



姜雪,郭丽琢,牛济军,等.不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应[J].江西农业大学学报,2024,46(4):1086-1098.

JIANG X, GUO L Z, NIU J J, et al. Improvement effect of different amendments on soil fertility status of saline alkali soil in Hexi Irrigation Area[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 1086-1098.

不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应

姜雪¹, 郭丽琢^{1,2}, 牛济军³, 高玉红^{1,2*}, 荆斌^{1,2}, 陈震³,
卢培娜², 李晓瑾¹, 马敬¹, 陈文涛¹, 何振邦¹

(1. 甘肃农业大学 农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃亚盛实业(集团)股份有限公司, 甘肃 兰州 730010)

摘要:【目的】旨在进一步提升盐碱地的生产能力, 促进我国农业经济持续发展, 探索不同类型改良剂对盐碱地土壤肥力改良效果。【方法】通过田间单因素随机区组试验, 以不施改良剂为对照(CK), 有机肥(T₁)、粉煤灰(T₂)、生物炭(T₃)、糠醛渣(T₄)、蚯蚓粪(T₅)、腐殖酸(T₆)、克碱王(T₇)、粉煤灰+有机肥(T₈)、粉煤灰+糠醛渣(T₉)、生物炭+糠醛渣(T₁₀)、蚯蚓粪+腐殖酸(T₁₁)研究了11种土壤改良剂对河西走廊盐碱地土壤肥力的改良效果。【结果】不同方案改良剂均能不同程度提高土壤有机质及氮、磷、钾养分含量。与CK相比, 各改良剂处理均显著增加了盐碱地0~30 cm和30~60 cm土层土壤有机质含量, 增幅分别达4.09%~26.44%和14.67%~28.38%, 而生物炭+糠醛渣处理提高幅度最大, 其次为生物炭和有机肥处理; 与CK相比, 有机肥处理显著增加了各土层土壤全氮、速效磷及速效钾含量, 0~30 cm土层分别增加了591.15%、111.91%和242.01%, 30~60 cm土层分别增加了148.16%、154.60%和93.08%。【结论】单施有机肥与生物炭配施糠醛渣均可有效提升盐碱地土壤养分含量, 对该地区综合改良利用盐碱地具有明显优势。

关键词:河西灌区; 盐碱地; 改良剂; 有机质; 氮磷钾养分; 土壤肥力

中图分类号: S156.4 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)04-1086-13



Improvement effect of different amendments on soil fertility status of saline alkali soil in Hexi Irrigation Area

JIANG Xue¹, GUO Lizhuo^{1,2}, NIU Jijun³, GAO Yuhong^{1,2*}, YAN Bin^{1,2}, CHEN Zhen³,
LU Peina², LI Xiaojin¹, MA Jing¹, CHEN Wentao¹, HE Zhenbang¹

(1. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Yasheng Industrial (Group) Co. Ltd., Lanzhou 730010, China)

收稿日期: 2023-12-29 修回日期: 2024-02-08

基金项目: 甘肃省科技重大专项子课题(21ZD4NA023-02)

Project supported by Major Special Project of Gansu Province Science and Technology(21ZD4NA023-02)

作者简介: 姜雪, 硕士生, orcid.org/0009-0008-6295-0147, ALJIANG03@163.com; *通信作者: 高玉红, 教授, 博士生导师, 主要从事作物栽培与生理生态研究, orcid.org/0000-0001-5967-2619, gaoyh@gsau.edu.cn.

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Abstract: [Objective] By exploring the effects of different types of amendments on soil fertility improvement in saline alkali land, this study aims to further enhance the production capacity of saline alkali land and promote the sustainable development of China's agricultural economy. [Method] A single factor randomized block experiment was conducted in the field, with no application of amendments as the control (CK), organic fertilizer (T₁), flyash (T₂), biochar (T₃), furfural residue (T₄), vermicompost (T₅), humic acid (T₆), kejianwang (T₇), flyash+organic fertilizer (T₈), flyash+furfural residue (T₉), biochar+furfural residue (T₁₀), and vermicompost+humic acid (T₁₁) as the amendments. The improvement effects of 11 soil amendments on soil fertility in saline alkali soil of the Hexi Corridor were explored. [Result] Different amendments can improve soil organic matter and nitrogen, phosphorus, and potassium nutrient content to varying degrees. Compared with CK, each amendment treatment significantly increased the soil organic matter content in the 0–30 cm and 30–60 cm soil layers of saline alkali land, with the increases of 4.09%–26.44% and 14.67%–28.38%, respectively. The biochar+furfural residue treatment showed the highest improvement, followed by biochar and organic fertilizer treatment; Compared with CK, organic fertilizer treatment significantly increased the total nitrogen, available phosphorus, and available potassium content in each soil layer, with the increases of 591.15%, 111.91%, and 242.01% in the 0–30 cm soil layer and the increases of 148.16%, 154.60%, and 93.08% in the 30–60 cm, respectively. [Conclusion] Both single application of organic fertilizer and biochar combined with application of furfural residue could effectively improve the nutrient content of saline alkali soil, which has a significant advantage in the comprehensive improvement and utilization of saline alkali land in the region.

Keywords: Hexi Irrigation Area; saline alkali land; improves; organic matter; NPK; nutrient soil fertility

【研究意义】全球盐碱地面积达8.33亿hm²,约占陆地总面积10%^[1]。我国盐碱地面积达1亿hm²,其中约有576.87万hm²盐碱地属于重度盐碱地,主要分布在东北、华北、西北内陆地区和长江以北沿海地带^[2-3]。我国盐碱地土壤面积约占耕地面积的5%^[4],仍约有80%的盐渍土尚未开发利用^[5],严重威胁着我国农业生产和经济的发展。河西走廊位于甘肃省,地处西北内陆,其盐碱荒地以典型盐土、草甸土和草甸盐土为主;灌区次生盐渍化耕地以盐化潮土和盐化耕灌草甸土为主。盐分类型以硫酸盐型为主,以氯化物硫酸盐型为辅,由于气候干燥、降雨量很少、蒸发量很大,从而造成了大面积的土壤盐渍化^[6]。盐碱地因具有较高的pH,土壤胶体含量丰富,导致其盐化的同时伴随着碱化,土壤有机质及养分含量低,微量元素缺乏,作物所需的营养元素因土壤pH较高而形成的沉淀难以被作物吸收利用,从而导致农作物营养缺乏,不利于耕作,阻碍了农业发展^[7]。【前人研究进展】针对盐碱土的改良方法包括客土改良、深松土壤、种植耐盐碱作物、暗管排水技术以及土壤改良剂等^[8]。春、秋季是土壤返盐较重的季节,深耕深翻的时间最好是在这2个季节。但在深翻盐碱地的时候,春宜迟,秋宜早,以保作物全苗^[9]。暗管排水通过建立水利设施,在盐碱地上大量灌溉,以充分溶解土壤盐分表层土壤中的可溶性盐碱经下渗排到深层土壤中或被直接淋洗,由于耗水量严重,不适用于河西地区^[10]。种植耐盐碱作物可以选用抗碱作物种植在盐碱地,如棉花、苜蓿、油菜、高粱、玉米等抗碱品种确保作物增产丰收,但各地区自然条件差异不同,盐碱土类型各异,种植作物前经引种,驯化等措施又有一定不可控因素,耗时较长^[11]。因此,使用土壤改良剂是在现代化工业基础上发展起来的有别于传统土壤改良的新方法^[12]。土壤改良剂又称土壤调理剂,是继增施有机肥、种植绿肥及合理轮作后的一种新型土壤改良方式,具有用量少、效率高和改良作用明显等特点^[13]。常用的盐渍化土壤改良剂分为无机改良剂、有机改良剂和生物改良剂^[14]。盐碱地改良利用的首要任务是提高土壤质量,而土壤养分是土壤质量的决定性因素之一,养分含量及其利用效率低均会导致作物减产^[15]。盐碱化土地一般都具有低温、土瘦和结构差的特点^[16]。在盐碱地中投入人粪尿、绿肥、饼肥、畜禽粪便、秸秆、麦草肥和混合制成的肥料等有机肥,有机肥料经微生物分解会转化形成腐殖质,而分解过程中又会产生大量有机酸,一方面可以中和土壤的碱性,另一方面可以加速分解养分,促进养分的转化^[17]。通过施用有机肥料,可增加土壤中有有机物质含量,由此提高土壤肥力,促进作物生长,抑

