

DOI: 10.11766/trxb202302010038

吴洪生, 陈小青, 马文舟, 王晓云, 程诚, 丁军, 李妍慧, 刘政, 段亚军, 邸明春, 李贞伟, 冯迎辰, 石佑华. 磷石膏改良滨海盐土效果及对小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1077-1087.

WU Hongsheng, CHEN Xiaoqing, MA Wenzhou, WANG Xiaoyun, Cheng Cheng, DING Jun, LI Yanhui, LIU Zheng, DUAN Yajun, DI Mingchun, LI Zhenwei, FENG Yingcheng, SHI Youhua. Effects of Phosphogypsum on Coastal Saline-sodic Soil and the Growth of Winter Wheat[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 1077-1087.

磷石膏改良滨海盐土效果及对小麦生长的影响*

吴洪生¹, 陈小青¹, 马文舟², 王晓云³, 程 诚¹, 丁 军¹, 李妍慧¹,
刘 政¹, 段亚军¹, 邸明春⁴, 李贞伟¹, 冯迎辰¹, 石佑华⁵

(1. 南京信息工程大学农业资源与环境系, 南京 210044; 2. 盱眙县耕地质量保护站, 江苏盱眙 211700; 3. 兴化市耕地质量保护站, 江苏兴化 225700; 4. 南京怡可帮生态环境科技有限公司, 南京 210042; 5. 如东县耕地质量保护站, 江苏如东 226404)

摘 要: 江苏滨海盐土(盐碱土)约66.22万公顷, 大多未开发利用, 主要因为含盐量很高, 迫切需要进行改良。本试验采用田间试验方法, 利用磷肥厂副产物磷石膏进行盐(碱)土改良试验。试验设置不施肥、不施用磷石膏、单施复合肥、施用复合肥+磷石膏不同用量等8个处理进行。结果表明, 施用磷石膏可以降低盐碱土土壤 pH, 与不施用磷石膏的对照相比, 施用磷石膏后表层0~20 cm 土壤 pH 下降0.07~0.40个单位, 碳酸氢根离子下降15.81%~43.53%; 土壤钠离子浓度下降17.25%~89.83%, 土壤钾离子含量增加8.17%~384.90%, 土壤钙离子含量增加59.51%~1 977.72%, 土壤有机质增加4.51%~19.50%。施用磷石膏处理小区小麦叶片全氮含量较不施磷石膏处理增加7.85%~26.21%, 叶片全磷含量增加5.02%~35.97%; 小麦增产11.41%~45.26%。滨海盐土及盐碱土可以采用磷石膏进行改良, 有较好的改良效果。综合考虑, 以处理为30%复合肥1 050 kg·hm⁻²+磷石膏1 125 kg·hm⁻²和30%复合肥1 050 kg·hm⁻²+磷石膏2 250 kg·hm⁻²处理效果最好。

关键词: 滨海盐土; 磷石膏; 改良; 小麦; 理化性状; 增产

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effects of Phosphogypsum on Coastal Saline-sodic Soil and the Growth of Winter Wheat

WU Hongsheng¹, CHEN Xiaoqing¹, MA Wenzhou², WANG Xiaoyun³, CHENG Cheng¹, DING Jun¹, LI Yanhui¹, LIU Zheng¹, DUAN Yajun¹, DI Mingchun⁴, LI Zhenwei¹, FENG Yingcheng¹, SHI Youhua⁵

(1. Department of Agricultural Resources and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Xuyi County Arable Land Quality Protection Station, Xuyi, Jiangsu 211700, China; 3. Xinghua City Arable Land Quality Protection Station, Xinghua, Jiangsu 225700, China; 4. Nanjing Eco-bump Ecology and Environmental Science and Technology Company Ltd., Nanjing 210042, China; 5. Rudong County Arable Land Quality Protection Station, Rudong, Jiangsu 226404, China)

* 国家自然科学基金项目(42177020)、高端外国专家引进计划项目(110000216220228007)和江苏省六大人才高峰计划项目(2009241)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42177020), Program for introduction of foreign senior expert (No.110000216220228007) and Jiangsu Provincial Six-level Talents Peak Program (No.2009241)

作者简介: 吴洪生(1964—), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤污染生态修复与土壤改良研究。E-mail: wuhsluck@163.com

收稿日期: 2023-09-07; 收到修改稿日期: 2023-11-16; 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-03-09

Abstract: 【Objective】 There are about 0.66 million hectares of coastal saline-sodic soil in Jiangsu that have not been developed and used as arable land for agriculture. This is because the saline-sodic soil has a higher concentration of salt that requires urgent ameliorating. 【Method】 This study used waste phosphogypsum (PG), a kind of by-product from the phosphate industry, to conduct an amelioration experiment of saline-sodic soil in the field. Eight treatments were employed in the field experiment: no fertilizer and PG, fertilizer but no PG, and compound fertilizer + different amounts of PG. 【Result】 Results showed that pH was decreased by 0.07–0.40 pH units in the depth of 0–20 cm topsoil treated with PG compared to the control. Soil bicarbonate and sodium ions decreased by 15.81%–43.53% and 17.25%–89.83%, respectively. The concentration of potassium ion, calcium ion, and organic matter in the amended soil treated with PG was increased by 8.17%–384.90%, 59.51%–1 977.72%, and 4.51%–19.50%, respectively. Also, the amounts of total N and P in the wheat leaves in the PG treatment were increased by 7.85%–26.21% and 5.02%–35.97%, respectively, and the wheat grain yield increased by 11.41%–45.26%. Overall, PG can be used to ameliorate costal saline-sodic soil with better effectiveness. Mechanistically, the increase in calcium ions occurred as PG exchanged with sodium ions adsorbed in soil, and the sodium ions were leached underground during irrigation and rain to decrease the soil pH. Also, some acid-containing groups in PG were able to neutralize the bicarbonate ions to decrease the soil pH. PG increased the N uptake in wheat leaves and the yield of wheat grain due to the increased P from PG which induced a proportionate uptake of nutrients by the plant. Comprehensively, the best performance was the treatments of 30% compound fertilizer (1 050 kg·hm⁻²) + PG (1 125 kg·hm⁻²) and 30% compound fertilizer (1 050 kg·hm⁻²) + PG (2 250 kg·hm⁻²).【Conclusion】 The positive effect of PG should not be considered proportional to the amount applied, because trace hazardous elements in PG could accumulate in the soil which will result in environmental risks and grain safety issues. Thus, proper care should be taken when using high doses of PG for soil amendment.

