

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23640

不同培肥措施对西辽河平原盐碱化耕地盐碱特性及作物产量的影响

赵 彬^{1, 4}, 刘美英^{1*}, 景宇鹏^{2*}, 史 培², 段海文², 张兰英², 张东旭³, 沈祥军³

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特 010031; 3. 通辽市科尔沁区农业技术推广中心, 内蒙古 通辽 028000; 4. 包头市农牧科学研究所, 内蒙古 包头 014013)

摘 要: 田间试验条件下, 在内蒙古自治区西辽河平原盐碱化耕地设置 8 种施肥处理, 分别为不施肥 (对照, CK)、有机肥 (M)、秸秆还田 (S)、化肥 (F)、有机肥 + 秸秆还田 (MS)、有机肥 + 化肥 (MF)、秸秆还田 + 化肥 (SF)、有机肥 + 秸秆还田 + 化肥 (MSF), 研究不同培肥措施对盐碱化耕地土壤盐碱特性及玉米产量的影响。结果表明, 施用 MF 和 MSF 处理下 pH 显著低于 CK ($P < 0.05$), 其中在 0 ~ 10 cm 土层, 土壤 pH 值以 MF 处理最低, 较 CK 低 13.41%; 碱化度以 MF 处理最低, 较 CK 低 35.45%。与 CK 相比, 各处理均能显著降低有害离子 Cl^- 和 Na^+ 含量, 且各处理间差异显著。由此可见, 有机肥与秸秆的添加对土壤理化性质的改善具有明显作用。MSF 处理玉米产量最高, 达到了 12231 kg/hm^2 , 相比 CK 提高了 58.87%。产量与有机质、全氮、有效磷存在极显著的正相关关系, 与 pH 呈显著负相关。可见, 有机肥、秸秆还田和化肥三者配合施用能够显著提升土壤肥力进而提高作物产量。研究结果可为西辽河平原盐碱化耕地改良利用以及秸秆综合利用提供科学依据。

关键词: 玉米; 盐碱化耕地; 有机肥; 秸秆还田; 化肥; 土壤施肥

盐碱土是含盐量超过一定标准的土壤, 是一种退化的土壤类型, 也是各种盐土、碱土和盐化、碱化土壤的总称^[1]。据联合国教科文组织和粮农组织不完全统计, 我国盐碱土面积约为 9913 万 hm^2 。截至 2019 年, 内蒙古自治区农牧业科学院对全区盐碱土资源及治理情况调查研究表明, 内蒙古盐碱化土地面积已达 361 万 hm^2 , 且耕地次生盐碱化面积每年仍以 1 万 ~ 1.3 万 hm^2 的速度递增^[2-3]。西辽河平原大部分在通辽境内, 局部位于赤峰境内, 是内蒙古自治区重要的粮食生产基地之一, 素有“内蒙古粮仓”之称^[4]。西辽河平原盐碱化耕地面积约 100 万 hm^2 , 其中重度盐碱化耕地面积 2.67 万 hm^2 , 中度盐碱化耕地面积 4.18 万 hm^2 ,

轻度盐碱化耕地面积 20 万 hm^2 ^[5-8], 盐分主要为 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 , 是典型的苏打盐碱土^[9]。

盐碱土由于结构性差, 对水的利用率低, 导致土壤粘粒大量堆积, 不利于土壤有机碳的固存。因此, 细菌生长活力较差、营养物质分解缓慢。在治理盐碱土的科学研究中, 核心问题仍然是土壤水盐运动过程及其调控^[10], 目前, 物理、生物和化学方法是世界上广泛使用的土壤修复技术, 其实质是通过改变土壤的上、下边界条件和相关土-水-气-生参数, 定向调节土壤盐分的运动与聚集过程^[11]。农作物秸秆是农业生产中主要的产物之一, 也是主要的农业废弃物^[12-13], 秸秆“用则利, 弃则害”^[14-15]。大量的研究表明, 作物秸秆易获取、低成本, 并且可以改善土壤内部环境, 缓解盐胁迫对作物的影响^[16-18]。向姣等^[19]发现, 化肥配施秸秆还田处理下有机碳积累高于其他处理。王楠等^[20]发现, 施用 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 与秸秆对苏打盐碱土进行还田后, 随着 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 与秸秆用量的增加, K^+ 含量均呈上升趋势。Yang 等^[21]施用秸秆与无机氮对滨海盐渍土进行秸秆还田, 发现可以降低土

收稿日期: 2023-10-21; 录用日期: 2024-01-26

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目 (2021GG0065, 2022YFDZ0067)。

