

王舒华,陈 爽,王 悦,等. 有机改良剂配施磷石膏的盐碱土改良效果研究[J]. 江苏农业科学,2022,50(11):227-233.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.11.033

有机改良剂配施磷石膏的盐碱土改良效果研究

王舒华,陈 爽,王 悦,徐 莉,焦加国,李辉信,胡 锋

(南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心,江苏南京 210095)

摘要:为了探究有机改良剂配施磷石膏对盐碱土中盐分和有机碳的影响,通过室内培养试验,共设计 WO(有机硅功能肥)、YP(土壤调理剂)、OF(有机肥)、PG(磷石膏)、WO + PG(有机硅功能肥 + 磷石膏)、YP + PG(土壤调理剂 + 磷石膏)、OF + PG(有机肥 + 磷石膏)和 CK(空白对照)8 个处理。结果表明,改良剂的施用提高了土壤的水溶性总盐含量和阳离子交换量(CEC);有机改良剂和磷石膏对于盐碱土的改良效果不一样,有机改良剂的施用主要提高了土壤的 CEC 和可溶性有机碳(DOC)含量,而磷石膏的施用主要提高了土壤的水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 含量,并降低了土壤的 pH 值、钠吸附比(SAR)。有机改良剂配施磷石膏对盐碱土的改良效果优于单施有机改良剂,与单施有机改良剂相比,有机改良剂配施磷石膏显著提高了土壤水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 含量,显著降低了土壤的 SAR、交换性 Na^{+} 含量和碱化度(ESP);在本试验中,有机硅功能肥配施磷石膏的处理对于盐碱土壤的改良效果最好,与 CK 相比,此处理中土壤的 pH 值、SAR、交换性 Na^{+} 含量和 ESP 分别显著下降 8.82%、43.47%、31.73%、37.82%。研究结果可以为有机改良剂配施磷石膏改良盐碱土提供理论基础和实际田间应用参考。

关键词:有机改良剂;磷石膏;盐碱土;室内培养试验;土壤改良

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)11-0227-07

盐碱土是盐化土、碱化土、盐土和碱土的总称^[1],指土壤含有过多的可溶性盐分,从而抑制或危害作物的生长发育。土壤中可溶性盐分离子过高,尤其是含过多的 Na^{+} ,容易使土粒分散,造成黏土的弥散和膨胀,土壤团聚体受到破坏,土壤孔隙率低,容重变大,土壤的导水性、透气性变差。由于团聚体结构受到破坏,有机质容易分解,所以有机质含量较低,土壤中碳储存下降^[2]。

土壤改良剂可有效减少盐分危害,改善土壤质量^[3]。有机改良剂主要由生活残渣、农业废弃物、动物粪便、工业废品等组成,施加有机改良剂对土壤的容重、饱和导水率和有机质含量的提高有明显积极的影响^[4]。付颖使用草炭、糠醛渣、园林废弃物等 3 种有机改良剂对土壤进行改良,结果表明草炭和糠醛渣可以增加土壤有机碳,园林废弃物可以提高土壤的阳离子交换量^[5]。王涵发现,有机改良剂能够提高盐碱土的有机质含量,降低土壤 pH 值、

电导率、水溶性盐含量及碱化度^[6]。

磷石膏是磷铵工业的副产品,主要成分是二水硫酸钙^[7]。作为一种无机改良剂,磷石膏改良盐碱地的效果显著。石膏改良盐碱地的原理主要有 2 个,一方面石膏可以提供丰富的 Ca^{2+} , Ca^{2+} 可以通过替换土壤胶体吸附的 Na^{+} ,在一定程度上增强了钠的迁移^[8];另一方面 Ca^{2+} 可以在土壤有机质和黏土颗粒之间形成离子桥,从而改良土壤结构,有利于水分入渗,促进盐分的淋洗。Zhao 等的研究表明,脱硫石膏应用后,土壤中的 EC 值、pH 值、碱化度、钠吸附比和可溶性离子水平显著下降^[9]。

改良剂与石膏配合施用对盐碱土的改良效果优于改良剂单独施用^[10]。张晓东等的研究表明,由磷石膏、腐植酸、牛粪和玉米秸秆形成的复合改良剂对盐碱地的改土、降盐、培肥、增产作用优于其单一组分^[11]。张盼盼等的研究表明,有机肥配施磷石膏对作物的增产效果优于单施有机肥或者磷石膏^[12]。本研究通过室内土壤培养试验,探究有机改良剂配施磷石膏对盐碱土盐分和有机碳的影响,以筛选适合本研究区域盐碱土改良的最佳改良剂和组合,为盐碱地的改良提供理论参考依据。

