

DOI:10.11686/cyxb2025176

http://cyxb.magtech.com.cn

刘朝荣, 陈永成, 陈莹, 等. 新疆盐碱化土壤下不同羊草的耐盐碱性差异研究. 草业学报, 2026, 35(4): 29—41.

LIU Chao-rong, CHEN Yong-cheng, CHEN Ying, *et al.* Differences in saline-alkali tolerance of five *Leymus chinensis* cultivars grown in saline-alkali soil from Xinjiang. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 29—41.

新疆盐碱化土壤下不同羊草的耐盐碱性差异研究

刘朝荣¹, 陈永成¹, 陈莹¹, 张旭东¹, 胡天宇¹, 苏力合¹, 张凡凡¹, 王旭哲¹, 姚琨²,
马春晖^{1*}

(1. 石河子大学动物科技学院, 新疆 石河子 832000; 2. 精河县天北牧业草料种植专业合作社, 新疆 博尔塔拉 833400)

摘要:为探究不同羊草品种(品系)对新疆北疆地区盐碱土的适应性,采用盆栽试验,以灰色羊草(HS)、中科一号羊草(ZK)、黄岗梁羊草(HGL)、赤峰羊草(CF)、东北羊草(DB)为对象,设置农田土(CK)、轻度(S₁)、中度(S₂)、重度(S₃)、极重度(S₄)5个盐碱胁迫强度,对盐碱胁迫下羊草生长、光合、生理特性和营养品质等进行观测和分析,利用聚类分析和模糊隶属函数法综合评价5份羊草的耐盐碱性。结果表明,轻度盐碱胁迫对羊草生长特性、光合速率和营养品质具有一定的促进作用。随着胁迫强度的增加,羊草农艺性状(株高、分蘖数、叶片数、茎粗、地上和地下部分干重)、光合特性(净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO₂浓度)和光合色素(叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b、类胡萝卜素)下降,羊草叶片相对电导率、丙二醛、渗透调节物质(脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖)含量增加,抗氧化酶(过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶)活性升高,营养品质降低,且同一指标在羊草间存在品种差异($P < 0.05$)。基于聚类分析和耐盐碱性综合评价D值,羊草耐盐碱性排序为HS>HGL>ZK>CF>DB,灰色羊草和黄岗梁羊草综合表现较好,具有在新疆地区盐碱地进一步推广种植的价值。本研究结果可为区域化羊草品种筛选、后期羊草推广种植和盐碱地改良利用提供理论基础。

关键词:羊草;盐碱胁迫;综合评价;隶属函数

Differences in saline-alkali tolerance of five *Leymus chinensis* cultivars grown in saline-alkali soil from Xinjiang

LIU Chao-rong¹, CHEN Yong-cheng¹, CHEN Ying¹, ZHANG Xu-dong¹, HU Tian-yu¹, SU Li-he¹,
ZHANG Fan-fan¹, WANG Xu-zhe¹, YAO Kun², MA Chun-hui^{1*}

1. College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Jinghe County Tianbei Animal Husbandry Forage Planting Professional Cooperative, Bortala 833400, China

Abstract: We investigated the adaptability of different *Leymus chinensis* varieties (lines) to saline-alkali soil, a widely distributed soil type in northern Xinjiang, China. A pot experiment was conducted using five *L. chinensis* materials: Huise (HS), Zhongke No. 1 (ZK), Huanggangliang (HGL), Chifeng (CF), and Dongbei (DB). Five saline-alkaline stress levels were applied: farmland soil (CK), and slight (S₁), moderate (S₂), severe (S₃), and extreme (S₄) saline-alkaline stress. The growth, photosynthetic characteristics, physiological traits, and nutritional quality of the five *L. chinensis* varieties under saline-alkali stress were determined. The saline-alkali tolerance of the five *L. chinensis* materials was comprehensively evaluated by a cluster analysis and the membership function method. The

收稿日期:2025-05-07;改回日期:2025-06-25

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS)和高产优质牧草羊草品种筛选及高效生产关键技术集成与示范项目(2023AB069)资助。

作者简介:刘朝荣(2000—),男,贵州安龙人,在读硕士。E-mail: 1751442937@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: chunhuima@126.com

results show that slight saline-alkali stress had a promoting effect on the growth traits, photosynthetic rate, and nutritional quality of *L. chinensis*. With increasing severity of saline-alkali stress, significant declines were observed in agronomic traits (plant height, tiller number, leaf number, stem diameter, aboveground and underground dry weight), photosynthetic characteristics (net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration), and the contents of photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, carotenoids). Concurrently, leaf relative electrical conductivity and malondialdehyde content increased with increasing severity of saline-alkali stress. As the saline-alkali stress became more severe, the contents of osmotic adjustment substances (proline, soluble protein, soluble sugars) increased, as did the activities of antioxidant enzyme activities (peroxidase, catalase, superoxide dismutase), whereas nutritional quality parameters decreased. We detected significant differences in each measured index among the *L. chinensis* materials ($P < 0.05$). On the basis of the cluster analysis and comprehensive evaluation (D -values), the varieties were ranked from most to least saline-alkali tolerant as follows: HS > HGL > ZK > CF > DB. The varieties HS and HGL exhibited superior overall performance, demonstrating potential for large-scale cultivation across Xinjiang's saline-alkali areas. The results of this study provide a theoretical foundation for region-specific variety screening and support the cultivation of *L. chinensis* and remediation of saline-alkali soils in the future.

Key words: *Leymus chinensis*; saline-alkali stress; comprehensive evaluation; membership function

全球可用的土地资源正在逐步减少,土壤盐碱化是导致这一问题的主要原因之一^[1]。中国盐渍土总面积 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国可利用土地面积的 4.88%^[2], 位居世界第三。我国盐碱地分布广泛, 以西北、华北、东北及沿海滩涂地区最为严重^[3]。新疆因特殊的地形地质结构“三山夹两盆”形成了封闭的内陆盆地地貌格局, 导致盐分只能在区域内循环分配。干旱的气候条件(年平均降水量低、蒸发量高), 土壤盐分和含盐地下水在强烈蒸发作用下, 随土壤毛细管上升并聚集于地表。此外, 人类活动因素(渠系水渗漏、灌排工程不配套及不合理灌溉施肥)进一步导致地下水位升高, 引发不同程度的次生盐渍化。在干旱气候、封闭地形及不合理灌溉等多重因素的共同作用下, 新疆土壤普遍受到盐分影响, 且土壤盐分运移呈“生育期下移—非生育期上行”的往复特征, 这种动态过程决定了新疆盐碱地治理的复杂性和难度^[4]。传统的治理方法(灌溉洗盐和水旱轮作压盐)虽能快速降低作物生育期根层土壤盐分, 但其效果受制于充足的淡水资源供给, 同时还会导致部分可溶性盐和氮素淋失。盐碱地治理应以“因地制宜、分类施策”为核心, 通过“以种适地”与“以地适种”双向发力。近些年来, 在盐碱地种植耐盐碱植物的生物改良措施因其能有效降低土壤盐碱含量、改良土壤结构、提高生物多样性的优点, 而越来越受到关注^[5]。

羊草(*Leymus chinensis*)是禾本科赖草属多年生草本植物, 兼具强抗逆性与优质饲用价值(高产、适口性好)。其能够在 pH 8.5~11.5 的盐碱地上存活, 是非盐生植物中耐盐碱较好的植物^[6], 但不同的羊草品种耐盐碱性相差较大^[7-10]。盐碱胁迫下, 羊草进行光合调控: 其叶绿素含量显著降低, 但通过提升水分利用效率减少盐分摄入^[11]。抗氧化防御: 激活抗氧化酶系统清除活性氧^[12], 但重度胁迫时酶活性受抑制, 植物遭受损伤。渗透调节: 通过积累有机溶质维持渗透平衡, 其灰绿型羊草抵抗盐碱胁迫的能力更强^[13-14]。综上表明羊草耐盐碱能力与其生长特性^[15]、光合效率^[11]和生理代谢^[12]密切相关, 尤其是渗透调节物质积累和抗氧化酶活性变化是适应逆境的关键机制。目前羊草的耐盐碱相关研究多聚焦于羊草种子萌发^[7-8]、苗期幼苗生长及生理响应^[9-10]等早期阶段, 对全生育期盐碱胁迫下羊草的抗逆性与营养品质的变化缺乏探讨, 尤其在新疆等特殊生境中, 如何筛选出兼具高抗性与优质饲用价值的羊草品种仍存在空白。基于此, 本研究基于新疆盐碱地实际生态条件, 采用原位盐碱土配制盐碱胁迫处理, 确保土壤离子组成与田间环境高度一致, 模拟羊草自然生长状况。拟通过多梯度盐碱胁迫试验, 结合羊草生长、光合、生理特性和营养品质等多维度指标, 进行聚类分析和耐盐碱性综合评价, 筛选出耐盐碱的羊草品种, 为区域化羊草品种筛选、后期羊草推广种植和盐碱地改良利用提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试羊草(灰色羊草、中科一号羊草、黄岗梁羊草、赤峰羊草、东北羊草)由中国农业科学院草原研究所提供。供试土壤取自新疆石河子大学牧草试验站 4 连(44°20'59" N, 85°57'32" E) 0~30 cm 农田土壤和新疆石河子市 147 团 18 连(44°36'23" N, 85°1'0" E) 0~30 cm 的盐碱土壤,属温带大陆性干旱气候,年平均气温 7~8 °C,年降水量 180~270 mm,年蒸发量为 1000~1500 mm。

