

纤维素钙基改良剂制备及其对盐渍土的改良效应

赵串串*,雷雨竹,王嘉怡,张莎,王羽琴,花莉

陕西科技大学环境科学与工程学院,陕西 西安 710021

摘要:为探究纤维素钙基改良剂对盐渍土的改良效应,选取青海柴达木盆地中度盐碱土为试验用土,以混酸处理后的玉米芯为主要材料,辅助磷石膏钙基材料,通过水溶液聚合合法制备纤维素钙基改良剂。筛选4种改良剂,纯纤维素基改良剂(COR)和吸水性较高的纤维素钙基改良剂(PGC₂、PGC₅和PGC₆),设置3个添加水平,通过淋溶试验开展盐渍土改良效应分析。结果表明:与CK相比,PGC₅-B处理,土壤pH降低了1.75个单位($P < 0.05$);土壤EC $< 2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,改良后的土壤不受碱化威胁;土壤机械性大团聚体含量($> 0.25 \text{ mm}$)增加0.86倍($P < 0.05$), $< 0.25 \text{ mm}$ 的微团聚体含量降低了40.98%($P < 0.05$);粒径2~0.25 mm及 $< 0.053 \text{ mm}$ 的土壤团聚体中有机碳含量分别提高了2.37倍和1.19倍,其土壤有机碳贡献率分别增加了1.03倍和降低了68.96%。

关键词:纤维素钙基;土壤改良剂;盐碱土;团聚体;有机碳

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)02-0222-12

Preparation of Cellulose Calcium-based Amendments and Its Improvement Effects on Saline-alkali Soil

ZHAO Chuan-chuan*, LEI Yu-zhu, WANG Jia-yi, ZHANG Sha, WANG Yu-qin, HUA Li

School of Environmental Science and Engineering/Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China

Abstract: To explore the improvement effects of cellulose calcium-based amendments on saline-alkali soil, this research selects the moderately saline-alkali soil in the Qaidam Basin of Qinghai Province as the test soil. Using acid-treated corncob as the main raw material and phosphogypsum as the calcium-based auxiliary, this research prepares the cellulose calcium-based amendments via aqueous solution polymerization. Then it selects four types of amendments: pure cellulose-based amendment (COR) and three cellulose calcium-based amendments with higher water absorption (PGC₂, PGC₅ and PGC₆), and sets three addition levels to study the improvement effects on saline-alkali soil through leaching tests. The results show that compared with CK, PGC₅-B treatment reduces the soil pH by 1.75 units ($P < 0.05$). The soil EC is less than $2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, indicating that the improved soil is not threatened by alkalization. The content of mechanical large aggregates ($> 0.25 \text{ mm}$) in the soil increases by 0.86 times ($P < 0.05$), while the content of micro-aggregates ($< 0.25 \text{ mm}$) decreases by 40.98% ($P < 0.05$). In the 2–0.25 mm aggregate fraction, the organic carbon content of soil aggregates increases by 2.37 times, and its contribution rate of soil organic carbon increases by 1.03 times. In the $< 0.053 \text{ mm}$ aggregate fraction, the organic carbon content of soil aggregates increases by 1.19 times, while its contribution rate of soil organic carbon decreases by 68.96%.

Keywords: Cellulose calcium-based; soil amendment; saline-alkali soil; soil aggregate; organic carbon

第三次全国国土调查结果,截至2019年我国盐碱地共有767万 hm^2 ^[1],占我国可耕地面积25%^[2],其中青海柴达木盆地的盐渍土占据了近223万 hm^2 ^[3]。土壤盐渍化是可溶性盐基离子尤其是 Na^+ 在土壤中积聚,导致土壤呈现不良特性和质量下降的过程。杨劲松^[4]等人研究结果,土壤盐渍化会使土地生产力、水质、土壤生物多样性下降,受盐分影响土壤缓冲和过滤污染物的能

力下降。盐渍化的土壤降低了农作物吸收水分的能力和微量元素的有效性,并可能使土壤结构退化。盐渍化耕地作为我国主要的中低产田类之一,其有机质含量不足1%的土壤面积达到26%,整体有机质含量低于欧洲同类土壤的1/2。盐碱地治理面临新的研究方向主要集中研发高效洗盐技术、探索养分绿色供给及研发价廉高效的盐渍土改良剂等方面。

收稿日期: 2025-05-06

修回日期: 2026-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(22376133); 青海省黄土丘陵区公益林生态效益监测项目(210170051)

第1作者简介: 赵串串(1976-),女,硕士,副教授,研究方向:区域水土流失问题监测与生态修复方法研究。E-mail: zhaochuanchuan@sust.edu.cn

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: zhaochuanchuan@sust.edu.cn

近年来国内外众多学者开展了淋溶条件下,磷石膏对盐渍土的改良效应研究,Outbakat M B^[5]等人施用磷石膏对摩洛哥地区盐渍土进行室内盆栽改良,结果表明当磷石膏施用量为45 t/hm²时,浸出液中EC、Cl⁻、Na⁺含量分别增加了28%、33%和33%,土壤盐渍化问题得到了一定缓解。张辉^[6]等人通过研究磷石膏施加对滨海地区盐渍土性能改良发现,施加磷石膏后土壤粘粒下降6.5%,pH值均小于8,改良土壤结构有助于快速脱盐。周妍宏^[7]等人研究了磷石膏添加对松嫩平原西部盐碱土的影响,结果表明当施用量为45 t/hm²,土壤有机碳、全氮、全磷均较CK处理有不同程度提高。磷石膏作为一种广泛使用的钙基改良剂,其体系中Ca²⁺可有效交换土壤中的Na⁺降低土壤含盐量^[8,9],同时Ca²⁺可消耗土壤中的致碱离子CO₃²⁻,降低土壤碱度^[10]。现有研究技术主要集中于石膏类改良剂的开发应用,石膏与其它纤维素有机类材料聚合型改良剂研究报道较少,改良剂存在施用量和灌水量过高的问题。

本文以磷石膏为辅助材料,引入富含羟基的农业废弃物玉米芯纤维素^[11],作为改良剂的主要添加材料,开发纤维素钙基盐渍土改良剂,提升改良剂的吸水性^[12]和盐基离子的交换性,在减少磷石膏施用量的同时调控土壤水盐运动过程。以青海地区柴达木盆地盐渍土为研究对象,基于室内土壤淋溶试验探究钙基改良剂类型及其添加水平对盐渍土的调控效应,为青海地区盐渍土改良调控和区域障碍性生态系统生产力的优化提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验土样及材料

试验用土取自青海省柴达木盆地都兰县(36°23'10"N、97°59'27"E),年均降雨量在50~200 mm左右,年均蒸发量1 000 mm以上,属高原大陆性荒漠气候区。区域土壤类型主要为棕钙土、盐土和风沙土。土样采集按S型随机选取5个采样点,采集0~20 cm土壤样品作为试验用土,并在20 cm深度处用环刀采集土壤容重样品,分析容重。供试土壤:pH为9.67(液固比2.5:1, v/w),电导率5.47 mS·cm⁻¹,土壤含盐量4.36 g·

kg⁻¹,有机质含量0.092 g·kg⁻¹,容重1.28~1.55 g·cm⁻³。采后自然风干,剔除土壤中可见石块和植物根系等杂物后过2 mm筛后备用。

玉米芯(corn cob,市售)破碎过40目筛备用;磷石膏(CaSO₄·2H₂O,陕西某磷肥厂提供)破碎后过80目筛备用,pH值为2.2(固液比为1:2.5),容重为0.83 g·cm⁻³;甲酸,硝酸,丙烯酸(AA),过硫酸钾(KPS),N,N-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)等试剂均采用分析纯级,购于天津市天力化学有限公司。

