



长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响

肖扬, 黄立华, 杨易, 黄金鑫, 刘伯顺, 杨靖民

引用本文:

肖扬, 黄立华, 杨易, 黄金鑫, 刘伯顺, 杨靖民. 长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 126–134.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 118–128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>

松嫩平原西部盐碱地紫花苜蓿产量和品质对刈割频次与施肥的响应

那佳, 黄立华, 晏益民, 张璐, 黄金鑫

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 882–890 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0539>

施用有机肥对盐碱土的改良效果:Meta分析

刘国辉, 买文选, 田长彦

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 86–96 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0892>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

肖扬, 黄立华, 杨易, 等. 长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 126–134.

XIAO Y, HUANG L H, YANG Y, et al. Effects of different long-term fertilization on soil salinity indices and nutrient contents in saline-sodic paddy fields[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 126–134.



开放科学 OSID

长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响

肖扬^{1,2}, 黄立华^{2,3*}, 杨易^{1,2}, 黄金鑫^{2,3}, 刘伯顺^{2,3}, 杨靖民^{1*}

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 3. 吉林大安农田生态系统国家野外科学观测研究站, 吉林 大安 131317)

摘要:为探讨长期不同培肥措施对苏打盐碱地稻田土壤盐碱化参数和养分含量的影响,本研究利用运行10年的长期定位施肥试验,采集了不施肥处理(CK)、无机肥配施处理(NPK)、有机肥单施处理(M)、有机肥与无机肥配施处理(MNPK)和秸秆还田配施无机肥处理(RNPK)的0~60 cm土壤样品并进行分析。结果表明,随着土层深度的增加,各处理土壤pH、电导率、碱化度和 Na^+ 、 Cl^- 、 $\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-$ 含量逐渐增加,土壤阳离子交换量和 K^+ 、 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 、 SO_4^{2-} 、有机质、速效养分含量逐渐降低。施肥处理均较CK处理降低了土壤pH、电导率和碱化度等盐碱化参数,以及 Na^+ 、 Cl^- 和 $\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-$ 等有害盐分含量,增加了阳离子交换量及 K^+ 、 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 和 SO_4^{2-} 等有益盐分含量,提高了有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量。与CK处理相比,M和MNPK处理土壤盐分含量显著降低($P<0.05$),土壤有机质和速效氮含量显著提高($P<0.05$)。NPK处理土壤电导率有增加趋势,0~20 cm土壤电导率较CK处理增加了7.1%。因此,从地力培育的角度来讲,苏打盐碱地稻田施用有机肥或有机肥与化肥配施有利于土壤盐碱的降低和地力的持续提升。

关键词:苏打盐碱土;有机培肥;秸秆还田;盐分;养分

中图分类号:S156.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)01-0126-09

doi: 10.13254/j.jare.2022.0032

Effects of different long-term fertilization on soil salinity indices and nutrient contents in saline-sodic paddy fields

XIAO Yang^{1,2}, HUANG Lihua^{2,3*}, YANG Yi^{1,2}, HUANG Jinxin^{2,3}, LIU Baishun^{2,3}, YANG Jingmin^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. Jilin Da'an Farmland Ecosystem National Observation and Research Station, Da'an 131317, China)

Abstract: To investigate the effects of different long-term fertilization measures on soil salinity indices and nutrient contents, a long-term sited fertilization experiment of rice has been running for 10 years in saline-sodic paddy fields. Soil samples from 0–60 cm were collected in three layers from no fertilization treatment (CK), the combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer treatment (NPK), the single application of manure treatment (M), the combined application of manure and chemical fertilizer treatment (MNPK), and the chemical fertilizer with straw returning treatment (RNPK). The results showed that soil pH, electrical conductivity, exchangeable sodium percentage, the concentrations of Na^+ , Cl^- , and $\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-$ gradually increased, the cation exchange capacity, the concentrations of

收稿日期: 2022-01-18 录用日期: 2022-03-10

作者简介: 肖扬(1997—),女,吉林白山人,硕士研究生,研究方向为植物逆境营养与盐碱土培肥。E-mail: xiaoyang9703@163.com

*通信作者: 黄立华 E-mail: huanglihua@iga.ac.cn; 杨靖民 E-mail: yangjingmin2001@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977148); 吉林省科技发展项目(20220508110RC); 国家重点研发计划项目(2022YFD1500502-7)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41977148); The Technological Development Project of Jilin Province(20220508110RC); National Key R&D Program of China(2022YFD1500502-7)

K^+ , $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, and SO_4^{2-} , the contents of soil organic matter and available nutrients gradually decreased with increasing soil depth in all experiment treatments. Compared with CK treatment, soil pH, electrical conductivity, and exchangeable sodium percentage, as well as the concentration of Na^+ , Cl^- , and $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ decreased, the cation exchange capacity, the concentration of K^+ , $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ and SO_4^{2-} , the contents of organic matter, the contents of available nitrogen, available phosphorus, and available potassium all increased in the other four fertilization treatments. Among them, soil salt contents significantly decreased in the M and MNPK treatments compared with those in CK ($P<0.05$), and the contents of soil organic matter and available nitrogen significantly increased in the M and MNPK treatments compared with those in CK ($P<0.05$). The electrical conductivity of soil solution increased in NPK treatment with application of chemical fertilizer, the electrical conductivity at the 0–20 cm soil layer increased by 7.1% compared with that in CK. Therefore, the application of manure or the combined application of manure and chemical fertilizer will be conducive to the reduction of soil salinity and the continuous improvement of soil fertility in saline-sodic paddy fields.