1.2 试验方法

参考第二次农业土壤普查盐渍化分级标准^[16],于 2024 年 5 月 20 日,将自然农田土壤与盐碱土壤按重量比例配置,依据总盐含量设置农田土(CK)、轻度盐碱土(S₁)、中度盐碱土(S₂)、重度盐碱土(S₃)和极重度盐碱土(S₄)共 5 个处理(表 1)。将混合均匀的盐碱土壤装入 18.0 cm×15.5 cm×18.0 cm 花盆,每盆 3 kg。于 2024 年 5 月 28 日,将灰色羊草(HS)、中科一号羊草(ZK)、黄岗梁羊草(HGL)、赤峰羊草(CF)、东北羊草(DB)长势一致、形态相近的三叶幼苗移栽至装有等量盐碱土壤的花盆中,每盆 15 株幼苗,每天采用称重法补水^[17],每周向盆中加入 50 mL Hoagland 营养液[945 mg·L⁻¹ Ca(NO₃)₂·4H₂O, 607 mg·L⁻¹ KNO₃, 493 mg·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O, 115 mg·L⁻¹ (NH₄)₂HPO₄]。试验共 25 组处理,每个处理重复 8 次,共 200 盆。盐碱胁迫处理 30 d 后统一收取各处理组羊草幼苗叶片,测定各处理组生长指标、光合参数、光合色素和生理指标。胁迫处理 120 d 后收取各处理组羊草地上部分,测定羊草营养品质。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

处理 Treatment	农田土壤含量 Content of farmland soil (%)	pH	电导率 Electrical conductivity (dS·m ⁻¹)	总盐 Total salt (%)	Cl ⁻ (g·kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (g·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (g·kg ⁻¹)
CK	100	7.42	0.71	0.1	0.16	0.08	1.23
S ₁	90	7.63	1.49	0.2	0.27	0.12	3.32
S ₂	70	7.87	2.84	0.4	0.48	0.17	6.54
S ₃	50	8.06	4.04	0.8	0.73	0.23	12.87
S ₄	0	8.34	6.99	1.2	1.03	0.32	19.91

CK: 农田土 Farmland soil; S₁: 轻度盐碱土 Slight saline-alkali soil; S₂: 中度盐碱土 Moderate saline-alkali soil; S₃: 重度盐碱土 Severe saline-alkali soil; S₄: 极重度盐碱土 Extremely severe saline-alkali soil; 盐碱胁迫处理强度设置参考第二次农业土壤普查盐渍化分级标准 The intensity of saline-alkali stress treatment was set according to the saline-alkali classification standard of the second agricultural soil survey; 由于供试土壤中 CO₃²⁻ 含量太低,在本研究中该指标数据未进行统计分析 Due to the extremely low content of CO₃²⁻ in the tested soil, the data of this indicator was not statistically analyzed in this study.

1.3 测定指标及方法

1.3.1 羊草农艺性状测定 盐碱胁迫 30 d 后,随机选取各盐碱胁迫处理下 3 盆羊草植株,每个重复取 5 株羊草植株合并累计,用钢卷尺测定株高,电子游标卡尺测定茎粗,对叶片数和分蘖数进行计数后于 105 °C 烘箱中杀青 30 min,转至 65 °C 烘干至恒重。地上和地下部分干重取 10 株植株合并称重记作样品干重^[18]。每个处理 3 次重复。

1.3.2 羊草光合特性测定 盐碱胁迫 30 d 后,于晴朗无风天气(11:00—13:00),随机选取盐碱胁迫处理下羊草植株 3 株,植株顶端第 2 片展开叶测定其光合参数,测定指标包括净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)、胞间 CO₂ 浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i),重复 3 次,取平均值^[19]。采用乙醇浸提法测定叶绿素 a(chlorophyll a, chl a)、叶绿素 b(chlorophyll b, chl b)和类胡萝卜素(carotenoid, Car)含量^[20]。每处理 3 次重复。

1.3.3 羊草生理特性测定 盐碱胁迫 30 d 后,采集羊草叶片。采用电导仪法测定相对电导率(relative

electrical conductivity, REC)^[21],由苏州格锐思生物科技有限公司提供的试剂盒测定丙二醛(malondialdehyde, MDA-G0109W)、可溶性糖(soluble sugar, SS-G0501W)、可溶性蛋白(soluble protein, SP-G0417W)和脯氨酸(proline, Pro-G0111W)含量及过氧化物酶(peroxidase, POD-G0107W)、过氧化氢酶(catalase, CAT-G0105W)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD-G0101W)活性。每处理3次重复。

1.3.4 羊草营养品质测定 盐碱胁迫120 d后,收取各处理组羊草,称量鲜重后,置于105 °C烘箱中杀青30 min,65 °C烘干至恒重。将烘干的样品粉碎后过筛,混合均匀装入自封袋,用于测定营养成分。参考罗俊杰等^[22]营养品质测定方法,测定各处理组干物质(dry matter, DM)、粗蛋白(crude protein, CP)、粗脂肪(ether extract, EE)、粗灰分(crude ash, Ash)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量。每个处理3次重复。

1.3.5 羊草耐盐碱性综合评价 运用模糊数学隶属函数法计算各指标的隶属函数值,隶属函数公式为:

$$R_i = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (1)$$

$$R_i = (X_{i\max} - X_i) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=1}^n R_i, i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: R_i 为第*i*个指标的隶属函数值; X_i 为第*i*个指标, $X_{i\max}$ 、 $X_{i\min}$ 分别表示第*i*个指标的最大值和最小值; D 为羊草耐盐碱综合评价值。当耐盐性与指标呈正相关关系时采用公式(1)计算,负相关时采用公式(2)计算。

1.4 数据统计与分析

采用Excel 2019软件对数据进行整理,利用SPSS 20.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和聚类分析,用Duncan检验法进行多重比较。采用Origin 2021软件和Chplot(<https://www.chplot.online/>)作图。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对羊草农艺性状的影响

与CK相比, S_1 处理,各羊草分蘖数和茎粗显著升高($P < 0.05$,图1)。CK处理,HGL地下部分干重显著高于其他羊草($P < 0.05$)。 S_1 处理,HS、ZK和HGL茎粗显著高于DB。 S_2 处理,HS和HGL株高、分蘖数、茎粗和地下部分干重显著高于CF和DB($P < 0.05$)。 S_3 和 S_4 处理,CF、DB株高显著低于其他羊草($P < 0.05$),HGL分蘖数和茎粗显著高于CF和DB($P < 0.05$)。

2.2 盐碱胁迫对羊草光合特性的影响

与CK相比, S_1 处理,羊草 T_r 、 G_s 和 C_i 显著升高($P < 0.05$),随着盐碱胁迫强度的增加,羊草 P_n 、 T_r 和 G_s 在 S_3 和 S_4 处理显著下降($P < 0.05$,图2)。CK处理,HGL羊草 T_r 显著高于其他羊草($P < 0.05$),HS、ZK和HGL羊草 G_s 显著高于CF和DB($P < 0.05$)。 S_1 处理,HS、ZK和HGL羊草 G_s 和 C_i 显著高于CF和DB($P < 0.05$),HS和ZK羊草 P_n 显著高于CF和DB($P < 0.05$)。 S_2 处理,CF和DB羊草 T_r 、 G_s 和 C_i 显著低于其他羊草($P < 0.05$),DB和ZK羊草 P_n 差异不显著。 S_3 和 S_4 处理,CF和DB羊草 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 显著低于其他羊草($P < 0.05$)。