1.2 试验设计

1.2.1 改良剂制备方案设计 参考李灿欣^[13]、黄仁亮^[14]等研究,取过40目筛风干的玉米芯原材料放入锥形瓶中,按照1:15的固液比添加混酸开展预处理,混酸按照体积比为100:1将浓度35%硝酸和88%甲酸(MA)进行混合,反应温度设置为70 °C,置于150 r/min的水浴摇床中处理3 h,离心水洗至中性,干燥后即得混酸提取玉米芯纤维素(HA_C)。玉米芯纤维素(HA_C)与磷石膏(PG)添加比例为20:1、10:1、6:1、4:1、2:1和1:1,加入中和度为60%的丙烯酸(AA)9 g,60 °C下水浴超声震荡5 min搅拌均匀后,加入引发剂(KPS)0.72 g,交联剂N,N-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)0.1 g,置于水浴锅60 °C加热3 h至成型。用无水乙醇浸泡15 min后冲洗,置于40 °C真空干燥箱中烘干,剪碎后得到6种改良剂产品,分别标记为PGC₁、PGC₂、PGC₃、PGC₄、PGC₅和PGC₆。以纯玉米芯纤维素基改良剂作为对照,制备的产品标记为COR。

1.2.2 土壤淋洗试验方案设计 本研究兼顾钙离子占比选择吸水性较好的4种改良剂COR、PGC₂、PGC₃和PGC₆,于2024年10月20日开展土壤淋洗试验。采用底部带孔的花盆(底部直径9 cm,高35 cm),在花盆底放置尼龙筛网固定,并加入2 cm厚的石英砂以降低界面效应同时确保在淋滤时土壤及改良剂不流失。改良剂施加量设置为试验用土重量(1 kg)的1%、2%和3%^[15]3个添加水平,分别标记为A、B和C。设置空白对照组CK,每组设置3个重复,按容重1.3 g/cm³填充于石英砂上层。室温培养60 d,培养期间根据质量差定量间歇灌水,维持其含水量在20%左右,观察土壤结构体形成后,开展淋溶试验。结

合当地近年平均降水量,淋溶试验用水量设计为 300 mL,共淋溶 3 次,单次淋溶用水量 100 mL,每次淋溶间隔 30 d,于每次淋溶结束至淋溶液完全渗出后采集中层土壤测定理化性质,90 d 后测定各团聚体及有机碳含量等指标。

1.3 测定方法

1.3.1 溶胀性能测定 称取 0.5 g 制备的改良剂放入尼龙网封口,置于盛有 500 mL 去离子水的烧杯中,定时取出,放置漏斗过滤直至无水滴下,称重。吸水倍率见公式:

$$Q = \frac{M - m}{m} \quad (1)$$

式中:Q 为吸水率(g/g);m 为吸水树脂吸水前的质量(g);M 为吸水后质量(g)。

1.3.2 水溶性钙离子测定 将 0.3 g 改良剂放置于尼龙袋中,放入 300 mL 去离子水烧杯中,每隔一段时间取 10 mL 试样于 50 mL 容量瓶中测定其钙离子含量,水溶性钙离子使用火焰原子吸收分光光度法进行测定。

1.3.3 结构表征 利用 EVO LS15 扫描电子显微镜对混酸处理前后的玉米芯纤维素,和吸水性较好的改良剂样品进行表面形貌的观察。利用 FTIR-650 红外光谱仪对混酸处理前后的玉米芯样品进行官能团表征。

1.3.4 盐渍土改良效应测定 土壤浸提液电导率(EC)按照 HJ 802-2016 测定,pH 值采用电位法(PHS-3C 数显酸度计)测定。选取干筛法分析各粒径机械团聚体含量,具体步骤为称取 50 g 土样,放置干燥箱 105 °C 至恒重,置于孔径为 2,

0.25,0.053 mm 的套筛上,利用电动筛分仪震荡 5 min,称取各粒级团聚体的质量百分比,每份土样 3 个重复。土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化-分光光度法(HJ 615-2011),各粒级团聚体有机碳贡献率为第 i 级团聚体有机碳含量占土壤总有机碳含量百分比。

1.4 数据处理

使用 Excel 2021 对所有试验数据进行记录,通过 SPSS 26.0 软件进行方差分析及显著性分析($P < 0.05$),利用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 改良剂吸水性分析

随着混酸处理后玉米芯 HA_c 添加比的增多,纤维素钙基改良剂吸水倍率越高(图 1(a))。PGC₁ 吸水倍率达到最大,为 164.71 g·g⁻¹,PGC₆ 吸水倍率最小(45.53 g·g⁻¹),与对照产品 Cor(167.77 g·g⁻¹) 相比,改良剂 PGC₂、PGC₃、PGC₄、PGC₅ 和 PGC₆ 吸水倍率存在显著性差异($P < 0.05$),改良剂 PGC₁ 吸水倍率无显著降低($P > 0.05$),PGC₂ 的吸水倍率(160.91 g·g⁻¹) 与 PGC₁ 差异不显著($P > 0.05$)。磷石膏在改良剂原材料中的占比越低,吸水溶胀过程受体系中钙、硫等离子影响越低^[16],体系中渗透压较大,呈现更好的吸水效果。经混酸解处理后的 HA_c 含有大量的羧基(-COO⁻)、羟基(-OH)、羰基(-CO-)等带电含氧亲水官能团,使得其更易吸水溶胀,其与水分子间形成氢键,吸水倍率更高。

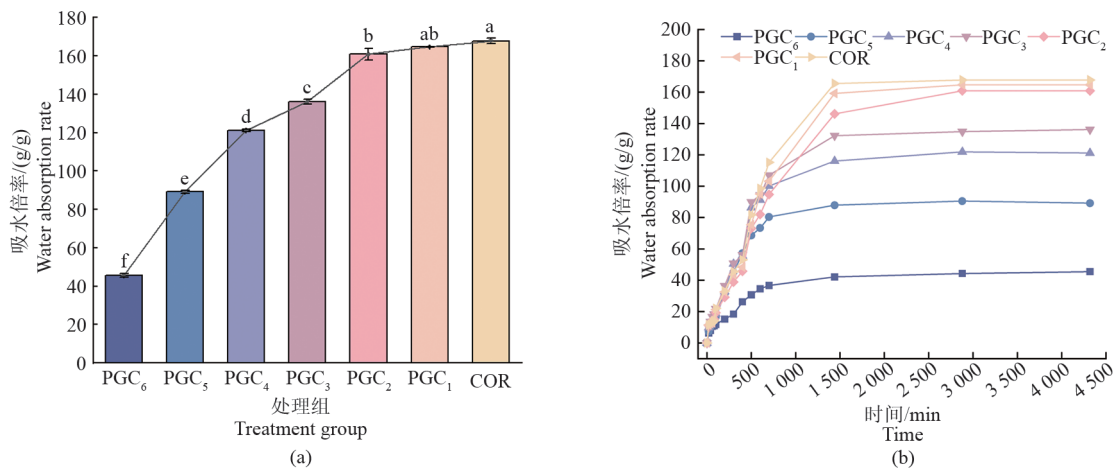


图 1 土壤改良剂平衡吸水倍率(a)及不同时刻吸水倍率(b)

