

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0391

李长慧,李淑娟,刘艳霞,董添财,贾科,梁德飞.低温胁迫对 10 份鹅观草属野生种质抗寒生理指标的影响.草业科学,2018,35(1):123-132.

Li C H, Li S J, Liu Y X, Dong T C, Jia K, Liang D F. Effect of low temperature stress on the cold-resistance physiological indexes of 10 germplasm resources of *Roegneria* in Qinghai. Pratacultural Science, 2018, 35(1): 123-132.

低温胁迫对 10 份鹅观草属野生种质 抗寒生理指标的影响

李长慧¹, 李淑娟¹, 刘艳霞², 董添财¹, 贾 科¹, 梁德飞¹

(1.青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2.西藏自治区山南市琼结县农牧综合服务中心, 西藏 山南 856800)

摘要:为研究低温胁迫对鹅观草属(*Roegneria*)野生种质抗寒相关生理指标的影响,以采集自青海三江源区的鹅观草属 6 个野生种 10 个居群的植物为研究材料,测定其幼苗在 -25~5 °C 低温胁迫下叶绿素(Chl)、可溶性糖(SS)、丙二醛(MDA)和游离脯氨酸(Pro)含量、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性以及细胞膜透性的变化。结果表明,低温胁迫下供试材料细胞膜透性、Chl 含量、MDA 含量、SS 含量、Pro 含量以及 CAT、POD 活性等抗寒生理指标均有显著变化,不同材料间变化幅度不同,并呈现出不同的变化规律,电解质渗出率持续增加,增加幅度为“小—大—小”的“S”曲线;MDA 含量先是所有材料一致逐步提高,后是部分材料降低;CAT 活性、POD 活性、SS 含量和 Pro 含量变化呈现先增加再降低的倒“V”型;9 种供试材料的 Chl 含量持续降低;应用隶属函数法综合评价鹅观草属各材料的抗寒性能,抗寒性由强到弱顺序为玉树鹅观草(*Roegneria yushuensis*)(玛多)>玉树鹅观草(*Roegneria yushuensis*)(铁卜加)>玉树鹅观草(*Roegneria yushuensis*)(兴海)>肃草(*R. stricta*)(同仁)>曲芒异芒草(*R. abolinii* var. *divaricans*)(湟源)>曲芒异芒草(*R. abolinii* var. *divaricans*)(泽库)>短柄鹅观草(*R. brevipes*)(曲麻莱)>紫穗鹅观草(*R. purpurascens*)(麦秀林场)>短柄鹅观草(*R. brevipes*)(泽库)>毛穗鹅观草(*R. trichospicula*)(泽库)。

关键词:鹅观草属; 低温胁迫; 生理指标; 抗寒性; 隶属函数法; 三江源; 种质资源

中图分类号:S543+.203.4;Q945.7

文献标志码:A

文章编号:1001-0629(2018)01-0123-10*

Effect of low temperature stress on the cold-resistance physiological indexes of 10 germplasm resources of *Roegneria* in Qinghai

Li Chang-hui¹, Li Shu-juan¹, Liu Yan-xia², Dong Tian-cai¹, Jia Ke¹, Liang De-fei¹

(1.Agriculture and Animal Husbandry Collage of Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;

2.Agriculture and Animal husbandry comprehensive service center of Qiongjie county, Shannan 856800, Tibet, China)

Abstract: In order to study the effect of low temperature on the physiological indexes of 10 populations of six wild species belonging to the *Roegneria* genus in the Three Rivers region of Qinghai, seedlings with four to five leaf stages were used as experimental materials, and the leaf chlorophyll (Chl), soluble sugar (SS), malondialdehyde (MDA), free proline (Pro), catalase (CAT) and peroxidase (POD) activities, and cell membrane permeability were measured under low temperature stress of between -25 and 5 °C. The results showed that the cold resistance indexes of plant materials, such as Chl content, MDA, SS content, Pro content, and CAT and POD activity were significantly different under low temperature stress compared to the control. Different materials have different change ranges, and present different change rules, that is electrolyte permeability continues increasing by increasing the size of the S curve. The MDA content of the all experimental materials tended to

* 收稿日期:2017-07-18 接受日期:2017-12-01

基金项目:青海省科技厅基础研究项目(2014-ZJ-712)和国家自然科学基金(31360578)

第一作者:李长慧(1969-),男,山东齐河人,教授,博士,主要从事牧草饲料资源与利用研究。E-mail:746886595@qq.com

通信作者:李淑娟(1967-),女,青海贵德人,教授,硕士,主要从事牧草遗传育种研究。E-mail:lsjqhu@163.com

remain consistent first increase, and then decrease. The contents of SS and Pro presented as an inverted V-shape, increasing first and then decreasing. The Chl content of nine materials continued to decrease. Membership function analysis showed the order of cold resistance of the 10 *Roegneria germplasms* is: *Roegneria yushuensis* (Maduo) > *R. yushuensis* (Tiebujia) > *R. yushuensis* (Xinhai) > *R. stricta* (Tongren) > *R. abolinii* var. *divaricans* (Huangyuan) > *R. abolinii* var. *divaricans* (Zeku) > *R. brevipes* (Qumalai) > *R. purpurascens* (Maixiu) > *R. brevipes* (Zeku) > *R. trichospicula* (Zeku), in order from the strongest to weakest.

Key words: *Roegneria*; cold stress; physiological index; cold resistance; method of membership function; Three Rivers region; germplasm resources

Corresponding author: Li Shu-juan E-mail: lsjqhu@163.com

鹅观草属(*Roegneria*)是禾本科小麦族近缘属中植物种类最多的多年生大属。现知全世界有 4 组 20 系 126 种,分布在北半球的温带、寒带,我国有 4 组 18 系 79 种,主要分布在西北、西南、华北和东北等地区^[1]。青海省分布的鹅观草属有 26 种^[2],其中多数种主要分布于海拔 3 300~4 500 m 的三江源地区,具有适口性好,抗逆性强等优良特性,是高寒地区天然草地的重要组成成分和优良的牧草^[3]。三江源区独特的生态区域和极端的气候条件塑造了该区鹅观草属野生草种可以在极端寒冷、干旱和缺氧环境条件的生存特性,但原始生境不同的植物在低温胁迫下的生理变化是有差异的,其抗寒性有强弱之分^[4-5]。对牧草抗寒性生理研究是种质资源评价的重要内容之一。植物叶片中的叶绿素(Chl)含量,可溶性糖(SS)含量和质膜透性以及一些氧化酶均与抗寒性有关^[6-10]。低温胁迫对植物细胞膜透性、Chl 含量以及光合作用等生理活动产生不利影响^[6,9,11-12],同时植物在生理生化方面对低温会产生适应变化。例如,有些植物叶片产生较多的脱落酸,抑制茎的伸长;植物中可溶性糖等保护物质增多,酶的活性发生变化^[6,12]。本研究通过对低温胁迫下鹅观草属 10 份材料的过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性变化、游离脯氨酸(Pro)累积、Chl 和丙二醛(MDA)含量及质膜相对透性等生理生化指标变化的研究,探讨和评价其抗寒性,旨在为抗寒种质筛选和优良草品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

