

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.025

引用格式:顾涛,包赛很那,苗彦军,等.3种禾本科牧草种子萌发及生理对高寒昼夜变温的适应性研究[J].草地学报,2026,34(1):266—274

GU Tao, BAO Sai-hen-na, MIAO Yan-jun, et al. Study on the Adaptability of Seed Germination and Physiology of Three Grasses to Diurnal Temperature Change in Alpine Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):266—274

3种禾本科牧草种子萌发及生理对高寒昼夜变温的适应性研究

顾涛,包赛很那*,苗彦军,韩有健,苏志刚,卓玛永青

(西藏农牧大学,西藏林芝 860000)

摘要:本研究以3种禾本科牧草垂穗披碱草(*Elymus snutans*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)和中华羊茅(*Festuca sinensis*)作为供试材料,模拟高寒地区植物自然生境中的昼夜变温(3—11月)设置10℃/5℃、15℃/5℃、20℃/5℃和25℃/10℃等4种温度,进行种子萌发试验,测定种子萌发及苗期生理指标,阐明3种禾本科牧草对高寒生境中温度变化的适应性。结果表明:随着温度的升高,垂穗披碱草种子发芽率、发芽势和发芽指数均呈先提高后下降的趋势;无芒雀麦和中华羊茅种子发芽率、发芽势和发芽指数均随温度的升高而显著提高。3种牧草幼苗丙二醛、可溶性含糖和游离脯氨酸含量均随着温度降低呈升高趋势。综上,垂穗披碱草最适温萌发度为20℃/5℃,无芒雀麦和中华羊茅最适萌发温度为25℃/10℃;隶属函数综合评价结果表明:3种牧草对高寒温度适应性由强至弱的顺序:垂穗披碱草>无芒雀麦>中华羊茅。

关键词:变温;垂穗披碱草;无芒雀麦;中华羊茅;种子萌发;生理特性

中图分类号:S543

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0266-09

Study on the Adaptability of Seed Germination and Physiology of Three Grasses to Diurnal Temperature Change in Alpine Region

GU Tao, BAO Sai-hen-na*, MIAO Yan-jun, HAN You-jian, SU Zhi-gang, ZHUO Ma-yong-qing

(Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Nyingchi, Xizang 860000, China)

Abstract: This study investigated the temperature adaptability of three grass species (*Elymus nutans*, *Bromus inermis*, and *Festuca sinensis*) through the controlled experiments simulating diurnal thermal regimes (10℃/5℃, 15℃/5℃, 20℃/5℃, 25℃/10℃) characteristic of their natural habitat during March–November. We systematically analyzed seed germination dynamics (quantified by germination rate, potential, and index), seedling growth parameters, and physiological stress markers to elucidate species-adaptive responses to temperature gradients in Alpine region. With the increase of temperature, the germination rate, germination potential and germination index of the *Elymus snutans* seeds all increased first and then decreased. The germination rate, germination potential and germination index of *Bromus inermis* and *Festuca sinensis* seeds increased significantly with the increase of temperature. The contents of malondialdehyde (MDA), soluble sugar (SS) and free proline (Pro) of the three grass seedlings increased with decreasing temperature. The results showed that the optimum temperature was 20℃/5℃ for *Elymus nutans*, 25℃/10℃ for *Bromus inermis* and *Festuca sinensis*. The comprehensive evaluation of the membership function showed that the temperature adaptability of the three grass species was *Elymus snutans* > *Bromus inermis* > *Festuca sinensis*.

收稿日期:2025-02-20;修回日期:2025-04-14

基金项目:西藏农牧学院研究生创新计划资助项目(YJS2025-17);中国农业大学-西藏农牧学院科研联合基金项目(2024TC082);国家自然科学基金项目,EnCOR401基因调控垂穗披碱草耐低温机制研究(32260342);中央引导地方科技发展资金项目,巴青垂穗披碱草种子繁育生产体系研究与示范(ZYYD2023000147)资助

作者简介:顾涛(2001-),男,汉族,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事野生牧草种质资源选育相关研究,E-mail:3197099541@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:1306598067@qq.com

Key words: Temperature change; *Elymus nutans*; *Bromus inermis*; *Festuca inensis*; Seed germination; Physiological characteristics

西藏是青藏高原的主要组成部分,平均海拔在4000 m以上,冬季时间长,昼夜温差大,冬季平均气温为 -3.9°C ,极端最低气温达到 -46.4°C ,全年低于 5°C 的时间长达200 d,大部分地区为高海拔低压缺氧地带,其被称为“世界屋脊”。西藏高原具有复杂多样的地形地貌,年平均气温低,早晚温差大,冬季干燥、寒冷等独特的高寒气候特点^[1-2]。在西藏,低温条件是限制植物正常生长发育的重要环境因素,主要抑制植物的新陈代谢、生理活性、酶促反应以及休眠等^[3]。常年来,低温冻害成为影响西藏草地生产力的一种自然灾害,严重时导致植物死亡,给草畜产品带来巨大的损失,为此成为影响畜牧业发展的主要因素之一^[4]。尤其在西藏高寒地区,研究牧草的环境适应性,选育适应高原特殊气候的优良牧草,对促进西藏畜牧业发展及改善高原生态环境方面具有重要意义。

温度主要影响植物正常的萌发及生长发育进程。在牧草种子萌发及幼苗生长过程中,需要适当调整和控制种子萌发所需的环境温度与萌发时间等^[5]。温度主要是通过限制种子的吸水能力、细胞酶的活性和细胞分裂过程等主要生理过程,从而影响牧草种子的萌发进程和萌发速度^[6-7]。低温条件致使植物的质膜结构及细胞质结构,从而影响植物的光合速率以及新陈代谢过程,最终导致植物在低温环境下无法健康生长,甚至出现“早衰”现象^[8-10]。适宜的温度处理有利于种子的发芽,并使其种子萌发速率明显加快^[11]。许静等^[12]表明在 $5^{\circ}\text{C}/15^{\circ}\text{C}$, $5^{\circ}\text{C}/20^{\circ}\text{C}$, $10^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}$ 温度梯度下,各科物种的平均萌发率表现出不同的变动规律,各科物种的温度适应机制不同。王江涛等^[13]认为垂穗披碱草最适萌发温度为 $25^{\circ}\text{C}/10^{\circ}\text{C}$,三毛草、草地早熟禾最适萌发温度为 $25^{\circ}\text{C}/15^{\circ}\text{C}$ 。研究不同的植物在不同的环境条件和逆境胁迫下,其生长发育性能的差异在生产实践中尤为重要。