制盐类对植物的不良影响,提高作物耐盐力。同时,有机肥料中含有大量有机质,对土壤中的有害阴、阳离子起到缓冲作用。因此,使用有机化肥能够提高土壤缓冲能力,改善土壤物理性状和盐分组成,降低土壤碱性^[18]。研究^[19-20]表明,添加发酵羊粪、污泥和椰壳生物炭、复合改良剂等均可以提高土壤氮、磷、钾及有机质含量。施用腐殖酸可以使盐碱地土壤有机质、全氮含量显著提高^[21]。而增施有机肥、生物炭等不但增加了土壤养分含量,还可以抑制土壤中盐分积累^[22-23]。且不同改良剂的改良效果受生态区域及土壤质地的影响。

【本研究切入点】关于盐渍化土壤改良剂的研究较多,但多为基于单一改良剂的研究。盐渍化土壤改良以及区域生态修复是一个复杂的系统工程,需要通过采用多种措施共同发挥作用。因此,进一步挖掘适宜河西灌区盐碱地改良利用的土壤改良剂,对该地区农业可持续发展具有重要意义。【拟解决的关键问题】本研究针对河西灌区盐碱地土壤贫瘠,制约农业生产的问题,通过田间试验,研究不同改良剂对该区域盐碱地各土层土壤养分含量的影响,为进一步改善盐碱地土壤肥力状况,提升盐碱地生产能力提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试区概况

试验于2022年4—9月在甘肃省酒泉市生地湾亚盛公司农场进行。试验地处河西走廊中段北部边缘(39°47'N,97°58'E),海拔1 229 m。该区域属于典型的温带大陆性气候,冬季寒冷,夏季炎热干燥,昼夜温差大。年平均气温8.3℃,最高气温40.5℃,最低气温-29.6℃,年平均日照时数3 321 h,年平均蒸发量2 141.4 mm,年平均降雨量60.3 mm。供试地块为撂荒盐碱地,土壤类型为沙壤盐渍土。基本理化性质见表1。

表1 供试土壤基本理化性状

Tab.1 Basic physical and chemical properties of the soil used

项目 Item	值 Value	项目 Item	值 Value
pH	8.12	CO ₃ ²⁻ /(g·kg ⁻¹)	0
有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	9.05	HCO ₃ ⁻ /(g·kg ⁻¹)	0.33
全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	0.12	Cl ⁻ /(g·kg ⁻¹)	0.93
全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	0.20	SO ₄ ²⁻ /(g·kg ⁻¹)	8.45
全钾/(g·kg ⁻¹) Total potassium	0.09	K ⁺ /(g·kg ⁻¹)	0.21
速效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	1.08	Na ⁺ /(g·kg ⁻¹)	0.62
速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium	338.66	Ca ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	2.75
		Mg ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	0.33

1.2 试验设计

1.2.1 试验材料

本试验供试改良剂均为商品性改良产品,其来源和成分见表2。

1.2.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,以不同种类土壤改良剂为试验因素,以不施改良剂为对照(CK),设置11种改良剂,分别为有机肥(T₁)、粉煤灰(T₂)、生物炭(T₃)、糠醛渣(T₄)、蚯蚓粪(T₅)、腐殖酸(T₆)、克碱王(T₇)、粉煤灰+有机肥(T₈)、粉煤灰+糠醛渣(T₉)、生物炭+糠醛渣(T₁₀)、蚯蚓粪+腐殖酸(T₁₁),共12个处理,每个处理重复3次。改良剂用量参考相关文献及根据厂家推荐用量综合调整。

不同种类改良剂用量详见表3。所有处理均施氮肥112.5 kg/hm²(N)、磷肥75 kg/hm²(P₂O₅)、钾肥112.5 kg/hm²(K₂O)。氮肥、磷肥和钾肥的种类分别为尿素(N≥46%)、过磷酸钙(P₂O₅≥16%)和硫酸钾(K₂O≥45%),所有肥料均作为基肥与改良剂一次性施入各试验小区,然后进行翻耕,翻耕深度30~50 cm,每隔7灌水(喷灌)1次。各试验小区面积3 m×5 m=15 m²;小区间隔40 cm,区组间隔50 cm。

表2 改良剂的来源和成分
Tab.2 Sources and composition of amendments

改良剂类型 Type of amendment	主要成分 Main composition	来源 Source
有机肥 Organic fertilizer	有机质 $\geq 45\%$,总养分(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O) $\geq 5\%$	甘肃明德伟业生物科技有限公司
粉煤灰 Flyash	SiO ₂ (1.83%),Al ₂ O ₃ (1.08%),Fe ₂ O ₃ (1.25%),CaO(1.69%), MgO(1.24%),SO ₃ (1.76%),Na ₂ O(1.18%),K ₂ O(1.58%), 烧失量(1.91%)	酒泉康多生态农业科技发展有限公司
生物炭(玉米秸秆) Biochar(corn straw)	碘吸附值为900~1 500 mg·g ⁻¹ ,酸溶物含量(0.8%),氯化 物含量(0.1%),铁含量(0.02%),pH(8~10)	河南妙蓝环保科技有限公司
糠醛渣 Furfural residue	腐植酸含量11.63%,木质素含量37.88%,纤维素含量 35.84%,多缩戊糖含量2.05%,磷(P ₂ O ₅)含量0.36%,钾含 量1.18%,氮含量0.61%,醋酸含量3.34%,游离酸(SO ₄ ²⁻) 1.27%,pH为2.1	山东莘县鑫辉煌饲料有限公司
蚯蚓粪 Vermicompost	总养分 $\geq 6\%$,有机质 $\geq 60\%$,酸碱度-7	广正丰蚯蚓粪原肥
腐殖酸 Humic acid	黄腐酸 $\geq 15\%$,Ca+Mg+S $\geq 10\%$	山东泉林嘉有现代农业股份有限公司
克碱王 Ke Jian Wang	有机络合酸45%,无机酸3%,渗透剂3%,展着剂3%	新疆博乐市丰达盐碱地改良研究所

