

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.05.019

秦子元, 邬佳宾, 郑和祥, 等. 不同饲料作物对苏打盐碱土改良效应研究. 土壤, 2023, 55(5): 1088–1096.

不同饲料作物对苏打盐碱土改良效应研究^①

秦子元¹, 邬佳宾^{1*}, 郑和祥¹, 李天佑², 周裕栋³, 王 军², 高春山⁴

(1 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 呼和浩特 010020; 2 达拉特旗水利事业发展中心, 内蒙古鄂尔多斯 017000; 3 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏镇江 212013; 4 鄂托克旗水利局, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘要: 为探明不同饲料作物种植对苏打盐碱土改良的影响, 以内蒙古科尔沁旗苏打盐碱地为研究对象, 设置 3 个土壤等级(中、良、优)和 5 个饲料作物种类(高丹草、稗草、青贮玉米、湖南稷子、甜高粱), 共计 15 个处理, 研究不同土壤等级下, 饲料作物对土壤盐化碱化、养分含量变化的影响, 并根据模糊物元-熵权模型进行土壤改良效应评价。结果表明: 饲料作物收获后土壤平均 pH 较播种前降低 1.64%, 种植前后土壤 pH 差异不显著; 土壤 EC、总可溶性盐、碱化度显著降低($P<0.05$)。不同饲料作物种植降低土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 含量, 提高土壤 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Cl^- 含量, 对土壤 SO_4^{2-} 含量影响存在差异, 收获后土壤碱解氮和速效钾含量比播种前分别降低 15.15%、24.06%。基于模糊物元-熵权模型得出, 青贮玉米对土壤盐渍化程度较高的土壤改良效果更佳, 而甜高粱与高丹草更适合盐渍化较轻土壤的改良。土壤盐化碱化参数受盐离子浓度的影响高于土壤养分指标, 速效钾与总可溶性盐、碱化度、EC 间呈显著正相关($P<0.05$), 说明土壤盐碱指标增加在一定程度上促进土壤速效钾的积累和转化。总体上, 饲料作物在苏打盐碱地种植是可行的, 在抑制土壤盐渍化方面有一定效果。

关键词: 饲料作物; 苏打盐碱土; 土壤改良; 模糊物元-熵权模型

中图分类号: X53 文献标志码: A

Improvement Effects of Different Feed Crops on Soda Saline-alkali Soil

QIN Ziyuan¹, WU Jiabin^{1*}, ZHENG Hexiang¹, LI Tianyou², ZHOU Yudong³, WANG Jun², GAO Chunshan⁴

(1 *Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China*; 2 *Dalad Banner Water Conservancy Development Center, Ordos, Inner Mongolia 017000, China*; 3 *Engineering Technology Research Center of Fluid Machinery, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*; 4 *Etoke Banner Water Conservancy Bureau, Ordos, Inner Mongolia 017000, China*)

Abstract: In this study, soda saline-alkali soil in Horqin Banner, Inner Mongolia was selected as the research object with 3 soil quality grades (medium, good and excellent) and 5 forage crop species (Gaodan grass, barnyard grass, silage corn, Hunan millet, sweet sorghum) to study the effects of forage crops on soil salinization and alkalization and nutrient contents, and soil improvement effects were evaluated according to the fuzzy matter-entropy weight model. The results showed that average soil pH after crop harvest decreased by 1.64% but not significantly different compared with that before crop sowing, while EC, total soluble salt and alkalinity degree significantly decreased ($P<0.05$). Different forage crops decreased Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ contents while increased soil $\text{K}^+ + \text{Na}^+$, Cl^- contents, while had different effects on SO_4^{2-} content. After harvest, alkali-hydrolyzed nitrogen and available potassium contents decreased by 15.15% and 24.06%, respectively, compared with those before crop sowing. Fuzzy matter-entropy weight model showed that silage corn had better improvement effect on soil with higher salinization while sweet sorghum and Gaodan grass were more suitable for soil with less salinization. Soil salinization and alkalization parameters were more affected by salt ion concentration than soil nutrient index. Available potassium was positively correlated with total soluble salt, alkalization degree and EC ($P<0.05$), indicating that the increase of saline-alkali index promoted the accumulation and transformation of available

①基金项目: 内蒙古自治区主席基金项目(202076)、内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2021CG0003)和国家外国专家项目(G2022005010L)资助。

* 通讯作者(mkswj@163.com)

作者简介: 秦子元(1995—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 工程师, 主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail: 598760724@qq.com

potassium to a certain extent. In conclusion, forage crops are feasible for soda saline-alkali soil improvement with a certain effect in inhibiting soil salinization.

Key words: Forage crops; Soda saline-alkali soil; Soil improvement; Fuzzy matter-entropy weight model

我国盐碱土总面积约为 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 分布范围较广, 占全国可利用土地面积的 4.88%^[1]。受半干旱季风气候、地下水状况以及元素迁移的地球化学过程等因素的影响, 内蒙古通辽科尔沁左翼中旗境内形成了大面积的盐碱土, 盐碱化土壤类型以苏打盐化土为主, 耕地盐碱化情况严重, 其中盐碱化耕地面积 $1.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 轻度盐碱耕地 $6.60 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占 51.1%; 中度盐碱耕地 $4.79 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占 37.1%; 重度盐碱耕地 $1.53 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占 11.8%^[2]。苏打盐碱土的主要特性是含有较多的水溶性盐或碱性物质, 使土壤腐殖质易遭淋失, 土壤结构易受破坏, 表现为湿时黏、干时硬, 土表常有白色盐分沉淀, 透水透气性变差, 严重的会造成作物萎蔫、中毒和烂根死亡^[3]。因此, 要对大面积的苏打盐碱地进行合理开发利用, 必须进行土壤改良。

