

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.029

引用格式:牛浴林, 仝宗永, 陈鹏伟, 等. 土壤改良剂对柴达木盐碱地燕麦生产性能的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(4):1483—1491

NIU Yu-lin, TONG Zong-yong, CHEN Peng-wei, et al. Effects of Soil Amendments on Production Performance of Oat in Qaidam Saline-Alkali Soils[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1483—1491

土壤改良剂对柴达木盐碱地燕麦生产性能的影响

牛浴林¹, 仝宗永², 陈鹏伟¹, 秦燕^{1*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193)

摘要:柴达木盆地是我国典型的内陆干旱盐渍化盆地, 土壤盐分高, 植物生长条件恶劣, 进行土壤改良对于合理开发利用盐碱地具有重要意义。本研究以4种土壤改良剂(过磷酸钙、腐殖酸钾、牛粪+脱硫石膏、凹凸棒)添加后的燕麦(*Avena sativa*)为研究对象, 分析燕麦的生产性能和营养品质, 筛选出适宜在柴达木盆地盐碱地中添加的理想土壤改良剂。结果表明: 施入过磷酸钙的燕麦株高、茎粗、草产量较高, 分别为107.57 cm, 3.47 mm, 1001.00 g·m⁻²; 施入腐殖酸钾的燕麦的粗脂肪和可溶性碳水化合物的含量较高(分别为3.15%和25.40%), 而酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量较低。分段式结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)分析表明, 土壤改良剂通过影响饲草产量和茎粗进而影响营养品质, 理想排序法(Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)-多准则决策模型表明, 施入过磷酸钙的燕麦的生产性能和营养品质较优, 过磷酸钙是适宜在柴达木盆地盐碱地中添加的理想土壤改良剂。

关键词:土壤改良剂; 柴达木盆地; 燕麦; 营养品质; 综合评价

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1483-09

Effects of Soil Amendments on Production Performance of Oat in Qaidam Saline-Alkali Soils

NIU Yu-lin¹, TONG Zong-yong², CHEN Peng-wei¹, QING Yan^{1*}

(1. Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. Institute of Animal Science of Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China)

Abstract: The Qaidam Basin is a typical inland arid saline basin in China, characterized by high soil salinity and harsh plant growth conditions. Soil amendment is therefore of great significance for the rational development and utilization of saline-alkali land. This study focused on oat (*Avena sativa*) grown with the application of four soil amendments (single superphosphate, potassium humate, cattle manure+desulfurized gypsum, and attapulgite) to analyze oat production performance and nutritional quality, aiming to identify the ideal soil amendment for saline-alkali soils in the Qaidam Basin. The results showed that oat treated with single superphosphate achieved greater plant height, stem diameter, and forage yield, measuring 107.57 cm, 3.47 mm, and 1001.00 g·m⁻², respectively. Oat treated with potassium humate exhibited higher crude fat and water-soluble carbohydrate content, at 3.15% and 25.40% respectively, while its acid detergent fiber and neutral detergent fiber content were lower. Piecewise Structural Equation Modeling (SEM) analysis indicated that the soil amendments affected nutritional quality by influencing forage yield and stem diameter. The TOPSIS multi-criteria decision model demonstrated that oat treated with single superphosphate had superior production performance and nutritional quality, which is the ideal soil amendment for application in saline-alkali soils of the Qaidam Basin.

Key words: Soil amendments; Qaidam Basin; Oat; Nutritional quality; Comprehensive evaluation

收稿日期:2025-05-07; 修回日期:2025-07-03

基金项目:柴达木盆地盐碱地土壤肥力关键技术研究(2023-NK-A3-B2)资助

作者简介:牛浴林(1998-), 男, 汉族, 青海互助人, 硕士研究生, 主要从事牧草育种与栽培研究, E-mail:1468209515@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail:mule119@163.com

盐碱地既是制约全球农业可持续发展进程中的关键因素,又是具有多重开发价值的特殊土地资源^[1-2]。全球盐碱地的面积约为10亿 hm^2 ^[3],而我国盐碱地面积约为9913.3万 hm^2 ^[4],西北盐碱地面积约占全国盐碱地面积的69.03%^[5],而青海省的盐碱地主要集中在柴达木盆地。为缓解青藏高原的草畜矛盾^[6],合理地开发柴达木盆地盐碱地并发展草牧业显得尤为重要。在开发盐碱地资源中,外源添加土壤改良剂是改良盐渍化土壤的有效措施之一,筛选出适宜当地添加的土壤改良剂,对于推动柴达木盆地盐碱地的改良具有重要意义。

土壤改良剂是通过优化土壤物理和化学性质来改善植物生长环境的材料,通过补充有机质和调节酸碱度来增强土壤缓冲性能,最终实现提高水资源利用效率和促进植物生长的综合目标^[7-8]。前人已在盐碱地施入土壤改良剂取得一定的成效^[9-10],李佳钰等^[11]研究发现,“生物菌剂+化肥”改良剂效果最好,草地早熟禾的密度、高度、盖度、叶宽及叶绿素含量优于其他改良剂。张辉等^[12]在滨海盐碱地研究发现,添加了脱硫石膏的盐碱土中的黏粒比例减少,物理结构得到改善,孔隙度变大,透气性和水力传导能力增强。顾鑫等^[13]研究表明,煤炭腐植酸能够降低土壤的盐碱特性,同时提高土壤肥力。已有的研究结果极大促进了盐渍化土壤改良剂的推广应用,但土壤改良剂的种类及用量因盐碱地的类型而异,因此,开展适用于柴达木盆地盐渍化土壤的改良剂研究是必要的,研究结果可为青藏高原东北缘盐碱土壤生态修复提供理论依据与技术支持。