Keywords: saline-sodic soil; application of organic fertilizer; straw returning; salinity; nutrient

土地盐碱化是目前全球范围内广泛存在的问题,已严重影响到农业生态系统的稳定性和农业经济的发展^[1],在干旱、半干旱地区尤为严重^[2]。我国是盐碱地分布较多的国家之一,总面积达到 9.9×10^7 hm^2 ,主要分布在东北、华北、西北等地区^[3]。盐碱地作为潜在的后备土地资源对我国耕地数量的动态平衡具有重要调节作用。东北松嫩平原西部是世界三大苏打盐碱土分布区之一^[4],仅吉林省西部的苏打盐碱地面积就高达153万 hm^2 。该区域受长期过度放牧及人类活动的影响,植被退化严重,土壤盐碱化加剧,不仅对植物产生渗透胁迫^[5]和离子毒害^[6],也造成土壤养分的匮乏或不平衡,导致生产力水平和资源利用效率低。苏打盐碱土碱性强、盐碱变异程度大、肥力水平低,氮素资源尤其匮乏^[7]。以往人们对盐碱地的利用多侧重于土壤改良或植被修复,采取的措施主要包括水利工程、农业耕作、化学改良及耐盐碱植物筛选等,其实质基本是降低盐碱危害或提高植物抗性^[8]。实际上这些土壤不仅存在着较高的盐碱障碍,而且大多肥力水平也较低,前人在长期的治理盐碱过程中总结出“改土是前提,培肥是根本”的成功经验^[9]。因此,研究盐碱化条件下土壤的合理培肥对于地力提升和盐碱地高效利用具有重要意义。

长期以来,有机肥和化肥施用对降低土壤盐碱度和培肥地力方面的效果一直是土壤学工作者关注和研究的热点问题^[10]。大量研究表明,施用有机肥对改良盐碱土效果明显,不仅能降低土壤的盐分和可溶性盐含量,而且可以改善土壤结构、硬度和通透性,提高土壤养分含量、微生物活性和水分入渗速率,调节盐离子在土壤中的分配,改善作物生长环境^[11]。有机肥的施用减少了耕层土壤返盐,降低了土壤次生盐渍化发生的几率,有利于土壤向非盐渍化方向发展,具有较好的抑盐效果,而化学肥料在某种程度上会导致

土壤表层积盐^[12]。近年来,秸秆还田配施无机肥也在盐碱地上得到广泛应用,其可增加耕层土壤有机质含量,特别是长期的秸秆还田能显著增加土壤腐殖质含量,而腐殖质对盐碱具有很好的抑制效果^[13]。

本研究利用盐碱地水稻长期定位施肥试验的部分施肥处理,分析了长期不同培肥措施对土壤盐碱和主要养分含量变化的影响,旨在揭示不同培肥措施对苏打盐碱地稻田地力培育的作用效果,以期为该区域的盐碱地资源高效利用提供参考与借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验概况

本研究基于吉林大安农田生态系统国家野外科学观测研究站的盐碱地水稻长期定位施肥试验进行。该站位于吉林省大安市,具体地理坐标为 $45^{\circ}35'58''\sim 45^{\circ}36'28''N$, $123^{\circ}50'27''\sim 123^{\circ}51'31''E$,属于松嫩平原西部苏打盐碱土的典型分布区,土壤类型包括苏打型草甸盐土(或碱土)和草甸盐碱土。气候类型为温带大陆性季风气候,全年光照充足,无霜期130~140 d,全年日照时数平均3 000 h以上,年平均气温 $4.3^{\circ}C$,年平均积温 $2\ 900^{\circ}C$ 以上,年均降雨量为350~400 mm,春季干旱多风,降雨多集中在夏季,秋季晴朗凉爽,冬季寒冷漫长^[14]。水稻长期定位施肥试验始于2010年,将地表0~60 cm土壤剥离,选择中度苏打盐碱化草甸土反复混匀后回填,为使各施肥处理的表层土壤地力均匀,第一年进行水稻匀田种植,所有处理均不施用肥料,通过观察水稻长势发现整个试验地土壤地力均匀。长期定位试验开始前耕层土壤(0~20 cm)基本理化特性^[15]:pH 8.86(土水比为1:2.5),电导率 $0.436\ dS\cdot m^{-1}$ (土水比为1:2.5),有机质含量 $8.26\ g\cdot kg^{-1}$,碱解氮含量 $76.8\ mg\cdot kg^{-1}$,速效磷含量 $21.6\ mg\cdot kg^{-1}$,速效钾含量 $210.7\ mg\cdot kg^{-1}$ 。各施肥试验从2011

年正式开始,截至2021年已连续进行10年,水稻品种为东稻4号,该品种为中国科学院东北地理与农业生态研究所于2010年选育并通过吉林省审定,具有耐盐碱、抗倒伏和抗稻瘟病等特点,是一个综合性状优良的超高产水稻抗逆品种。

1.2 试验设计

盐碱地水稻长期定位施肥试验设有11个不同施肥处理,每个处理重复4次,随机区组排列,小区面积为20 m²(5 m×4 m),小区间通过水泥池埂分隔,各小区独立灌水和排水。本研究从中选取了5个不同施肥处理,即不施肥对照(CK)、无机肥配施(NPK)、有机肥单施(M)、有机肥与无机肥配施(MNPK)和秸秆还田配施无机肥(RNPK),其中,NPK、M和MNPK处理施肥量相同(按有效养分含量折合为纯量计),RNPK处理为在NPK处理基础上秸秆全量还田。NPK处理的氮肥为尿素(含N 46.2%),施用量为200 kg·hm⁻²(以N计);磷肥为普通过磷酸钙(含P₂O₅ 16%),施用量为100 kg·hm⁻²(以P₂O₅计);钾肥为硫酸钾(含K₂O 50%),施用量为100 kg·hm⁻²(以K₂O计)。M处理肥料为当地腐熟羊粪^[15-16],养分和盐分情况如下:全氮约2.01%,全磷约0.49%,全钾约1.32%,pH 8.65,盐分电导率为0.21 dS·m⁻¹,施用量为30 t·hm⁻²。MNPK处理氮磷钾肥用量为NPK处理的75%,腐熟羊粪施用量为10 t·hm⁻²。RNPK处理的氮磷钾肥施用量与NPK处理相同,秸秆还田量为10 t·hm⁻²,基本为秸秆全量还田,秸秆中氮、磷、钾含量分别为0.64%、0.17%、1.19%。土壤样品采集于秋季水稻收获后、表土结冻前,采样时间为2020年10月28日,采样深度为0~60 cm,分3层(即0~20、20~40、40~60 cm)采集,每个施肥处理的重复小区内随机采集3个样点同层土壤,混合装入样品袋中,带回实验室置于阴凉处自