目前国内外对于苏打盐碱地的改良已进行了一系列研究^[4-8]。农业措施包括耕作、灌水和培肥等, 化学改良措施包括生物质炭、石膏、腐殖酸和硫酸铝添加等, 但农业措施、化学改良措施都存在成本高、改良效果不持久、局限性大等短板, 且化学改良剂的添加作为外来物质会不会影响当地土壤生态健康也没有长期试验进行研究验证^[9]。近年来, 随着科尔沁左翼中旗农区畜牧业的持续发展, 原有以玉米秸秆黄贮为主的饲料供给已不能完全满足畜牧业发展的需求, 草畜矛盾突出。在区域草畜矛盾、土壤盐渍化加重的背景下, 苏打盐碱地耐盐碱饲料作物种植因其环境友好性在土壤改良技术中备受重视^[10]。饲料作物种植不仅能改善土壤理化性状、抑制土壤返盐, 并可通过收获地上部而获得经济效益^[11]。目前, 部分农户尝试盐碱地适宜饲料作物的种植, 但缺乏完整成熟的与科尔沁左翼中旗条件相适应的盐碱地适宜饲料作物类型筛选机制, 且不同盐碱等级土壤的适宜作物尚不清楚, 难以保障改土肥田的绿色农业可持续发展。

为此, 本文选取具备一定盐碱地适应能力的 5 种饲料作物, 在不同土壤盐碱等级条件下研究饲草种植对盐碱土壤盐化碱化参数、盐离子含量、土壤养分指标的影响, 并利用模糊物元-熵权模型进行土壤改良效应评价, 以期对苏打盐碱地的改良提供技术与理

论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗(121°08'E ~ 123°32'E, 43°32'N ~ 44°32'N), 地处通辽市东北端, 西北接大兴安岭, 南临西辽河, 东与吉林省长岭县毗邻, 是内蒙古高原与松辽平原的过渡带。科尔沁左翼中旗为温带大陆性季风气候, 春季回暖快、风沙多, 夏季雨热同期、暖热多雨, 秋季短促、降温迅速, 冬季寒冷干燥, 气温年变化大。全年无霜期约 140 d, 多年平均气温 5.53 °C, 多年平均蒸发量为 1 897.4 mm, 多年平均降水量 346.3 mm, 降水多集中在 6—8 月。全旗经济以农为主, 农牧结合, 具有粮多、秸秆多、牲畜头数多的资源优势, 发展农区畜牧业有较大潜力。试验前耕层土壤(0 ~ 20 cm)基本理化性质如下: 总可溶性盐 1.21 g/kg, 碱化度 11.44%, pH 8.83, 有机质 22.61 g/kg, 全氮 1.31 g/kg, 碱解氮 74.17 mg/kg, 有效磷 35.22 mg/kg, 速效钾 290.76 mg/kg。

1.2 试验设计

试验始于 2020 年, 选取具备一定盐碱地适应能力的 8 种饲料作物类型包括青贮玉米、高丹草、湖南稷子、甜高粱、苏丹草、黑麦草、蛋白桑、稗草进行田间对比试验。除蛋白桑移栽大田后出现死苗情况外, 其余饲料作物均能正常出苗。结合碱化度、牧草长势及产量将研究区苏打盐碱土分为优、良、中 3 个等级。2021 年优选 5 种饲料作物进行研究, 分别是青贮玉米、高丹草、湖南稷子、甜高粱、稗草。采用土壤盐碱等级和饲料作物种类 2 因素全面试验, 试验共计 15 个处理, 每个处理 3 次重复, 共计 45 个试验小区, 随机区组排列。试验小区面积为 48 m^2 (4 m × 12 m), 小区间设置 2 m 宽隔离带, 消除小区间相互干扰。土地整理技术采用深松 30 cm, 联合整地, 采用 40 cm 和 80 cm 大小行种植模式, 播种、铺管、施肥一次性机械作业完成。浅埋滴灌每隔 15 d 左右灌溉一次, 每次灌水量 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 根据降水及土壤墒情适当调整。病虫害防控则遵循勤观察、早发现、早防治的原则, 对症施药。

1.3 测定项目与方法

于 2021 年饲草作物播种前(4 月)和收获后(10 月)在每个小区用土钻按照五点取样法采集耕层(0~20 cm)土壤样品,土壤样品混合均匀后带回实验室,剔除根茬碎石,自然阴干后研磨过 80 目筛。土壤 pH 和电导率(EC)采用 pH 计(LA-pH10, 美国 HACH)和电导率仪(DDS-11A, 上海精密仪器公司)在水土质量比为 5:1 时测定;阳离子交换量采用乙酸钠-火焰光度计法测定;K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺ 通过离子色谱仪测定(ICS-90A, 戴安中国有限公司);HCO₃⁻、CO₃²⁻采用双指示剂中和滴定法测定;Cl⁻采用硝酸银滴定法测定;SO₄²⁻采用 EDTA 容量法测定;有机质采用重铬酸钾氧化-容量法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用醋酸浸提-火焰光度计法测定。土壤总可溶性盐为 K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、CO₃²⁻、Cl⁻ 之和;土壤碱化度为土壤中交换性钠含量与阳离子交换量的比值。

1.4 模糊物元-熵权模型

采用模糊物元-熵权模型^[12-14]对不同土壤等级下饲料作物对土壤盐碱改良效果进行了综合评价,具体步骤如下。

1)构建复合模糊物元。对于某一事物如果可用名称、特征、量值(M, C, v)来描述其基本元,则 $R=(M, C, v)$ 可视为物元,其中 v 具有模糊性的话, R 可称为模糊物元。当 M 包括 n 个特征和量值,则 R 构成了 n 维模糊物元,当有 m 个事物和 n 个模糊物元则可构成复合模糊物元 R_{mn} , 即:

$$R_{mn} = \begin{pmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: M_i 为不同的 i 个事物($i=1, 2, \dots, m$); C_j 为不同的 j 个特征($j=1, 2, \dots, n$); x_{ij} 为第 i 个事物下特征 j 对应的量值。