Fig. 1 Equilibrium water absorption ratio of soil amendments (a) and water absorption ratio at different times (b)

改良剂吸水过程均分为快速吸水、缓慢溶胀和溶胀平衡3个阶段(图1(b))。吸水过程在最初500 min内表现出较大的溶胀速率,水分子由于表面亲水基团及毛细作用进入内部,改良剂溶胀率迅速增加;在500~1 500 min时,改良剂吸水呈现较慢的溶胀速率,此时主要受扩散机理控制;之后逐渐达到溶胀平衡。分析原因,改良剂刚浸入去离子水中时吸水速率较高,因内外渗透压差较大,随着内外渗透压差降低,改良剂内部网络逐渐松弛,溶胀吸水速率开始缓慢降低^[17]。

2.2 改良剂水溶性钙离子释放量分析

在240 h内,7种改良剂的水溶性钙离子释放量大小表现为 $PGC_6 > PGC_5 > PGC_4 > PGC_3 > PGC_2 > PGC_1 > COR$,与改良剂中磷石膏的添加比例存在一定的相关性(图2)。

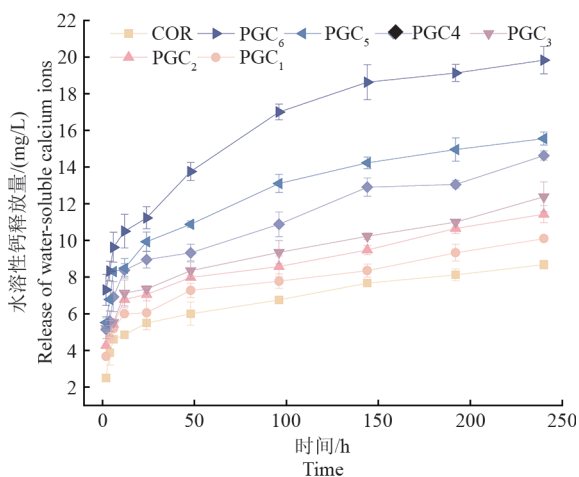


图2 土壤改良剂水溶性钙离子释放量

Fig. 2 Water-soluble calcium ion release amount from soil amendments

在释放240 h时,PGC₆, PGC₅, PGC₄, PGC₃, PGC₂, PGC₁和COR改良剂的钙离子释放量分别为19.83、15.55、14.63、12.38、11.43、10.10和8.68 mg·L⁻¹, PGC₆较COR改良剂钙离子释放量提高了129.86%。纤维素与磷石膏在1:1占比条件内,磷石膏加入量对于三维单网络结构改良剂的水溶性钙释放量影响趋势一致,随着时间的增加,水溶性钙离子释放量逐渐增大,尤其在前24 h内钙离子释放量迅速增加,24 h~144 h内释放速度增加趋于平缓,144 h后改良剂释放钙素缓慢趋于稳定。

2.3 扫描电镜分析

由图3(a)可见未经处理的玉米芯表面十分光滑,纤维呈现平整表面形貌,这种结构特征揭示了纤维素被半纤维素与木质素紧密包裹,三者相互联结形成的致密特性。由图3(b)可知经过混酸处理后的玉米芯,规整结构遭到了破坏,表面被分解破碎出现裂纹,呈现出不同程度的剥离,粗糙的表面结构为接枝反应提供了更多的载体。由图3(c)可知改良剂表面形成了致密的层状结构且粗糙不平,存在较多褶皱,HA_c及磷石膏被丙烯酸单体包裹并无规则交接,结构复杂,正是这种结构增大了改良剂的比表面积有利于外界水分的渗透。由图3(d)可知,改良剂充分吸水真空冷冻干燥后形成了致密的三维网络结构,吸水后的网络孔隙周边存在大量片状薄膜。

2.4 玉米芯混酸处理红外分析

与处理前的玉米芯原材料相比(图4),经过混酸处理后玉米芯HA_c在3 420 cm⁻¹处氢键(-O-H)的特征峰,2 920 cm⁻¹处和1 373 cm⁻¹处-C-H的伸缩振动峰^[18],1 730 cm⁻¹处-C=O伸缩振动峰和898 cm⁻¹处单糖分子间β-(1,4)-糖苷键(C-O-C)处的弯曲振动特征吸收峰有不同程度增强^[19],表明混酸处理一定程度上活化了HA_c中的羟基(-OH)、羰基(-CO-)等带电含氧亲水官能团,可以与水分子形成氢键更好地保留水分^[20]。在经混酸处理后HA_c在1 600 cm⁻¹、1 510 cm⁻¹处苯环C=C骨架的吸收振动峰以及1 040 cm⁻¹处醚键(C-O-C)的特征峰降低,表明木质素结构受到了破坏,一定程度上被去除^[21]。

2.5 改良剂红外分析

改良剂PGC₂、PGC₅、PGC₆和COR的红外光谱见图5,4种改良剂在2 945 cm⁻¹处出现了-CH₂-的弯曲振动吸收峰,1 730 cm⁻¹处出现了丙烯酸酯键中-C=O伸缩振动峰,1 570 cm⁻¹处出现了羧酸盐COO-的对称吸收振动峰,1 151 cm⁻¹出现了纤维素骨架C-O-C的振动吸收峰,这些吸收峰的出现表明了丙烯酸以侧链的形式成功与HA_c中纤维素发生了接枝共聚,聚合在了玉米芯纤维素骨架上。

