

不同福禄考品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性综合评价

曲彦婷^{1,2}, 熊燕², 韩辉², 李洋³, 左豫虎^{1,*}

¹黑龙江八一农垦大学, 黑龙江大庆163000; ²黑龙江省科学院自然与生态研究所, 哈尔滨150036; ³东北农业大学, 哈尔滨150030

摘要: 通过对14个福禄考品种在低温胁迫下相关生理指标进行分析, 结果表明: 可溶性糖含量随处理温度降低呈“升降升降”的变化趋势; 可溶性蛋白含量随处理温度降低呈“降升降降”的变化趋势; 不同品种脯氨酸、叶绿素、丙二醛含量和超氧化物歧化酶活性变化趋势不同, 差异达到显著水平。运用主成分分析法和聚类分析法对14个福禄考品种进行抗寒性排序, 将其分为3个抗寒等级: 强抗寒品种为‘Sub-05’、‘Sub-Ja-03’和‘Sub-Ja-04’; 中抗寒品种为‘Sub-Ja-01’、‘Sub-Ja-02’、‘Sub-06’、‘Sub-07’、‘Pan-02’和‘Pan-Ru-07’; 弱抗寒品种为‘Pan-01’、‘Pan-Ru-06’、‘Pan-05’、‘Pan-04’和‘Pan-03’。丛生福禄考品种抗寒性优于锥花品种, 与露地越冬观察的结果基本一致。

关键词: 福禄考; 低温胁迫; 生理响应; 抗寒综合评价

福禄考属(*Phlox* Linn.)为花荵科(Polemoniaceae)中最大的一属, 是进化生物学的模式属之一(李红伟等2005)。福禄考属植物以其花色丰富艳丽、覆盖度高、花期长等特点, 在园林绿化造景中应用广泛。北方城市冬季漫长寒冷, 温度成为制约福禄考属植物在北方园林应用的重要因素, 因此对于福禄考属抗寒性的研究显得尤其重要。近些年对于福禄考属植物的研究主要集中在组织培养(张伟2008)和栽培管理(唐焕伟等2014; 陈银芬等1999)等方面, 为了探索其在北方园林应用的适应性, 尤其是抗寒性, 本文主要以锥花福禄考和丛生福禄考2个系列的14个品种作为研究对象, 对其进行低温处理, 研究渗透物质含量及超氧化物歧化酶活性等的变化规律, 综合分析评价各品种的抗寒性, 以期为福禄考属植物抗寒性鉴定、耐寒品种培育及抗寒基因克隆提供理论参考。

材料与方法

1 供试材料

供试材料为2010~2014年从国内外引进的14个福禄考品种, 其中锥花福禄考(*Phlox paniculata* L.) 7个品种分别为来自中国的‘Pan-01’、‘Pan-02’、‘Pan-03’、‘Pan-04’和‘Pan-05’以及俄罗斯的‘Pan-Ru-06’和‘Pan-Ru-07’, 丛生福禄考(*Phlox subulata* L.) 7个品种分别为来自中国的‘Sub-05’、‘Sub-06’和‘Sub-07’以及日本的‘Sub-Ja-01’、‘Sub-Ja-02’、‘Sub-Ja-03’和‘Sub-Ja-04’。

2 试验方法

2.1 露地越冬情况调查

2.1.1 外部形态冻害观测

从2013年10月至2014年4月, 哈尔滨冬季平均气

温-25°C, 最低温度-40°C。配合气温变化不加任何覆盖在试验地对供试14个品种进行观察与记录。

2.1.2 越冬存活情况调查

2014年春天, 调查统计各品种发芽株数, 计算存活率, 存活率为芽株株数与总植入株数的比值。

2.2 人工低温处理

2014年7月22日, 在试验地选取二年生无病害且长势健康的植株地上部分, 齐地面剪下后立即放入自封袋中带回实验室, 用蒸馏水洗净, 并用吸水纸吸干表面水分, 用纱布包好, 分别置于20 (室温, 对照)、10、0、-10和-20°C(后面4个温度梯度作为低温胁迫温度)恒温箱和冷冻冰柜内(无光照)。处理24 h后, 取出剪下叶片适量, 用锡纸包好后立即放入液氮中预冷, 然后置-80°C冰箱保存备用(用于抗寒指标测定)。试验重复3次。

2.3 各指标测定方法

取福禄考低温处理叶片0.4 g, 采用蒽酮比色法测得可溶性糖含量(%); 取低温处理叶片1 g, 采用考马斯亮蓝法测得可溶性蛋白含量(mg·g⁻¹); 取低温处理叶片0.5 g, 采用酸性茚三酮比色法测得脯氨酸(Pro)含量(%); 取低温处理叶片0.1 g, 采用丙酮-乙醇混合液法测得叶绿素总量(mg·g⁻¹); 取低温处理叶片0.5 g, 采用硫代巴比妥酸反应法测得丙二醛(MDA)含量[μmol·g⁻¹ (FW)]; 取低温处理叶片0.5 g, 采用氮蓝四唑光化还原法得到超氧化物歧化酶(SOD)活性(U·g⁻¹) (李合生2000)。

收稿 2015-12-04 修定 2016-02-02

资助 黑龙江省科技厅对外合作重点项目(WB10B110)和黑龙江省院所基本应用技术研究专项(STJB2015-06)。

* 通讯作者(E-mail: zuoyuhu@163.com)。

2.4 数据处理及分析方法

以室温下的福禄考植株测定值为对照值,选择 -10°C 低温处理后测定值为处理值,计算变化率(α), $\alpha=(\text{处理值}-\text{对照值})/\text{对照值}$,然后对 α 进行主成分分析。主成分分析和聚类分析均应用SPSS 19.0软件完成(唐婉2012;杨凤翔等2010)。

实验结果

1 自然条件下越冬情况

2013~2014年,已引进的14个福禄考属植物品种自然越冬生长情况见表1。14个品种的存活率都高于60%,均可在哈尔滨自然越冬,丛生福禄考品种的抗寒性优于锥花品种。

表1 福禄考各品种哈尔滨自然越冬情况调查

Table 1 Investigation on natural overwintering conditions of *Phlox* varieties in Harbin