然风干,研磨后过20目筛,待测。

1.3 测定指标及方法

土壤pH(土水比为1:2.5)采用pH计(GLP 22型)测定;电导率(EC)(土水比为1:2.5)采用DDS-11A电导率仪测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸钠-火焰光度法测定;土壤碱化度(ESP)的计算用土壤中交换性钠含量与阳离子交换量的比值来表示;土壤Ca²⁺、Mg²⁺含量采用原子吸收分光光度法测定;Na⁺、K⁺含量采用火焰光度法测定;CO₃²⁻、HCO₃⁻含量采用双指示剂中和滴定法测定;Cl⁻含量采用硝酸银滴定法测定;SO₄²⁻含量采用硫酸钡比浊法测定。土壤有机质(SOM)含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;速效氮(AN)含量采用碱解扩散法测定;速效磷(AP)含量采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)含量采用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定。

1.4 数据分析

试验数据采用Microsoft Excel 2013软件进行整理,采用IBM SPSS Statistics 26统计软件对试验数据进行方差分析,处理间的差异显著性(P<0.05)采用LSD多重比较进行判断,采用Origin 2019b软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤盐碱指标和养分含量的方差分析

通过施肥处理及土层深度对土壤盐碱指标和养分含量影响的双因素方差分析(表1)可知,施肥处理和土层深度对各土壤盐碱指标和养分含量均具有显著影响(P<0.05),此外,施肥处理与土层深度的交互作用对土壤有机质含量无显著影响(P>0.05),对其他指标均具有显著影响(P<0.05)。

表1 施肥处理及土层深度对土壤盐碱指标与养分含量影响的方差分析(F值)

Table 1 F-ratio of ANOVA of effect of fertilization and soil depth on soil salinity indices and nutrient contents

因素 Factor	pH	EC	CEC	ESP	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺
施肥处理	105.06*	145.85*	218.29*	548.36*	118.37*	50.17*	226.88*
土层深度	1 355.65*	27.92*	286.89*	947.23*	156.07*	34.67*	901.51*
施肥处理×土层深度	8.44*	4.12*	16.60*	17.21*	6.76*	7.91*	5.16*
因素 Factor	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻	SOM	AN	AP	AK
施肥处理	88.55*	150.66*	142.70*	74.64*	182.93*	285.85*	121.36*
土层深度	299.28*	985.44*	1 722.06*	3 345.36*	4 726.31*	2 756.79*	1 084.71*
施肥处理×土层深度	6.63*	13.72*	4.36*	1.04	21.65*	89.70*	10.79*

注:*表示影响显著(P<0.05)。

Note:* indicates the significant effects(P<0.05).

