

多元大宗固废协同改良盐碱土的机制研究

秦燕莲

光明校园餐饮管理有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i4.3163

[摘要] 针对盐碱土退化与固废资源化难题,本研究以磷石膏(PG)、粉煤灰(FA)、有机污泥(OS)为协同改良剂,采用室内培养与盆栽试验相结合的方法,系统探究三者不同配比对盐碱土理化性质、土壤结构及作物生长的影响。最佳配比时,土壤pH值从8.92降至7.43,电导率降至1.21mS/cm,全盐量降低62.3%,有机质含量提升108.7%,阳离子交换量提升45.6%,土壤容重降低18.2%,孔隙度提升22.5%。盆栽试验中,小麦株高、鲜重、干重分别较对照组提升42.8%、56.3%、61.5%,小麦生物量显著提高,实现了盐碱土改良与固废利用双赢。

[关键词] 磷石膏; 粉煤灰; 有机污泥; 盐碱土; 协同改良

中图分类号: P619.26+1 **文献标识码:** A

Study on Mechanism of Synergistic Improvement of Saline-alkali Soil by Multi-elements and Bulk Solid Wastes

Yanlian Qin

Guangming Campus Catering Management Co., Ltd.

[Abstract] Addressing the challenges of saline-alkali soil degradation and solid waste resource utilization, this study employed phosphogypsum (PG), fly ash (FA), and organic sludge (OS) as synergistic amendments. By combining indoor cultivation and pot experiments, the study systematically explored the effects of different ratios of these three amendments on the physicochemical properties, soil structure, and crop growth of saline-alkali soil. At the optimal ratio, the soil pH value decreased from 8.92 to 7.43, the electrical conductivity dropped to 1.21 mS/cm, the total salt content reduced by 62.3%, the organic matter content increased by 108.7%, the cation exchange capacity rose by 45.6%, the soil bulk density decreased by 18.2%, and the porosity increased by 22.5%. In the pot experiment, wheat plant height, fresh weight, and dry weight increased by 42.8%, 56.3%, and 61.5% respectively compared to the control group. The wheat biomass significantly improved, achieving a win-win situation for both saline-alkali soil improvement and solid waste utilization.

[Key words] Phosphogypsum; Coal Fly Ash; Organic Sludge; Saline-alkali Soil; Synergistic Improvement

1 前言

盐碱土是全球主要的低产土壤类型之一,其核心问题表现为土壤pH值偏高、盐分积累、结构板结、有机质匮乏^[1],导致土壤肥力低下、作物生长受限,严重制约农业可持续发展和生态环境修复^[2]。近年来,固废协同改良盐碱土成为研究热点。已有研究表明,石膏^[3]与粉煤灰^[4]可改善盐碱土物理结构,降低土壤盐碱度;有机污泥与化学改良剂协同可提升土壤肥力,促进作物生长^[5]。但现有研究多聚焦于单一或两种改良剂的协同作用^[6-8],对多元固废协同改良的研究较少,研究不够深入,对最优配比的筛选缺乏系统数据支撑,难以满足实际工程应用需求。

本研究通过设计磷石膏-粉煤灰-有机污泥协同改良盐碱土的室内培养试验,分析配比与改良效果的相关性。揭示三者协同

改良盐碱土的内在机制,为盐碱土高效改良及磷石膏、粉煤灰、有机污泥的资源化利用提供理论依据和技术方案。

2 材料与方法

2.1 实验材料

2.1.1 实验土壤

盐碱土采集于江苏北部滩涂盐碱地区(典型盐碱化区域),采样深度为0-20 cm。

2.1.2 改良剂

磷石膏(PG): 取自江苏某磷化工企业,主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (含量 $\geq 90\%$), pH值4.2;

粉煤灰(FA): 取自上海某火力发电厂,主要成分为 SiO_2 (52.3%)、 Al_2O_3 (28.7%);

表 1 室内培养试验处理设计

样品编号	磷石膏添加量(g/kg)	粉煤灰添加量(g/kg)	有机污泥添加量(g/kg)	备注
CK	0	0	0	空白对照
T1	10	5	5	低配比组
T2	10	10	5	低配比组
T3	10	15	5	低配比组
T4	10	10	10	中配比组
T5	10	10	15	中配比组
T6	15	5	10	中配比组
T7	15	10	10	中配比组
T8	15	15	10	中配比组
T9	20	5	10	高配比组
T10	20	10	10	高配比组
T11	20	15	10	高配比组
T12	20	15	15	高配比组

