

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0128

李京蓉, 马真, 刘泽华, 乔安海, 邓艳芳, 王文颖, 姚步青, 杨正荣, 张春辉, 周华坤. 青海省6种高寒禾本科牧草的耐盐性. 草业科学, 2019, 36(2): 442-449.

LI J R, MA Z, LIU Z H, QIAO A H, DENG Y F, WANG W Y, YAO B Q, YANG Z R, ZHANG C H, ZHOU H K. Salt resistance of six alpine grass species in Qinghai Province. Pratacultural Science, 2019, 36(2): 442-449.

## 青海省6种高寒禾本科牧草的耐盐性

李京蓉<sup>1,2</sup>, 马真<sup>1</sup>, 刘泽华<sup>2</sup>, 乔安海<sup>3</sup>, 邓艳芳<sup>3</sup>, 王文颖<sup>2</sup>,  
姚步青<sup>2,4</sup>, 杨正荣<sup>5</sup>, 张春辉<sup>4</sup>, 周华坤<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所 / 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810001; 2. 青海师范大学, 青海 西宁 810008;  
3. 青海省草原总站, 青海 西宁 810001; 4. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016;  
5. 青海省铁卜加草原改良试验站, 青海 铁卜加 813000)

**摘要:** 本研究通过对6种禾本科高寒牧草同德贫花鹤观草 (*Roegneria pauciflora* Tongde)、草原看麦娘 (*Alopecurus pratensis*)、大颖草 (*Roegneria grandiglumis*)、无芒雀麦 (*Bromus inermis*)、扁穗冰草 (*Agropyron cristatum*) 和同德短芒披碱草 (*Elymus breviaristatus* Tongde) 萌发期及幼苗期分别进行不同浓度的NaCl溶液处理, 测定其萌发期的发芽率和幼苗期的脯氨酸含量、叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量、可溶性糖含量以及游离脯氨酸(PRO)含量。结果表明, 随着NaCl浓度的增加, 6种禾本科牧草叶片中的脯氨酸含量和MDA含量随之增加, 而叶绿素和可溶性糖含量呈先升后降的变化。运用隶属函数对6种禾本科牧草萌发期及幼苗期的耐盐性进行综合评价分析。6种禾本科牧草的耐盐性依次为无芒雀麦 > 草原看麦娘 > 大颖草 > 同德短芒披碱草 > 扁穗冰草 > 同德贫花鹤观草。

**关键词:** 禾本科牧草; 盐胁迫; 种子萌发期; 发芽率; 幼苗期; 耐盐性

中图分类号: S816; S543<sup>+</sup>.903.4; Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2019)02-0442-08

## Salt resistance of six alpine grass species in Qinghai Province

LI Jingrong<sup>1,2</sup>, MA Zhen<sup>1</sup>, LIU Zehua<sup>2</sup>, QIAO Anhai<sup>3</sup>, DENG Yanfang<sup>3</sup>, WANG Wenying<sup>2</sup>,  
YAO Buqing<sup>2,4</sup>, YANG Zhengrong<sup>5</sup>, ZHANG Chunhui<sup>4</sup>, ZHOU Huakun<sup>1,4</sup>

(1. Key Laboratory of Restoration Ecology for Cold Regions Laboratory in Qinghai / Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, Qinghai, China;

2. School of Life and Geographic Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China;

3. Qinghai Grassland Station, Xining 810001, Qinghai, China;

4. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;

5. The Improved and Experiment of Grassland Station in Tiebujia of Qinhai Province, Gonghe 813000, Qinghai, China)

**Abstract:** Stress caused by different NaCl concentrations, germination proportion chlorophyll content, proline content, MDA content, and soluble sugar content were measured during the germination and seedling period of six grass species. As NaCl concentrations increased, proline content and MDA content in leaves of all six grass species increased. Chlorophyll and

收稿日期: 2018-03-07 接受日期: 2018-06-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501901); 青海省自然科学基金项目(2016-ZJ-910、2015-ZJ-919Q); 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室开放研究项目(2017-KF-02、2017-ZZ-11); 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20、2016-ZJ-Y01); 国家自然科学基金项目(31672475、31472135、31702163、31600335、31860668); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划KFJ-STZ-DTP-036); 2017年度青海三江源生态保护和建设二期工程科研和推广(2017-S-1)

第一作者: 李京蓉(1994-), 女, 青海民和人, 在读硕士生, 主要从事草地生态恢复研究。E-mail: 350440948@qq.com

通信作者: 周华坤(1974-), 男, 青海乐都人, 研究员, 博士, 主要从事草地生态学研究。E-mail: hkzhou@nwpib.cas.cn

共同通信作者: 马真(1982-), 女, 新疆石河子人, 助理研究员, 博士, 主要从事草地恢复生态学研究。E-mail: mazhen@nwpib.cas.cn

soluble sugar content first decreased and then increased as NaCl concentrations increased. The membership function was used to evaluate the antisalinity of six grass species in germination and seedling periods. Results revealed the following order of salinity tolerance for the six grasses (from largest to smallest): *Bromus inermis* > *Alopecurus pratensis* > *Roegneria grandiglumis* > *Elymus breviaristatus* Tongde > *Agropyron cristatum* > *Roegneria pauciflora* Tongde.