燕麦(*Avena sativa*)是一种粮饲兼用型一年生植物,因其抗旱、抗寒、耐贫瘠、耐盐碱、适应性强^[14-15]等特点而成为青藏高原主栽植物,目前,柴达木盆地盐碱地主要推广种植‘青甜1号’燕麦。前人的研究主要关注添加土壤改良剂后燕麦产量的变化^[16-17],而忽略了其营养品质。确定适合当地的土壤改良剂显得至关重要。但目前适合柴达木盆地的最佳土壤改良剂尚不清楚,土壤改良剂对燕麦产量和营养品质的影响过程及其调控路径尚不明确,

制约着盐碱地的改良,亟需开展相关研究。

基于此,本研究在柴达木盆地蓄集乡施入土壤改良剂,通过理想解排序法(Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)-多准则决策模型对燕麦饲草产量和营养品质开展综合评价,以筛选出适宜的土壤改良剂改良柴达木盆地盐碱地。采用分段式结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)探讨土壤改良剂对燕麦营养品质的影响过程,推动柴达木盆地盐碱地改良的进程,为该区域土壤改良剂的施入提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究的试验地位于中国青藏高原东北部的青海省海西蒙古族藏族自治州蓄集乡,其地理位置为 $37^{\circ}22'38.784''\text{N}$, $97^{\circ}43'58.962''\text{E}$ 。该区域为高原山地气候,海拔为3158 m,年均气温约为 3.7°C 和年降水量约为199.8 mm(图1),年蒸发量约为2370.0 mm,全年日照时数约为3182.8 h,年辐射量约为 $693.33\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,无霜期约为95 d。土壤类型为盐化棕钙土,其pH值为8.68(表1)。全氮含量为 $739\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $639\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

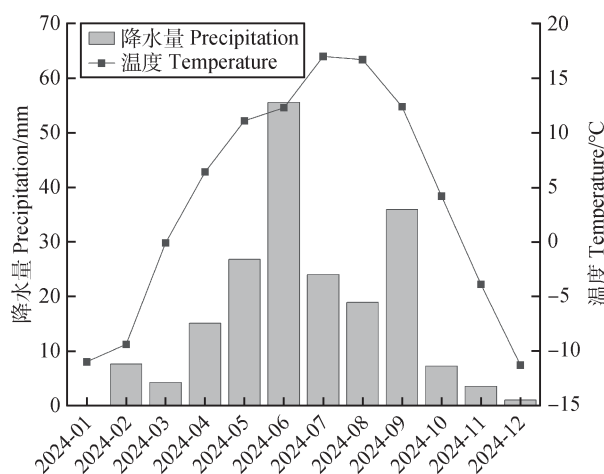


图1 2024年试验地月平均温度和降水量

Fig. 1 Monthly mean temperature and precipitation for the experimental site in 2024

表1 试验地基本土壤数据

Table 1 Basic soil data of the experimental site

试验地 Experimental field	土层 Soil layer/cm	pH	电导率 EC/($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\text{Ca}^{2+}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{K}^{+}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{Mg}^{2+}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
含量 Content	0~10	8.68	14.410	2.109	0.186	0.184
试验地 Experimental field	$\text{Na}^{+}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{CO}_3^{2-}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{HCO}_3^{-}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{Cl}^{-}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{SO}_4^{2-}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	水溶性盐总量 Total water-soluble salts/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
含量 Content	9.658	0	0.249	14.279	17.948	44.613

1.2 试验设计

试验燕麦种子由青海省奔盛草业公司提供,品种为‘青甜1号’,发芽率为90%,腐殖酸钾由山东旺通化工有限公司生产,黑色粉末状,腐殖酸 $\geq 30\%$,钾含量 $\geq 11\%$;过磷酸钙中五氧化二磷(P_2O_5)含量 $\geq 12\%$;牛粪取自本地牧民圈养牛圈中,脱硫石膏中 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 含量约为74.7%;凹凸棒由青海省奔盛草业公司提供。本研究试验地前期进行深翻平整预处理,清除地表石块及杂草残留物。2024年6月初施入土壤改良剂^[18-20](表2),牛粪和脱硫石膏均为1:1配置,牛粪和脱硫石膏各为 $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,采用随机区组设计设置3次重复处理,施入土壤改良剂后,人工耙平小区,使土壤改良剂更为均匀。播种方式为条播,播量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,试验小区为 $3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,区间保留1 m作业通道,四周设置1 m宽保护行。试验期间定期进行灌溉,不进行追肥、除草等田间管理。

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

编号 Number	土壤改良剂 Soil amendment	施入量 Application amount
Sa ₁	CK	$0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
Sa ₂	过磷酸钙 Single superphosphate	$375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
Sa ₃	腐殖酸钾 Potassium humate	$1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
Sa ₄	牛粪+脱硫石膏 Cattle manure+Flue gas desulfurized gypsum	$12\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
Sa ₅	凹凸棒 Attapulgite	$750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

1.3 样品采集及指标测定

本研究于2024年10月初进行系统采样,为防止边际效应产生不必要误差,人工去除小区边行50 cm,在剩余的小区内进行指标测定和样品采集。使用校准钢卷尺垂直测量其基部至最高生长点的距离,记录为株高,使用游标卡尺测定茎粗,对每个小区的指标进行5次重复测定,完成形态指标测定后,进行基部齐地刈割,清除杂质后即刻测定鲜生物量。样品经密封转运至实验室后,执行标准化干燥流程:105℃左右烘30分钟杀青处理,75℃恒温干燥至恒重后测定干物质含量。将杀青后干物质样品粉碎并过筛^[21],测定粗灰分(Crude ash, CA)、粗蛋白(Crude protein, CP)、粗脂肪(Crude fat, CF)、酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)、淀粉(Starch)、可溶性碳水化合物(Water-soluble carbohydrates, WSC)、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 含量。