品种	2013年9月	2013年10月	2013年11日	2014年4月存活率/%
(1) 'Pan-01'	正常生长	下部叶片脱落	茎秆干枯	90
(2) 'Pan-02'	正常生长	下部叶片脱落	茎秆干枯	100
(3) 'Pan-03'	正常生长	少数叶干枯	茎秆干枯	90
(4) 'Pan-04'	正常生长	少数叶干枯	茎秆干枯	90
(5) 'Pan-05'	正常生长	下部叶片脱落	茎秆干枯	80
(6) 'Pan-Ru-06'	正常生长	下部叶片脱落	茎秆干枯	90
(7) 'Pan-Ru-07'	正常生长	下部叶片脱落	茎秆干枯	90
(8) 'Sub-Ja-01'	正常生长	叶片变红褐色	茎秆干枯,叶红褐	100
(9) 'Sub-Ja-02'	正常生长	正常生长	茎秆干枯,叶褐	90
(10) 'Sub-Ja-03'	正常生长	正常生长	茎秆干枯,叶红	100
(11) 'Sub-Ja-04'	正常生长	正常,叶绿色	茎秆干枯,叶暗红	100
(12) 'Sub-05'	正常生长	叶片变红褐色	茎秆干枯,叶红褐	100
(13) 'Sub-06'	正常生长	叶片变红褐色	茎秆干枯,叶红褐	90
(14) 'Sub-07'	正常生长	叶片绿色	茎秆干枯,叶红褐	100

2 低温胁迫对不同福禄考品种可溶性糖含量的影响

经过低温处理的14个福禄考品种叶片可溶性糖含量的变化情况见表2。从整体来看,各品种可溶性糖含量随温度变化出现升—降—升—降的波状变化, -20°C 时为最低值,在 10 或 -10°C 处理时达到最高值。推测植物材料 -20°C 下组织结构已经被破坏,导致植物体内保护性物质含量下降。大多数福禄考品种在从 20°C 降至 0°C 时可溶性糖含量变化差异不显著。当胁迫温度降至 -10°C 时,除了'Pan-01'、'Pan-02'和'Pan-04' 3个品种可溶性糖含量差异不显著,其他品种可溶性糖含量升高,差异达显著水平。与对照比较,'Sub-06'升高24.9%, 'Sub-07'升高20.7%, 'Sub-05'升高17.2%,是低温胁迫下可溶性糖含量升高较多的品种。根据前人研究结论植物体内糖积累量与植物的抗寒性呈正相关(简令成等2005;李轶冰等2009)。从可溶性糖含量判定这几个品种的抗寒性强于其他品种。

考虑到 -20°C 低温对离体植物材料组织结构的破坏性较大,此时的理化指标不能很准确地描

述植物的抗寒性,所以低温胁迫下各指标分析中选择在 -10°C 时各指标值进行方差分析。

低温胁迫下(-10°C)各福禄考品种可溶性糖含量采用LSD方差分析(表2),其中6号以及8~14号各品种可溶性糖含量差异不显著,但与其后其他品种可溶性糖含量差异达极显著水平。

3 低温胁迫对不同品种福禄考可溶性蛋白含量的影响

由表3可以看出,整体上,以 20°C 为对照,随温度的降低,14种福禄考叶片可溶性蛋白含量变化为降—升—降—降的趋势, -10°C 降至 -20°C 时变化不明显;而'Pan-Ru-07'、'Sub-Ja-03'和'Sub-06' 3个品种在低于 10°C 的低温胁迫下,随着温度增加可溶性蛋白含量逐渐上升,不同品种在不同低温下变化幅度不同, 0°C 至 -10°C 之间变化比较平缓。丛生福禄考'Sub-05'在低温下变化不明显,其可溶性蛋白含量较高,经方差分析可以看出,大部分品种在不同温度胁迫下,其可溶性蛋白含量差异达显著水平。

表2 福禄考品种在不同低温胁迫下可溶性糖含量的变化及品种间差异性分析

Table 2 Changes in soluble sugar content of different *Phlox* varieties under low temperature and difference analysis of these varieties

品种	可溶性糖含量/%					-10°C各品种间
	20°C (对照)	10°C	0°C	-10°C	-20°C	差异显著性
(1) 'Pan-01'	0.298±0.001 ^b	0.297±0.009 ^b	0.240±0.004 ^a	0.286±0.010 ^b	0.245±0.030 ^a	dD
(2) 'Pan-02'	0.281±0.005 ^{ab}	0.296±0.014 ^b	0.268±0.021 ^a	0.299±0.013 ^b	0.266±0.012 ^a	dD
(3) 'Pan-03'	0.262±0.007 ^b	0.285±0.006 ^c	0.240±0.006 ^b	0.293±0.006 ^c	0.202±0.006 ^a	dD
(4) 'Pan-04'	0.304±0.014 ^b	0.322±0.017 ^b	0.299±0.004 ^{ab}	0.342±0.028 ^b	0.256±0.043 ^a	cBC
(5) 'Pan-05'	0.317±0.006 ^b	0.314±0.004 ^b	0.280±0.008 ^a	0.353±0.009 ^c	0.285±0.013 ^a	abAB
(6) 'Pan-Ru-06'	0.332±0.013 ^b	0.349±0.008 ^b	0.298±0.002 ^a	0.378±0.009 ^c	0.295±0.016 ^a	abAB
(7) 'Pan-Ru-07'	0.254±0.024 ^{ab}	0.260±0.013 ^{ab}	0.241±0.008 ^a	0.303±0.016 ^c	0.270±0.014 ^b	bcAB
(8) 'Sub-Ja-01'	0.323±0.007 ^a	0.317±0.006 ^a	0.290±0.013 ^a	0.368±0.044 ^b	0.320±0.050 ^a	abcAB
(9) 'Sub-Ja-02'	0.328±0.015 ^{ab}	0.369±0.025 ^c	0.332±0.013 ^b	0.374±0.025 ^c	0.294±0.016 ^a	abAB
(10) 'Sub-Ja-03'	0.333±0.027 ^a	0.371±0.016 ^b	0.330±0.007 ^a	0.377±0.010 ^b	0.310±0.011 ^a	abAB
(11) 'Sub-Ja-04'	0.326±0.027 ^a	0.344±0.013 ^a	0.334±0.034 ^a	0.382±0.017 ^b	0.332±0.014 ^a	abAB
(12) 'Sub-05'	0.332±0.006 ^a	0.396±0.002 ^b	0.385±0.004 ^b	0.389±0.006 ^b	0.327±0.025 ^a	aA
(13) 'Sub-06'	0.305±0.007 ^a	0.345±0.029 ^b	0.321±0.016 ^{ab}	0.381±0.008 ^c	0.298±0.019 ^a	abAB
(14) 'Sub-07'	0.314±0.014 ^a	0.332±0.010 ^a	0.305±0.007 ^a	0.379±0.022 ^b	0.309±0.016 ^a	dCD

表中数据表示为平均值±标准差, 同一品种不同温度下(同一行内第2~6列)数据用不同小写字母标识表示差异显著($P<0.05$); -10°C下(第7列)不同品种数据用不同小写和大写字母标识分别表示差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$); 表3~7同。

表3 福禄考品种在不同低温胁迫下可溶性蛋白含量的变化及品种间差异性分析

Table 3 Changes in protein content of different *Phlox* varieties under low temperature and difference analysis of these varieties