Key words: Costal saline soil; Phosphogypsum (PG); Amelioration; Wheat; Physico-chemical properties; Yield-increase

盐渍化农田土壤具有盐碱程度高、养分含量低、土壤板结等原生和次生障碍,影响作物的水气热供给条件、土壤养分的有效性、土壤的耕作性能,从而影响作物生长^[1-2]。江苏沿海滩涂面积约 66.22 万公顷,占全国海涂总面积的 1/5,占江苏省陆域面积的 1/15,是全省最大的一块后备土地资源,开发利用潜力巨大,是江苏未来新的经济和生态增长点。但是江苏滨海盐碱地土壤类型大多为盐渍淤泥带,高度盐化与滨海盐土带。碱化度<30%, pH<9.0,表层土壤盐分高于 5%^[3],植物难以立苗生长,因此研究改良滨海盐土意义重大。

目前已有很多滨海盐土改良措施,效果评价不一。采用围田蓄淡养鱼改土、垦荒早作、抛荒自然淋洗改良方法,围田蓄淡养鱼 2 年的土壤脱盐率最高^[4]。石膏改良土壤盐碱,0~20 cm 土壤脱盐率分别为 31.06%、40.60%,土壤 pH 分别降低 0.67、0.51 个单位。降低 0~20 cm 土壤 Na⁺含量,改善土壤结构^[5]。石膏和生物质炭混合施用,可以增加盐碱土中有机质的稳定性^[6]。石膏与农家肥混合施用盐碱土, pH、电导率 (Electrical Conductivity, EC)、可溶性离子、钠吸附比 (Sodium Adsorption Ratio,

SAR)、交换性钠饱和度 (Exchangeable Sodium Saturation Percentage, ESP) 和重金属下降,促进小麦生长^[7]。生物质炭施用后,盐碱土的 pH 降低 9.04%,含盐量降低 28.75%,Na⁺浓度降低 6.78%及碱化度降低 22.88%,土壤阳离子交换量、土壤全氮、全磷、速效钾、有效磷和有机质含量分别提高 22.06%、16.00%、21.74%、25.33%、17.63%和 17.84%^[8]。秸秆生物质炭和畜禽粪便堆肥混合施用,可以降低盐碱土容重、pH、盐分,增加盐碱土有机质,促进水稻生长^[9]。

其他方法有有机无机肥配合施用^[10]、菌糠复合改良剂 (菌糠+硫磺+腐殖酸)^[11]、禽粪、蘑菇菌渣和牛粪^[12]。脱硫石膏+黄腐酸钾+稻壳复合改良剂^[13]、硫酸钙、稻壳和腐殖酸混合改良剂^[14]。生物质炭+磷石膏+蚯蚓粪不同组合^[15]、有机肥^[16]、微生物改良剂盐碱固氮菌 (*Azotobacter salinestris*)、杆状链霉菌 (*Streptomyces bacillaris*)、解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*)、胶冻样类芽孢杆菌 (*Paenibacillus mucilaginosus*) 和枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 混合菌剂^[17]、嗜盐抗碱灰绿曲霉结合惰性材料^[18]、溶磷菌+纤维分解菌+耐盐碱固氮

菌寡养单胞菌属 (*Oligotrophomonas*) + 农杆菌属 (*Agrobacterium*)^[19]、采用铁尾矿构建防返盐碱层和混合层等^[20]、堆肥和无机肥混合施用^[21]、施用木醋液和牛粪^[22]、木醋液、粉煤灰、园林废弃物堆肥^[23]、糠醛渣和石膏混合^[24]、风化褐煤、酒糟、石膏、堆肥、甘蔗渣^[25]、藻类提取物^[26]、藻类与浮石混合改良剂^[27]、稻草和石膏混合^[28]。

陈小青等^[29]早期的室内盆栽试验表明，滨海盐土施用适量的磷石膏可以改良盐土理化性状，促进小麦生长。磷石膏作为一种磷肥工业的副产物，来源丰富，价格便宜，含有丰富的植物养分元素，用于改良滨海盐土有很好的前景，本研究在前期室内盆栽试验基础上进行野外田间小区试验，进一步验证磷石膏改良滨海盐土的有效性，为开发利用磷石膏改良滨海盐土提供理论依据。

1 材料方法

1.1 试验地点及土壤基本理化性状

试验地位于江苏省南通市如东县苴镇，改良前该滨海盐土种植 5 年棉花。该县位于 32°12'~32°36'N, 120°42'~121°22'E。土壤含盐量为 4.5 g·kg⁻¹, pH 为 8.10, 有机质为 4.40 g·kg⁻¹, 全氮为 0.19 g·kg⁻¹, 碱解氮为 24.4 mg·kg⁻¹, 有效磷为 27.3 mg·kg⁻¹, 速效钾为 35.9 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

本次田间试验所用磷石膏废弃物由中石化集团南化公司的磷肥厂提供，磷石膏的化学性状 pH 为 2.15, CaO 为 296.8 g·kg⁻¹, SO₃ 为 415.9 g·kg⁻¹, SiO₂ 为 60.6 g·kg⁻¹, P₂O₅ 为 28.5 g·kg⁻¹。

供试小麦品种：宁麦 13 号。田间试验所用 30% 复合肥为 12-6-12 复合肥。

1.3 试验设计

试验采用田间试验。共设 8 个处理，具体见表 1。

每个处理设 3 次重复，随机排列。小区之间挖深 30 cm、宽 40 cm 灌排沟隔离小区。每个小区单收单打，每个小区 10 m²。10 月 18 日施肥耕翻试验田块，按照事先开挖的条沟播种小麦种子，沟深 2 cm。复合肥 65% 作为基肥施用，其余 35% 在次年的 3 月 22 日追肥，每小区单独施用肥料和磷石膏，磷石膏改良剂在种植前一次性施用，均匀撒施小区

土壤表面，然后耕翻，耙匀，并于田间试验盐土拌匀。4 月 29 日采集田间试验土样和小麦植株鲜样，进行实验室分析。次年 6 月 22 日收获小麦。

表 1 田间试验设计

Table 1 Experimental design in field

代号 Code	处理 Treatments
CK1	不施肥，不施磷石膏
CK2	30%复合肥 1 050 kg·hm ⁻²
改 1	30%复合肥 1 050 kg·hm ⁻² +磷石膏 225 kg·hm ⁻²
改 2	30%复合肥 1 050 kg·hm ⁻² +磷石膏 1 125 kg·hm ⁻²
改 3	30%复合肥 1 050 kg·hm ⁻² +磷石膏 2 250 kg·hm ⁻²
改 4	30%复合肥 1 050 kg·hm ⁻² +磷石膏 11 250 kg·hm ⁻²
改 5	30%复合肥 1 050 kg·hm ⁻² +磷石膏 22 500 kg·hm ⁻²
改 6	30%复合肥 1 050 kg·hm ⁻² +磷石膏 45 000 kg·hm ⁻²

