

柴胡幼苗越冬抗寒性及其相关生理指标筛选

马艳芝, 客绍英

(唐山师范学院 生命科学系, 河北唐山 063000)

摘要:以北柴胡、地产柴胡、三岛柴胡的根为试验材料,以早春植株成活率为越冬抗寒性指标,测定越冬期不同柴胡品种根系生理生化特征,进行柴胡抗寒性综合评价,并对主要抗寒生理指标进行通径分析和相关性分析,以探讨冬季自然低温条件下柴胡生理特性与抗寒性的关系,筛选适合柴胡越冬抗寒性鉴定的生理指标。结果表明:(1)北柴胡、地产柴胡、三岛柴胡返青期的返青率依次为80%、50%、10%,且各品种间差异显著。(2)3个品种柴胡越冬期根系可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、根系活力与返青率大小顺序一致,其中北柴胡根系游离脯氨酸平均含量分别为地产柴胡和三岛柴胡的2.44倍和4.49倍,且可溶性蛋白含量显著高于地产柴胡、三岛柴胡,但3个品种柴胡的相对电导率、丙二醛含量水平与返青率大小顺序相反。(3)自然越冬过程中,各柴胡品种的根系活力均呈下降趋势,且以三岛柴胡根系活力下降幅度最大,达80%,而北柴胡根系活力下降幅度最小为52.04%。(4)越冬期3个柴胡品种的越冬抗寒性综合排序为:北柴胡>地产柴胡>三岛柴胡;柴胡根中脯氨酸含量、可溶性蛋白含量与综合评价值呈极显著正相关关系,相对电导率与综合评价值呈显著负相关关系;生理指标决策系数的大小顺序依次为脯氨酸含量>可溶性蛋白含量>电导率。研究表明,越冬期柴胡根系游离脯氨酸含量是影响其抗寒性的主要影响因素,其含量可作为评价柴胡抗寒性的指标。

关键词:柴胡幼苗;抗寒性;生理指标;综合评价

中图分类号: Q945.79 **文献标志码:** A

Cold Resistance and Related Physiological Indexes Identification of *Bupleurum* Seedlings during Wintering Stage

MA Yanzhi, KE Shaoying

(Department of Life Sciences, Tangshan Normal University, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: This experiment takes *Bupleurum chinense* DC., *Bupleurum chinense* DC. (lushi) from Lushi of Henan Province and *Bupleurum falcatum* L. roots as the materials. In early spring, with the survival rate of plants as winter hardiness indexes, the physiological and biochemical indexes of different varieties of *Bupleurum* root were detected during winter period. Path analysis and phase analysis were used to evaluate *Bupleurum* cold resistance and cold resistance physiological indicators. The purpose is to explore the relationship between dynamic changes and cold resistance physiological indexes of *Bupleurum* in natural low temperature conditions and to filter out the most suitable physiological indicators that identify *Bupleurum* winter hardiness. The results as follows: (1) The overwinter survival rate in turn was 80% (*B. chinense* DC.), 50% [*B. chinense* DC. (lushi)], 10% (*B. falcatum* L.), and there were differences between different cultivars. (2) The change of soluble sugar content, proline content, soluble protein content and root activity were consistent with that of the overwinter survival rate, but the relative electrolytes and MDA content of the 3 cultivars were in an opposite order. Among them, the free proline content of *B. chinense* DC. was 2.44 fold of *B. chinense* DC. (lushi), and 4.49 fold of *B. falcatum* L.. The soluble protein content of *B. chinense*

收稿日期: 2013-08-08; **修改稿收到日期:** 2014-03-30

基金项目: 国家科技部子课题(2011BAI07B05-4); 河北省科技厅项目(10965511D); 唐山市科技重大项目(12130203A)

作者简介: 马艳芝(1977-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事药用植物与生物技术研究。E-mail: mayanzhiwx@163.com

