



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

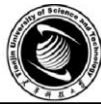
《天津科技大学学报》网络首发论文

题目: 市政污泥腐熟料配施脱硫石膏和腐植酸对盐碱土的改良效果
作者: 赵雨彤, 崔月萍, 李青芹, 王联庆, 隋文杰, 王冠华
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250058
收稿日期: 2025-03-20
网络首发日期: 2025-07-29
引用格式: 赵雨彤, 崔月萍, 李青芹, 王联庆, 隋文杰, 王冠华. 市政污泥腐熟料配施脱硫石膏和腐植酸对盐碱土的改良效果[J/OL]. 天津科技大学学报. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250058>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



市政污泥腐熟料配施脱硫石膏和腐植酸对盐碱土的改良效果

赵雨彤¹, 崔月萍², 李青芹², 王联庆², 隋文杰³, 王冠华¹

(1. 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2. 张家口绿垣环境工程有限公司, 张家口 075138;
3. 食品营养与安全国家重点实验室, 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 通过复配市政污泥好氧发酵腐熟料、脱硫石膏和腐植酸, 系统探究其对盐碱土改良和促进玉米幼苗生长的效果。结果表明: 该土壤改良剂可有效调节土壤 pH, 降低碱化度, 提升有机质含量和土壤养分, 促进玉米幼苗生长。当土壤改良剂施用量一致, 市政污泥好氧发酵腐熟料占比 50% 时土壤改良效果最优, 可显著降低土壤 pH。进一步优化配比发现, 在土壤改良剂施用量为 35 g/kg 时, 市政污泥好氧发酵腐熟料 50%、脱硫石膏 30%、腐植酸 20% 的组合处理效果最为显著, 能够将土壤碱化度降低至 17.80%, 同时提升有机质含量及阳离子交换量, 并且降低土壤容重和增加土壤孔隙度, 为作物生长提供了更为理想的土壤环境。盆栽实验显示, 经改良的盐碱土壤能够促进玉米幼苗的生长和增强光合效率, 相较于 CK 对照组可溶性糖和可溶性蛋白分别增加 39.61% 和 32.53%。本研究为市政污泥资源化利用及盐碱土改良提供了科学依据和技术支持。

关键词: 市政污泥; 脱硫石膏; 腐植酸; 盐碱土改良; 玉米幼苗生长

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

Aerobically Composted Municipal Sludge Material Combined with Desulfurized Gypsum and Humic Acid on Saline-Alkali Soil Amelioration

ZHAO Yutong¹, CUI Yueping², LI Qingqin², WANG Lianqing², SUI Wenjie³, WANG Guanhua¹

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Zhangjiakou Lüyuan Environmental Engineering Co., Ltd., Zhangjiakou 075138, China.;
3. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China.)

Abstract: This study systematically explored the effects of a soil amendment composed of municipal sludge aerobic fermentation compost, desulfurization gypsum and humic acid on the improvement of saline-alkali soil and the growth of corn seedlings. The results showed that this soil amendment could effectively regulate soil pH, reduce alkalinity, increase organic matter content and soil nutrients, and promote the growth of corn seedlings. When the application rate of the soil amendment was the same, the treatment with 50% municipal sludge aerobic fermentation compost had the best soil improvement effect, soil pH was significantly reduced. Further optimization of the ratio showed that under the condition of 35 g/kg soil amendment, the combination of 50% municipal sludge aerobic fermentation decomposition clinker, 30% desulfurization gypsum and 20% humic acid had the most significant effect, which could reduce the soil alkalinity to 17.80%, increase the organic matter content and cation exchange capacity, and reduce soil bulk density and increase soil porosity, providing a more ideal soil environment for crop growth. The pot experiment showed that the improved saline-alkali soil could promote the growth of corn seedlings and enhance photosynthetic efficiency. Compared with the CK blank control group, the soluble sugar and soluble protein increased by 39.61% and 32.53%, respectively. This study provides a scientific

basis and technical support for the resource utilization of municipal sludge and the improvement of saline-alkali soil.

Key words: municipal sludge; desulfurization gypsum; humic acid; saline-alkali soil improvement; maize seedling growth

随着城市化进程的加速,我国污泥产量逐渐增加^[1],污泥的安全合理利用已成为污泥资源化利用的主要途径^[2]。2019年我国污泥产生量约为3900万吨,据估计,至2025年,我国的污泥年产量预计将增至约9000万吨^[3]。据数据统计显示,我国城市市政污泥中土地利用占比26.5%、焚烧占比25%、建材利用占比14.4%、综合处理占比9.3%^[4]。随着生态环保意识的提高和国家战略政策的调控,填埋、焚烧的处置方式受到很大限制^[5]。市政污泥含有丰富的氮、磷、钾等营养物质和大量可生物降解的有机质^[6],可作为植物养分的来源,可以提高作物产量^[7-8],通过改善土壤理化性质,提高土壤肥力和持水能力^[9-10]。好氧发酵能够将污泥中的有机质转化为较为稳定的腐殖质,使产物具有较高的稳定化程度,便于土地利用^[11]。