作者简介: 赵彬 (1998-), 硕士研究生, 主要从事盐碱化土壤治理与修复研究, E-mail: 791627091@qq.com。

通讯作者: 刘美英, E-mail: liumeiyingimau@163.com; 景宇鹏, E-mail: jyp236@163.com。



壤盐分并增加可溶性有机碳 (DOC) 和微生物量碳 (SMBC) 含量。

盐碱土是我国重要的后备耕地资源,用好盐碱土资源事关国家粮食安全。盐碱土的高效利用对保障国家粮食安全、坚守耕地红线具有重要意义,开发利用耕地后备资源,修复治理盐碱化土壤刻不容缓^[22]。因此,针对西辽河平原盐碱化耕地土壤肥力难以长期维系、土壤有机质缺乏、土壤团粒结构缺乏、孔隙度小、有机质分解性差、养分对作物有效性低等问题,以培肥为核心,探究盐碱化土壤肥力稳定提升的技术途径,为同类地区盐碱化土壤改良提供理论依据和科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古自治区通辽市科尔沁区莫力庙镇,中心位置坐标 121.96°E, 43.60°N, 土壤类型为典型苏打碱化土,该地区位于西辽河平原东部,属于典型内陆苏打盐碱化耕地土壤。试验区气候为中温带大陆性季风气候,四季分明,气温日较差和年较差均较大,全年最高气温 35.8℃,最低气温 -25.1℃,年均温 7℃,无霜期 202 d。年降水量在 300 ~ 400 mm,降水量随季节波动较大,土壤基本理化性质:有机质为 4.42 g/kg,全氮为 0.67 g/kg, pH 为 9.37,全盐含量为 1.31 g/kg。生长季降水主要集中在 7—8 月,8 月降水量在生长季最高,达到 91.07 mm (图 1)。

1.2 试验设计与管理

试验开始于 2020 年,设置 8 个施肥处理,分别为对照 (不施肥, CK)、有机肥 (M)、秸秆还

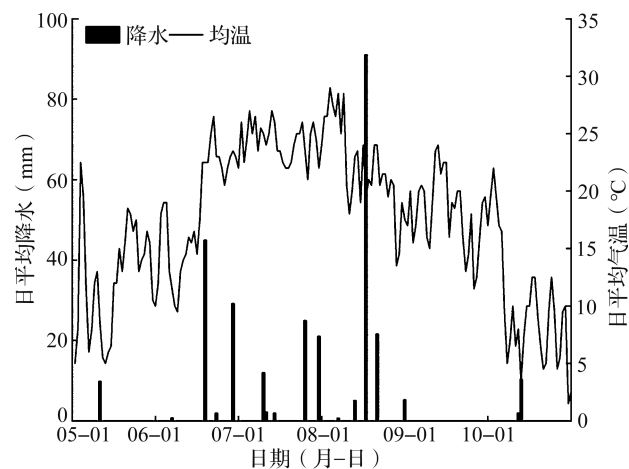


图 1 2022 年的生长季日平均气温和日累积降水量

田 (S)、化肥 (F)、有机肥 + 秸秆还田 (MS)、有机肥 + 化肥 (MF)、秸秆还田 + 化肥 (SM)、有机肥 + 秸秆还田 + 化肥 (MSF) (表 1)。采用完全随机设计,3 次重复,共 24 个小区,小区面积 55 m²。各处理按照氮、磷素水平一致设置,化肥用尿素和磷酸二铵,有机肥用腐熟牛粪,秸秆为当地的玉米秸秆,试验前将秸秆用粉碎机打碎,长度小于 5 cm,人工均匀翻埋至不同处理小区 25 cm 左右深度的土层,氮、磷肥作为基肥一次性施入,种植玉米,品种为京科 968,采用大小垄浅埋滴灌种植,大行距 80 cm,小行距 40 cm,株距 30 cm,留苗 60000 株/hm²。5 月初播种,9 月末收获,其余管理措施同当地常规管理。在播种后,立即滴灌出苗水 150 ~ 225 m³/hm²,此后在玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期进行补灌,每次灌水 225 ~ 375 m³/hm²。2022 年 8 月试验区集中降水较多,故后期没有灌水。

表 1 试验设计及肥料种类施用量

| 处理 | 代号 | 肥料种类及用量 | 肥料氮、磷含量 |
|-----------------|-----|--|--|
| 对照 | CK | 不施肥 | 尿素含 N 46%, 磷酸二 |
| 有机肥 | M | 有机肥 22500 kg/hm ² | 铵含 N、P ₂ O ₅ 量分别为 |
| 秸秆还田 | S | 玉米秸秆 33750 kg/hm ² | 18%、46%, 有机肥含 |
| 化肥 | F | 尿素 480 kg/hm ² + 磷酸二铵 255 kg/hm ² | N、P ₂ O ₅ 量分别为 1.2%、 |
| 有机肥 + 秸秆还田 | MS | 有机肥 11250 kg/hm ² + 玉米秸秆 16875 kg/hm ² | 0.5%, 秸秆含 N、P ₂ O ₅ |
| 有机肥 + 化肥 | MF | 有机肥 11250 kg/hm ² + 尿素 239.2 5 kg/hm ² + 磷酸二铵 138.60 kg/hm ² | 量分别为 0.8%、0.35% |
| 秸秆还田 + 化肥 | SF | 玉米秸秆 168.75 kg/hm ² + 尿素 241.50 kg/hm ² + 磷酸二铵 132.45 kg/hm ² | |
| 有机肥 + 秸秆还田 + 化肥 | MSF | 有机肥 7500 kg/hm ² + 玉米秸秆 11250 kg/hm ² + 尿素 159.00 kg/hm ² + 磷酸二铵 93.75 kg/hm ² | |