2)从优隶属度模糊物元构建。根据从优隶属的原则计算模糊物元量值隶属度,不同土壤改良指标效用不同,为更好表达指标相对性,分为越大越优型和越小越优型两种指标,具体计算公式如下:

$$\text{越大越优型指标: } u(x_{ij}) = x_{ij} / q_{\max} \quad (2)$$

$$\text{越小越优型指标: } u(x_{ij}) = q_{\min} / x_{ij} \quad (3)$$

式中: $u(x_{ij})$ 为 x_{ij} 的从优隶属度; q_{\max} 、 q_{\min} 分别为

x_{ij} 对应指标的最大值和最小值。

从优隶属度模糊物元矩阵 R'_{mn} 构建如下所示:

$$R'_{mn} = \begin{pmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & u(x_{11}) & u(x_{21}) & \cdots & u(x_{m1}) \\ C_2 & u(x_{12}) & u(x_{22}) & \cdots & u(x_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & u(x_{1n}) & u(x_{2n}) & \cdots & u(x_{mn}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

3)熵权法确定权重。对从优隶属度模糊物元矩阵 R'_{mn} 中的每个 $u(x_{ij})$ 量值进行归一化处理,越大越优型和越小越优型两种指标计算公式如下:

$$\text{越大越优型指标: } b_{ij} = \frac{u(x_{ij}) - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

$$\text{越小越优型指标: } b_{ij} = \frac{x_{\max} - u(x_{ij})}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中: b_{ij} 为 $u(x_{ij})$ 对应的归一化值; x_{\max} 、 x_{\min} 分别为 $u(x_{ij})$ 对应指标的最大值和最小值。

计算评价指标熵值,具体计算步骤如下:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \left[\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right] \quad (7)$$

$$f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^m b_{ij}} \quad (8)$$

式中: H_i 为第 i 个事物对应的熵值; f_{ij} 为事物 i 在特征 j 中归一化值所占比例。

基于实际情况考虑,当 $f_{ij}=0$ 、 $f_{ij}=1$ 时,明显与熵所反映的信息无序化程度相悖,对 f_{ij} 进行修正,修正后公式如下:

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + b_{ij})} \quad (9)$$

计算评价指标权重 W :

$$W = (\omega_i)_{1 \times n} \quad (10)$$

式中: $\omega_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}$, 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

4)综合评价价值 Q_j 。计算公式如下:

$$Q_j = \sum_{i=1}^m w_j f_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

1.5 数据分析

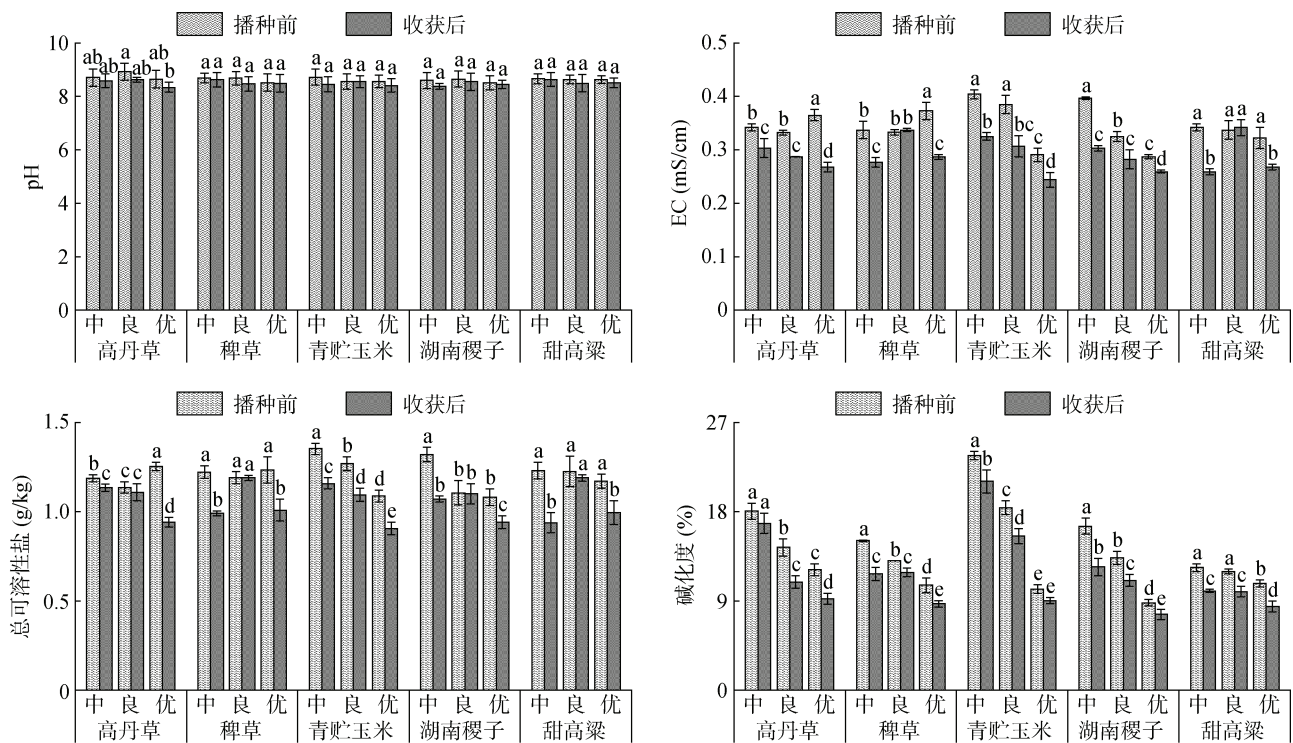
采用 Excel 2019 和 Origin 2022 处理数据及作图,利用 SPSS 27.0 进行统计分析。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)中 Duncan 法进行处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同饲料作物对土壤盐化和碱化参数的影响