1 120 cm⁻¹处以及621 cm⁻¹处为SO₄²⁻的非对称伸缩振动峰以及弯曲振动吸收峰^[22],这两处的吸收峰随着磷石膏添加比的增加而增强,可以证

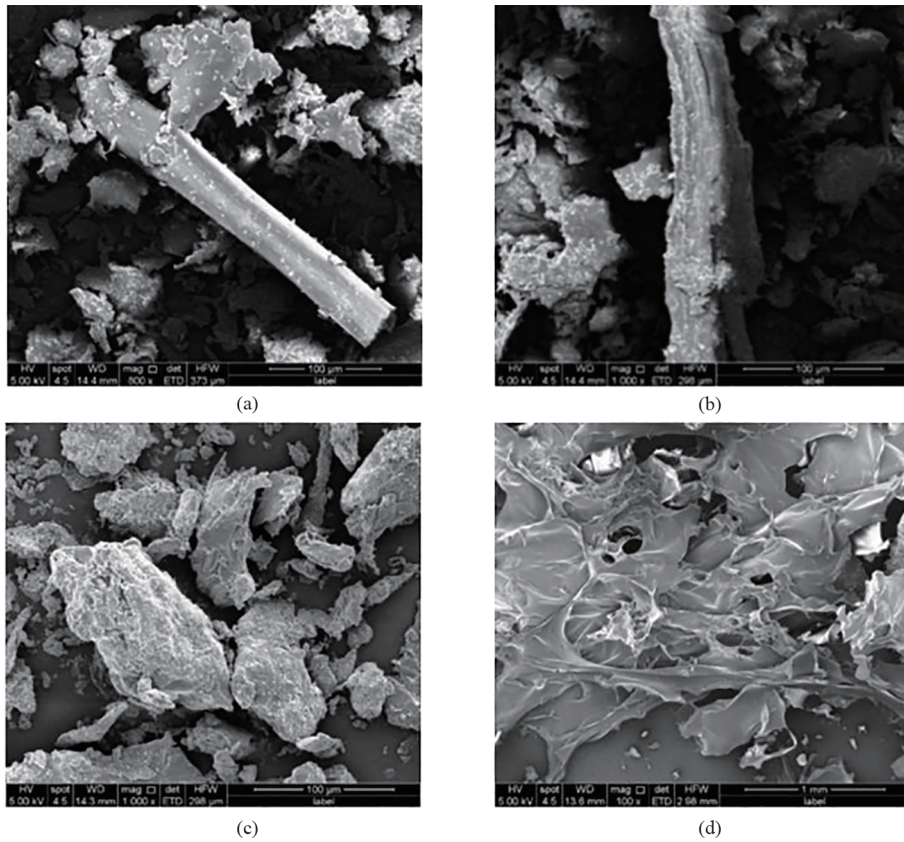


图 3 混酸处理前的玉米芯原材料(a)、处理后的 HA_c (b)、 PGC_5 吸水前(c)和吸水后冷冻干燥(d)扫描电镜图
 Fig. 3 Scanning electron microscope images of corn cob raw materials before mixed acid treatment (a)、treated HA_c (b)、 PGC_5 before water absorption (c) and freeze-drying after water absorption (d)

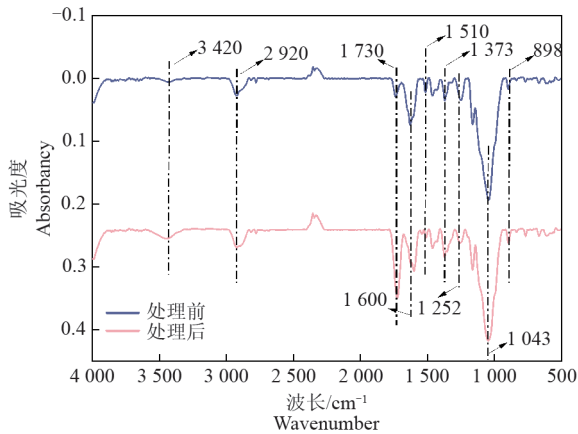


图 4 混酸处理前后玉米芯的红外光谱图
 Fig. 4 Infrared spectra of corn cobs before and after mixed acid treatment

明磷石膏穿插在了聚合物内部,形成磷石膏-纤维素基共聚物改良剂。4种改良剂,无论是不含磷石膏的COR改良剂还是以不同添加比加入磷石膏聚合成的3种改良剂 PGC_2 、 PGC_5 和 PGC_6 ,红外光谱图呈现高度相似的等高线特征,特别是在特征区段的吸收峰位置相似,这充分证实了4

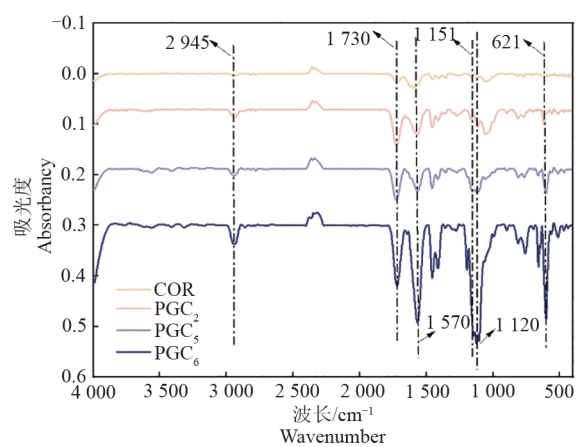


图 5 改良剂红外光谱图
 Fig. 5 Infrared spectra of amendments

种改良剂具有相同的化学组成,所得产物即为目标产物。

2.6 改良剂对中度盐渍土的改良效应分析

2.6.1 土壤 pH 的改良效应 加入改良剂的 4 个处理组土壤 pH 在三次淋溶后均显著低于 CK ($P < 0.05$) (图 6)。三次淋溶后改良剂的施放量

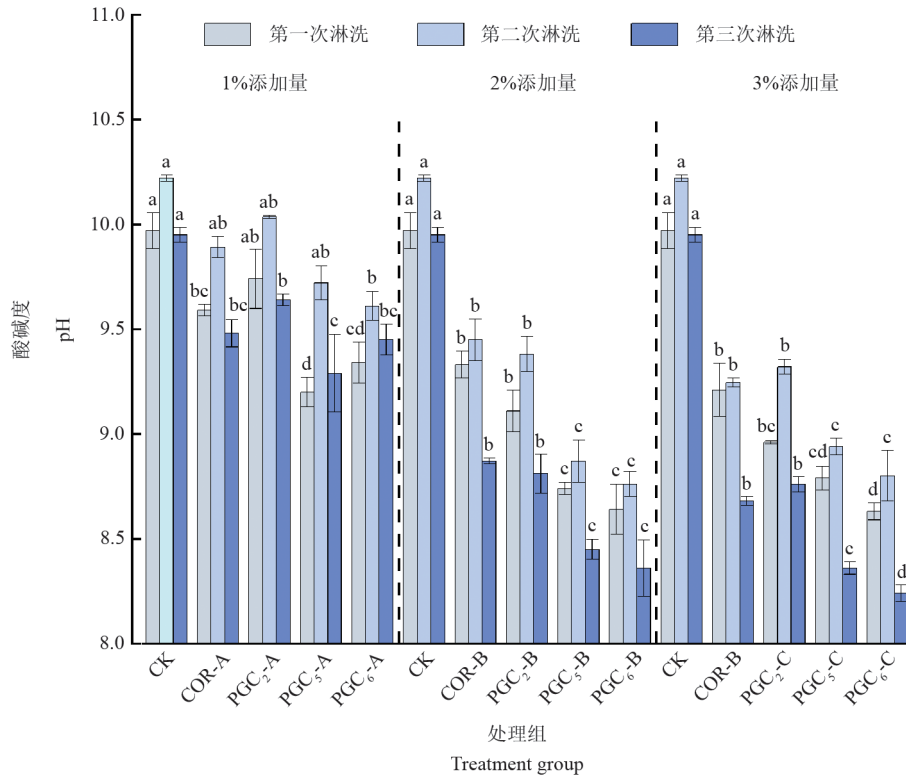


图 6 改良剂 3 种施加量水平下对土壤 pH 的改良效应

Fig. 6 Improvement effects of soil pH at three application levels of amendments

注:不同字母表示同一添加量相同淋溶次数间土壤 pH 差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences in soil pH between the same addition amount and the same leaching frequency ($P < 0.05$).