1.4 数据处理

相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)计算

公式为:

$$RFV = (DDM \times DMI) / 1.29$$

$$DDM = 88.9 - (0.779 \times ADF)$$

$$DMI = 120 / NDF$$

式中:DMI(Dry matter intake)为干物质采食量,DDM(Digestible dry matter)为可消化干物质^[22]。

使用Excel 2016对数据进行初步整理。采用SPSS 27.0(SPSS 27.0, Chicago, IL, USA)对燕麦的株高、叶面积、茎粗、鲜干比、草产量进行正态性(Kolmogorov-Smirnov)和方差齐性(Homogeneity)检验。采用LSD法(最小显著差异法)进行单因素方差多重比较($\alpha=0.05$)。采用Mantel检验揭示农艺性状与营养品质指标间的关联强度。为解析营养品质形成的调控路径,通过piecewise SEM数据包构造SEM结构方程模型,量化各因素对营养品质的直接效应、间接效应及其路径系数。标准化效应值的计算采用Origin 2022软件完成。

TOPSIS是一种通过计算每个方案与虚构的“理想最佳方案”和“理想最差方案”的距离,并据此计算相对贴合度来对方案进行排序的直观且实用的多准则决策方法^[23]。

2 结果与分析

2.1 不同土壤改良剂对燕麦农艺性状及产量的影响

施入土壤改良剂之后的燕麦, Sa₂的株高、茎粗、草产量较大,分别为107.57 cm, 3.47 mm, 1001.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著高于Sa₁($P<0.05$)。Sa₁的株高、茎粗、草产量均为最低,为62.88 cm, 1.33 mm, 265.83 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图2a, b, d)。Sa₃的鲜干比为2.86, 显著高于其他处理($P<0.05$)(图2c)。

2.2 不同土壤改良剂对燕麦营养品质的影响

粗灰分含量较高的是Sa₁(8.78%)和Sa₃(8.41%),较低的是Sa₄(7.48%)(图3a)。Sa₁和Sa₃处理的粗蛋白含量显著高于其他处理,分别为10.03%和10.98%(图3b)。粗脂肪含量较高的为Sa₁(3.10%)和Sa₃(3.15%),显著高于其他处理(图3c)。Sa₃处理的燕麦酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量较低,为30.54%和46.70%,显著低于其他处理($P<0.05$),酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量较高的均为Sa₂,分别为40.27%和58.78%(图3d,

e)。淀粉含量较高的是 Sa_1 , 较低的是 Sa_4 , 分别为 1.32% 和 0.52% (图 3f)。 Sa_3 和 Sa_4 处理的可溶性碳水化合物含量较高, 分别为 25.40%, 24.81% (图 3g)。相对饲喂价值较高的是 Sa_3 (129.91%), 较低

的是 Sa_2 (91.63%) (图 3h)。 Ca^{2+} , Na^+ 和 Mg^{2+} 含量较高的均为 Sa_3 , 分别为 0.20%, 0.27% 和 0.17%, 含量较低的皆是 Sa_2 , 为 0.07%, 0.23% 和 0.11% (图 3i,j,k)。

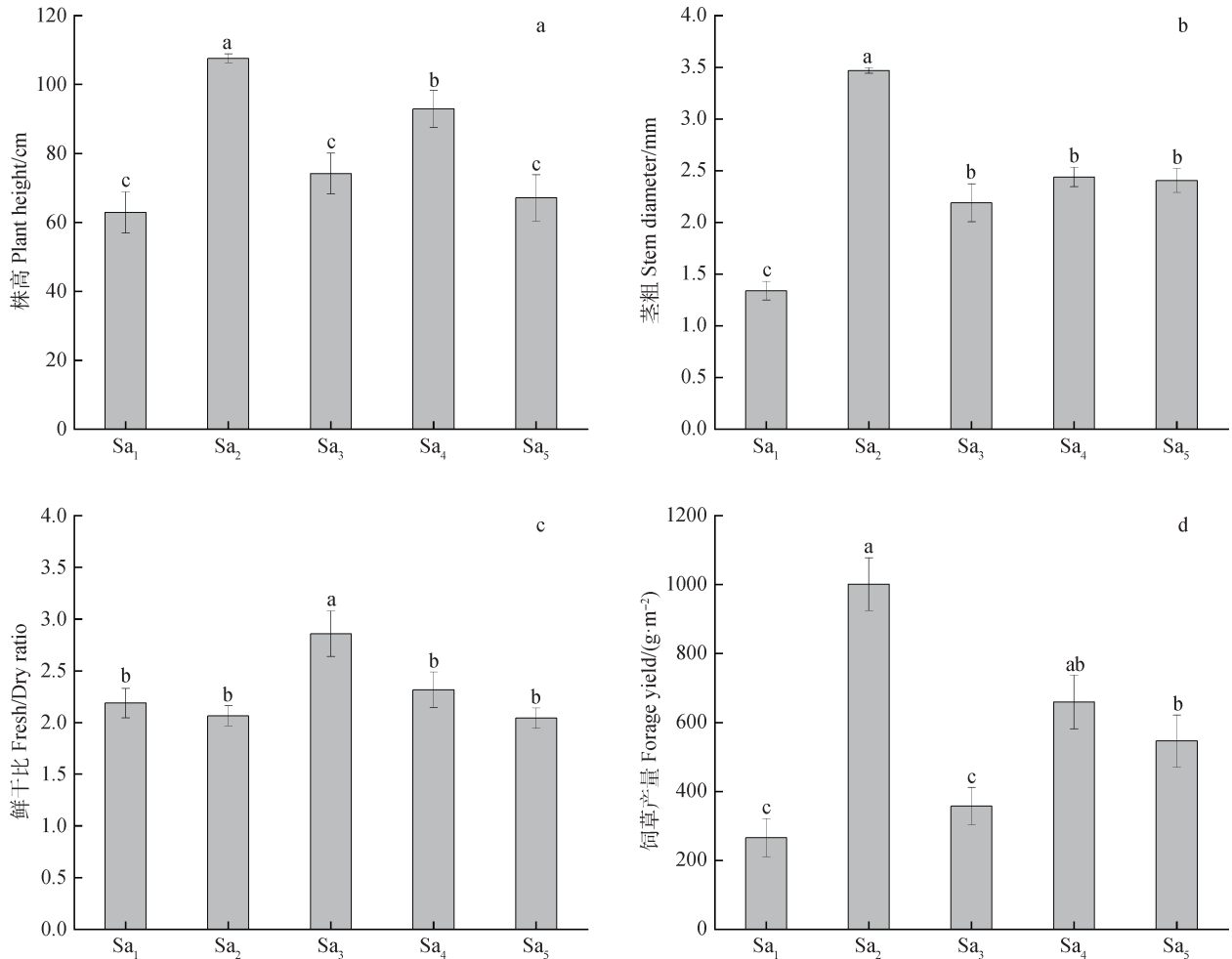


图2 不同土壤改良剂对燕麦生产性能的影响

Fig. 2 Effects of different soil amendments on oat production performance

注:图中误差棒表示标准误差,不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: Error bars in the figure represent standard errors; different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same applies below