合理治理盐碱土地可以极大提高土地利用率和绿化覆盖率,对改善生态环境有着重要意义^[12]。盐碱地改良措施主要包括物理、化学、生物和水利工程等^[13-15],其中化学改良剂因成本相对较低、周期短而在生产实践中广泛应用^[16-17]。常用的化学改良材料包括含钙类矿石(石膏、脱硫石膏、磷石膏等)、酸性物质(硫磺、硫酸铝等)和有机废料类(腐植酸、沼液、木醋液等)^[18]。石膏和腐植酸因具有环境友好的优势^[17],在盐碱地改良中效果显著,常混合施用。孙在金^[19]的研究表明,脱硫石膏和腐植酸配施对滨海地区中高盐碱化土壤改良效应显著,可以改善土壤的理化性能,促进植物生长。周阳^[20]的研究表明脱硫石膏和腐植酸配施可以显著提高盐碱地玉米产量,降低土壤容重、pH和碱化度。

本研究创新性地将市政污泥好氧发酵腐熟料作为盐碱土改良的核心材料,充分发挥其富含营养元素和可降解有机质的资源特性,以及形成稳定腐殖质的土壤改良潜力。通过系统研究不同腐熟料添加量与脱硫石膏、腐植酸等改良剂的优化配比,探究其对盐碱土改良和玉米幼苗生长的影响,并对土壤物理化学性质以及玉米幼苗的生长情况进行综合评价,旨在为市政污泥资源化利用与盐碱土改良提供兼具理论基础和实践价值的技术方案,实现废弃物资源化与农业可持续发展的双重目标。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试土壤取自天津滨海新区中央大道附近土壤(0~20 cm),土样采集后除去石块和植物残体。

供试土壤一: pH 8.74, 电导率 312.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 容重 1.33 g/cm^3 , 含水率 14%, 阳离子交换量 13.66 cmol/kg , 有机质含量 11.51 g/kg 。供试土壤二: pH 8.44, 电导率 3194.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 容重 1.32 g/cm^3 , 含水率 14%, 阳离子交换量 17.39 cmol/kg , 交换性钠离子 4.50 cmol/kg , 有机质含量 16.8 g/kg , 土壤碱解氮含量 53.43 mg/kg , 有效磷 38.20 mg/kg , 速效钾 732.21 mg/kg 。

供试市政污泥好氧污泥腐熟料来源于张家口绿垣环境工程有限公司,是由市政污泥经过好氧发酵工艺形成。供试脱硫石膏购买自烟台安达环保科技有限公司。供试腐植酸为黑色固体粉末,腐植酸含量 80%, pH 6.87, 电导率 770.40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 含水率 21.09%, 有机质含量 44.79%。

1.2 实验设计

1.2.1 市政污泥好氧发酵腐熟料用量实验设计

实验选用花盆规格为下径 10 cm×上径 13 cm×盆高 12 cm,每个花盆装风干过筛土壤 1000 g,将供试土壤一与改良剂混匀 5 min,确保无干土后将混合好的土壤放入密封袋中静置 12 h,使土壤、土壤改良剂与水充分浸润。设计土壤培养 40 d,实验期间称量补水维持土壤中正常的生态环境。实验针对污泥用量的优化设计中设置 50%和 30%的改良剂污泥添加量,并依据 GB/T 24600—2009《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》^[21]中污泥施用频率的要求,将改良剂施用量设定为 28 g/kg ,各个实验组改良剂配比见表 1,确定最适市政污泥好氧发酵腐熟料的添加量。

表 1 市政污泥好氧发酵腐熟料用量实验设计分组

Tab. 1 Experimental design for aerobic fermentation of municipal sludge and consumption of humic clinker

组别	改良剂用量 / (g/kg)	改良剂配比
CK	0	未添加改良剂
T1	28	50%污泥+50%脱硫石膏+0%腐植酸
T2	28	50%污泥+30%脱硫石膏+20%腐植酸
T3	28	50%污泥+10%脱硫石膏+40%腐植酸
T4	28	30%污泥+70%脱硫石膏+0%腐植酸
T5	28	30%污泥+50%脱硫石膏+20%腐植酸
T6	28	30%污泥+30%脱硫石膏+40%腐植酸
T7	28	30%污泥+0%脱硫石膏+70%腐植酸

1.2.2 土壤改良剂施用量和各组分配比实验设计

在最适市政污泥好氧发酵腐熟料的添加量确定后, 改良剂配比的优化实验中设置 9 个改良剂处理组和 1 个空白对照组, 即对照组 CK、50%污泥-40%脱硫石膏-10%腐植酸 (配方 1)、50%污泥-30%脱硫石膏-20%腐植酸 (配方 2)、50%污泥-20%脱硫石膏-30%腐植酸 (配方 3) 配比设置, 每种配方设置高、中、低 3 种用量 (H、M、L), 同 1.2.1 实验方法与供试土壤二进行混匀培养, 具体改良剂用量和各组分配比如下表所示。

表 2 土壤改良剂施用量和各组分配比实验设计分组

Tab. 2 Experimental design grouping of soil amendment application rate and materials ratio of each group

组别	改良剂用量/ (g/kg)	改良剂配比
CK	0	未添加改良剂
H1	35	50%污泥+40%脱硫石膏+10%腐植酸
H2	35	50%污泥+30%脱硫石膏+20%腐植酸
H3	35	50%污泥+20%脱硫石膏+30%腐植酸
M1	30	50%污泥+40%脱硫石膏+10%腐植酸
M2	30	50%污泥+30%脱硫石膏+20%腐植酸
M3	30	50%污泥+20%脱硫石膏+30%腐植酸
L1	25	50%污泥+40%脱硫石膏+10%腐植酸
L2	25	50%污泥+30%脱硫石膏+20%腐植酸
L3	25	50%污泥+20%脱硫石膏+30%腐植酸