DC. was much higher than that of others. (3) During natural overwintering, the root activities of all cultivars showed a decreasing trend. The decrease margin of *B. falcatum* L. was the largest (80%), the decrease margin of *B. chinense* DC. was the smallest (52.04%). (4) The winter hardiness of three *Bupleurum* species of comprehensive order was: *B. chinense* DC. > *B. chinense* DC. lushi > *B. falcatum* L., the comprehensive appraisal was significantly positively correlated with the contents of protein and proline, but it had significant negative correlation with the relative electrolytes. The decision coefficient of physiological indexes in size order was proline content > soluble protein content > conductivity. The results showed that: the free proline content of roots was the main factor which influenced cold resistance during natural overwintering, which could be used as evaluation index of cold resistance of *Bupleurum*.

Key words: *Bupleurum* seedlings; cold resistance; physiological indexes; subordinate function analysis

柴胡(*Bupleurum*)系伞形科柴胡属多年生草本植物,是中国常用的大宗药材,以干燥根入药,始载《神农本草经》,列为上品,具有抗炎、解热、镇静等多种功效^[1],是‘大柴胡汤’、‘小柴胡汤’、‘柴胡桂枝汤’等方剂的主要组成药味。《中国药典》(一部)2010年版收录的柴胡药材为柴胡或狭叶柴胡的干燥根,习称‘北柴胡’和‘南柴胡’。北柴胡广泛分布于中国的北方地区,其质量优良,市场需求大。

目前国内外对柴胡的研究主要侧重于对其药理学及其有效成分和临床应用之间的相互关系。近年来也有不少学者开始研究柴胡的人工栽培技术,如谢志明等^[2]对北柴胡在白城地区的驯化栽培进行了研究,还有学者研究柴胡的病虫害及其防治、田间的水肥管理等^[3-4],但是鲜有学者对柴胡的越冬抗寒性进行研究。在本课题组多年柴胡田间栽培实践过程中,发现有很明显的越冬死苗现象,柴胡的越冬返青率低。在北方地区,低温寒害是农业生产中一种严重自然灾害,严重影响了农作物的栽培。在生产实践中,柴胡经受冬季冷害后造成其越冬率较低,进而影响种植的产量和收益。因此,探究柴胡抗寒性形成的生理机制,不仅在理论上具有重要的科学意义,在解决生产实际问题上也具有广泛的应用价值。本试验以3个柴胡品种为材料,利用冬季自然低温,研究6个越冬生理指标与越冬抗寒性的关系,筛选出最适合柴胡抗寒性鉴定的生理指标,为柴胡的越冬抗寒性研究和田间栽培管理提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 材料与实验设计

供试柴胡品种为‘北柴胡(黑)’(*Bupleurum chinense* DC.)、‘地产柴胡(北柴胡采自河南卢氏)’(*Bupleurum chinense* DC. lushi)和‘三岛柴胡’(*Bupleurum falcatum* L.),其中北柴胡广泛种植于北方地区,地产柴胡原产于甘肃,三岛柴胡来源于

日本。所有柴胡品种均种植于适合其生长的试验田。在2011年6月20日播种,田间管理同一般高产田。2011年12月13日至2012年3月10日,每隔15 d取样1次,共7次。每个品种田间挖取大量根,室内随机选取根长度和粗度较一致的植株20棵,取相同部位根5 cm,用蒸馏水小心冲洗,并用吸水纸吸干表面水分,切成小薄片,混合均匀,用于测定生理指标。随后,于2012年3月25日,在玉田县试验田调查各柴胡品种的越冬返青率。

1.2 测定指标及方法

相对电导率用 DDS-11A 型电导仪测定^[5],脯氨酸含量用茚三酮比色法测定^[6],可溶性糖含量用蒽酮比色法测定^[5],可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[5],丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定^[6],根系活力用 TTC 染色法测定^[5]。