收稿日期:2021-09-14

基金项目:山东省重点研发计划(编号:2019JZZY020614)。

作者简介:王舒华(1996—),女,广东清远人,硕士,主要从事盐碱土改良研究。E-mail:2019803182@njau.edu.cn。

通信作者:焦加国,博士,研究员,主要从事土壤生态学研究。

E-mail:jiaguojiao@njau.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤来自山东省博兴县山东博华高效生态农业科技有限公司蔡寨基地(118°08′52″E,37°18′15″N)。2020 年 11 月采集表层(0~20 cm)土壤,其基本理化性质:pH 值为 9.02,EC 值为 2.86 dS/cm,水溶性总盐含量为 8.89 g/kg,水溶性 Ca²⁺ 含量为 1.41 mmol/L,水溶性 Mg²⁺ 含量为 3.77 mmol/L,水溶性 K⁺ 含量为 0.23 mmol/L,水溶性 Na⁺ 含量为 28.99 mmol/L,钠吸附比(SAR)为

18.03 (mmol/L)^{1/2},阳离子交换量(CEC)为 11.74 cmol/kg,交换性 Na⁺ 为 0.66 cmol/kg,碱化度(ESP)为 5.61%,有机碳(SOC)含量为 4.15 g/kg。

1.1.2 供试土壤有机改良剂 选择有机硅功能肥(WO)、土壤调理剂(YP)、有机肥(OF)等 3 种有机改良剂和磷石膏(PG)进行培养试验。土壤调理剂主要由麦饭石、腐植酸、生物酶等组成;有机肥由牛粪、玉米秸秆、稻壳、鸭粪等堆腐而成;磷石膏为粉状,主要成分为硫酸钙,占 88% 左右。改良剂的基本理化性质见表 1。

表 1 土壤有机改良剂的基本理化性质

改良剂	pH 值	EC 值 (dS/m)	水溶性盐分离子含量(mmol/L)			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
有机硅功能肥	5.05 ± 0.01	—	2.08 ± 0.06	4.32 ± 0.11	742.27 ± 4.83	21.91 ± 0.27
土壤调理剂	7.11 ± 0.02	12.24 ± 0.03	14.43 ± 0.02	11.80 ± 0.02	26.66 ± 0.65	379.16 ± 0.89
有机肥	8.17 ± 0.05	4.83 ± 0.04	0.49 ± 0.04	0.79 ± 0.06	16.46 ± 0.14	30.65 ± 0.42
磷石膏	4.18 ± 0.05	3.24 ± 0.02	26.80 ± 3.96	0.15 ± 0.04	0.24 ± 0.03	0.23 ± 0.05

改良剂	SAR (mmol/L) ^{1/2}	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)
有机硅功能肥	12.25 ± 0.01	67.28 ± 6.89	268.35 ± 26.00	90.83 ± 14.51	186.57 ± 6.82
土壤调理剂	104.70 ± 0.33	132.70 ± 11.67	30.84 ± 1.58	3.35 ± 0.75	12.72 ± 1.21
有机肥	38.30 ± 0.88	154.64 ± 6.77	5.34 ± 0.26	3.13 ± 0.13	5.34 ± 0.06
磷石膏	0.06 ± 0.01	1.34 ± 0.38	0.06 ± 0.01	2.58 ± 0.05	—

注:“—”代表低于检测限。

1.2 试验设计

该研究为室内培养试验,于 2020 年 12 月布置,每个钵钵装入风干土 4 kg,有机改良剂的添加量为 0.3%,磷石膏添加量为 1%。共设计 8 个处理:WO(0.3%的有机硅功能肥)、YP(0.3%的颗粒土壤调理剂)、OF(0.3%的有机肥)、PG(1%的磷石膏)、WO + PG(0.3%的有机硅功能肥 + 1%的磷石膏)、YP + PG(0.3%的颗粒土壤调理剂 + 1%的磷石膏)、OF + PG(0.3%的有机肥 + 1%的磷石膏)和 CK(不添加任何土壤改良剂),每个处理 3 次重复。试验期间每周补 1 次水,维持土壤含水率为最大田间持水量(50.8%)的 60% 左右,即土壤含水率在 30.48% 左右,培养 60 d 后采样进行测定分析。