表3 改良剂的用量
Tab.3 The application amounts of soil amendments

处理 Treatments	改良剂类型 Types of soil amendments	施用量/(kg·hm ⁻²) Application rates
CK	不施改良剂	0
T ₁	有机肥	30 000
T ₂	粉煤灰	30 000
T ₃	生物炭	30 000
T ₄	糠醛渣	30 000
T ₅	蚯蚓粪	3 750
T ₆	腐殖酸	1 500
T ₇	克碱王	334
T ₈	粉煤灰+有机肥	15 000+15 000
T ₉	粉煤灰+糠醛渣	15 000+15 000
T ₁₀	生物炭+糠醛渣	15 000+15 000
T ₁₁	蚯蚓粪+腐殖酸	1 875+750

1.3 测定项目与方法

参照其他试验地燕麦播种和收获期,于2022年5月4日和8月16日,利用土钻在各小区进行“S形取样法”采集土壤0~30 cm、30~60 cm土层的土壤样品,各小区样品混匀过2 mm筛,然后风干备用。土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法;土壤全氮的测定采用开氏法;土壤全磷的测定采用NaOH熔融法;土壤速效磷的测定采用钼锑抗比色法;土壤全钾的测定采用NaOH熔融法;土壤速效钾的测定采用HNO₃溶液浸提-火焰光度法,测试方法均按照《土壤农化分析》^[24]进行测定。

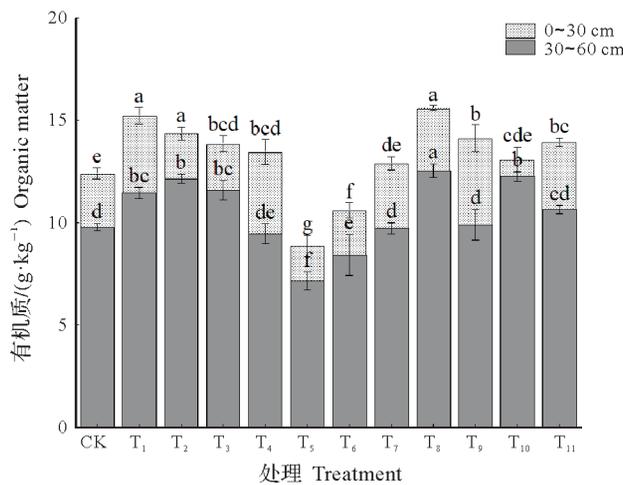
1.4 数据统计与分析

采用Excel 2010软件进行数据统计;运用SPSS 27软件进行单因素方差分析,差异水平确定在 $P < 0.05$;使用GraphPad Prism 8软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对盐碱地土壤有机质含量的影响

由图1可知,与不施改良剂(CK)比较,除单施T₅、T₆处理外,不同改良剂处理均增加了盐碱地0~30 cm 土层土壤有机质含量,增幅达4.09%~26.44%。各处理土壤有机质含量由大到小依次为粉煤灰+有机肥(T₈)、有机肥(T₁)、粉煤灰(T₂)、粉煤灰+糠醛渣(T₉)、蚯蚓粪+腐殖酸(T₁₁)、生物炭(T₃)、糠醛渣(T₄)、生物炭+糠醛渣(T₁₀)、腐殖酸(T₆)和蚯蚓粪(T₅)。其中,T₈、T₁、T₂、T₉处理分别较CK显著($P<0.05$)增加26.44%、22.69%、15.75%、13.81%。粉煤灰配施有机肥改良效果大于粉煤灰配施糠醛渣。在30~60 cm 土层,各处理土壤有机质含量增幅不一,其中,以T₈处理增加土壤有机质含量最多,T₁、T₂、T₃、T₈、T₁₀处理较CK显著增加14.67%~28.38%。T₉、T₁₁处理分别较CK增加1.27%、8.12%,无显著差异。综合来看,混施处理对盐碱地0~60 cm 土层土壤有机质含量的提升大于单施改良剂处理,单施腐殖酸及蚯蚓粪处理对没有增加盐碱地土壤有机质含量。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

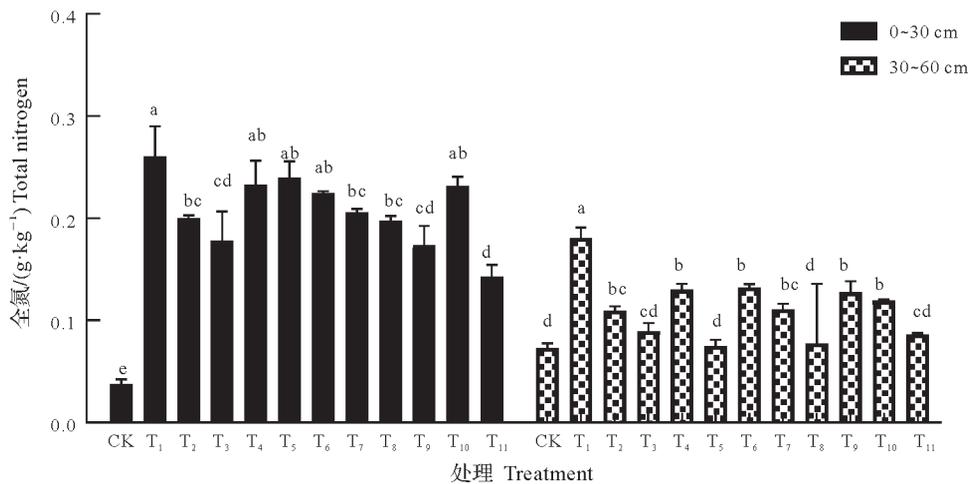
The different lowercase letters indicate significant ($P<0.05$).

图1 不同种类土壤改良剂对盐碱地有机质含量的影响

Fig.1 Effect of improvers on the organic matter content of saline alkaline land

2.2 不同改良剂对盐碱地土壤全氮含量的影响

由图2可知,与不施改良剂(CK)相比较,不同改良剂均显著增加了盐碱地0~60 cm 土层土壤全氮含量。从0~30 cm 土层分析,各改良剂处理土壤全氮含量由大到小依次为有机肥(T₁)、蚯蚓粪(T₅)、糠醛渣



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

The different lowercase letters indicate significant ($P<0.05$).