高寒地区植物适应性评价中,植物耐寒性是植物适应性评价中的尤为重要的部分。大量研究结果表明,植物幼苗的叶片丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量、可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量以及游离脯氨酸(Proline, Pro)含量的变化均与植物的耐寒性特性有关^[14-15]。在低温胁迫条件下,由于低温导致的酶活性降低、叶绿体及多种细胞内膜系统

结构破坏,使得植物叶绿素含量降低,光合作用受阻,低温胁迫还会引起植物体内活性氧自由基的大量积累,诱导膜脂过氧化并产生MDA,因此MDA的含量可反映植物细胞膜系统的受损程度。SS和Pro是细胞内两种重要的渗透调节物质,能通过增加细胞保水能力和稳定细胞内的代谢过程来提高植物的耐寒性^[16]。付娟娟等^[17-18]的研究表明,在低温条件下,西藏野生垂穗披碱草的SS含量以及Pro含量均明显提高,从而增强其耐寒性。

垂穗披碱草(*Elymus nutans*)属禾本科披碱草属多年生草本植物,在青藏高原广泛分布,多生于高海拔的山坡草地或路边,其抗旱性较强,不耐水淹,耐寒性强,耐瘠薄,喜欢湿润和排水良好的土壤。在高山草原是常见种类,具有防止土地沙漠化的作用。无芒雀麦(*Bromus inermis*)属禾本科雀麦属多年生草本植物,主要生长在林缘草甸、山坡、谷地、河边路旁。其营养价值高,适口性好,耐寒旱,耐放牧,也是建立人工草场和环保固沙的主要草种。中华羊茅(*Festuca sinensis*)属禾本科羊茅属多年生草本植物,该植物是青藏高原特有的植被类型,具有耐寒、耐旱、耐牧等特点,在保持水土、改良天然草场、建立人工草地等方面具有重要的生态和经济价值。这3种牧草为青藏高原抗逆性较强的物种,饲用价值较高且能够在恶劣的环境条件下保持良好的生长特性。在长期的自然选择过程中,形成了抗寒、抗旱以及耐盐碱等高抗基因^[19]。是防风固沙及水土保持的优良物种。研究3种牧草对高寒昼夜变温的适应性可以在生态修复及牧草生产中,筛选不同高寒昼夜变温条件下最适合萌发生长的物种。

鉴于此,本研究以青海地区3种禾本科牧草为供试材料,通过比较 $10^{\circ}\text{C}/5^{\circ}\text{C}$, $15^{\circ}\text{C}/5^{\circ}\text{C}$, $20^{\circ}\text{C}/5^{\circ}\text{C}$, $25^{\circ}\text{C}/10^{\circ}\text{C}$ 下垂穗披碱草、无芒雀麦和中华羊茅种子的萌发及MDA含量、SS含量以及Pro含量变化,探讨3种禾本科牧草对高寒变温条件下的种子萌发及生理响应机制,旨在为筛选对西藏高寒地区适应性强的禾本科牧草提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和来源

三种供试材料垂穗披碱草(*Elymu snutans*)、中

华羊茅(*Festuca sinensis*)和无芒雀麦(*Bromus inermis*)种子,于2023年7月购买于青海省牧草良种繁殖场。

1.2 试验方法

本试验于2023年7月在西藏农牧学院高寒草地实验室进行。以籽粒饱满、大小均匀、健康无病害的种子为试验材料。试验前,采用0.1%的高锰酸钾溶液浸泡种子10 min,进行种子消毒处理。

种子发芽阶段:试验采用纸上发芽法,在每个培养皿中垫双层滤纸,再用蒸馏水将培养皿湿润至饱和为止,然后在每个培养皿中均匀放入50粒供试牧草种子,每个处理重复3次,最终将培养皿放入已设置不同温度的人工气候箱(宁波普朗特仪器有限公司)中进行发芽试验。温度主要模拟高寒地区植物自然生境中的昼夜变温(3—11月)设置为10℃/5℃,15℃/5℃,20℃/5℃,25℃/10℃,12 h/12 h(高温/低温)依次交替,试验培养周期为14 d。每天观察记录种子发芽情况,同时补充挥发而失去的水分,培养皿中始终保持湿润且无明水。以芽长超过种子本身长度的1/2作为种子发芽的标志,第7 d时计算发芽势,第14 d时计算种子发芽率和发芽指数,取平均值。

幼苗期生理指标测定试验:试验采用种子发芽盒土培法进行幼苗生长观测试验。在发芽盒(长19 cm、宽13 cm、高11 cm)中,以农田土:羊粪10:1(质量比)作为混合栽培基质。试验前,筛土去除杂质,并将土用高温烘干灭杀附带的杂草和生物杂质。在每个发芽盒中放入等量的混合栽培基质,再将土湿润至无名水,然后把处理好的100粒牧草种子均匀地播入土壤中,播种深度保持一致(约1 cm),每个处理重复5次,最终将发芽盒放入不同温度的人工气候箱内培养。每天观察种子出苗数,同时补充挥发而失去的水分,发芽盒中始终保持湿润。试验培养30 d后,分别测量3种牧草幼苗芽长、根长、芽干重和根干重,以及MDA含量、SS含量和Pro含量等指标。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 种子萌发指标测定方法 发芽率(%)=(萌发种子数量/供试种子总数)×100%,数值越高,代表种子的生命力越强^[20];

发芽势(%)=(发芽初期正常萌发种子数量/

供试种子总数)×100%,试验按前7 d计算;发芽势可以反映种子的发芽速率及幼苗的整齐度^[20];

发芽指数= $\sum (G_t/D_t)$ 式中, G_t 为t时间内发芽数, D_t 为相应的发芽天数,种子发芽指数指示种子的活力及发芽速率^[20]。

根长和芽长:从各处理中随机选取10株幼苗,测量其根长和芽长,取平均值^[20]。

根干重和芽干重:从各处理中随机选取10株幼苗将根和芽分开,在105℃烘箱内杀青30 min,再在65℃下烘干至恒重,并称干重,取平均值。

1.3.2 生理指标测定方法 丙二醛(MDA)测定:取新鲜叶片1 g,再将叶片剪成小碎片后,加入10%浓度的三氯乙酸(TCA)2 mL,进行研磨;再加入8 mL TCA充分研磨。然后,在4000转离心机中离心10 min,提取上清液。显色反应及测定:用吸管吸取2 mL上述提取液,加入2 mL 0.6% TBA溶液,混合摇匀,然后在试管上加塞,置于沸水中煮沸15 min,并迅速冷却,离心。取上清液分别测定532 nm和450 nm下的OD值。