1.3 样品的采集与测定

培养结束时采用多点混合采样。土壤样品分为 2 个部分,一部分作为鲜样,过 10 目筛,放入 4℃ 冰箱保存并尽快测定相关指标;一部分进行风干,并

过 10、20、100 目的孔筛,进行相关指标测定。

土壤理化性质测定参照《土壤农化分析》^[13] 进行。土壤 pH 值和 EC 值的测定分别使用玻璃电极酸度计和电导率测定仪(水土比为 5:1);水溶性总盐含量的测定采用电导法;可溶性盐分离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺)含量的测定使用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES);土壤有机碳(SOC)含量的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法;可溶性有机碳(DOC)含量的测定使用碳氮分析仪;阳离子交换量(CEC)的测定采用乙酸钠-火焰光度法;交换性 Na⁺ 含量的测定采用 NH₄OAc-NH₄OH 火焰光度法;土壤微生物生物量碳/氮(MBC/MBN)含量测定:土壤样品用三氯甲烷熏蒸 24 h 后用 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提,根据熏蒸土壤和未熏蒸土壤测定的碳/氮量的差值和提取效率估算土壤微生物生物量碳/氮含量。

碱化度(ESP)计算公式:

$$ESP = \frac{\text{可交换性 Na}^+ \text{ 含量}}{CEC} \times 100\% \quad (1)$$

钠吸附比(SAR)计算公式:

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

其中:Na⁺代表土壤溶液的水溶性钠离子含量;Ca²⁺代表土壤溶液的水溶性钙离子含量;Mg²⁺代表土壤溶液的水溶性镁离子含量。

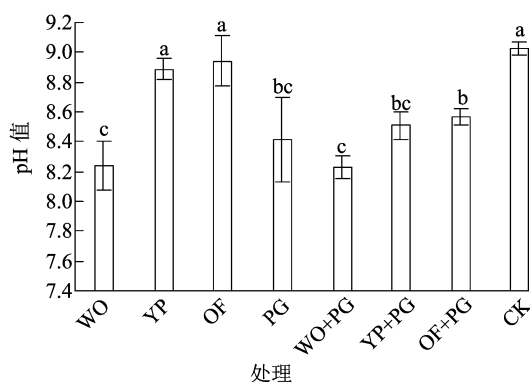
1.4 数据统计及分析

试验数据利用 Excel 2016、SPSS 20.0 软件进行统计分析,用 Excel 2016 进行图表制作,采用 Duncan's 检验法($P < 0.05$)进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 有机改良剂配施磷石膏对土壤 pH 值、EC 值的影响

由图 1 可知,与 CK 相比,添加磷石膏各处理的土壤 pH 值均显著降低,PG、WO + PG、YP + PG 和 OF + PG 处理分别降低了 0.61、0.79、0.51 和 0.45 ($P < 0.05$),但 YP、OF 处理与 CK 相比,土壤 pH 值差异不显著。



柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 有机改良剂配施磷石膏对土壤 pH 值的影响

由图 2 可知,与 CK 相比,除了 OF 处理外,其他改良剂处理均显著提高了土壤 EC 值。与单施有机改良剂的处理相比,有机改良剂配施磷石膏处理的土壤 EC 值显著提高,WO + PG、YP + PG、OF + PG 处理与相应未添加磷石膏的处理相比,土壤 EC 值分别提高了 20.22%、29.95%、45.50%。

2.2 有机改良剂配施磷石膏对土壤盐分及其组成的影响

由图 3 可知,土壤水溶性总盐含量的变化趋势与 EC 值的相似。与 CK 相比,除了 OF 处理外,其

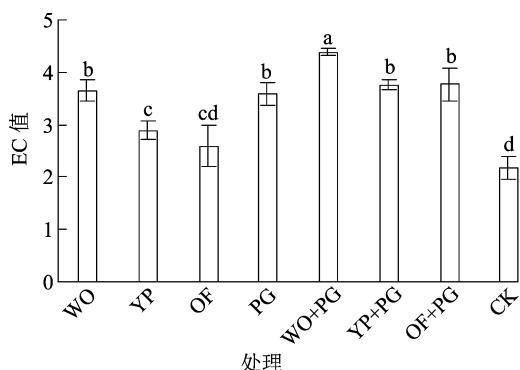


图2 有机改良剂配施磷石膏对土壤 EC 值的影响

他添加改良剂的处理均显著提高了土壤的水溶性总盐含量。与单施有机改良剂的处理相比,有机改良剂配施磷石膏的处理显著提高了土壤的水溶性总盐含量,WO + PG、YP + PG、OF + PG 处理的水溶性总盐含量较相应未添加磷石膏处理分别提高了 20.55%、30.58%、46.56%。