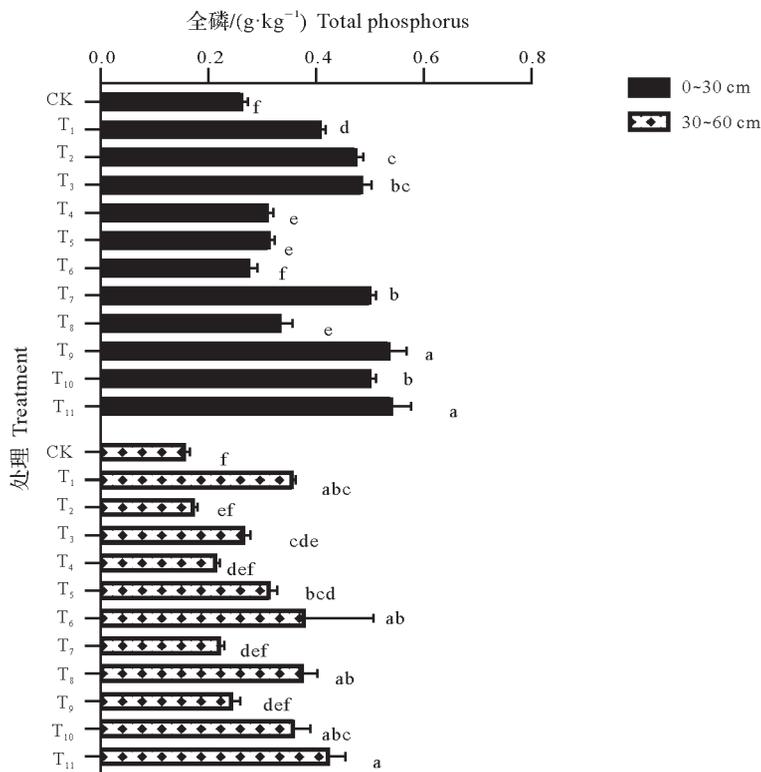
图2 改良剂对盐碱地全氮含量影响

Fig.2 Effect of improvers on total nitrogen content in saline alkali soil

(T₄)、生物炭+糠醛渣(T₁₀)、腐殖酸(T₆)、克碱王(T₇)、粉煤灰(T₂)、粉煤灰+有机肥(T₈)、生物炭(T₃)、粉煤灰+糠醛渣(T₉)和蚯蚓粪+腐殖酸(T₁₁),较CK显著提高277.88%~591.15%。从30~60 cm土层分析结果可以看出,各处理全氮含量存在显著差异,其中T₁处理下最高,较CK处理显著增加148.17%(*P*<0.05),其次为T₄、T₆和T₉处理。T₃、T₅、T₈和T₁₁处理与CK间无显著差异。综合来看,改良剂均可提高0~60 cm土层中全氮含量,其中单施有机肥处理的效果最佳。

2.3 不同改良剂对土壤全磷含量的影响

由图3可知,与不施改良剂(CK)相比较,施用改良剂均增加了盐碱地0~60 cm土层土壤全磷含量。各处理0~30 cm土层土壤全磷含量较CK增加了19.38%~105.40%,除施用腐殖酸(T₆)外,其他处理均显著(*P*<0.05)高于CK。其中,粉煤灰+糠醛渣(T₉)与蚯蚓粪+腐殖酸(T₁₁)处理下分别较CK显著(*P*<0.05)高出105.40%和103.74%;T₉较T₁₁增加1.26%,差异不显著。不同改良剂处理下0~30 cm土层土壤全磷含量由大到小依次为蚯蚓粪+腐殖酸(T₁₁)、粉煤灰+糠醛渣(T₉)、生物炭+糠醛渣(T₁₀)、克碱王(T₇)、生物炭(T₃)、粉煤灰(T₂)、有机肥(T₁)、粉煤灰+有机肥(T₈)、蚯蚓粪(T₅)、糠醛渣(T₄)和腐殖酸(T₆)。不同改良剂均较CK增加了30~60 cm土层土壤全磷含量,增幅为10.17%~169.19%。其中,T₁₁、T₆、T₈、T₁₀和T₁处理分别较CK显著(*P*<0.05)提高了169.19%、140.75%、138.21%、127.59%、126.52%,五种改良剂处理间比较无显著差异。综合来看,T₉、T₁₁处理对0~30 cm土层土壤全磷含量提升效果较好,T₆、T₈、T₁₁处理对30~60 cm土层土壤全磷含量提升效果较好,而且以蚯蚓粪+腐殖酸、粉煤灰/生物炭+糠醛渣提升效果较佳。



不同小写字母表示差异显著(*P*<0.05)。

The different lowercase letters indicate significant (*P*<0.05).

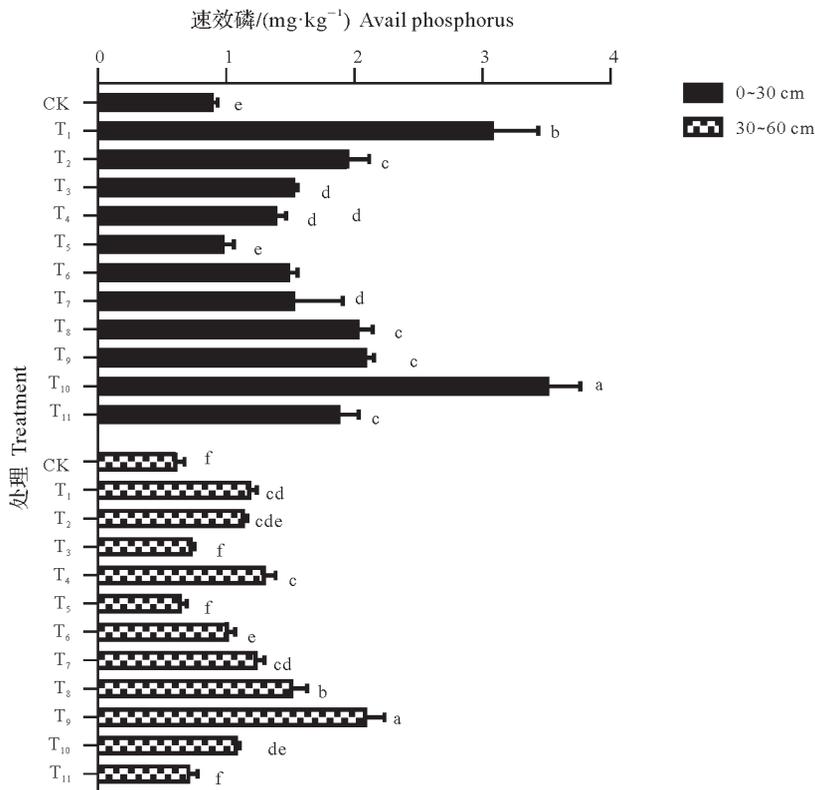
图3 改良剂对盐碱地全磷含量影响

Fig.3 Effect of improvers on total phosphorus content in saline alkali soil

2.4 不同改良剂对土壤速效磷含量的影响

由图4可知,从0~30 cm土层分析,除蚯蚓粪(T₅)外,不同改良剂均较CK显著增加了0~30 cm土层速效磷含量,生物炭+糠醛渣(T₁₀)处理增幅最高,达289.65%,有机肥(T₁)处理次之,增幅为242.01%,T₁₀较T₁显著(*P*<0.05,下同)增加了47.64%。各处理整体由大到小依次为生物炭+糠醛渣(T₁₀)、有机肥(T₁)、粉煤灰+糠醛渣(T₉)、粉煤灰+有机肥(T₈)、粉煤灰(T₂)、蚯蚓粪+腐殖酸(T₁₁)、克碱王(T₇)、生物炭(T₃)、腐殖酸(T₆)、糠醛渣(T₄)和蚯蚓粪(T₅)。从30~60 cm土层来看,粉煤灰+糠醛渣(T₉)、粉煤灰+有机肥(T₈)、糠醛渣(T₄)较

CK 显著增加了 30~60 cm 土层速效磷含量,分别提高 238.84%、146.27%、111.50%;其中, T_9 处理下土层速效磷含量分别较 T_8 、 T_4 显著高出了 92.57%、127.35%, T_8 较 T_4 显著高出 34.78%。综合分析, T_1 、 T_{10} 处理对 0~30 cm 土层土壤速效磷含量提升效果较好, T_8 、 T_9 对 30~60 cm 土层土壤速效磷含量提升效果较好。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

The different lowercase letters indicate significant ($P < 0.05$).