2014 年自三江源区及其周边地区采集到鹅观草属植物标本 200 余份,经过中科院西北生物研究所标本馆鉴定后,于 2015 年 5 月种植在青海大学牧草试验站。选择玉树鹅观草等为试验材料(表 1),待供试材

料在田间生长至具有 4~5 片真叶时,采集功能叶片装入保鲜袋带回实验室,在低温冰箱中进行人工模拟降温处理,处理温度分别为 5、0、-5、-10、-15、-20、-25 ℃。低温胁迫 24 h 测定 CAT 和 POD 活性,Pro、MDA 和 SS 含量以及细胞膜透性等生理生化指标。

1.2 测定指标和测定方法

细胞膜透性的测定采用电导法;Chl 含量的测定采用荧光法;MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸法;SS 含量的测定采用蒽酮比色法;Pro 含量测定采用茚三酮法;CAT 活性的测定采用高锰酸钾滴定法;POD 活性的测定采用愈创木酚法^[13]。

1.3 抗寒性综合评价方法

用隶属函数法综合各项指标进行抗寒性评价^[14]。抗寒性负相关的参数,相对电导率、MDA 采用降型分布函数: $U(x_i) = (X_{i\max} - X_{ij}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$;与抗寒性呈正相关的参数,脯氨酸、可溶性糖、过氧化氢酶采用升型分布函数: $U(x_i) = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$,其中 $U(x_i)$ 表示各指标的隶属度值, X_{ij} 表示各指标值, $X_{i\max}$ 和 $X_{i\min}$ 分别表示第 i 项指标的最大值和最小值。

1.4 数据处理

应用 SPSS 20.0 对同种材料不同温度处理间进行方差分析和差异显著性检验,应用 Excel 2007 制作图表。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对细胞膜透性的影响

植物受到低温胁迫后细胞膜的结构遭受破坏,膜的破坏程度可以通过细胞内电解质外渗率的大小即电导率(Cond)来反映^[4]。电导率相对越大说明植物体细胞破坏越严重,抗寒性就越弱^[4]。随着温度的降低,10 份鹅观草属植物材料的细胞膜透性总体呈上升趋势

表 1 供试材料来源
Table 1 Origin of the experiment materials

材料编号 Material code	种质名称 Germplasm name	海拔 Altitude/m	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	采集地点 Collection site
A	玉树鹅观草 <i>Roegneria yushuensis</i>	4 366	98°07.686′	34°46.327′	玛多县星海西 Xingxinghai, Maduo County
B	玉树鹅观草 <i>R. yushuensis</i>	3 228	99°33.121′	37°04.148′	共和县铁卜加 Tiebujia, Gonghe County
C	曲芒异芒草 <i>R. abolinii</i> var. <i>divaricans</i>	2 513	101°23.713′	36°40.292′	湟源县下脖项 Xiaboxiang, Huangyuan County
D	毛穗鹅观草 <i>R. trichospicula</i>	3 016	101°56.285′	35°14.151′	泽库县麦秀林场 Maixiu tree farm, Zeku County
E	玉树鹅观草 <i>R. yushuensis</i>	3 522	99°53′	35°45′	兴海县子科滩 Ziketan, Xinghai County
F	短柄鹅观草 <i>R. brevipes</i>	4 086	96°25.284′	33°54.185′	曲麻莱东风乡 Dongfeng, Qumalai County
G	曲芒异芒草 <i>R. abolinii</i> var. <i>divaricans</i>	3 286	101°23.713′	36°40.292′	泽库县和日乡 Heri, Zeku County
H	肃草 <i>R. stricta</i>	2 726	101°57.675′	35°22.539′	同仁县西铺沙 Xipusha, Tongren County
I	短柄鹅观草 <i>R. brevipes</i>	3 506	101°00.141′	35°12.426′	泽库县和日乡 Heri, Zeku County
J	紫穗鹅观草 <i>R. purpurascens</i>	2 997	101°55.828′	35°14.788′	泽库县麦秀林场 Maixiu Tree Farm, Zeku County

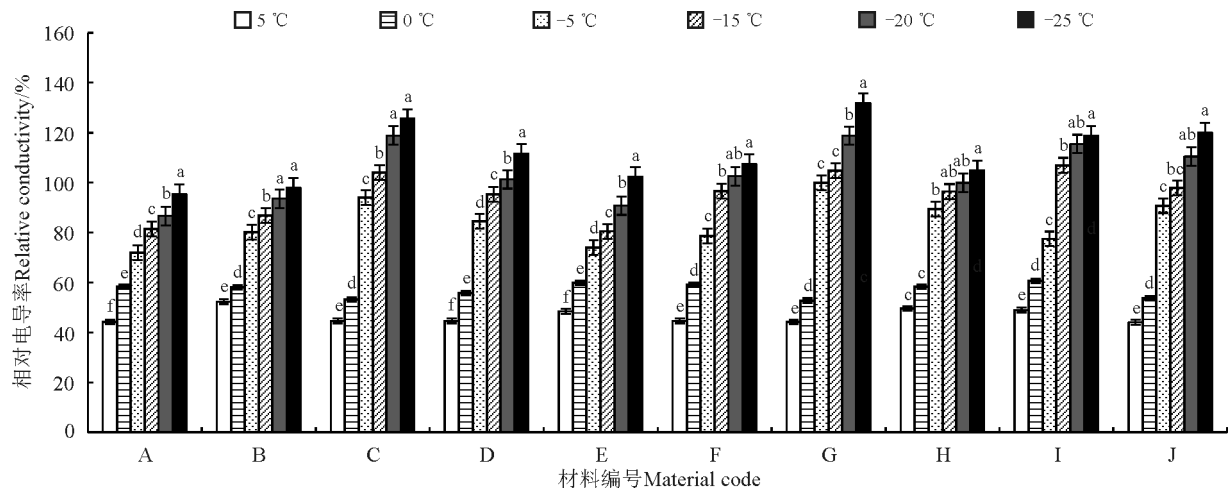


图 1 低温胁迫对鹅观草幼苗细胞膜透性的影响

Fig. 1 Effect of cold stress on the relative membrane permeability in leaves of seedlings

A、B、C、……、J 表示材料编号,同表 1,下同。
A, B, C,……, J indicate materials code in Table 1; similarly for the following figures.