1.3 样品分析与数据处理

在 2022 年玉米的收获期利用土钻采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm

土层的土壤样品,每小区随机采集 3 个土样后混合为 1 个样品,风干后过筛,进行相关指标测定,土壤养分、盐分测定采用《土壤农化分析》常规方法

测定^[23]。

用 Excel 2020 及 Origin 2021 整理数据及作图，用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析 (ANOVA)，LSD 法进行多重比较，各指标间的关系采用 Pearson 相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同培肥措施对西辽河平原盐碱化耕地土壤盐分的影响

Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 是本地区苏打碱化土的特征盐分，此外还含有少量的硫酸盐和氯化物，阳离子以 Na⁺ 为主要离子，其含量远远大于其他

离子，阴离子则以 HCO₃⁻ 为主要离子。针对 0 ~ 10 cm 土层，各处理均在不同程度上降低了土壤的 Na⁺ 含量。其中，与 CK 相比，M、MF 和 MSF 这 3 个处理显著降低了 Na⁺ 含量，降幅分别为 82.62%、82.62% 和 79.20% (*P*<0.05)。除 S 处理外，各处理下的 Ca²⁺ 含量均显著提高 (*P*<0.05)。阴离子中各处理均降低了土壤 Cl⁻ 含量，S、M、MS、F、SF、MF 和 MSF 处理降幅分别为 50.87%、61.40%、59.46%、3.51%、26.32%、14.35% 和 17.54%，其中 M 处理降低效果最明显，减少了 0.035 g/kg。而对于 SO₄²⁻ 含量，除 F 处理外，其余 6 种培肥模式均不同程度的减少，不同处理间表现为 F>CK>MS>MF>MSF>SF>S>M。

表 2 不同培肥措施对土壤 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺ 含量的影响 (g/kg)

| 土层 (cm) | 处理 | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ |
|---------|-----|------------------|------------------|----------------|-----------------|
| 0 ~ 10 | CK | 0.101 ± 0.008e | 0.097 ± 0.006bc | 0.205 ± 0.018a | 0.351 ± 0.016a |
| | S | 0.060 ± 0.013f | 0.043 ± 0.011c | 0.050 ± 0.009d | 0.140 ± 0.012c |
| | M | 0.130 ± 0.008d | 0.087 ± 0.006bc | 0.111 ± 0.012c | 0.061 ± 0.007e |
| | MS | 0.152 ± 0.024bc | 0.173 ± 0.006a | 0.099 ± 0.017c | 0.131 ± 0.031cd |
| | F | 0.174 ± 0.013ab | 0.093 ± 0.015bc | 0.151 ± 0.006b | 0.257 ± 0.047b |
| | SF | 0.137 ± 0.008cd | 0.110 ± 0.069b | 0.163 ± 0.010b | 0.090 ± 0.012de |
| | MF | 0.189 ± 0.031a | 0.040 ± 0.046c | 0.058 ± 0.003d | 0.061 ± 0.007e |
| | MSF | 0.156 ± 0.009bc | 0.087 ± 0.015bc | 0.070 ± 0.013d | 0.073 ± 0.019e |
| 10 ~ 20 | CK | 0.067 ± 0.012c | 0.050 ± 0.010c | 0.249 ± 0.005a | 0.449 ± 0.019a |
| | S | 0.146 ± 0.025a | 0.083 ± 0.006c | 0.022 ± 0.003f | 0.185 ± 0.019c |
| | M | 0.127 ± 0.018ab | 0.143 ± 0.015b | 0.048 ± 0.003e | 0.077 ± 0.019fg |
| | MS | 0.116 ± 0.014b | 0.237 ± 0.127a | 0.116 ± 0.008c | 0.152 ± 0.025cd |
| | F | 0.151 ± 0.006a | 0.073 ± 0.012bc | 0.239 ± 0.025a | 0.287 ± 0.007b |
| | SF | 0.113 ± 0.017b | 0.133 ± 0.006bc | 0.173 ± 0.005b | 0.123 ± 0.019de |
| | MF | 0.077 ± 0.016c | 0.047 ± 0.006c | 0.050 ± 0.005e | 0.061 ± 0.019g |
| | MSF | 0.133 ± 0.010ab | 0.110 ± 0.010bc | 0.078 ± 0.003d | 0.107 ± 0.019ef |

注：不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 (*P*<0.05)。下同。

表 3 不同培肥措施对土壤 Cl⁻、HCO₃⁻+CO₃²⁻、SO₄²⁻ 含量的影响 (g/kg)

| 土层 (cm) | 处理 | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ | SO ₄ ²⁻ |
|---------|----|-----------------|--|-------------------------------|
| 0 ~ 10 | CK | 0.057 ± 0.001a | 0.343 ± 0.002a | 0.133 ± 0.050a |
| | S | 0.028 ± 0.001e | 0.177 ± 0.007f | 0.047 ± 0.011cd |
| | M | 0.022 ± 0.003f | 0.211 ± 0.010e | 0.024 ± 0.005d |
| | MS | 0.023 ± 0.000f | 0.209 ± 0.003e | 0.087 ± 0.014b |
| | F | 0.055 ± 0.000b | 0.275 ± 0.013d | 0.137 ± 0.009a |
| | SF | 0.042 ± 0.000d | 0.280 ± 0.001d | 0.050 ± 0.012cd |