品种	可溶性蛋白含量/mg·g ⁻¹					-10°C各品种间
	20°C	10°C	0°C	-10°C	-20°C	差异显著性
(1) 'Pan-01'	0.623±0.127 ^c	0.565±0.016 ^a	0.603±0.010 ^{bc}	0.561±0.012 ^a	0.584±0.015 ^{ab}	iI
(2) 'Pan-02'	0.732±0.035 ^d	0.522±0.122 ^a	0.702±0.007 ^{cd}	0.670±0.010 ^{bc}	0.650±0.012 ^b	gG
(3) 'Pan-03'	0.772±0.013 ^c	0.656±0.011 ^a	0.779±0.013 ^c	0.680±0.010 ^b	0.683±0.011 ^a	gG
(4) 'Pan-04'	0.786±0.015 ^c	0.638±0.013 ^a	0.757±0.013 ^b	0.617±0.012 ^a	0.749±0.012 ^b	hH
(5) 'Pan-05'	0.659±0.004 ^b	0.601±0.007 ^a	0.628±0.006 ^{ab}	0.614±0.012 ^{ab}	0.710±0.055 ^c	hH
(6) 'Pan-Ru-06'	1.089±0.014 ^d	0.894±0.018 ^a	0.975±0.014 ^c	0.947±0.012 ^b	0.891±0.009 ^a	fF
(7) 'Pan-Ru-07'	1.146±0.021 ^{cd}	1.182±0.010 ^d	1.109±0.010 ^c	1.034±0.012 ^b	0.931±0.041 ^a	eE
(8) 'Sub-Ja-01'	1.356±0.113 ^d	0.904±0.009 ^a	1.038±0.010 ^{bc}	0.959±0.026 ^{ab}	1.081±0.044 ^c	fF
(9) 'Sub-Ja-02'	1.483±0.046 ^d	1.083±0.021 ^b	1.102±0.021 ^b	1.152±0.004 ^c	0.982±0.010 ^a	cC
(10) 'Sub-Ja-03'	1.233±0.011 ^c	1.421±0.015 ^d	0.990±0.042 ^a	1.120±0.026 ^b	0.956±0.013 ^a	dD
(11) 'Sub-Ja-04'	1.106±0.002 ^a	1.170±0.006 ^b	1.366±0.022 ^d	1.322±0.010 ^d	1.234±0.067 ^c	aA
(12) 'Sub-05'	1.044±0.014 ^a	1.002±0.005 ^b	1.247±0.065 ^c	1.273±0.044 ^b	1.277±0.059 ^d	bB
(13) 'Sub-06'	1.109±0.010 ^c	1.379±0.080 ^d	1.068±0.013 ^{bc}	1.010±0.002 ^b	0.923±0.012 ^a	eE
(14) 'Sub-07'	1.184±0.016 ^a	1.120±0.096 ^a	1.143±0.020 ^a	1.176±0.032 ^a	1.187±0.038 ^a	cdCD

对低温胁迫下(-10°C)不同福禄考品种可溶性蛋白含量进行LSD方差分析(表3), 品种可溶性蛋白含量差异达显著水平, 大部分品种间差异性达极显著水平。根据前人研究经验植物低温胁迫下可溶性蛋白含量高的品种抗性强的结论(林善枝等2002), 得出1~9、11、12和14号品种的抗寒性较强。

4 低温胁迫对不同品种福禄考Pro含量的的影响

由表4可以看出, 不同品种叶片在20°C时Pro含量较高, 10°C时1~7号7个锥花福禄考品种及'Sub-Ja-02'、'Sub-Ja-03'和'Sub-Ja-04' 3个针叶品种Pro含量略有升高, 但大部分品种升高值不显著; 其他4个针叶品种Pro含量降低, 且差异显著。当温度由10°C降至0°C时, 整体上看大部分品种Pro含

表4 福禄考品种在不同低温胁迫下Pro的变化及品种间差异性分析

Table 4 Changes in Pro content of different *Phlox* varieties under low temperature and difference analysis of these varieties

品种	Pro含量/%					-10°C各品种间 差异显著性
	20°C	10°C	0°C	-10°C	-20°C	
(1) 'Pan-01'	0.079±0.001 ^a	0.118±0.002 ^c	0.109±0.002 ^d	0.106±0.003 ^c	0.091±0.002 ^b	deD
(2) 'Pan-02'	0.090±0.005 ^a	0.105±0.003 ^b	0.104±0.003 ^b	0.114±0.004 ^c	0.096±0.001 ^a	deD
(3) 'Pan-03'	0.089±0.040 ^b	0.126±0.003 ^{ab}	0.133±0.002 ^{ab}	0.126±0.011 ^{ab}	0.106±0.002 ^a	dD
(4) 'Pan-04'	0.092±0.013 ^c	0.121±0.002 ^{bc}	0.162±0.008 ^d	0.112±0.003 ^a	0.122±0.003 ^{ab}	deD
(5) 'Pan-05'	0.087±0.003 ^b	0.089±0.004 ^b	0.082±0.008 ^{ab}	0.076±0.001 ^a	0.109±0.003 ^c	fEF
(6) 'Pan-Ru-06'	0.083±0.004 ^a	0.121±0.002 ^c	0.128±0.004 ^d	0.102±0.002 ^b	0.100±0.002 ^b	eDE
(7) 'Pan-Ru-07'	0.090±0.004 ^b	0.119±0.022 ^b	0.125±0.002 ^c	0.113±0.002 ^d	0.097±0.002 ^a	deD
(8) 'Sub-Ja-01'	0.072±0.013 ^b	0.062±0.002 ^{ab}	0.066±0.001 ^{ab}	0.063±0.001 ^a	0.058±0.001 ^a	fF
(9) 'Sub-Ja-02'	0.081±0.003 ^c	0.100±0.002 ^d	0.102±0.001 ^d	0.066±0.002 ^b	0.057±0.001 ^a	fF
(10) 'Sub-Ja-03'	0.052±0.003 ^a	0.106±0.001 ^a	0.131±0.011 ^b	0.190±0.032 ^c	0.080±0.005 ^a	bB
(11) 'Sub-Ja-04'	0.061±0.002 ^{ab}	0.088±0.002 ^{bc}	0.097±0.002 ^c	0.144±0.028 ^d	0.073±0.001 ^b	cC
(12) 'Sub-05'	0.110±0.010 ^a	0.121±0.001 ^b	0.132±0.006 ^c	0.183±0.014 ^d	0.106±0.003 ^a	aA
(13) 'Sub-06'	0.074±0.002 ^c	0.066±0.001 ^a	0.097±0.001 ^d	0.070±0.002 ^b	0.068±0.001 ^{ab}	deD
(14) 'Sub-07'	0.089±0.002 ^d	0.067±0.004 ^c	0.093±0.004 ^d	0.060±0.004 ^b	0.052±0.004 ^a	fF