1.4 测定项目和方法

土壤 pH 采用电位法 (PHS-3C 的 pH 计) 测定，土壤总盐采用电导法 (DDBJ-350 电导仪) 测定，有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定，全氮采用半微量开氏定氮法 (KDY-9810 定氮仪) 测定，碱解氮采用碱解扩散法测定，有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法 (756MC 型分光光度计) 测定，钙和镁采用 EDTA 滴定法测定，钠和钾采用火焰光度法 (6400A 的火焰光度计) 测定，碳酸根和碳酸氢根采用双指示剂中和滴定法测定，氯离子采用硝酸银滴定法测定，硫酸根采用 EDTA 间接络合滴定法测定，具体测定方法参照文献[30]。

小麦株高采用尺子测量地上茎基部到生长点的距离，植株鲜重、生物量等采用天平测定，植株全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—开氏定氮法测定，植株全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—钼锑抗分光光度法测定，植株全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—火焰光度法测定。

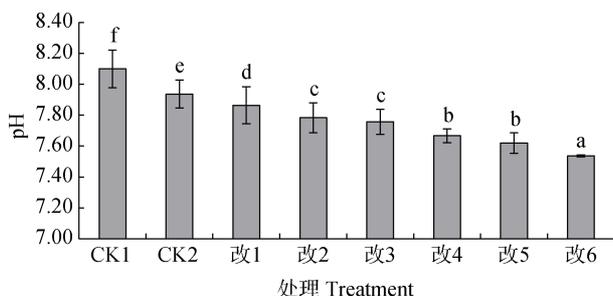
1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件计算数据并作图，图表中的数据为 3 次重复的平均值±标准误 (SD)。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行显著性差异分析 (95% 概率水平)。采用最小显著差异法 (LSD) 进行处理间的多重比较。利用 SPSS17.0 对试验数据进行方差分析，

2 结果

2.1 施用磷石膏改良剂对滨海盐土 pH 的影响

结果表明,田间试验土壤 pH 与施用的磷石膏用量呈负相关,施用磷石膏改良剂处理的表层土壤 pH 较对照 CK2(施肥,不施用磷石膏)下降了 0.07、0.15、0.18、0.27、0.32、0.40,降幅分别为 0.92%、1.93%、2.27%、3.40%、3.99%、5.04%,最大降幅为改 6,较对照 CK1 下降更多。对照 CK2 的 pH 与对照 CK1(不施肥不施用磷石膏)相比也是下降的,降幅为 2.02%,说明施用复合肥也能在某种程度上降低土壤 pH。图 1 反映了盐土施用磷石膏后土壤 pH 的变化趋势,从图中可以看出,随着磷石膏的用量增加,土壤的 pH 逐渐降低,处理间差异显著 ($P<0.05$),改 2 和改 3 之间差异不显著,改 4 和改 5 之间差异不显著,其余处理之间差异显著 ($P<0.05$)。改 6 降低 pH 效果最好。这是因为磷石膏本身是呈酸性的,施入土壤后一方面磷石膏中的游离酸可以快速中和土壤碱度,这对土壤改良是有益的;另一方面,磷石膏中的硫酸钙与土壤中的碳酸氢根和碳酸根离子发生化学反应,生成碳酸钙和碳酸氢钙,这两种物质均难溶于水,导致土壤 pH 下降。同时由于磷石膏含有大量的可溶性钙离子,会与土壤胶体上的钠离子进行交换,钠离子被交换下来随灌溉降雨淋洗,从而减少表层土壤钠离子含量,也会导致表层土壤 pH 下降。土壤 pH 过高影响植物根系细胞膜通透性,从而影响植物对养分的吸收。



注:柱状图上方不同字母表示在 95%置信水平下不同处理间差异显著。下同。Note: Different letters indicate significant difference among different treatments at 95% of confidence level. The same as below.

图 1 不同磷石膏用量对滨海盐土 pH 的影响

Fig. 1 Effects of phosphogypsum on soil pH in coastal saline soil

2.2 施用磷石膏改良剂对土壤水溶性盐的影响

2.2.1 不同磷石膏处理对土壤水溶性阳离子 (Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 的影响 施用磷石膏后,表层土壤钠离子的含量分别为 0.473、0.392、0.317、0.263、0.206、0.154、0.108、0.048 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,各处理间钠离子随着磷石膏用量的增加而下降,与 CK1 相比,下降幅度分别为 17.25%、32.93%、44.24%、56.38%、67.38%、77.21%、89.83%,不同处理间差异显著 ($P<0.05$) (图 2a)。施磷石膏后土壤的钠离子含量呈下降趋势,各处理土壤钠离子含量与磷石膏使用量呈负相关关系。钠离子并非植物生长所需要的大量元素,含量过高会使得土壤物理状况恶化,而且还能毒害植物的根系。另一方面,钠离子与钾离子和钙离子之间存在拮抗关系,高浓度的钠离子会抑制植物对钙离子和钾离子的吸收,不利于植物的生长,所以施用磷石膏一方面可能含有吸附土壤中钠离子的吸附剂,另一方面磷石膏中的钙离子能够置换出土壤胶体中的钠离子,使得土壤物理性能得到改善,土壤中的钠离子比较容易随水流走,因此表层钠离子含量比较低。

本试验表层土中钾离子含量分别为 0.032、0.034、0.054、0.073、0.099、0.117、0.134、0.154 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,改 6 最高,CK1 最低。施用磷石膏各处理较 CK1 增幅分别为 8.17%、68.54%、129.70%、210.90%、267.85%、322.94%、384.90%,除了 CK2 与 CK1 之间差异不显著之外,其余各处理之间差异显著 ($P<0.05$),而 CK1 未施用复合肥,其余均施用复合肥,复合肥能显著提高滨海盐土中的含钾量。改 6 处理的效果最好,且随着磷石膏加入量的增加,土壤中可溶性的钾离子也呈上升趋势(图 2b),磷石膏施用量与土壤中钾离子含量呈正相关。这可能与施用磷石膏后改善了土壤团粒结构和土壤胶体吸附性能有关;同时磷石膏中还含有少量钾,因此随着磷石膏的施用,钾也进入到土壤中,且用量增加,土壤中钾离子含量提高;土壤中可溶性钾离子增加,有利于植物对钾元素的吸收。

不同处理磷石膏用量不同,提供的钙离子量不同,从滨海盐土胶体中交换下来的钠离子量也不同(图 2c)。施用磷石膏后土壤中钙离子浓度提高,CK2、改 1、改 2、改 3 增幅较小,改 4、改 5、改 6 增幅较大。CK1 与改 3 之间的差异不显著,改 4、