**Keywords:** gramineous pasture; salt stress; seed germination period; germination rate; seedlings period; salt resistance

**Corresponding author:** MA Zhen E-mail: [mazhen@nwipb.cas.cn](mailto:mazhen@nwipb.cas.cn)

ZHOU Huakun E-mail: [hkzhou@nwipb.cas.cn](mailto:hkzhou@nwipb.cas.cn)

在全球范围内，盐是限制植被产量和品质最重要的环境因素之一<sup>[1-2]</sup>。盐碱化是当今世界荒漠化和耕地退化的主要原因之一，这也引起了科研人员对植物盐碱抗性生理和生态的关注和研究<sup>[3]</sup>。在干旱半干旱地区，降水量少、蒸发量大、用水量不合理等因素是造成盐胁迫的重要原因<sup>[4]</sup>。盐胁迫环境通过影响作物生长发育而影响作物的产量<sup>[5]</sup>。青海省地处中国西北地区，干旱、半干旱、大面积的盐碱地是制约当地农业和畜牧业发展的主要因素<sup>[6]</sup>。如何合理有效地利用和改善盐碱地，对促进青海地区的农业和畜牧业发展具有积极意义。

青海省高寒草甸的禾本科牧草具有良好的适应性和耐盐性<sup>[7]</sup>，可以用于改善盐碱地。禾本科牧草的耐盐性通常优于豆科牧草和普通作物<sup>[8]</sup>。在盐胁迫条件下植物种子能否正常发芽及生长是植物生长发育及能否建植成功的先决条件<sup>[9-10]</sup>。因此，对

盐胁迫条件下禾本科牧草种子萌发和幼苗生长的研究具有重要意义。本研究所选 6 种牧草均属禾本科多年生牧草，多分布于海拔高度 3 000–4 300 m 的天然草地，是改善干旱、盐碱草地和栽培草地建植的优良草种，也是退化草地恢复和水土保持的重要草种<sup>[11]</sup>。但目前处于试验阶段，并未在生产建设中大规模使用。本研究对盐胁迫条件下 6 种禾本科牧草萌发期和苗期的各指标变化情况进行分析，通过隶属函数综合评价供试禾本科牧草耐盐能力的强弱，旨在对牧草耐盐鉴定、耐盐性新品种的选育和应用及盐碱地的改良利用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本研究选取了 6 种在青海省分布较为广泛的禾本科牧草进行抗盐性评价，详情如表 1 所列。

表 1 供试材料  
Table 1 Test materials

材料 Material	来源 Source
同德贫花鹅观草 <i>Roegneria pauciflora</i> Tongde	青海省牧草良种繁殖场 Qinghai Province Pasture Breeding Farm
草原看麦娘 <i>Alopecurus pratensis</i>	青海省草原总站 Qinghai Provincial Grassland Station
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	青海省草原总站 Qinghai Provincial Grassland Station
大颖草 <i>Roegneria grandiglumis</i>	青海省草原总站 Qinghai Provincial Grassland Station
扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	青海省草原总站 Qinghai Provincial Grassland Station
同德短芒披碱草 <i>Elymus breviaristatus</i> Tongde	青海省牧草良种繁殖场 Qinghai Province Pasture Breeding Farm

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 牧草萌发期试验

种子处理：选择成熟、饱满、中等大小、均匀、无病的健康种子于 1% NaCl 溶液中浸泡 15 min，然后用蒸馏水冲洗 3 遍并放置在铺有 3 层滤纸的培养皿中，加入适量的 NaCl 溶液（浓度分别为 70、140 和 280 mmol·L<sup>-1</sup>），对照 (CK) 加入蒸馏

水。培养皿放置于培养箱，温度控制在 20 ℃，每天光照 12 h，每天加入相同体积的 NaCl 溶液，对照加蒸馏水，每 4 d 更换滤纸以使水势的变化最小化。每个处理 (包括 CK) 设 4 个重复，每个重复选用 50 粒种子。自种子置于培养箱中开始观察，以胚芽长度等于发芽种子 1/2 的长度为标准。将重复中最早有 1 粒发芽的日期作为开始，此后每天记录

发芽种子的数量,当连续15 d不再有种子发芽时作为发芽结束期<sup>[12-14]</sup>,并按下式计算。

发芽率 = (正常发芽种子数/供试种子数) × 100%。

### 1.2.2 牧草苗期试验方法

选择土壤进行筛分,除去石头及杂质,将沙:有机肥:土按1:1:4的混合基质置于塑料花盆中,用清水浇透,在花盆中均匀撒下消毒后的种子,用干土轻轻覆盖,播种深度为1 cm。播种后,幼苗长至2~3片叶时进行间苗,每盆留30株。6种牧草每种5盆,共30盆。待生长到4~5片叶时进行NaCl处理。NaCl处理浓度分别为50、100、150、200 mmol·L<sup>-1</sup>,对照用蒸馏水,每个处理4次重复。在NaCl处理前3 d对所有牧草进行浇水处理,使每盆土壤处于饱和含水状态(土壤含水量保持在22.8% ± 2.0%)。NaCl处理采用浓度梯度递升的方式依次进行处理,14 d后分别对各生理指标进行测定。