相较于CK, S_1 处理,羊草chl a+b和Car显著升高($P < 0.05$),其中ZK羊草chl a、chl b、chl a+b和Car显著高于其他羊草($P < 0.05$,图3),随着盐碱胁迫强度的增加,各羊草chl a、chl b、chl a+b和Car在 S_3 和 S_4 处理下显著降低($P < 0.05$)。 S_2 和 S_3 处理,HS、ZK、HGL羊草chl b和chl a+b显著高于CF和DB($P < 0.05$)。 S_4 处理,HS羊草chl a、chl b和chl a+b显著高于其他羊草($P < 0.05$)。

2.3 盐碱胁迫对羊草生理特性的影响

2.3.1 盐碱胁迫对羊草细胞膜透性的影响 CK处理下,HS和HGL羊草REC和MDA含量显著低于CF和DB($P < 0.05$,图4)。随着盐碱胁迫强度的增加,羊草REC和MDA含量呈逐渐上升趋势。 S_1 处理,CF和DB羊草REC和MDA显著高于其他羊草($P < 0.05$)。 S_2 、 S_3 和 S_4 处理,HS、ZK和HGL羊草MDA含量显著低于CF和DB($P < 0.05$),DB羊草REC显著高于HS和HGL($P < 0.05$)。

2.3.2 盐碱胁迫对羊草渗透调节物质的影响 随盐碱胁迫强度的增加,Pro和SP含量分别在 S_4 和 S_3 达到最大,且显著高于其他盐碱胁迫处理($P < 0.05$,图5)。 S_2 处理,DB羊草Pro含量显著低于其他羊草($P < 0.05$)。 S_3

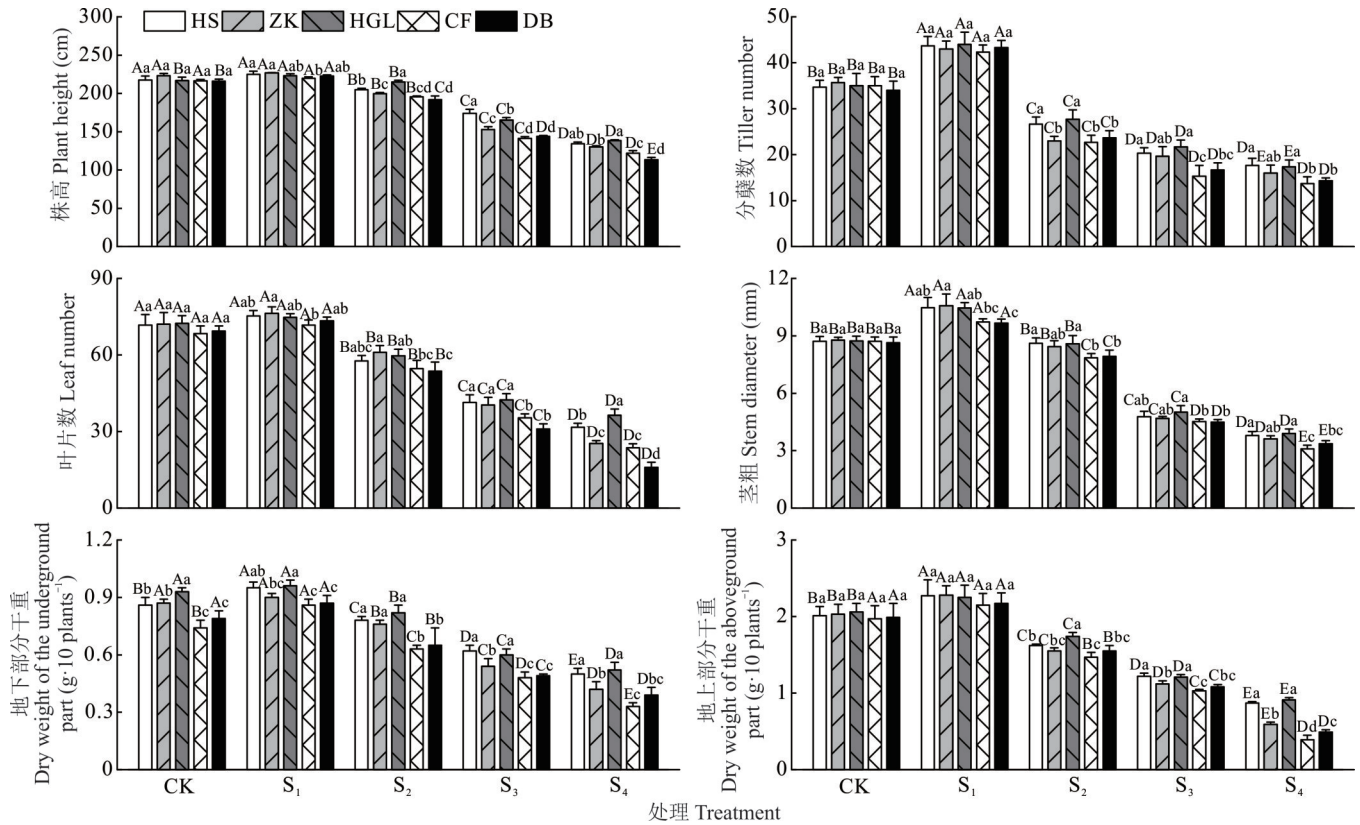


图 1 盐碱胁迫对羊草农艺性状的影响

Fig. 1 Effect of saline-alkali stress on agronomic traits of *L. chinensis*

HS: 灰色羊草 Huise *L. chinensis*; ZK: 中科一号羊草 Zhongke No. 1 *L. chinensis*; HGL: 黄岗梁羊草 Huanggangliang *L. chinensis*; CF: 赤峰羊草 Chifeng *L. chinensis*; DB: 东北羊草 Dongbei *L. chinensis*. 不同小写字母表示同一盐碱胁迫处理下不同羊草间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一羊草在不同盐碱胁迫处理下差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different *L. chinensis* under the same saline-alkali stress treatment ($P < 0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences of the same *L. chinensis* under different saline-alkali stress treatments ($P < 0.05$). The same below.

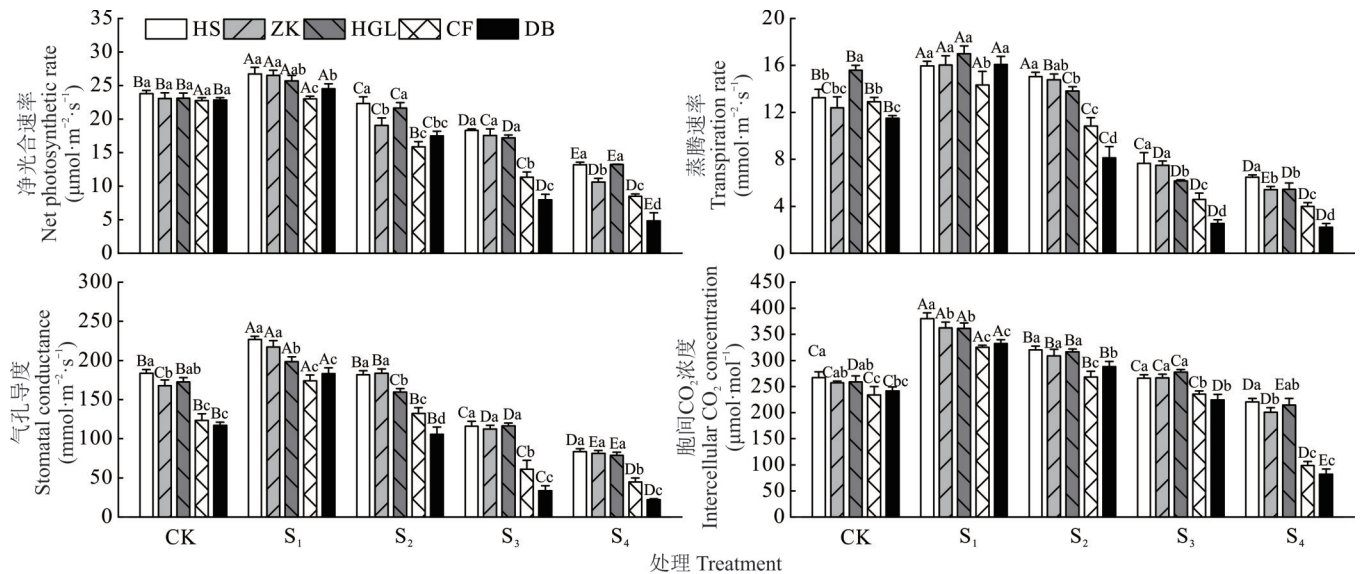


图 2 盐碱胁迫对羊草光合参数的影响

Fig. 2 Effects of saline-alkali stress on photosynthetic parameters of *L. chinensis*