改5、改6较CK2、改1、改2、改3差异显著 ($P<0.05$)。施入改良剂后土壤中钙离子含量较CK1增加的幅度分别为 59.51%、93.75%、167.66%、152.17%、917.12%、1 218.75%、1 977.72%。施入的磷石膏越多，土壤中的可溶性钙离子含量就会越多。

图 2d 表明，施入磷石膏后，土壤中镁离子的变化无明显规律，但是改4、改5、改6处理土壤镁离子显著高于其他处理，尤其是显著高于 CK1 和 CK2

($P<0.05$)。改5的镁离子含量最高，CK2 是最低的。不同处理土壤镁离子含量与 CK1 相比均有显著提高 ($P<0.05$)，增减的幅度分别为-47.55%、105.71%、-8.70%、-24.18%、233.42%、387.23%、334.51%，CK2、改2、改3相比CK1而言，镁离子的含量减少，可能是偶然因素造成的，具体原因有待进一步分析和试验。其余处理均表现为增加趋势，可能是磷石膏中的钙离子交换了更多的土壤胶体上的镁离子所致。

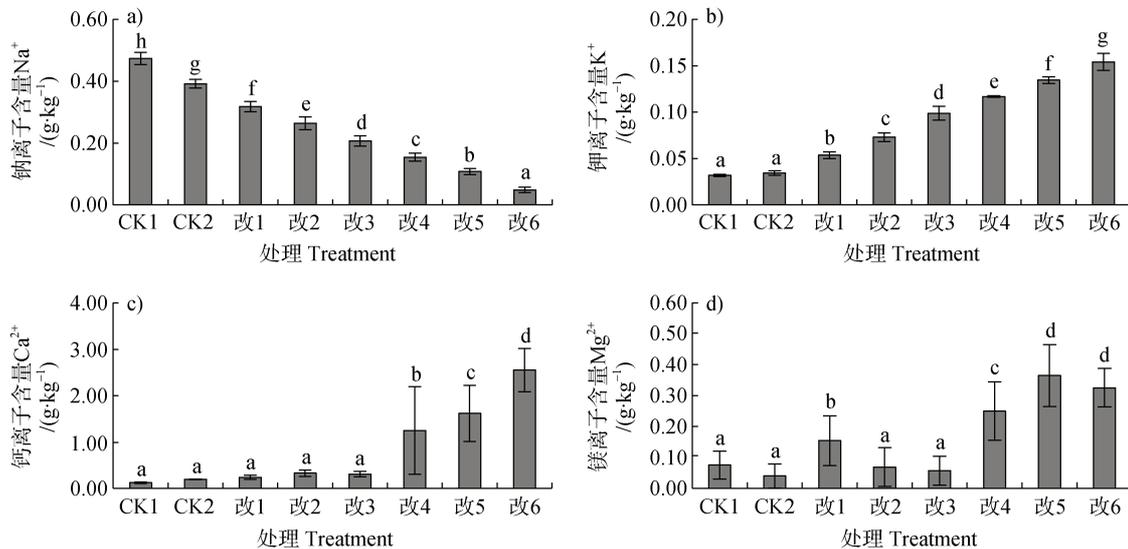


图 2 不同磷石膏处理滨海盐土土壤阳离子变化趋势

Fig. 2 Effects of phosphogypsum on cation ion in coastal saline soil

2.2.2 不同磷石膏处理对土壤水溶性阴离子 (CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}) 的影响 试验田滨海盐土中未检测出可溶性碳酸根离子，说明试验地土壤中可溶性碳酸根离子的含量很少。但是检测出重碳酸根离子，揭示了为何该试验田块土壤 $\text{pH}>7$ 的原因。

土壤中碳酸氢根过高容易表现出碱害，不利于植物生长。滨海盐土施入磷石膏后碳酸氢根离子含量与不施磷石膏处理之间有显著差异 ($P<0.05$)，但不同用量改良剂之间差异大小不一，改1、改2、改3之间的差异不显著，改5、改6之间的差异也不显著，其余差异显著。从图 3a 可以看出，碳酸氢根离子含量以CK1最高，施入复合肥和磷石膏改良剂后，土壤中的碳酸氢根离子是有所下降的，与CK1相比，各处理下降幅度分别为 15.81%、21.97%、24.02%、23.61%、35.93%、42.51%、43.53%，下降幅度大小排列为改6 > 改5 > 改4 > 改2 > 改3 > 改1 > CK2，下降幅度最大的为改6，最小的为CK2。施入磷石膏之后，土壤中的碳酸氢根离子含量有显著

降低趋势，可能是由于磷石膏中的酸与重碳酸根发生中和反应所致。土壤中的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 含量的多少是决定盐碱地土壤 pH 高低及理化性状好坏的重要因素，本试验表明，施用磷石膏能降低土壤中碳酸氢根离子的含量，从而达到改良盐碱地理化性状的目的。

土壤中 Cl^- 含量表现为磷石膏处理普遍低于CK1和CK2(改1除外)，其中最低值为改3，为 $0.030 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高值为改1，为 $0.085 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3b)，总体呈下降趋势。

随着磷石膏施用量增加，土壤中硫酸根离子含量大幅增长。各处理土壤中硫酸根离子含量分别为 0.016 、 0.047 、 0.065 、 0.083 、 0.129 、 0.209 、 0.258 、 $0.263 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施用磷石膏处理中硫酸根离子含量普遍显著高于CK1和CK2 ($P<0.05$)，与CK1相比，各处理增加幅度分别为 206%、319%、434%、728%、1 249%、1 563%、1 597%，改5与改6之间差异不显著，其余处理之间差异显著(图 3c)。施用磷石膏改良剂处理的硫酸根离子含