续表

| 土层 (cm) | 处理 | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ | SO ₄ ²⁻ |
|---------|-----|-----------------|--|-------------------------------|
| 10 ~ 20 | MF | 0.049 ± 0.004c | 0.313 ± 0.002b | 0.086 ± 0.009b |
| | MSF | 0.047 ± 0.001c | 0.301 ± 0.001c | 0.076 ± 0.002bc |
| | CK | 0.055 ± 0.001a | 0.381 ± 0.001b | 0.135 ± 0.022a |
| | S | 0.027 ± 0.001e | 0.250 ± 0.002d | 0.053 ± 0.011b |
| | M | 0.025 ± 0.002e | 0.194 ± 0.004f | 0.053 ± 0.010b |
| | MS | 0.023 ± 0.003e | 0.211 ± 0.010e | 0.143 ± 0.053a |
| | F | 0.040 ± 0.003d | 0.206 ± 0.005e | 0.160 ± 0.015a |
| | SF | 0.048 ± 0.008bc | 0.404 ± 0.004a | 0.061 ± 0.007b |
| | MF | 0.042 ± 0.000cd | 0.206 ± 0.002e | 0.063 ± 0.001b |
| | MSF | 0.050 ± 0.000b | 0.264 ± 0.007c | 0.075 ± 0.007b |

在内蒙古东部地区，玉米的生长季节一般为5月中下旬至10月中下旬，而土壤盐分的运移主要与降水和灌溉有关，图2表明，与CK相比，S、M、MS、F、SF、MF和MSF各处理均有效降低了0 ~ 10 cm 土层含盐量，分别降低了0.742、0.642、

0.412、0.145、0.415、0.492和0.478 g/kg，而随着土层深度的增加，不同处理的土壤盐分含量在60 ~ 80 cm 土层都达到了最大值。

2.2 不同培肥措施对西辽河平原盐碱化耕地土壤pH、碱化度的影响

从表4可知，在0 ~ 10 cm 土层，S、M和MS处理后的土壤pH较CK分别增加了0.16、0.16和0.23，而F、MF、MSF处理均降低了土壤pH，其中MF处理降幅效果最为显著，较CK显著降低了13.41% ($P<0.05$)。在10 ~ 20 cm 土层，pH值的降低幅度在0.03 ~ 1.44，此外，不同处理不仅能对表层土壤的pH有降低效果，对下层土壤的pH也能起到积极作用。从表5可知，针对0 ~ 10 cm 土层，CK处理的碱化度达到12.27%，为中度碱性土壤，各处理均能显著降低土壤的碱化度，降低幅度在4.97% ~ 35.45%，说明土壤盐碱化程度降低，其中效果最好的处理为MF ($P<0.05$)，且碱化度随着土层深度的增加而升高。

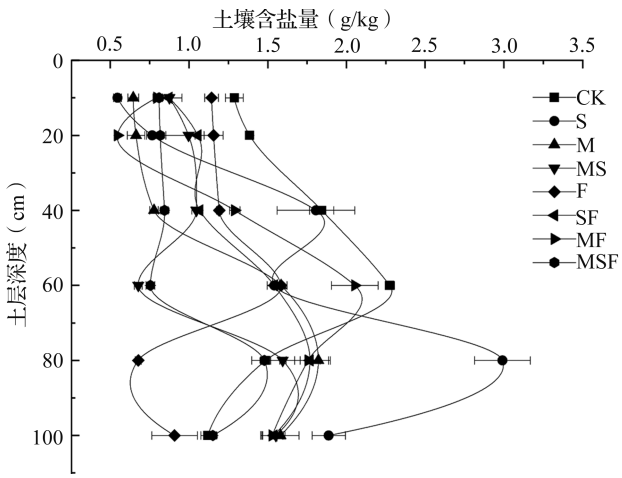


图2 不同培肥措施对土壤含盐量的影响

表4 不同培肥措施对土壤pH的影响

| 处理 | 土层深度 | | | | | |
|-----|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 ~ 10 cm | 10 ~ 20 cm | 20 ~ 40 cm | 40 ~ 60 cm | 60 ~ 80 cm | 80 ~ 100 cm |
| CK | 9.17 ± 0.25a | 9.23 ± 0.15a | 9.47 ± 0.38ab | 9.97 ± 0.42a | 10.13 ± 0.12a | 10.17 ± 0.06a |
| S | 9.33 ± 0.12a | 9.37 ± 0.15a | 9.73 ± 0.38ab | 9.97 ± 0.42a | 10.13 ± 0.16a | 10.17 ± 0.06a |
| M | 9.33 ± 0.12a | 9.20 ± 0.27a | 9.23 ± 0.06ab | 9.50 ± 0.61ab | 9.90 ± 0.56ab | 10.00 ± 0.52a |
| MS | 9.40 ± 0.26a | 9.43 ± 0.25a | 9.93 ± 0.32a | 10.27 ± 0.21a | 10.37 ± 0.12a | 10.37 ± 0.31b |
| F | 8.61 ± 0.52b | 8.61 ± 0.46b | 8.36 ± 0.68c | 8.37 ± 1.06ab | 9.20 ± 0.79bc | 9.10 ± 0.68b |
| SF | 9.01 ± 0.02ab | 9.09 ± 0.11a | 9.16 ± 0.15b | 9.56 ± 0.49ab | 9.79 ± 0.41ab | 9.78 ± 0.43a |
| MF | 7.94 ± 0.17c | 7.79 ± 0.19c | 8.35 ± 0.53c | 8.77 ± 0.35bc | 8.88 ± 0.21c | 8.86 ± 0.24a |
| MSF | 7.96 ± 0.05c | 8.05 ± 0.23c | 7.94 ± 0.16c | 8.66 ± 0.46c | 8.90 ± 0.25c | 8.90 ± 0.18b |