处理, CF 羊草 SS 含量显著低于其他羊草 ($P < 0.05$), 且 CF 和 DB 羊草的 Pro 含量显著低于其他羊草 ($P < 0.05$)。S₄ 处理, HS 和 HGL 羊草 SS、SP 和 Pro 含量显著高于其他羊草 ($P < 0.05$)。

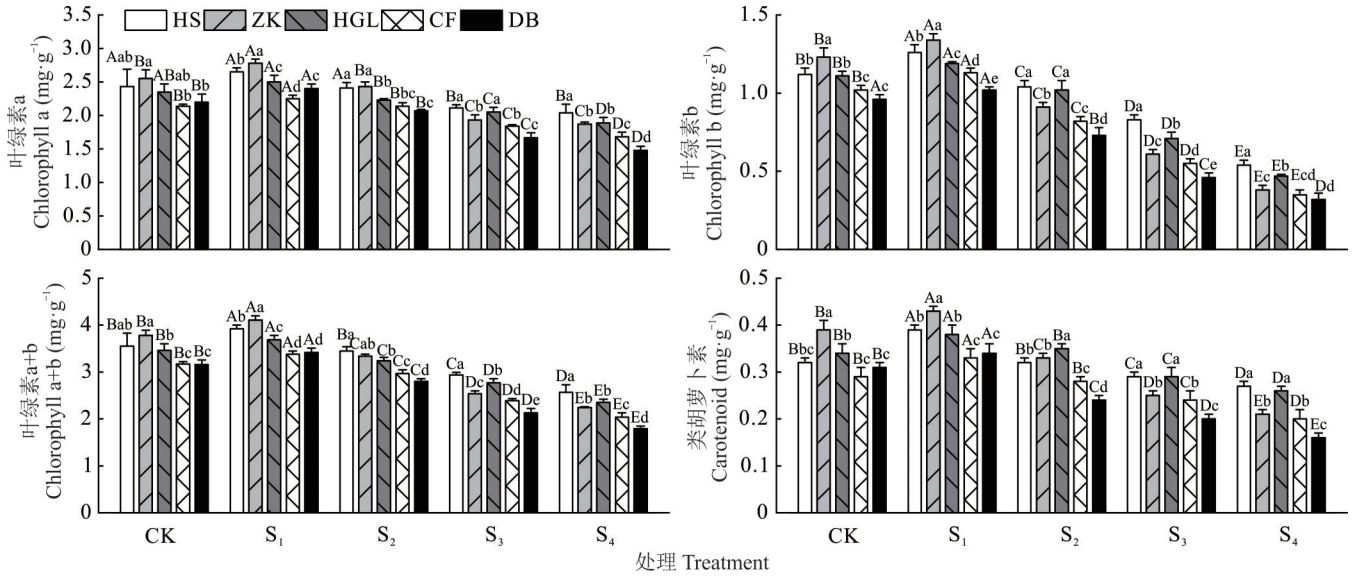


图3 盐碱胁迫对羊草光合色素的影响

Fig. 3 Effect of saline-alkali stress on photosynthetic pigment of *L. chinensis*

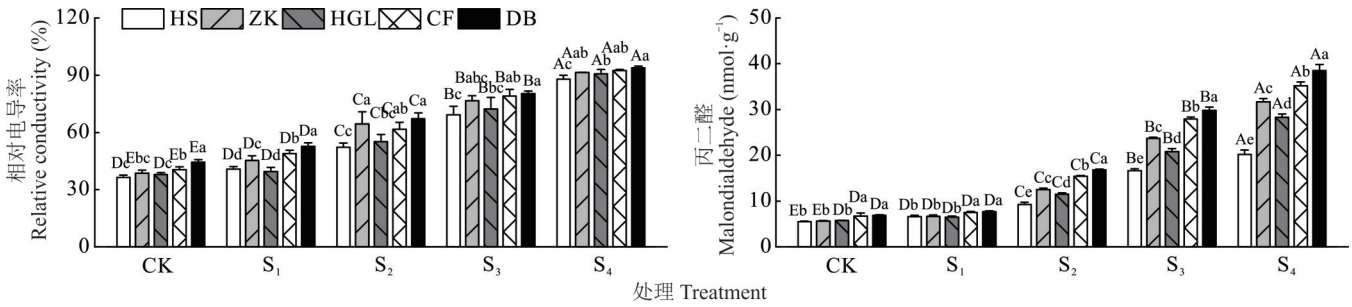


图4 盐碱胁迫对羊草细胞膜透性的影响

Fig. 4 Effect of saline-alkali stress on membrane permeability of *L. chinensis*

2.3.3 盐碱胁迫对羊草抗氧化酶活性的影响 随着盐碱胁迫强度的增加,羊草 POD、CAT 和 SOD 活性分别在 S₂、S₃ 和 S₄ 处理下达到最高(图 6),且显著高于其他盐碱胁迫处理($P < 0.05$)。CK 处理,CF 羊草 POD 和 CAT 活性显著低于 ZK($P < 0.05$),且 CF 和 DB 羊草 SOD 活性显著低于其他羊草($P < 0.05$)。S₁ 处理,ZK 羊草 POD 活性显著高于其他羊草($P < 0.05$)。S₂ 处理,DB 羊草 POD 活性显著高于其他羊草($P < 0.05$)。S₃ 处理,HGL 羊草 POD 活性显著高于其他羊草($P < 0.05$),且 HGL、HS 羊草的 CAT 和 SOD 活性显著高于其他羊草($P < 0.05$)。S₄ 处理,DB 羊草 CAT 和 SOD 活性显著低于其他羊草($P < 0.05$)。

2.4 盐碱胁迫对羊草营养品质的影响

相较于 CK, S₁ 处理,羊草 NDF 和 Ash 含量显著升高($P < 0.05$,图 7)。S₁ 处理,CF 和 DB 羊草 DM、CP 和 NDF 含量显著低于其他羊草($P < 0.05$),但 DB 羊草 ADF 含量显著高于其他羊草($P < 0.05$)。S₂ 处理,HGL 羊草 DM 和 CP 含量显著高于其他羊草($P < 0.05$),CF 和 DB 羊草 Ash 含量显著低于其他羊草($P < 0.05$)。S₃ 和 S₄ 处理,HS、ZK 和 HGL 羊草 NDF 和 Ash 含量显著高于 CF 羊草($P < 0.05$),HGL 羊草 DM、CP 和 EE 含量显著高于 CF 和 DB($P < 0.05$)。

2.5 盐碱胁迫下 5 份羊草的综合评价

通过隶属函数值排序,综合评价不同羊草的耐盐碱性(表 2)。CK 和 S₁ 处理,CF 和 DB 羊草显著低于 HS、ZK 和 HGL($P < 0.05$),综合排序分别为 ZK > HS/HGL > CF/DB 和 HS/ZK > HGL > DB > CF。S₂ 和 S₄ 处理,HS 和 HGL 羊草差异不显著,其他羊草间差异显著($P < 0.05$),综合排序为 HS/HGL > ZK > CF > DB。S₃ 处理,各羊草

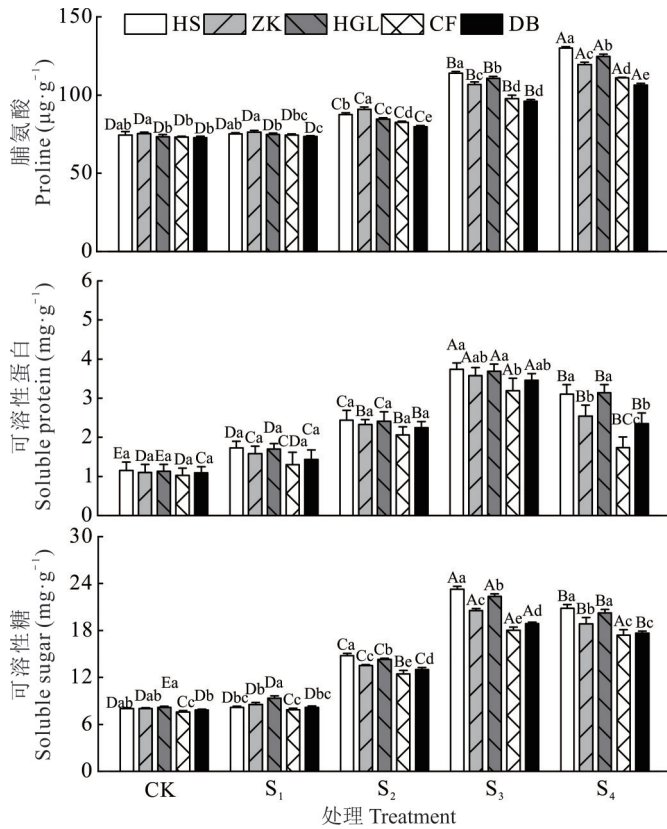


图 5 盐碱胁迫对羊草渗透调节物质的影响

Fig. 5 Effect of saline-alkali stress on osmotic regulatory substances of *L. chinensis*