不同饲料作物对土壤盐化和碱化参数的影响如图 1 所示。试验结果表明，土壤 pH 相对较为稳定，种植前后 pH 分别介于 8.51~8.93、8.34~8.63，种植饲料作物后土壤平均 pH 较种植前降低 1.64%，种植前后土壤 pH 差异不显著($P>0.05$)。土壤 EC 在相同饲料作物不同处理间差异显著($P<0.05$)，高丹草、稗草、青贮玉米、湖南稷子、甜高粱收获后土壤平均 EC 比播种前分别降低 17.18%、13.22%、18.68%、15.55%、13.19%；中、良、优土壤等级下，饲料作物收获后土壤平均 EC 比播种前分别降低 11.30%、6.81%、27.09%。土壤总可溶性盐在土壤等级为良时，种植前后土壤总

可溶性盐差异均不显著(青贮玉米除外)，高丹草、稗草、青贮玉米、湖南稷子、甜高粱收获后土壤平均总可溶性盐比播种前分别降低 10.56%、12.36%、14.96%、10.64%、13.87%；中、良、优土壤等级下，饲料作物收获后土壤平均总可溶性盐比播种前分别降低 16.04%、3.86%、17.52%。土壤碱化度随土壤等级提升而降低，相同饲料作物不同处理间差异显著($P<0.05$)，高丹草、稗草、青贮玉米、湖南稷子、甜高粱收获后土壤平均碱化度比播种前分别降低 18.33%、16.25%、12.63%、18.43%、19.23%；中、良、优土壤等级下，饲料作物收获后土壤平均碱化度比播种前分别降低 16.74%、16.56%、17.63%。综合来看，不同饲料作物种植在抑制盐渍化方面均有一定效果，当土壤等级为优时种植前后土壤盐化和碱化降幅最大。



(图中小写字母不同表示同一饲料作物不同土壤间及种植前后差异显著($P<0.05$), 下同)

图 1 不同饲料作物对土壤盐化和碱化参数的影响

Fig. 1 Soil salinization and alkalization parameters before and after planting different forage crops

2.2 不同饲料作物对土壤盐离子的影响

不同饲料作物对土壤盐离子的影响如图 2 所示。总体上，不同饲料作物种植降低土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 含量，提高土壤 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Cl^- 含量，对土壤 SO_4^{2-} 含量影响存在差异。饲料作物收获后土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 平均含量分别比播种前显著降低 29.33%、60.41%、43.36% ($P<0.05$)，其中青贮玉米土壤 Mg^{2+} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 平均含量降幅最大，

分别为 87.79% 和 62.56%；湖南稷子土壤 Ca^{2+} 平均含量降幅最大，为 55.94%。土壤质量为优时， Mg^{2+} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 含量降幅最大，分别为 72.96%、53.50%；土壤等级为中时， Ca^{2+} 平均含量降幅最大，为 56.66%。饲料作物收获后土壤 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Cl^- 平均含量分别比播种前显著提升 24.92%、68.33% ($P<0.05$)，其中青贮玉米土壤 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Cl^- 平均含量增幅最大，分别为 39.93% 和 119.19%。土壤质量为优时， $\text{K}^+ + \text{Na}^+$

平均含量增幅最大, 为 29.37%; 土壤质量为良时, Cl^- 平均含量增幅最大, 为 122.76%。饲料作物收获后土壤 SO_4^{2-} 平均含量比播种前降低 0.76%, 稗草和甜高粱收获后土壤平均 SO_4^{2-} 含量较播种前降低 1.17%、5.06%, 高丹草、青贮玉米、湖南稷子收获

后土壤平均 SO_4^{2-} 较播种前提高 6.75%、1.17%、1.32%。土壤等级为中、优时, 收获后土壤平均 SO_4^{2-} 含量较播种前提高 18.67%、13.86%; 土壤等级为良时, 收获后土壤平均 SO_4^{2-} 含量较播种前降低 24.79%。