图 4 改良剂对盐碱地速效磷含量影响

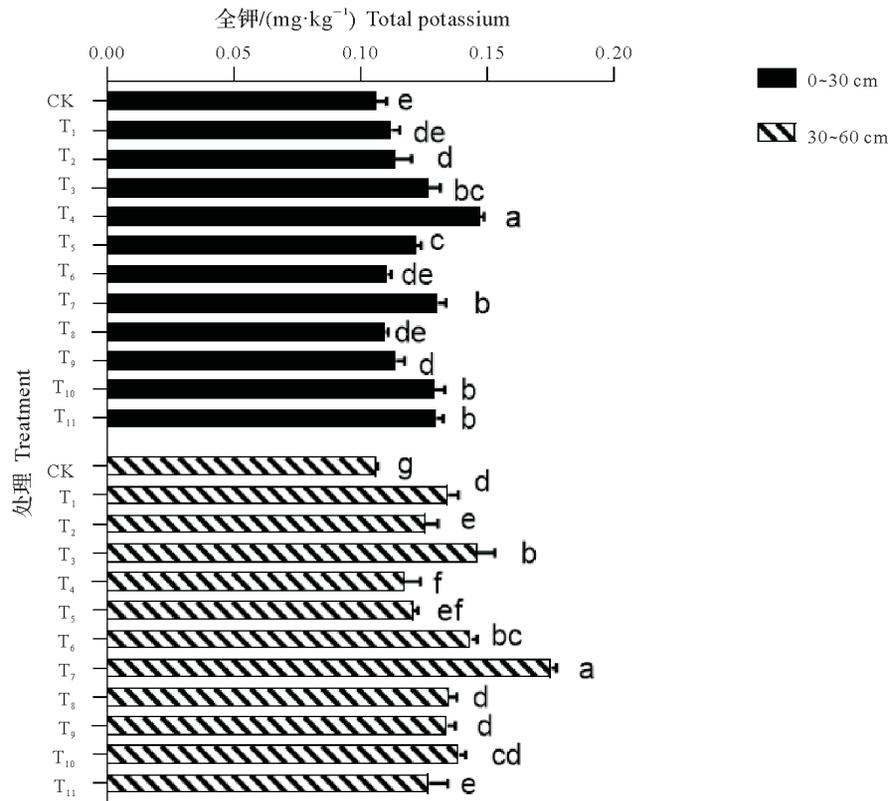
Fig.4 Effect of improvers on the content of available phosphorus in saline alkali soil

2.5 改良剂对土壤全钾含量影响

由图 5 可知,与不施改良剂(CK)相比较,不同改良剂均增加了盐碱地 0~60 cm 土层土壤全钾含量。从 0~30 cm 土层分析,各改良处理全钾含量由大到小依次为糠醛渣(T_4)、克碱王(T_7)、蚯蚓粪+腐殖酸(T_{11})、生物炭+糠醛渣(T_{10})、生物炭(T_3)、蚯蚓粪(T_5)、粉煤灰+糠醛渣(T_9)、粉煤灰(T_2)、有机肥(T_1)、腐殖酸(T_6)和粉煤灰+有机肥(T_8),糠醛渣(T_4)处理土壤全钾含量较不施改良剂(CK)显著增加了 38.56% ($P < 0.05$, 下同); T_7 较 CK 显著增加了 22.8%; T_4 较 T_7 显著提高 15.67%。从 30~60 cm 土层分析,各处理土壤全钾含量较 CK 显著 ($P < 0.05$) 增加,增幅为 10.34%~64.89%,各改良处理全钾含量由大到小依次为 T_7 、 T_3 、 T_6 、 T_{10} 、 T_8 、 T_1 、 T_9 、 T_{11} 、 T_2 、 T_5 和 T_4 , T_7 较 CK 显著增加 64.89%; T_3 较 CK 显著提高了 37.62%; 且 T_7 较 T_3 显著提高 27.27%。综上分析,单施克碱王对 0~60 cm 土层土壤全钾含量提升效果明显。

2.6 改良剂对土壤速效钾含量影响

由图 6 可知,不同土壤改良剂处理较不施改良剂(CK)均显著 ($P < 0.05$) 增加 0~60 cm 土层土壤速效钾含量。其中有机肥(T_1)和糠醛渣(T_4)处理较 CK 显著 ($P < 0.05$) 提升 0~30 cm 土层土壤速效钾含量,分别提高 111.91% 和 103.05%, T_1 较 T_4 高出 8.68%, 差异不显著。各改良处理土壤速效钾含量由大到小依次为有机肥(T_1)、糠醛渣(T_4)、克碱王(T_7)、粉煤灰+有机肥(T_8)、腐殖酸(T_6)、粉煤灰+糠醛渣(T_9)、蚯蚓粪(T_5)、粉煤灰(T_2)、生物炭+糠醛渣(T_{10})、生物炭(T_3)和蚯蚓粪+腐殖酸(T_{11}), 30~60 cm 土层分析, T_1 、 T_4 、 T_7 和 T_{10} 分别较 CK 显著 ($P < 0.05$) 提高 154.60%、153.93%、143.30% 和 150.28%; T_1 处理下增加的速效钾含量分别较 T_4 、 T_7 、 T_{10} 处理下提高 6.64%、11.3%、4.32%, 但施加 4 种改良剂处理间比较无显著差异。综合来看,单施有机肥(T_1)和单施糠醛渣(T_4)对 0~60 cm 土层速效钾含量提升最明显,单施克碱王(T_7)次之。

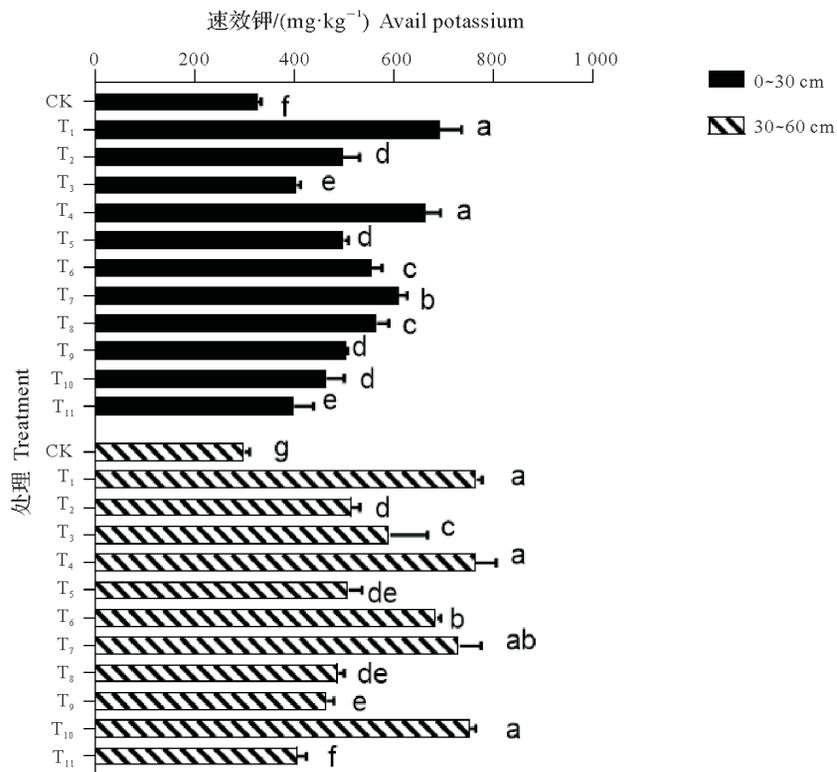


不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

The different lowercase letters indicate significant($P < 0.05$).