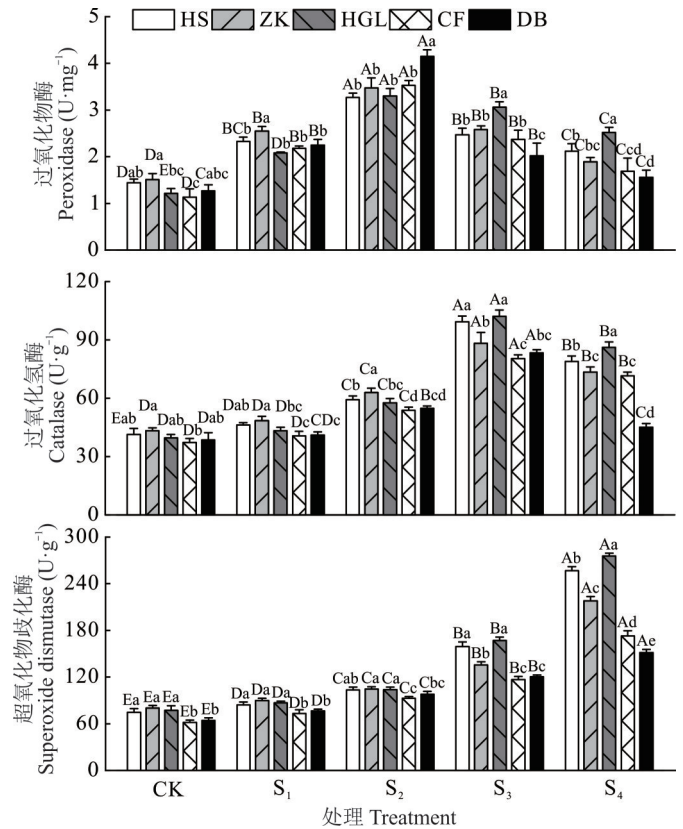


图 6 盐碱胁迫对羊草抗氧化酶活性的影响

Fig. 6 Effect of saline-alkali stress on antioxidant enzyme activities of *L. chinensis*

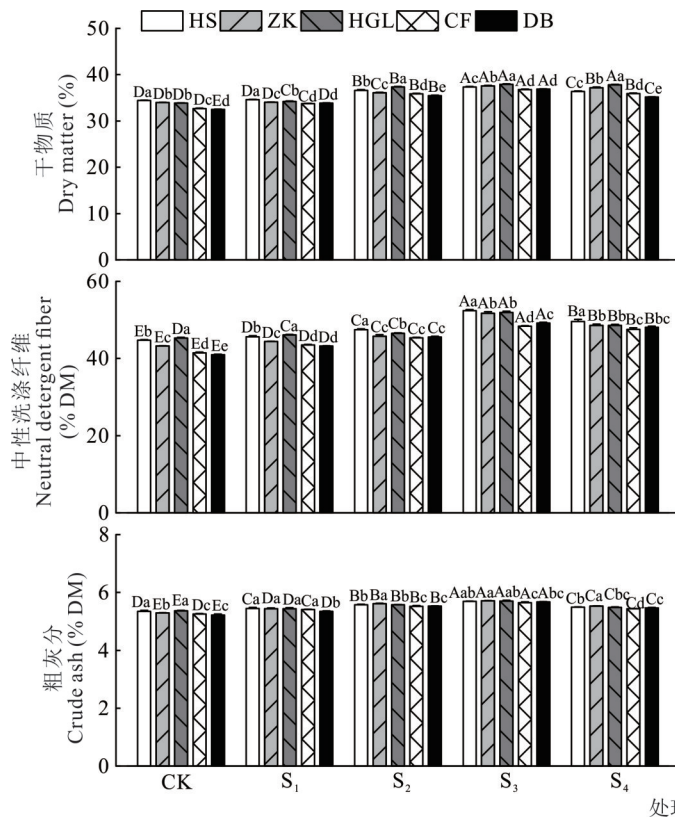
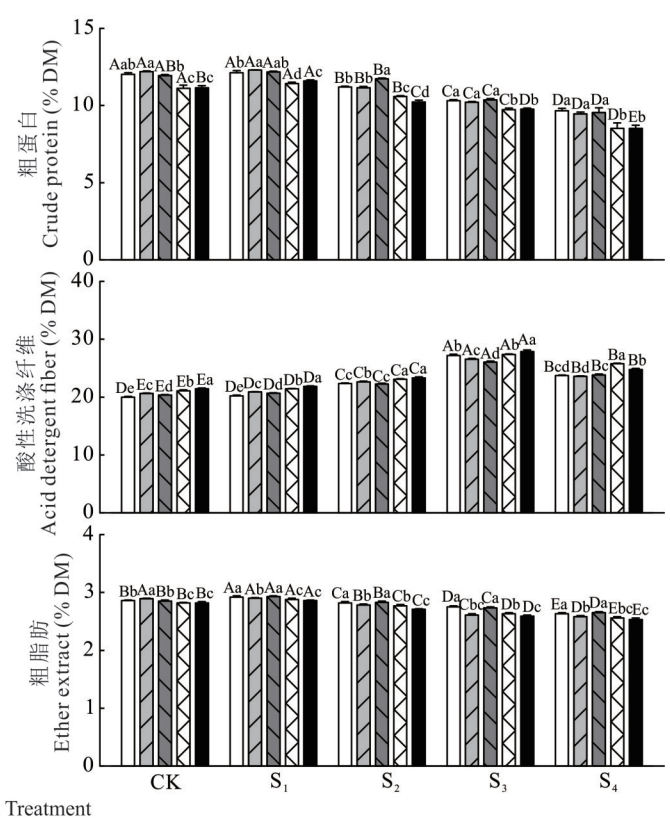


图 7 盐碱胁迫对羊草营养品质的影响

Fig. 7 Effect of saline-alkali stress on nutritional quality of *L. chinensis*



间差异显著 ($P < 0.05$), 综合排序为 HS > HGL > ZK > CF > DB。5 份羊草综合平均隶属函数值排序为 HS > HGL > ZK > CF > DB。

通过隶属函数值排序, 综合评价羊草对盐碱胁迫的响应情况(表 2)。HS 羊草, CK 和 S₃ 处理差异不显著, 其他处理间差异显著 ($P < 0.05$), 综合评价排序为 S₁ > S₂ > S₃ > CK > S₄。HGL 羊草, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 综合评价排序为 S₁ > S₂ > CK > S₃ > S₄。ZK、CF 和 DB 羊草, CK 和 S₂ 处理差异不显著, 其他处理间差异显著 ($P < 0.05$), 综合评价排序分别为 S₁ > S₂/CK > S₃ > S₄、S₁ > S₂ > CK > S₃ > S₄ 和 S₁ > CK > S₂ > S₃ > S₄。

表 2 盐碱胁迫下 5 份羊草的综合评价与排序

Table 2 Comprehensive evaluation and ranking of five *L. chinensis* under saline-alkali stress

材料 Material	处理 Treatment	农艺性状 Agronomic character	光合特性 Photosynthetic characteristics	生理特性 Physiological characteristics	营养品质 Nutritional quality	综合平均值 Composite average value	耐盐碱性排序 Order of saline- alkali tolerance		
HS	CK	0.79	0.72	0.37	0.46	0.58Ac	0.59	4	1
	S ₁	0.94	0.91	0.40	0.54	0.69Aa		1	
	S ₂	0.65	0.73	0.50	0.63	0.63Ab		2	
	S ₃	0.38	0.50	0.68	0.79	0.59Ac		3	
	S ₄	0.21	0.36	0.63	0.52	0.43Ad		5	
ZK	CK	0.81	0.76	0.37	0.43	0.59Ab	0.55	2	3
	S ₁	0.93	0.94	0.39	0.51	0.69Aa		1	
	S ₂	0.62	0.69	0.48	0.59	0.59Bb		2	
	S ₃	0.32	0.41	0.57	0.73	0.51Cc		3	
	S ₄	0.14	0.25	0.51	0.51	0.35Bd		4	
HGL	CK	0.82	0.72	0.35	0.45	0.58Ac	0.58	3	2
	S ₁	0.93	0.85	0.39	0.54	0.68Aa		1	
	S ₂	0.69	0.68	0.47	0.66	0.63Ab		2	
	S ₃	0.38	0.46	0.66	0.78	0.57Bd		4	
	S ₄	0.24	0.31	0.62	0.55	0.43Ae		5	
CF	CK	0.75	0.59	0.32	0.29	0.49Bb	0.45	3	4
	S ₁	0.87	0.72	0.33	0.45	0.59Ba		1	
	S ₂	0.54	0.52	0.41	0.53	0.50Cb		2	
	S ₃	0.24	0.29	0.47	0.64	0.41Dc		4	
	S ₄	0.06	0.14	0.40	0.42	0.26Cd		5	
DB	CK	0.76	0.59	0.32	0.28	0.49Bb	0.43	2	5
	S ₁	0.88	0.76	0.33	0.44	0.60Ba		1	
	S ₂	0.55	0.46	0.41	0.49	0.48Db		3	
	S ₃	0.25	0.18	0.47	0.66	0.39Ec		4	
	S ₄	0.06	0.03	0.31	0.39	0.20Dd		5	

注: 不同小写字母表示同一羊草在不同盐碱胁迫处理下差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一盐碱胁迫处理下不同羊草间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences the same *L. chinensis* under different saline-alkali stress treatments ($P < 0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences among different *L. chinensis* under the same saline-alkali stress treatment ($P < 0.05$).