公式:

$$C_1(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})=11.71\text{OD}_{450}$$

$$C_2(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})=6.45\text{OD}_{532}-0.56\text{OD}_{450}$$

C_1 为SS的浓度; C_2 为MDA的浓度。由公式可计算出,样品提取液中的MDA含量和SS含量,再计算每克样品中MDA和SS的含量。

游离脯氨酸(Free proline, Pro)含量:采用酸性茚三酮法^[21]测定Pro含量。称取叶片0.2~0.5 g,加入3% 磺基水杨酸5 mL,在沸水浴中提取10 min,冷却后,吸取2 mL提取液加入2 mL 冰醋酸3 mL 酸性茚三酮,在沸水浴中提取40 min,冷却,加入5 mL 甲苯,进行振荡,静置数分钟,待溶液分层后吸出甲苯层,用分光光度计在520 nm 波长比色,3次重复。

脯氨酸含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)=($C\times V/A$)/W 或脯氨酸含量(%)=($C\times V/A$)/W×10⁶×100;

式中,C为由标准曲线查的脯氨酸含量, μg ;V为提取液总体积,mL;a为测定液体积,mL;W为样品质量,g;1 g=10⁶ μg 。

1.3.3 3种牧草对高寒变温的适应性综合评价 采用隶属函数法对3种供试材料进行高寒变温的适应性综合性评价^[22]隶属函数值计算公式 $F=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$;反隶属函数值计算公式 $F=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$ 。式中: X_i 为3种牧草某种

测定指标测定值的平均值, $X_{\max}$, $X_{\min}$ 为该指标中的最高值及最低值, 并最终将所求得隶属函数值综合累加求得平均值, 即为该指标的隶属函数度; 隶属度越高, 说明植物的抗性或对高寒温度的适应性越强。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行统计数据并取测定指标的平均值; 利用 SPSS25 软件对测量数据进行方差分析, 分析各个处理值之间的显著性, 再采用 LSD 法进行多重比较^[23]。

2 结果与分析

2.1 高寒变温对3种禾本科牧草种子发芽率的影响

由图1所示, 同一牧草在不同温度条件下, 3种牧草种子发芽率差异很大。垂穗披碱草种子发芽率随温度的升高呈先提高后下降的趋势, 在 20℃/5℃ 时达到最大值, 为 83%, 与 25℃/10℃ 相比差异显著 ($P < 0.05$)。无芒雀麦和中华羊茅种子发芽率随着温度的升高而提高, 在 25/10℃ 时达到最大值, 分别为 51% 和 68%, 且与 10℃/5℃ 相比差异显著 ($P < 0.05$)。

同一温度条件对3种牧草种子发芽率影响较明显。在 10℃/5℃, 15℃/5℃ 和 20℃/5℃ 时, 垂穗披碱草种子发芽率与无芒雀麦相比, 分别提高 133%, 95% 和 63%; 与中华羊茅相比分别提高 46%, 34% 和 30%, 且均差异显著 ($P < 0.05$)。25℃/10℃ 时, 中华羊茅种子发芽率高于其余两种牧草, 尤其与无芒雀麦相比提高了 33%, 差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 高寒变温对3种禾本科牧草发芽势的影响

由图2所示, 垂穗披碱草的发芽势随着温度的升高呈先提高后下降的趋势, 无芒雀麦和中华羊茅发芽势随着温度的升高而提高。在 10℃/5℃ 时, 无芒雀麦和中华羊茅发芽势为 0, 垂穗披碱草发芽势为 3.33%; 在 20℃/5℃ 时, 垂穗披碱草的发芽势达到最大值为 78%, 与 10℃/5℃, 15℃/5℃ 相比差异显著 ($P < 0.05$)。在 25℃/10℃ 时, 无芒雀麦和中华羊茅的发芽势达到了最大值, 分别为 48% 和 75.33%, 分别与 10℃/5℃, 15℃/5℃ 相比差异显著 ($P < 0.05$)。

同一温度下, 垂穗披碱草发芽势高于无芒雀麦和中华羊茅, 在 20℃/5℃ 时, 垂穗披碱草发芽势比无

芒雀麦和中华羊茅的发芽势分别提高了 72% 和 47%, 差异显著 ($P < 0.05$); 但在 15℃/5℃ 时, 中华羊茅发芽势比垂穗披碱草、无芒雀麦发芽势分别提高了 15% 和 35%, 差异显著 ($P < 0.05$)。在 25℃/10℃ 时, 垂穗披碱草发芽势与无芒雀麦相比提高了 36%, 差异显著 ($P < 0.05$), 与中华羊茅发芽势相比无显著差异。

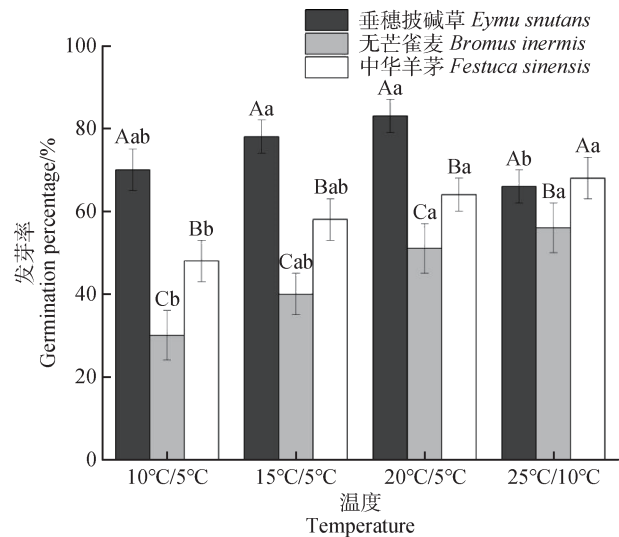


图1 温度对3种禾本科牧草发芽率的影响

Fig. 1 Effect of temperature on germination rate of three grasses

注: 相同处理下大写字母表示品种之间的差异, 同一品种在不同处理方式下的差异用小写字母 ($P < 0.05$), 下同

Note: The uppercase letters under the same processing indicate the differences between varieties, and the differences under different processing methods of the same varieties are marked by lower case letters at the 0.05 level, the same as below