势(图 1),其中玉树鹅观草 A(玛多)、玉树鹅观草 B(铁卜加)、玉树鹅观草 E(兴海)、短柄鹅观草 F(曲麻莱)、肃草 H(泽库西铺沙)的上升比较平缓,而曲芒异芒草 C(湟源)和曲芒异芒草 G(泽库)的上升幅度较大;由 5

℃降低到 0℃时,电导率的变化幅度普遍较小;由 0℃降低到-5℃时,B、C、D、G、H、J 电导率增加显著($P<0.05$);由-5℃降低到-15℃时,除 I 外各材料的电导率增加的幅度相对降低,但 A、B、C、D、E、F、I 电导率增加仍显著;由-15℃降低到-20℃时,F、H、I、J 的电导率增加的变化不显著($P>0.05$);由-20℃降低到-25℃时,大多数材料电导率增加幅度较小,B、C、F、H、I、J 的变化差异不显著。总体来看,同种材料不同温度间电解质渗出率的增加幅度呈现出“小—大—小”的规律,其中,A、B、E、F、H 的电解质渗出率增加幅度较小,植物细胞膜受损较小;C、G 电解质渗出率增加幅度最大,植物细胞膜受损最大,说明曲芒异芒草 C(湟源)和曲芒异芒草 G(泽库)的抗寒性较弱,玉树鹅观草 A(玛多)、玉树鹅观草 B(铁卜加)的抗寒性强。鹅观草电解质渗出率随低温胁迫加强呈现出持续增加的规律与银边扶芳藤(*Euonymus fortunei*)低温胁迫^[15]和对 30 份老芒麦(*Elymus sibiricus*)种质材料抗寒性^[16]研究结果一致。与张尚雄等^[17]对 3 种垂穗披碱草(*Elymus nutans*)的研究结果有所不同,在

其试验中,温度降低到 10℃后,电解质渗出率不再增加,而是降低。

2.2 低温胁迫对丙二醛含量的影响

MDA 是膜脂过氧化作用的主要产物之一,其含量高则说明低温胁迫下植物受伤害的程度高^[18]。-15~5℃范围内,随着胁迫温度的降低,鹅观草属植物的 MDA 含量逐渐增加(图 2);由-15℃降到-25℃,不同材料 MDA 含量变化不一样,A、B、E、F、I 是先升高后降低,D、H、J 是先降低再升高,C 是持续降低,G 是持续升高的。总体来看,短柄鹅观草 F(曲麻莱,)在-20℃时 MDA 含量升高到最大值 $90.25 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,说明其遇到低温胁迫后,调节 MDA 含量的保护酶系统协同作用弱,MDA 含量增加,使其抗寒作用降低;曲芒异芒草 C(湟源)在低温胁迫过程中,MDA 含量增加的幅度最小,为 $45.08 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。6 种鹅观草材料随胁迫温度降低,MDA 含量先增加后降低的这种规律和张尚雄等^[17]对垂穗披碱草低温胁迫的试验结果以及柏晓玲等^[19]对燕麦(*Avena sativa*)幼苗低温胁迫的试验结果一致。

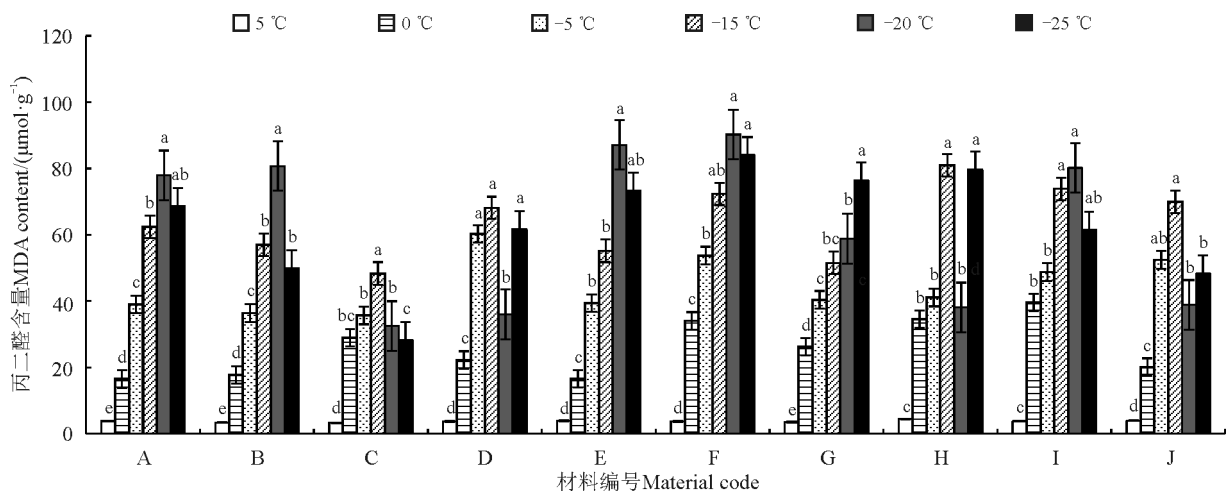


图 2 低温胁迫对鹅观草幼苗丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effect of cold stress on the MDA content in leaves of *Roegneria* seedlings

2.3 低温胁迫对过氧化氢酶活性的影响

过氧化氢酶(CAT)是细胞内重要保护酶,可以清除逆境条件下细胞内产生的大量自由基,减轻膜脂过氧化作用,保护质膜不受自由基的破坏。CAT 活性高低间接地说明了植物抗寒性的强弱^[6,12]。低温胁迫由 5℃降低到-25℃,鹅观草 CAT 活性呈现先增加再降低的倒“V”型(图 3)。其中,A、B、D、E、F、H、I 的峰值出现在-15℃,其中玉树鹅观草 A(玛多)的 CAT 活性最高,为 $79.97 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。说明这几种植物能积累较多的 CAT 来清除活性氧自由基而表现对

逆境的抵抗;C、G、J 的峰值出现在-5℃,CAT 活性较早地开始降低,表明清除活性氧自由基的能力有限,表现对逆境抵抗的能力较差;曲芒异芒草 C(湟源)不仅在-5℃就开始降低,而且其峰值仅为 $62.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,CAT 活性变化的幅度为 $12.68 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,可推断出其抗寒性较弱。韩发等^[20]对不同海拔矮嵩草(*Kobresia humilis*)中 CAT 活性比较结果为随着海拔的升高,矮嵩草茎、叶中 CAT 活性都升高。因此,可理解为随着海拔升高和气温降低,矮嵩草 CAT 活性升高。张志等^[21]研究表明,

