翻与旋耕施用脱硫石膏对改良碱化土壤的效果研究[J].*生态环境学报*, 2010, 19(2): 433-437.
- [17] 周阳.脱硫石膏与腐植酸改良盐碱土效果研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016.
- [18] 景鑫鑫.改良剂对盐碱土壤修复的研究进展[J].*河南农业*, 2020(1): 17-19.
- [19] Sojka R E, Lentz R D. Reducing furrow irrigation erosion with polyacrylamide(PAM) [J]. *Journal of Production Agriculture*, 1997, 10(1): 47-52.
- [20] 杨扬.添加 γ -PGA 保水剂对一维垂直入渗土壤水盐运移特性的影响研究[D].陕西 西安:西安理工大学, 2018.
- [21] 王卫国,王卫,赵永亮,等. γ -聚谷氨酸的研究及应用进展[J].*河南工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(2): 837-845.
- [22] Chen Lihua, Xu Xianghong, Zhang Huan, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid biopreparation (PGAB) on nitrogen conservation in the coastal saline soil [C] // Egu General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2017: 2096.
- [23] 宋新山,邓伟,章光新,等.钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用[J].*水利学报*, 2000, 1(7): 70-76.
- [24] 吴忠东,王全九.微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J].*干旱地区农业研究*, 2008, 26(1): 231-236.
- [25] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社, 2000.
- [26] 侯林.脱硫石膏与腐植酸改良盐碱土室内土柱研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018.
- [27] 邹璐.盐碱地施用脱硫石膏对土壤理化性质和油葵生长的影响[D].北京:北京林业大学, 2012.