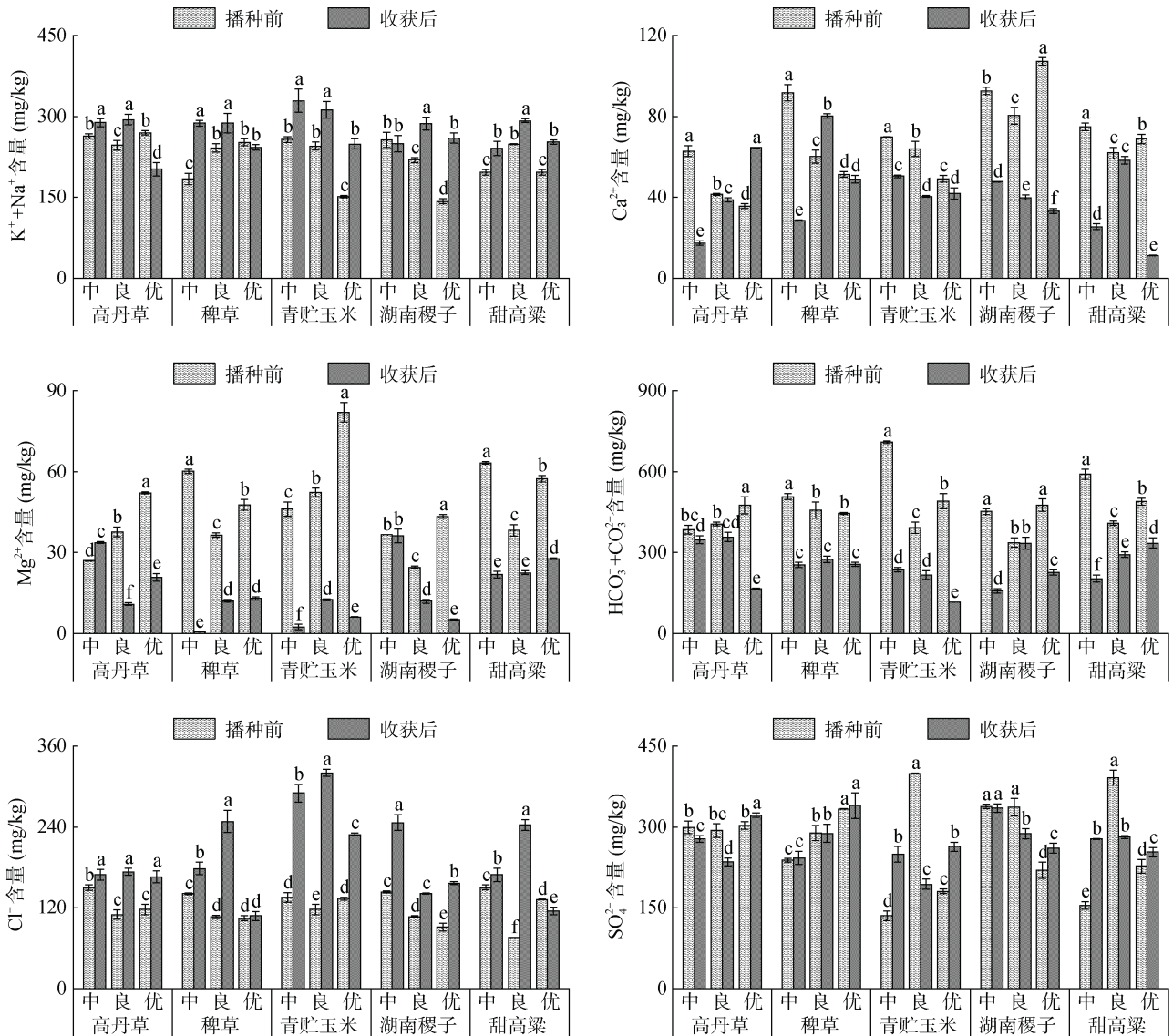


图 2 不同饲料作物对土壤盐离子的影响

Fig. 2 Soil salt ions before and after planting different forage crops

2.3 不同饲料作物对土壤养分的影响

不同饲料作物对土壤养分的影响如图 3 所示。总体上, 不同饲料作物种植后显著降低土壤碱解氮和速效钾含量 ($P < 0.05$), 饲料作物收获后土壤碱解氮和速效钾含量比播种前分别降低 15.15%、24.06%。高丹草收获后土壤有机质平均含量较播种前提升 31.80%, 稗草、青贮玉米、湖南稷子、甜高粱收获后土壤有机质平均含量较播种前降低 6.42%、2.40%、7.20%、8.96%。土壤质量为中、良时, 收获后土壤

有机质平均含量较播种前分别提高 25.52%、1.77%; 土壤质量为优时, 土壤有机质平均含量较播种前降低 20.14%。高丹草、稗草、青贮玉米、湖南稷子收获后土壤碱解氮平均含量较播种前分别降低 0.38%、24.58%、14.67%、36.92%, 甜高粱收获后土壤碱解氮平均含量较播种前提高 8.54%。土壤质量为中、良时, 收获后土壤碱解氮平均含量较播种前分别降低 8.46%、34.91%; 土壤质量为优时, 土壤碱解氮平均含量较播种前提高 0.10%。高丹草、青贮玉米、湖南

稗草、甜高粱收获后土壤有效磷平均含量较播种前分别提高 0.43%、24.78%、7.15%、31.03%，稗草收获后土壤有效磷平均含量较播种前降低 34.62%。土壤质量为中时，收获后土壤有效磷平均含量较播种前降低 22.79%；土壤质量为良、优时，土壤有效磷平均含量较播种前分别提高 20.29%、12.06%。高丹草、

稗草、湖南稗子、甜高粱收获后土壤速效钾平均含量较播种前分别降低 21.48%、37.10%、39.44%、30.45%，青贮玉米收获后土壤速效钾平均含量较播种前提高 12.97%。土壤质量为中时，收获后土壤速效钾平均含量较播种前提高 7.92%；土壤质量为良、优时，土壤速效钾平均含量较播种前分别降低 20.31%、51.46%。