1.3 数据分析

用 SPSS 11.5 软件进行方差分析、相关性分析、通径分析;用隶属函数值法对越冬抗寒性指标进行综合分析^[7]。

2 结果与分析

2.1 不同柴胡品种越冬返青率比较

本研究以各柴胡品种的返青率表示其抗寒性的强弱,返青率越高抗寒性越强,反之越弱。田间调查结果表明,北柴胡、地产柴胡、三岛柴胡返青期的返青率分别为 80%、50%、10%,北柴胡显著高于地产柴胡,地产柴胡又显著高于三岛柴胡($P < 0.05$)。说明北柴胡的越冬抗寒能力显著高于地产柴胡,地产柴胡的能力又显著高于三岛柴胡。

2.2 越冬期不同柴胡品种根系渗透调节物质含量变化特征

2.2.1 可溶性糖含量 从图 1 可以看出,北柴胡和地产柴胡根系的可溶性糖含量在越冬期表现为下降-上升-下降趋势,三岛柴胡则总体呈逐渐下降趋

势;其中,在温度最低的 1 月份,北柴胡根系的可溶性糖含量迅速上升,地产柴胡表现为先上升后下降,三岛柴胡则逐渐下降。另外,北柴胡根系的可溶性糖含量在越冬期间始终高于三岛柴胡,地产柴胡除个别时间点外也均高于三岛柴胡;北柴胡和地产柴胡可溶性糖含量变化幅度较大,三岛柴胡含量波动较小。由方差分析结果可知,在自然越冬条件下,不同柴胡品种间的根系可溶性糖含量在不同取样时期差异均达到了显著水平,并且整个越冬期中 3 个品种的柴胡的可溶性糖含量均比返青期高。可见,柴胡根系内可溶性糖含量在越冬期都保持较高的水平;北柴胡和地产柴胡的水平相对较高且波动较大,而三岛柴胡水平相对较低但波动较小。

2.2.2 脯氨酸含量 图 2 显示,3 个柴胡品种根系的脯氨酸含量在越冬期间基本均呈现先上升后下降趋势,且基本表现为北柴胡>地产柴胡>三岛柴胡,但是不同柴胡品种的脯氨酸含量具体变化过程并不一致。其中,北柴胡根系脯氨酸含量在 1 月 27 日后大幅增加,并于 2 月 11 日时达到峰值(1.411 mg/g),随后快速下降至最低值;地产柴胡在 1 月 12 日至 2 月 11 日期间脯氨酸含量开始迅速增加,同样于 2 月 11 日时达到峰值(0.611 mg/g),但其峰值显著小于北柴胡,随后下降至越冬前水平;三岛柴胡在 2 月 26 日时达到峰值(0.329 mg/g),其峰值又显著小于地产柴胡,且其在越冬期间较小。同时,从方差分析可知,不同柴胡品种间的游离脯氨酸含量在不同取样时期差异均达到了显著水平,其中北柴胡的游离脯氨酸平均含量最高,其平均含量水平是地产柴胡的 2.44 倍,三岛柴胡的 4.49 倍。可见,柴胡越冬期根系脯氨酸含量与其抗寒性有密切关系。

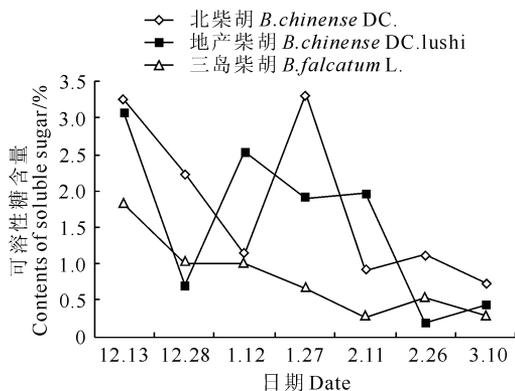


图 1 越冬期不同柴胡品可溶性糖含量的动态变化
Fig.1 The dynamic changes of soluble sugar content among different *Bupleurum* cultivars in wintering period