1.2.3 玉米幼苗盆栽实验设计

采用育苗移栽的方式提高玉米苗成活率。先将玉米种子用 1%次氯酸钠溶液浸泡 10 min, 浸泡后的种子用无菌水反复冲洗, 放置在培养箱中避光催芽 2 d 后, 见光育苗。在育苗过程中, 保持育苗环境的水分和温度。育苗 7 d 后, 选择长势相似且生长健康的幼苗移栽到实验盆 (3 株/盆)。每个处理组 3 盆, 随机排列, 每隔 5 d 更换实验盆位置, 保证每天浇水, 使土壤水分维持田间持水量的 60%。

1.3 测定项目与方法

土壤理化性质根据《土壤农化分析》^[22]的方法测定。土壤容重、孔隙度采用环刀法测定, 土壤 pH 采用电位法测定, 土壤电导率采用电导法测定, 土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 土壤阳离子交换量采用三氯化六氨钴浸提-分光光度法测定, 土壤交换性钠离子采用醋酸铵-氢氧化铵火焰光度法测定, 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定, 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提法测定, 土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

玉米幼苗叶绿素含量的测定: 将 0.5 g 新鲜叶片切成小块, 加入 10 mL 95%乙醇溶液, 在黑暗环境

下提取 24 h, 采用分光光度计记录提取液在 665 nm、649 nm 波长处的吸光度, 计算叶绿素的浓度^[23]。玉米幼苗可溶性蛋白质的含量、可溶性糖的含量分别采用考马斯亮蓝法、蒽酮比色法测定。

1.4 数据处理

实验数据采用 Excel 软件整理, 用 SPSS 软件进行方差分析, 不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 市政污泥好氧发酵腐熟料基本理化性质

本研究制备的市政污泥好氧污泥腐熟料, 源自市政污泥经高效好氧发酵工艺而成。该腐熟料呈现出疏松多孔的结构, 具有良好的通气性和保水性, 其 pH 为 7.24, 含水率为 11.27%, 适宜大多数植物生长。该腐熟料的有机质质量分数 23.6%, 并且包括总氮 3.12%、总磷 5.64%及总钾 0.21%, 不仅为植物生长提供了丰富的碳源, 这些养分对于土壤的肥力提升和植物的健康生长也起着至关重要的作用。该腐熟料的砷(8.8 mg/kg)、汞(3.0 mg/kg)、铅(11.8 mg/kg)、镉(<0.5 mg/kg)、铬(91.8 mg/kg)、铜(0.002%)及锌(0.002%)等均严格遵循 GB/T 33891—2017《绿化用有机基质》^[24]标准中的Ⅲ级限值, 作为土壤改良剂具有环境友好性和安全性。

市政污泥好氧污泥腐熟料作为盐碱土壤改良剂, 不仅能有效调节土壤 pH, 还能显著提升土壤有机质含量及植物生长所需的营养元素, 为盐碱地的生态修复与改良以及植物生长提供科学依据。

2.2 污泥用量对土壤部分理化特性的影响

2.2.1 土壤 pH 和电导率

污泥用量对土壤 pH 和土壤电导率的影响如图 1 所示。各改良处理组 pH 均低于 CK 对照组, 其中 T1 处理组 pH 最低, 与 CK 处理相比降低 0.97, 显著优于其他处理组 ($P < 0.05$)。在市政污泥好氧发酵腐熟料施用量相同时, 脱硫石膏的添加量越多, 对土壤 pH 的降低效果越明显。这是由于石膏加入土壤后, 通过 Ca^{2+} 置换土壤胶体上吸附的 Na^+ 和 Mg^{2+} , 使钠质亲水胶体变为钙质疏水胶体, 从而改善土壤结构和通透性, 同时降低土壤 pH^[25-26]。除 T7 处理组外, 其他处理组土壤电导率均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。在市政污泥好氧发酵腐熟料施用量相同时, 随着脱硫石膏添加量的减少, 土壤电导率下降, 并且呈现显著性差异 ($P < 0.05$)。市政污泥好氧发酵腐熟料、脱硫石膏和腐植酸对土壤电导

率提升显著 ($P<0.05$)，这主要是由于各组分自身含有的盐离子较高，增加了土壤中的可溶性离子，从而增加了土壤电导率。

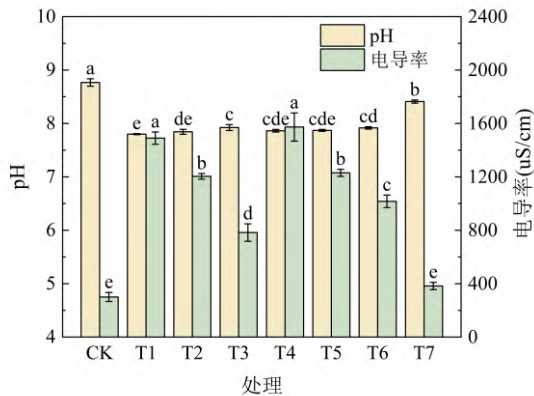


图1 污泥用量对土壤 pH 和土壤电导率的影响

Fig. 1 Effects of different sludge application rates on soil pH and soil electrical conductivity