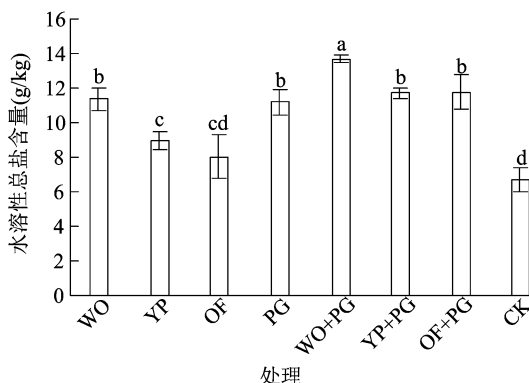


图3 有机改良剂配施磷石膏对土壤水溶性总盐含量的影响

由图 4 可知,与 CK 相比,WO 处理和添加磷石膏的各处理显著提高了土壤水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 含量,但是各添加改良剂的处理都显著提高了土壤的水溶性 Na⁺ 含量。与单施有机改良剂的处理相比,有机改良剂配施磷石膏的处理显著提高了土壤的水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 含量,但是水溶性 Na⁺ 含量差异不显著。

由图 5 可知,与 CK 相比,WO 处理和添加磷石膏的各处理土壤 SAR 均显著降低。与单施有机改良剂的处理相比,有机改良剂配施磷石膏的处理均显著降低了土壤 SAR,WO + PG、YP + PG、OF + PG 处理的土壤 SAR 分别为 9.83、10.08、9.88 (mmol/L)^{1/2},较相应未添加磷石膏处理分别降低了 37.66%、44.29%、46.23%。

由图 6 可知,添加改良剂处理的土壤 CEC 显著高于 CK。与单施有机改良剂处理相比,有机改良剂

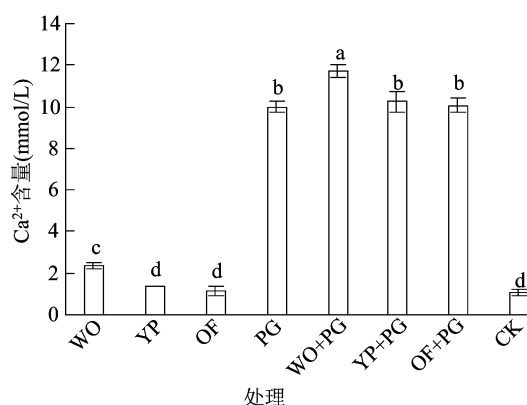
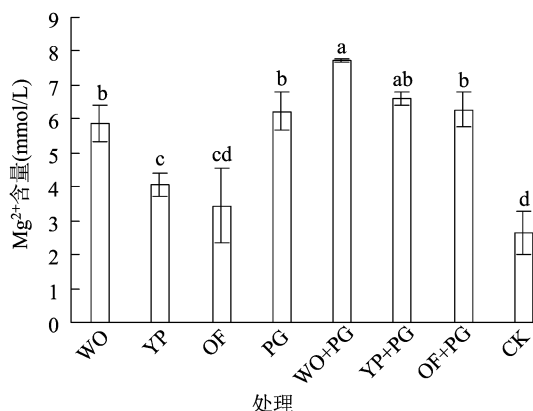
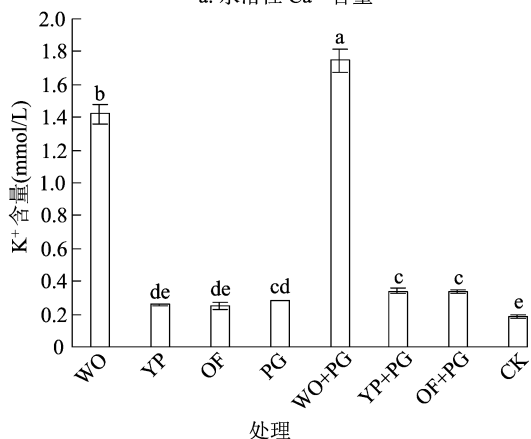
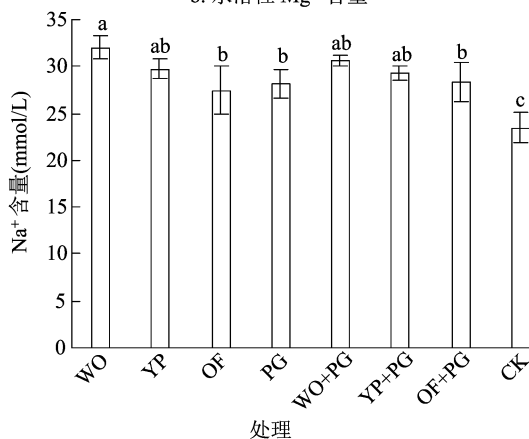
a. 水溶性 Ca^{2+} 含量b. 水溶性 Mg^{2+} 含量c. 水溶性 K^{+} 含量d. 水溶性 Na^{+} 含量