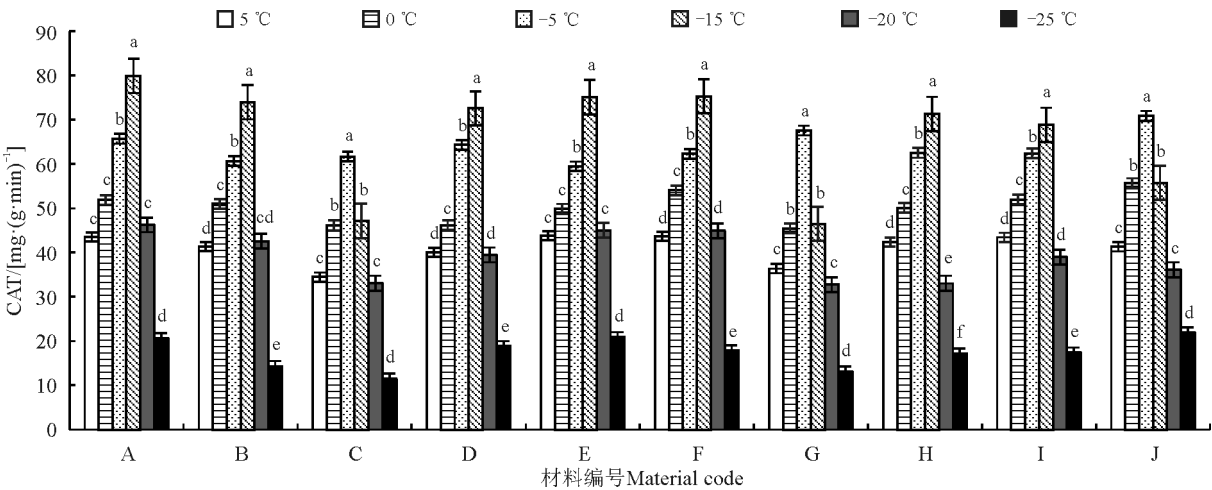


图 3 低温胁迫对鹅观草幼苗 CAT 酶活性的影响

Fig. 3 Effect of cold stress on the catalase activity in leaves of *Roegneria* seedlings

高羊茅(*Festuca elata*)在 5、0、-6 °C 低温胁迫 2、4、6、8 h, CAT 活性的变化均为先升高再降低的趋势。

2.4 低温胁迫对过氧化物酶活性的影响

过氧化物酶(POD)主要起到防止 H₂O₂ 的积累,避免超氧阴离子和 H₂O₂ 反应生成毒性更强的羟基自由基,从而减轻了低温胁迫对植株的伤害^[6,12]。随着温度降低,植物 POD 活性逐步升高,温度降低到 -15 °C 左右时,POD 活性达到峰值,然后降低,呈倒“V”字型(图 4)。总体来看,不同植物材料低温胁迫后 POD 活性的峰值有所不同,其中,玉树鹅观草 A(玛多) POD 活性的峰值最高,为 2 272 U · (g · min)⁻¹,玉树鹅观草 B(铁卜加)POD 活性峰值最低,为 1 753 U · (g · min)⁻¹。H、I、J 的 POD 活性的峰值较高,C、D、E 的 POD 活性的峰值较低。10 种植物材料 POD 活性均呈现先升后降的变化趋势,说明这些鹅观草属

植物在胁迫前期通过提高 POD 活性来消除体内产生的自由基,抵御低温带来的伤害。在低温胁迫 3 种披碱草试验中,在 0—18 °C,随着温度的降低披碱草 POD 活性提高^[17]。在 0—18 °C 间低温胁迫 9 个野生早熟禾试验中,叶片 POD 活性随低温胁迫的加剧而逐渐增大^[22]。低温胁迫下,5 种酢浆草属(*Oxalis*)植物的 POD 活性随着处理温度的降低呈先上升后下降趋势,与本研究结果一致^[23]。同一物种,由于分布区海拔不同,低温胁迫下 POD 活性有所不同,如玛多县的玉树鹅观草较铁卜加、兴海县分布的玉树鹅观草 POD 活性高。泽库分布的曲芒异芒草较湟源县分布的曲芒异芒草 POD 活性高。

2.5 低温胁迫下可溶性糖含量变化

可溶性糖(SS)是主要的渗透调节物质,在植物渗透调节中起着重要作用。植物积累的可溶性糖越多,

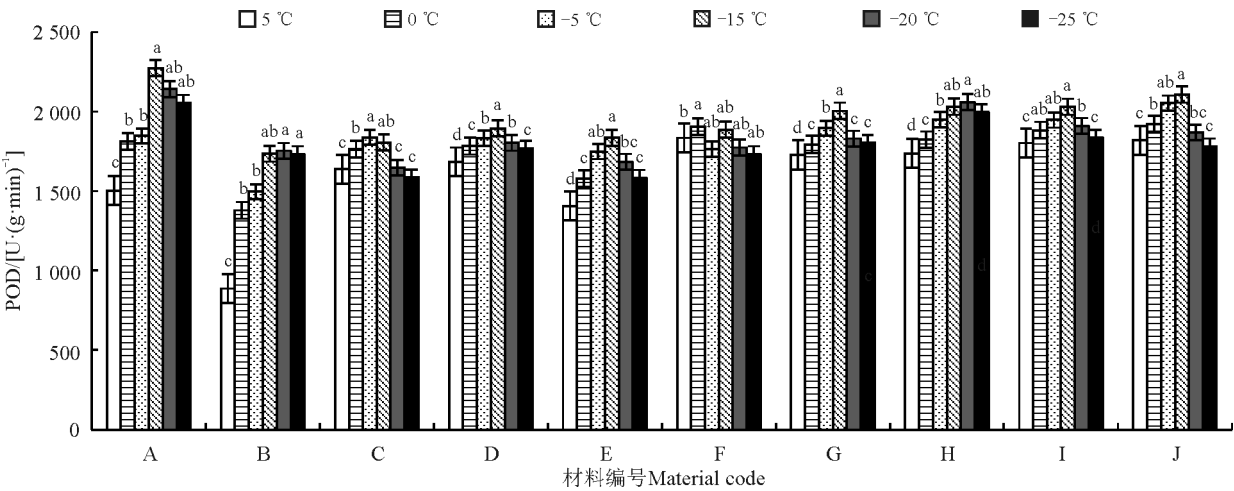


图 4 低温胁迫对鹅观草幼苗 POD 酶活性的影响

Fig. 4 Effect of cold stress on the POD activity in leaves of *Roegneria* seedlings