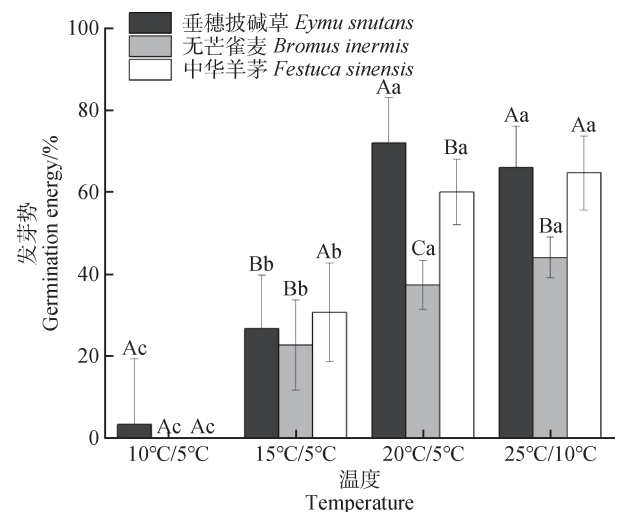


图2 温度对3种禾本科牧草发芽势的影响

Fig. 2 Effect of temperature on germination potential of three grasses

2.3 高寒变温对3种禾本科牧草发芽指数的影响

由图3所示,同一牧草不同温度条件下,垂穗披碱草发芽指数随温度的升高呈先提高后下降的趋势。在20℃/5℃时达到最大值,发芽指数为7.52,与10℃/5℃,15℃/5℃和25℃/10℃均存在显著差异($P<0.05$)。无芒雀麦和中华羊茅发芽指数随着温度的升高而呈提高趋势,在25℃/10℃时均达到最大值,分别为4.72和6.28;无芒雀麦发芽指数在20℃/5℃和25℃/10℃时,分别与10℃/5℃和15℃/5℃相比存在显著差异($P<0.05$);中华羊茅发芽指数在25℃/10℃时,与10℃/5℃,15℃/5℃,20℃/5℃相比均存在显著差异($P<0.05$)。

同一温度下垂穗披碱草发芽指数最高,其次是中华羊茅,无芒雀麦发芽指数最低。在10℃/5℃,15℃/5℃,20℃/5℃和25℃/10℃时,垂穗披碱草发芽指数分别比无芒雀麦提高了131%,71%,72%和36%,差异显著($P<0.05$),与中华羊茅发芽指数相比分别提高了21%,34%,47%和2%,显著差异($P<0.05$);不同温度条件下,中华羊茅发芽指数与无芒雀麦相比,提高17%~90%。

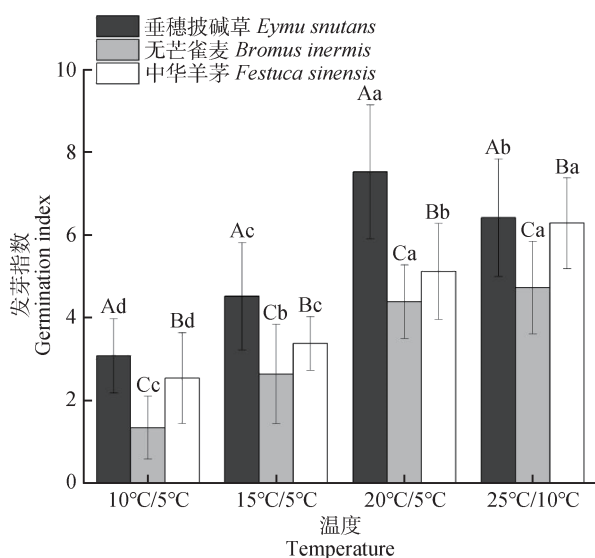


图3 温度对3种禾本科牧草发芽指数影响

Fig. 3 Effect of temperature on germination index of three grasses

2.4 高寒变温对3种禾本科牧草生长特性的影响

由表1所示,垂穗披碱草根长在10℃/5℃和15℃/5℃时,分别与20℃/5℃和25℃/10℃时相比差异显著($P<0.05$)。其中,芽长在20℃/5℃时为12.85 cm,与10℃/5℃时相比增长了60%;根干重、

芽干重在15℃/5℃时达到最高值,分别为0.99 g和0.58 g,与其他温度相比均差异显著($P<0.05$)。

无芒雀麦芽长在25℃/10℃时为7.72 cm,达到处理间的最高值,且与10℃/5℃时(3.48 cm)相比提高了55%,差异显著($P<0.05$)。根干重在20℃/5℃时达到最高值,为0.13 g,且与其他温度相比均差异显著($P<0.05$);根长和芽干重在不同温度之间均无显著差异。

中华羊茅根长在15℃/5℃时为0.54 cm,且与20℃/5℃时的0.23 cm相比提高了57%,差异显著($P<0.05$)。芽长在10℃/5℃时达到最低值,为3.92 cm,与15℃/5℃,20℃/5℃和25℃/10℃相比均差异显著($P<0.05$)。根干重在15℃/5℃时为0.002 g,达到最高值,且与20℃/5℃时的0.005 g相比,差异显著($P<0.05$)。芽干重在不同温度处理时均无显著差异。

2.5 高寒变温对3种禾本科牧草可溶性糖含量的影响

由图4所示,随着温度的升高,3种牧草幼苗叶片SS含量呈降低趋势。同一品种不同温度、同一温度下不同品种之间均有差异显著($P<0.05$)。在10℃/5℃时与25℃/10℃相比,垂穗披碱草、无芒雀麦和中华羊茅叶片SS含量分别提高151%,198%和195%,其中,无芒雀麦叶片SS含量提高最明显。

同一温度下,3种牧草叶片SS含量从高到低的顺序为:垂穗披碱草>无芒雀麦>中华羊茅。在10℃/5℃时,垂穗披碱草叶片SS含量分别比无芒雀麦和中华羊茅提高30%和38%,差异显著($P<0.05$)。