图 5 改良剂对盐碱地全钾含量影响

Fig.5 Effect of improvers on total potassium content in saline alkali soil



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

The different lowercase letters indicate significant($P < 0.05$).

图 6 改良剂对盐碱地速效钾含量影响

Fig.6 Effect of improvers on the content of available potassium in saline alkali soil

3 讨 论

3.1 改良剂对土壤有机质含量影响

土壤有机质(SOM)是土壤中所有含碳有机物的总称,是陆地生态系统巨大的有机碳库,在调节全球气候变化中起着不可或缺的作用^[25]。有机质作为土壤养分要素之一,在一定程度上决定了土壤肥力水平^[26],提高有机质也是衡量提升盐碱地土壤质量的重要指标之一^[27]。本研究中有机肥、粉煤灰、糠醛渣、克碱王、粉煤灰+有机肥、粉煤灰+糠醛渣、生物炭+糠醛渣、蚯蚓粪+腐殖酸均可以提高0~30 cm土层土壤有机质含量,其中以单施有机肥,单施糠醛渣,混施粉煤灰+有机肥处理显著增加土壤有机质含量。施用粉煤灰+有机肥或粉煤灰+糠醛渣处理显著影响土壤容重变化,有利于改善耕层土壤通透性,进而增加了土壤有机质含量^[28-29]。将粉煤灰与有机或无机肥料混合施用,不但提高了土壤质量,也弥补了粉煤灰养分含量低的缺点^[30]。当粉煤灰结合酸性改良剂时,会残留部分有机酸,使粉煤灰内的有机碳含量增加,向土壤中施加粉煤灰后,土壤内有机碳含量也会随之增加^[31]。高攀攀^[32]施加改良剂后,不但可以增加土壤有机碳含量,还间接的增加了土壤C/N比,以及增强了对其他养分的吸收^[33]。

3.2 改良剂对土壤氮、磷、钾养分含量影响

土壤中氮(N)、磷(P)和钾(K)是植物生长发育所需的必要养分元素,其含量能够反映土壤质量与养分限制状况^[34]。氮磷钾也是土壤养分的主要组成部分,其含量能够作为衡量土壤肥力水平的重要指标^[35]。本研究认为,重度盐碱地施入有机肥改良效果最佳,其原因是有机肥含有丰富的氮磷钾元素^[36],本试验中施加有机肥可提升0~60 cm土层土壤全氮、速效磷、速效钾含量,与李菊等^[37]施用羊粪可提高土壤氮、磷、钾养分含量研究结果一致。也有研究^[38]指出,施加有机肥对土壤全钾含量无显著影响,这与本试验中施加单施有机肥对全钾含量影响不显著研究结果相似,由于盐碱地土质贫瘠,所以有机肥对全钾含量影响效果不显著,而克碱王针对盐碱地全钾含量提升效果较好,可能是因其有机络合酸含量较高,有较强的络合能力,促进了离子间相互转化,进而对全钾含量影响显著^[39]。

此外,本研究认为糠醛渣配施处理可以显著提高土壤的有机质、全磷以及速效磷含量。研究认为糠醛渣通常疏松多孔,细度一致,具有良好的吸附性,且有机质含量很高,同时含有一定量的氮、磷、钾营养成分^[40];而且由于糠醛生产过程中以酸为催化剂,其含水量较高,而且渣中含少量硫酸,pH值较低,所以糠醛渣呈酸性^[41]。单施有机肥显著增加土壤速效钾含量,这可能与有机肥自身含有较多养分及营养元素有关^[42],而单施糠醛渣处理显著增加土壤速效钾含量,则因糠醛渣呈酸性,通过促进土壤溶液中阴离子与缓效钾发生静电作用释放钾离子,且不同形态钾之间存在动态平衡反应有关^[43],进而增加了速效钾含量。研究^[17,44]发现有机肥与黄腐酸钾复合处理可以缓解盐碱胁迫对水稻生长发育和产量造成的影响,增加土壤养分含量,增加水稻产量,显著提高水稻株高、地上部干物质量及产量。Zhao等^[45]将糠醛渣施用于灌溉沙漠土壤,使得土壤pH值和容重显著降低,而有机质、N、P、K含量显著提高。施加糠醛渣能够提高土壤中全氮、全磷和全钾含量,且糠醛渣施用量越大,各养分含量提升越大^[46-47],与本试验施用糠醛渣可提升河西盐碱地土壤养分含量相似。据全国第二次土壤养分含量分级标准^[48],在本研究中通过施加改良剂,显著增加了河西灌区0~60 cm土层土壤速效钾含量,达到了极高标准,而有机质属中等标准,全磷属低标准,全氮、速效磷、全钾含量仍属于极低水平。当某种养分含量过高时,会使土壤中其他元素不足,对植物生长产生负面作用,进而影响农作物产量^[49];土壤养分含量过高可能会流失到地表水或地下水中,对环境造成污染^[50]。本研究前期测定了土壤养分含量,西北内陆盐碱土盐分差异较大,通过查阅文献,结合前人研究,综合分析制定施肥方案。因此,根据不同环境因素,合理选择施用量,避免造成过度浪费。

4 结 论

研究表明,不同种类改良剂均能不同程度提高土壤有机质及氮、磷、钾养分含量。其中单施有机肥对河西灌区0~60 cm土层土壤全氮、速效磷、速效钾含量提升效果明显,而单施糠醛渣提升土壤全钾效果明显,生物炭与糠醛渣配施、粉煤灰与糠醛渣配施分别增加了该土层有机质和全磷含量。综合比较分析,