图4 有机改良剂配施磷石膏对土壤水溶性盐分离子含量的影响

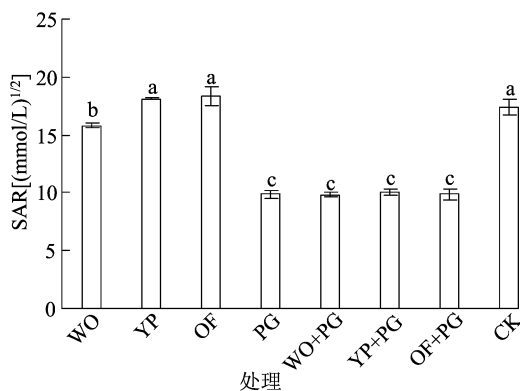


图5 有机改良剂配施磷石膏对土壤 SAR 的影响

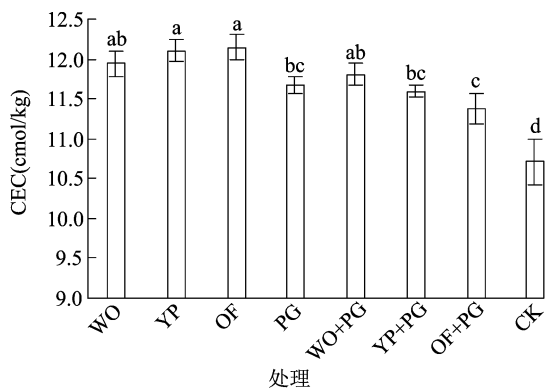


图6 有机改良剂配施磷石膏对土壤 CEC 值的影响

配施磷石膏的处理降低了土壤的 CEC, 其中 YP + PG、OF + PG 处理较相应未添加磷石膏的处理分别显著降低了 4.18%、6.32%。由图 7 可知, 与 CK 相比, WO + PG 处理显著降低了土壤的交换性 Na^{+} 含量, 但 YP 处理和 OF 处理显著提高了土壤的交换性 Na^{+} 含量。与单施有机改良剂的处理相比, 有机改良剂配施磷石膏的处理可以显著降低土壤的交换性 Na^{+} 含量。由图 8 可知, 与 CK 相比, 除了 YP、OF 和 PG 处理, 其他添加改良剂的处理都显著降低了

土壤 ESP, 与单施有机改良剂处理相比, 有机改良剂配施磷石膏处理的土壤 ESP 均显著降低。

2.3 有机改良剂配施磷石膏对土壤有机碳、可溶性有机碳和微生物生物量碳/氮含量的影响

由表 2 可知, 有机改良剂及磷石膏的添加对土壤 SOC 含量无显著影响; 与 CK 相比, 单施有机改良剂的处理提高了土壤 DOC 含量, PG 处理降低了土壤 DOC 含量。与单施有机改良剂处理相比, 有机改良剂配施磷石膏降低了土壤 DOC 含量。与 YP、OF

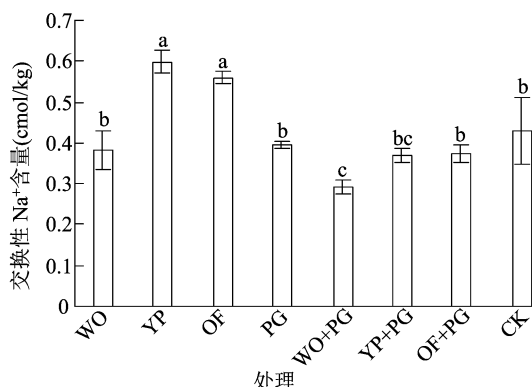
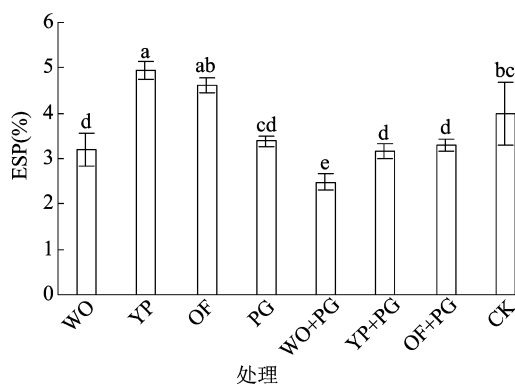
图7 有机改良剂配施磷石膏对土壤交换性 Na⁺ 的影响