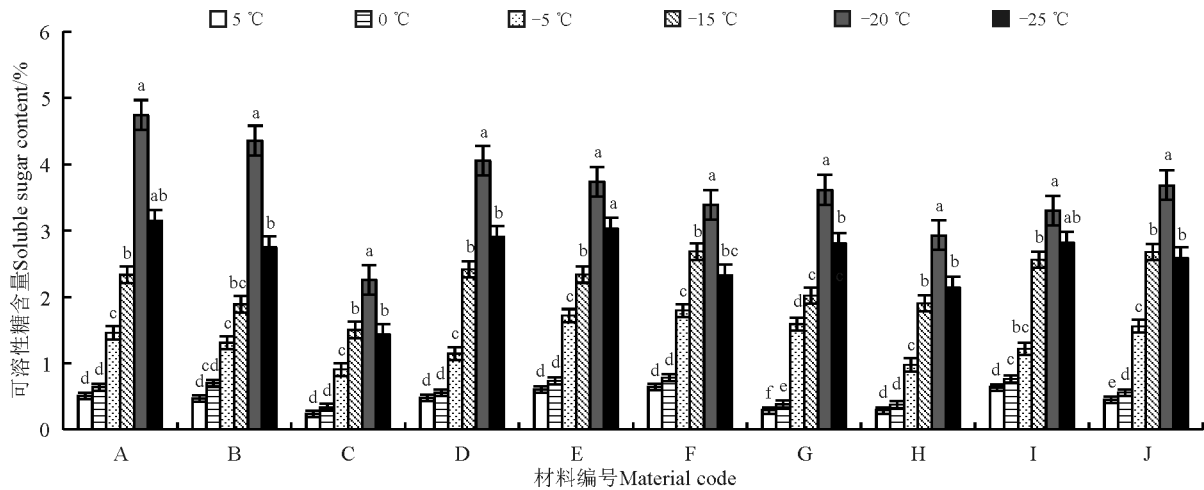


图 5 低温胁迫对鹅观草幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 5 Effect of cold stress on the soluble sugar content in leaves of *Roegneria* seedlings

低温寒害程度越低。其机理是：植物在低温胁迫后可溶性糖含量增加，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^[6,12]。不同鹅观草材料低温胁迫时均表现出可溶性糖含量随温度的降低而提高，在-20℃时达到峰值，然后随着温度的降低可溶性糖含量也降低。峰值最大的是玉树鹅观草 A(玛多)，峰值最小的是曲芒异芒草 C(湟源)(图 5)。对 9 种野生早熟禾材料低温胁迫试验表明，在 5~ -20℃ 范围内，随温度的降低，早熟禾 SS 含量增加^[22]，其结果与本研究结果是一致的。

2.6 低温胁迫对游离脯氨酸含量的影响

游离脯氨酸(Pro)是重要的渗透调节物质。当植物遭遇低温时，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。

的,Pro 的积累是植物对低温胁迫的适应^[6,12]。不同低温胁迫对鹅观草中游离 Pro 含量有显著的影响 ($P<0.05$),随着温度的降低,10 种供试材料中的游离 Pro 含量均有先升高后降低的趋势(图 6)。各供试材料峰值均出现在-15℃,其中玉树鹅观草 A(玛多)、短柄鹅观草 F(曲麻莱)、短柄鹅观草 I(泽库)的峰值较高,分别为 438.79、445.34 和 422.24 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$;峰值较低的是毛穗鹅观草 D(泽库),为 353.62 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。同种植物相比较,玛多的玉树鹅观草(A)低温胁迫下 Pro 含量的峰值以及 Pro 含量的 Δ 值(不同温度下 Pro 含量的差值)较铁卜加的(B)和兴海县的(E)高;曲麻莱得短柄鹅观草(F)低温胁迫下 Pro 含量的峰值以及 Pro 含量的 Δ 值较泽库的(G)高,这说明,分布在海拔高一些的鹅观草在低温胁迫下,体内 Pro 含量升高的幅度大一些。这与对不同海拔矮嵩草叶中Pro含

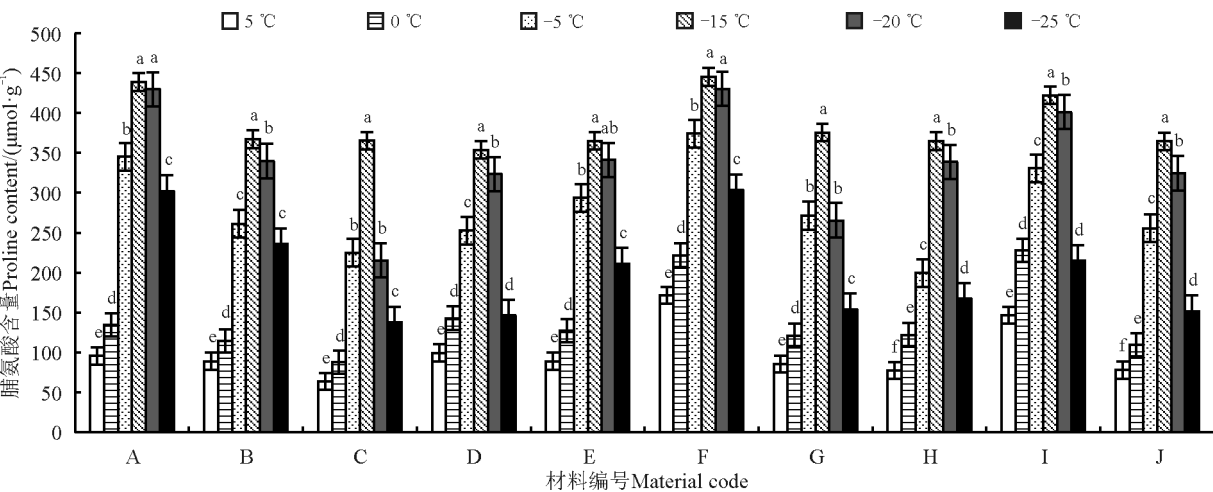


图 6 低温胁迫对鹅观草幼苗叶片游离脯氨酸含量的影响

Fig. 6 Effect of cold stress on the free proline content in leaves of *Roegneria* seedlings