量均有提升,但提升幅度不尽相同,只有'Pan-01'、'Pan-02'和'Pan-05' 3个品种平缓下降;'Sub-06'和'Sub-07' 2个品种的Pro含量增加幅度最大,分别为47.0%和38.8%。在0°C至-10°C处理的过程中,'Sub-Ja-03'、'Sub-Ja-04'和'Sub-05' 3个品种的Pro含量继续增加,变化幅度明显高于其他品种,分别上升45.0%、48.5%和38.6%。当胁迫温度降至-20°C时,所有品种Pro含量都有不同程度的下降。可见,福禄考Pro含量可以作为抗寒性的指标之一,方差分析表明,同一品种不同温度处理后,

其Pro含量变化差异显著。

对低温胁迫下(-10°C)不同福禄考品种Pro含量进行LSD方差分析(表4), 10~12号品种Pro含量差异达极显著水平, 2、8、9、13和14号品种Pro含量差异不显著,说明这几个品种抗寒性较接近,其他品种Pro含量差异达极显著水平,说明各品种的抗寒性有差异, 10~12号品种抗寒性相对较强。

5 低温胁迫对不同品种叶绿素含量变化的影响

由表5可以看出,温度处理由20°C降至10°C时,不同品种叶绿素含量变化不同,有的增加,有

表5 福禄考品种在不同低温胁迫下叶绿素的变化及品种间差异性分析

Table 5 Changes in chlorophyll content of different *Phlox* varieties under low temperature and difference analysis of these varieties

品种	叶绿素含量/mg·g ⁻¹					-10°C各品种间 差异显著性
	20°C	10°C	0°C	-10°C	-20°C	
(1) 'Pan-01'	0.485±0.020 ^c	0.786±0.023 ^e	0.590±0.026 ^d	0.417±0.033 ^b	0.352±0.019 ^a	fDE
(2) 'Pan-02'	0.585±0.052 ^c	0.901±0.017 ^d	0.583±0.033 ^c	0.522±0.011 ^b	0.422±0.018 ^a	bB
(3) 'Pan-03'	0.481±0.008 ^c	0.576±0.019 ^e	0.516±0.002 ^d	0.368±0.010 ^b	0.238±0.027 ^a	gFG
(4) 'Pan-04'	0.962±0.127 ^d	0.423±0.014 ^b	0.593±0.011 ^c	0.417±0.012 ^b	0.368±0.018 ^a	efDE
(5) 'Pan-05'	0.640±0.028 ^d	0.538±0.021 ^c	0.423±0.011 ^b	0.405±0.011 ^b	0.315±0.019 ^a	fEF
(6) 'Pan-Ru-06'	0.662±0.007 ^d	0.711±0.010 ^e	0.623±0.010 ^c	0.456±0.024 ^b	0.350±0.018 ^a	dCD
(7) 'Pan-Ru-07'	0.666±0.032 ^d	0.637±0.042 ^e	0.591±0.016 ^c	0.432±0.026 ^b	0.327±0.018 ^a	defDE
(8) 'Sub-Ja-01'	0.394±0.014 ^b	0.649±0.007 ^e	0.485±0.010 ^d	0.438±0.018 ^c	0.225±0.018 ^a	deDE
(9) 'Sub-Ja-02'	0.472±0.020 ^d	0.354±0.012 ^c	0.321±0.010 ^b	0.308±0.003 ^b	0.265±0.014 ^a	hH
(10) 'Sub-Ja-03'	0.410±0.016 ^b	0.481±0.010 ^e	0.514±0.013 ^c	0.365±0.027 ^b	0.240±0.044 ^a	gG
(11) 'Sub-Ja-04'	0.615±0.021 ^d	0.483±0.011 ^b	0.479±0.018 ^b	0.584±0.007 ^c	0.441±0.007 ^a	aA
(12) 'Sub-05'	0.497±0.032 ^b	0.564±0.018 ^e	0.530±0.007 ^{bc}	0.489±0.004 ^b	0.335±0.031 ^a	cBC
(13) 'Sub-06'	0.352±0.025 ^a	0.554±0.025 ^e	0.469±0.016 ^b	0.372±0.008 ^a	0.337±0.012 ^a	gFG
(14) 'Sub-07'	0.342±0.021 ^b	0.481±0.005 ^e	0.452±0.016 ^d	0.416±0.016 ^c	0.313±0.014 ^a	efE

的降低; 随着胁迫温度的下降, 叶绿素含量均呈下降趋势, 且下幅度有所不同。从数据上看, 锥花福禄考品种叶绿素含量下降幅度大于丛生福禄考品种, 说明2个系列品种的抗寒能力存在差异, 叶绿素含量可作为植物抗寒性评价指示之一。在 -20°C 时, 各品种叶绿素含量明显降低, 与 20°C 对照时相比‘Pan-04’品种降幅最高, 达61.7%, 说明低温已经对植物叶片产生了破坏作用。方差分析表明, 各品种在不同低温胁迫下, 叶绿素含量变化差异达显著水平。

对低温胁迫下(-10°C)不同福禄考品种叶绿素含量进行LSD方差分析(表5), 10~13号品种叶绿素含量差异显著, 2、7~9和14号品种叶绿素含量差异不显著, 说明这几个品种抗寒性相似。

6 低温胁迫对不同福禄考品种MDA含量的影响

在逆境条件下, 植物常会发生膜质过氧化作用, MDA是膜脂过氧化主要产物之一, 对生物膜有毒害作用, 且对某些生物大分子也有破坏作用。低温胁迫下, 各品种MDA含量变化见表6。由 20°C 降至 0°C 时, 品种‘Pan-05’、‘Pan-Ru-06’、‘Sub-

表6 福禄考品种在不同低温胁迫下MDA的变化及品种间差异性分析

Table 6 Changes in MDA content of different *Phlox* varieties under low temperature and difference analysis of these varieties