2.3 燕麦农艺性状与营养品质相关性分析

Mantel test对燕麦农艺性状与营养品质的相关性分析表明(图4),茎粗与酸性洗涤纤维含量呈显著正相关,与相对饲喂价值和 Ca^{2+} 含量呈显著负相关;饲草产量与粗蛋白、粗脂肪、 Mg^{2+} 含量和相对饲喂价值显著负相关,但与酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量显著正相关;鲜干比与粗蛋白、粗脂肪、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、相对饲喂价值、 Ca^{2+} , Na^+ 和 Mg^{2+} 含量显著正相关;淀粉含量与粗灰分、粗蛋白、粗脂肪、 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 含量和相对饲喂价值显著正相关,但与酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、可溶性碳水化合物含量显著负相关;可溶性碳水化合物与粗蛋白、

粗脂肪、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、 Ca^{2+} , Na^+ 和 Mg^{2+} 显著负相关,但与相对饲喂价值显著正相关。

2.4 不同土壤改良剂综合评价

为有效评价4种土壤改良剂的综合表现,用TOPSIS-多准则决策模型对不同土壤改良剂处理的燕麦的农艺性状(株高、茎粗、饲草产量、鲜干比)和营养品质(粗灰分、粗蛋白、粗脂肪、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、淀粉、可溶性碳水化合物、相对饲喂价值、 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+})进行综合评价(图5)。结果表明,贴合度由高到低分别为 Sa_2 , Sa_3 , Sa_4 , Sa_1 , Sa_5 。其中 Sa_2 的贴合度最高,为 0.57, Sa_5 的贴合度