2.6 盐碱胁迫下羊草聚类分析

对各指标平均值进行聚类分析(图 8), 将 5 份羊草的耐盐碱性分为 III 类, 即耐盐碱性较强、耐盐碱性较好和耐盐碱性较弱。其中灰色和黄岗梁羊草耐盐碱性较强, 中科一号羊草耐盐碱性较好, 赤峰和东北羊草耐盐碱性较弱。

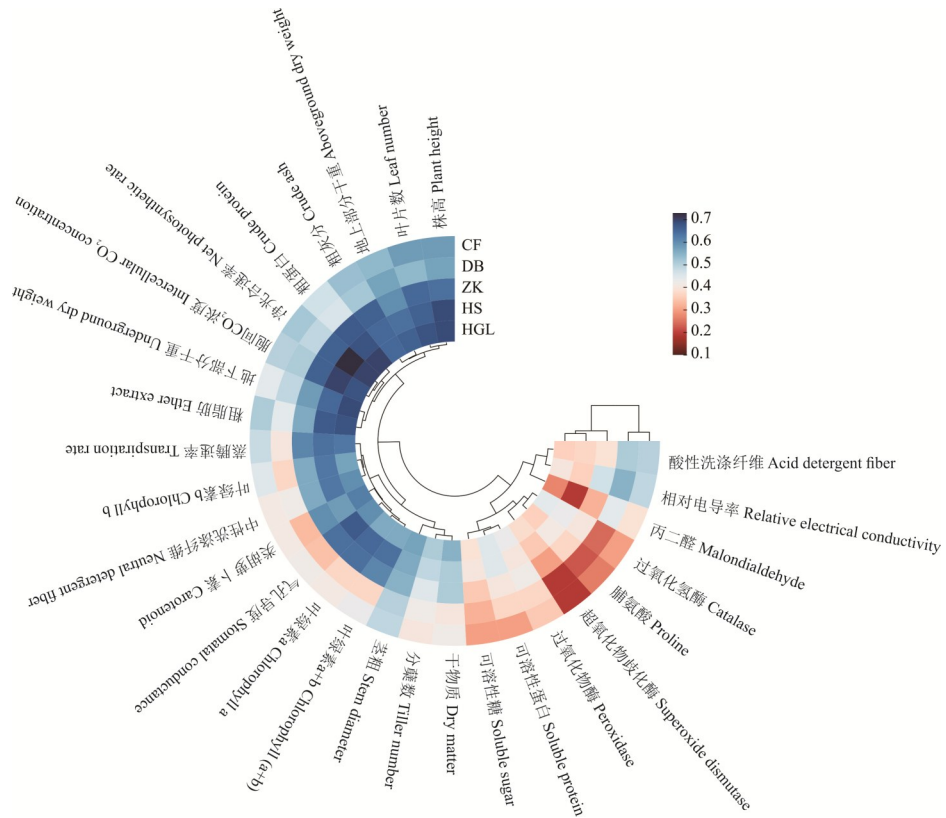


图 8 盐碱胁迫下羊草的聚类分析
 Fig. 8 Cluster analysis of *L. chinensis* under saline-alkali stress

3 讨论

3.1 盐碱胁迫下羊草的生长响应

株高、茎粗和生物量等形态指标是植株生长状况和生产能力的直接体现,能够直观反映植物对盐碱的耐受能力^[23]。盐碱胁迫下,植物的株高、茎粗、生物量积累均随着胁迫浓度的增加而受到不同程度的抑制^[24]。本研究中,羊草株高、茎粗、地上和地下部分干重等农艺性状、叶绿素含量和光合作用均随着盐碱胁迫强度增加而下降,其中赤峰和东北羊草下降幅度高于其他羊草,表明赤峰和东北羊草对于盐碱耐受性能力较差。同时,本研究也进一步证实了羊草对于盐碱胁迫生长响应呈“低促高抑”的效应,即同一指标在羊草品种间的差异随胁迫强度增加而愈发明显,这与熊雪等^[25]的研究结果相似。轻度盐碱胁迫下,羊草光合作用升高,这是由于低浓度盐碱环境的短暂刺激促进叶绿素的合成、根系分蘖和叶片扩展,形成“低剂量兴奋效应”,但此类促进作用具有阈值效应,当胁迫强度或持续时间超过临界值,抑制作用将占据主导^[26]。高浓度的盐碱环境能够抑制叶绿素合成关键酶的活性,同时叶绿素酶被激活,导致叶绿素游离从而不能被合成,最终引起光合速率下降^[11]。这一叶绿素变化趋势与李佳恺^[27]在 NaCl 胁迫下羊草生理及蛋白质组变化研究中的发现一致。黄立华等^[28]研究也指出,轻度碱化土壤上较高的生物量与叶绿素含量增加和光合能力提高有关,本研究结果与其相符。

3.2 盐碱胁迫下羊草的生理响应

植物遭受盐碱胁迫会诱导活性氧(reactive oxygen species, ROS)的生成积累,破坏植物细胞膜透性,REC 和 MDA 含量通常用来衡量植物细胞膜透性变化和受损程度,侧面反映植物对盐碱的耐受能力^[29]。本研究中,灰色和黄岗梁羊草 REC 和 MDA 随盐碱胁迫强度的增加上升幅度较低,表明灰色和黄岗梁羊草细胞膜受损程度低,对于盐碱胁迫的耐受性较强。随盐碱胁迫强度的增加,渗透势下降,间接形成水分胁迫,细胞膨压下降,细胞内电解质大量外渗^[27],细胞膜受损,导致羊草 REC 和 MDA 含量呈上升趋势。这与闫阔^[30]研究发现盐碱胁迫下,MDA 含量增加的变化趋势一致。周婵等^[31]研究发现随外界盐碱胁迫加重,渗透势下降,细胞内电解质大量外渗。颜宏

等^[32]研究发现盐碱处理,导致膜选择性丧失,其离子的毒害作用加重,导致电导率的数值更大。本研究结果与其一致。

植物为了减轻渗透胁迫带来的损伤,通常在细胞内积累渗透调节物质(SS、SP、Pro)来提高细胞内渗透压,维持正常的生理代谢^[30]。本研究中,当羊草遭受盐碱胁迫时,SS、SP和Pro含量都随着盐碱胁迫强度的增加逐渐升高,而当盐碱强度达到重度盐碱时,SS和SP含量明显下降,表明此时盐碱强度超过羊草的渗透调节能力范围。但在S₃和S₄处理,羊草Pro含量迅速增加。这与Peng等^[33]在苜蓿(*Medicago sativa*)幼苗对各种盐碱混合胁迫的生态生理特性研究中发现随盐碱梯度的上升,Pro含量在较高盐碱胁迫下也有加快的趋势,导致Pro大量积累达到最大值的变化趋势一致。Yang等^[34]研究发现当盐浓度高于240 mmol·L⁻¹时,Pro浓度随盐浓度升高而升高。本研究中,羊草叶片Pro和SS、SP含量在中度盐碱胁迫下显著低于重度盐碱胁迫处理,且显著高于CK处理,这与Yang等^[34]和Anjum等^[35]的研究结果一致。