2.6 高寒变温对3种禾本科牧草丙二醛含量的影响

由图5所示,3种植物幼苗叶片MDA含量随着温度的升高呈降低趋势,且在不同温度条件下,MDA含量大小顺序均为:中华羊茅>无芒雀麦>垂穗披碱草,同一品种在不同温度之间MDA含量均差异显著($P<0.05$)。说明,随着环境温度的下降,植物叶片细胞膜受损程度越严重。在10℃/5℃时,垂穗披碱草、无芒雀麦和中华羊茅叶片MDA含量显著高于其他温度处理,并达到最高值,分别为34.54,36.74和43.24,与25℃/10℃时的MDA含量最小值相比提高了96%,78%和83%,差异显著($P<0.05$)。

表 1 变温处理下 3 种牧草幼苗生长指标的分析

Table 1 Analysis of growth indexes of three grasses under variable temperature treatments

处理 Treatment	根长 Root length/cm	芽长 Shoot length/cm	根干重 Root dry weight/(g·plant ⁻¹)	芽干重 Bug dry weight/(g·plant ⁻¹)
A ₁	2.14 ^a	5.12 ^b	0.09 ^b	0.04 ^c
A ₂	2.39 ^a	8.41 ^{ab}	0.99 ^a	0.58 ^a
A ₃	1.02 ^b	12.85 ^a	0.05 ^b	0.06 ^b
A ₄	1.01 ^b	9.32 ^{ab}	0.07 ^b	0.05 ^{bc}
B ₁	1.58 ^a	3.48 ^b	0.08 ^b	0.04 ^a
B ₂	1.92 ^a	6.57 ^{ab}	0.07 ^b	0.06 ^a
B ₃	2.75 ^a	5.93 ^{ab}	0.13 ^a	0.07 ^a
B ₄	1.29 ^a	7.72 ^a	0.05 ^c	0.05 ^a
C ₁	0.28 ^{ab}	3.92 ^b	0.01 ^{ab}	0.01 ^a
C ₂	0.54 ^a	5.18 ^a	0.02 ^a	0.02 ^a
C ₃	0.23 ^b	5.19 ^a	0.005 ^b	0.02 ^a
C ₄	0.43 ^{ab}	5.04 ^a	0.01 ^{ab}	0.02 ^a

注:表中 1、2、3、4 依次 10℃/5℃、15℃/5℃、20℃/5℃和 25℃/10℃,A、B、C 分别为垂穗披碱草、无芒雀麦和中华羊茅,表中小写字母表示不同处理下相同品种同一指标的差异显著($P<0.05$)

Note: 1, 2, 3 and 4 in the table represent the 10℃/5℃, 15℃/5℃, 20℃/5℃ and 25℃/10℃, and A, B and C are *Elymus nutans*, *Bromus inermis* and *Festuca sinensis*, respectively. The small and medium letters in the table indicate the significant difference of the same variety and the same index under different treatments ($P<0.05$)

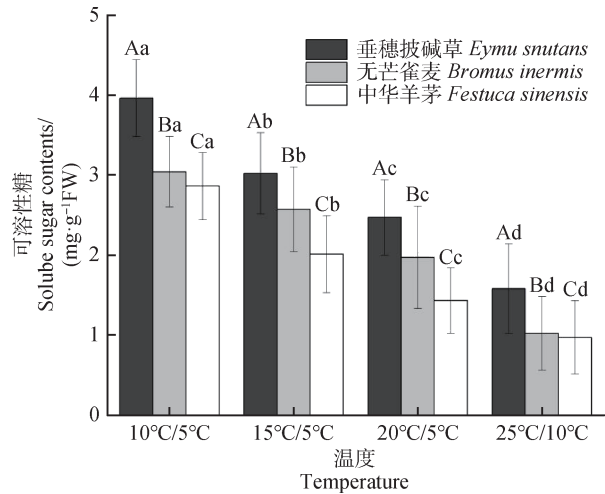


图 4 温度对 3 种禾本科牧草可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effect of temperature on soluble sugar content of three grasses

同一温度下,3种植物叶片MDA含量之间均存在差异显著($P<0.05$)。在25℃/10℃时,3种植物叶片MDA含量均达到最低值,叶片细胞膜受损程度最低,其中垂穗披碱草叶片MDA含量与无芒雀麦和中华羊茅相比分别降低了6%和20%,差异显著($P<0.05$)。

2.7 高寒变温对 3 种禾本科牧草游离脯氨酸含量的影响

如图6所示,随着温度的提高,3种植物叶片Pro含量呈降低趋势。在10℃/5℃时,垂穗披碱草、无芒雀麦和中华羊茅叶片Pro含量显著高于其他三个温度处理下的Pro含量,分别为116.36,101.75和98.57,均达到处理间的最高值,且与25℃/10℃时的最小值相比分别提高22%,23%和22%,差异显著($P<0.05$)。