2.2.2 有机质含量和阳离子交换量

不同污泥用量对土壤有机质含量和阳离子交换量的影响如图 2 所示。

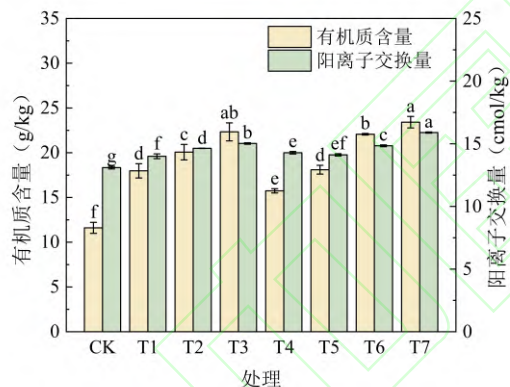


图2 不同污泥用量对土壤有机质含量和阳离子交换量的影响

Fig. 2 Effects of different sludge dosage on soil organic matter content and cation exchange capacity

各处理组的有机质含量均显著高于 CK 对照组 ($P<0.05$)。其中，T7 处理土壤有机质含量最多，其次是 T3、T6 处理。在市政污泥好氧发酵腐熟料施用量相同时，土壤有机质含量随腐植酸添加比例增加呈现递增趋势；对比 T1 和 T4 处理可知，在不添加腐植酸的情况下，50% 市政污泥好氧发酵腐熟料添加量对土壤有机质的提升效果高于 30% 添加量对盐碱土壤的改良效果。各处理组的阳离子交换量均显著高于 CK 对照组 ($P<0.05$)。其中，T7 处理阳离子交换量最高，与 CK 处理相比升高了

21.35%，其次是 T3 处理土壤阳离子交换量。土壤的阳离子交换量是土壤吸附阳离子的能力，研究结果与张荣涛等^[27]将有机肥施入土壤后，改变土壤的胶体类型和土壤质地、降低土壤 pH、土壤阳离子交换量增加的结果类似。

综合土壤 pH、电导率、有机质含量以及阳离子交换量，确定市政污泥好氧发酵腐熟料的 50% 添加量优于 30% 添加量，故后续设计 50% 市政污泥好氧发酵腐熟料的添加量，进行整体施用量以及脱硫石膏和腐植酸配比对改良盐碱土效果的研究。

2.3 改良剂施用量和各组分配比对土壤理化特性的影响

2.3.1 土壤容重和土壤孔隙度

改良剂施用量和各组分配比对土壤容重和孔隙度的影响如图 3 所示。

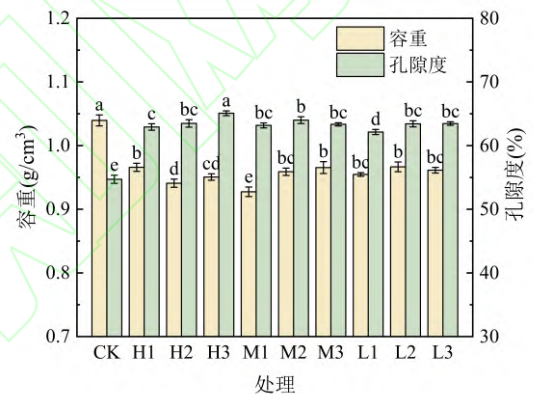


图3 改良剂施用量和各组分配比对土壤容重和孔隙度的影响

Fig. 3 Effects of amendment application rate and distribution ratio on soil bulk density and porosity

由图 3 可知，各处理组土壤的容重降低显著，均显著低于 CK 对照组 ($P<0.05$)。其中，M1 组土壤容重最小，平均土壤容重仅为 0.93 g/cm^3 ，较 CK 对照组显著降低 10.79%；其次是 H2 组、H3 组。由各处理组土壤容重均显著低于 CK 对照组可知，添加市政污泥好氧发酵腐熟料、脱硫石膏和腐植酸能够降低土壤容重，这与徐秋桐等^[28]研究结果一致。不同处理对土壤孔隙度较 CK 对照组均有显著提升 ($P<0.05$)，其中 H3 组土壤孔隙度最大，为 65.08%，较 CK 对照组增加 18.98%。

综合来看，土壤改良剂添加量为 35 g/kg 时，对于降低土壤容重和提高土壤孔隙度要优于 30 g/kg 和 25 g/kg 处理组。添加市政污泥好氧发酵腐熟料、脱硫石膏和腐植酸后，土壤中的有机质和黏粒含量逐渐增加，可以促进土壤的团聚作用和保水性

能, 进而增加土壤的孔隙度, 同时降低容重^[29], 起到疏松土壤, 改善土壤孔隙状况的作用。

2.3.2 土壤 pH、交换性钠离子和土壤碱化度

改良剂施用量和各组分配比对土壤 pH、交换性钠离子、碱化度的影响如图 4 所示。

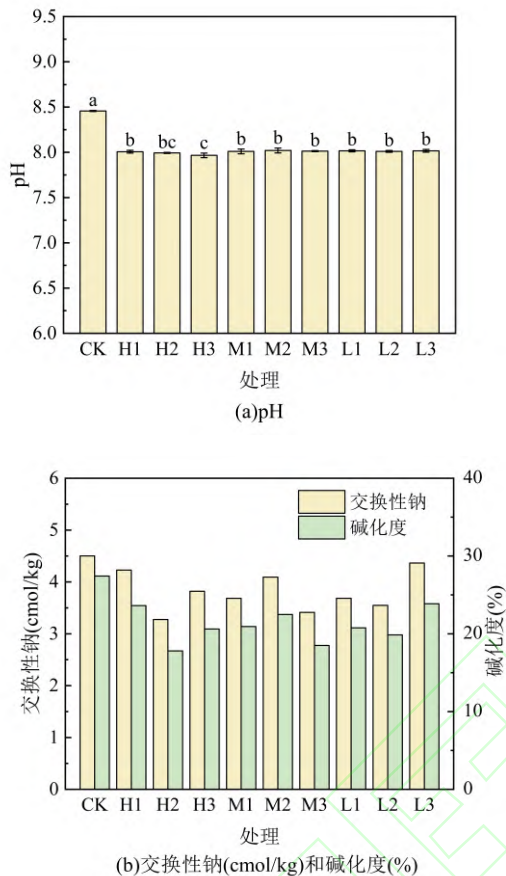


图 4 改良剂施用量和各组分配比对土壤 pH、交换性钠离子、碱化度的影响

Fig. 4 Effects of the application amount of modifier and the distribution ratio of each group on soil pH, exchangeable sodium ion and alkalinity