有机污泥(OS):取自上海城市污水处理厂,有机质含量48.7 g/kg,氮含量2.31 g/kg,磷含量1.05 g/kg,钾含量1.22 g/kg,pH值6.5。

2.1.3供试作物

供试作物为小麦(品种:济麦44),种子经筛选、消毒冲洗后备用。

2.1.4试验仪器

pH计(PHS-3C)、电导率仪(DDS-307)、电子天平(FA2004)、烘箱(DHG-9070A)、环刀(容积100 cm³)、离心机(TDL-5-A)、原子吸收分光光度计(TAS-990)、土壤团聚体分析仪等。

2.2试验设计

2.2.1室内培养试验设计

采用盆栽培养方式,设置磷石膏(PG)、粉煤灰(FA)、有机污泥(OS)的添加量梯度,具体配比如下表1所示。

2.2.2盆栽试验设计

选取室内培养改良效果较好的配比进行盆栽试验。每盆播种小麦种子15粒,出苗后间苗至10株,培养期间保持土壤含水量为田间持水量的70%,培养45 d后收获,测定小麦生长指标(株高、鲜重、干重)。

2.3指标测定方法

土壤pH值:采用电位法测定,土壤与蒸馏水按1:2.5(质量体积比)混合,搅拌均匀后静置30 min,用pH计测定;

土壤电导率(EC):土壤与蒸馏水按1:5混合,振荡30 min后离心,取上清液用电导率仪测定;

土壤全盐量:取上述离心上清液,经蒸发、烘干、称重后计算全盐量;

土壤有机质:采用重铬酸钾氧化法测定;

阳离子交换量(CEC):采用醋酸铵法测定;

土壤容重与孔隙度:容重=土壤干重/环刀容积,孔隙度=(1-容重/土壤密度)×100%(土壤密度取2.65 g/cm³);

作物生长指标:株高用直尺测定,鲜重用电子天平测定。干重经105℃烘干至恒重后测定。

3 研究数据分析

3.1协同改良对盐碱土理化性质的影响

3.1.1对土壤pH值的影响

不同配比改良剂对盐碱土pH值的影响如图1所示。所有添加改良剂的处理组pH值均随培养时间延长而逐渐降低,且显著低于CK组(P<0.05),说明磷石膏-粉煤灰-有机污泥协同改良可有效中和土壤碱性,且改良效果随培养时间延长而增强。