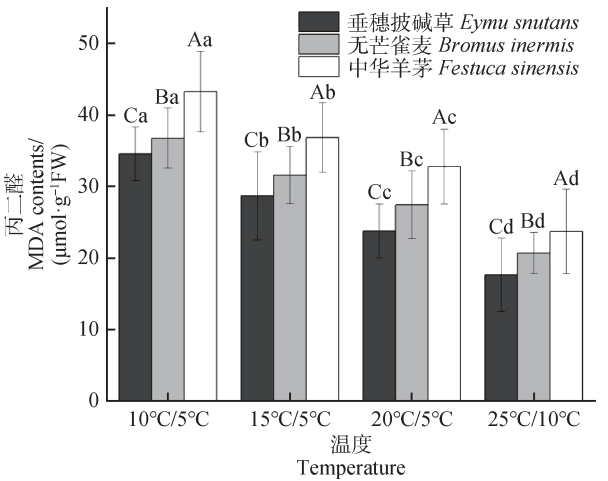


图 5 温度对 3 种禾本科牧草丙二醛含量的影响

Fig. 5 Effect of temperature on malondialdehyde content of three grasses

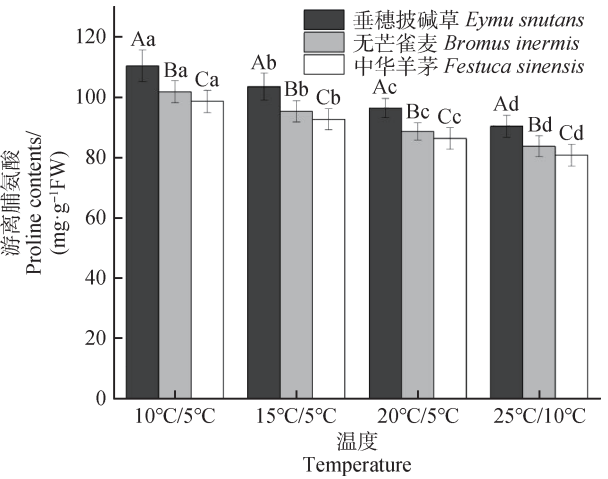


图 6 温度对 3 种禾本科牧草游离脯氨酸含量的影响

Fig. 6 Effect of temperature on free proline content of three grasses

同一温度下,垂穗披碱草、无芒雀麦和中华羊茅叶片 Pro 含量差异显著($P<0.05$),其中垂穗披碱草 Pro 含量最高,无芒雀麦次之,中华羊茅最低。

2.8 隶属函数综合评价

如表 2 所示,根据变温处理对 3 种牧草各项测

定指标的综合评价结果显示,垂穗披碱草和中华羊茅在 15℃/5℃处理时 D 值最大,分别为 0.864 和 0.260,无芒雀麦 20℃/5℃条件下 D 值最大,为 0.482。采用隶属函数综合评价表明:3 种牧草 D 平均值介于 0.216~0.864 之间,其对高寒生境中变温的适应性由强至弱的顺序依次为:垂穗披碱草>无芒雀麦>中华羊茅。

表 2 隶属函数综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of membership functions

处理 Treatment	根长 Root length/cm	芽长 Shoot length/cm	根干重 Root dry weight/ (g·plant ⁻¹)	芽干重 Bug dry weight/ (g·plant ⁻¹)	SS	MDA	Pro	D	平均值	排序
A ₁	2.14 ^a	5.12 ^b	0.09 ^b	0.04 ^c	3.96	34.54	110.36	0.505	0.617	1
A ₂	2.39 ^a	8.41 ^{ab}	0.99 ^a	0.58 ^a	3.02	28.67	103.45	0.864		
A ₃	1.02 ^b	12.85 ^a	0.05 ^b	0.06 ^b	2.47	23.75	96.35	0.600		
A ₄	1.01 ^b	9.32 ^{ab}	0.07 ^b	0.05 ^{bc}	1.58	17.64	90.32	0.499		
B ₁	1.58 ^a	3.48 ^b	0.08 ^b	0.04 ^a	3.04	36.74	101.75	0.358	0.427	2
B ₂	1.92 ^a	6.57 ^{ab}	0.07 ^b	0.06 ^a	2.57	31.58	95.24	0.453		
B ₃	2.75 ^a	5.93 ^{ab}	0.13 ^a	0.07 ^a	1.97	27.42	88.57	0.482		
B ₄	1.29 ^a	7.72 ^a	0.05 ^c	0.05 ^a	1.02	20.67	83.68	0.415		
C ₁	0.28 ^{ab}	3.92 ^b	0.01 ^{ab}	0.01 ^a	2.86	43.24	98.57	0.216	0.246	3
C ₂	0.54 ^a	5.18 ^a	0.02 ^a	0.02 ^a	2.01	36.82	92.65	0.260		
C ₃	0.23 ^b	5.19 ^a	0.005 ^b	0.02 ^a	1.43	32.74	86.21	0.257		
C ₄	0.43 ^{ab}	5.04 ^a	0.01 ^{ab}	0.02 ^a	0.97	23.68	80.74	0.252		

注:1,2,3,4 分别为 10℃/5℃、15℃/5℃、20℃/5℃和 25℃/10℃,A,B,C 依次表示垂穗披碱草、无芒雀麦、中华羊茅

Note:1, 2, 3, 4 are 10℃/5℃, 15℃/5℃, 20℃/5℃ and 25℃/10℃, respectively, A,B,C, in turn, stand for *Elymus nutans*, *Bromus inermis*, *Festucas inensis*

3 讨论

种子发芽率指在规定时间内发芽的种子数比供试种子总数所得的百分比,当最终数值越高,就说明种子质量越高。在本研究中,25℃/10℃温度处理时,3 种牧草种子发芽率由高到低的顺序为:中华羊茅>垂穗披碱草>无芒雀麦;在其他较低温处理时,发芽率由高到低的顺序均为:垂穗披碱草>无芒雀麦>中华羊茅。在 20℃/5℃时,垂穗披碱草发芽势和发芽指数达到最高值,分别为 78% 和 7.52,在 25℃/10℃时,无芒雀麦和中华羊茅发芽势和发芽指数均达到最高值,且均与 10℃/5℃,15℃/5℃相比显著提高($P<0.05$)。这与王传旗等^[24]的研究结果,温度对老芒麦种子萌发具有极显著影响($P<0.01$),低温抑制种子的萌发相一致。

细胞内 MDA 含量可反映细胞膜氧化损伤的程度^[25-26]。闫伟红等^[27]研究 8 份冰草属(*Agropyron Gaertn*)植物幼苗的生理特性对低温胁迫的响应发现,随着环境温度的降低,8 份冰草属植物丙二醛含量逐渐增加。在本研究中也发现,3 种牧草幼苗叶

片 MDA 含量均随着环境温度的降低而增加,在 10℃/5℃时,垂穗披碱草、无芒雀麦和中华羊茅叶片 MDA 含量显著高于其他温度处理,并达到最高值。但在 25℃/10℃时,3 种植物叶片 MDA 含量均达到最低值,其中垂穗披碱草叶片 MDA 含量与无芒雀麦和中华羊茅相比分别降低了 6% 和 20%,差异显著($P<0.05$)。说明,温度降低对植物幼苗产生了氧化胁迫伤害。这可能是由于,植物细胞内膜脂质过氧化程度是通过幼苗叶片中的 MDA 含量的改变来体现,当植物受到外界逆境胁迫时,细胞中活性氧含量会升高,诱发细胞膜发生膜脂过氧化反应,破坏膜的完整性,同时产生大量 MDA。其中,温度的降低导致植物产生大量的对植物有害的丙二醛从而加剧植物的过氧化损伤。