为 1% (A 添加量水平), PGC₆-A 相对于 COR-A、PGC₂-A 和 PGC₅-A 下降差异均不显著 ($P > 0.05$), 改良剂的施加量为 2% (B 添加量水平), PGC₅-B 和 PGC₆-B 处理的土壤 pH 为 8.45、8.36, 差异不显著 ($P > 0.05$), 相对于 CK (9.95) pH 降幅分别为 1.5 和 1.59 个单位。改良剂的施加量为 3% 水平 (C 添加量水平), PGC₅-C 和 PGC₆-C 处理三次淋溶后的 pH 为 8.36 和 8.24, 较 2% 水平 (B 添加量水平) 条件下下降幅度不大。

2.6.2 土壤 EC 的改良 土壤浸提液电导率 (EC) 是土壤可溶性盐离子的有效指标^[23]。第一次淋溶后, CK 处理土壤电导率为 $3.8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ (图 7); PGC₆-B、COR-C、PGC₂-C、PGC₅-C 和 PGC₆-C 处理与背景土壤 EC ($5.47 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) 相比有所增加, 1% 和 2% 添加水平处理组均有不同程度降低。

三次淋洗后, 1% 水平 (A 添加量水平) 处理组土壤 EC 变幅在 $1.34 \sim 1.89 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; 2% 水平 (B 添加量水平) 处理组土壤 EC 变幅在 $1.79 \sim$

$2.18 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; 3% 水平 (C 添加量水平) 处理组土壤 EC 变幅在 $2.67 \sim 3.26 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。3% 水平处理组土壤 EC 在三次淋溶后均大于 $2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 改良剂施加量并不是越多越好, 改良剂原材料中的磷石膏本身含有较多可溶性盐, 过多地施加改良剂反而会使土壤遭受盐害。

2.6.3 团聚体质量分布改良效应 土壤团聚体的粒径分布是影响土壤结构形成的重要因素, 其中机械性大团聚体含量是决定土壤稳定性的主要因素^[24]。3 种添加量水平条件下, 土壤团聚体均以 $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒径为主 (图 8); $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒径占比分布分别为 $43.89\% \sim 48.49\%$ 、 $47.77\% \sim 53.26\%$ 和 $49.02\% \sim 56.36\%$ 。与 CK 相比, 改良剂 COR、PGC₂、PGC₅ 和 PGC₆ 处理组土壤机械性大团聚体含量 ($>0.25 \text{ mm}$) 显著增加, 分别增加了 $0.43 \sim 0.72$ 、 $0.51 \sim 0.89$ 、 $0.62 \sim 1.06$ 和 $0.57 \sim 1.04$ 倍; $<0.25 \text{ mm}$ 的微团聚体含量显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 $20.59\% \sim 34.33\%$ 、 $24.19\% \sim 42.58\%$ 、 $29.65\% \sim 50.21\%$ 和 $27.14\% \sim$

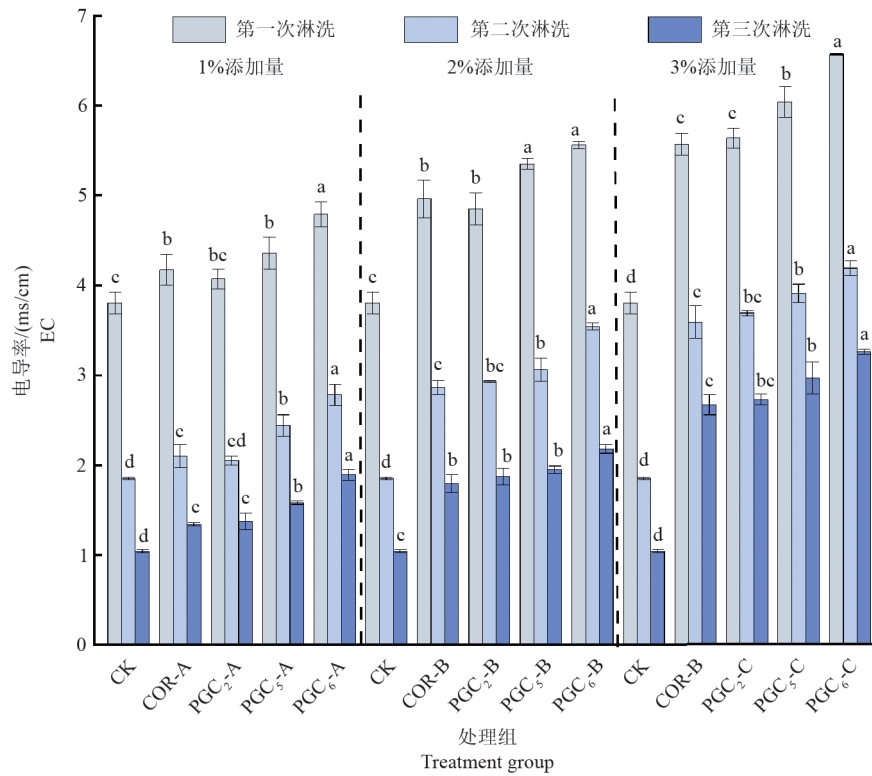


图 7 改良剂 3 种施加量水平下对土壤 EC 的改良效应

Fig. 7 Improvement effects of soil EC at three application levels of amendments

注:不同字母表示同一添加量相同淋溶次数组间土壤 EC 差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences in soil EC between the same addition amount and the same leaching frequency ($P < 0.05$).

49.48%。1%、2% 和 3% 添加水平条件下,改良剂 PGC₅和 PGC₆处理对于土壤团聚体分布改良效应差异不显著。

2.6.4 土壤团聚体中有机碳含量 在不同改良剂添加水平下,土壤团聚体各粒径组分中土壤有机碳(SOC)含量呈现不同程度的增加趋势。具体表现为:改良剂添加水平为 1% 时,各处理均显著提高了土壤团聚体粒径 2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 中 SOC 含量 ($P < 0.05$) (图 9),与 CK 相比土壤团聚体各粒径 SOC 分别提高了 0.85~1.83 倍,0.60~2.19 倍和 0.56~1.06 倍。当添加水平增至 2% 时,与 CK 相比,改良剂处理均显著增加了土壤团聚体各级粒径中 SOC 含量,PGC₅-B 和 PGC₆-B 处理团聚体粒径 2~0.25 mm 土壤 SOC 含量分别提高了 2.37 和 2.33 倍;团聚体粒径 <0.053 mm 土壤中 SOC 含量分别提高了 1.19 和 1.23 倍。在 3% 添加水平时,与 CK 相比,改良剂处理均显著增加了土壤团聚体各级粒径中 SOC 含量,PGC₅-B 和 PGC₆-B 处理团聚体

粒径 2~0.25 mm 土壤 SOC 含量分别提高了 3.43 和 3.50 倍;团聚体粒径 <0.053 mm 土壤中 SOC 含量分别提高了 1.69 和 1.73 倍。基于以上分析,土壤团聚体 SOC 主要存在于大团聚体 (2~0.25 mm) 和粉黏粒中 (<0.053 mm)。

2.6.5 团聚体各粒径有机碳贡献率 与对照 (CK) 相比,不同添加水平的改良剂处理均改变了土壤团聚体中有机碳(SOC)的贡献率。具体表现为:各处理对团聚体粒径 2~0.25 mm 的土壤 SOC 贡献率显著增加,<0.053 mm 的土壤 SOC 贡献率显著降低 ($P < 0.05$) (图 10)。

进一步分析不同添加水平的影响如下:与 CK 相比,3 种添加水平,低添加水平处理 (1%, A 组) 时,与 CK 相比,各处理土壤团聚体粒径 > 2 mm 和 2~0.25 mm 时土壤 SOC 贡献率显著增高,粒径 0.25~0.053 mm 与 <0.053 mm 土壤 SOC 贡献率在施加改良剂后显著降低 ($P < 0.05$)。中等添加量水平 (2%, B 组) 时,与 CK 相比,各处理土壤团聚体粒径 2~0.25 mm 时土壤 SOC 贡献率