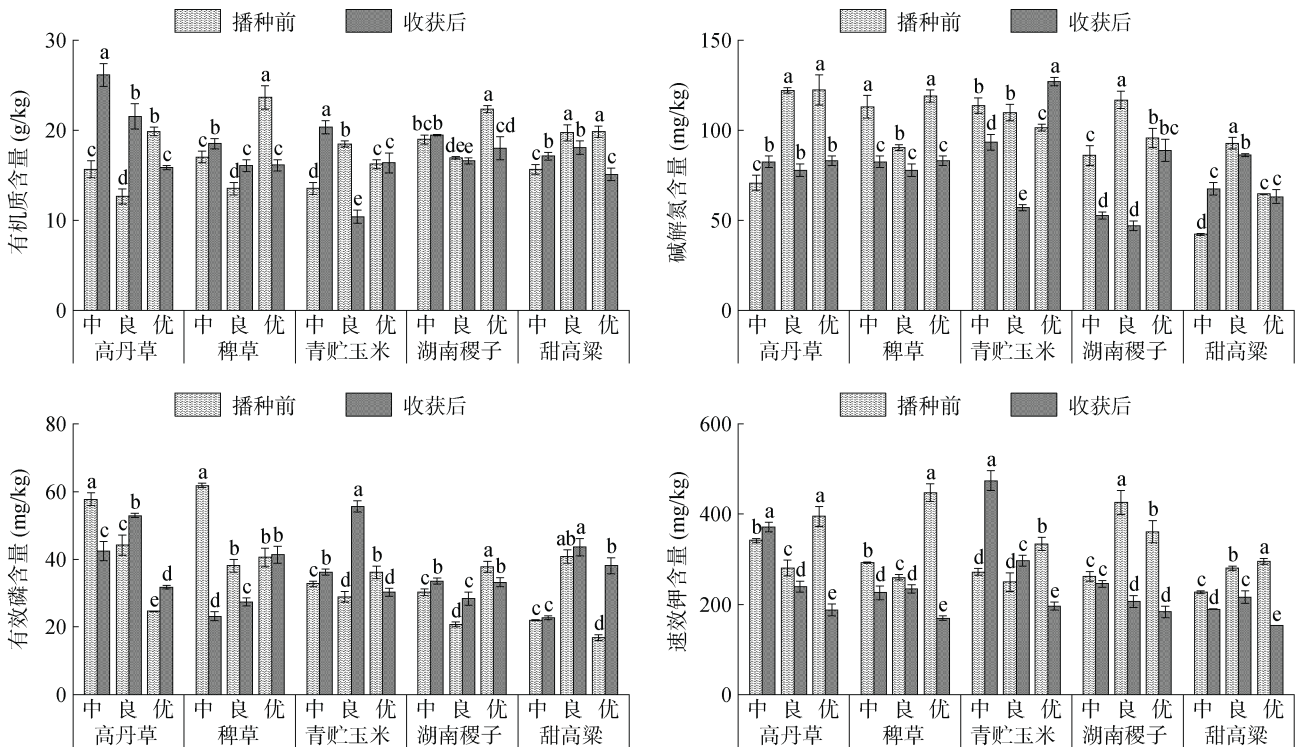


图 3 不同饲料作物对土壤养分的影响
Fig. 3 Soil nutrients before and after planting different forage crops

2.4 基于模糊物元-熵权模型的土壤改良效应

试验供试饲料作物为高丹草、稗草、青贮玉米、湖南稗子、甜高粱，共有 15 种不同的饲草、土壤等级处理，以 2021 年各项指标数据为例，评价指标包括总可溶性盐、碱化度、pH、有效磷、速效钾、有机质、碱解氮、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 、EC，各指标数据见表 1。基于模糊物元-熵权模型的综合评价可知，不同饲草、土壤等级处理评价结果与总可溶性盐、碱化度、pH、有效磷、速效钾、有机质、碱解氮、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 、EC 关联性大小介于 0.109 2 ~ 0.111 5。由图 4 可知，不同饲草、土壤等级处理通过模糊物元-熵权模型得到的综合评价从大到小排序依次为：青贮玉米中、甜高粱良、高丹草良、甜高粱优、高丹草中、高丹草优、湖南稗子中、稗草良、甜高粱中、青贮玉米优、稗草中、湖南稗子优、湖南稗子良、稗草优、青贮玉米良。排名前六的处理中，包括青贮玉米 1 个处理，甜高粱 2 个处理，高丹草 3 个处理，说明青贮玉米对土壤盐渍化程度

较高的土壤改良效果更佳，而甜高粱与高丹草更适合盐渍化较轻土壤的改良。通过模糊物元-熵权模型对不同饲草、土壤等级处理进行评价，与实际情况较为接近，说明该方法在内蒙古东部土壤盐渍化地区的应用是合理的，且计算简便易于推广，具有实用价值。

2.5 土壤养分与盐碱指标相关性

不同饲料作物种植土壤养分与盐碱指标相关性分析如图 5 所示。土壤总可溶性盐与碱化度、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、EC 间呈极显著正相关($P < 0.01$)，与 pH、速效钾呈显著正相关($P < 0.05$)；碱化度与 EC 间呈极显著正相关($P < 0.01$)，与 pH、速效钾、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 呈显著正相关($P < 0.05$)；pH 与 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 呈极显著正相关($P < 0.01$)，与 Cl^- 呈显著负相关($P < 0.05$)，与 Mg^{2+} 呈显著正相关($P < 0.05$)，说明土壤盐化碱化参数受盐离子浓度的影响高于土壤养分指标。速效钾与有机质、EC 间呈显著正相关($P < 0.05$)。 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 与 Cl^- 呈极显著负相关($P < 0.01$)，与

表 1 模糊物元-熵权模型评价指标
Table 1 Evaluation indexes of fuzzy matter-entropy weight model

饲料作物	土壤分级	总可溶性盐	碱化度	pH	有效磷	速效钾	有机质	碱解氮	HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻	EC
高丹草	中	-4.51	-6.83	-1.49	-26.60	8.64	66.66	32.72	-9.73	-11.40
	良	-2.25	-24.20	-3.47	19.68	-14.77	70.45	-35.91	-11.93	-13.55
	优	-24.91	-23.95	-3.47	29.27	-52.34	-20.25	15.94	-65.20	-26.58
稗草	中	-18.81	-22.05	-0.81	-62.62	-22.91	8.79	-27.06	-49.73	-17.80
	良	-0.04	-9.01	-2.53	-27.99	-10.00	19.03	-13.98	-40.06	1.20
	优	-18.23	-17.69	-0.35	1.85	-62.12	-31.91	-30.28	-42.24	-23.06
青贮玉米	中	-14.37	-10.92	-3.10	10.53	74.26	50.19	-17.95	-66.55	-19.55
	良	-13.77	-15.52	0.00	91.72	18.84	-43.75	-48.05	-44.85	-20.32
	优	-16.73	-11.46	-1.75	-16.07	-41.32	0.82	25.11	-76.28	-16.15
湖南稷子	中	-18.76	-24.86	-2.44	10.91	-6.30	2.48	-38.87	-65.23	-23.68
	良	-0.38	-16.99	-1.16	36.96	-51.47	-1.90	-59.77	-0.87	-13.23
	优	-12.78	-13.44	-0.82	-12.17	-49.31	-19.43	-7.27	-52.40	-9.76
甜高粱	中	-23.77	-19.03	-0.35	3.19	-16.52	9.17	59.75	-65.65	-24.27
	良	-2.86	-17.07	-1.51	6.74	-22.99	-8.28	-7.17	-28.38	1.48
	优	-14.97	-21.59	-1.27	126.11	-48.22	-23.96	-2.33	-31.36	-16.77