最低,为0.36。实验结果表明,添加了土壤改良剂过磷酸钙的燕麦,综合性能表现较好,因此,过磷酸

钙是适宜在柴达木盆地蓄集地区重度盐碱地中添加的理想土壤改良剂。

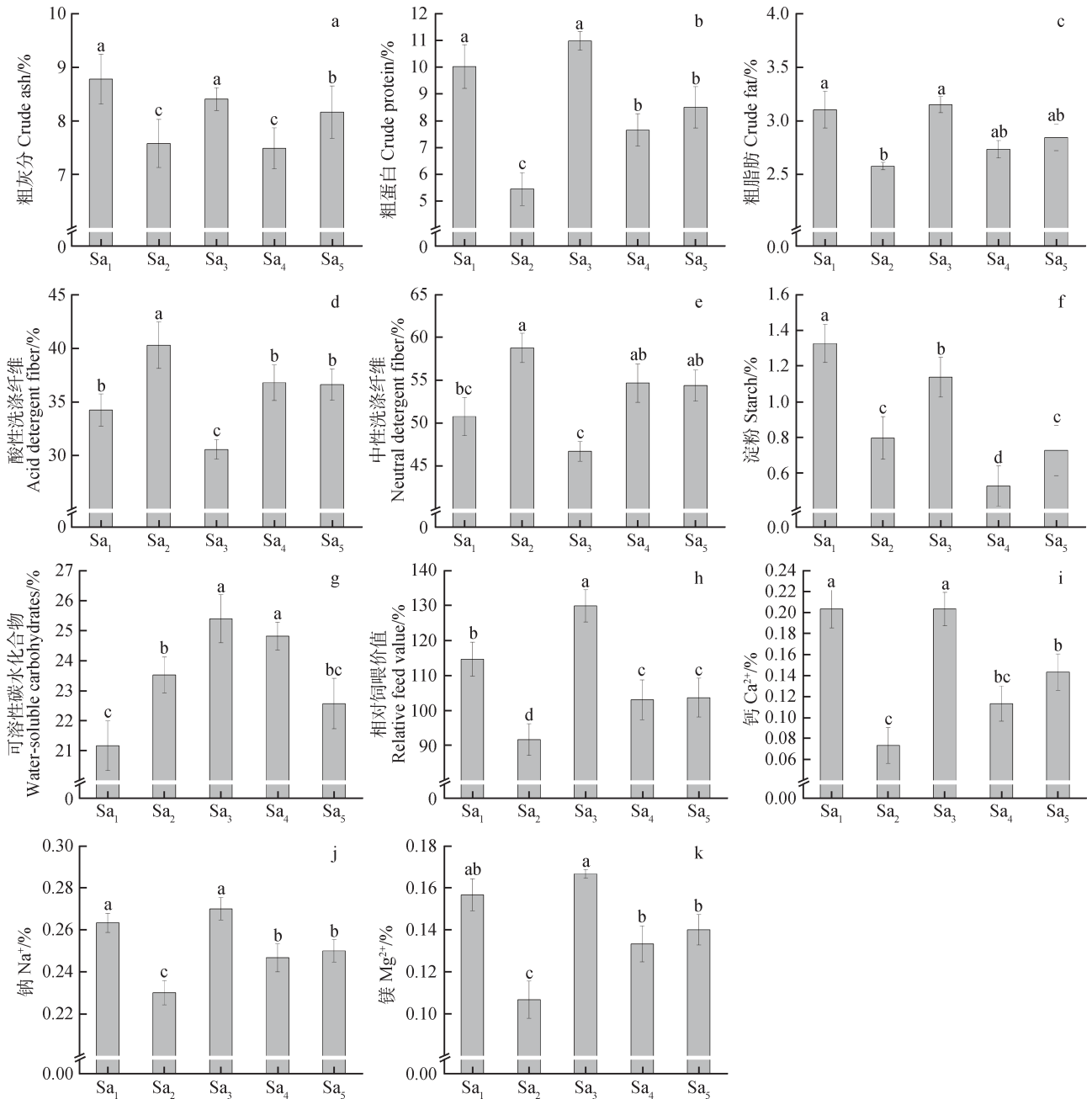


图3 不同土壤改良剂对燕麦营养品质的影响

Fig. 3 Effects of different soil amendments on the nutritional quality of oat

2.5 土壤改良剂对燕麦营养品质的影响过程及路径

为探讨土壤改良剂如何通过影响农艺性状和产量性状进一步影响燕麦营养品质,解析其调控路径,本研究聚焦关键驱动因子构建分段式SEM模型。结果表明,土壤改良剂通过影响株高、茎粗、鲜干比和饲草产量间接影响营养品质,株高、茎粗和饲草产量对营养品质均为负效应,路径系数分别为

−0.386, −0.229和−0.591,鲜干比对营养品质是正影响,路径系数为0.314,该模型的拟合度良好($P=0.682$, Fisher's $C=0.2.294$)(图6a)。

基于分段SEM模型的标准化路径系数,计算各因子的直接效应、间接效应和总效应,其中,土壤改良剂、茎粗和饲草产量的总效应值最高,分别为−0.67, −0.54和−0.59(图6b)。因此,土壤改良剂通过影响燕麦饲草产量和茎粗间接影响燕麦的营养品质。

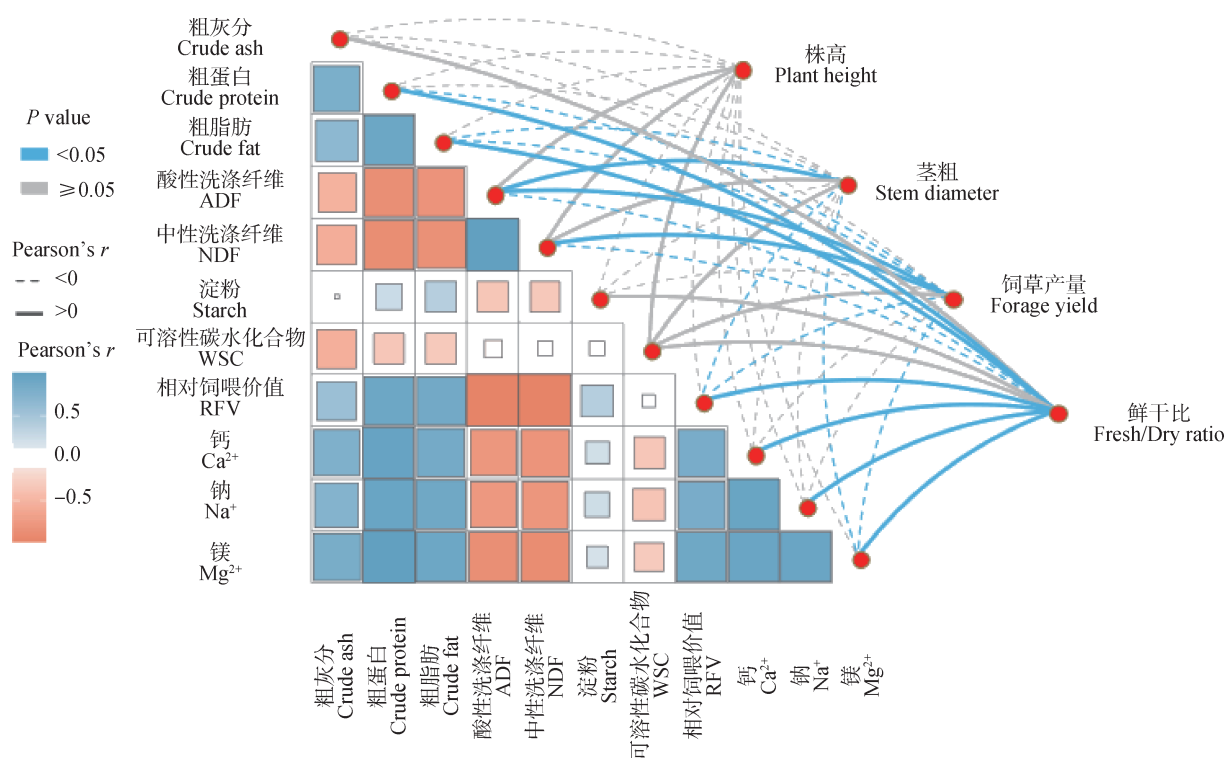


图 4 燕麦农艺性状与营养品质 Mantel test 相关性分析

Fig. 4 Mantel test correlation analysis between agronomic traits and nutritional quality in oats

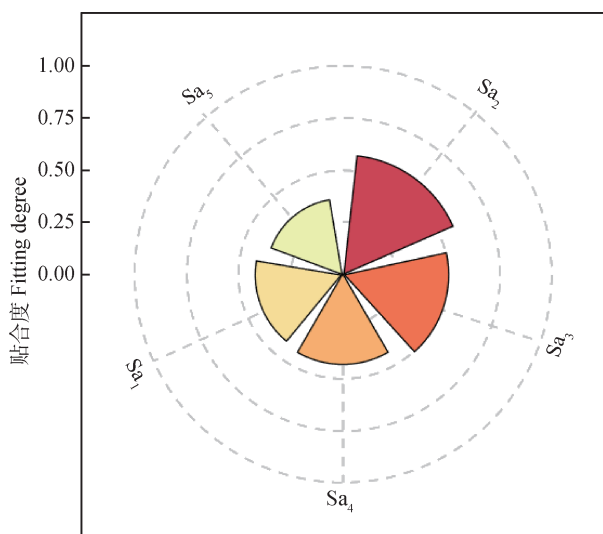


图 5 不同土壤改良剂 TOPSIS 综合评价

Fig. 5 TOPSIS-based comprehensive evaluation of different soil amendments

3 讨论

农艺性状是植物科学研究中的重要指标,不仅是衡量作物生长发育状态的关键参数,也是评估植物适应环境能力和品质优劣的重要依据^[24]。植物的生长主要受遗传特性和环境因素的影响^[25],当植物的品种一样时,主要受温度、降水、光照和土壤等