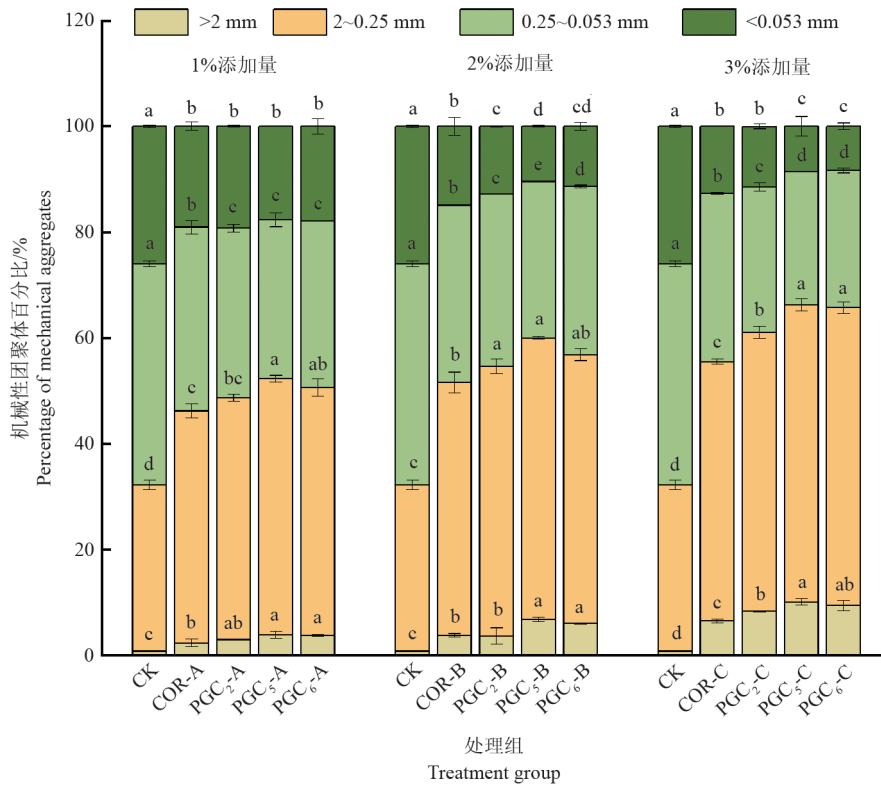


图 8 改良剂 3 种施放量水平下土壤机械团聚体百分比分布特征

Fig. 8 Percentage distribution characteristics of soil mechanical aggregates at three application levels of amendments

注:不同字母表示同一添加量下相同粒径团聚体含量差异显著($P < 0.05$)。

Note: at the application levels of three types of amendments Different letters indicate significant differences in the content of aggregates of the same particle size under the same addition amount ($P < 0.05$).

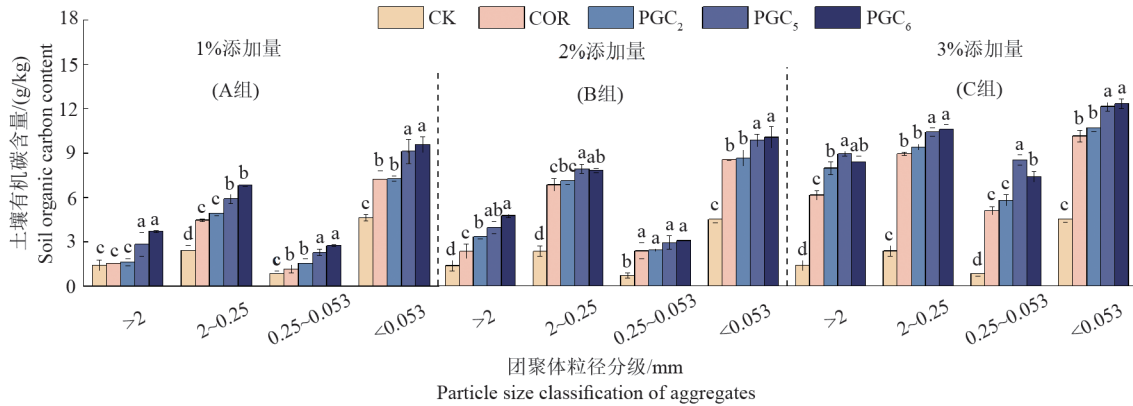


图 9 团聚体各粒径 SOC 含量

Fig. 9 SOC content of aggregates with different partial sizes

注:不同字母表示同一添加量下相同粒径团聚体 SOC 含量差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences in the SOC content of aggregates with the same particle size at the same addition amount ($P < 0.05$).

显著增加($P < 0.05$), PGC₅-B 增加了 1.03 倍; 各处理土壤团聚体粒径 <0.053 mm 时土壤 SOC 贡献率显著降低, PGC₅-B 降低了 68.96%。高添加水平处理(3%, C 组)时, 与 CK 相比, 各处理组土壤团聚体粒径 2~0.25 mm 时土壤 SOC 贡献率显著

增加($P < 0.05$), 变幅为 0.75~0.89 倍, 平均增高 0.81 倍; 各处理土壤团聚体粒径 <0.053 mm 时土壤 SOC 贡献率显著降低, 变幅为 67.76%~79.84%, 平均降低了 74.77%。

基于以上分析, 各处理对于 2~0.25 mm 粒径

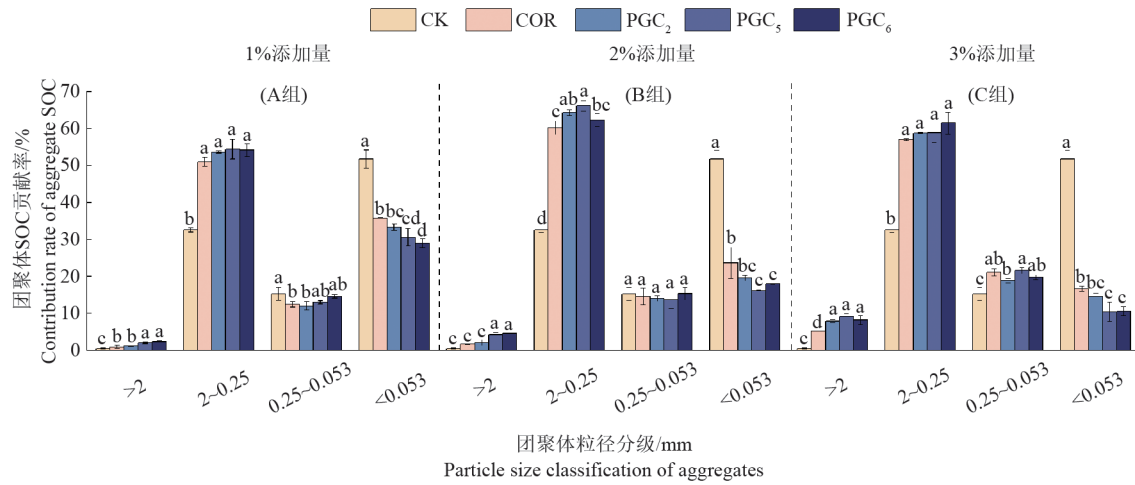


图 10 团聚体各粒径有机碳贡献率

Fig. 10 Contribution rate of organic carbon at each particle size of aggregates

注:不同字母表示同一添加量下相同粒径团聚体有机碳贡献率差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences in the contribution rate of organic carbon to aggregates of the same particle size under the same addition amount ($P < 0.05$).