## 1.3 牧草苗期生理指标测定及方法

### 1.3.1 丙二醛(MDA)含量

将试验材料磨成浆液于离心管中,离心10 min,上清液为萃取物,取上清液测其体积。在提取液中加入2 mL 0.3% TBA溶液,沸水浴中15 min后立即冷却,再次离心15 min,取上清液,测定450、532、600 nm波长的吸光度。根据 $C_{MDA} = 6.45(D_{532} - D_{600}) - 0.56D_{450}$ ,计算出MDA的浓度,再按下式得出MDA的含量<sup>[15-16]</sup>。

MDA含量 = (MDA浓度 × 提取液体积)/植物组织鲜重。

### 1.3.2 叶绿素相对含量

称取剪碎的鲜样0.3 g,于研钵中研磨成匀浆,加80%丙酮,继续磨至组织变白,再过滤至25 mL容量瓶中,反复用丙酮清洗数次,最后用丙酮定容至25 mL。以80%丙酮为空白对照,测定470、646、663 nm波长下的吸光值。

$$C_a = 12.21D_{663} - 2.81D_{646};$$

$$C_b = 20.13D_{646} - 5.03D_{663};$$

$$\text{叶绿素总浓度 } C = C_a + C_b;$$

$$C_{x.c} = (1000D_{470} - 3.27D_a - 104C_b) / 229;$$

式中:  $C_a$ 、 $C_b$ 分别表示叶绿素a和叶绿素b的浓度;  $C_{x.c}$ 表示类胡萝卜素的总浓度。

根据下式计算组织中各色素的含量:

色素含量 = (色素浓度  $C$  × 提取液总量 × 稀

倍数 × 1 000) / 样品叶片鲜重。

### 1.3.3 可溶性糖含量

将样品置于试管中并封口,在沸水中提取30 min,冷却后吸取0.5 mL提取液于加有1.5 mL蒸馏水的试管中,并依次加入0.5 mL的蒽酮乙酸乙酯和5 mL浓硫酸充分振荡,逐管立即准确保温1 min,蒸馏水作对照,测定其在630 nm波长下的吸光度值。

$$\text{可溶性糖含量} = (C \times V/a) / W;$$

式中:  $C$ 为葡萄糖量,由标准曲线求得( $\mu\text{g}$ );  $V$ 是提取液总体积(mL);  $a$ 为测定时所吸取的体积(mL);  $W$ 为样品重(g)。

### 1.3.4 游离脯氨酸含量

用3%的磺基水杨酸在沸水浴中提取15 min后,用酸性茚三酮法显色,然后用甲醛萃取,避光静置4 h后,吸取甲苯层在520 nm波长下测定吸光度<sup>[1]</sup>。

$$\text{脯氨酸} = (C \times V/a) / W;$$

式中:  $C$ 为四氮唑还原量(mg),由标准曲线求得;  $V$ 为提取液总体积(mL);  $a$ 为测定时所吸取的体积(mL);  $W$ 为样品重(g)。

## 1.4 数据处理与分析

试验所得数据通过Microsoft Excel 2007进行处理并作图;用SPSS 20.0统计软件对相同物种不同浓度间,以及相同浓度不同物种间的各项生理指标;用Student-Newman-Keuls方法进行在0.05显著水平上的多重比较;用Origin制图软件制作插图。

## 2 结果与分析

### 2.1 NaCl处理对6种禾本科牧草萌发期影响

草原看麦娘种子(*Alopecurus pratensis*)的萌发率在每个浓度梯度均显著高于其余5种牧草( $P < 0.05$ )(图1),除NaCl浓度280 mmol·L<sup>-1</sup>,扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)萌发率和其余5种牧草均存在显著差异。而不同浓度NaCl同一物种间除扁穗冰草在NaCl浓度140和280 mmol·L<sup>-1</sup>差异不显著外,其余均存在显著差异( $P < 0.05$ ),且随浓度的增大萌发率显著下降。