表 5 不同培肥措施对土壤碱化度的影响 (%)

| 处理 | 土层深度 | | |
|-----|-----------------|----------------|----------------|
| | 0 ~ 10 cm | 10 ~ 20 cm | 20 ~ 40 cm |
| CK | 12.27 ± 0.72a | 14.96 ± 0.63a | 36.37 ± 2.19a |
| S | 10.48 ± 1.21abc | 12.18 ± 1.55cd | 21.88 ± 4.19c |
| M | 10.10 ± 1.23bc | 12.88 ± 0.60bc | 17.97 ± 2.13c |
| MS | 9.50 ± 1.43cd | 11.31 ± 0.45d | 32.60 ± 5.63ab |
| F | 11.66 ± 0.97ab | 10.95 ± 0.65d | 16.62 ± 0.39c |
| SF | 9.54 ± 1.08cd | 10.89 ± 0.23d | 19.87 ± 0.44c |
| MF | 7.92 ± 1.04d | 12.14 ± 0.75cd | 20.62 ± 1.59c |
| MSF | 11.28 ± 0.75abc | 13.66 ± 0.22b | 29.73 ± 0.29b |

2.3 不同培肥措施对西辽河平原盐碱化耕地玉米产量的影响

玉米是我国重要的粮食作物和饲料作物，在我国的种植范围广泛，由图 3 可以看出，不同处理均能起到保产、增产的作用。其中 MSF 处理增产幅度最大，增产 58.87%，F 处理增产最小，增产了 11.35%，方差分析结果表明，M、MF 和 MSF 处理相比于 CK 差异显著 ($P<0.05$)，此外，这 3 个处理的百粒重相比于 CK 有显著的提高 ($P<0.05$)，分别增重 3.74、3.91 和 4.63 g (图 4)。

2.4 不同培肥措施对西辽河平原盐碱化耕地土壤理化性质及产量的相关性分析

不同施肥处理 0 ~ 10 cm 土层土壤养分含量与土壤盐碱化参数以及玉米产量变化的相关性分析结果 (表 6) 显示，产量与有机质、全氮、有效磷呈极显著的正相关，与 pH 呈显著负相关；土壤盐分含量与全氮、有机质、速效钾、有效磷含量均呈显著负相关。土壤 pH 则与全氮、有机质、有效磷含量呈极显著负相关。

表 6 盐碱化耕地各指标间的相关性

| 指标 | 全氮 | 有机质 | 速效钾 | 有效磷 | pH | 盐分 | 产量 |
|-----|----------|---------|--------|---------|--------|-------|-------|
| 有机质 | 0.88*** | | | | | | |
| 速效钾 | 0.46* | 0.37 | | | | | |
| 有效磷 | 0.91*** | 0.88*** | 0.40 | | | | |
| pH | -0.65*** | -0.55** | -0.28 | -0.52** | | | |
| 盐分 | -0.47* | -0.47* | -0.48* | -0.62** | -0.05 | | |
| 产量 | 0.64*** | 0.68*** | 0.18 | 0.70*** | -0.43* | -0.37 | |
| 碱化度 | -0.47* | -0.38 | -0.49* | -0.48* | 0.16 | 0.44* | -0.19 |