量均大于 CK2,且改 4、改 5、改 6 远远大于 CK2,土壤中硫酸根离子含量与磷石膏的施用量呈正相关,这是因为磷石膏本身就含有大量的硫酸根离

子,施入土壤会迅速增加土壤中的硫酸根离子。硫是植物生长必需营养元素,所以硫酸根离子增加不影响植物的生长。

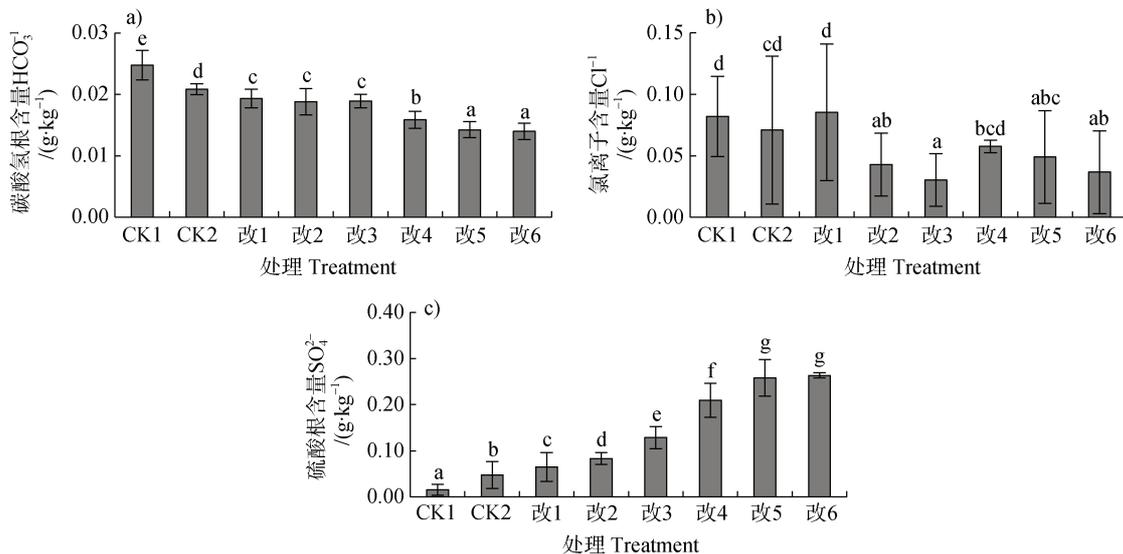


图 3 不同磷石膏处理滨海盐土土壤阴离子变化趋势

Fig. 3 Effects of phosphogypsum on anion ion in coastal saline soil

2.3 施用磷石膏改良剂对土壤有机质的影响

施用磷石膏后影响土壤有机质,试验结束后表层土壤有机质含量依次为 4.40、5.61、6.71、5.87、6.27、5.98、5.95、5.36 g·kg⁻¹。施磷石膏改良剂的处理有机质较 CK2 分别增加 19.50%、4.51%、11.59%、6.58%、5.93%、-4.54%,增加幅度最大的为改 3,改 6 的有机质含量较 CK2 下降了 4.54%。CK2 的有机质含量较 CK1 增加 27.57%,说明施用磷石膏改良剂能显著提高土壤的有机质(图 4)。各处理有机质含量较不施肥、未施用磷石膏的对照 CK1 均有显著增加($P<0.05$),这可能是施用复合肥和磷石膏的田块小麦生长好于对照 CK1 和 CK2,小

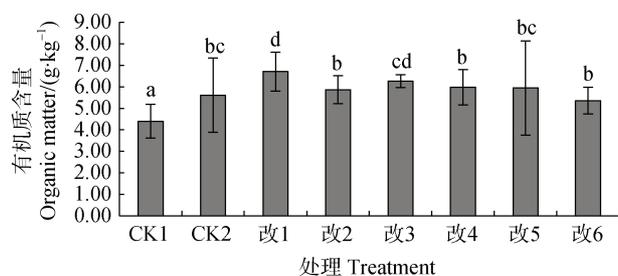


图 4 不同磷石膏处理对滨海盐土有机质的影响

Fig. 4 Effects of phosphogypsum on soil organic matter in coastal saline soil

麦在生长过程中向土壤中分泌了较多的根系分泌物,这些分泌物大多为有机物。

2.4 施用磷石膏改良剂对小麦叶片养分含量的影响

2.4.1 不同处理对小麦叶片全氮的影响 施用磷石膏处理的小麦叶片全氮含量较不施磷石膏处理即 CK2 显著增加 ($P<0.05$),增加幅度分别为 11.71%、7.85%、13.29%、26.21%、24.21%、15.56%,增加幅度最大的为改 4,最小的为改 2。所有处理的小麦叶片氮素含量均显著高于不施肥、不施用磷石膏的对照 CK1。从图 5a 可以看出,各处理的全氮含量总体上是先升高再降低的趋势,改 4 的全氮含量最高,改 5、改 6 较改 4 低,且越来越低,但差异不显著。结果表明,施用磷石膏能促进小麦吸收氮素,但不是越多越好,过量施用磷石膏反而下降,本试验中对于增加小麦全氮最理想的效果是改 4 处理。CK2 与 CK1 相比全氮含量增加了 34.22%。究其原因,这可能是由于磷石膏的施用,导致土壤中的磷素增加,作物吸收较多的磷,根据李比西养分定律,小麦吸收养分有一定比例关系,土壤施用磷石膏后,随着小麦吸收磷素增加,相应的促进小麦吸收氮素增加。

2.4.2 不同处理对小麦叶片全磷的影响 施用磷石膏处理的小麦叶片全磷含量显著高于 CK2 (改 1

除外)($P < 0.05$), 且增减幅度分别为-21.39%、6.92%、35.35%、35.97%、17.65%、5.02%, 增加幅度最大的是改 4。所有处理小麦叶片磷素均显著高于不施肥、不施用磷石膏的对照 CK1。从图 5b 可以看出, 施用磷石膏处理全磷含量表现出先升高再降低的趋势, 全磷含量在改 4 处理的时候表现为最大, 随后下降, 说明磷石膏改良滨海盐土不是越多越好, 本试验中改 4 增加小麦全磷量最高, 这与全氮含量是一致的。此外。CK2 较 CK1 的全磷含量提高了 64.06%, 说明磷石膏改良剂能显著提高小麦叶片中的全磷含量, 为小麦的生长提供必要的养分。

2.4.3 不同处理对小麦叶片全钾的影响 在 8 个处理中, 施用磷石膏处理的小麦叶片全钾含量均

显著高于未施磷石膏处理即 CK1 和 CK2 ($P < 0.05$)。改 1、改 2、改 3、改 4、改 5、改 6 与 CK1 相比, 全钾增加幅度分别为 23.60%、131.31%、186.25%、88.01%、96.34%、84.66%, 增加幅度最高的为改 3, 最小的为改 1, CK2 的全钾较 CK1 增加了 37.28% (图 5c)。随着磷石膏的施用量增加, 小麦叶片中全钾基本表现出先升高再降低的趋势, 其中改 3 的全钾含量最大, 较 CK1 增加了 186.25%。结果表明, 施用磷石膏能有效促进小麦对土壤中钾的吸收, 但过量施用磷石膏反而下降, 增加最多的处理是改 3, 与全氮、全磷的结果不一致。施用磷石膏改良剂能增加小麦叶片中全钾含量, 促进小麦的生长。