图8 有机改良剂配施磷石膏对土壤 ESP 的影响

表2 不同处理组对土壤 SOC、DOC、MBC 和 MBN 含量的影响

处理	SOC 含量 (g/kg)	DOC 含量 (mg/kg)	MBC 含量 (mg/kg)	MBN 含量 (mg/kg)
WO	3.88 ± 0.34a	127.81 ± 15.21ab	136.12 ± 45.94b	88.78 ± 3.29a
YP	4.52 ± 0.91a	143.03 ± 10.35a	276.38 ± 25.06ab	24.09 ± 12.04bcd
OF	4.33 ± 1.09a	115.08 ± 15.42bcd	270.18 ± 31.99ab	13.27 ± 4.47d
PG	3.21 ± 2.37a	88.09 ± 5.69e	267.03 ± 109.60ab	41.86 ± 10.05bc
WO + PG	4.24 ± 0.49a	118.14 ± 10.40bc	218.51 ± 91.76ab	44.79 ± 13.66b
YP + PG	3.84 ± 0.87a	97.61 ± 10.26cde	373.06 ± 113.35a	24.04 ± 9.83bcd
OF + PG	3.93 ± 0.21a	83.30 ± 4.14e	341.93 ± 98.96a	17.63 ± 4.47cd
CK	3.26 ± 0.61a	93.45 ± 6.12de	249.72 ± 27.80ab	24.85 ± 12.80bcd

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

处理相比,YP + PG 和 OF + PG 处理显著降低了土壤 DOC 含量,降幅分别为 31.76%、27.62%。与 CK 相比,除了 WO 和 WO + PG 处理中土壤 MBC 含量有所降低,其他处理的土壤 MBC 含量均有所增加,但各处理组的土壤 MBC 含量差异不显著。WO 处理较 CK 显著提高了土壤 MBN 含量,且 PG 和 WO + PG 处理也提高了土壤 MBN 含量,但差异不显著。

3 讨论

3.1 有机改良剂配施磷石膏对土壤的 pH 值、EC 值和盐分的影响

本研究中,添加改良剂处理都提高了土壤 EC 值和水溶性总盐含量。土壤盐分增加的原因可能是改良剂本身含有较高盐分,磷石膏的主要成分是 $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,尽管其溶解度低,但仍有少部分溶解在土壤中。有研究表明,盐碱土的改良效果与糠醛渣、脱硫石膏的用量在一定范围内呈正相关,用量过多反而会导致土壤全盐量的增加^[14],并会危害植物根系的生长和发育^[15];陈小青的研究也表明,施用磷石膏后,土壤盐分含量升高,但是可以增加

对作物有益的土壤离子,减少对作物有害的离子,使土壤的盐分得到优化组合^[16]。有机物料和磷石膏的添加可以通过增加土壤 EC 值来促进土壤絮凝,从而改善土壤结构的稳定性^[17-18]。

土壤 CEC 影响土壤缓冲能力,是改良和评价土壤保肥能力的重要依据^[19]。本研究中,添加改良剂的处理都显著提高了土壤 CEC,其中有机改良剂的施用对土壤 CEC 的提升效果最显著,这是因为有机改良剂中含有大量的有机物质,可以增加土壤腐殖质含量,其功能团的解离有利于吸附土壤阳离子,并且土壤腐殖质的增加可以促进土壤团粒结构形成,改善土壤结构,进而提高土壤的 CEC^[20-21]。本研究中,与 CK 相比,有机硅功能肥可以显著提高土壤水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 含量,显著降低土壤 pH 值、SAR 和 ESP,而其他 2 种有机改良剂的单独施用也提高了土壤的盐分含量,但对土壤 pH 值和 SAR 影响不大。表明不同有机改良剂由于性质不同,对盐碱土的改良效果也不一样^[17]。

SAR 和 ESP 是土壤盐碱化程度的重要指标^[22]。本试验中,与单施有机改良剂处理相比,有

机改良剂配施磷石膏的处理显著降低了土壤的 SAR、交换性 Na^+ 含量和碱化度,这与南江宽等的研究结果^[23]相似,因为磷石膏的施用增加了土壤中 Ca^{2+} 含量,促进土壤吸附的 Na^+ 被交换出来,从而降低了土壤的交换性 Na^+ 含量,使土壤的碱化度下降^[24]。张济世等发现,石膏等含钙改良剂显著降低了土壤交换性 Na^+ 含量和 SAR,而硫酸亚铁、腐植酸和糠醛渣等酸性材料则明显降低了土壤 pH 值^[25]。脱硫石膏单施或与黄腐酸和聚合硫酸铁铝配施均可降低重度碱化盐土的 pH 值^[26]。这可能是由于磷石膏和有机改良剂同时施入,会生成酸性较强的硫酸并在土壤里残留下来,使土壤 pH 值降低^[27-28]。Zhao 等认为,施用烟气脱硫石膏可以减小土壤的 ESP 和 pH 值,主要由于它的施用可以降低土壤可交换 Na^+ 和水溶性 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 含量^[29]。