环境因素的影响。本研究中,添加过磷酸钙显著提高了燕麦的株高、茎粗和饲草产量。这主要归因于过磷酸钙的成分水溶性磷酸一钙和硫酸钙,它们能为植物直接提供磷和钙元素。更重要的是,硫酸钙中的钙离子可置换土壤胶体中的钠离子,有效减轻钠毒害,并改善土壤结构,促进排水与透气性^[26],这些综合效应最终在短期内显著提升了燕麦的饲草产量。而本研究中添加腐殖酸钾的燕麦鲜干比显著高于其他处理,这是因为腐殖酸是大分子化合物,分子外有很多具有亲水性的官能团,水分聚集于官能团的吸附位点上,当土壤饱和时,土壤孔隙水分运动带动官能团上的水分运动,使土壤水分运动性增加,提高土壤的含水量,进而提高燕麦的鲜干比。这与郭同铠等^[27]的研究一致。与其他处理相比,添加凹凸棒的燕麦生长表现较差,归因于凹凸棒主要改善土壤物理结构,但不直接提供养分,导致其综合生长效果不佳。

饲草的营养品质是其营养成分含量、可利用性、安全性和功能性的综合体现^[28]。本研究中添加腐殖酸钾的燕麦,其粗蛋白、粗脂肪、可溶性碳水化合物的含量较高,源于腐殖酸通过整合作用吸附 Na^+ , Cl^- 等盐离子,减少根系接触的游离盐浓度,提高养分吸收效率^[29],并且腐殖酸与钙、镁结合,释放被

固定的磷^[30],而腐殖酸钾本身含速效钾,促进光合产物(可溶性碳水化合物)积累。添加过磷酸钙的土壤,燕麦的酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维较高,相对饲喂价值较低,原因在于株高、茎粗和酸性、中性洗涤纤维呈现正相关,而添加过磷酸钙土壤的燕麦株高、茎粗较高,导致其酸性、中性洗涤纤维的含量

上升。这与王小军等^[31]的结果相似。添加腐殖酸钾的燕麦的钙、钠和镁的含量较高,这可能是由于腐殖酸通过强吸附能力结合土壤中的 Na^+ ,减少 Na^+ 对根系细胞膜的毒害,同时降低 Na^+ 与 Ca^{2+} , Mg^{2+} 的竞争抑制^[32],间接促进植物对后两者的吸收。

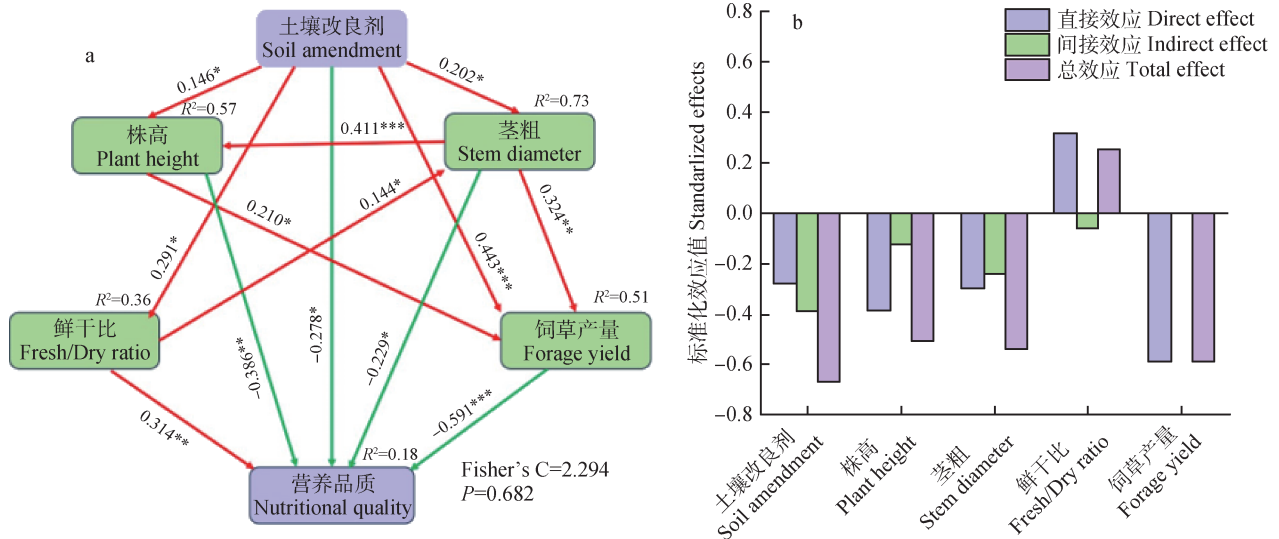


图6 结构方程模型分析土壤改良剂对营养品质的影响路径(a)及各因子的标准化效应值(b)

Fig. 6 Structural equation modeling (SEM) analysis of the influence pathways of soil amendments on nutritional quality (a) and standardized effect values of each factor (b)

注:图中红线表示正向效应关系,绿线表示负向效应关系,数值对应的是标准化路径系数。*表示在0.05水平上差异显著,**表示在0.01水平上差异显著,***表示在0.001水平上差异显著

Note: Red lines indicate positive effect relationships, green lines denote negative effect relationships, and numerical values correspond to standardized path coefficients. Asterisks denote significance levels: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