### 2.2 NaCl处理对6种禾本科牧草苗期各生理指标影响

#### 2.2.1 6种禾本科牧草丙二醛含量的变化

随着NaCl胁迫强度的增加,各牧草叶片中的MDA含量均显著升高( $P < 0.05$ )(表2)。NaCl浓度在0~

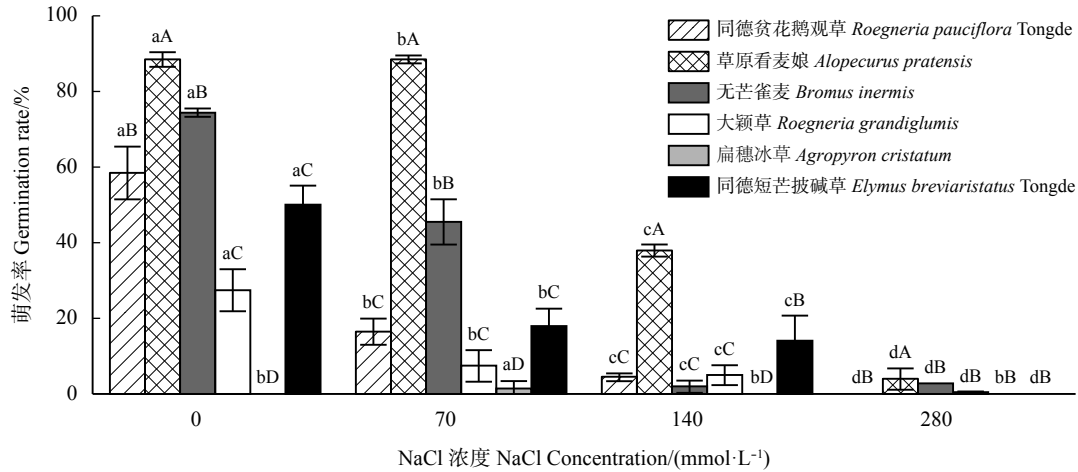


图 1 不同 NaCl 浓度处理下 6 种牧草的萌发率

Figure 1 Germination rate of 6 pastures under different NaCl concentrations

不同小写字母表示同一物种不同 NaCl 浓度间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一 NaCl 浓度下不同物种间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters within the same species indicate significant difference between different NaCl concentrations at the 0.05 level, and different capital letters within the same NaCl concentration indicate significant difference between different species at the 0.05 level; similarly for the following tables.

表 2 不同 NaCl 浓度处理下 6 种牧草丙二醛含量

Table 2 MDA content of six grass species under NaCl treatment

物种 Species	NaCl 浓度 NaCl concentration					平均 Average
	0 mmol·L <sup>-1</sup>	50 mmol·L <sup>-1</sup>	100 mmol·L <sup>-1</sup>	150 mmol·L <sup>-1</sup>	200 mmol·L <sup>-1</sup>	
I	3.66 ± 0.02Be	7.84 ± 0.02Bd	12.18 ± 0.02Ac	33.27 ± 0.02Ab	45.63 ± 0.01Aa	20.52 ± 0.02A
II	4.13 ± 0.01Ae	8.63 ± 0.02Ad	11.36 ± 0.02Bc	23.63 ± 0.02Cb	35.28 ± 0.01Ca	16.61 ± 0.02B
III	3.74 ± 0.00Be	8.33 ± 0.02Bd	10.54 ± 0.02Cc	21.86 ± 0.03Cb	30.43 ± 0.03Da	14.98 ± 0.03C
IV	3.85 ± 0.04Be	7.46 ± 0.02Bd	10.94 ± 0.02Cc	27.28 ± 0.01Bb	39.45 ± 0.03Ba	17.68 ± 0.03B
V	3.44 ± 0.03Ce	7.28 ± 0.02Cd	11.37 ± 0.03Bc	31.43 ± 0.02Ab	42.36 ± 0.03Aa	19.17 ± 0.03A
VI	3.17 ± 0.02Ce	7.32 ± 0.03Cd	11.46 ± 0.02Ac	24.84 ± 0.04Bb	37.45 ± 0.02BCa	16.85 ± 0.03B

I: 同德贫花鹅观草 *Roegneria pauciflora* Tongde; II: 草原看麦娘 *Alopecurus pratensis*; III: 无芒雀麦 *Bromus inermis*; IV: 大颖草 *Roegneria grandiglumis*; V: 扁穗冰草 *Agropyron cristatum*; VI: 同德短芒披碱草 *Elymus breviaristatus* Tongde。下同 Similarly for the following tables.

100 mmol·L<sup>-1</sup> 时牧草叶片中 MDA 含量变化幅度较小, 说明牧草幼苗对低浓度 NaCl 胁迫有一定耐受能力; 随着 NaCl 胁迫的加剧, 在 150 和 200 mmol·L<sup>-1</sup> 的 NaCl 浓度下, 扁穗冰草和同德贫花鹅观草 (*Roegneria pauciflora* Tongde) 的 MDA 含量增加较多, 分别是对照的 9.14、12.31 倍和 7.84、11.81 倍; 增加较少的是草原看麦娘和无芒雀麦, 分别是对照的 5.72、8.54 倍和 5.84、8.14 倍。这表明扁穗冰草、同德贫花鹅观草受到的伤害较大, 草原看麦娘、无芒雀麦受到的伤害则较小。

2.2.2 6 种禾本科牧草叶绿素含量的变化

随着 NaCl 浓度的增大, 6 种禾本科牧草的叶

绿素含量呈现先升后降的变化, 同一物种在不同 NaCl 浓度下的叶绿素含量差异显著 ( $P < 0.05$ ) (表 3)。NaCl 浓度为 50 mmol·L<sup>-1</sup> 时, 所有牧草的叶绿素含量均最高; NaCl 浓度为 200 mmol·L<sup>-1</sup> 时, 所有牧草叶绿素含量较对照均显著下降 ( $P < 0.05$ ), 同德贫花鹅观草下降的最多, 较对照下降了 84.5%, 叶绿素含量最少, 受 NaCl 胁迫伤害大; 而草原看麦娘下降最少, 较对照下降了 49.4%, 受 NaCl 胁迫伤害小; 同德短芒披碱草和大颖草分别下降了 60.7% 和 59.5%, 耐盐性居中间。