由图 4(a)可知, 各处理组 pH 均显著低于 CK 对照组 ($P < 0.05$)。其中, H3 组 pH 最低, 比 CK 组降低 0.49; 其次为 H2 组, 比 CK 组降低 0.47。当改良剂配方相同时, 施用量为 35 g/kg 处理对土壤 pH 降低效果略优于 30 g/kg 和 25 g/kg 处理。整体来看, 施用土壤改良剂能够降低盐碱土 pH, 在施用量为 35 g/kg 处理组中, 配方 2 和配方 3 的 pH 降低效果略优于配方 1。

土壤碱化度是土壤中交换性钠占土壤阳离子交换量的百分比, 是评价土壤碱化指标之一。由图 4(b)可知, 处理组的交换性钠离子均较 CK 对照组的交换性钠离子少, 其中 H2 处理交换性钠离子含量最低, 为 3.28 cmol/kg, 与 CK 对照组降低

27.19%, H2 组的土壤碱化度最低, 为 17.80%。由此可见, 添加市政污泥好氧发酵腐熟料、脱硫石膏和腐植酸能够降低土壤碱化度。由于脱硫石膏中大量的 Ca^{2+} 能够与土壤胶体吸附的 Na^+ 发生离子置换, Na^+ 置换下来后形成的 Na_2SO_4 可随水运动排出土壤, 进而降低 Na^+ 含量^[19], 通过计算碱化度可知, 土壤碱化度降低。腐植酸同样可以降低土壤碱化度, 腐植酸颗粒具有巨大的比表面积和表面能, 对土壤胶体表面吸附的钠离子、氯离子具有吸附作用^[30], 随着 Na^+ 的减少从而降低土壤碱化度。

2.3.3 土壤有机质和阳离子交换量

土壤有机质和阳离子交换量是反映土壤肥力的重要指标, 有机质是土壤肥力的基础物质之一^[31]。改良剂施用量和各组分配比对土壤有机质含量和阳离子交换量的影响如图 5 所示。不同处理组土壤有机质含量均显著高于 CK 对照组 ($P < 0.05$)。其中, H3 处理土壤有机质含量增幅最大, 比 CK 组增加 83.75%。在土壤改良剂添加量相同时, 配方 3 处理组 (H3、M3、L3) 土壤有机质含量均高于其他处理组, 这是由于配方 3 中腐植酸添加量高于其他处理组, 并且在配方相同时, 添加量为 35 g/kg 时土壤有机质含量高于 30 g/kg 和 25 g/kg 处理组。

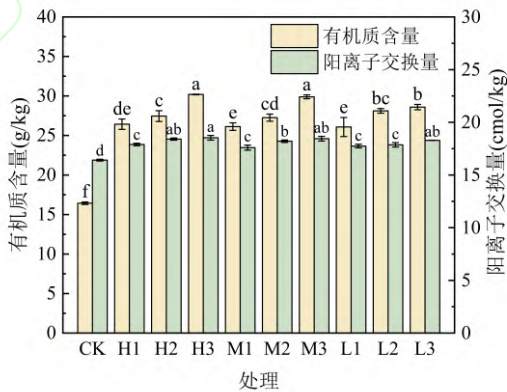


图 5 改良剂施用量和各组分配比对土壤有机质含量和阳离子交换量的影响

Fig. 5 Effects of amendment application rate and distribution ratio on soil organic matter content and cation exchange capacity

不同处理组阳离子交换量均显著高于 CK 组 ($P < 0.05$)。其中, H3 组土壤阳离子交换量最高, 为 18.53 cmol/kg, 比 CK 组上升 12.92%, 其次为 M3 处理。在土壤改良剂添加量相同时, 配方 3 处理组 (H3、M3、L3) 土壤阳离子交换量均高于其他处理组, 并且在配方相同时, 添加量为 35 g/kg 时土壤阳离子交换量最高。

在市政污泥好氧发酵腐熟料施用量相同时,改良剂中腐植酸能够提高土壤阳离子交换量和土壤有机质,并且随着腐植酸添加量的增加而增加,这与顾鑫等^[32]施用腐植酸改良大庆苏打盐碱土的研究结果相同。市政好氧污泥发酵腐熟料和腐植酸的施入可增加土壤有机质含量;脱硫石膏中的 Ca^{2+} 进入土壤能与土壤有机质中的腐殖质形成有机-无机复合体^[33],同时腐植酸因具有较大比表面积,为这种复合体的形成提供了有利场所,进而共同促进了土壤阳离子交换量的显著提升^[34]。