注：表中数据为饲料作物种植前后变化率，单位均为 %，负数表示播种前土壤指标数值高于收获后，正数反之。

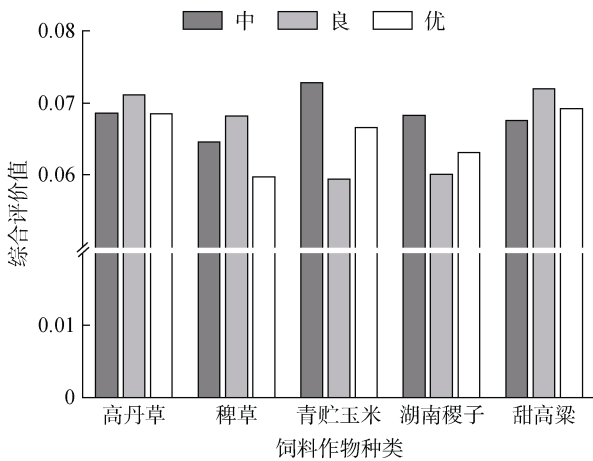
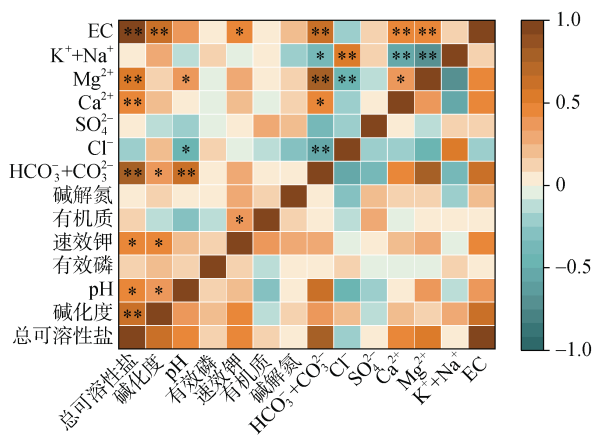


图 4 模糊物元-熵权模型的综合评价价值

Fig. 4 Comprehensive evaluation values of fuzzy matter-entropy weight model



(*表示指标间相关性达 P<0.05 显著水平, **表示指标间相关性达 P<0.01 显著水平)

图 5 不同饲料作物种植土壤养分与盐碱指标相关性
Fig. 5 Correlation analysis of soil nutrients and saline-alkali indexes of different forage crops

Mg²⁺、EC 间呈极显著正相关(P<0.01), 与 Ca²⁺ 呈显著正相关(P<0.05), 与 K⁺+Na⁺ 呈显著负相关(P<0.05); Cl⁻ 与 Mg²⁺ 呈极显著负相关(P<0.01), 与 K⁺+Na⁺ 呈极显著正相关(P<0.01); Ca²⁺、Mg²⁺ 与 K⁺+Na⁺ 呈极显著负相关(P<0.01), 与 EC 呈极显著正相关(P<0.01)。

3 讨论

作物与土壤间的交互效应十分复杂,对于盐渍化土壤改良的关键是压盐抑碱^[15]。在盐渍化土壤上种植耐盐碱作物,能够改变土壤理化性质,有利于土壤盐渍化改良,相比种植盐生植物也更具农业经济效益,但不同饲料作物类型对盐渍化土壤的影响存在较大差异^[16]。本研究表明,不同饲料作物种植后土壤平均 pH 较种植前降低 1.64%, 种植前后土壤 pH 差异不显著(P>0.05)。这是由于有机酸代谢和饲料作物抗盐碱关系密切,作物根系在盐渍等逆境胁迫的影响下,体内会合成大量脯氨酸并释放到根际,根系分泌物中如草酸、水杨酸、吲哚乙酸和脱落酸的分泌量也普遍增加^[17]。杨茜等^[18]关于低分子量有机酸对土壤性质的影响研究表明,土壤 pH 变化受低分子量有机酸的酸解作用和络合作用影响,且土壤 pH 随有机酸浓度升高而降低;李平和王兴祥^[19]研究得出有机酸种类、浓度和 pH 均对土壤 pH 影响显著,柠檬酸对土壤 pH 的影响大于草酸和苹果酸,有机酸浓度和土壤 pH 成反比,有机酸 pH 与土壤 pH 成正比;此外麻莹等^[20]研究发现,盐碱胁迫下抗碱牧草体内累积有机酸是维持细胞内离子平衡和调节 pH 的重要方

式,极大地提高了机体容纳 Na^+ 等阳离子以及抗脱水能力。一方面,盐碱胁迫下植物根系分泌有机酸;另一方面,在盐碱胁迫下,抗盐碱植物体内合成更多有机酸来降低细胞渗透势,维持细胞膨压,当植物凋落物和残体降解时可为土壤提供大量有机酸,使得土壤 pH 降低^[21]。本文中,牧草种植前后土壤 pH 变化不显著,而窦晓慧等^[22]研究认为,种植牧草可显著降低土壤 pH,且随土壤深度增加 pH 降幅逐渐变小,这可能与不同地区土壤盐碱程度、水文气象条件以及种植年限等因素有关。种植饲草作物具有降盐抑碱效果,主要是由于作物对土层中盐离子的吸收作用,且根系生长增强土壤通气性、导水性,促进盐分淋洗,同时饲草作物增加土壤盖度,植株蒸腾代替部分棵间蒸发,从而抑制土壤盐分表聚^[23]。本文中,饲料作物种植显著降低 EC、总可溶性盐、碱化度($P<0.05$),当土壤盐渍化程度较低时盐化和碱化参数降幅最大,这与迟春明和王志春^[24]关于松嫩平原不同类型草原植被对盐渍化表层土壤具有明显脱盐效果相类似。