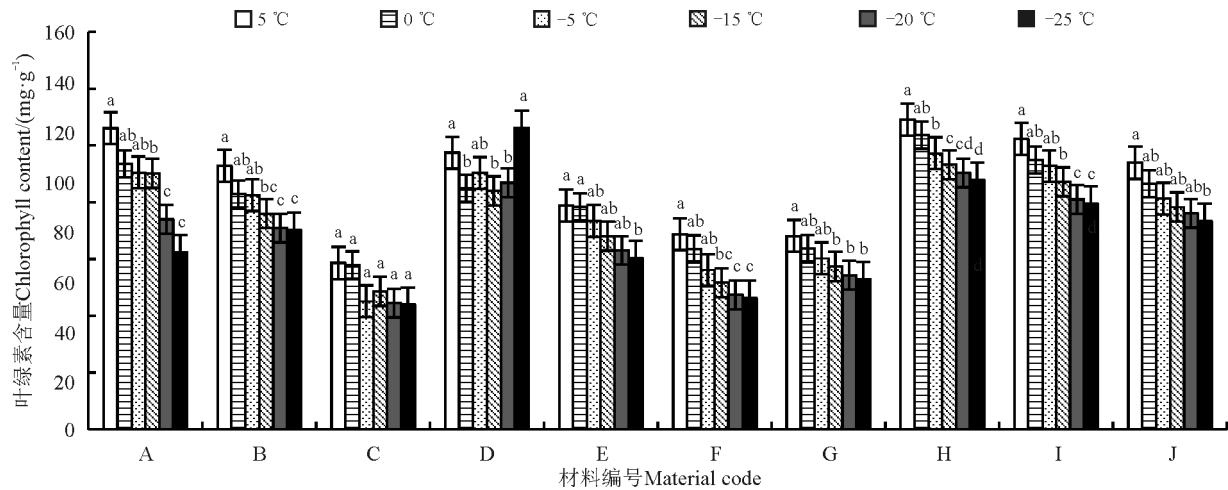


图 7 低温胁迫对鹅观草幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 7 Effect of cold stress on the chlorophyll content in leaves of *Roegneria* seedlings

量比较研究的结果是一致的^[20]。

2.7 低温胁迫对叶绿素含量的影响

叶绿素(Chl)的变化直接影响植物的光合作用,光合作用是主要的代谢活动之一。低温胁迫下会加速植物体内叶绿素的降解,叶绿素的变化与植物的抗寒性呈负相关^[6,12]。一般情况下,低温下叶绿素含量较高的植物,有利于光合作用,形成可溶性糖等溶质,对抗寒有利^[24]。随着温度的逐渐降低,10 种供试材料的叶绿素含量逐渐下降(图 7),说明各种鹅观草属材料因持续低温而使叶绿素合成受阻导致叶绿素含量也相对降低。这一结果与已报道的低温胁迫对牧草叶绿素含量影响的结论一致^[25-27]。

2.8 抗寒性综合评价

运用隶属函数法对测定的 10 个供试材料的 7 项生理指标进行了综合评定,并做了相关性分析,可以确定其抗寒性的强弱(表 2)。结果表明,7 项指标(Pro 含量、SS 含量、MAD 含量、CAT 活性、POD 活性、Chl 含量以及细胞膜透性)与抗寒综合评价值显著相关($P<0.01$)。抗寒性由强到弱的顺序为玉树鹅观草 A(玛多)>玉树鹅观草 B(铁卜加)>玉树鹅观草 E(兴海县)>肃草 H(同仁)>曲芒异芒草 C(湟源)>曲芒异芒草 G(泽库县)>短柄鹅观草 F(曲麻莱)>紫穗鹅观草 J(麦秀林场)>短柄鹅观草 I(泽库)>毛穗鹅观草 D(泽库)。这一结果与铁卜草改试验站试验田及青海大学试验田的种植观察结果基本相一致,如玉树鹅观草、肃草在铁卜草改试验站试验田及青海大学试验田中返青、长势比曲芒异芒草、紫穗鹅观草、毛穗鹅观草和短柄鹅观草明显好一些,曲芒异芒草在铁卜加试验田中第 2 年的返青率较低^[4-5,8-11,15-28,30]。

3 讨论与结论

高寒地区植物的生长发育经常会受到寒冷胁迫的影响,抗寒性比较强的植物在长期应对低温等逆境胁迫的过程中形成了功能独特的渗透调节物质和细胞保护酶系^[28]。本研究表明,低温胁迫可诱导鹅观草属植物启动抗寒响应机制,在生理上产生了一系列的变化,具体表现:低温胁迫使鹅观草属植物幼苗叶片内积累更多的游离 Pro、SS 及水分等物质,这些渗透调节物质的积累可减轻渗透胁迫、降低冰点、增强保水能力、防止膜质和蛋白质的过氧化作用等;CAT、POD 是清除活性氧的主要保护酶,低温胁迫期间 CAT 可以分解鹅观草属植物体内的过氧化氢,POD 可降解过氧化氢,解除细胞内有害自由基。通过 POD 和 CAT 保护酶系统协同作用,使自由基维持在一个低水平,从而防止自由基伤害。由于上述渗透调节作用和保护酶系统协同作用,鹅观草属植物细胞内保护物质增加,活性氧平衡,从而具有抗寒性,能够适应三江源区寒冷的气候。供试材料在不同低温胁迫下,细胞膜透性、Chl 含量、MDA 含量、SS 含量、Pro 含量以及 CAT 活性、POD 活性等生理生化指标均有显著性变化,不同材料间变化幅度不同,电解质渗出率的变化呈现持续增加,增加幅度为“小一大一小”的“S”曲线。所有供试材料 MDA 含量先一致逐步提高,后部分材料降低;CAT 活性、POD 活性、SS 含量和 Pro 含量的变化规律呈现先增加再降低的倒“V”型;9 种供试材料的 Chl 含量持续降低;应用隶属函数法综合评价鹅观草属各材料的抗寒性,抗寒性由强到弱顺序:玉树鹅观草(玛多)>玉树鹅观草(铁卜加)>玉树鹅观草(兴海)>肃草(同仁)>曲芒异芒草(湟源)>曲芒异芒草(泽库)>短柄

表 2 供试鹅观草材料苗期叶片抗寒性各指标隶属函数值、权重及评价值

Table 2 Synthetic evaluation indexes and weighted value of cold resistance character of 10 *Roegneria* germplasm