单施有机肥、生物炭配施糠醛渣均可有效提升盐碱地土壤养分含量,对该地区综合改良利用盐碱地并提升耕地质量具有明显优势。

致谢:甘肃农业大学博士公开招聘科研启动基金(GAU-KYQD-2021)、干旱生境作物学国家重点实验室开放基金(GSCS-2023-11)和甘肃农业大学伏羲杰出人才项目(Gaufx-02J05)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 张志美,袁梦,李燊,等.不同改良剂对东营盐碱地改良效果研究[J].腐植酸,2021(6):15-21.
ZHANG Z M, YUAN M, LI S, et al. Study on the effect of different modifiers on saline-alkali land improvement in Dongying [J]. Humic acid, 2021(6): 15-21.
- [2] 铁宇.黄河三角洲重盐碱地3个树种造林技术研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
TIE Y. Afforestation techniques of three tree species in heavy saline-alkali soil of the Yellow River Delta [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [3] 马晨,马履一,刘太祥,等.盐碱地改良利用技术研究进展[J].世界林业研究,2010,23(2):28-32.
MA C, MA L Y, LIU T X, et al. Research progress of saline-alkali land improvement and utilization technology [J]. World forestry research, 2010, 23(2): 28-32.
- [4] 刘浩.吉林省西部盐碱地治理技术综述[J].长春工程学院学报(自然科学版),2016,17(4):41-43.
LIU H. Summary of saline-alkali land management technology in western Jilin Province [J]. Journal of Changchun institute of engineering (natural science edition), 2016, 17(4): 41-43.
- [5] 丁海荣,洪立洲,杨智青,等.盐生植物碱蓬及其研究进展[J].江西农业学报,2008,20(8):35-37.
DING H R, HONG L Z, YANG Z Q, et al. Halophyte *Suaeda salsa* and its research progress [J]. Journal of Jiangxi agriculture, 2008, 20(8): 35-37.
- [6] 李爽,汤巧香,高杰.河西走廊盐碱地治理研究[J].现代园艺,2019,42(17):76-77.
LI S, TANG Q X, GAO J. Study on saline-alkali land management in Hexi Corridor [J]. Modern horticulture, 2019, 42(17): 76-77.
- [7] 周启运,郑重谊,荆永锋,等.湘南稻作烟区不同土层土壤有机质含量与氮磷钾关系研究[J].作物杂志,2021(5):114-119.
ZHOU Q Y, ZHENG Z Y, JING Y F, et al. Study on the relationship between soil organic matter content and N, P, K in different soil layers of rice-growing tobacco-growing areas in south Hunan [J]. Crop journal, 2021(5): 114-119.
- [8] 张震中,张金旭,黄佳盛,等.不同排水措施对青海高寒区盐碱地改良效果的研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):78-85.
ZHANG Z Z, ZHANG J X, HUANG J S, et al. Effect of different drainage measures on saline-alkali land improvement in Qinghai Alpine region [J]. Journal of irrigation and drainage, 2018, 37(12): 78-85.
- [9] 王小锋,杨松.盐碱地改良措施概述[J].施工技术,2020,49(S1):220-222.
WANG X S, YANG S. Overview of improvement measures for saline-alkali land [J]. Construction technology, 2020, 49(S1): 220-222.
- [10] 王春娜,宫伟光.盐碱地改良的研究发展[J].防护林科技,2004(5):38-41.
WANG C N, GONG W G. Research and development of saline-alkali land improvement [J]. Shelterbelt science and technology, 2004(5): 38-41.
- [11] 张建锋,宋玉民,邢尚军,等.盐碱地改良利用与造林技术[J].东北林业大学学报,2002,30(6):124-129.
ZHANG J F, SONG Y M, XING S J, et al. Improvement and utilization of saline-alkali land and afforestation technology [J]. Journal of Northeast forestry university, 2002, 30(6): 124-129.
- [12] 吴增芳.土壤结构改良剂[M].北京:科学出版社,1976:24-34.
WU Z F. Soil structure improver [M]. Beijing: Science Press, 1976: 24-34.
- [13] EBRAHIMI N, VIAENE N, VANDECASTEELE B, et al. Traditional and new soil amendments reduce survival and reproduction of potato cyst nematodes, except for biochar [J]. Applied soil ecology, 2016, 107: 191-204.
- [14] 贾林,刘璐瑶,张涛,等.土壤改良剂在盐渍化土壤生态修复中的应用[J].湖南生态科学学报,2023,10(3):92-99.
JIA L, LIU L Y, ZHANG T, et al. Application of soil conditioner in ecological restoration of saline soil [J]. Journal of Hunan

- ecological sciences, 2023, 10(3):92-99.
- [15] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1282-1289.
CHEN Y Q, DONG Y H. Advances in research and application of soil conditioner[J]. Eco-environment, 2008, 17(3): 1282-1289.
- [16] 李丹丹,沈晖,田军仓,等.盐碱地改良综述[J].现代农业科技,2023(24):153-159.
LI D D, SHEN H, TIAN J C. Review of saline-alkali land improvement[J]. Modern agricultural science and technology, 2023 (24): 153-159.
- [17] 李鹏,田苗,任安,等.土壤改良剂对松嫩平原盐碱土壤理化性状、水稻生长及产量的影响[J].辽宁农业科学,2023,(5):48-52.
LI P, TIAN M, REN A, et al. Effects of soil conditioner on physical and chemical properties, growth and yield of saline-alkali soil in Songnen Plain[J]. Liaoning agricultural sciences, 2023, (5): 48-52.
- [18] 闫茂鲁,王晓鹏,郑云珠,等.有机肥对我国盐碱地土壤改良及作物生长的影响[J].农业工程,2023,13(8):56-62.
YAN M L, WANG X P, ZHENG Y Z, et al. Effect of organic fertilizer on soil improvement and crop growth in saline-alkali land in China[J]. Agricultural engineering, 2023, 13(8): 56-62.
- [19] 代德敏,蒋旭升,刘杰,等.3种有机改良剂对铅锌矿尾砂适生性改善的研究[J].生态环境学报,2023,32(4):784-793.
DAI D M, JIANG X S, LIU J, et al. Study on improvement of adaptability of lead-zinc mine tailings by three organic modifiers [J]. Journal of ecological environment, 2023, 32(4): 784-793.
- [20] 陈雨露,罗有发,万祖燕,等.改良剂-植物联合修复对赤泥理化特性、酶活性和微生物群落结构的影响[J/OL].生态学杂志:1-10[2023-10-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230523.1701.014.html>.
CHEN Y L, LUO Y F, WAN Z Y, et al. Effects of amendments and plant remediation on physicochemical properties, enzyme activity and microbial community structure of red mud[J/OL]. Journal of ecology: 1-10[2023-10-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230523.1701.014.html>.
- [21] 庞喆,王启龙,李娟.不同土壤改良剂对陕北低洼盐碱地土壤理化性质及水稻产量和经济效益的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(6):174-180.
PANG Z, WANG Q L, LI J. Effects of different soil conditioner on soil physical and chemical properties, rice yield and economic benefits in low-lying saline-alkali soil of Shanbei[J]. China agricultural science and technology news, 2023, 25(6): 174-180.
- [22] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623-1627.
- [23] 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.
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Study on saline soil in China: history, present situation and prospect[J]. Journal of soil sciences, 2022, 59(1): 10-27.
- [24] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000.
- [25] 朱晶,张巴奇,冉成,等.秸秆还田对松嫩平原西部苏打盐碱地稻田土壤养分及产量的影响[J].东北农业科学,2021,46(1):42-46.
ZHU J, ZHANG S Q, RAN C, et al. Effects of straw incorporation on soil nutrients and yield in soda saline-alkali rice fields in western Songnen Plain[J]. Northeast agricultural sciences, 2021, 46(1): 42-46.
- [26] LIANG B Q, LEHMANN J, SOHI S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic geochemistry, 2009, 41(2):206-213.
- [27] 田小明,李俊华,危常州,等.连续3年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1111-1118.
TIAN X M, LI J H, WEI C Z, et al. The effects of continuous application of bio organic fertilizers on soil organic matter components, cotton nutrient absorption, and yield for three years[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2012, 18(5): 1111-1118.
- [28] 陈文涛,郭丽琢,剡斌,等.改良剂对盐碱地燕麦生长及土壤物理性状的调控效应[J/OL].甘肃农业大学学报:1-12[2024-02-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.s.20231205.1903.130.html>.
CHEN W T, GUO L Z, YAN B, et al. Regulatory effect of improver on the growth and soil physical properties of oats in saline-alkali land[J/OL]. Journal of Gansu agricultural university: 1-12[2024-02-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.s.20231205.1903.130.html>.