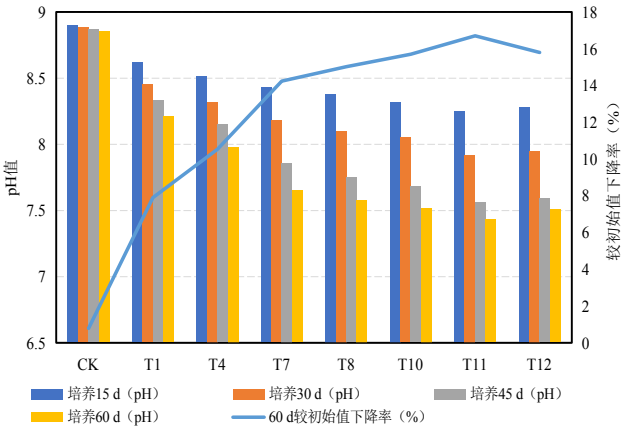


图1 不同培养时期各处理组土壤pH值变化

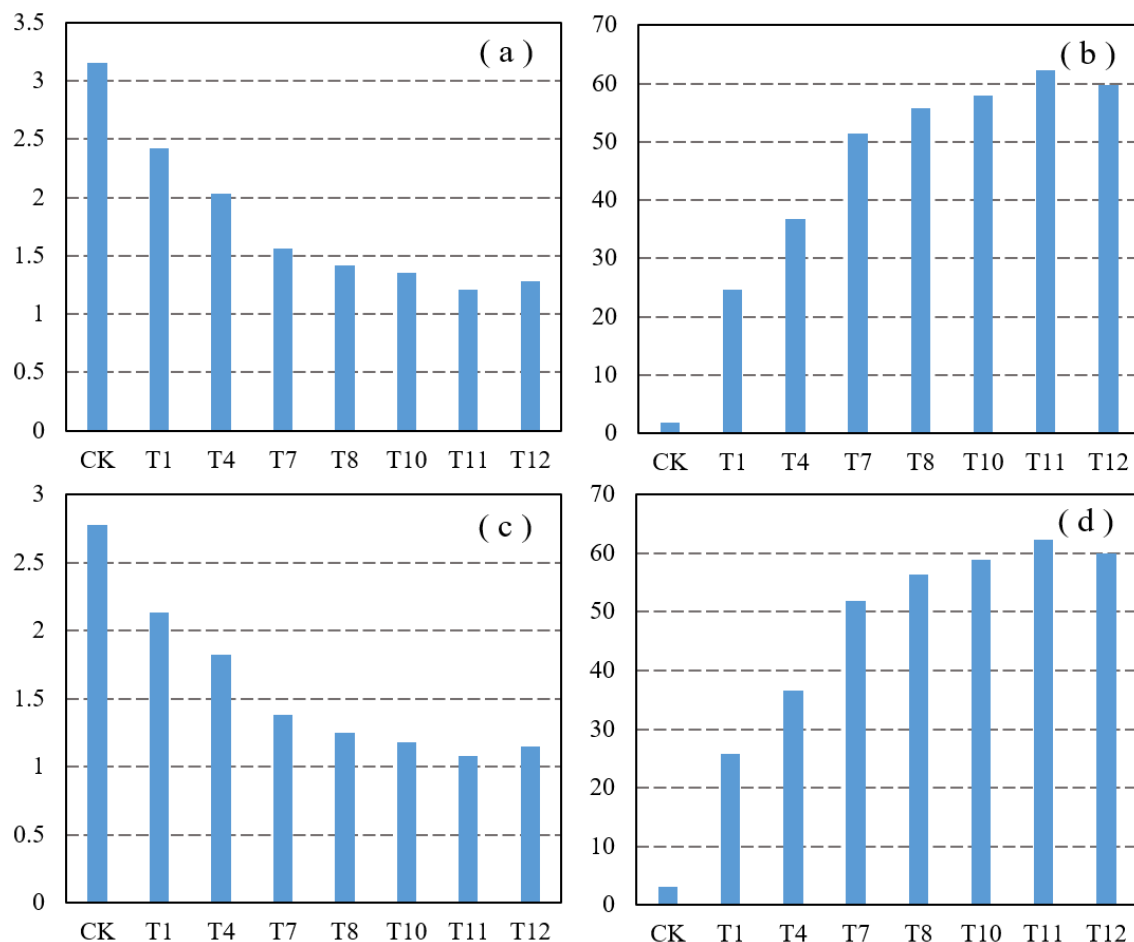


图2 培养60 d各处理组土壤EC值和全盐量变化: 培养60 d EC值(mS/cm) (a); EC值下降率(%) (b); 培养60 d全盐量(g/kg) (c); 全盐量下降率(%) (d)

其中, T11处理组(PG=20 g/kg、FA=15 g/kg、OS=10 g/kg) pH值下降最为显著, 培养60 d后pH值降至7.43, 较初始值下降16.7%, 较CK组下降16.8%。T1处理组改良效果最差, 培养60 d后pH值仍为8.21, 仅较初始值下降7.9%。磷石膏呈弱酸性, 其溶解产生的 H^+ 可中和土壤中的 OH^- , 降低土壤pH值, 而有机污泥分解产生的有机酸可进一步增强酸碱调节效果, 粉煤灰的加入则可缓解磷石膏酸性过强导致的土壤酸化, 实现酸碱平衡, 三者协同作用显著提升了pH值调节效果。

3.1.2对土壤电导率(EC)和全盐量的影响

土壤电导率和全盐量是反映土壤盐碱化程度的核心指标, 其数值越低, 表明土壤盐碱化程度越轻。不同配比改良剂对土壤EC值和全盐量的影响如图2所示。所有改良剂处理组的EC值和全盐量均随培养时间延长而显著下降($P<0.05$), 且下降幅度明显高于CK组。其中, T11处理组效果最佳, 培养60 d后EC值降至1.21 mS/cm, 较初始值下降62.3%, 较CK组下降61.6%; 全盐量降至1.08 g/kg, 较初始值下降62.3%, 较CK组下降61.1%。磷石膏溶解产生

的 Ca^{2+} 可与土壤中的 Na^+ 发生离子交换, 形成易淋溶的 Na_2SO_4 , 随水分淋溶去除, 从而降低土壤盐分含量; 粉煤灰的多孔结构可增强土壤通透性, 促进盐分淋溶; 有机污泥分解产生的有机酸可促进土壤中难溶性盐分溶解, 加速盐分去除, 三者协同作用显著提升了脱盐效果。