品种	MDA含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$					- 10°C 各品种间 差异显著性
	20°C	10°C	0°C	-10°C	-20°C	
(1) ‘Pan-01’	3.771±0.016 ^d	2.434±0.040 ^c	1.596±0.813 ^a	2.696±0.012 ^b	1.455±0.042 ^a	bB
(2) ‘Pan-02’	2.850±0.073 ^c	1.602±0.038 ^a	2.336±0.056 ^b	2.877±0.052 ^c	2.157±0.017 ^d	aA
(3) ‘Pan-03’	2.623±0.041 ^c	3.165±0.029 ^d	2.180±0.015 ^b	2.190±0.055 ^b	1.508±0.040 ^a	dD
(4) ‘Pan-04’	2.471±0.023 ^c	2.653±0.040 ^d	2.122±0.030 ^b	2.464±0.014 ^c	1.768±0.030 ^a	cC
(5) ‘Pan-05’	1.148±0.017 ^a	1.274±0.017 ^b	1.644±0.030 ^d	1.334±0.021 ^c	1.120±0.022 ^a	eEF
(6) ‘Pan-Ru-06’	1.258±0.022 ^b	1.102±0.024 ^a	1.382±0.045 ^c	1.320±0.004 ^{bc}	1.086±0.074 ^a	eEF
(7) ‘Pan-Ru-07’	2.013±0.014 ^{bc}	1.630±0.464 ^b	1.865±0.029 ^{bc}	2.141±0.091 ^c	1.079±0.041 ^a	dD
(8) ‘Sub-Ja-01’	1.152±0.063 ^b	1.397±0.014 ^d	1.264±0.045 ^c	1.074±0.032 ^a	1.010±0.028 ^a	hGH
(9) ‘Sub-Ja-02’	0.998±0.016 ^b	1.090±0.013 ^d	0.973±0.003 ^a	1.209±0.019 ^c	1.024±0.010 ^c	iHI
(10) ‘Sub-Ja-03’	1.164±0.048 ^d	0.933±0.002 ^c	0.819±0.003 ^b	1.179±0.009 ^d	0.705±0.007 ^a	fgG
(11) ‘Sub-Ja-04’	1.439±0.012 ^d	1.549±0.023 ^c	0.577±0.025 ^a	1.081±0.023 ^b	1.293±0.014 ^c	ghGH
(12) ‘Sub-05’	0.855±0.023 ^b	0.828±0.012 ^b	0.772±0.007 ^a	0.959±0.037 ^c	0.734±0.028 ^a	fFG
(13) ‘Sub-06’	0.881±0.004 ^b	0.781±0.005 ^a	1.003±0.037 ^c	1.383±0.022 ^d	0.913±0.031 ^b	eE
(14) ‘Sub-07’	1.252±0.012 ^c	0.831±0.058 ^b	0.590±0.021 ^a	0.873±0.018 ^b	0.604±0.033 ^a	liI

Ja-01’和‘Sub-06’叶片内MDA含量有不同程度的增加, 其中‘Pan-05’品种MDA含量增加42.55%, 为最大增幅; 其他品种都表现出降低趋势, 其中‘Sub-07’下降52.88%, ‘Sub-Ja-04’下降59.9%, 是MDA含量降幅较大的品种, 说明其在此阶段表现出较强的抗性。当胁迫温度降至 -10°C 时, MDA含量呈逐渐递增趋势, 当温度降至 -20°C 时MDA含量回落。因此, MDA含量的高低可以反映膜脂过氧化的水平及植物细胞遭受逆境伤害程度。经过差异性分析可以看出, 大部分品种不同低温胁迫下MDA含量变化差异达显著水平。

对低温胁迫下(-10°C)不同福禄考品种MDA含量进行LSD方差分析(表6), 8、9、11和12号品种MDA含量差异显著, 9和14号品种MDA含量差

异不显著, 说明这2个品种抗寒性相似; 6、10和13号品种MDA含量差异不显著, 说明抗寒性相似, 但与前5个品种MDA含量差异达极显著水平。按照前期多数人的研究结果(刘祖祺和张石诚1994), 低温下MDA含量高的品种抗寒性弱的说法, 1、3、4和6号品种抗寒性相对较强。

7 低温胁迫对各品种SOD活性的影响

低温胁迫下不同福禄考品种叶片内SOD活性变化情况见表7。 20°C 时14个品种的SOD活性有很大的差异, ‘Sub-06’ SOD值最高, ‘Pan-02’ SOD值最低, 最高值比最低值高出63.6%。5个低温处理下, SOD活性的变化趋势基本一致, 20°C 至 0°C 是先降低再升高的过程, 0°C 以下的低温处理过程中, 14个品种的SOD值都是随着温度一同降低, 但各

表7 福禄考品种在不同低温胁迫下SOD活性的变化及品种间差异性分析

Table 7 Changes in SOD activity of different *Phlox* varieties under low temperature and difference analysis of these varieties

品种	SOD活性/U·g ⁻¹					-10℃各品种间 差异显著性
	20℃	10℃	0℃	-10℃	-20℃	
(1) 'Pan-01'	2.488±0.099 ^d	1.931±0.131 ^a	2.377±0.237 ^d	1.447±0.232 ^a	1.039±0.035 ^a	fEF
(2) 'Pan-02'	2.283±0.038 ^c	2.104±0.070 ^b	2.702±0.117 ^d	1.757±0.107 ^b	1.056±0.023 ^a	bcdBCD
(3) 'Pan-03'	2.484±0.072 ^c	2.481±0.054 ^c	2.943±0.039 ^d	1.693±0.042 ^b	0.964±0.056 ^a	bcdeBCDE
(4) 'Pan-04'	2.665±0.102 ^e	1.791±0.288 ^c	2.108±0.035 ^d	1.506±0.135 ^b	0.974±0.012 ^a	efDE
(5) 'Pan-05'	2.632±0.073 ^e	1.986±0.081 ^c	2.273±0.077 ^d	1.570±0.511 ^b	1.012±0.014 ^a	defCDE
(6) 'Pan-Ru-06'	3.301±0.066 ^c	2.611±0.345 ^{bc}	2.940±0.765 ^b	1.606±0.191 ^a	0.981±0.059 ^a	cdefBCDE
(7) 'Pan-Ru-07'	3.397±0.159 ^e	2.924±0.095 ^c	3.211±0.103 ^d	1.858±0.040 ^b	1.182±0.061 ^a	bB
(8) 'Sub-Ja-01'	3.366±0.144 ^d	1.856±0.129 ^b	2.390±0.255 ^c	1.811±0.011 ^b	1.135±0.019 ^a	bcBC
(9) 'Sub-Ja-02'	3.666±0.059 ^c	1.213±0.158 ^a	2.325±0.215 ^d	2.267±0.208 ^b	1.458±0.122 ^a	aA
(10) 'Sub-Ja-03'	3.507±0.178 ^c	2.591±0.204 ^b	2.566±0.271 ^b	1.199±0.087 ^a	1.176±0.037 ^a	gF
(11) 'Sub-Ja-04'	2.750±0.051 ^d	1.834±0.213 ^c	1.735±0.036 ^{bc}	1.559±0.133 ^{ab}	1.414±0.013 ^a	defCDE
(12) 'Sub-05'	3.533±0.022 ^e	2.469±0.117 ^c	2.661±0.054 ^d	2.142±0.024 ^b	1.413±0.162 ^a	aA
(13) 'Sub-06'	3.734±0.050 ^e	1.678±0.043 ^c	1.813±0.498 ^d	1.506±0.102 ^b	0.979±0.061 ^a	efDE
(14) 'Sub-07'	2.618±0.123 ^e	1.865±0.106 ^c	2.154±0.028 ^d	1.623±0.074 ^b	0.995±0.068 ^a	cdefBCDE