2.2 不同施肥处理对土壤盐碱特征的影响

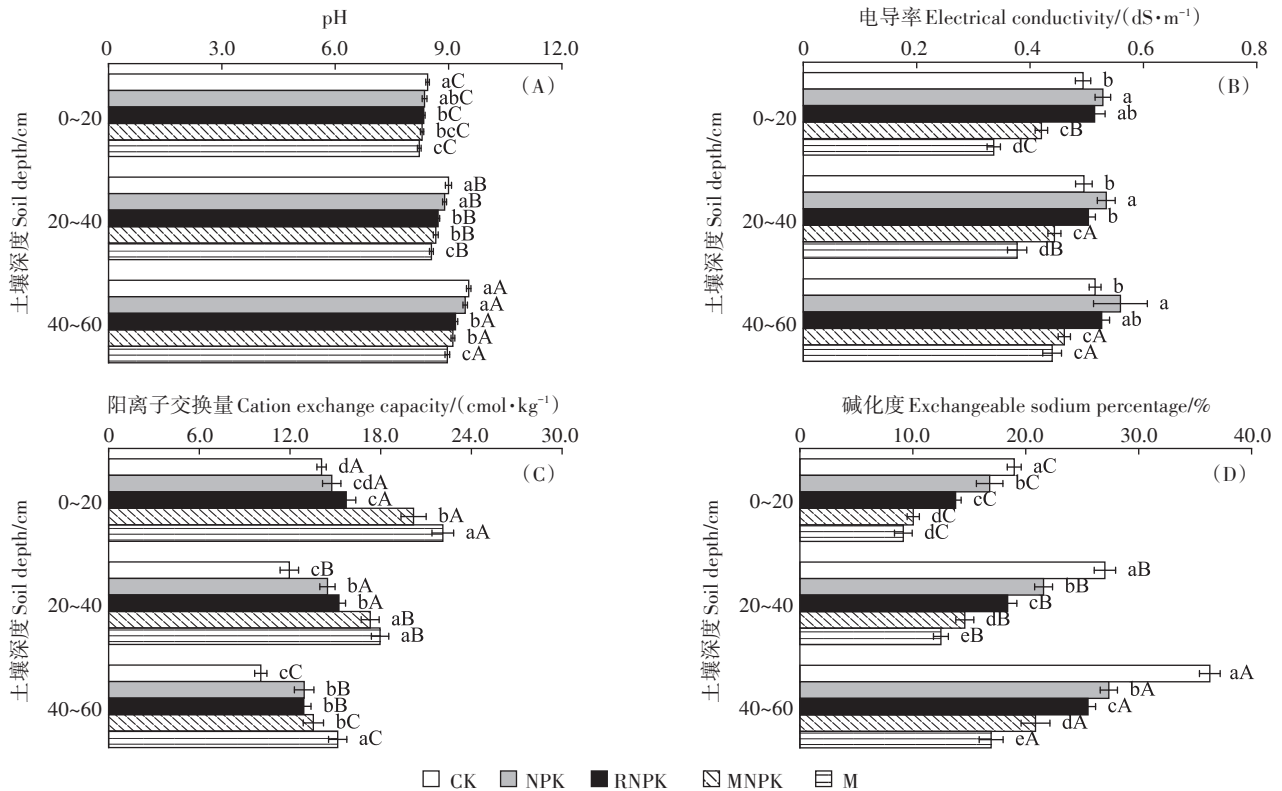
2.2.1 不同施肥处理对土壤盐化和碱化参数的影响

随着土层深度的增加,土壤pH显著增加,20~40 cm和40~60 cm土层的pH显著高于0~20 cm ($P < 0.05$),在20~40 cm和40~60 cm土层,CK和NPK处理的pH显著高于其他3个施肥处理(图1A)。在0~20 cm土层中,RNPK、MNPK和M处理的土壤pH值较CK处理显著降低了1.2%、1.7%和2.6% ($P < 0.05$),NPK与CK处理土壤pH值无显著差异。CK、NPK和RNPK 3个处理土壤电导率在0~60 cm的3个土层间无显著变化(图1B),MNPK和M处理20~40 cm和40~60 cm土层的电导率显著高于0~20 cm土层 ($P < 0.05$)。在0~20 cm土层中,NPK和RNPK处理的土壤电导率较CK处理升高了7.1%和4.2%,MNPK和M处理较CK处理下降14.9%和31.9%。土壤阳离子交换量整体上随着土层深度增加呈下降趋势(图1C),NPK和RNPK处理在0~20 cm和20~40 cm土层间差异不显著,在0~20 cm土层中,各施肥处理土壤阳离子交换量与CK处理相比均有所升高,其中RNPK、

MNPK和M处理较CK处理显著提高了11.6%、43.2%和56.9% ($P < 0.05$),NPK和CK处理相比无显著差异。各处理土壤碱化度随土层深度增加而显著增大 ($P < 0.05$)(图1D)。在0~20 cm土层中,与CK处理相比,各施肥处理土壤碱化度差异均达到显著水平 ($P < 0.05$),其中MNPK和M处理对土壤碱化度的影响较大,较CK处理分别下降了47.1%和51.8%。

2.2.2 不同施肥处理对土壤盐离子含量的影响

随着土层深度增加,不同施肥处理的土壤 Na^+ 、 Cl^- 和 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 含量呈增加趋势, K^+ 、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 SO_4^{2-} 含量呈降低趋势(图2)。在0~20 cm土层中,与CK处理相比,RNPK、MNPK和M处理均显著降低了土壤 Na^+ 含量 ($P < 0.05$),降幅分别为13.6%、22.1%和30.8%,M处理的降幅最明显,NPK处理与CK处理无显著差异(图2A)。在0~20 cm土层中,不同施肥处理的土壤 K^+ 含量较CK处理均有所提高,其中MNPK、M处理的 K^+ 含量较CK处理分别增加了15.3%和38.6%,差异显著 ($P < 0.05$),NPK和RNPK处理 K^+ 含量较CK处理略有增加,但差异不显著(图2B)。在0~20 cm土层中,NPK、



同一土层不同处理的小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$);同一处理不同土层的大写字母表示土层间差异显著 ($P < 0.05$);无标注表示差异不显著。下同

Different lowercase letters in the same soil layer indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$); Different capital letters in the same treatment indicate significant differences among soil layers; No label indicate insignificant difference. The same below

图1 不同施肥处理对稻田土壤盐化和碱化参数的影响

Figure 1 Effects of different fertilization treatments on the parameters of soil salinization and alkalization in saline-sodic paddy field

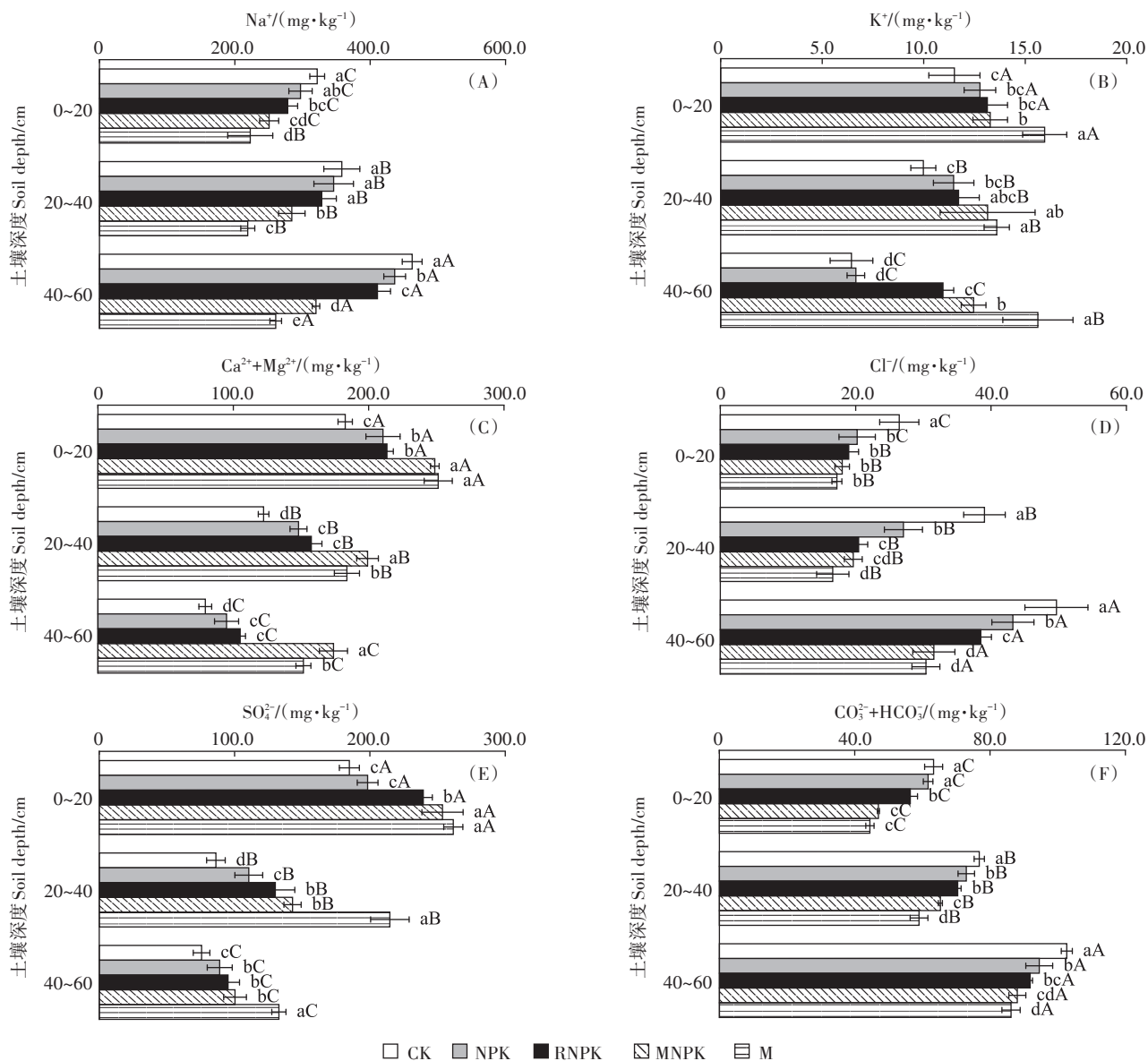


图2 不同施肥处理对稻田土壤盐离子含量的影响

Figure 2 Effects of different fertilization treatments on soil salt ion contents at different depths in saline-sodic paddy field