3.1.3对土壤有机质和阳离子交换量(CEC)的影响

土壤有机质和阳离子交换量是反映土壤肥力的重要指标, 有机质含量越高, CEC值越大, 土壤保肥、供肥能力越强。不同配比改良剂对土壤有机质和CEC值的影响如图3(上)所示。所有改良剂处理组的有机质含量和CEC值均随培养时间延长而显著提升($P<0.05$), 且提升幅度明显高于CK组。其中, T11处理组效果最佳, 培养60 d后有机质含量升至13.00 g/kg, 较初始值提升108.7%, 较CK组提升104.7%; CEC值升至12.70 cmol/kg, 较初始值提升45.6%, 较CK组提升43.5%。有机污泥富含有机质, 是土壤有机质的主要来源, 其分解过程中可释放大量有机胶体, 提升土壤CEC值; 粉煤灰中的硅、铝等矿物元素可与有机胶体结合, 增

强土壤保肥能力;磷石膏溶解产生的 Ca^{2+} 可促进有机胶体凝聚,提升土壤团聚性,进而促进有机质积累,三者协同作用显著提升了土壤肥力。

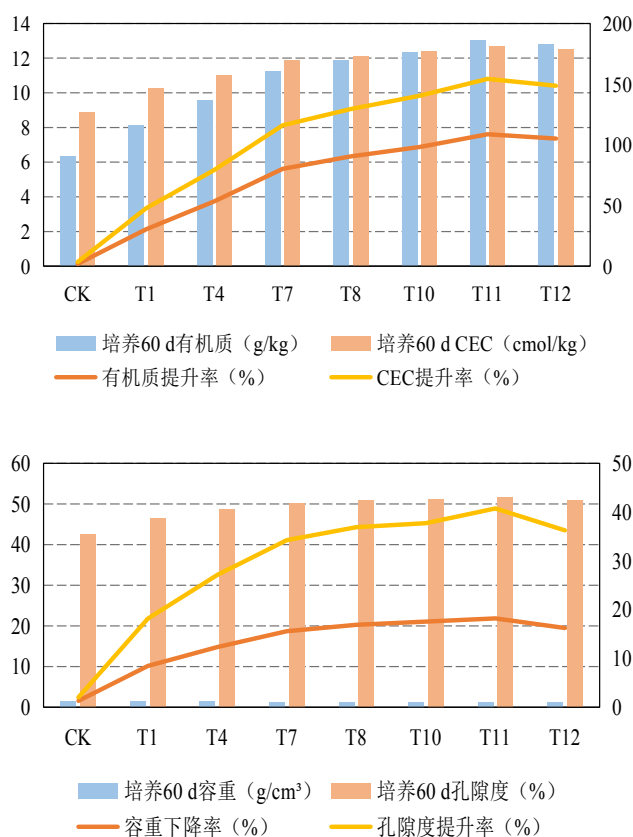


图3 培养60 d各处理组土壤有机质和CEC值变化(上)、土壤容重和孔隙度变化(下)

3.2 协同改良对盐碱土物理结构的影响

土壤容重和孔隙度是反映土壤物理结构的核心指标,容重越低、孔隙度越高,土壤通透性、保水性越好,越有利于作物根系生长。不同配比改良剂对土壤容重和孔隙度的影响如图3(下)所示。所有改良剂处理组的土壤容重均随培养时间延长而显著降低,孔隙度显著提升($P<0.05$),且改善效果明显高于CK组。其中,T11处理组效果最佳,培养60 d后土壤容重降至 1.26 g/cm^3 ,较初始值下降18.2%,较CK组下降17.1%;孔隙度升至51.7%,较初始值提升22.5%,较CK组提升21.4%。粉煤灰具有多孔结构,可直接填充土壤孔隙,降低土壤容重,提升孔隙度;磷石膏溶解产生的 Ca^{2+} 可促进土壤颗粒凝聚,形成稳定的团聚体,改善土壤结构;有机污泥分解产生的有机胶体可粘结土壤颗粒,增强土壤团聚性,减少土壤板结,三者协同作用显著改善了土壤物理结构。

3.3 协同改良对小麦生长的影响

盆栽试验结果表明,磷石膏-粉煤灰-有机污泥协同改良可显著促进小麦生长,不同处理组小麦生长指标存在显著差异($P<0.05$)。所有改良剂处理组的小麦株高、鲜重、干重均显著