2.3.4 土壤速效养分

改良剂施用量和各组分配比对土壤速效养分的影响如图 6 所示。

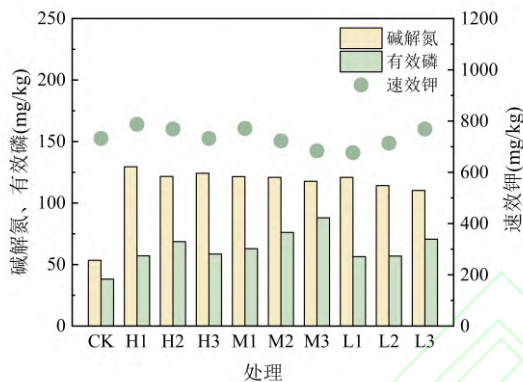


图 6 改良剂施用量和各组分配比对土壤速效养分的影响

Fig. 6 Effects of modifier application rate and distribution ratio of each group on soil available nutrients

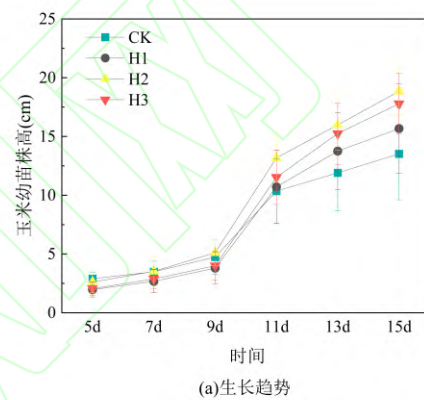
各处理碱解氮含量均高于 CK 对照组,其中 H1 组土壤碱解氮含量最高,平均为 129.47 mg/kg,比 CK 组提高 76.04 mg/kg;其次为 H3、H2、M1 处理组。在土壤改良剂添加量相同时,配方 1 处理组 (H1、M1、L1) 的碱解氮含量均高于其他处理组;在配方相同时,土壤改良剂添加量为 35 g/kg 时土壤碱解氮含量最高。对于土壤有效磷而言, M3 处理组含量最高,其次 M2、L3、L2 处理组。H1 处理速效钾含量最高。

总体来看,当土壤改良剂添加量为 35 g/kg 时 (如 H1、H2、H3 处理组),平均土壤速效钾含量高于其他添加量的处理组。在土壤改良剂添加量为 35 g/kg 时,市政污泥好氧发酵腐熟料、脱硫石膏和腐植酸能够对土壤碱解氮、有效磷和速效钾起到提高作用,这是由于添加土壤改良剂改善了土壤的盐碱环境,极大提高了土壤养分的有效性^[35-37]。

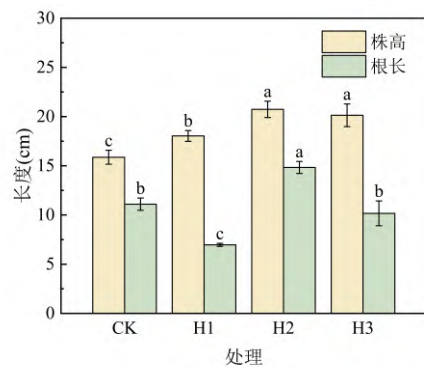
2.4 玉米幼苗培养实验结果

改良剂施用量和各组分配比对玉米幼苗生长状

态的影响结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,随着培育时间的推移, H2 组的玉米幼苗展现出最为迅猛的生长态势,在种植 15 d 时, H2 组玉米株高最高,平均为 18.84 cm,相较于 CK 组增长 39.38%。在相同的培养时期下, H2 组的株高均高于 H1 组和 H3 组。玉米幼苗培养 16 d 时,各处理组玉米幼苗株高和根长如图 7(b)所示,各处理组的玉米幼苗株高均显著高于 CK 组 ($P < 0.05$)。 H2 组的玉米幼苗根长为 14.83 cm,比 CK 组显著增长 33.63% ($P < 0.05$)。这说明土壤改良剂在促进玉米幼苗生长发育方面具有积极效应,这与田宁宁等^[38]利用玉米和油菜盆栽实验证明污泥肥能够促进作物生长、提高作物品质的研究结论一致。



(a) 生长趋势



(b) 株高、根长 (cm)

图 7 改良剂施用量和各组分配比对玉米幼苗生长状态的影响

Fig. 7 Effects of the application amount of modifier and the distribution ratio of each group on the growth status of maize seedlings

改良剂施用量和各组分配比的影响对叶绿素含量、可溶性糖、可溶性蛋白的影响如图 8 所示。

叶绿素是光合作用中捕获光的主要色素,直接影响植物的光合作用效能^[39]。由图 8(a)可知,在玉米幼苗生长 16 d 时,各处理组的玉米幼苗叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均显著高于 CK 对照组 ($P <$

0.05)。与 CK 组相比, 处理组 H1、H2、H3 的平均叶绿素 a 含量分别增长 85.95%、81.01%、79.81%, 叶绿素 b 含量分别增加 0.47、0.62、0.45 mg/g。这是由于脱硫石膏施入盐碱土壤后经过置换反应将碳酸盐转化为硫酸盐, 减弱盐碱地对植物生长发育的毒害作用, 减轻盐碱胁迫对植物叶绿体膜结构的破坏, 从而促进植物叶绿素形成并维持较高的叶绿素含量^[40]。胡慧等^[41]设计脱硫石膏改良盐碱土技术集成模式并以水稻进行实验, 结果表明适宜集成模式下脱硫石膏可显著增加植物叶绿素含量, 缓解盐碱胁迫, 该结论与本研究结果一致。