编号 Code	种质名称 Germplasm name	隶属函数值 Membership fuction value							综合评价 Evaluation
		Pro	MDA	CAT	SS	Chl	Cond	POD	
A	玉树鹅观草(玛多) <i>R. yushuensis</i> (Maduo)	0.569 3	0.551 9	0.517 5	0.385 2	0.543 5	0.562 5	0.567 1	0.470 8
B	玉树鹅观草(铁卜加) <i>R. yushuensis</i> (Tiebujia)	0.523 5	0.484 4	0.552 7	0.371 5	0.395 4	0.564 4	0.704 7	0.448 1
C	曲芒异芒草(湟源) <i>R. abolinii</i> var. <i>divaricansi</i> (Huangyuan)	0.394 2	0.581 8	0.547 9	0.433 4	0.397 1	0.560 8	0.377 9	0.340 0
D	毛穗鹅观草(泽库) <i>R. trichospicula</i> (Zeku)	0.473 5	0.594 3	0.521 9	0.404 8	0.344 4	0.560 2	0.526 8	0.312 4
E	玉树鹅观草(兴海) <i>R. yushuensis</i> (Xinghai)	0.539 6	0.504 5	0.519 2	0.454 7	0.545 3	0.510 7	0.543 3	0.353 9
F	短柄鹅观草(曲麻莱) <i>R. brevipes</i> (Qumalai)	0.558 4	0.608 3	0.554 1	0.472 1	0.416 5	0.586 4	0.482 4	0.328 1
G	曲芒异芒草(泽库) <i>R. abolinii</i> var. <i>divaricans</i> (Zeku)	0.437 1	0.539 1	0.499 0	0.449 2	0.432 0	0.546 2	0.415 6	0.332 1
H	肃草(同仁) <i>R. stricta</i> (Tongren)	0.467 2	0.549 4	0.534 3	0.434 4	0.426 2	0.605 2	0.606 7	0.345 2
I	短柄鹅观草(泽库) <i>R. brevipes</i> (Zeku)	0.522 3	0.621 5	0.578 2	0.468 1	0.444 7	0.559 5	0.435 0	0.312 7
J	紫穗鹅观草(麦秀林场) <i>R. purpurascens</i> (Maixiu)	0.475 2	0.530 4	0.510 8	0.454 4	0.400 6	0.553 6	0.439 2	0.327 8
权重 Weight coefficient		0.099 96	0.100 00	0.099 99	0.099 98	0.100 30	0.099 86	0.100 47	
相关系数 Related coefficient		—0.544	—0.782	0.393	—0.837	0.359	—0.91	—0.299	
P		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

鹅观草(曲麻莱)＞紫穗鹅观草(麦秀林场)＞短柄鹅观草(泽库)＞毛穗鹅观草(泽库)。不同海拔分布的同一植物种的抗寒性也有一定差异,体现出了环境对植物的塑造性。海拔高的地区年均气温较低,在寒冷地区生长的植物抗寒性较强一些。有研究表明^[29-31],与气候梯度有关的基因梯度的分布说明寒冷地区的树种更为抗寒。与此类似,分布地海拔较高的玛多县的玉树鹅观草较分布地海拔较低的铁卜加的玉树鹅观草的抗寒性强。本研究设置的温度范围为-25~5℃。检索对高原植物低温胁迫的研究文献,发现已有研究中设置的温度偏高,缺乏-25~-15℃的低温设置,所以本研究可对比的文献不多。

参考文献 References:

[1] 中国科学院中国植物志编委会.中国植物志(第九卷第三分册).北京:科学出版社,1987:51-109.
Editorial Committee of Chinese Journal of Plant of Chinese Academy of Sciences.Flora of China. VoL.9 Book 3.Beijing:Science Press,1987:51-109.(in Chinese)

[2] 中科院西北高原生物研究所.青海植物志(第4卷).西宁:青海人民出版社,1999:74-86.

- Northwest Plateau Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences Editorial Committee. Flora Qinghaiica. Vol. 4. Xining: Qinghai People Press, 1999: 74-86. (in Chinese)
- [3] 青海省草原总站. 青海草地资源. 西宁: 青海人民出版社, 2012: 192-193.
The Qinghai General Station of Grassland. Grassland Resource in Qinghai Province. Xining: Qinghai People Press, 2012: 192-193. (in Chinese)
- [4] 迟春玉, 连永权, 李文君, 丁国华. 低温胁迫下三种冷季型草坪草的抗寒性变化. 安徽农学通报, 2007, 13(7): 41-43.
Chi C Y, Lian Y Q, Li W J, Ding G H. Chilling resistance change of three turf grass varieties under low temperature stress. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(7): 41-43. (in Chinese)
- [5] 李轶冰, 杨顺强, 任广鑫, 冯永忠, 张强, 李鹏. 低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较. 生态学报, 2009, 29(3): 1341-1347.
Li Y B, Yang S Q, Ren G X, Feng Y Z, Zhang Q, Li P. Changes analysis in physiological properties of several graminaceae grass species and cold resistance comparison on under cold stress. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1341-1347. (in Chinese)
- [6] 王忠. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 442-450.
Wang Z. Plant Physiology. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 442-450. (in Chinese)
- [7] 陈爱葵, 韩瑞宏, 李东洋, 凌连连, 罗惠霞, 唐上剑. 植物叶片相对电导率测定方法比较研究. 广东教育学院学报, 2010, 30(5): 88-91.
Chen A K, Han R H, Li D Y, Lin L L, Luo H X, Tang S J. A comparison of two methods for electrical conductivity about plant leaves. Journal of Guangdong Education Institute, 2010, 30(5): 88-91. (in Chinese)
- [8] 窦玉梅. 国内紫花苜蓿抗寒性机理研究进展. 黑龙江农业科学, 2011(7): 146-148.
Dou Y M. Advance of research on cold-resistance mechanism of alfalfa in China. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2011(7): 146-148. (in Chinese)
- [9] 冯昌军, 罗新义, 沙伟, 王凤国. 低温胁迫对苜蓿品种幼苗 SOD、POD 活性和脯氨酸含量的影响. 草业科学, 2005, 22(6): 29-32.
Feng C J, Luo X Y, Sha W, Wang F G. Effect of low temperature stress on SOD, POD activity and proline content of alfalfa. Pratacultural Science, 2005, 22(6): 29-32. (in Chinese)
- [10] 魏臻武, 王德贤, 贺连昌. 超氧化物歧化酶在苜蓿抗寒锻炼过程中的作用. 草业科学, 2006, 23(7): 15-18.
Wei Z W, Wang D X, He L C. Effect of superoxide dismutase on cold acclimation of alfalfa. Pratacultural Science, 2006, 23(7): 15-18. (in Chinese)
- [11] 陈世茹, 于林清, 易津, 乌日娜, 吉仁花, 刘曙娜. 低温胁迫对紫花苜蓿叶片叶绿素荧光特性的影响. 草地学报, 2011, 19(4): 596-600.
Chen S R, Yu L Q, Yi J, Wurina, Jirenhua, Liu S N. Influence of chlorophyll fluorescence characteristics on alfalfa seedlings under cryogenic stress. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(4): 596-600. (in Chinese)
- [12] 刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学. 北京: 中国农业出版社, 1994: 8-23.
Liu Z Q, Zhang S C. Plant Resistance Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 1994: 8-23. (in Chinese)
- [13] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Zou Q. Experiment Instruction of Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [14] 李松岗. 实用生物统计. 北京: 北京大学出版社, 2002: 134-139.
Li S G. Practical Biometrics. Beijing: Peking University Press, 2002: 134-139. (in Chinese)
- [15] 孟艳琼, 张令峰, 王雷宏, 傅松玲. 低温胁迫对 6 种彩叶藤本植物抗寒性生理指标的影响. 安徽农业大学学报, 2009(2): 172-177.
Meng Y J, Zhang L F, Wang L H, Fu S L. Effects of low temperature stress on the cold-resistance physiological indexes of six leaf-colored climbing shrub species. Journal of Anhui Agricultural University, 2009(2): 172-177. (in Chinese)
- [16] 德英, 赵来喜, 穆怀彬. 30 份老芒麦种质材料抗寒性研究. 草业科学, 2011, 28(1): 90-93.
Deying, Zhao L X, Mu H B. Winter hardiness of 30 germplasm materials of *Elymus sibiricus*. Pratacultural Science, 2011, 28(1): 90-93. (in Chinese)
- [17] 张尚雄, 尼玛平措, 徐雅梅, 苗彦军, 贝赛很那, 张卫红. 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. 草业科学, 2016, 33(6): 1154-1163.
Zhang S X, Nimapingcuo, Xu Y M, Miao Y J, Baosaihen, Zhang W H. Physiological responses to low temperature stress and cold tolerance evaluation in three *Elymus* species. Pratacultural Science, 2016, 33(6): 1154-1163. (in Chinese)