注：*、** 和 *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上的相关显著性。

3 讨论

3.1 不同培肥措施对土壤盐碱特征的影响

土壤盐化和碱化指标以及盐分离子的含量

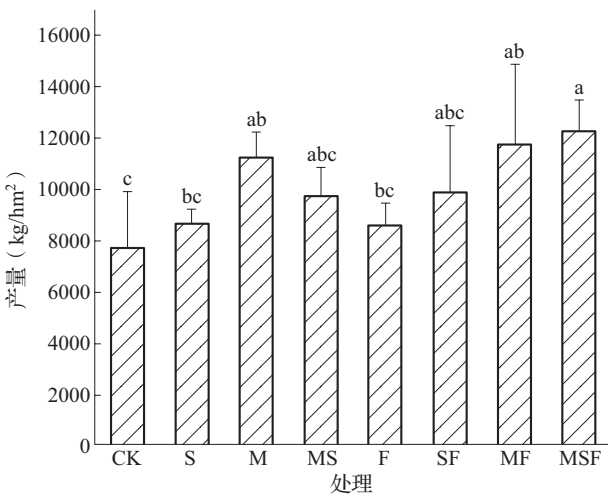


图 3 不同培肥措施对玉米产量的影响

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

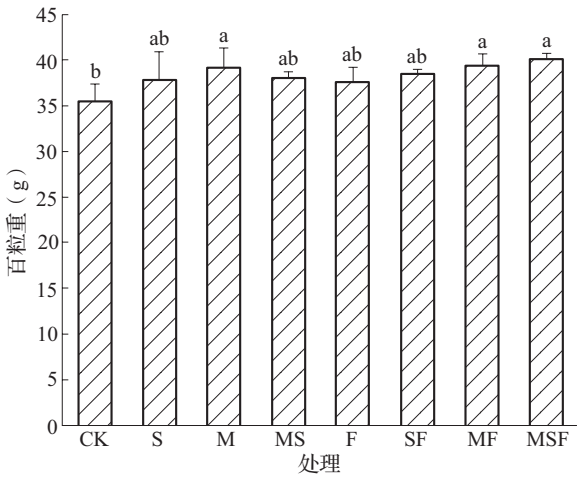
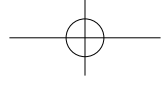


图 4 不同培肥措施对玉米籽粒百粒重的影响

可以真实地反映土壤的盐碱化情况，土壤 pH 和碱化度是土壤的重要基础性质，本研究发现，S、M、F、MS、MF、SF 和 MSF 处理均不同程度影响土壤盐碱含量。其中 MSF 和 MF 处理显著降低



了土壤 pH 以及水溶性盐和其他盐分离子的含量。MSF 和 MF 处理下土壤 0 ~ 10 cm 土层内 pH 降低幅度为 13.20% ~ 13.41%，土壤盐分的降低幅度为 37.10% ~ 38.22%，土壤碱化度的降低幅度为 4.97% ~ 35.45%。在一定程度上可以起到改良盐碱土的效果。此外，时佳琦等^[24]也发现，盐碱土添加玉米秸秆极显著降低了土壤 pH。赵海成等^[25]则通过连续 4 年秸秆还田，发现可以不同程度降低盐碱土容重、pH，且还田量越大降低幅度越大，其中秸秆还田相较于其他处理后的 pH 达到了极显著水平。这是因为，一方面秸秆还田可以不同程度地提高土壤有机质含量，有机质中的大分子羧基又对碱性离子起到一定的中和作用，此外，秸秆在微生物的作用下腐解，促进了土壤腐植酸和有机酸的形成，进而起到改良碱土的作用；另一方面，有机肥也可以吸附盐碱土中的 Na^+ ，而且在分解过程中产生大量有机酸，中和土壤碱度，进而降低了土壤 pH^[26]。但本研究中 S、M、MS 处理后的土壤 pH 相较于 CK 有提升趋势但不显著 ($P>0.05$)，其原因可能是一方面秸秆本身含有的碱性物质以及添加秸秆后，土壤中发生有机氮的矿化作用加速了去羧化作用，同时又产生新的碱性物质和官能团等使土壤 pH 上升^[27-29]；另一方面由于有机肥（腐熟的牛粪）自身呈弱碱性，在其分解过程中会产生大量的碱性物质，因而提高了土壤 pH 值。本文的研究结果与解开治等^[30]类似。王庆蒙等^[31]也发现在作物生育期内，不同培肥措施的土壤 pH 值变化差异不显著。此外，Naramabye 等^[32]的研究结果也表明，长期施用牛粪和鸡粪等有机肥可显著提高土壤 pH 和土壤盐分含量。

本试验中秸秆和有机肥的施用改善了土壤的盐基离子组成，如水溶性的 Na^+ 和 Cl^- 等对植物生长有害的盐离子均显著减少，主要是因为秸秆与土壤相比，孔隙度大，毛管力弱，有效改变了土壤水盐时空分布特征，改变了土壤质地的均匀性和土体构型，使土水势在交界面发生突变，导致水分入渗形式也发生相应变化，在入渗过程中可以增加土壤含水率，降低土壤含盐量；蒸发过程中可以将盐分控制在底土层中，抑制了土壤返盐^[33-35]；另外，秸秆腐解产生的有机酸中的羧基分子具有化学活性和生物活性，显著增强了 Ca^{2+} 与 Na^+ 的置换作用^[36]，且有机肥的添加使得腐殖质胶体中含有较多的羧

基、酚基、烯醇基、酚羟基等功能团，增加了与阳离子进行交换位点，所以土壤胶体中的交换性 Na^+ 被 Ca^{2+} 以及其他离子交换淋洗到深层^[37-38]。这与前人研究结果基本保持一致，徐国伟等^[39]、黄强等^[40]发现，施用麦秸还田、有机肥可以明显减少土壤表层盐分积累，降低 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量。