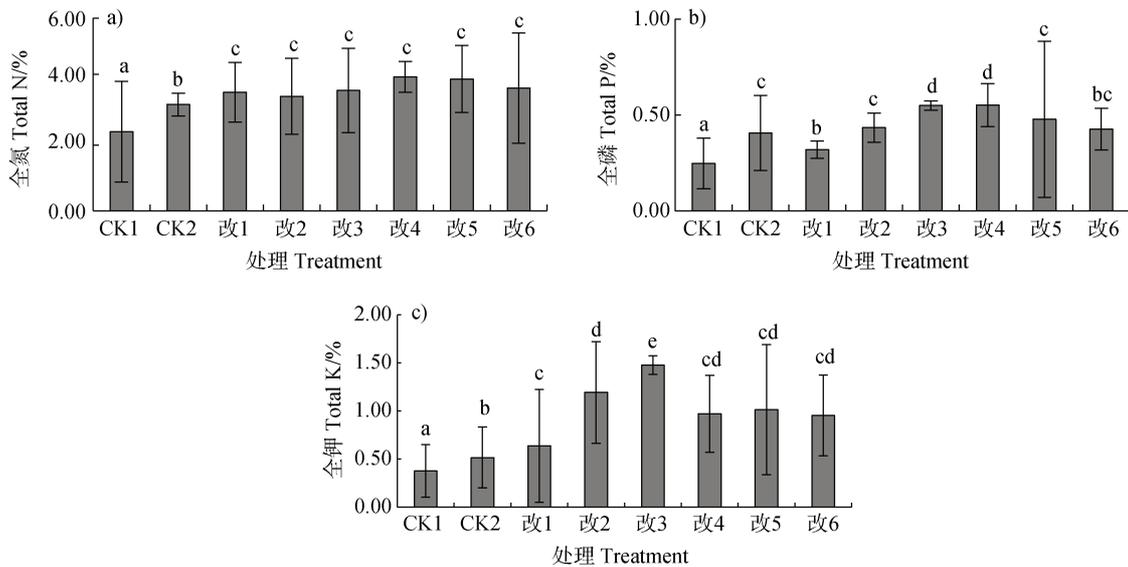


图 5 不同磷石膏处理小麦叶片养分含量的变化

Fig. 5 Effects of phosphogypsum on leaf nutrient elements of winter wheat

2.5 施用磷石膏改良剂对小麦生长的影响

2.5.1 磷石膏对小麦株高的影响 在 8 个处理中, 施用磷石膏处理的小麦株高均显著高于不施肥不施用磷石膏对照 CK1 ($P < 0.05$), 也均高于不施肥但是施用磷石膏对照 CK2 (改 1 除外), 增减幅度分别为-0.39%、13.74%、17.22%、15.36%、19.04%、14.82%, 增加幅度最大的是改 5, 改 6 与改 5 相比有所下降, CK2 较 CK1 增加 61.11% (图 6)。且与 CK2 差异显著, 但改 2、改 3、改 4、改 5、改 6 之间的差异不显著。说明施用磷石膏改良剂能有效促进小麦生长, 增加小麦的株高, 但是过量施用磷石膏不再提高小麦株高, 本试验中改 5 小麦株高最高。

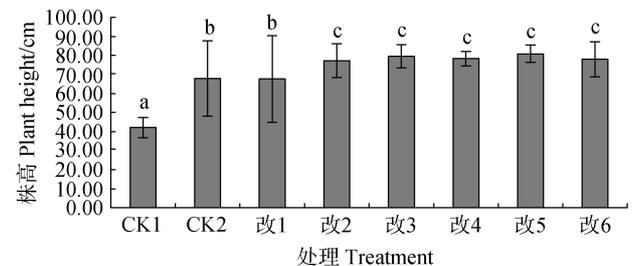


图 6 不同磷石膏处理对小麦株高的影响

Fig. 6 Effects of phosphogypsum on the height of winter wheat

2.5.2 磷石膏对小麦千粒重和产量的影响 磷石膏改良剂能增加小麦千粒重, 施用磷石膏处理小麦千粒重均高于不施用磷石膏的对照 CK2, 增加幅度

分别为 3.21%、10.60%、19.36%、11.87%、12.16%、11.87%，增加最高的是改 3 处理，CK2 较 CK1 增加 8.32%。方差分析显示，跟对照 CK2 相比，处理之间的千粒重差异不明显 ($P>0.05$)，原因有可能是用

磷石膏改良只经过一个生长季，在作物身上表现得不明显 (图 7a)。各处理千粒重表现出先升高再降低的趋势，改 3 的千粒重是最高的，但从图上看差异不是很大。

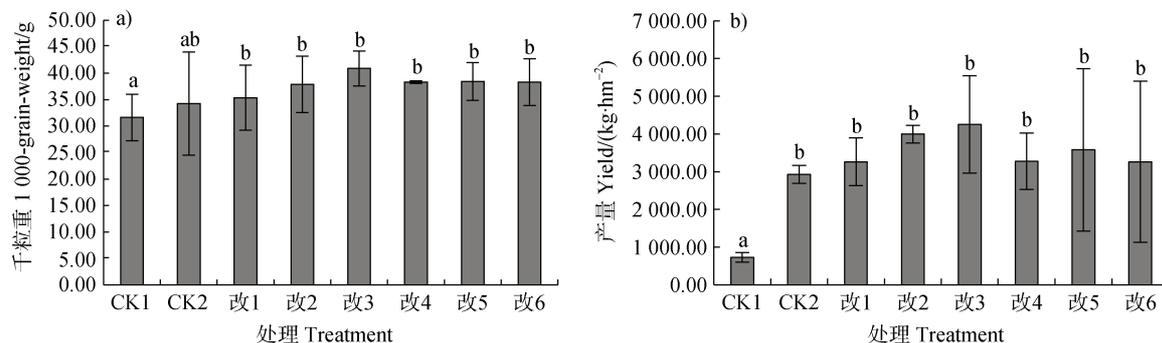


图 7 磷石膏对小麦千粒重和产量的影响

Fig. 7 Effects of phosphogypsum on 1000-grain-weight and harvested yield of winter wheat

磷石膏能提高小麦产量。施用复合肥和磷石膏的处理实际产量均显著高于不施用磷石膏的 CK2，增加幅度分别为 11.41%、36.63%、45.26%、11.91%、22.33%、11.45%，方差分析组间差异显著 ($P<0.05$)，增加最多的为改 3，最少的为改 1，CK2 较 CK1 增加 300.89%，差异显著 (图 7b)。施用磷石膏后，小麦产量表现出先升高后降低的趋势，过量施用磷石膏反而引起小麦减产，其中改 3 处理的小麦产量是最高的。表明施用磷石膏改良剂能显著增加小麦的产量，但随着磷石膏的施用量增加，产量有下降趋势，改 3 处理小麦产量最高。这与千粒重是一致的。