2.2.3 6 种禾本科牧草可溶性糖含量的变化

6 种禾本科牧草的可溶性糖含量呈先增加后降

表3 NaCl处理下6种牧草叶绿素含量的变化  
Table 3 Changes of chlorophyll content of six grass species under NaCl treatment

物种 Species	NaCl浓度 NaCl concentration					平均 Average
	0 mmol·L <sup>-1</sup>	50 mmol·L <sup>-1</sup>	100 mmol·L <sup>-1</sup>	150 mmol·L <sup>-1</sup>	200 mmol·L <sup>-1</sup>	
I	3.41 ± 0.01Dc	3.90 ± 0.01Da	3.55 ± 0.02Db	2.97 ± 0.02Dd	0.53 ± 0.01De	3.08 ± 0.01D
II	5.40 ± 0.02Bc	7.95 ± 0.01Ba	6.34 ± 0.03Bb	3.62 ± 0.01Bd	2.73 ± 0.01Be	5.21 ± 0.02B
III	7.42 ± 0.01Ac	9.24 ± 0.02Aa	8.77 ± 0.01Ab	4.23 ± 0.02Ad	3.94 ± 0.03Ae	6.72 ± 0.02A
IV	3.70 ± 0.01Cc	5.43 ± 0.02Ca	4.57 ± 0.02Cb	3.07 ± 0.01Cd	1.50 ± 0.02Ce	3.69 ± 0.02C
V	3.63 ± 0.02Dc	4.56 ± 0.01Da	3.98 ± 0.02Db	3.02 ± 0.01Dd	1.07 ± 0.02De	3.14 ± 0.02D
VI	4.07 ± 0.02Cc	5.36 ± 0.02Ca	4.55 ± 0.01Cb	3.77 ± 0.02Cd	1.60 ± 0.02Ce	3.85 ± 0.02C

表4 NaCl处理下6种牧草可溶性糖含量的变化  
Table 4 Changes of soluble sugar content of six grass species under NaCl treatment

物种 Species	NaCl浓度 NaCl concentration					平均 Average
	0 mmol·L <sup>-1</sup>	50 mmol·L <sup>-1</sup>	100 mmol·L <sup>-1</sup>	150 mmol·L <sup>-1</sup>	200 mmol·L <sup>-1</sup>	
I	7.26 ± 0.02Dd	7.51 ± 0.02Dc	10.96 ± 0.02Da	8.74 ± 0.01Db	4.97 ± 0.01De	7.89 ± 0.02D
II	11.45 ± 0.01Ad	12.75 ± 0.03Ab	14.95 ± 0.01Ba	12.47 ± 0.02Bc	9.33 ± 0.01Be	12.19 ± 0.02B
III	10.45 ± 0.00Bd	12.67 ± 0.02Bc	20.15 ± 0.01Aa	14.69 ± 0.03Ab	10.23 ± 0.02Ae	13.64 ± 0.02A
IV	9.08 ± 0.01Cd	11.23 ± 0.02Cc	14.03 ± 0.02Ca	11.79 ± 0.01Cb	5.39 ± 0.01Ce	10.30 ± 0.01C
V	7.43 ± 0.02Dd	8.88 ± 0.01Dc	11.34 ± 0.02Da	9.37 ± 0.02Db	2.77 ± 0.02De	7.96 ± 0.02D
VI	8.98 ± 0.01Cd	10.63 ± 0.02Cc	12.99 ± 0.00Ca	10.96 ± 0.01Cb	5.77 ± 0.02Ce	9.87 ± 0.02C

低的趋势(表4), NaCl浓度为100 mmol·L<sup>-1</sup>时,所有牧草的可溶性糖含量均最高,150~200 mmol·L<sup>-1</sup>时可溶性糖含量下降,200 mmol·L<sup>-1</sup>时的可溶性糖含量最低。同一浓度下6种禾本科牧草间可溶性糖均值比较,无芒雀麦可溶性糖含量最高,显著高于其他所有牧草( $P < 0.05$ );其次是草原看麦娘;同德贫花鹅观草和扁穗冰草之间、同德短芒披碱草和大颖草之间差异不显著( $P > 0.05$ ),但后两种显著高于前两种牧草。

#### 2.2.4 6种禾本科牧草脯氨酸含量的变化

随着NaCl浓度的增加,6种禾本科牧草叶片中的脯氨酸含量也显著增加( $P < 0.05$ )(表5)。同一浓度不同物种间的脯氨酸均值,大颖草、扁穗冰草和同德短芒披碱草之间、草原看麦娘和无芒雀麦之间差异不显著( $P > 0.05$ ),但后两种显著高于前3种。

#### 2.2.5 6种禾本科牧草耐盐性综合评价

将参试的6种禾本科牧草与抗盐性有关指标进

行综合分析,计算不同材料各指标隶属度值,并以各材料的平均抗盐隶属度作为耐盐鉴定综合评价指标。结果显示,6种牧草的耐盐性强弱表现为,无芒雀麦>草原看麦娘>大颖草>同德短芒披碱草>扁穗冰草>同德贫花鹅观草(表6)。