土壤盐离子浓度不平衡是影响土壤盐渍化的直接因素,由于本文研究区域广泛分布富含 Na、K 的近代火山岩,Na 与 K 主要以铝硅酸盐形式存在,在风化过程中,形成了含 Na、K、Ca、Mg 的重碳酸盐类,随水溶解汇集到低地,Ca、Mg 的重碳酸盐经蒸发转化为碳酸盐而沉淀,含 Na、K 的重碳酸盐及含 Cl、S 的化合物则呈易溶性盐被淋洗迁移于低地,为形成苏打盐渍土提供了补给源^[25]。本研究表明,不同饲料作物种植降低土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 含量,可以对研究区苏打盐碱土起到一定脱盐降碱作用。这可能是由于作物庞大致密的根系对土壤的穿插和挤压作用,改善了土壤的结构,使其朝良性方向发展,促进了盐分向下淋溶作用,同时增加表土腐殖质含量,促进了大团聚体的形成,渗透性增强促进了各盐分离子的运移,一定程度上抑制了土壤盐渍化。但不同饲料作物种植条件下,作物耐盐机理尚不十分明确,如何能达到土壤盐离子含量比例变化最优还有待进一步深入研究。

有研究表明耐盐作物可显著提升土壤养分含量^[26],但关于种植作物对土壤速效钾含量变化的研究结果存在差异。本文研究表明,不同饲料作物收获后土壤碱解氮和速效钾含量比播种前分别降低 15.15%、24.06%。而潘洁等^[27]关于滨海盐碱地 4 种耐盐草本植物对土壤养分影响的研究表明,耐盐植物种植后,土壤速效钾含量呈上升趋势;乔艳辉和王月海^[28]关于 NyPa 牧草对滨海盐碱地土壤改良的研究发现,速

效钾含量变化不大,始终低于同期荒草地。相关分析表明,土壤盐化碱化参数受盐离子浓度的影响高于土壤养分指标,速效钾与总可溶性盐、碱化度、EC 间呈显著正相关($P<0.05$),说明土壤盐碱指标含量增加在一定程度上促进土壤速效钾的积累和转化,但其内在机理不清,是今后重点研究的方向之一。

4 结论

1)不同饲料作物种植前后土壤 pH 差异不显著($P>0.05$),EC、总可溶性盐、碱化度显著降低($P<0.05$),在抑制土壤盐渍化方面均有一定效果,当土壤盐渍化程度较低时盐化和碱化参数降幅最大。

2)总体上,不同饲料作物种植降低土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 含量,提高土壤 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Cl^- 含量,对土壤 SO_4^{2-} 含量影响存在差异,收获后土壤碱解氮和速效钾含量比播种前分别降低 15.15%、24.06%。

3)基于模糊物元-熵权模型的综合评价,青贮玉米对土壤盐渍化程度较高的土壤改良效果更佳,而甜高粱与高丹草更适合盐渍化较轻土壤的改良。

4)土壤盐化碱化参数受盐离子浓度的影响高于土壤养分指标。

参考文献:

- [1] Lim S J, Shin M N, Son J K, et al. Evaluation of soil pore-water salinity using a Decagon GS3 sensor in saline-alkali reclaimed tidal lands[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 132: 49-55.
- [2] 周道玮, 田雨, 王敏玲, 等. 覆沙改良科尔沁沙地-松辽平原交错区盐碱地与造田技术研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 910-918.
- [3] 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.
- [4] 司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1124-1131.
- [5] Li N, Kang Y H, Li X B, et al. Response of tall fescue to the reclamation of severely saline coastal soil using treated effluent in Bohai Bay[J]. Agricultural Water Management, 2019, 218: 203-210.
- [6] 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 等. 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1941-1949.
- [7] Liu M L, Wang C, Liu X L, et al. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 156: 103705.

- [8] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1377–1385.
- [9] 关胜超. 松嫩平原盐碱地改良利用研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- [10] Zhang F F, Wang X Z, Lu W H, et al. Improved quality of corn silage when combining cellulose-decomposing bacteria and *Lactobacillus buchneri* during silage fermentation[J]. BioMed Research International, 2019, 2019: 4361358.
- [11] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. Geoderma, 2019, 349: 25–35.
- [12] 杜现增, 袁榆梁, 孟钰, 等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 145–151.
- [13] 刘娜, 艾南山, 方艳, 等. 基于熵权的模糊物元模型在城市生态系统健康评价中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(5): 589–595.
- [14] 汪顺生, 薛红利. 基于熵权的模糊物元模型优选夏玉米沟灌方式[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(4): 362–368.
- [15] Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 1419–1427.
- [16] Pandey V C, Pandey D N, Singh N. Sustainable phytoremediation based on naturally colonizing and economically valuable plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 86: 37–39.
- [17] Gong B, Wen D, Bloszies S, et al. Comparative effects of NaCl and NaHCO₃ stresses on respiratory metabolism, antioxidant system, nutritional status, and organic acid metabolism in tomato roots[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(8): 2167–2181.
- [18] 杨茜, 卢越琴, 马玲莉, 等. 淋溶条件下低分子量有机酸对淋出液及三峡库区典型土壤性质的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 175–181.
- [19] 李平, 王兴祥. 几种低分子量有机酸淋溶对土壤 pH 和交换性铝的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 669–673.
- [20] 麻莹, 郭立泉, 张淑芳, 等. 盐碱胁迫下抗碱牧草碱地肤溶质积累、分布特点及有机酸的生理贡献[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 193–200.
- [21] 李月明, 杨帆, 韩沛霖, 等. 植物根系分泌物响应非生物胁迫机理研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(5): 1384–1392.
- [22] 窦晓慧, 李红丽, 盖文杰, 等. 牧草种植对黄河三角洲盐碱土壤改良效果的动态监测及综合评价[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 394–401.
- [23] Zhao Y G, Li Y Y, Wang J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 363–370.
- [24] 迟春明, 王志春. 苏打盐渍土草原植被群落分布与土壤理化性质相互关系[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2245–2249.
- [25] 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.
- [26] Yang H J, Xia J B, Cui Q, et al. Effects of different *Tamarix chinensis*-grass patterns on the soil quality of coastal saline soil in the Yellow River Delta, China[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 772: 145501.
- [27] 潘洁, 王立艳, 肖辉, 等. 滨海盐碱地不同耐盐草本植物土壤养分动态变化[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 168–172.
- [28] 乔艳辉, 王月海. NyPa 牧草对滨海盐碱地土壤改良效应研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24): 67–72.