植物为了防止膜脂过氧化,维持膜系统的完整性,依靠体内活性氧清除系统清除毒性自由基,SOD、POD和CAT是活性氧清除系统的关键酶^[36]。SOD能够避免羟自由基形成,POD和CAT将H₂O₂分解为水和氧气,从而减少和防御活性氧对细胞的损害^[37]。本研究中,CK~S₄处理,灰色和黄岗梁羊草CAT和SOD活性高于赤峰和东北羊草,表明灰色和黄岗梁羊草对体内产生的活性氧清除能力较强,避免堆积导致膜脂过氧化破坏体内正常生理代谢活动。并且POD、CAT和SOD活性随着盐碱胁迫强度的增加都有上升趋势,表明在羊草遭受盐碱胁迫时POD、CAT和SOD共同清除体内活性氧。这一抗氧化酶活性变化趋势与刘爱荣等^[38]在盐胁迫下盐芥(*Thellungiella halophila*)渗透调节物质的积累及其渗透调节作用研究发现结果一致。当盐碱强度超过中度时,体内ROS生成与清除之间的动态平衡被打破,酶活性有所下降。这与刘滨硕等^[39]在羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征研究结果一致。

3.3 盐碱胁迫对羊草营养品质的影响

营养品质对于评定优良牧草具有重要参考价值。盐碱胁迫对牧草营养品质具有显著影响,本研究表明,盐碱胁迫对羊草营养品质呈“低促高抑”效应:在轻度盐碱胁迫下,羊草CP含量有所升高,并且其SP含量显著积累,这与渗透调节机制激活及氮代谢酶活性增强密切相关。在重度盐碱胁迫下,氮吸收受阻导致蛋白质合成效率下降^[40],这与前人研究结果一致。本研究中,羊草ADF、NDF和Ash含量随盐碱胁迫强度增加呈上升趋势。Ash含量升高可能是由于羊草吸收土壤中的无机离子贮存于液泡以维持细胞代谢稳态,这与撒多文^[41]研究发现轻度和重度盐碱地紫花苜蓿粗灰分增加结果一致。极重度盐碱胁迫下,Ash含量下降,可能是因为此时离子转运系统崩溃^[32,42]。于浩然等^[43]通过对盐碱地紫花苜蓿营养品质研究发现,中度和重度盐碱化程度紫花苜蓿NDF、ADF含量降低。但本研究中羊草在中度和重度盐碱胁迫下ADF和NDF含量升高,可能是因为羊草通过增厚细胞壁进行适应性调整,缓解渗透胁迫带来的损伤。本研究中,羊草干物质含量随着盐碱胁迫强度的增加呈现上升趋势,这与曹明^[44]研究发现随盐浓度的增加,茎生物量和株高升高的变化趋势一致。综上,轻度盐碱环境通过激发羊草生理补偿机制改善其营养品质,但当胁迫强度超过羊草耐受范围后,膜脂损伤程度加剧与离子毒害共同降低其营养价值。

3.4 羊草耐盐碱性综合评价

植物受到盐碱胁迫后会产生一系列的复杂机制来抵抗胁迫,不同测定指标下5份羊草耐盐性存在一定的差异,因此利用多种指标进行综合评价,能更好地反映植物耐盐性的强弱^[25]。研究发现,灰色和黄岗梁羊草无论在何种盐碱胁迫处理下均表现出较强的耐盐碱性,中科一号羊草耐盐碱性较好,而赤峰和东北羊草耐盐碱性较弱,特别是在重度盐碱胁迫强度时,其生长、光合速率受到严重抑制,并且细胞膜透性增加,膜脂受到氧化损伤,其渗透调节物质积累较少和酶活性较低,导致其耐盐碱性较弱。此外,在盐碱胁迫下,灰色和黄岗梁羊草营养品质较好,其干物质、粗蛋白以及粗灰分含量高于赤峰和东北羊草。并且通过使用模糊隶属函数法对同一处理下不同羊草和同一羊草在不同处理下的耐盐碱性进行综合评价,反映出同一处理下不同羊草的耐盐碱性强弱和同一羊草对盐碱胁迫的响应情况。综上对5份羊草的耐盐碱性进行综合分析评价,耐盐碱性由高到低顺序为灰色羊草>

黄岗梁羊草>中科一号羊草>赤峰羊草>东北羊草。

4 结论

盐碱胁迫处理下,羊草生长特性、光合作用速率和营养品质均表现为“低促高抑”效应。基于系统聚类分析和耐盐碱性综合评价,5份羊草耐盐碱性由高到低为灰色羊草>黄岗梁羊草>中科一号羊草>赤峰羊草>东北羊草。从生长特性、光合作用速率、生理特性和营养品质综合特性来看,灰色羊草和黄岗梁羊草耐盐碱性较好,具有在新疆地区盐碱地进一步推广种植的价值。

参考文献 References:

- [1] Lyu H, Zhao Y, Gong X L, *et al.* Review of techniques and case studies for saline-alkali land amelioration in the coastal regions of China. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2025, 52(2): 25–43.
吕航, 赵月, 龚绪龙, 等. 我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究. *水文地质工程地质*, 2025, 52(2): 25–43.
- [2] Yang J S, Yao R J, Wang X P, *et al.* Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10–27.
杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望. *土壤学报*, 2022, 59(1): 10–27.
- [3] Zhang Y F, Li W Y, Hu H, *et al.* Research status and prospect of saline-alkaline land improvement. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(18): 7–10.
张翼夫, 李问盈, 胡红, 等. 盐碱地改良研究现状及展望. *江苏农业科学*, 2017, 45(18): 7–10.
- [4] Lyu N, Shi L, Dai Y Y, *et al.* Reclamation of saline-alkali soils in Xinjiang: A review. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(12): 1–10.
吕宁, 石磊, 戴显余, 等. 新疆盐碱地治理利用研究回顾与启示. *灌溉排水学报*, 2024, 43(12): 1–10.
- [5] Zhu J F, Cui Z R, Wu C H, *et al.* Research advances and prospect of saline and alkali land greening in China. *World Forestry Research*, 2018, 31(4): 70–75.
朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望. *世界林业研究*, 2018, 31(4): 70–75.
- [6] Zhu T C. Bio-ecology of *Leymus chinensis*. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2004.
祝廷成. 羊草生物生态学. 长春: 吉林科学技术出版社, 2004.
- [7] Liang R F, Wu Z N, Li Z Y, *et al.* Effects of low-temperature and light on seed germination of *Leymus chinensis*. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(12): 33–39.
梁润芳, 武自念, 李志勇, 等. 低温和光照对羊草种子萌发的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(12): 33–39.
- [8] Mu L L, Zhuang X, You J, *et al.* Evaluation of saline-alkali tolerance of 35 *Leymus chinensis* germplasm during germination. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2024(18): 91–96.
牟林林, 庄煦, 尤佳, 等. 35份羊草种质材料萌发期耐盐碱性评价. *黑龙江畜牧兽医*, 2024(18): 91–96.
- [9] Liang X, Hou X Y, Wang Y R, *et al.* Comprehensive evaluation on saline-alkali tolerance of *Leymus chinensis* germplasm resources. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(3): 1–9.
梁潇, 侯向阳, 王艳荣, 等. 羊草种质资源耐盐碱性综合评价. *中国草地学报*, 2019, 41(3): 1–9.
- [10] Ren J J, Wang F, Li Y L, *et al.* Effects of delinting treatment with hydrochloric acid on oxidation resistance of *Bothriochloa ischaemum*. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(6): 1862–1868.
任建军, 王菲, 李尹琳, 等. 盐酸脱绒处理对白羊草种子抗氧化性能的影响. *草地学报*, 2025, 33(6): 1862–1868.
- [11] Huang L H, Liang Z W, Ma H Y, *et al.* Effects of saline-sodic stress on the photosynthesis rate, transpiration rate and water use efficiency of *Leymus chinensis*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(5): 25–30.
黄立华, 梁正伟, 马红媛, 等. 苏打盐碱胁迫对羊草光合、蒸腾速率及水分利用效率的影响. *草业学报*, 2009, 18(5): 25–30.
- [12] Wang X. The physiological response of the atioxidant system in *Leymus chinensis* to different alkali-saline stress. Changchun: Jilin University, 2015.
王鑫. 羊草抗氧化系统对盐碱胁迫的响应特征. 长春: 吉林大学, 2015.
- [13] Xu Y Q. The response of rhizosphere effect and photosynthetic physiology of gray green and yellow green ecotypes of *Leymus chinensis* to salt-alkaline stress. Changchun: Northeast Normal University, 2019.
徐月乔. 盐碱胁迫下灰绿型与黄绿型羊草根际效应和光合生理响应. 长春: 东北师范大学, 2019.