通过 Mantel 相关性和分段式结构方程模型分析表明,土壤改良剂通过影响茎粗和饲草产量进而影响燕麦营养品质。这可能是因为土壤改良剂的加入改善了土壤环境,其燕麦的饲草产量上升,植物优先将光合产物投入茎秆等结构组织,导致纤维(如木质素、纤维素)比例上升^[33],而植物高产需要延长生长期,茎秆随成熟度增加其木质化也增加^[34],降低消化率和蛋白质含量,最终导致燕麦的营养品质下降。本研究采用熵权法-TOPSIS 综合评价表明,在盐碱地中添加土壤改良剂过磷酸钙,其燕麦的生产性能和营养品质表现较优,过磷酸钙是适宜在柴达木盆地改良盐碱地过程中添加的理想土壤改良剂。然而,土壤改良剂对燕麦营养品质的作用机制存在复杂性与不确定性,其效应可能受年际气候波动(降水、气温)的影响。鉴于本研究结论基于1年的研究,后续应通过长期定位试验开展多年连续观测,更为全面地解析土壤改良剂的生态效应及其对饲草品质的累积影响。

4 结论

过磷酸钙、腐殖酸钾、牛粪十脱硫石膏、凹凸棒四种土壤改良剂能有效提升燕麦产量和营养品质。分段式结构方程表明:土壤改良剂对燕麦营养品质有直接效应,土壤改良剂通过影响燕麦饲草产量和茎粗进而影响燕麦的营养品质。TOPSIS-多准则决策模型分析表明:添加土壤改良剂过磷酸钙的燕麦,既能保持较高的饲草生产性能又能保持较好的营养品质,过磷酸钙是适宜在柴达木盆地盐碱地中添加的理想土壤改良剂。

参考文献

- [1] 李彬,王志春,孙志高,等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158
LI B, WANG Z C, SUN Z G, et al. Resources and sustainable resource exploitation of salinized land in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(2): 154-158

- [2] 俞仁培,陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用[J]. 土壤通报,1999,30(4):158-159,177
YU R P, CHEN D M. Saline soil resources in China and their development and utilization [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(4): 158-159, 177
- [3] 元雯雯,李亚晓,马红媛,等. 盐胁迫下羊草种子萌发特性的种内变异及其影响因素[J]. 生态学报,2025,45(11):5481-5496
QI W W, LI Y X, MA H Y, et al. Intraspecific variation of seed germination characteristics of *Leymus chinensis* under salt stress and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5481-5496
- [4] 李月梅. 柴达木盆地细土平原带土壤盐分及其组成的盐渍特征[J]. 中国农村水利水电,2019(11):72-75,80
LI Y M. Saline characteristics of soil salt and its components in Qaidam Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(11): 72-75, 80
- [5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报,2008,45(5):837-845
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845
- [6] 王金龙,王小军,刘启林,等. 不同燕麦品种在三江源区的生产性能和营养品质综合评价[J]. 草业学报,2024,33(10):83-95
WANG J L, WANG X J, LIU Q L, et al. A multi-trait evaluation of production performance and nutritional quality of different oat varieties in the Sanjiangyuan area [J]. Acta Pratacul-turae Sinica, 2024, 33(10): 83-95
- [7] 刘娇娴,崔骏,刘洪宝,等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. 环境工程技术学报,2022,12(1):173-184
LIU J X, CUI J, LIU H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 173-184
- [8] 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. Research progress of soil amendments in salinized area [J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2023, 10(3): 92-99
- [9] 王丽娜,王迪,任翠梅,等. 土壤改良剂的应用现状[J]. 中国农学通报,2024,40(30):84-88
WANG L N, WANG D, REN C M, et al. Current application status of soil improvers [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(30): 84-88
- [10] 郑皓文,薛冬梅. 基于CiteSpace软件的全球土壤改良剂研究进展[J]. 中国资源综合利用,2024,42(8):120-122
ZHENG H W, XUE D M. Research progress on global soil amendments based on CiteSpace software [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(8): 120-122
- [11] 李佳钰,刘兴和,魏佳吉,等. 土壤改良剂对盐碱土及草地早熟禾生长的影响[J]. 国土与自然资源研究,2025(1):92-96
LI J Y, LIU X H, WEI J J, et al. Effects of soil amendments on the growth of precocious grasses in saline-alkali soil and grass-land [J]. Territory & Natural Resources Study, 2025(1): 92-96
- [12] 张辉,陈小华,付融冰,等. 脱硫石膏对不同质地滨海盐碱土性质的改良效果[J]. 环境工程学报,2017,11(7):4397-4403
ZHANG H, CHEN X H, FU R B, et al. Effect to FGD (flue gas desulfurization) -gypsum as an improvement to different coastal saline-alkali soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(7): 4397-4403
- [13] 顾鑫,任翠梅,王丽娜,等. 施用腐植酸改良大庆苏打盐碱土的效应[J]. 中国土壤与肥料,2021(4):77-82
GU X, REN C M, WANG L N, et al. Effects of humic acid application on soda saline-alkali soil in Daqing [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(4): 77-82
- [14] 李文,魏廷虎,阿保地,等. 化肥减施配合有机肥对高寒区燕麦营养品质和土壤养分的影响[J]. 草地学报,2021,29(12):2878-2886
LI W, WEI T H, A B D, et al. Effects of reduction of chemical fertilizer and organic manure supplement on oat nutrient quality and soil nutrient in alpine cold region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(12): 2878-2886
- [15] BELTRÁN-PAZ O, SOLLEIRO-REBOLLEDO E, MARTÍNEZ-JARDINES G, et al. Short-term response of oat crop yield and soil microbial activity promoted by inorganic fertilization suppression and organic fertilization addition in a periurban agroeco-system [J]. Applied Soil Ecology, 2024, 195: 105249
- [16] 刘慧军,刘景辉,于健,等. 土壤改良剂对土壤紧实度及燕麦生长状况的影响[J]. 水土保持通报,2013,33(3):130-134
LIU H J, LIU J H, YU J, et al. Effects of soil amendments on soil compaction and growth status of oat [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 130-134
- [17] 刘慧军,刘景辉,徐胜涛,等. 土壤改良剂对土壤水分及燕麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2012,31(3):125-128
LIU H J, LIU J H, XU S T, et al. Effects of soil amendments on soil water and yield of oat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 125-128
- [18] 曹亚丽,代先林,王瑜,等. 不同肥料配施对轻度盐碱地土壤理化性状和苜蓿产量的影响[J]. 草地学报,2025,33(5):1694-1701
CAO Y L, DAI X L, WANG Y, et al. The impacts of different fertilizer combinations on the physicochemical properties of mildly saline-alkali soil and the yield of alfalfa [J]. Acta Agres-tia Sinica, 2025, 33(5): 1694-1701
- [19] 杜志敏,郝建设,周静,等. 四种改良剂对Cu、Cd复合污染土壤中Cu、Cd形态和土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(10):1507-1512
DU Z M, HAO J S, ZHOU J, et al. Effects of four amendments on Cu and Cd forms and soil enzyme activity in Cu-Cd polluted soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1507-1512
- [20] 章可奕,肖辉,田秀平,等. 牛粪与脱硫石膏配施对滨海盐碱土壤及小麦生长的影响[J]. 中国农学通报,2024,40(30):66-74
ZHANG K Y, XIAO H, TIAN X P, et al. Effects of combined