3.2 不同培肥措施对玉米产量的影响

本研究结果表明，所有培肥措施均能显著提高玉米产量，其中 MSF、MS、MF 处理均高于 S 处理，且 S 处理与 CK 并不显著。关于秸秆还田对玉米产量影响的研究还有很多，但不同土壤类型和不同气候类型所得的结果差距甚远，本研究结果显示 CK 与 S 处理相比，产量未见显著变化，主要原因可能是，一方面碳氮比过大，秸秆腐解过程中会出现微生物与作物争夺氮素的现象^[41]，缺氮导致秸秆腐解不完全，影响养分含量，进而影响作物产量；另一方面可能是降水和水分的因素，玉米秸秆在土壤水分为 16% ~ 20% 时，腐解速率最快，土壤水分过高或过低，腐解率都会降低，另外，秸秆过长也不利于秸秆腐解，进而影响作物生长，最终影响作物产量^[42-43]。此外，毛玉梅等^[44]研究发现，限制玉米生长的主要因素是土壤盐渍化，而不是无机氮、磷、钾等养分。

4 结论

(1) 有机肥、化肥、秸秆还田三者配合施用能有效降低土壤 pH，改善土壤离子组成，降低土壤有害离子含量，与不施肥（对照）相比，有机肥 + 秸秆还田 + 化肥在降低含盐量方面效果最佳，盐分含量最大降幅为 38.22%， Cl^- 含量最大降幅为 0.035 g/kg，其他处理也均能显著降低有害离子 Cl^- 和 Na^+ 含量。有机肥 + 化肥则在降低碱化度方面效果最佳，相比于不施肥（对照）降低了 35.45%。此外，有机肥 + 秸秆还田 + 化肥和有机肥 + 化肥对降低土壤 pH 效果较好，分别降低了 1.21 和 1.23。

(2) 有机肥、化肥、秸秆三者配合施用均可以在一定程度上促进作物生长发育，增加百粒重，并最终提高玉米产量。其中有机肥 + 秸秆还田 + 化肥处理产量最高，比对照提高了 58.87%。

(3) 相关分析表明，玉米产量与有机质、全氮、有效磷呈极显著正相关，与 pH 呈显著负相关。

因此，针对西辽河盐碱化耕地状况，建议在

以后生产实践中采用有机肥、化肥、秸秆还田三者配合施用，能够显著地改良土壤并起到增产的作用。

参考文献：

[1] 温利强. 我国盐渍土的成因及分布特征 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

[2] 江杰, 王胜. 我国盐碱地成因及改良利用现状 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48 (13): 85-87.

[3] 徐绍史. 坚决守住 18 亿亩耕地红线 [J]. 国家行政学院学报, 2008 (1): 8-11.

[4] 矫丽娜, 张福胜, 姚影, 等. 西辽河流域半干旱区农业节水灌溉技术发展过程及展望 [J]. 安徽农学通报, 2021, 27 (13): 164-165.

[5] 李莹莹, 张东旭, 王宏辉, 等. 喷施宝水溶肥对科尔沁区玉米光合特性及产量的影响 [J]. 现代农村科技, 2022 (5): 63-64.

[6] 何俊仕, 王志新, 付玉娟, 等. 西辽河平原土地利用/覆被变化特征分析 [J]. 中国农村水利水电, 2016 (11): 66-69, 73.

[7] 红梅, 银山, 包玉海, 等. 内蒙古西辽河流域荒漠化分析研究 [J]. 水土保持研究, 2014, 21 (6): 324-328.

[8] 庞志伟. 内蒙古西辽河平原地质水源环境治理措施 [J]. 内蒙古水利, 2020 (1): 38-39.

[9] 范富, 张庆国, 邵继承, 等. 通辽市盐碱地形成及类型划分 [J]. 内蒙古民族大学学报 (自然科学版), 2009, 24 (4): 409-413.

[10] Zhu W, Yang J S, Yao R J, et al. Soil water and salt transport in medium and heavy saline soils of Yellow River Delta [J]. Soils, 2021, 53 (4): 817-825.

[11] 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.

[12] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (2): 374-380.

[13] Turmel M S, Speratti A, Baudron F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis [J]. Agricultural Systems, 2015, 134: 6-16.

[14] 毕于运, 高春雨, 王亚静. 高效利用秸秆资源全面建设社会主义新农村 [C]//2008 中国农村生物质能源国际研讨会暨东盟与中日韩生物质能源论坛, 2008.

[15] 张鑫. 不同秸秆还田模式对盐碱地土壤理化性质及碳库的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.

[16] 朱丽君, 李布青, 施六林, 等. 小麦秸秆还田对玉米生长发育及产量的影响初探 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (9): 123-128.

[17] 张曼玉, 杨海昌, 张风华, 等. 秸秆还田方式对盐碱土壤微观结构和理化性质的影响 [J]. 节水灌溉, 2022 (5): 65-70.

[18] 王丹, 黄超, 李小东, 等. 脱硫石膏配施不同量有机物料对盐碱土壤改良效果及作物产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37 (1): 34-40.

[19] 向姣, 王著峰, 王玉刚, 等. 长期不同施肥对新疆荒漠农田土壤碳含量及其剖面分布的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (4): 333-341.

[20] 王楠, 张鑫, 刘金华, 等. 玉米秸秆和 $Al_2(SO_4)_3$ 对苏打盐碱土主要盐碱化指标的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (5): 134-140.

[21] Yang H, Xia J, Xie W, et al. Effects of straw returning and nitrogen addition on soil quality of a coastal saline soil: a field study of four consecutive wheat-maize cycles [J]. Land Degradation & Development, 2023, 34 (7): 2061-2072.