在环境温度降低时,植物体产生系列耐寒机制,主要是通过植物体内的可溶性糖及脯氨酸等生理指标的调节来达到抗寒效果,以上两种指标可以有效缓解植物在逆境下的受害程度^[28]。李长慧等^[29]研究 10 份鹅观草(*Roegneria kamoji*)属野生种质生理特性对低温胁迫的响应结果表明,供试植物 SS 和

Pro含量随着胁迫强度的增强,与对照相比种子萌发及生理特性均显著提高。李清亚等^[30]研究不同豆梨(*Pyrus calleryana* Decne)品种的抗寒性评价发现,豆梨幼苗中SS和Pro含量均随着胁迫温度的降低呈逐渐提高的趋势。本试验结果表明,3种牧草幼苗叶片中SS和Pro含量均随着处理温度的降低呈提高的趋势,且在同一温度条件下,3种牧草SS和Pro含量之间均存在显著差异($P<0.05$)。在10℃/5℃时,3种牧草幼苗叶片中SS含量和Pro含量均达到最高值,且与其他温度处理差异显著($P<0.05$)。在25℃/10℃时,3种牧草幼苗叶片中SS含量和Pro含量均达到最低值。说明,植物体中的SS和Pro含量的高低明显受环境温度的影响,还可能与植物遗传特性有关。植物在低温胁迫后SS含量增加,细胞液浓度会提高,使冰点降低,减轻细胞的过度脱水,保护原生质胶体不致遇冷凝固,从而表现出对低温胁迫的适应性;温度降低时,细胞内的游离Pro会持续增多,以降低细胞的渗透势,从而增强水分保持力,达到抗寒的目的,Pro的积累是植物对低温胁迫的适应^[27],本研究结果中也证实了这一点。

牧草对温度的适应性强弱可用多个指标来表示,研究变温对3种植物生理性状的综合影响,再利用模糊数学隶属函数进行综合评价,应用标准差系数法计算各指标权重,从而得出每一项指标的D值,并对其进行排序。采用隶属函数综合评价表明:3种牧草对高寒变温的适应性由强至弱的顺序依次为:垂穗披碱草>无芒雀麦>中华羊茅,且垂穗披碱草最适温萌发度为20℃/5℃,无芒雀麦和中华羊茅最适萌发温度为25℃/10℃。因此,在高寒地区人工草地建设或植被修复中可推广垂穗披碱草作为首选物种,其种子萌发温度可选择为20℃/5℃。垂穗披碱草的萌发优势明显,在退化草地补播改良或人工草地栽培时推测其在生长过程中幼苗会比较壮实、整齐,不容易被周围杂草遮盖,更具有竞争力。

4 结论

高寒变温对3种禾本科牧草种子萌发及生理特性的影响具有较大差异。适当提高温度对3种禾本科牧草发芽率、发芽指数、发芽势、芽长和芽干重均具有促进作用,对根长和根干重产生抑制作用。温度降低时,3种牧草SS含量、MDA含量和Pro含量均随着温度降低呈提高趋势;在10℃/5℃时,其幼苗

生理指标含量均高于其他温度处理。采用隶属函数综合分析3种牧草对温度的适应性进行评价,其对高寒变温的适应性由强至弱的顺序依次为:垂穗披碱草>无芒雀麦>中华羊茅,且垂穗披碱草最适种子萌发温度为20℃/5℃,无芒雀麦和中华羊茅最适种子萌发温度为25℃/10℃。

参考文献

- [1] 徐宗学,孟翠玲,巩同梁,等. 西藏自治区气温变化趋势分析[J]. 自然资源学报,2009,24(1):162-170
XU Z X, MENG C L, GONG T L, et al. Long-term trend analysis for air temperature in the Tibetan Region[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 162-170
- [2] 德庆措姆,索朗旦巴. 西藏气候的初步分析[J]. 西藏科技, 2002(8):49-51
DE Q, SUO L. A preliminary analysis of the climate in Tibet[J]. Tibet's Cience and Technology, 2002(8):49-51
- [3] 严青,马玉寿,施建军,等. 低温胁迫对3种牧草幼苗抗性生理指标的影响[J]. 青海大学学报(自然科学版),2007(1):54-57
YAN Q, MA Y S, SHI J J, et al. Effect of low temperature stress on physiological process of three kinds of herbage grasses in the seedling stage[J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 2007(1): 54-57
- [4] 王代军,温洋. 温度胁迫下几种冷季型草坪草抗性机制的研究[J]. 草业学报,1998,7(1):76-78,80-81
WANG D J, WEN Y. Effects of temperature on growth of cold-season turfgrasses[J]. Acta Pratacultural Science, 1998, 7(1):76-78,80-81
- [5] 张红梅,金海军,丁小涛,等. 不同砧木黄瓜嫁接苗对温度胁迫的生理响应及其抗性评价[J]. 西北植物学报,2019,39(7):1259-1269
ZHANG H M, JIN H J, DING X T, et al. Physiological response and resistance evaluation of grafted cucumber seedlings with different rootstocks under temperature stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(7): 1259-1269
- [6] 蔺吉祥,李晓宇,张兆军,等. 温度与盐碱胁迫交互作用对羊草种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 草地学报,2011,19(6):1005-1009
LIN J X, LI X Y, ZHANG Z J, et al. The Influence of Physiological Characteristics and Cold Hardiness Evaluation of 8 Agropyron Gaertn Seedlings under Low Temperature Stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(6): 1005-1009
- [7] LIU S J, XU H H, WANG W Q, et al. A proteomic analysis of rice seed germination as affected by high temperature and ABA treatment[J]. Physiologia Plantarum, 2015, 154(1):142-161
- [8] SHAIBU A S, MOTAGI B N, MUHAMMAD K S. Peanut genotypes with high chlorophyll content and low leaf temperature are preferred in breeding program for drought prone areas [J]. Legume Research-an International Journal, 2019, 42(6) 73-76.
- [9] 曹仲华,魏军,杨富裕,等. 西藏牧草种质资源剖析[J]. 草业科学,2007,24(8):43-46
CAO Z H, WEI J, YANG F Y, et al. The current situation and prospect of forage germplasm resources in Tibet[J]. Pratacultural Science, 2007, 24(8):43-46
- [10] LI H, QIANG S, QIAN Y L. Physiological response of different croftonweed (*Eupatorium adenophorum*) populations to