3.2 有机改良剂配施磷石膏对土壤 SOC、DOC 和微生物生物量碳/氮含量的影响

SOC 含量与 SOC 矿化速率、累积矿化量密切相关^[30]。王著峰等通过相关分析表明,脱硫石膏用量、土壤 EC 值和土壤含水量是影响盐碱土生态系统碳固存的主要因素^[31]。汤洁等的研究表明,降低土壤碱化度和 pH 值,增加有机质和黏粒含量是提高盐碱土壤固存有机碳的重要措施之一^[32]。Wu 等研究发现,SOC 矿化随着土壤 EC 值的增加呈下降趋势^[33]。肖颖等的研究表明,在低盐度范围内,盐度升高可以提高土壤微生物数量和活性,促进了 SOC 矿化,而在高盐度范围内,盐度过高会降低土壤微生物胞外渗透势,微生物数量和活性下降,SOC 矿化能力下降^[34]。已有众多学者研究表明,有机物料的添加可以提高 SOC 含量^[35-37],一方面因为有机物料本身可以向土壤输入有机碳,另一方面有机物料可以通过促进作物生长,提高土壤中作物残茬和根系分泌物的含量,且有机物料还可以促进土壤团聚体结构的形成,通过物理性保护作用促进 SOC 累积^[38]。但本试验中各处理间的 SOC 含量无显著差异,可能是由于室内培养时间较短,也可能与有机改良剂的用量或者性质有关。王琳琳的试验中各处理都添加了相同量的有机质,但是各处理土壤有机碳的增加幅度是不一样的^[39],这是因为改良剂的化学本质决定了土壤有机质对有机碳的影响。

盐分会降低土壤微生物活性,但可提高土壤 DOC 含量,因为盐分可抑制土壤有机碳的分解^[40]。本研究中,与 CK 相比,单施有机改良剂提高了土壤

DOC 含量,而磷石膏的添加降低了土壤 DOC 含量。可能是由于有机改良剂本身含有较高的有机碳,其中易溶性组分的溶解可导致土壤 DOC 含量升高。MBC 很大程度上反映 SOC 的分解强度,与 SOC 含量呈正相关^[41]。有机物料施入盐渍化土壤,有利于降低土壤的碱性,提高土壤肥力^[42],还可以提高土壤酶活性和微生物活性,减小次生盐渍化引起的植物毒性^[43]。杨全刚的研究表明,改良剂褐煤、硫磺和石膏均能改善盐碱土的生物学性质,提高盐碱土中的 MBC 和 MBN 含量^[41]。Wu 等的研究表明,有机改良剂显著提高了棉花开花期土壤 MBC 含量^[44]。总体而言,本试验中各处理组间土壤的 MBC 和 MBN 含量差异不太显著,有机改良剂和磷石膏的添加对土壤的 MBC 和 MBN 含量影响不大,可能与所使用有机改良剂本身的性质有关。SOC 中最不稳定的组分是最容易降解的,也最容易受矿化的影响,是微生物直接的能源来源。因此,有机改良剂的性质不同,对微生物的影响也不同。

4 结论

本研究中,改良剂的施用提高了土壤的水溶性总盐含量和 CEC 值,有机改良剂配施磷石膏对盐碱土的改良效果优于单施有机改良剂。与 CK 相比,有机硅功能肥配施磷石膏的处理中土壤的 pH 值、SAR、交换性 Na^+ 含量和 ESP 分别显著下降 8.83%、43.47%、31.73% 和 37.82%。本研究各处理中,有机硅功能肥配施磷石膏处理对盐碱土壤的改良效果最好。

参考文献:

- [1] 姚强,宫志远,辛寒晓,等. 盐碱地改良肥配方优化及对滨海旱作夏玉米的影响[J]. 农学报,2020,10(11):43-47.
- [2] Amini S, Ghadiri H, Chen C R, et al. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(3): 939-953.
- [3] 刘易,王新勇,赵振勇,等. 施用改良剂后盐渍化土壤养分和棉花产量变化[J]. 中国农学通报,2014,30(12):253-257.
- [4] 陈霏菲. 有机改良剂对柴达木盆地沙地土壤改良和枸杞生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [5] 付颖. 天津滨海盐碱土水盐动态及有机改良剂的改良效果研究[D]. 北京:北京林业大学,2015.
- [6] 王涵. 不同有机物料对滨海盐碱土改良效果的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2018.
- [7] 吴洪生,陈小青,周晓冬,等. 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J]. 土壤学报,2012,49(6):1262-1266.