高于CK组,其中T11处理组小麦生长状况最佳,株高达到60.4 cm,较CK组提升42.8%;鲜重达到29.1 g/株,较CK组提升56.3%;干重达到8.4 g/株,较CK组提升61.5%。其次是T12处理组,小麦株高为58.7 cm,鲜重为28.3 g/株,干重为8.1 g/株。分析原因,协同改良后土壤pH值、盐分含量得到有效调节,土壤结构和肥力显著提升,为小麦生长提供了适宜的土壤环境,促进了小麦根系发育和养分吸收,从而显著提升了小麦生长指标。

T10处理组小麦生长表现仅次于T11和T12处理组,株高达到57.9 cm,较CK组提升36.9%;鲜重为27.9 g/株,较CK组提升50.0%;干重为7.9 g/株,较CK组提升51.9%。T12处理组虽有机污泥添加量高于T11处理组,但小麦生长指标略低于T11处理组,推测原因是有机污泥添加量过高,导致土壤中部分养分失衡,反而在一定程度上抑制了小麦生长,说明改良剂配比存在最优阈值,过量添加某一种改良剂无法进一步提升改良效果,甚至可能产生负面作用。

4 结论

本研究通过室内培养与盆栽试验相结合的方法,系统探究了磷石膏-粉煤灰-有机污泥不同配比对盐碱土理化性质、土壤结构及小麦生长的影响,揭示了三者协同改良机制,得出以下结论:

磷石膏、粉煤灰和有机污泥协同改良盐碱土,核心是酸碱互补。磷石膏释放 H^+ 中和 OH^- , Ca^{2+} 置换 Na^+ ;有机污泥分解产生有机酸,辅助降碱并提升肥力;粉煤灰呈弱碱性,防止酸化过度。三者形成“中和-调节-缓冲”闭环,将土壤pH稳定在7.0-7.5,避免了单一改良剂的弊端。最佳配比时土壤pH值从8.92降至7.43,电导率降至 1.21 mS/cm ,全盐量降低62.3%,有机质含量提升108.7%,CEC值提升45.6%。

粉煤灰的多孔颗粒填充孔隙、降低容重;磷石膏中的钙离子胶结土壤颗粒,并置换钠离子;有机污泥分解后粘结各组分。三者分别搭建骨架、提供胶结剂、补充粘合剂,使土壤变得疏松透气。试验显示,处理组容重下降18.2%,孔隙度提高22.5%,效果优于单一改良剂。

有机污泥补充有机质和氮磷钾,改善保肥;粉煤灰提供硅、铝、铁等微量元素,多孔结构能吸附养分减少流失;磷石膏溶解出的钙离子促进团聚体形成,活化土壤磷。三者协同实现“养分补给-保肥增效-养分活化”。T11处理组有机质较初始提高108.7%,CEC提高45.6%,验证了协同提肥效果。

【参考文献】

- [1]杨柳晨,王小钊,段旭.中国盐碱土类型、评价指标及测定标准方法研究综述[J].陕西地质,2026,44(01):101-109.
- [2]赵秀芳,宋国香,谢志远等.我国盐碱土修复现状与特点[J].环境卫生工程,2017,25(04):96-99.
- [3]陈雨琼,石膏施用对滨海盐碱土水稻产量和甲烷排放的影响[D].扬州:扬州大学,2025.
- [4]吴孝炯,常星岚,李进军等.粉煤灰基材料对盐碱土离子淋出的促进效应[J].环境科学与技术,2025,48(07):173-179.

[5]陈澎军,夏曷远,刘强等.太湖淤泥-改良剂复合利用对滨海砂质盐碱土的协同改良效应[J].地质学刊,2026:1-11.

[6]姜明禹,陈月坤,黄韵洁等.功能真菌-除杂磷石膏复合改良剂在滨海盐碱土中的修复应用[J].生物加工过程,2026:1-15.

[7]孙一博,生物炭和腐殖酸联合修复盐碱土的研究,内蒙古科技大学,2020.

[8]王嘉祺,庞春花,张永清等.磷石膏与氮肥配施对盐碱地土壤及藜麦生长生理的影响[J].江苏农业科学,2025,53(18):264-269.

作者简介:

秦燕莲(1984--),女,汉族,海安人,研究方向:主要从事土壤生态与废弃物资源化利用研究,本科,农艺师。