SOC 贡献率较大, >2 mm 粒径 SOC 贡献率较小, 这与肖欣娟等^[25]人的研究结果一致。分析原因, 土壤团聚体 SOC 贡献率受土壤团聚体粒径百分比及各粒径 SOC 含量共同影响, 其中团聚体粒

径百分比对其影响更大。

2.6.6 土壤有机碳相关指标与土壤主要理化性质相关性分析 土壤四种粒径团聚体有机碳含量与 pH 之间呈极显著负相关($P < 0.01$) (图 11),

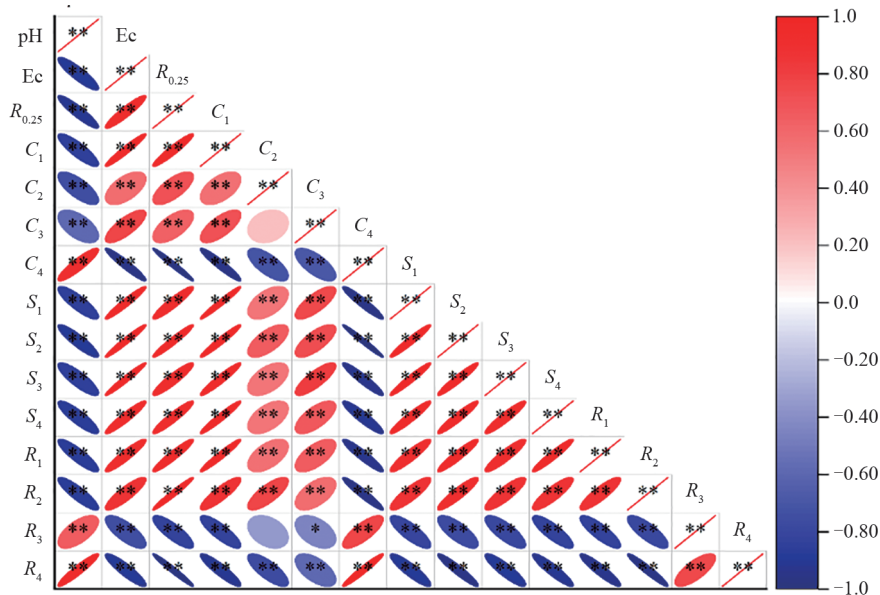


图 11 土壤团聚体有机碳相关指标与土壤主要理化性质的相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis between soil aggregate organic carbon-related indicators and wain soil physical and chemical properties

注:图中 $R_{0.25}$ 为>0.25 mm 粒径大团聚体百分比; $C_1, C_2, C_3, C_4; S_1, S_2, S_3, S_4; R_1, R_2, R_3, R_4$ 分别为>2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、<0.053 mm 粒径团聚体对有机碳贡献率, 各粒径有机碳含量和各粒径团聚体百分比。

Note: $R_{0.25}$ represents the percentage of large aggregates with particle size > 2.25 mm in the soil. $C_1, C_2, C_3, C_4; S_1, S_2, S_3, S_4; R_1, R_2, R_3, R_4$ respectively represent the contribution rates of organic carbon from aggregates with particle sizes greater than 2 mm, 2-0.25 mm, 0.25-0.053 mm, and less than 0.053 mm, as well as the content of organic carbon for each particle size and the percentage of each aggregate size.

表明改良剂施加在降低土壤碱度的同时能够有效地提高土壤有机碳含量。各粒径团聚体有机碳含量与土壤EC呈极显著正相关($P < 0.01$),表明有机碳含量随EC增高而增高,这与Wu^[26]、肖颖^[27]等人研究结论一致。四种粒径团聚体有机碳含量与 $R_{0.25}$ 之间呈极显著正相关($P < 0.01$),随着土壤大团聚体的形成,土壤结构更稳定,土壤各粒径SOC含量增高。

3 讨论

土壤pH值与电导率(EC)是衡量土壤盐碱化程度的关键指标。国际上通常把pH大于8.5认为是土壤发生碱化的临界值,7.0~8.5是微碱环境^[28]。本研究结果表明,施入改良剂的四个处理组均能降低土壤pH,其中PGC₅-B、PGC₆-B、PGC₅-C和PGC₆-C处理在三次淋溶后土壤pH均小于8.5;1%水平和2%添加水平除PGC₆-B处理外,土壤EC均低于 $2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,属于非盐渍化^[29],对土壤盐碱化改良效果显著。究其原因,改良剂PGC₅和PGC₆体系富含游离态 Ca^{2+} ,张峰举等^[30]人文献报道,土壤胶体对 Ca^{2+} 有较高的选择性吸附,因此可有效置换出土壤胶体上的 Na^+ ,降低盐渍化程度;同时 Ca^{2+} 可结合盐渍土中部分致碱离子 CO_3^{2-} ,降低土壤pH值;此外改良剂以纤维素作为聚合反应的接枝骨架材料,其分子结构中含有大量的羧基、羟基等酸性官能团,添加玉米芯纤维素基改良剂后,玉米芯中铵态氮在微生物的作用下发生硝化作用转化为硝态氮产生氢离子,在水分充足条件下被微生物腐解产生有机酸^[31],中和土壤中 OH^- 离子的浓度,同时,玉米芯中的葡萄糖、蛋白质等物质被微生物分解形成腐殖质,腐殖质通过改善土壤团粒结构进而打破钠离子的胶体吸附,从而降低土壤pH^[32],有效缓解土壤碱化程度。

土壤团聚体的粒径分布特征是衡量土壤结构稳定性的核心指标,本研究表明施加改良剂各处理增加了土壤大团聚体($>0.25 \text{ mm}$)质量分布,降低了微团聚体($<0.25 \text{ mm}$)质量分布,与CK相比,PGC₅改良剂处理组效果最好,3个添加量水平下,土壤 $>2 \text{ mm}$ 粒径团聚体增加了3.92~11.97倍,2~0.25 mm粒径团聚体增加了0.54~0.78倍,0.25~0.053 mm粒径团聚体含量降低了28.8%~39.64%, $<0.053 \text{ mm}$ 粒径团聚体含量降低

了31.91%~67.17%。表明改良剂添加后能够促进土壤大团聚体的形成、有利于土壤结构的稳定性,这与Huang^[33]、邵社刚^[34]等人已有研究结论一致。改良剂施入土壤后,一方面其高分子结构含有较多的亲水基团,对土壤颗粒有着较强的吸附和絮凝作用,可将细小的土壤颗粒吸附形成更大的团聚体^[35]。另一方面体系中游离的 Ca^{2+} 可以通过凝聚作用形成有机无机复合体Ca-SOC^[36],促进土壤大团聚体的形成,提高土壤结构稳定性和抗蚀性。

土壤有机碳是土壤重要养分指标之一,有机碳的形成与土壤团聚过程不可分割^[37]。本研究表明,在3个添加水平条件下,改良剂PGC₅和PGC₆处理对于团聚体各粒径土壤SOC含量增加更为显著,这可能是改良剂PGC₅和PGC₆体系中磷石膏添加比例较高,更多水溶性 Ca^{2+} 可有效置换盐渍土胶体中的 Na^+ ,形成强吸附力的钙胶体,增加大团聚体含量从而改良土壤结构,有机碳储存于团聚体内部,增强了土壤对SOC的物理保护机制^[38],延缓SOC矿化过程^[39]。此外,改良剂由混酸处理后的玉米芯作为骨架,含有大量的纤维素、木质素等大分子有机物质,作为外来碳源施入后直接增加土壤有机碳含量。土壤中有有机碳主要存储在2~0.25 mm及 $<0.053 \text{ mm}$ 粒径团聚体中,团聚体各粒径SOC的分布符合土壤碳路径顺序,即有机碳进入土壤后先被固定到大团聚体体内,进而逐级分解至更小粒径的团聚体^[40],与苗月等人的研究结论一致^[41]。土壤中有有机碳作为土壤有机黏结物质,有利于小粒径土壤团聚,同时形成的大团聚体对于土壤现存SOC形成物理保护,两者相互作用,相辅相成。