3 讨论

大多植物适合生长在低钠的中性环境中，盐碱土由于土壤含有很多钠离子和较高的 pH，影响植物根部细胞的渗透压和通透性，从而影响植物对水分和养分的吸收和运输，影响植物生长。我国耕地紧张，人口众多，保障粮食安全首先要保障耕地数量和质量安全。目前我国有大量盐碱地和滨海盐土尚未完全开发利用，因此改良滨海盐土、盐碱土对于保障我国粮食安全意义重大。

世界范围内，改良盐土、碱土的方法有很多。采用磷石膏改良盐碱土有较好的环境经济和生态效益。全世界每年大约生产 1.7 亿吨磷石膏，只有不到 20% 用于改良盐碱土^[31]。磷石膏含有多种矿物质，

能够供给作物生长需要。由于湿法生产磷酸时废弃物磷石膏中含有一定量的磷酸或者硫酸，因此磷石膏能够中和碱性土壤，降低土壤 pH。

本试验结果显示，施用磷石膏能有效降低滨海盐土 pH。石懿等^[32]的研究也表明施用脱硫石膏后土壤表层的 pH 较对照均有明显的降低，且不同处理之间试验效果差异较大。说明磷石膏可以用来改良盐碱化的滨海盐土，这与陈小青等^[29]早期室内盆栽试验结果一致。

滨海盐土施用磷石膏还能增加土壤有机质。磷石膏能将有害盐分如钠离子从土壤胶体中交换下来，随灌溉或者降水淋洗出去。随着磷石膏的施用量的增加，土壤中对植物有害的钠离子越来越少，对植物有益的钾离子和钙离子越来越多。钾离子和钙离子是植物生长必需营养元素，能促进作物生长，增加植物生物量和产量，导致植物根系向周围土壤中分泌更多根系分泌物；而植物根系分泌物含有很多有机成分，因此导致磷石膏处理后盐土中有机质含量提高，从而改善土壤的团粒结构，增强植物的缓冲性能。在滨海盐碱土中施用磷石膏，土壤中碳酸氢根离子逐渐降低，硫酸根离子逐渐升高，硫酸根酸性与碳酸氢根碱性中和，并且发生置换反应，生成二氧化碳，也是导致滨海盐碱土 pH 下降的一个原因。同时由于硫元素也是植物生长必需营养元素，因此磷石膏中硫酸根进入土壤后，能够满足植物生长需要。虽然施用磷石膏后土壤总盐有所升高，

但主要是对作物无害的硫酸盐，这与本研究团队陈小青等^[29]早期室内试验结果及王凯等^[32]的研究类似；也与有关盐碱地配合施用石灰、磷石膏、有机肥等能够降低土壤盐分、碱化度，增加土壤肥力和有机质的报道一致^[33-35]。

由于磷石膏改良了滨海盐土，改善了土壤理化性状，提高了土壤肥力，从而促进作物的生长。本试验表明，磷石膏处理均能不同程度地提高小麦叶片中的养分含量，但是磷石膏用量也不是越多越好。磷石膏施入土壤后，提高了土壤中的养分含量，使得植株从土壤中能吸收到更多的养分，促进小麦的生长。这与二水硫酸钙的应用不仅提高了免耕系统小麦的产量，也提高了小麦叶片中钙和硫等养分含量的报道一致^[36]。并进而提高小麦的株高、千粒重和产量。

但是近年来也有研究发现磷石膏中还含有少量有害物质，比如放射性元素铀、镭、铅、铜等，可能会影响土壤肥力和旱地微生物转化^[37]，影响老成土中氧化铁的形态和转化^[38]，同时磷石膏中有害重金属镭、铅可能带来潜在的环境风险，应该在磷石膏改良滨海盐土、碱化土时综合考虑可能的环境风险。

4 结 论

滨海盐土田间试验施用磷石膏可以降低表层土壤 pH 和碳酸根浓度，综合考虑，以处理为 30% 复合肥 1 050 kg·hm⁻² + 磷石膏 1 125 kg·hm⁻² 和 30% 复合肥 1 050 kg·hm⁻² + 磷石膏 2 250 kg·hm⁻² 两个处理效果最好。降低土壤胶体钠离子，减少土壤中碳酸氢根含量，增加土壤有机质和钙离子、硫元素等含量，促进小麦生长，提高小麦产量。

参考文献 (References)

[1] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Prevent soil salinization and improve soil productivity[J]. *Science*, 2021, 73 (6): 30-34. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. *科学*, 2021, 73 (6): 30—34.]

[2] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10—27. [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 (1): 10—27.]

[3] Ma Z L, Dai Y X, Cai H H, et al. Present situation and improvement measures of saline-alkali land in Jiangsu coastal area[J]. *Modern Horticulture*, 2015 (14): 189—190. [马赞留, 戴云新, 蔡红海, 等. 江苏滨海地区盐碱地现状及改良措施[J]. *现代园艺*, 2015 (14): 189—190.]

[4] Liu Z P, Shen Q R, Sun H S, et al. Results of reclamation of marine highly-saline soils under different amelioration ways[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1992, 15 (3): 57—62. [刘兆普, 沈其荣, 孙怀顺, 等. 蓄淡养鱼改良江苏滨海强度盐渍化土壤的探讨[J]. *南京农业大学学报*, 1992, 15 (3): 57—62.]

[5] Gao S, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of soil amelioration measures mitigating soil salinity and improving crop P uptake in coastal area of North Jiangsu[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1219—1229. [高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1219—1229.]

[6] Wu L P, Zheng H N, Wang X J. Effects of soil amendments on fractions and stability of soil organic matter in saline-alkaline paddy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 112993.

[7] Abd Elrahman S H, Mostafa M A M, Taha T A, et al. Effect of different amendments on soil chemical characteristics, grain yield and elemental content of wheat plants grown on salt-affected soil irrigated with low quality water[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2012, 57 (2): 175—182.

[8] Cui Y T. Effect of straw biochar on phosphorus composition and improvement effect of soda saline-alkali soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. [崔雨桐. 秸秆生物炭对苏打盐碱土磷素组分及改良效果影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.]

[9] Lashari M S, Liu Y M, Li L Q, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 113—118.

[10] Zhang Y Z. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on improving saline-alkali soil in Tumochuan Plain[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. [张雅贞. 有机无机肥配施对土默川平原盐碱土改良效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.]

[11] Ma L, Liu J H, Yang J M, et al. Effect of compound modifier on the improvement effect of soda saline-alkali soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021 (5): 144—149. [马列, 刘金华, 杨靖民, 等. 新型复合改良剂对苏打盐碱土的改良效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (5): 144—149.]