- [29] 杨海儒,宫伟光.不同土壤改良剂对松嫩平原盐碱土理化性质的影响[J].安徽农业科学,2008(20):8715-8716.
YANG H R, GONG W G. Effects of different soil amendments on the physicochemical properties of saline alkali soil in the Songnen Plain[J]. Anhui agricultural science, 2008(20): 8715-8716.
- [30] 张婷,石爱丽,任杰,等.粉煤灰在农业中的应用研究进展[J].现代农业科技,2023(20):127-130.
ZHANG T, SHI A L, REN J, et al. Research progress on the application of fly ash in agriculture[J]. Modern agricultural science and technology, 2023(20): 127-130
- [31] 方超.煤基固废粉煤灰改良重构土壤养分效果研究[D].淮南:安徽理工大学,2022.
FANG C. Research on the effect of coal based solid waste fly ash on improving and reconstructing soil nutrients[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022
- [32] 高攀攀.改良剂施用对盐渍土壤碳氮转化的影响研究[D].泰安:山东农业大学,2023.
GAO P P. Effects of amendments on carbon and nitrogen transformation in saline soil [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.
- [33] 王磊元,李凤娟,秦翠兰.施用不同土壤改良剂对准格尔盆地盐碱地的改良作用[J].江苏农业科学,2022,50(16):259-264.
WANG L Y, LI F J, QIN C L. Improvement of Dzungar Basin saline-alkali soil by different soil conditioner[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2022, 50(16): 259-264.
- [34] 王传盈,王凯月,王浩然,等.黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征[J].环境科学,2024,45(3):1674-1683.
WANG C Y, WANG K Y, WANG H R, et al. Soil nutrients and their eco-chemical metrological characteristics of typical wetlands in the lower Yellow River[J]. Environmental science, 2024, 45(3): 1674-1683.
- [35] 刘展航,张树岩,侯玉平,等.互花米草入侵对黄河口湿地土壤碳氮磷及其生态化学计量特征的影响[J].生态环境学报,2022,31(7):1360-1369.
LIU Z H, ZHANG S Y, HOU Y P, et al. Effects of *Spartina alterniflora* intrusion on soil carbon, nitrogen and phosphorus and their eco-stoichiometric characteristics in the Yellow River estuary wetland[J]. Journal of ecological environment, 2022, 31(7): 1360-1369.
- [36] 赵江.施用蚯蚓肥对榆林盐碱地土壤性质及中科羊草生长的影响[D].榆林:榆林学院,2023.
ZHAO J. Effects of earthworm fertilizer on soil properties and growth of *Leymus chinensis* in Yulin saline-alkali soil [D]. Yulin: Yulin College, 2023.
- [37] 李菊,杨永志,甘良,等.土壤改良剂和有机肥对旱改水砖红壤稻田的改良效果[J].中国土壤与肥料,2022(4):91-98.
LI J, YANG Y Z, GAN L, et al. Effects of soil conditioner and organic fertilizers on paddy field improvement in dry-to-dry lateritic red soil[J]. Chinese soil and fertilizer, 2022(4): 91-98.
- [38] 田露,苏文斌,郭晓霞,等.化肥减施下生物有机肥对连作甜菜耕层土壤质量及产量的影响[J].生态学杂志,2024,43(3):665-674.
TIAN L, SU W B, GUO X X, et al. Effect of bio-organic fertilizer on soil quality and yield of sugar beet under chemical fertilizer reduction[J]. Journal of ecology, 2024, 43(3): 665-674.
- [39] 王泽涛.有机酸络合铁离子促进类芬顿体系处理有机废水的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2022.
WANG Z T. Research on organic acid complex iron ion promoted fenton like system for organic wastewater treatment [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [40] 祝海竣,李丹妮,张听,等.抗盐碱剂对盐碱胁迫条件下双季稻渗透调节物质及根系活力的影响[J].土壤通报,2022,53(5):1098-1105.
ZHU H J, LI D N, ZHANG T, et al. Effects of salinity-alkali resistance on osmotic regulators and root activity of double cropping rice under saline-alkali stress[J]. Chinese journal of soil science, 2022, 53(5): 1098-1105.
- [41] 张晨阳,徐明岗,王斐,等.施用有机肥对我国大豆产量及土壤养分的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(8):148-156.
ZHANG C Y, XUE M G, WANG F, et al. Effect of applying organic fertilizer on soybean yield and soil nutrient in our country [J]. China agricultural science and technology news, 2023, 25(8): 148-156.
- [42] 于菲.长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土壤肥力和玉米产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2024.
YU F. The effects of long-term application of organic fertilizers on the fertility of saline alkali soil and maize yield in the west-

- ern Songnen Plain[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2024
- [43] 王响玲,夏浩,李宇轩,等.施用生物炭对2种典型土壤养分有效性及肥力特征的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(5):158-167.
- WANG X L,XIA H,LI Y X, et al.The effect of biochar application on nutrient availability and fertility characteristics of two typical soils[J].Journal of Huazhong agricultural university,2023,42(5):158-167
- [44] 江胜国.生物有机肥配施改良剂对滨海盐土的改良效果研究[J].天津农业科学,2023,29(9):53-60.
- JIANG S G.Study on the improvement effect of bio organic fertilizer combined with amendments on coastal saline soil [J].Tianjin agricultural science,2023,29(9):53-60.
- [45] ZHAO Y C,YAN Z B,QIN J H, et al.The potential of residues of furfural and biogas as calcareous soil amendments for corn seed production[J].Environmental science and pollution research,2016,23(7):6217-6226.
- [46] 王瑞琦,井大炜.糠醛渣在蓝莓土壤理化性质调节中的应用研究[J].山东农业科学,2017,49(1):98-102.
- WANG R Q,JING D W.Study on the application of furfural residue in regulating the physical and chemical properties of blueberry soil[J].Shandong agricultural sciences,2017,49(1):98-102.
- [47] 张美娟.盐碱胁迫下牧草对糠醛渣的适应性生理应答研究[D].北京:中国农业科学院,2020.
- ZHANG M J.Adaptive physiological response of forage to furfural residue under saline-alkali stress [D].Beijing: Chinese academy of agricultural sciences,2020.
- [48] 黄晓露,戴勤,梁文汇,等.桂西北板栗园区土壤养分含量分析及评价[J].西南农业学报,2022,35(12):2827-2835.
- HUANG X L,DAI Q,LIANG W H, et al.Analysis and evaluation of soil nutrient content in chestnut parks in northwest Guangxi[J].Southwest agricultural journal,2022,35(12):2827-2835.
- [49] 黄德明,徐秋明,李亚星,等.土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2007(5):966-970.
- HUANG D M,XU Q M,LI Y X, et al.The effects of excess nitrogen and phosphorus nutrients in soil on the availability of trace elements zinc, manganese, iron, copper, and their content in plants [J].Journal of plant nutrition and fertilizer,2007(5):966-970.
- [50] 陈萍.黄河三角洲不同潜水埋深下柽柳灌丛土壤养分和盐分的富集效应[D].泰安:山东农业大学,2024.
- CHEN P.Enrichment effects of soil nutrients and salts in tamarisk shrubs under different depths of groundwater in the Yellow River Delta[D].Tai'an:Shandong Agricultural University,2024.