- [14] Yao Y, Xu Y Q, Wang G, *et al.* Salt-alkaline stress induced rhizosphere effects and photosynthetic physiological response of two ecotypes of *Leymus chinensis* in Songnen meadow steppe. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2584–2594.
姚远, 徐月乔, 王贵, 等. 盐碱胁迫下松嫩草地2种生态型羊草根际效应及光合生理响应. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2584–2594.
- [15] Bai W Y, Hou X Y, Wu Z N, *et al.* Advances in studies on morphological plasticity of *Leymus chinensis* rhizome. *Pratacultural Science*, 2019, 36(3): 821–834.
白乌云, 侯向阳, 武自念, 等. 羊草根茎克隆形态可塑性研究进展. *草业科学*, 2019, 36(3): 821–834.
- [16] Li H Z. Study on dynamic changes of the oasis soil salinization in the lower reaches of Kaidu River Basin, Xinjiang based on RS and GIS. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2010.
李会志. 基于RS/GIS的开都河流域下游绿洲土壤盐渍化动态变化研究. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010.
- [17] Song W X. Evaluation of salt-tolerant accessions and analysis on the transcriptome of endure salt stress in *Bromus inermis* Lyess. Yinchuan: Ningxia University, 2024.
宋文学. 无芒雀麦耐盐性评价与耐盐转录组学分析. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [18] Flowers T J, Colmer T D. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 2008, 179(4): 945–963.
- [19] Song J X, Anjum S A, Zong X F, *et al.* Combined foliar application of nutrients and 5-aminolevulinic acid (ALA) improved drought tolerance in *Leymus chinensis* by modulating its morpho-physiological characteristics. *Crop and Pasture Science*, 2017, 68(5): 474–482.
- [20] Song W Z, Loik M E, Cui H Y, *et al.* Effect of nitrogen addition on leaf photosynthesis and water use efficiency of the dominant species *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvelev in a semi-arid meadow steppe. *Plant Growth Regulation*, 2022, 98(1): 91–102.
- [21] Bao F X, Chen N, Wang N, *et al.* Identification of soda saline-alkali tolerance of cold-resistant alfalfa germplasm at seedling stage based on membership function method. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(12): 3827–3835.
包凤轩, 陈宁, 王楠, 等. 基于隶属函数法鉴定抗寒苜蓿种质苗期耐苏打盐碱性. *草地学报*, 2024, 32(12): 3827–3835.
- [22] Luo J J, Xiao Y Z, Hou M L, *et al.* Effects of different additives on quality and vitamin content of mixed silage of alfalfa and *Leymus chinensis*. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(3): 992–1000.
罗俊杰, 肖燕子, 侯美玲, 等. 不同添加剂对苜蓿与羊草混合青贮品质及维生素含量的影响. *草地学报*, 2025, 33(3): 992–1000.
- [23] Nasr S M, Parsakhoo A, Naghavi H, *et al.* Effect of salt stress on germination and seedling growth of *Prosopis juliflora* (Sw.). *New Forests*, 2012, 43(1): 45–55.
- [24] Wang Z Q, Wu C Y, Yang Z, *et al.* Effect of saline-alkali stress on growth, physiological and biochemical characteristics of wild jujube seedlings. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 153–160.
王志强, 吴翠云, 杨哲, 等. 盐碱胁迫对酸枣幼苗生长及生理生化特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 153–160.
- [25] Xiong X, Gui W Y, Liu M H, *et al.* Evaluation of salt tolerance in different alfalfa varieties under uniform and non-uniform salt stress. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2018, 27(9): 67–76.
熊雪, 桂维阳, 刘沫含, 等. 不同紫花苜蓿品种在均匀与不均匀盐胁迫下的耐盐性评价. *草业学报*, 2018, 27(9): 67–76.
- [26] Calabrese E J, Baldwin I A. Hormesis: The dose-response revolution. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 2003(43): 175–197.
- [27] Li J K. Proteomic and physiological responses to salt (NaCl) stress in *Leymus chinensis*. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
李倩恺. 盐(NaCl)胁迫对羊草生理及蛋白质组变化的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [28] Huang L H, Liang Z W, Ma H Y, *et al.* Biological characteristics and physiological responses of *Leymus chinensis* seeded in soils with different pH. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1084–1088.
黄立华, 梁正伟, 马红媛, 等. 直播羊草在不同pH土壤环境下的生物学特性和生理反应. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1084–1088.
- [29] Chen Y Y, Li Y Y, Sun P, *et al.* Interactive effects of salt and alkali stresses on growth, physiological responses and nutrient (N, P) removal performance of *Ruppia maritima*. *Ecological Engineering*, 2017(104): 177–183.
- [30] Yan G. Physiological and metabolic mechanisms underlying the effects of salt and alkali stress on the growth of *Leymus chinensis* at the seedling stage and adult stage and their differences. Changchun: Northeast Normal University, 2024.
闫阁. 盐碱胁迫影响幼苗期与成株期羊草生长的生理代谢机制及其差异. 长春: 东北师范大学, 2024.

- [31] Zhou C, Yang Y F. Physiological response to salt-alkali stress in experimental populations in two ecotypes of *Leymus chinensis* in the Songnen Plains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1842–1846.
周婵, 杨允菲. 松嫩平原两个生态型羊草实验种群对盐碱胁迫的生理响应. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1842–1846.
- [32] Yan H, Zhao W, Yin S J, *et al.* Different physiological responses of *Leymus chinensis* to NaCl and Na₂CO₃. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(6): 49–55.
颜宏, 赵伟, 尹尚军, 等. 羊草对不同盐碱胁迫的生理响应. *草业学报*, 2006, 15(6): 49–55.
- [33] Peng Y L, Gao Z W, Gao Y, *et al.* Eco-physiological characteristics of alfalfa seedlings in response to various mixed salt-alkaline stresses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(1): 29–39.
- [34] Yang C N, Chong J N, Li C Y, *et al.* Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* during adaptation to salt and alkali conditions. *Plant and Soil*, 2007, 294(1/2): 263–276.
- [35] Anjum S A, Niu J H, Wang R, *et al.* Regulation mechanism of exogenous 5-aminolevulinic acid on growth and physiological characters of *Leymus chinensis* (Trin.) under high temperature stress. *Philippine Agricultural Scientist*, 2016, 99(3): 253–259.
- [36] Tourajzadeh O, Piri H, Naserin A. Effect of nano biochar addition and deficit irrigation on growth, physiology and water productivity of quinoa plants under salinity conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 217: 105564.
- [37] Niu X Y, Ma R. The response of physiological characteristics of leaves of red sand seedlings to drought stress. *Pratacultural Science*, 2023, 40(10): 2483–2492.
牛欣益, 马瑞. 红砂幼苗叶片生理特性对干旱胁迫的响应. *草业科学*, 2023, 40(10): 2483–2492.
- [38] Liu A R, Zhao K F. Osmotica accumulation and its role in osmotic adjustment in *Thellungiella halophila* under salt stress. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(4): 389–395.
刘爱荣, 赵可夫. 盐胁迫下盐芥渗透调节物质的积累及其渗透调节作用. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31(4): 389–395.
- [39] Liu B S, Kang C L, Wang X, *et al.* Physiological and biochemical response characteristics of *Leymus chinensis* to saline-alkali stress. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(23): 166–173.
刘滨硕, 康春莉, 王鑫, 等. 羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 166–173.
- [40] Li S J, Huang Y J, Li Y F. Homeostatic responses and growth of *Leymus chinensis* under incrementally increasing saline-alkali stress. *PeerJ*, 2021(9): 10768.
- [41] Sa D W. Study on the characteristics of nutritional quality changes and fungal community structure of alfalfa after cutting in saline-alkali soil. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
撒多文. 盐碱地紫花苜蓿刈割后营养品质变化特征与真菌群落结构研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [42] Wang Y K, Yang Y R, Wang D L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on ion absorption and distribution in *Leymus chinensis* under saline-alkaline stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(12): 95–104.
王英逵, 杨玉荣, 王德利. 盐碱胁迫下AMF对羊草的离子吸收和分配作用. *草业学报*, 2020, 29(12): 95–104.
- [43] Yu H R, Jia Y S, Jia P F, *et al.* Comprehensive evaluation of growth, yield and quality of alfalfa in different saline-alkali soil. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(4): 143–149.
于浩然, 贾玉山, 贾鹏飞, 等. 不同盐碱度对紫花苜蓿产量及品质的影响. *中国草地学报*, 2019, 41(4): 143–149.
- [44] Cao M. Effects of saline-alkali stress on the individual and clonal growth traits of *Leymus chinensis*. Changchun: Northeast Normal University, 2017.
曹明. 盐碱胁迫对羊草个体生长及克隆繁殖性状的影响. 长春: 东北师范大学, 2017.