RNPk、MNPK 和 M 处理均显著提高了土壤 Ca²⁺+Mg²⁺ 含量 ($P < 0.05$), NPK 和 RNPk 处理对土壤 Ca²⁺+Mg²⁺ 含量影响差别不大,但低于 MNPK 和 M 处理,4 种施肥处理的 Ca²⁺+Mg²⁺ 含量分别较 CK 处理提高了 15.3%、16.9%、36.2% 和 37.6% (图 2C)。在 0~20 cm 土层中,与 CK 处理相比,NPK、RNPk、MNPK 和 M 处理显著降低了土壤 Cl⁻ 含量,降幅分别为 23.5%、28.2%、31.9% 和 34.8% ($P < 0.05$),4 种施肥处理间则无显著差异(图 2D)。在 0~20 cm 土层中,NPK 处理土壤 SO₄²⁻ 含量与 CK 处理相比略有升高但差异不显著,RNPk、MNPK 和 M 处理 SO₄²⁻ 含量较 CK 处理分别显著提高了 29.6%、37.2% 和 41.6% ($P < 0.05$),MNPK 和 M 处理间

无显著差异(图 2E)。在 0~20 cm 土层中,4 种施肥处理的土壤 CO₃²⁻+HCO₃⁻ 含量较 CK 处理均有所下降,NPK 处理与 CK 处理无显著差异,RNPk、MNPK 和 M 处理 CO₃²⁻+HCO₃⁻ 含量分别降低了 10.9%、25.8% 和 29.8%,差异显著 ($P < 0.05$),MNPK 和 M 处理间无显著差异(图 2F)。

2.3 不同施肥处理对土壤养分含量的影响

随着土层深度的增加,土壤速效养分含量逐渐降低,在 0~20 cm 土层中,各处理的土壤速效养分含量显著高于 20~60 cm 土层(图 3)。4 种施肥处理均有助于养分含量的提升,MNPK 和 M 处理对土壤有机质含量的影响差别不大,与 CK 处理相比,分别显著提高了

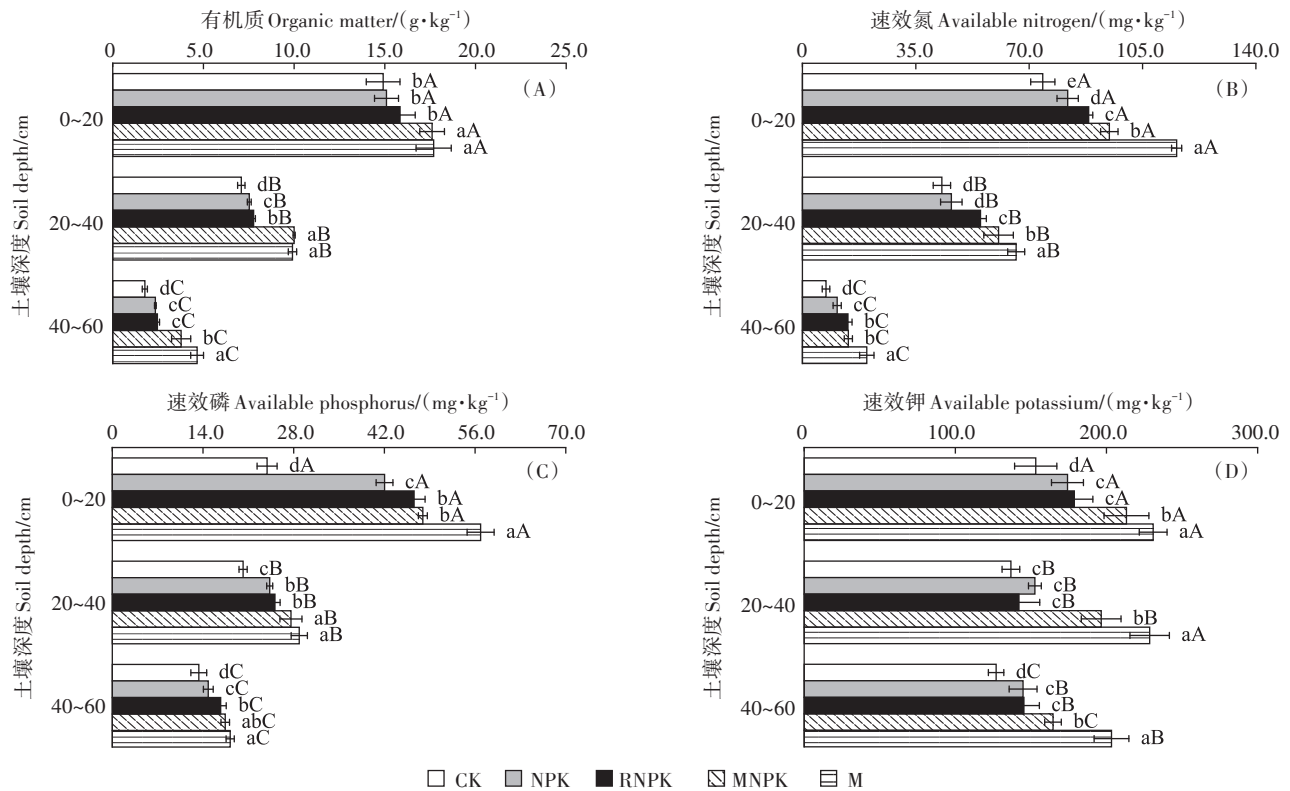


图3 不同施肥处理对稻田土壤养分含量的影响

Figure 3 Effects of different fertilization treatments on soil nutrient contents at different depths in saline-sodic paddy field