- [8] Day S J, Norton J B, Strom C F, et al. Gypsum, langbeinite, sulfur, and compost for reclamation of drastically disturbed calcareous saline – sodic soils[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(1): 295 – 304.
- [9] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Extensive reclamation of saline – sodic soils with flue gas desulfurization gypsum on the Songnen Plain, Northeast China[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 52 – 60.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 张盼盼, 高立城, 李晓敏, 等. 磷石膏和有机肥对盐碱地糜子产量和叶片生理特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(15): 26 – 32.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 王 旭, 何 俊, 孙兆军, 等. 脱硫石膏糠醛渣对碱化盐土入渗及盐分离子的影响研究[J]. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1210 – 1217.
- [15] 孙兆军, 赵秀海, 王 静, 等. 脱硫石膏改良龟裂碱土对枸杞根际土壤理化性质及根系生长的影响[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(1): 107 – 110.
- [16] 陈小青. 磷石膏改良滨海盐土效果及机理[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [17] Tejada M, Garcia C, Gonzalez J L, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1413 – 1421.
- [18] Chen C H, Xu X C, Sadakata M, et al. Use of the flue gas desulfurization byproduct from thermal power plants and facilities and a method for alkali soil amelioration: US 08007560 [P]. 2011 – 08 – 30.
- [19] 魏博微. 不同措施对大安市苏打碱土的改良效果及对植物生长的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- [20] 谢晓蓉, 刘金荣, 王引权, 等. 功能性盐土改良肥对河西走廊草甸盐土的改土效应[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 67 – 74.
- [21] 王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 等. 3 种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(1): 20 – 27.
- [22] 王金满, 杨培岭, 任树梅, 等. 烟气脱硫副产物改良碱性土壤过程中化学指标变化规律的研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 98 – 105.
- [23] 南江宽, 陈效民, 王晓洋, 等. 石膏与肥料配施对滨海盐土降盐抑碱的效果研究[J]. *南京农业大学学报*, 2014, 37(4): 103 – 108.
- [24] 张丽辉, 孔 东, 张艺强. 磷石膏在碱化土壤改良中的应用及效果[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2001, 22(2): 97 – 100.
- [25] 张济世, 于波涛, 张金凤, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土土壤理化性质和小麦生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 704 – 711.
- [26] 秦 萍, 张俊华, 孙兆军, 等. 土壤结构改良剂对重度碱化盐土的改良效果[J]. *土壤通报*, 2019, 50(2): 414 – 421.
- [27] 张 乐, 徐平平, 李素艳, 等. 有机 – 无机复合改良剂对滨海盐碱地的改良效应研究[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(2): 92 – 99.
- [28] Sundha P, Basak N, Rai A K, et al. Can conjunctive use of gypsum, city waste composts and marginal quality water rehabilitate saline – sodic soils? [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200: 104608.
- [29] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 13 – 21.
- [30] 郝存抗, 周蕊蕊, 鹿 鸣, 等. 不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化规律[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(1): 36 – 42.
- [31] 王著峰, 王玉刚, 陈园园, 等. 施加脱硫石膏对盐碱土固碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 353 – 360.
- [32] 汤 洁, 宫志宇, 王静静, 等. 可溶性有机碳在盐碱水田土壤中的吸附特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 259 – 266, 276.
- [33] Wu Y, Tam N F Y, Wong M H. Effects of salinity on treatment of municipal wastewater by constructed mangrove wetland microcosms [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57(6/7/8/9/10/11/12): 727 – 734.
- [34] 肖 颖, 杨继松. 辽河口滨海湿地土壤有机碳矿化及其与盐分的关系[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(10): 2792 – 2798.
- [35] 侯晓静, 杨劲松, 赵 曼, 等. 不同施肥措施对滨海盐渍土有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 780 – 786.
- [36] 李莹飞. 有机肥和木醋液对滨海盐土化学性质和酶活性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [37] 王 康, 许玉超, 戴 辉, 等. 沼液在土壤改良上的应用研究[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(24): 299 – 303.
- [38] 郭军玲, 金 辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1290 – 1299.
- [39] 王琳琳. 天津滨海盐土隔盐修复、有机改良及造林效果评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [40] Mavi M S, Marschner P, Chittleborough D J, et al. Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 8 – 13.
- [41] 杨全刚. 改良剂组合对盐碱土改良机理及对植物耐盐性影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- [42] Trivedi P, Singh K, Pankaj U, et al. Effect of organic amendments and microbial application on sodic soil properties and growth of an aromatic crop [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 127 – 136.
- [43] Liang Y C, Si J, Nikolic M, et al. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(6): 1185 – 1195.
- [44] Wu Y P, Li Y F, Zhang Y, et al. Responses of saline soil properties and cotton growth to different organic amendments [J]. *Pedosphere*, 2018, 28(3): 521 – 529.