### 3 讨论

影响植物种子萌发和幼苗生长的重要因素是盐<sup>[3]</sup>。罗志娜等<sup>[17]</sup>通过对燕麦(*Avena sativa*)种子的耐盐性的研究,得出随盐胁迫的加剧,低盐对种子萌发的影响极小,高盐则对种子萌发的抑制作用很强<sup>[18]</sup>。也有研究<sup>[19]</sup>指出,盐胁迫的浓度达到一定值时,增加的盐浓度对植物的种子萌发和幼苗生长形成抑制效应。史燕山等<sup>[20]</sup>的研究表明,在低盐下某些植物种子的萌发率显著高于对照,而高盐胁迫下,种子的萌发率显著降低。本研究中只有扁穗冰草在70 mmol·L<sup>-1</sup>浓度的NaCl处理下种子的萌发率有一点升高,其他牧草相比对照呈



表 5 NaCl 处理下 6 种牧草脯氨酸含量的变化  
Table 5 Changes of proline content of six grass species under NaCl treatment

物种 Species	NaCl 浓度 NaCl concentration					平均 Average
	0 mmol·L <sup>-1</sup>	50 mmol·L <sup>-1</sup>	100 mmol·L <sup>-1</sup>	150 mmol·L <sup>-1</sup>	200 mmol·L <sup>-1</sup>	
I	3.44 ± 0.00Ce	8.73 ± 0.02Ad	9.84 ± 0.02Cc	14.46 ± 0.03Cb	20.57 ± 0.03Ca	11.81 ± 0.02C
II	3.54 ± 0.03Be	7.88 ± 0.02Bd	11.67 ± 0.01Ac	18.46 ± 0.02Ab	25.37 ± 0.02Aa	13.38 ± 0.02A
III	3.86 ± 0.02Be	7.74 ± 0.02Bd	12.78 ± 0.02Ac	17.38 ± 0.02Ab	27.04 ± 0.01Aa	13.76 ± 0.02A
IV	3.45 ± 0.03Ce	7.66 ± 0.02Bd	10.84 ± 0.02Bc	17.18 ± 0.01Bb	24.36 ± 0.03Ba	12.67 ± 0.02B
V	4.33 ± 0.01Ae	8.23 ± 0.02Ad	11.86 ± 0.02Bc	15.73 ± 0.03Bb	20.14 ± 0.16Ba	12.06 ± 0.05B
VI	3.47 ± 0.02Ce	7.45 ± 0.03Cd	11.76 ± 0.02Bc	16.46 ± 0.03Bb	23.98 ± 0.05Ba	12.62 ± 0.04B

表 6 各牧草对 NaCl 处理适应指标的隶属函数值及评价  
Table 6 Membership value and evaluation of adaptation indexes of herbage to NaCl treatment

物种 Grass species	发芽率 Germination rate	MDA 含量 MDA content	叶绿素 Chlorophyll	可溶性糖 Soluble sugar	脯氨酸 Proline	总隶属函数值 Total membership function value	排序 Sort
同德贫花鹅观草 <i>Roegneria pauciflora</i> Tongde	0.337	0.119	0.438	0.443	0.475	0.362	6
草原看麦娘 <i>Alopecurus pratensis</i>	0.387	0.182	0.528	0.514	0.462	0.415	2
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	0.424	0.197	0.598	0.475	0.537	0.446	1
大颖草 <i>Roegneria grandiglumis</i>	0.363	0.165	0.476	0.481	0.572	0.411	3
扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	0.361	0.129	0.447	0.454	0.514	0.381	5
同德短芒披碱草 <i>Elymus breviaristatus</i> Tongde	0.355	0.143	0.488	0.472	0.498	0.391	4

下降趋势，因此，高盐胁迫对种子萌发有明显的抑制作用，其抑制程度不同是由于不同物种对盐的耐性不同所致。

MDA 和脯氨酸是抗盐胁迫的重要抗氧化剂。受盐胁迫的牧草通过增加渗透调节物的含量，来维持正常的生理代谢，从而增加对盐的抗性<sup>[21-22]</sup>。在本研究中，当 NaCl 浓度较低时，牧草能抵抗胁迫，但不同的牧草对盐胁迫的敏感度不一样，NaCl 浓度的增加会破坏或伤害牧草的膜结构和功能，导致膜通透性增大，渗透调节物外渗，脂质化增强，影响幼苗生长。因此，牧草中 MDA 和脯氨酸的增加是牧草对盐的耐受性增强的表现。本研究结果表明，扁穗冰草、同德贫花鹅观草受盐胁迫的伤害最大，草原看麦娘、无芒雀麦受盐胁迫的伤害则最小，大颖草、同德短芒披碱草受盐胁迫的伤害居中。

叶绿素不仅能吸收和传递光能，还是光合作用必不可少的原料，是植物光合能力的重要指标。在盐碱胁迫下，叶片细胞的叶绿体结构被破坏，叶绿素含量在一定程度上降低并影响光合作用。大多数对于不同 NaCl 浓度对叶绿素含量的影响的研究发现 NaCl 胁迫显著降低牧草中的叶绿素含量<sup>[23-25]</sup>。在本研究中，随着 NaCl 浓度的增加，6 种牧草的叶绿素含量先增加后降低，同一物种的叶绿素含量有显著差异 ( $P < 0.05$ )，呈现出低 NaCl 浓度处理促进叶绿素的合成，高 NaCl 浓度则抑制其合成，这与之前的研究一致<sup>[26]</sup>。这是因为盐胁迫下高浓度的盐分破坏细胞内的色素-蛋白-脂质复合体，降低叶绿素 a 和其他色素的含量，所以随 NaCl 浓度的增加，呈现先增后减的趋势。