18.0%和18.1% ($P < 0.05$), NPK、RNPK处理与CK处理相比略有提高,但差异不显著(图3A)。在0~20 cm土层中,与CK处理相比,NPK、RNPK、MNPK和M处理不同程度提高了土壤速效氮含量(图3B),M处理较CK处理速效氮含量提高了55.7%,且显著高于NPK、RNPK和MNPK处理 ($P < 0.05$)。在0~20 cm土层中,与CK处理相比,NPK、RNPK、MNPK和M处理土壤速效磷含量显著提高 ($P < 0.05$),增幅分别为75.9%、95.0%、100.6%和138.0%(图3C)。在0~20 cm土层中,4种施肥处理均能提高土壤速效钾的积累,NPK、RNPK、MNPK和M处理较CK处理分别显著提高了13.7%、16.7%、39.2%和50.7% ($P < 0.05$),NPK和RNPK处理间无显著差异(图3D)。

2.4 土壤养分含量与土壤盐碱指标的相关性

不同施肥处理土壤养分含量与土壤盐碱化参数、盐离子含量变化的相关性分析结果(表2)显示,土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾的含量均受土壤盐碱化参数和各盐离子含量的影响。土壤养分含量与土壤主要盐碱指标呈极显著负相关 ($P < 0.01$),土壤养分(有机质、速效氮、速效磷和速效钾)含量与土壤pH、电导率、碱化度及 Na^+ 、 Cl^- 和 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 含量呈极

显著负相关 ($P < 0.01$),与 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。土壤有机质、速效氮等养分含量与土壤盐碱指标呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 施肥对土壤盐碱特征的影响

土壤盐化和碱化参数及盐离子含量均可以反映土壤的盐碱化情况^[17]。本研究发现,NPK、M、MNPK和RNPK处理可不同程度地影响土壤盐碱含量。也有研究指出,有机无机肥配施可降低土壤酸碱度、盐分和交换性钠含量^[18]。余世鹏等^[19]认为有机无机肥配施能有效提高土壤肥力,促进土壤排盐抑碱。王庆蒙等^[20]在河套灌区盐碱地开展的研究也表明,有机质中的大分子羧基能够中和土壤中的碱性物质,增加土壤胶体吸附盐基离子的能力,与土壤中的各种阳离子结合生成腐植酸盐,从而降低盐分离子含量。本试验研究显示,M和MNPK处理降低了土壤pH、电导率和碱化度,增加了土壤阳离子交换量,且M处理降盐抑碱的效果最为显著,有机肥不仅可以吸附盐碱土中的钠离子,而且在分解过程中产生大量有机酸,中和土壤碱度^[21],并能改善土壤结构,有利于土壤团聚体形

表2 不同施肥处理土壤养分含量与盐碱指标的 Pearson 相关性分析

Table 2 Pearson correlation analysis between soil nutrient contents and saline-alkali indexes under different fertilization treatments

指标 Parameter	EC	CEC	ESP	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻	SOM	AN	AP	AK
pH	0.488**	-0.769**	0.878**	0.751**	-0.702**	-0.919**	0.885**	-0.907**	0.959**	-0.949**	-0.949**	-0.866**	-0.628**
EC		-0.762**	0.653**	0.739**	-0.620**	-0.604**	0.475**	-0.573**	0.545**	-0.421**	-0.490**	-0.485**	-0.815**
CEC			-0.901**	-0.772**	0.706**	0.854**	-0.760**	0.822**	-0.835**	0.721**	0.781**	0.801**	0.839**
ESP				0.870**	-0.820**	-0.913**	0.911**	-0.852**	0.875**	-0.782**	-0.799**	-0.780**	-0.829**
Na ⁺					-0.841**	-0.773**	0.795**	-0.701**	0.736**	-0.614**	-0.655**	-0.594**	-0.800**
K ⁺						0.741**	-0.720**	0.632**	-0.636**	0.550**	0.570**	0.570**	0.717**
Ca ²⁺ +Mg ²⁺							-0.850**	0.888**	-0.911**	0.892**	0.883**	0.878**	0.721**
Cl ⁻								-0.779**	0.854**	-0.759**	-0.785**	-0.710**	-0.662**
SO ₄ ²⁻										-0.901**	0.913**	0.911**	0.910**
CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻											-0.944**	-0.969**	-0.890**
SOM												0.973**	0.904**
AN													0.927**
AP													0.635**

注:**表示在0.01水平上极显著相关。

Note:** indicates that there is an extremely significant correlation between parameters at 0.01 level.

成,使土壤通气透水,有利于盐分排出,提高土壤保水保肥的能力;NPK与RNPK处理提高了土壤电导率,形成盐分表聚,可能是由于无机肥带入的一些可溶性盐分离子使土壤电导率升高,这与刘春卿等^[22]的研究结果基本一致。胡育骄等^[23]的研究表明,施用化肥使0~60 cm土层土壤脱盐率显著低于不施肥处理,说明施用化肥不利于土壤脱盐,而有机无机肥配施土壤脱盐率较单施化肥土壤高55%。

土壤盐离子含量失衡是土壤盐碱化的直接表现。本研究表明,4种施肥处理均能降低土壤Na⁺、Cl⁻和HCO₃⁻+CO₃²⁻含量,提高土壤Ca²⁺、Mg²⁺和K⁺含量。整体来看,有机肥处理与其他施肥处理相比显著降低了土壤Na⁺、Cl⁻和HCO₃⁻+CO₃²⁻的含量,原因可能是施入有机肥增加了表土腐殖质含量,促进了大团聚体的形成,使得土壤的物理性质得到改善,渗透性增加也促进了各盐分离子的运移^[24]。Huang等^[16]的研究表明,经有机肥处理的土壤中Na⁺、CO₃²⁻+HCO₃⁻和Cl⁻的含量较低,有机肥可以促进水稻种植过程中土壤脱盐,从而使盐分降低。大量施用有机物质时,土壤理化性质发生显著变化,可溶性盐、pH值以及交换性Na⁺等均显著下降,阳离子中Ca²⁺+Mg²⁺含量与交换性盐基总量则呈增加趋势,表明土壤盐渍化程度在逐渐下降。