自的下降幅度有所不同。10℃时, 'Pan-03'和'Sub-Ja-03'的SOD值下降幅度相对较小, 随着胁迫温度降低, 各品种SOD值逐渐提高, 0℃时出现峰值, 之后表现出逐渐下降的趋势, 可见, SOD活性可作为评价植物抗寒性的重要指标。方差分析表明, 在不同低温胁迫下, 'Pan-01'、'Pan-Ru-06'、'Sub-Ja-03'和'Sub-Ja-04' 4个品种在-10℃至-20℃区间SOD值变化差异不显著, 其他所有品种SOD值变化差异显著。

低温胁迫下(-10℃)各福禄考品种SOD活性采用LSD方差分析(表7), 可以看出, 9和12号品种SOD值高, 且差异不显著, 说明这2个品种抗寒性相似, 但与其他品种SOD值差异达极显著水平。8、10、11和13号品种SOD值差异不显著, 说明这4个品种抗寒性相似。9和12号品种抗寒性相对较强, 这与引种越冬栽培试验及表型研究过程中得到的结论相同。

8 14个福禄考品种抗寒综合性评价

为了研究影响14个福禄考品种抗寒性的主导因素, 采用主成分分析方法综合分析抗寒指标, 以特征值大于1作为参考值, 确定主成分个数。选取SOD活性以及MDA、游离Pro、叶绿素、可溶性蛋白和可溶性糖含量这6个生理指标进行主成分分析, 并对14个福禄考品种的抗寒能力进行综合评价。

由特征值(λ)与初始因子载荷(B_i)依据公式 $A_i = B_i \sqrt{\lambda}$ 转换为主成分系数(A_i), A_i 与标准化后的原始数据可得到各主成分得分和综合评价得分(唐婉2012)。根据综合评价得分大小对14个品种抗寒性排序, 如表8所示。

9 福禄考品种抗寒性聚类分析

按杨凤翔等(2010)的方法通过聚类分析, 将福禄考品种按抗寒性强弱分为3类(图1), 从表7可以得到: 'Sub-05'、'Sub-Ja-03'和'Sub-Ja-04'属于强抗寒品种; 'Sub-Ja-01'、'Sub-Ja-02'、'Sub-06'、'Sub-07'、'Pan-02'和'Pan-Ru-07'属于中抗寒品种; 'Pan-01'、'Pan-Ru-06'、'Pan-05'、'Pan-04'和'Pan-03'属于弱抗寒品种。丛生福禄考品种的抗寒性优于锥花品种, 这与露地种植观察的结果基本一致。

讨 论

1 低温胁迫对抗寒生理指标的影响

糖是植物抗寒的主要保护物质, 当植物受到冷胁迫时糖含量会增加以防止植株受到伤害。本研究中福禄考品种受低温胁迫, 可溶性糖总体趋势呈升一降一升一降的波状变化。低温胁迫下西番莲(*Passiflora edulis*)随着温度的持续降低, 可溶性糖含量升高(董万鹏等2015), 在草坪草的抗寒性研究中也得到相同的结果(杜永吉等2008)。本研

表8 各福禄考品种抗寒性排序及分类

Table 8 Cold resistance scheduling and classification in *Phlox* varieties

品种	第1主成分	第2主成分	第3主成分	综合得分	排序	抗寒性分类
'Sub-05'	1.48	2.21	1.21	1.68	1	强抗
'Sub-Ja-03'	1.69	1.45	-0.14	1.29	2	强抗
'Sub-Ja-04'	1.33	1.32	0.87	1.25	3	强抗
'Sub-Ja-01'	0.13	0.86	1.05	0.54	4	中抗
'Sub-Ja-02'	0.13	0.68	0.39	0.36	5	中抗
'Sub-06'	0.29	0.16	-0.52	0.11	6	中抗
'Sub-07'	-0.55	0.39	1.28	0.08	7	中抗
'Pan-02'	0.22	-0.50	-0.04	-0.07	8	中抗
'Pan-Ru-07'	-0.17	-1.12	-0.45	-0.54	9	中抗
'Pan-01'	-1.14	-0.42	0.81	-0.56	10	弱抗
'Pan-Ru-06'	-0.77	-0.35	-1.87	-0.82	11	弱抗
'Pan-05'	-0.67	-1.37	-1.22	-1.01	12	弱抗
'Pan-04'	-0.53	-1.66	-1.23	-1.03	13	弱抗
'Pan-03'	-1.43	-1.64	-0.14	-1.28	14	弱抗

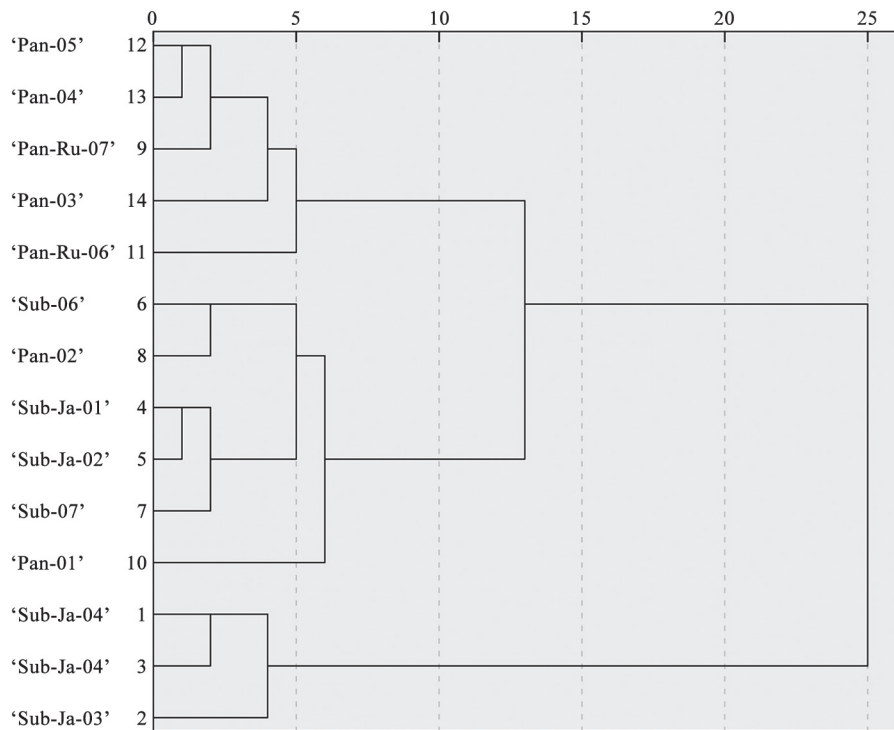


图1 福禄考品种抗寒性聚类分析

Fig.1 Clustering graph of fourteen *Phlox* varieties based on the tolerance to coldness