可溶性糖是植物细胞的主要有机渗透调节因子，它直接反映了细胞遭受伤害的程度，其总含

量也决定了植物对盐胁迫的抗性<sup>[26]</sup>。本研究表明可溶性糖含量在 NaCl 浓度为 100 mmol·L<sup>-1</sup> 时最高, 在 150~200 mmol·L<sup>-1</sup> 下降, 表明低盐浓度促进牧草渗透调节力, 而高盐浓度已经使牧草受到盐害。NaCl 浓度为 100 mmol·L<sup>-1</sup> 也可作为本研究材料盐胁迫的临界值, 可以为实践应用提供理论依据。

本研究在室内对 6 种禾本科牧草做了盐胁迫试验, 但还有待于到实际生态环境中去检验。在今后的研究中, 建议能与实际环境条件和生产实际有机结合, 则能更完整地说明 6 种牧草的抗盐性,

以及对不同 NaCl 浓度梯度的响应, 从而选出真正需要的抗盐型高寒牧草。

## 4 结论

本研究运用隶属函数对 6 种禾本科牧草种子萌发及幼苗的耐盐性进行综合评价分析, 得出各供试材料的耐盐性强弱表现为无芒雀麦 > 草原看麦娘 > 大颖草 > 同德短芒披碱草 > 扁穗冰草 > 同德贫花鹅观草。

## 参考文献 References:

- [1] VEERANAGAMALLAIAH G, CHANDRAOBULREDDY P, JYOTHSNAKUMARI G, SUDHAKAR C. Glutamine synthetase expression and pyrroline-5-carboxylate reductase activity influence proline accumulation in two cultivars of foxtail millet (*Setaria italica* L.) with differential salt sensitivity. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60: 239-244.
- [2] BARTELS D, SUNKAR R. Drought and salt tolerance in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005, 24: 23-58.
- [3] 乔枫, 罗桂花, 耿贵工. 蚕豆幼苗对 NaCl 和 NaHCO<sub>3</sub> 胁迫的生理响应. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(5): 783-787.  
QIAO F, LUO G H, GEN G G. Physiological responses of vicia faba seedlings to NaCl and NaHCO<sub>3</sub> stress. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(5): 783-787.
- [4] MELONI D A, OLIVA M A, MARTINEZ C A. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49: 69-76.
- [5] 陈惠哲, NATALIA LADATKO, 朱德峰, 林贤青, 张玉屏, 孙宗修. 盐胁迫下水稻苗期 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>吸收与分配规律的初步研究. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 937-945.  
CHEN H Z, NATALIA L, ZHU D F, LIN X Q, ZHANG Y P, SUN Z X. Absorption and diatribution of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> in rice seedline under salt stress. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(5): 937-945.
- [6] 乔旭, 黄爱军, 褚贵新. 植物对盐分胁迫的响应及其耐盐机理研究进展. *新疆农业科学*, 2011, 48(11): 2089-2094.  
QIAO X, HUANG A J, CHU G X. Research progress in the effects of salt stress on plant and the mechanism of plant resistance. *Agriculture Science of Xinjiang*, 2011, 48(11): 2089-2094.
- [7] 沈艳, 谢应忠. 牧草抗旱性和耐盐性研究进展. *宁夏农学院学报*, 2004, 25(1): 65-69.  
SHEN Y, XIE Y Z. The progress of studies on forage grass drought resistance and salt tolerance. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2004, 25(1): 65-69.
- [8] 余玲, 王彦荣, 孙建华. 野大麦种子萌发条件及抗逆性研究. *草业学报*, 1999, 8(1): 50-57.  
YU L, WANG Y R, SUN J H. Studies on germination condition and stress resistance of *Hordeum brevisubulatum* seeds. *Journal of Grass Industry*, 1999, 8(1): 50-57.
- [9] 毛培春, 王勇. 不同禾本科牧草材料种子萌发的耐盐性试验. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2004(2): 115-118.  
MAO P C, WANG Y. Experiment on salt resistance in seed germination stage of six grass varieties. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2004(2): 115-118.
- [10] 王晓龙, 李红, 闫利军, 米福贵, 于洁, 贾振宇, 杨墨, 杨伟光. 5 种禾本科牧草种子萌发及幼苗耐盐性鉴定. *种子*, 2016(8): 27-31.  
WANG X L, LI H, YAN L J, MI F G, YU J, JIA Z Y, YANG Z, YANG W G. Salt-tolerance of seed germination and seedling growth for five grass species. *Seeds*, 2016(8): 27-31.
- [11] 李京蓉, 周学斌, 马真, 刘泽华, 石国玺, 王文颖, 张中华, 郭美玲, 姚步青, 张春辉, 马丽, 周华坤. 6 种高寒牧区禾本科牧草抗旱性研究与评价. *草地学报*, 2018, 26(3): 659-665.  
LI J R, ZHOU X B, MA Z, LIU Z H, SHI G X, WANG W Y, ZHANG Z H, GUO M L, YAO B Q, ZHANG C C, MA L, ZHOU H K. Research and evaluation on drought resistance of six grasses in high-cold pastoral area. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(3): 659-665.
- [12] 朱教君, 李智辉, 康宏樟, 范业展. 聚乙二醇模拟水分胁迫对沙地樟子松种子萌发影响研究. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 801-