3.2 施肥对土壤养分含量的影响

本研究发现,土壤养分含量随土层增加逐渐降低,与CK相比,NPK、M、MNPK和RNPK处理显著提高了土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量。其

中,M和MNPK处理对土壤养分含量影响最为明显,这与以往的研究结果^[25]基本一致。林治安等^[26]在研究有机肥和无机肥对土壤肥力的作用时发现,施用有机肥对土壤有机质含量的提升效果明显优于无机肥,有机无机肥配施处理的效果介于有机肥和无机肥单独施用之间。劳秀荣等^[27]研究发现,秸秆还田与化肥配施比单施化肥对土壤养分含量的影响更为显著。本研究结果也显示,不同施肥处理对土壤养分含量的影响具有差异,M处理的效果优于其他施肥处理,有机肥的施入是土壤有机质提高的原因之一,氮磷钾含量的增加是因为有机肥可以改善土壤环境,减少土壤对速效养分的固定。然而,本研究中M和MNPK处理分别施用了不同量的有机肥,研究结果却显示两处理在0~40 cm土层中的有机质含量无显著差异,仅在40~60 cm土层M处理显著高于MNPK处理(图3A)。上述结果表明,短期内大量投入有机肥并没有达到预期的有机质提升效果,由于苏打盐碱土具有较强的碱性,极易造成有机质分解,因此短期内在苏打盐碱地开垦稻田,耕层土壤有机质含量提升缓慢,说明土壤有机培肥是一个长期过程^[28]。长期定位研究也表明,长期单施化肥会降低土壤有机质含量,有机无机肥配施及单施有机肥提高土壤养分的作用显著优于单施化肥,有机无机肥配施与单施化肥处理相比,不仅可以提高耕层土壤有机质含量,还可以提高速效氮、速效磷及速效钾含量,全面提升土壤肥力水平,增强供肥能力,减少养分流失^[29]。

相关性分析结果表明,土壤盐碱指标与有机质、速效氮等养分含量呈极显著负相关,说明土壤盐碱含量增加在一定程度上抑制土壤有机质和速效氮等养分的积累和转化,使作物吸收养分和新陈代谢过程受到限制,这与以往的研究结果^[30]一致。苏打盐碱土有机质含量低,导致土壤团粒结构数量少、稳定性差,土壤硬度大。有机质可以提高团聚体的稳定性,土壤各级团聚体的数量取决于有机质含量^[31],这可能与腐殖质胶体的阳离子吸附能力有关,腐殖质的吸附能力是土壤黏粒的6倍以上、粉粒的24倍,其可降低土壤盐分离子的活性^[32]。然而在盐渍化土壤脱盐过程中,土壤极易发生碱化,碱土的治理难度高于盐土^[33],因此在治理苏打盐碱土时,调节pH值十分重要。本试验通过相关性分析发现,盐碱指标中土壤pH与土壤速效养分含量呈极显著负相关($P<0.01$),并与土壤有机质和速效氮含量相关程度较高,说明土壤pH是有机质和速效氮的主要限制因子,提高土壤有机质和速效氮含量可以有效降低土壤pH。随着有机肥的施入,有机物质在分解和腐殖化过程中产生的有机酸从土壤 CaCO_3 中分解出 Ca^{2+} ,将起分散作用的 Na^+ 置换出来,形成 Na_2SO_4 ,进而随水移动排出土壤,降低土壤碱性和盐分含量^[34],铵态氮的硝化作用产生的 H^+ 也对降低土壤pH有一定影响。土壤养分与土壤微生物的活动密切相关,而土壤盐分会明显降低土壤微生物的活性^[35]。因此,有机肥、化肥等肥料的长期施用对土壤微生物活性的影响有待进一步深入研究。

4 结论

本研究初步表明,长期进行培肥有利于稻田土壤盐碱含量的降低和养分含量的提升,特别是有机肥的合理施用对苏打盐碱地稻田降低土壤碱化度和提高有机质含量效果显著。苏打盐碱地具有较高的盐碱危害,常常导致土壤有机质和速效氮等养分匮乏,因此从地力培育的角度来讲,苏打盐碱地稻田施用有机肥或者有机肥与化肥配施是十分必要的,这将有利于盐碱地地力的持续提升,但有机肥的施用量不宜过大,应遵循适量和循序渐进的原则,避免造成浪费。

参考文献:

[1] WICHELS D, QADIR M. Achieving sustainable irrigation requires effective management of salts, soil salinity, and shallow groundwater[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 157:31-38.
[2] 赵思峰. 新疆盐碱地的综合治理研究[J]. *农机化研究*, 2006(9):33-

34. ZHAO S F. Research on the integrate control to saline and alkali land of Xinjiang[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006(9):33-34.
[3] 胡立煌, 史文竹, 项剑, 等. 生物炭、秸秆和粪肥对滨海盐碱土氮矿化和硝化作用的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8):1089-1096. HU L H, SHI W Z, XIANG J, et al. Effects of biochar, straw and manure fertilizer on nitrogen mineralization and nitrification of coastal saline-alkali soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8):1089-1096.
[4] 赵兰坡, 冯君, 王宇, 等. 松嫩平原盐碱地种稻开发的理论与技术问题[J]. *吉林农业大学学报*, 2012, 34(3):237-241. ZHAO L P, FENG J, WANG Y, et al. Theoretical and technological problems in the development of planting paddy in saline-alkali land of Songnen Plain[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34(3):237-241.
[5] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3):324-349.
[6] RENGASAMY P. World salinization with emphasis on Australia[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(5):1017-1023.
[7] HUANG L H, LIANG Z W, SUAREZ D L, et al. Impact of cultivation year, nitrogen fertilization rate and irrigation water quality on soil salinity and soil nitrogen in saline-sodic paddy fields in northeast China[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2016, 154(4):632-646.
[8] 张强, 赵文娟, 陈卫峰, 等. 盐碱地修复与保育研究进展[J]. *天津农业科学*, 2018, 24(4):65-70. ZHANG Q, ZHAO W J, CHEN W F, et al. Research progress on remediation and conservation of saline alkali soil[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2018, 24(4):65-70.
[9] 刘期松, 邱凤琼, 李凤珍, 等. 土壤有机质转化的研究——I. 苏打盐土中有机质转化与脱盐脱碱培育肥力的关系[J]. *土壤学报*, 1980, 17(3):275-283. LIU Q S, QIU F Q, LI F Z, et al. Studies on the transformation of soil organic materials Part I. Transformation of organic materials in relation to the amelioration of soda-saline soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1980, 17(3):275-283.
[10] 马桂秀, 林治安, 李志杰, 等. 有机物料与化肥配施改良盐碱耕地的效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(3):69-75. MA G X, LIN Z A, LI Z J, et al. Effect of combination of organic material and chemical fertilizer on the improvement of saline soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(3):69-75.
[11] SHABAN K A, ESMAEIL M A, ABDEL F A K, et al. Effect of nano, bio and organic fertilizers on some soil physical properties and soybean productivity in saline soil[J]. *Asian Soil Research Journal*, 2020, 4(3):44-57.
[12] 朱海, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机无机肥配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(3):441-450. ZHU H, YANG J S, YAO R J, et al. Effects of partial substitution of organic nitrogen for inorganic nitrogen in fertilization on salinity and nitrogen utilization in salinized coastal soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(3):441-450.
[13] 郑沛. 不同秸秆量与无机肥配施对小麦生长和土壤理化性状的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015. ZHENG P. Effects of different amounts of straw combined with inorganic fertilizer on wheat growth and soil physical and chemical properties[D]. Tai'an: Shandong Agri-