2.2.3 可溶性蛋白含量 由图 3 可知,3 个柴胡品种根系的可溶性蛋白含量在越冬期均呈现先减小后缓慢增加继而逐渐降低的变化趋势,且始终表现为北柴胡>地产柴胡>三岛柴胡;在越冬期开始时(12 月 13 日),各柴胡品种根中可溶性蛋白含量均处于最高值,说明越冬前柴胡根中已积累了大量的蛋白来抵御寒冷胁迫。方差分析表明,在自然低温条件下,不同柴胡品种间的可溶性蛋白含量在不同取样时期差异均达到了显著水平,即北柴胡的可溶性蛋白含量显著高于地产柴胡,地产柴胡的可溶性蛋白含量又显著高于三岛柴胡,柴胡的抗寒性也与其越冬期根系可溶性蛋白含量密切相关。

2.3 越冬期不同柴胡品种根的相对电导率和丙二醛含量的变化特征

2.3.1 相对电导率 从图 4 可以看出,不同的柴胡品种对低温的反应是不同的,北柴胡和三岛柴胡的电导率在越冬期均表现出先下降后上升而后又下降的趋势,而地产柴胡则表现出完全不同的时降时升

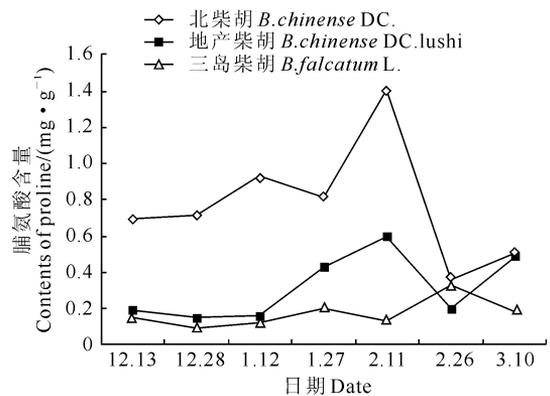


图 2 越冬期不同柴胡品种脯氨酸含量的动态变化
Fig.2 The dynamic changes of proline content among different *Bupleurum* cultivars in wintering period

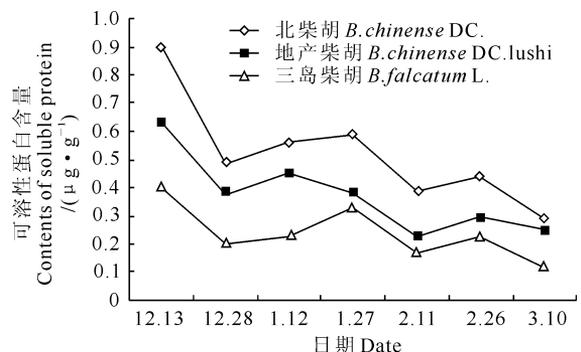


图 3 越冬期不同柴胡品种可溶性蛋白含量的动态变化
Fig.3 The dynamic changes of soluble protein content among different *Bupleurum* cultivars in wintering period

的变化。其中,北柴胡和三岛柴胡根系电导率均在 1 月 27 日时达到峰值,且三岛柴胡峰值更高(4.36%),变化幅度更大,并达到显著水平;而地产柴胡根系电导率在 2 月 26 日才达到峰值,明显比前两者推迟,且峰值高低介于前两者之间。进一步方差分析可知,在自然越冬条件下,不同柴胡品种间的相对电导率在不同取样时期差异均达到了显著水平($P < 0.05$)。在返青期(3 月 10 日)时,北柴胡的相对电导率显著低于其他两个品种,其根系受到的低温伤害更轻。