804.  
ZHU J J, LI Z H, KANG H Z, FAN Y Z. Effects of polyethylene glycol (PEG)-simulated drought stress on *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* seed germination on sandy land. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 801-804.
- [13] 施积炎, 丁贵杰. 水分胁迫对不同种源马尾松种子发芽的影响. *山地农业生物学报*, 2000, 19(5): 32-337.  
SHI J Y, DING G J. The effect of water stress on germination of Masson Pine seeds from different provenance. *Journal of Mountain Agricultural Biology*, 2000, 19(5): 32-337.
- [14] 冯淑华, 陈雅君. 干旱对草地早熟禾种子萌发的影响. *草地与草坪*, 2006(1): 70-71.  
FENG S H, CHEN Y J. The influence of drought on seeds' germination ability of *Poa pratensis* cultivars. *Grassland and Lawn*, 2006(1): 70-71.
- [15] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2005.  
ZHANG Z L, QU W J. *Plant Physiology Experiment Guidance*. 3rd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [16] 武永军, 何国强, 史艳茹, 梁宗锁. 不同 pH 值缓冲液处理下蚕豆叶片相对含水量、脯氨酸及丙二醛含量的变化. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 169-172.  
WU Y J, HE G Q, SHI Y R, LIANG Z S. The relative water content, proline and malondialdehyde content of broad bean leaves were treated with different pH buffer. *Agricultural Research in Arid Regions*, 2009, 27(6): 169-172.
- [17] 罗志娜, 赵桂琴, 刘欢. 24 个燕麦品种种子萌发耐盐性综合评价. *草原与草坪*, 2012, 32(1): 34-38.  
LUO Z N, ZHAO G Q, LIU H. 24 oat varieties of seed germination of salt resistance comprehensive evaluation. *Grassland and Lawn*, 2012, 32(1): 34-38.
- [18] 王晓龙. 五种禾本科牧草生物学特性、农艺性状及抗逆性研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2014.  
WANG X L. Evaluation of the biologic traits, agronomic characters and stress tolerance for five forage grasses. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [19] 武俊英, 刘景辉, 翟利剑, 李倩, 李立军. 不同品种燕麦种子萌发和幼苗生长的耐盐性. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 1960-1965.  
WU J Y, LIU J H, ZHAI L J, LI Q, LI L J. Salt-tolerance of seed germination and seedling growth of different oat varieties. *Ecology Journal*, 2009, 28(10): 1960-1965.
- [20] 史燕山, 骆建霞, 黄家珍, 叶军, 魏巍. 盐胁迫对 7 种草本地被植物种子萌发的影响. *天津农学院学报*, 2007, 14(4): 1-4.  
SHI Y S, LUO J X, HUANG J Z, YE J, WEI E. Effects of salt stress on seed germination of seven herb ground cover plants. *Journal of Tianjin Agricultural College*, 2007, 14(4): 1-4.
- [21] LI M, WANG G X. Effect of drought Stress on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in *glycyrrhiza uralensis* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(4): 503-507.
- [22] 陈莎莎, 姚世响, 袁军文, 兰海燕. 盐生植物灰绿藜对 NaCl 和 NaHCO<sub>3</sub> 胁迫的生理响应. *新疆农业科学*, 2010, 47(5): 882-887.  
CHEN S S, YAO S X, YUAN J W, LAN H Y. Physiological responses of halophyte *Chenopodium glaucum* L. to NaCl and NaHCO<sub>3</sub> stresses. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(5): 882-887.
- [23] 邓敏捷, 张晓申, 范国强, 赵振利, 董焱鹏, 魏振. 四倍体泡桐对盐胁迫生理响应的差异. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(11): 42-46.  
DENG M J, ZHANG X S, FAN G Q, ZHAO Z L, DONG Y P, WEI Z. Comparative studies on physiological responses to salt stress in tetraploid paulownia plants. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2013, 33(11): 42-46.
- [24] 洪森荣, 尹明华. 红芽芋驯化苗对盐胁迫的光合及生理响应. *西北植物学报*, 2013, 33(12): 2499-2506.  
HONG S R, YIN M H. Photosynthetic and physiological responses of red bud taro transplanting seedlings under salt stress. *Journal of Northwest Plants*, 2013, 33(12): 2499-2506.
- [25] 廖岩, 陈桂珠. 三种红树植物对盐胁迫的生理适应. *生态学报*, 2007, 27(6): 2208-2214.  
LIAO Y, CHEN G Z. Research on physiological adaptability of three mangrove species to salt stress. *Journal of Ecology*, 2007, 27(6): 2208-2214.
- [26] 张丽. 平欧杂种榛抗盐碱生理机制研究及其耐盐性评价. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.  
ZHANG L. Study on the Physiological Mechanism of the Hybrid Hazel and Salinity Tolerance. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2015.

(责任编辑 张瑾)