[22] 俞仁培, 陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用 [J]. 土壤通报, 1999 (4): 15-16, 34.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[24] 时佳琦, 萨如拉, 令玉, 等. 盐碱土秸秆添加量对玉米种子萌发及幼苗生长特性的影响 [J]. 中国农学通报, 2021, 37 (36): 13-18.

[25] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土壤理化性状及水稻产量的影响 [J]. 西南农业学报, 2018, 31 (9): 1836-1844.

[26] 高利华, 屈忠义, 丁艳宏, 等. 秸秆不同还田方式对土壤理化性质及玉米产量的影响研究 [J]. 中国农村水利水电, 2016 (9): 28-34.

[27] Yuan J H, Xu R K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China [J]. Soil Research, 2012, 50 (7): 570.

[28] 柴洪星, 郭祥林, 吴畏等. 河沙与有机肥对盐碱土改良效果及作物生长指标的影响 [J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2023, 37 (6): 39-45.

[29] 杨彩迪, 卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响 [J]. 环境科学, 2020, 41 (9): 4246-4252.

[30] 解开治, 徐培智, 蒋瑞萍, 等. 有机无机肥配施提升冷浸田土壤氮转化相关微生物丰度和水稻产量 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (5): 1267-1277.

[31] 王庆蒙, 景宇鹏, 李跃进, 等. 不同培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.

[32] Naramabuye F X, Haynes R J. The liming effect of five organic manures when incubated with an acid soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170: 615-622.

[33] 王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究 [J]. 土壤学报, 2017, 54 (6): 1395-1403.

[34] 赵永敢, 王婧, 李玉义, 等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (23): 109-117.

- [35] 赵永敢. “上膜下秸”调控河套灌区盐渍土水盐运移过程与机理 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [36] 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 等. 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 [J]. 环境科学, 2023, 44 (7): 4119-4129.
- [37] 张莉. 黄淮海平原玉米秸秆颗粒还田的培肥效应与机制 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [38] 米迎宾, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响 [J]. 土壤学报, 2016, 53 (3): 612-620.
- [39] 徐国伟, 段骅, 王志琴, 等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (3): 934-942.
- [40] 黄强, 殷志刚, 田长彦, 等. 施有机肥条件下的土壤溶液盐分变化动态 [J]. 干旱区研究, 2001 (1): 53-56.
- [41] 吕开宇, 仇焕广, 白军飞, 等. 中国玉米秸秆直接还田的现状与发展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23 (3): 171-176.
- [42] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征 [J]. 中国农业科学, 2011, 44 (16): 3351-3360.
- [43] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (15): 116-125.
- [44] 毛玉梅, 李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究 [J]. 中国环境科学, 2016, 36 (1): 225-231.

Effects of different fertilization measures on salinity characteristics and crop yield of salinized cultivated land in the West Liaohe Plain

ZHAO Bin^{1, 4}, LIU Mei-ying^{1*}, JING Yu-peng^{2*}, SHI Pei², DUAN Hai-wen², ZHANG Lan-ying², ZHANG Dong-xu³, SHEN Xiang-jun³ (1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources of Inner Mongolia Autonomous Region, Key Laboratory of Agricultural Ecological Safety and Green Development of Autonomous Region Universities, Hohhot Inner Mongolia 010011; 2. Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Hohhot Inner Mongolia 010031; 3. Agricultural Technology Extension Center of Kerqin District, Tongliao Inner Mongolia 028000; 4. Baotou Institute of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Baotou Inner Mongolia 014013)

Abstract: Under field test condition, eight kinds of fertilization treatments were set up in the salineized cultivated land of the West Liaohe Plain, namely control (CK), organic fertilizer (M), straw return (S), chemical fertilizer (F), organic fertilizer+straw return (MS), organic fertilizer+chemical fertilizer (MF), straw return+chemical fertilizer (SF), organic fertilizer+straw return+chemical fertilizer (MSF), and the effects of different fertilization measures on soil salinity characteristics and maize yield in salineized cultivated land were studied. The results showed that the pH was significantly lower than that without fertilization ($P<0.05$) under the application of MF and MSF, and the soil pH was the lowest in MF treatment and 13.41% lower than that of CK in the 0-10 cm soil layer. The alkalization degree was the lowest in MF treatment, which was 35.45% lower than that of CK. Compared with CK, all fertilization treatments significantly reduced the content of harmful ions Cl^- and Na^+ , and the differences between treatments were significant. It could be seen that the addition of organic fertilizer and straw had an obvious effect on the improvement of soil physical and chemical properties. MSF treatment processed the highest yield of corn, reaching 12231 kg/hm^2 , with an increase of 58.87%, compared with CK. There was a significant positive correlation between yield and organic matter, total nitrogen and available phosphorus, and a significant negative correlation with pH. It was concluded that the combined application of organic fertilizer, straw return and chemical fertilizer could significantly improve soil fertility and thus increase crop yield. The research results could provide a scientific basis for the improvement and utilization of salinized arable land and the comprehensive utilization of straw in the West Liaohe Plain.

Key words: corn; salinized arable land; organic fertilizer; returning straw to the field; chemical fertilizer; soil fertilization