- application of cow manure and desulfurized gypsum on coastal saline soil and growth of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(30): 66-74
- [21] 李琰, 李雨晨, 于爱萍, 等. 8份无芒雀麦种质资源的草产量与营养品质的综合评价[J]. 作物学报, 2025, 51(12): 3377-3386
- LI Y, LI Y C, YU A P, et al. Comprehensive evaluation of forage yield and nutritional quality in eight *Bromus inermis* germplasm resources[J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(12): 3377-3386
- [22] ROHWEDER D A, BARNES R F, JORGENSEN N. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality[J]. Journal of Animal Science, 1978, 47(3): 747-759
- [23] 王文虎, 曹文侠, 王小军, 等. 河西走廊荒漠灌区不同豆禾混播对土壤养分及牧草产量的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(5): 40-49
- WANG W H, CAO W X, WANG X J, et al. Effects of legume-grass mixtures on soil nutrients and forage yield in desert irrigated area of Hexi Corridor[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(5): 40-49
- [24] 王小萍, 白羿雄, 姚晓华, 等. 刈割留茬高度对青稞饲草与籽粒产量及饲用品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(4): 513-523
- WANG X P, BAI Y X, YAO X H, et al. Effect of mowing stubble height on forage and grain yield and forage quality characteristics of hulless barley[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(4): 513-523
- [25] 罗林杰, 曾健, 田朝霞, 等. 植物的发育: 从细胞到个体[J]. 科学通报, 2016, 61(33): 3532-3540
- LUO L J, ZENG J, TIAN Z X, et al. Plant development: from cells to individuals[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(33): 3532-3540
- [26] 薛远赛, 师长海, 王源溪, 等. 过磷酸钙及有机肥混施对盐碱地小麦光合特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(20): 1-6
- XUE Y S, SHI C H, WANG Y X, et al. Mixed application of superphosphate and organic fertilizer: effects on photosynthetic characteristics and yield of wheat in saline alkali soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(20): 1-6
- [27] 郭同铠, 毛伟兵, 孙玉霞, 等. 腐殖酸对滨海黏质盐土持水性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 32-36, 55
- GUO T K, MAO W B, SUN Y X, et al. Effects of humic acid on water holding properties of clay solonchak[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 32-36, 55
- [28] 钟瑾, 郭旭生, 邵涛, 等. 草产品加工及利用的生物学基础及研究进展[J]. 中国科学基金, 2024, 38(4): 668-676
- ZHONG J, GUO X S, SHAO T, et al. Biological basis and research progress of forage grass products processing and utilization[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2024, 38(4): 668-676
- [29] 陈星星, 刘新社, 王盛荣. 腐殖酸对盐胁迫下土壤理化性质、微环境及苦瓜生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(17): 138-144
- CHEN X X, LIU X S, WANG S R. Influences of humic acid on soil physical and chemical properties, microenvironment and balsam pear growth under salt stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(17): 138-144
- [30] HU Y W, LI Q K, SONG C J, et al. Effect of humic acid combined with fertilizer on the improvement of saline-alkali land and cotton growth[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2021, 19(2): 1279-1294
- [31] 王小军, 王金兰, 琚泽亮, 等. 环青海湖地区不同饲用燕麦品种生产性能和营养品质综合评价[J]. 中国农业科学, 2024, 57(19): 3730-3742
- WANG X J, WANG J L, JU Z L, et al. Comprehensive evaluation on production performance and nutritional quality of different varieties of forage oat in the Qinghai Lake area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(19): 3730-3742
- [32] ALSUDAYS I, ALSHAMMARY F, ALABDALLAH N, 等. 在盐碱地条件下施用腐植酸和黄腐酸对大麦生长和产量的改善作用[J]. 腐植酸, 2025(1): 51-62
- ALSUDAYS I, ALSHAMMARY F, ALABDALLAH N, et al. Applications of humic and fulvic acid under saline soil conditions to improve growth and yield in barley[J]. Humic Acid, 2025(1): 51-62
- [33] 王运涛, 杨志敏, 刘建成, 等. 冀西北地区21个燕麦品种生产性能与营养品质综合评价[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1311-1318
- WANG Y T, YANG Z M, LIU J C, et al. Comprehensive evaluation of production performance and nutritional quality of 21 oat varieties in northwest of Hebei Province[J]. Acta Agraria Sinica, 2020, 28(5): 1311-1318
- [34] 罗海波, 何雄, 包永华, 等. 鲜切果蔬品质劣变影响因素及其可能机理[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 324-330
- LUO H B, HE X, BAO Y H, et al. Affecting factors and possible mechanisms of quality deterioration in fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food Science, 2012, 33(15): 324-330

(责任编辑 闵芝智)