4 结论

(1)纯纤维素基改良剂COR吸水倍率为 $167.77 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$;纤维素钙基改良剂PGC₂、PGC₃、PGC₄、PGC₅和PGC₆吸水倍率存在显著性差异($P < 0.05$);PGC₁吸水倍率达到最大,为 $164.71 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,PGC₆吸水倍率最小($45.53 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)。

(2)4种改良剂1%添加水平和2%添加水平除PGC₆-B处理外,3次淋溶后土壤EC均低于 $2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,属于非盐渍化土壤。PGC₅-B、PGC₆-B、PGC₅-C和PGC₆-C处理3次淋溶后土壤pH低于8.5,小于土壤发生碱化的临界值。改良剂施

入后均增加机械性大团聚体含量,提高土壤团聚体各粒径有机碳含量,提高大团聚体有机碳贡献率,降低微团聚体有机碳贡献率,有效提高土壤结构稳定性及有机碳含量。

参考文献

- [1] 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(02):489-494.
- [2] 宋玉凤,肖辉,张慧,等.基于盐碱地研究的可视化分析及改良技术的研究进展[J].环境生态学,2025,7(01):65-75.
- [3] 周磊,贺聪聪,吕爱锋,等.柴达木盆地土壤盐渍化程度快速动态监测[J].测绘科学,2021,46(07):99-106+114.
- [4] 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(01):10-27.
- [5] Outbakat M B, Choukr-Allah R, EL Gharous M, et al. Does phosphogypsum application affect salts, nutrients, and trace elements displacement from saline soils? [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022,10:964698.
- [6] 张辉,陈小华,付融冰,等.脱硫石膏对不同质地滨海盐碱性质的改良效果[J].环境工程学报,2017,11(07):4397-4403.
- [7] 周妍宏,刘宏远,王辰,等.磷石膏添加对苏打盐碱稻田耕层土壤肥力和酶活性的影响[J].土壤,2025,57(02):325-332.
- [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(01):295-304.
- [9] 卢维宏,王要芳,刘娟,等.磷石膏无害化改性及其在农田土壤改良中的应用研究进展[J].土壤,2023,55(04):699-707.
- [10] 聂朝阳,杨帆,王志春,等.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[J].干旱地区农业研究,2023,41(01):235-243.
- [11] 常敏敏.半纤维素复合粘附性凝胶材料的构建与性能研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [12] 罗英海,罗东霞,王凤羽,等.可生物降解秸秆基高吸水树脂的制备及其性能研究[J].化工新型材料,2025,53(11):246-252.
- [13] 李灿欣.甲酸预处理玉米秸秆分离非缩合木质素及纤维素的融盐水解研究[D].广州:华南理工大学,2022.
- [14] 黄仁亮,苏荣欣,齐崑,等.木质纤维素甲酸预处理及其组分分离[J].过程工程学报,2008,8(06):1103-1107.
- [15] 张昊,樊文华,田剑,等.不同改良剂施用量和次数对黄土区煤矿复垦土壤团聚体和有机碳含量的影响[J].应用与环境生物学报,2023,29(04):987-993.
- [16] 王晓华.淀粉系载磷保水剂的制备及应用研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [17] Zhao C, Zhang M, Liu Z, et al. Salt-tolerant superabsorbent polymer with high capacity of water-nutrient retention derived from sulfamic acid-modified starch[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(3): 5923-5930.
- [18] 陈尚研,勇强,徐勇,等.蒸汽爆破预处理对玉米秸秆化学组成及纤维结构特性的影响[J].林产化学与工业,2009,29(S1):33-38.
- [19] 李萍.木质纤维素预处理及其降解机制的研究[D].北京:北京化工大学,2018.
- [20] Kumar A, Saha A. Effect of polyacrylamide and gypsum on surface runoff, sediment yield and nutrient losses from steep slopes[J]. *Agricultural Water Management*,2011,98(6):999-1004.
- [21] 赵晶,张福蓉,陈明,等.NaOH预处理对玉米秸秆纤维结构特性和酶解效率的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(07):1407-1412.
- [22] 秦思成.硫酸钙晶须的优化和改性及在PVC中的应用[D].包头:内蒙古科技大学,2023.
- [23] 冯春晖,刘新路,纪文君,等.基于电磁感应技术的棉田土壤电导率时空异质性研究[J].土壤学报,2022,59(04):999-1011.
- [24] 高健永,刘菲,王楚涵,等.减氮覆膜对黄土旱塬土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].山西农业科学,2021,49(09):1081-1087.
- [25] 肖欣娟,夏建国,于正义,等.茶渣生物质炭对茶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].土壤,2021,53(03):594-601.
- [26] 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(6-12):727-734.
- [27] 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.
- [28] 刘旭,初莱,董建飞,等.高硫煤矸石与脱硫石膏复合施用对盐碱性质的影响[J].化工进展,2025,45(01):567-575.
- [29] 姜佰文,戴建军.土壤肥科学实验[M].北京:北京大学出版社,2017.

- [30] 张峰举,肖国举,罗成科,等. 脱硫石膏对次生碱化盐土的改良效果[J]. 河南农业科学,2010(02):49-53.
- [31] 王旭平. 发酵玉米秸秆与脱硫石膏配施对盐碱土改良效果初探[D]. 包头:内蒙古科技大学,2017.
- [32] 张慧,胡娟,周道玮. 大量添加秸秆对松嫩平原盐碱地改良及玉米生长的影响[J]. 土壤与作物,2024,13(04):415-427.
- [33] Huang X, Tang H, Kang W, et al. Redox interface-associated organo-mineral interactions: A mechanism for C sequestration under a rice-wheat cropping system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, (120):12-23.
- [34] 邵社刚,李婷,朱立安,等. 土壤改良剂PAM在生土改良中的应用及效果[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2023,48(06):97-103.
- [35] 纪冰祎,赵驰鹏,吴玥,等. 连续失水-复水中不同粒径保水剂对土壤结构和水分特性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (05): 375-383.
- [36] 黑杰,李先德,刘吉龙,等. 轮作模式对农田土壤团聚体及碳氮含量的影响[J]. 中国水土保持科学, 2022,20(03):126-134.
- [37] 杨艳华,苏瑶,何振超,等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 应用生态学报,2019,30(02):668-676.
- [38] 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(02):353-360.
- [39] Fan R Q, Du J J, Liang A Z, et al. Carbon sequestration in aggregates from native and cultivated soils as affected by soil stoichiometry[J]. *Biology and Fertility of Soils*,2020,56(8):1109-1120.
- [40] Shi J W, Deng L, Gunina A, et al. Carbon stabilization pathways in soil aggregates during long-term forest succession: Implications from $\delta^{13}C$ signatures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, (180):e108988.
- [41] 苗月,周杰,马乐,等. 秸秆还田协同酸化对苏打盐碱土团聚体特性及有机碳含量的影响[J]. 吉林农业大学学报,2024-08-06.