[12] Upadhyay S K, Chauhan P K. Optimization of

- eco-friendly amendments as sustainable asset for salt-tolerant plant growth-promoting bacteria mediated maize (*Zea Mays* L.) plant growth, Na uptake reduction and saline soil restoration[J]. *Environmental Research*, 2022, 211: 113081.
- [13] Tang X, Shang H, Liu G M, et al. Effects of combined amendment on improvement of salinized soil and plant growth[J]. *Soils*, 2021, 53 (5): 1033—1039. [唐雪, 尚辉, 刘广明, 等. 复合改良剂对盐碱土改良及植物生长的影响[J]. *土壤*, 2021, 53 (5): 1033—1039.]
- [14] Rady M M. A novel *organo-mineral fertilizer* can mitigate salinity stress effects for tomato production on reclaimed saline soil[J]. *South African Journal of Botany*, 2012, 81: 8—14.
- [15] Mao S, Gao J H, Zhang X H. An experimental study on the improvement effect of combined additive on soda saline-alkali soil in western Jilin Province[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022 (1): 85—90. [毛硕, 高金花, 章晓晖. 组合添加物对吉林西部苏打盐碱土改良效果的试验研究[J]. *节水灌溉*, 2022 (1): 85—90.]
- [16] Liu G H, Mai W X, Tian C Y. Effect of organic fertilizer on saline-sodic soil amelioration: Meta-analysis[J], *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40 (1): 86—96. [刘国辉, 买文选, 田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果: Meta 分析[J], *农业资源与环境学报*, 2023, 40 (1): 86—96.]
- [17] Wang T. Development and application of microbial inoculum for soda saline-alkali soil[D]. Anshan, Liaoning: University of Science and Technology Liaoning, 2021. [王铁. 苏打盐碱地用微生物菌剂研制及应用[D]. 辽宁鞍山: 辽宁科技大学, 2021.]
- [18] Chen L N. Study on the role and mechanism of halophilic/halotolerant microorganisms in the improvement of soda saline-alkali soil[D]. Changchun: Jilin University, 2020. [陈丽娜. 嗜盐/耐盐微生物在苏打盐碱土改良中的作用及机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.]
- [19] Pang N, Zhang X, Liu J Q, et al. Application of compound microbial agent in soda-type saline-sodic soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2024, 46 (2): 290—296. [庞宁, 张雪, 刘俊清, 等. 复合微生物菌剂在苏打盐碱土改良中的应用[J]. *吉林农业大学学报*, 2024, 46 (2): 290—296.]
- [20] Li X H. Study on salt control and formula fertilization in soda saline-alkali land[D]. Anshan, Liaoning: University of Science and Technology Liaoning, 2021. [李晓涵. 苏打盐碱地控盐及配方施肥研究[D]. 辽宁鞍山: 辽宁科技大学, 2021.]
- [21] Chen M M, Zhang S R, Liu L, et al. Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure, P availability and root growth in saline-alkaline soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 212: 105060.
- [22] Tang X Q. Effects of combined application of wood vinegar and cow dung on chemical properties and microbial community structure of saline-alkali soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. [唐晓倩. 木醋液和牛粪配施对盐碱土化学性质和微生物群落结构的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.]
- [23] Zhou W Z. Study on improvement of coastal saline-alkali soil by wood vinegar, fly ash and garden waste compost[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. [周文志. 木醋液、粉煤灰和园林废弃物堆肥对滨海盐碱土的改良研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.]
- [24] Dai J J, Fang Q N, Wang D N, et al. Effects of furfural residue and gypsum on saline alkaline soil improvement and rice growth[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52 (1): 37—44. [戴建军, 房秋娜, 汪丹妮, 等. 糠醛渣和石膏对盐碱土改良效果及水稻生长的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52 (1): 37—44.]
- [25] Medina Litardo R C, García Bendezú S J, Carrillo Zenteno M D, et al. Effect of mineral and organic amendments on rice growth and yield in saline soils[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2022, 21 (1): 29—37.
- [26] El-Katony T M, Ward F M, Ali Deyab M, et al. Algal amendment improved yield and grain quality of rice with alleviation of the impacts of salt stress and water stress[J]. *Heliyon*, 2021, 7 (9): e07911.
- [27] Kong C, Camps-Arbestain M, Clothier B, et al. Reclamation of salt-affected soils using pumice and algal amendments: Impact on soil salinity and the growth of lucerne[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 24: 101867.
- [28] Ebrahim Yahya K, Jia Z H, Luo W, et al. Enhancing salt leaching efficiency of saline-sodic coastal soil by rice straw and gypsum amendments in Jiangsu coastal area[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2022, 13(5): 101721.
- [29] Chen X Q, Wu H S, Zhou X D, et al. Effect of phosphogypsum amendment on physical and chemical properties of costal saline soil in Rudong Jiangsu and winter wheat growth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1261—1265. [陈小青, 吴洪生, 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): 1261—1265.]
- [30] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [31] Trifi H, Ben Salem I, Kolsi Benzina N, et al. Effectiveness of plant growth-promoting rhizobacterium *Pantoea* sp. BRM17 in enhancing canola growth on phosphogypsum-amended soil[J]. *Pedosphere*, 2020, 30 (4): 570—576.

- [32] Wang K, Qin Y F, Hong L Z, et al. Effects of phosphogypsum on physic-chemical properties of coastal salt soil and its mechanism, *Jiangsu Agricultural Science*, 1996 (6): 37—39 [王凯, 秦毓芬, 洪立洲, 等. 磷石膏对改善滨海盐土理化性状的作用及其机理 [J]. *江苏农业科学*, 1996 (6): 37—39.]
- [33] Shi Y, Yang P L, Zhang J G, et al. The mechanism on sodic soils throwed desulfurized gypsum was analyzed from SAR and pH[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24 (4): 5—10.[石懿, 杨培岭, 张建国, 等. 利用 SAR 和 pH 分析脱硫石膏改良碱(化)土壤的机理 [J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24 (4): 5—10.]
- [34] Carmeis Filho A C A, Penn C J, Crusciol C A C, et al. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 241: 11—23.
- [35] Huang L H, Liu Y, Ferreira J F S, et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals of saline-sodic paddy fields in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105222.
- [36] Caires E F, Feldhaus I C, Barth G, et al. Lime and gypsum application on the wheat crop[J]. *Scientia Agricola*, 2002, 59 (2): 357—364.
- [37] Sengupta I, Dhal P K. Impact of elevated phosphogypsum on soil fertility and its aerobic biotransformation through indigenous microorganisms (IMO's) based technology[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113195.
- [38] Firmano R F, Alleoni L R F. Properties of Fe-oxides and Fe fractionation in an Oxisol amended over long term with lime and phosphogypsum[J]. *Applied Geochemistry*, 2021, 135: 105116.

(责任编辑：檀满枝)