- culture University, 2015.
- [14] 吉林省白城地区普查办公室. 白城土壤[M]. 吉林科技出版社, 1988: 14-18. Baicheng Regional Census Office, Jilin Province. Baicheng soil[M]. Jilin Science and Technology Press, 1988: 14-18.
- [15] 李冠男, 黄立华, 张璐, 等. 施用有机肥和秸秆还田对东北苏打盐碱地水稻营养与食味品质的影响[J]. 作物杂志, 2019(5): 82-88. LI G N, HUANG L H, ZHANG L, et al. Effects of organic fertilizer and straw returning on nutrition and taste quality of rice in saline-sodic soil of northeast China[J]. *Crops*, 2019(5): 82-88.
- [16] 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 & Tillage Research*, 2022, 215: 105222.
- [17] 冯君, 马秀兰, 王宇, 等. 微域内苏打盐碱化草原草甸碱土和草甸盐土土壤剖面特征[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(4): 450-456. FENG J, MA X L, WANG Y, et al. Profile characteristics of alkaline and saline meadow soil in soda salinization-grassland in micro zone [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(4): 450-456.
- [18] 周连仁, 杨德超. 盐渍化农田有机无机肥配施比例的筛选[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(11): 25-28. ZHOU L R, YANG D C. Screening of salinization of farmland organic manure and inorganic fertilizer ratio[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(11): 25-28.
- [19] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 不同水肥盐调控措施对盐碱耕地综合质量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 942-947. YU S P, YANG J S, LIU G M. Impacts of different water-fertilizer-salt regulation measures on saline farmland quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 942-947.
- [20] 王庆蒙, 景宇鹏, 李跃进, 等. 不同施肥措施对河套灌区盐碱地改良效果[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 124-131. WANG Q M, JING Y P, LI Y J, et al. Effect of different fertilizer regime on the improvement of saline-alkali soil in Hetao Irrigation District[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(5): 124-131.
- [21] CHAGANTI V N, CROHN D M, ŠIMUNEK J. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 255-265.
- [22] 刘春卿, 杨劲松, 陈德明. 管理调控措施对土壤盐分分布和作物体内盐分离子吸收的作用[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 230-236. LIU C Q, YANG J S, CHEN D M. Effect of regulatory measures on distribution of soil salt and ionic uptake by crop[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 230-236.
- [23] 胡育骄, 王小彬, 赵全胜, 等. 海冰水灌溉对不同施肥方式下土壤盐分运移及棉花的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 20-27. HU Y J, WANG X B, ZHAO Q S, et al. Effects of sea ice water irrigation and different fertilizations on soil salinity dynamics and cotton [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 20-27.
- [24] 周薇, 王鸿斌, 朴海淑, 等. 苏打盐碱地水田的快速改良研究[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(5): 53-57. ZHOU W, WANG H B, PIAO H S, et al. Studies on rapid amendment of soda saline-alkaline paddy fields[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2015, 40(5): 53-57.
- [25] 龚雪蛟, 秦琳, 刘飞, 等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1403-1416. GONG X J, QIN L, LIU F, et al. Effect of organic manure on soil nutrient content: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1403-1416.
- [26] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819. LIN Z A, ZHAO B Q, YUAN L, et al. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2809-2819.
- [27] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623. LAO X R, SUN W H, WANG Z, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618-623.
- [28] 刘胜楠, 赵兰坡. 种稻年限对苏打盐碱土腐殖质含量及组成的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(6): 707-715. LIU S N, ZHAO L P. Effects of different rice cultivation years on humus content and composition of soda saline-alkaline soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(6): 707-715.
- [29] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139. XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [30] 刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 废弃盐田复垦利用后土壤盐分与有机质含量空间变异特征[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1311-1319. LIU W Q, LU F, XU X Y, et al. Spatial variation of soil salinity and organic matter under reclamation in an abandoned salt pan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1311-1319.
- [31] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418. DOU S, LI K, GUAN S. A review on organic matter in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 412-418.
- [32] 田圣贤, 冯盼, 杨山, 等. 东北阔叶红松林腐殖质层土壤阳离子交换性能及其主要影响因素[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2549-2558. TIAN S X, FENG P, YANG S, et al. Soil cation exchange capacity and its main impact factors in the humic layer of broad-leaved Korean pine forest in northeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(9): 2549-2558.
- [33] 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(2): 73-77. LI Z J, SUN W Y, MA W P, et al. Review and prospects of improvement technology for saline-alkali soil [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2010(2): 73-77.
- [34] 王金满, 杨培岭, 张建国, 等. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 33-37. WANG J M, YANG P L, ZHANG J G, et al. Salinity effect on sunflower at seedling stage during improving sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulphurization(BFGD)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(9): 33-37.
- [35] RIETZ D N, HAYNES R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(6): 845-854.