- low temperature[J]. Weed Science, 2008, 56(2):196-202
- [11] HARDEGREE S P. Optimization of seed priming treatments to increase low-temperature germination rate [J]. Journal of Range Management, 1996, 49(1):87
- [12] 许静, 杜国祯, 李文龙, 等. 温度和海拔对高寒草甸植物种子萌发进化特性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(3):377-383
- XU J, DU G Z, LI W L, et al. Effects of temperature and altitude on the evolutionary characteristics of seed germination in an alpine meadow[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013, 49(3):377-383
- [13] 王江涛, 杨军, 王向涛. 变温处理对藏北高原 3 种禾本科牧草种子萌发的影响[J]. 高原农业, 2019, 3(6):670-674
- WANG J T, YANG J, WANG X T. The effect of the changing temperature treatment on the germination of three Gramineae grass seeds in the northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2019, 3(6):670-674
- [14] 王传旗, 付娟娟, 刘敏洁, 等. 垂穗披碱草对 Cu^{2+} , Zn^{2+} 胁迫的生理响应[J]. 草地学报, 2019, 27(6):1781-1785
- WANG C Q, FU J J, LIU M J, et al. Physiological responses of *Elymus nutans* to Cu^{2+} and Zn^{2+} stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6):1781-1785
- [15] 闫天芳, 苗彦军, 王向涛, 等. 干旱胁迫对西藏 4 份野生披碱草属牧草幼苗生理指标的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(6):1333-1339
- YAN T F, MIAO Y J, WANG X T, et al. Physiological change of four wild *Elymus* species from Tibet under drought stress at seedling stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(6):1333-1339
- [16] 何子华, 杨成行, 王沛, 等. 高寒地区 6 种禾本科牧草对低温胁迫的生理响应及耐寒性评价[J]. 草业科学, 2021, 38(10):2019-2028
- HE Z H, YANG C H, WANG P, et al. Effect of low-temperature stress on the physiological responses of six gramineous forages in alpine regions and evaluation of their cold resistance[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(10):2019-2028
- [17] 付娟娟. 西藏野生垂穗披碱草低温适应机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017:22
- FU J J. The physiological and molecular mechanisms of Tibetan wild *Elymus nutans* responses to cold stress[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017:22
- [18] 张尚雄, 尼玛平措, 徐雅梅, 等. 3 个披碱草属牧草对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价[J]. 草业科学, 2016, 33(6):1154-1163
- ZHANG S X, NI M, XU Y M, et al. Physiological responses to low temperature stress and cold tolerance evaluation in three *Elymus* species[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(6):1154-1163
- [19] 高献磊, 包赛很那, 周忠义, 等. 4 种牧草种子在不同逆境下的萌发特性[J]. 草业科学, 2022, 39(9):1823-1831
- GAO X L, BAO S H N, ZHOU Z Y, et al. Study on germination characteristics of four forage seeds under different stresses[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(9):1823-1831
- [20] 张玉, 郑笑, 苏佳露, 等. 不同培养温度对金佛山方竹种子萌发的影响[J]. 种子, 2019, 38(1):80-85
- ZHANG Y, ZHENG X, SU J L, et al. Effects of different temperatures on the seeds germination of *Chimonobambusa utilis* (Keng) P. C. Keng[J]. Seed, 2019, 38(1):80-85
- [21] 田宏, 王志勇, 张鹤山, 等. 不同温度下美丽胡枝子种子的发芽特性[J]. 种子, 2017, 36(7):73-75
- TIAN H, WANG Z Y, ZHANG H S, et al. Seed germination characteristics of *Lespedeza formosa* (vog.) kochne. at different temperatures[J]. Seed, 2017, 36(7):73-75
- [22] ABOUZARI A, SOLOUKI M, GOLEIN B, et al. Screening of molecular markers associated to cold tolerance-related traits in *Citrus* [J]. Scientia Horticulturae, 2020(263):109145
- [23] 刘艳. 试用隶属函数分析法对大豆品种进行综合评价[J]. 大豆科技, 2014(4):14-17
- LIU Y. Comprehensive evaluation for soybean varieties with subordinate function analysis method [J]. Soybean Science & Technology, 2014(4):14-17
- [24] 王传旗, 徐雅梅, 梁莎, 等. 西藏野生老芒麦种子萌发对温度和水分响应[J]. 作物杂志, 2017(6):165-169
- WANG C Q, XU Y M, LIANG S, et al. Germination responses of *Elymus sibiricus* seed to temperature and moisture [J]. Crops, 2017(6):165-169
- [25] 马丹炜, 王亚男, 王煜, 等. 化感胁迫诱导植物细胞损伤研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(5):1640-1645
- MA D W, WANG Y N, WANG Y, et al. Advance in allelochemical stress induced damage to plant cells [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5):1640-1645
- [26] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生理影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3):575-581
- WU X X, ZHU Y L, ZHU W M, et al. Physiological effects of exogenous nitric oxide in tomato seedlings under NaCl stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3):575-581
- [27] 闫伟红, 马玉宝, 张晶然, 等. 低温胁迫对 8 份冰草属植物幼苗生理特性的影响及抗寒性评价[J]. 草业科学, 2021, 5(6):27-29
- YAN H W, MA Y B, ZHANG J R, et al. The influence of physiological characteristics and cold hardiness evaluation of 8 agropyron gaertn seedlings under low temperature stress [J]. Pratacultural Science, 2021, 5(6):27-29
- [28] 袁小情, 严国强, 黄思怡, 等. 中国西南部野生狗牙根种质耐寒性初步鉴定[J]. 草业科学, 2020, 37(2):287-297
- YUAN X Q, YAN G Q, HUANG S Y, et al. Cold tolerance of native *Bermudagrass* germplasms in southwest China [J]. Pratacultural Science, 2020, 37(2):287-297
- [29] 李长慧, 李淑娟, 刘艳霞, 等. 低温胁迫对 10 份鹅观草属野生种质抗寒生理指标的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(1):123-132
- LI C H, LI S J, LIU Y X, et al. Effect of low temperature stress on the cold-resistance physiological indexes of 10 germplasm resources of *Roegneria* in Qinghai [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(1):123-132
- [30] 李清亚, 路斌, 赵佳伟, 等. 不同豆制品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1):86-94, 110
- LI Q Y, LU B, ZHAO J W, et al. Physiological response and cold resistance evaluation of different *Pyrus calleryan* varieties under low temperature stress [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1):86-94, 110

(责任编辑 刘婷婷)