图中横向数字代表类间距, 竖向数字代表聚类步骤。

究中随温度的降低, 14种福禄考叶片可溶性蛋白含量变化为降一升一降一降的趋势, 并且通过本研究抗寒性综合分析得到抗寒性强品种Sub-05的可溶性蛋白含量也是高于其他品种的。植物受到冷

胁迫时, 游离Pro通过对蛋白质的水合作用, 保护了细胞的空间结构不被低温伤害, 起到了对植物在寒冷条件下的保护作用(王兆2014)。本研究中福禄考品种低温胁迫整体上看大部分品种Pro含量均

有提升,但提升幅度不尽相同。喜树(*Camptotheca acuminata*)叶片在低温胁迫下,随着温度的持续降低,叶片中的Pro含量也有所改变,呈上升趋势,因此游离Pro含量可以作为抗性研究的衡量指标(冯建灿等2002)。植物受到低温胁迫时,MDA含量大量增加,表明体内细胞受到较严重的破坏,因此,植物的抗寒性与MDA含量呈负相关(刘祖祺和张石诚1994;邓仁菊等2014)。火龙果(*Hylocereus* spp.)在低温胁迫下,MDA含量随着处理时间的延长,呈现总体增加的趋势(邓仁菊等2014)。相同的研究结果也出现在喜树的抗寒研究中(冯建灿等2002)。本研究中温度由20°C降至0°C时,品种Pan-05、Pan-Ru-06、Sub-Ja-01和Sub-06叶片内MDA含量有不同程度的增加,而其他品种都表现出降低趋势。与其他研究的MDA含量持续增加不同,个别品种出现降低趋势,证明在此温度范围内个别品种的抗寒性强,体内细胞没有受到破坏。而随着温度的继续降低,各品种MDA含量均呈现增加趋势,说明在此温度范围内细胞均受到破坏导致MDA含量增加。

2 综合因子与抗寒性的关系

植物对低温胁迫的反应表现在生理、生长和表观形态等诸多方面,在以往的研究中,多采用形态、理化和生态等单一指标进行抗寒性鉴定(刘祖祺和张石诚1994)。而植物的生理过程是复杂的,影响植物抗寒性的因素较多,指标单一化很难真实反映植物的抗寒性实质,因此用多个指标进行植物的抗寒性综合鉴定是必要的(张文辉等2004)。主成分分析法和聚类分析法作为可靠的数学统计方法,可以将多个抗寒指标综合分析,对各个生理指标做标准化处理,根据标准处理所得数据求出其特征值、特征向量值和各因子的贡献率,选取前3个主成分作为主成分分析的依据,对14个福禄考品种进行抗寒性综合排序。目前在紫薇(*Lagerstroemia indica*) (唐婉2012)、葡萄(*Vitis vinifera*) (苏李维等2015)和草莓(*Fragaria ananassa*) (杨凤翔等2010)等研究中均应用了这些方法对抗寒性进行综合评定。本研究如只通过单一指标对福禄考各品种进行评价,则通过可溶性糖含量进行抗寒分析可得‘Sub-06’和‘Sub-07’的抗寒性强;而通过MDA进行抗寒分析,则‘Sub-07’和‘Sub-Ja-04’

的抗寒性强。通过各生理指标结果,各品种在低温胁迫下表现出的抗寒性各不相同,不能从整体上对14个品种的抗寒性综合分析。进而应用主成分分析及聚类分析对福禄考属14个品种进行抗寒性综合分析并对各个品种的抗寒性进行了分级,得到了丛生福禄考‘Sub-05’、‘Sub-Ja-03’和‘Sub-Ja-04’属于强抗寒品种的结论,且丛生福禄考品种的抗寒性优于锥花品种,与露地栽培越冬结果基本一致,说明主成分分析法及聚类分析优于单一指标分析,适用于福禄考品种抗寒性研究,结果的获得为下一步福禄考转录组测序和相关抗寒基因克隆提供了参考。

参考文献

- Chen Y, Tian Y, Xu Q, Yu X, Wang Y (1999). The experiment on introduce fine variety and properagation of *Phlox paniculata* L. J Ningxia Agr Coll, 20 (5): 57-69 (in Chinese with English abstract) [陈银芬, 田耘, 徐庆林, 俞晓艳, 王彦庆(1999). 宿根福禄考引种及繁殖试验. 宁夏农学院学报, 20 (5): 57-69]
- Deng RJ, Fan JX, Wang YQ, Jin JF, Liu T (2014). Physiological responses of pitaya (*Hylocereus* spp.) seedlings to chilling stress and comprehensive evaluation of their cold resistance. Plant Physiol J, 50 (10): 1529-1534 (in Chinese with English abstract) [邓仁菊, 范建新, 王永清, 金吉芬, 刘涛(2014). 火龙果幼苗对低温胁迫的生理响应及其抗寒性综合评价. 植物生理学报, 50 (10): 1529-1534]
- Dong WP, Luo C, Long XQ, Hu J, Li Y (2015). Effects of low temperature stress on physiological indexes of cold resistance of *Passiflora edulis*. Plant Physiol J, 51 (5): 771-777 (in Chinese with English abstract) [董万鹏, 罗充, 龙秀琴, 胡静, 李燕(2015). 低温胁迫对西番莲抗寒生理指标的影响. 植物生理学报, 51 (5): 771-777]
- Du YJ, Yu L, Sun JX, Lu WH, Han LB (2008). Study on cold-resistance and its mechanism of different cultivars of *Zoysia japonica* Steud. Acta Agrestia Sin. 16 (4): 347-352 (in Chinese with English abstract) [杜永吉, 于磊, 孙吉雄, 鲁为华, 韩烈保(2008). 结缕草品种抗寒性和抗寒机理研究. 草地学报, 16 (4): 347-352]
- Feng JC, Zhang YJ, Yang TZ (2002). Effect of low temperature stress on the membrane-lipid peroxidation and the concentration of free proline in *Camptotheca acuminata* seedling. Forest Res, 15 (2): 197-202 (in Chinese with English abstract) [冯建灿, 张玉洁, 杨天柱(2002). 低温胁迫对喜树幼苗SOD活性、MDA和脯氨酸含量的影响. 林业科学研究, 15 (2): 197-202]
- Jian LC, Lu CF, Li JH, Li PH (2005). Increment of chilling tolerance and its physiological basis in chilling-sensitive corn sprouts and tomato seedlings after cold-hardening at optimum temperatures. Acta Agron Sin, 31 (8): 971-976 (in Chinese with English abstract) [简令成, 卢存福, 李积宏, 李PH (2005). 适宜低温锻炼提高冷敏感植物玉米和番茄的抗冷性及其生理基础. 作物学报, 31 (8): 971-976]