- [18] 周瑞莲,赵哈林.高寒山区草本植物的保护的系统及其在低温生长中的作用.西北植物学报,2002,22(3):566-573.
Zhou R L,Zhao H L.Protecting enzyme system of herbage and its functions in the cold growing process in alpine and cold re-
gion.Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2002,22(3):566-573.(in Chinese)
- [19] 柏晓玲,周青平,陈有军,田莉华,陈仕勇,肖雪君.燕麦幼苗对低温胁迫的响应.草业科学,2016,33(7):1375-1382.
Bai X L,Zhou Q P,Chen Y J,Tian L H,Chen S Y,Xiao X J.Responses of oat seedlings to chilling stress.Pratacultural Sci-
ence,2016,33(7):1375-1382.(in Chinese)
- [20] 韩发,岳向国,师生波,吴兵,李以康.青藏高原几种高寒植物的抗寒生理特性.西北植物学报,2005,25(12):2502-2509.
Han F,Yue X G,Shi S B,Wu B,Li Y K.Physiological characteristics in cold resistance of several alpine plants in Qinghai-Ti-
bet Plateau.Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2005,25(12):2502-2509.(in Chinese)
- [21] 张志,王世发,徐洪国,刘敏.低温胁迫对高羊茅生长影响的研究.草业科学,2009,26(5):185-188.
Zhang Z,Wang S F,Xu H G,Liu M.The effect of low temperature stress on tall fescue growth.Pratacultural Science,2009,
26(5):185-188.(in Chinese)
- [22] 吕优伟,贺佳圆,白小明,董沁,雷娅伟.9 个野生早熟禾对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价.草地学报,2014,22(2):
326-333.
Lyu Y W,He J Y,Bai X M,Dong Q,Lei Y W.Evaluation of physiological responses and resistances of nine wild poa to low
temperature.Acta Agrestia Sinica,2014,22(2):326-333.(in Chinese)
- [23] 李文明,魏一粟,钱燕萍,田如男.5 种酢浆草属植物对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价.东北林业大学学报,2017,45(7):
28-33.
Li W M,Wei Y S,Qian Y P,Tian R N.Evaluation of cold resistance and physiological response to low temperature on five
kinds of *Oxalis* plants.Journal of Northeast Forestry University,2017,45(7):28-33.(in Chinese)
- [24] 邓雪柯,乔代蓉,李良,于昕,张乃胜,雷高鹏,曹毅.低温胁迫对紫花苜蓿生理特性影响的研究.四川大学学报(自然科学版),
2005,42(1):190-194.
Deng X K,Qiao D R,Li L,Yu X,Zhang N S,Lei G P,Cao Y.The effect of chilling stress on physiological characters of *Medi-
cago sativa*.Journal of Sichuan University(Natural Science Edition),2005,42(1):190-194.(in Chinese)
- [25] 梁慧敏,夏阳,杜峰,张普金.低温胁迫对草地早熟禾抗性生理变化指标的影响.草地学报,2001,9(4):283-286.
Liang H M,Xia Y,Du F,Zhang P J.Effect of low temperature stress on physiological process of kentucky bluegrass.Acta Ag-
restia Sinica,2001,9(4):283-286.(in Chinese)
- [26] 高丽慧,易津,李菲,雷雪峰,马杰.三种禾本科牧草低温胁迫的生理响应.中国草地学报,2011,33(3):107-111.
Gao L H,Yi J,Li F,Lei X F,Ma J.The physiological response to low temperature stress of three gramineous pastures.Chinese
Journal of Grassland,2011,33(3):107-111.(in Chinese)
- [27] 萧洪东,王惠珍,喻敏.草坪抗逆增绿剂对细叶结缕草抗寒性的影响.草业科学,2013,30(9):1344-1348.
Xiao H D,Wang H Z,Yu M.Influence of turfass stress resistance and green enhancer on chilling resistance of *Zoysia tenuifo-
lia*.Pratacultural Science,2013,30(9):1344-1348.(in Chinese)
- [28] 周瑞莲,张普金.春季高寒草地牧草根中营养物质含量和保护酶活性的变化及其生态适性研究.生态学报,1996,16(4):
402-407.
Zhou R L,Zhang P J.The change in carbohydrate content and protecting enzyme activities in root of alpine forage related to its
adaptation to cold in spring.Acta Ecologica Sinica,1996,16(4):402-407.(in Chinese)
- [29] Aitken S N,Hannerz M.Genecology and gene resource management strategies for conifer cold hardiness.//Bigras F J,Colum-
bo S J.(eds).Conifer Cold Hardiness.Dordrecht:Kluwer Academic Publishers,2001:23-53.
- [30] 杨盛昌,林鹏.潮滩红树植物抗低温适应的生态学研究.植物生态学报,1998,22(1):60-67.
Yang S C,Lin P.Ecological studies on the resistance and adaptation to cold of some tidal mangrove species in China.Acta Phy-
toecologica Sinica,1998,22(1):60-67.(in Chinese)
- [31] 徐燕,薛立,屈明.植物抗寒性的生理生态学机制研究进展.林业科学,2007,43(4):88-93.
Xu Y,Xue L,Qu M.Physiological and ecological mechanisms of plant adaptation to low temperature.Scientia Silvae Sinicae,
2007,43(4):88-93.(in Chinese)

(责任编辑 张瑾)