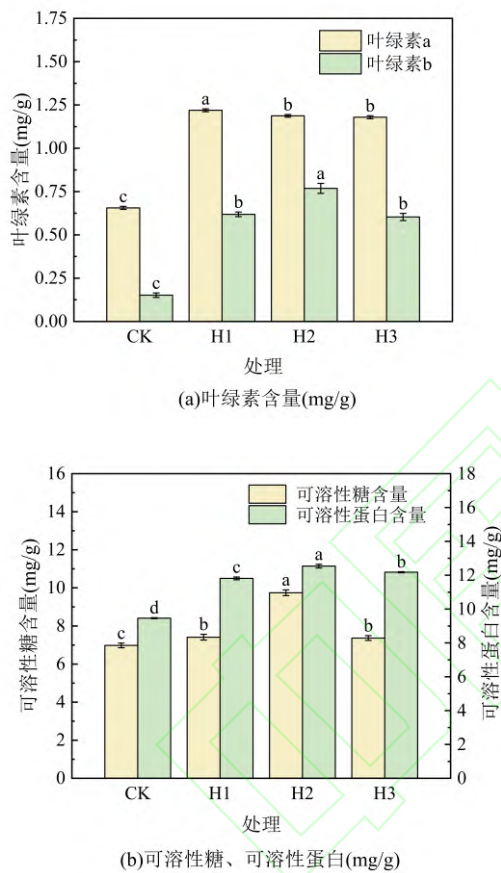


图 8 改良剂施用量和各组分配比的影响对叶绿素含量、可溶性糖、可溶性蛋白的影响

Fig. 8 Effects of the application amount of modifier and the distribution ratio of each group on chlorophyll content, soluble sugar and soluble protein

可溶性糖是玉米幼苗生长必要的能量来源, 也是幼苗体内重要的渗透调节物质。由图 8(b)可知, 各处理组可溶性糖含量均高于 CK 组, H1 组、H2 组、H3 组的可溶性糖含量比 CK 对照组增加 6.18%、39.61%、5.55%, 并且 H2 组可溶性糖含量显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。玉米幼苗培养 16 d 时, 可溶性蛋白含量如图 8(b)所示, 与 CK 对

照组相比, H1 组、H2 组、H3 组的可溶性蛋白含量分别增加 24.87%、32.53%、28.73%, 其中 H2 组增幅最大。这说明土壤改良剂的添加改良了土壤环境, 促进了幼苗根系对养分的吸收利用, 增加了可溶性蛋白的积累。

综上所述, 当土壤改良剂添加量为 35g/kg, 且各组分配比为市政污泥好氧发酵腐熟料 50%、脱硫石膏 30%、腐植酸 20%时, 即 H2 组处理方式对玉米幼苗的生长促进作用最为显著。这得益于土壤改良剂为幼苗提供更充足的养分和更适宜的土壤环境, 促进了幼苗的光合作用、糖代谢过程以及蛋白质积累等生理活动 (图 9)。

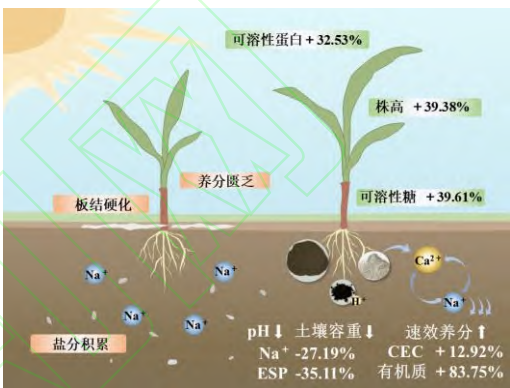


图 9 市政污泥腐熟料配施脱硫石膏和腐植酸改良盐碱土和促进玉米幼苗生长作用机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the mechanism of municipal sludge decomposing clinker combined with desulfurization gypsum and humic acid to improve saline-alkali soil and promote maize seedling growth

3 结论

在保持土壤改良剂施用总量一致的前提下, 市政污泥好氧发酵腐熟料占比为 50%时土壤改良效果最优, 能够将土壤 pH 降低 0.97, 并且显著提升土壤有机质含量和阳离子交换量。当土壤改良剂的添加量为 35 g/kg, 且改良剂中各组分的比例为市政污泥好氧发酵腐熟料 50%、脱硫石膏 30%、腐植酸 20%时, 其对土壤盐碱度的降低效果尤为显著。这一特定配比能够将土壤碱化度降低 35.11%, 同时进一步增加土壤有机质含量和土壤养分, 为作物生长提供更为理想的土壤环境。经改良之后的盐碱土壤在玉米幼苗盆栽实验中能够促进植物生长和增强光合效率, 相较于 CK 对照组, 可溶性糖含量和可溶性蛋白含量分别增加 39.61%和 32.53%。这表明改良土壤不仅能够提升玉米幼苗的生理功能, 还促进

其生物量的积累,为盐碱地农业的可持续发展提供有力支持。

本研究经系统实验与数据分析,验证了市政污泥好氧发酵腐熟料、脱硫石膏与腐植酸复配对盐碱土壤的改良效果及对玉米幼苗生长的积极影响,为市政污泥资源化利用和盐碱地改良提供了科学依据和技术支持,有助于农业资源循环利用与环境保护。

参考文献:

- [1] 刘国伟. 长期施用生物有机肥对土壤理化性质影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [2] 李志杰, 孙文彦, 马卫萍, 等. 盐碱土改良技术回顾与展望[J]. 山东农业科学, 2010, 63(2): 73-77.
- [3] FENG C, HUANG J, YANG C, et al. Smouldering combustion of sewage sludge: volumetric scale-up, product characterization, and economic analysis[J]. Fuel, 2021, 305: 121485.
- [4] 赵嘉林. 污泥堆肥对盐碱土壤理化性质及冷季型草坪草生长影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [5] 谭学军, 王磊. 我国重点流域典型污水厂污泥处理处置方式调研与分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(14): 1-8.
- [6] 乔雪园, 王先恺, 陈祥, 等. 市政污泥用于矿山废弃地生态修复的研究进展[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(6): 154-160.
- [7] ANGİN I, YAGANOĞLU A. Effects of sewage sludge application on yield, yield parameters and heavy metal content of barley grown under arid climatic conditions[J]. International journal of agriculture and biology, 2012, 14(5): 811-815.
- [8] 王黛莹. 污泥生物炭的制备及对土壤性质和农作物生长的影响研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [9] MOHAMED B, MOUNIA K, AZIZ A, et al. Sewage sludge used as organic manure in Moroccan sunflower culture: effects on certain soil properties, growth and yield components[J]. Science of the total environment, 2018, 627: 681-688.
- [10] ANTONIADIS V, KOUTROUBAS S D, FOTIADIS S. Nitrogen, phosphorus, and potassium availability in manure-and sewage sludge-applied soil[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2015, 46(3): 393-404.
- [11] 任少辉, 林立, 马建永, 等. 污泥气化资源化高值利用研究进展[J]. 能源与环境, 2024, 43(5): 11-15.
- [12] 杨玉坤, 耿计彪, 于起庆, 等. 盐碱地土壤利用与改良研究进展[J]. 农业与技术, 2019, 39(24): 108-111.
- [13] 杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(增刊): 162-170.
- [14] ROZEMA J, FLOWERS T. Crops for a salinized world[J]. Science, 2008, 322(5907): 1478-1480.
- [15] DARZI-NAFTCHALI A, MIRLATIFI S M, SHAHNAZARI A, et al. Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields[J]. Agricultural water management, 2013, 130(4): 61-68.
- [16] 张伶俐, 陈广锋, 田晓红, 等. 盐碱土石膏与有机物料组合对作物产量与籽粒养分含量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(12): 12-17.
- [17] 刘瑞敏, 杨树青, 史海滨, 等. 河套灌区中度盐渍化土壤改良产品筛选研究[J]. 土壤, 2017, 49(4): 776-781.
- [18] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 石膏和腐植酸配施对干旱盐碱区土壤改良及棉花生长的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 327-332.
- [19] 孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应与机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [20] 周阳. 脱硫石膏与腐植酸改良盐碱土效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质:GB/T 24600—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 绿化用有机基质:GB/T 33891-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [25] 曲长凤, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对苏北滩涂盐碱土壤改良效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 21-25.
- [26] WANG J, YANG P. Potential flue gas desulfurization gypsum utilization in agriculture: a comprehensive review[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2017, 82: 1969-1978.
- [27] 张荣涛, 周东兴, 申雪庆. 蚯蚓粪对盐碱土壤速效养分和碱化指标的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2013, 47(4): 83-86.
- [28] 徐秋桐, 孔樟良, 章明奎. 不同有机废弃物改良新复垦

- 耕地的综合效果评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 567-576.
- [29] 黄殿男, 谭杰, 傅金祥, 等. 城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 323-327.
- [30] 邹超煜, 白岗栓. 河套灌区土壤盐渍化成因及防治[J]. 人民黄河, 2015, 37(9): 143-148.
- [31] 陈文婷, 付岩梅, 隋跃宇, 等. 长期施肥对不同有机质含量农田黑土土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(15): 78-83.
- [32] 顾鑫, 任翠梅, 王丽娜, 等. 施用腐植酸改良大庆苏打盐碱土的效应[J]. 中国土壤与肥料, 2021, 58(4): 77-82.
- [33] 刘玉龙, 刘韵, 宁松瑞. 脱硫石膏对定边盐碱土壤水盐运移的影响[J]. 榆林学院学报, 2025, 35(2): 52-57.
- [34] 黄俊川. 腐植酸、有机肥和硅钙镁对轻度盐碱地土壤特性和作物生长的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [35] 侯锋, 何芸, 高霖, 等. 施用堆肥污泥对土壤肥力及植物生长的影响[J]. 地球与环境, 2024, 52(1): 53-64.
- [36] 田野, 刘善江, 冯浩杰. 脱硫石膏配施聚马来酸酐对碱化土壤的改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018, 55(1): 114-120.
- [37] 陈瑞杰, 罗林毅, 阮向阳, 等. 腐植酸对滴灌棉田土壤养分和棉花产量及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(9): 2112-2121.
- [38] 田宁宁, 王凯军, 曹从荣, 等. 污泥好氧堆肥产品(复合肥)的农田试验[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 37-39.
- [39] 李丹丹, 陈静波, 宗俊勤, 等. 施氮对‘Tifton85’狗牙根光合特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 472-478.
- [40] 白小龙, 武晋民, 张家豪, 等. 不同改良物料及其配施组合对河套平原盐碱土壤玉米光合与根系形态特征的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(10): 3023-3030.
- [41] 胡慧, 马帅国, 田蕾, 等. 脱硫石膏改良盐碱土对水稻叶绿素荧光特性的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(12): 2439-2450.