- Li H (2000). The experimental principle and technology of plant physiology and biochemistry. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [李合生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社]
- Li H, Zhang J, Zhang Q (2005). Recent advances in horticultural studies of *Phlox* and its major cultivated species. *Acta Horticult Sin*, 32 (5): 954–959 (in Chinese with English abstract) [李红伟, 张金政, 张启翔(2005). 福禄考属植物及其主要栽培种的园艺学研究进展. 园艺学报, 32 (5): 954–959]
- Li YB, Yang SQ, Ren GX, Feng YZ, Zhang Q, Li P (2009). Changes analysis in physiological properties of several gramineous grass species and cold-resistance comparison on under cold stress. *Acta Ecol Sin*, 29 (3): 1341–1347 (in Chinese with English abstract) [李轶冰, 杨顺强, 任广鑫, 冯永忠, 张强, 李鹏(2009). 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, 29 (3): 1341–1347]
- Lin S, Li X, Zhang Z (2002). The effects of cold acclimation on the freezing resistance and total soluble protein in *Populus tomentosa* seedlings. *Sci Silvae Sin*, 38 (6): 137–141 (in Chinese with English abstract) [林善枝, 李雪平, 张志毅(2002). 低温锻炼对毛白杨幼苗抗冻性和总可溶性蛋白质的影响. 林业科学, 38 (6): 137–141]
- Liu Z, Zhang S (1994). Plant Resistance Physiology. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [刘祖祺, 张石诚(1994). 植物抗性生理学. 北京: 中国农业出版社]
- Su L, Li S, Ma S, Dai C, Shi Z, Tang B, Zhao S, Pu Y (2015). A comprehensive assessment method for cold resistance of grapevines. *Acta Pratac Sin*, 24 (3): 70–79 (in Chinese with English abstract) [苏李维, 李胜, 马绍英, 戴彩虹, 时振振, 唐斌, 赵生琴, 蒲彦涛(2015). 葡萄抗寒性综合评价方法的建立. 草业学报, 24 (3): 70–79]
- Tang HW, Qu YT, Han H, Zhang X (2014). Introduction and cultivation of *Phlox subulata*. *Terr Nat Res Study*, (2): 88–89 (in Chinese with English abstract) [唐焕伟, 曲彦婷, 韩辉, 张兴(2014). 针叶天蓝绣球引种栽培试验. 国土与自然资源研究, (2): 88–89]
- Tang W, Hu X, Xu W, Wang X, Liu Y, Yang B, Pan H (2012). Assessing the cold resistance of several crape myrtle (*Lagerstroemia L.*) species and cultivars. *Acta Agr Boreal-Occident Sin*, 21 (9): 121–126 (in Chinese with English abstract) [唐婉, 胡杏, 徐婉, 王晓娇, 刘阳, 杨冰洁, 潘会堂(2012). 几种紫薇属植物的抗寒性评价. 西北农业学报, 21 (9): 121–126]
- Wang Z (2014). Physiological responses to chilling stress in *Solenostemon scutellarioides* and its inductive research (master's thesis). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University (in Chinese with English abstract) [王兆(2014). 低温胁迫对彩叶草的生理效应及抗寒性研究(硕士学位论文). 福州: 福建农林大学]
- Yang FX, Jin F, Yan X (2010). Comprehensive evaluation of different strawberry varieties' tolerance to coldness. *J Fruit Sci*, 27 (3): 368–372 (in Chinese with English abstract) [杨凤翔, 金芳, 颜霞(2010). 不同草莓品种抗寒性综合评价. 果树学报, 27 (3): 368–372]
- Zhang W (2008). Establishment of tissue culture regeneration and receptor regeneration system of two species *Phlox* (master's thesis). Harbin: Northeast Forestry University (in Chinese with English abstract) [张伟(2008). 两种福禄考组织培养再生及受体再生体系建立(硕士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学]
- Zhang WH, Duan BL, Zhou JY, Liu XJ (2004). Water relations and activity of cell defense enzymes to water stress in seedling leaves of different provenances of *Quercus variabilis*. *Acta Phytoecol Chin*, 28 (4): 483–490 (in Chinese with English abstract) [张文辉, 段宝利, 周建云, 刘祥君(2004). 不同种源栓皮栎幼苗叶片水分关系和保护酶活性对干旱胁迫的响应. 植物生态学报, 28 (4): 483–490]

Physiological response to low temperature stress and comprehensive evaluation of cold resistance on different *Phlox* varieties

QU Yan-Ting^{1,2}, XIONG Yan², HAN Hui², LI Yang³, ZUO Yu-Hu^{1,*}

¹Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163000, China; ²Institute of Natural Resources and Ecology, HAS, Harbin 150040, China; ³Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

Abstract: Through the analysis of related physiological indexes of fourteen different *Phlox* varieties at low temperatures stress, results indicate that soluble sugar content showed a “decreased–increased–decreased–increased” variation trend while soluble protein content showed a variation trend of “decreased–increased–decreased–decreased” along with decline of treatment temperature. Pro, chlorophyll, MDA contents and SOD activity of different *Phlox* varieties had different variation trends, the differences of which were remarkable. Principal component analysis (PCA) and cluster analysis were used to sort cold resistance of all varieties. It was divided into three cold resistance grades: strong cold resistant varieties ‘Sub-05’, ‘Sub-Ja-03’ and ‘Sub-Ja-04’; cold resistant varieties ‘Sub-Ja-01’, ‘Sub-Ja-02’, ‘Sub-06’, ‘Sub-07’, ‘Pan-02’ and ‘Pan-Ru-07’; weak cold-resistance varieties ‘Pan-01’, ‘Pan-Ru-06’, ‘Pan-05’, ‘Pan-04’ and ‘Pan-03’. The result was basically the same as overwintering observation which show that *Phlox subulata* varieties had a stronger cold resistance than *Phlox paniculata* varieties.

Key words: *Phlox*; low temperature stress; physiological response; comprehensive evaluation of cold resistance

Received 2015-12-04 Accepted 2016-02-02

This work was supported by the Foreign Cooperation Projects of Heilongjiang Provincial Science and Technology Department (Grant No. WB10B110), and Basic Applied Technology Research Project of Institutes in Heilongjiang Province (Grant No. STJB2015-06).

*Corresponding author (E-mail: zuoyuhu@163.com).