2.3.2 丙二醛含量 图 5 显示,3 个柴胡品种根系丙二醛含量在越冬期均呈现先升高后降低的趋势。其中,在 12 月 28 日至 1 月 12 日和 1 月 27 日至 2 月 11 日期间,随着温度的持续降低,各品种根系丙二醛含量均增加,并于 2 月 11 日均达到最高值;而后随着温度逐渐回升,各品种丙二醛含量又出现下降趋势。在整个越冬期,三岛柴胡根系丙二醛含量水平大多高于其余 2 个品种。北柴胡根系丙二醛含量低于地产柴胡,地产柴胡的丙二醛含量又低于三岛柴胡。即抗寒性较强品种受到低温胁迫伤害较轻。

2.4 越冬期不同柴胡品种根系活力的动态比较

由图 6 可知,在自然越冬过程中,各柴胡品种的根系活力均呈现下降趋势,三岛柴胡下降幅度显著高于北柴胡。且方差分析结果显示,不同柴胡品种间根系活力在不同取样时期差异均达到了显著水平。其中,在 12 月 13 日至 12 月 28 日期间,各柴胡根系活力的下降幅度均较大,并以三岛柴胡根系活力下降幅度最大,降低达 80%,而北柴胡根系活力下降幅度最小,降低约 52.04%。即越冬期柴胡根系活力降幅大小也一定程度上反映了其抗寒性强弱。

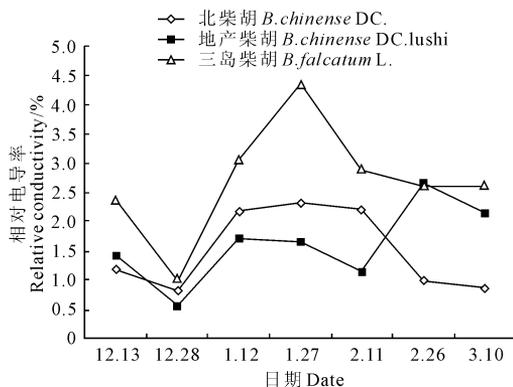


图 4 越冬期不同柴胡品种根系相对电导率的动态变化
Fig. 4 The dynamic changes of relative conductivity among different *Bupleurum* cultivars in wintering period

2.5 柴胡越冬抗寒性抗寒综合评价

越冬期柴胡不同品种各生理指标的测定结果表明,各生理指标在越冬期过程中表现出不同的变化趋势,但将任意单一指标作为衡量其抗寒性的标准都不够科学。为进一步探究柴胡抗寒性与其生理指标之间的关系,采用综合评价值对柴胡抗寒性进行综合评价。

2.5.1 综合评价 材料综合评价值的大小可以反映各材料的综合能力的大小,值越大表明越冬抗寒性越强。通过计算得出 3 个柴胡品种的综合评价值大小分别为:北柴胡 0.439、地产柴胡 0.377、三岛柴胡 0.348(表 1)。从这个综合评价结果(表 1)可以看出,北柴胡品种抗寒性最强,三岛柴胡最弱。这与在田间测定的返青期存活率(北柴胡 80%、地产柴胡 50%、三岛柴胡 10%)所反映的抗寒性强弱顺序一致。因此,3 个柴胡品种越冬抗寒性的综合排序为:北柴胡 > 地产柴胡 > 三岛柴胡。

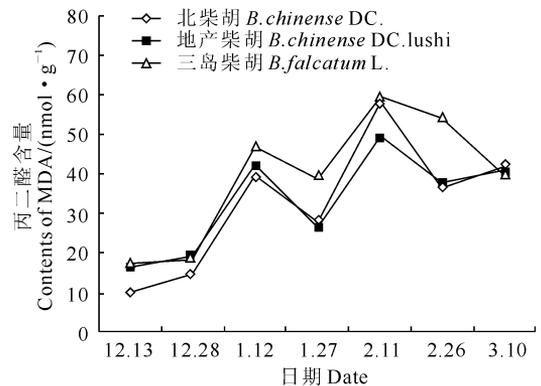


图 5 越冬期不同柴胡品种丙二醛含量的动态变化
Fig. 5 The dynamic changes of malonaldehyde content among different *Bupleurum* cultivars in wintering period

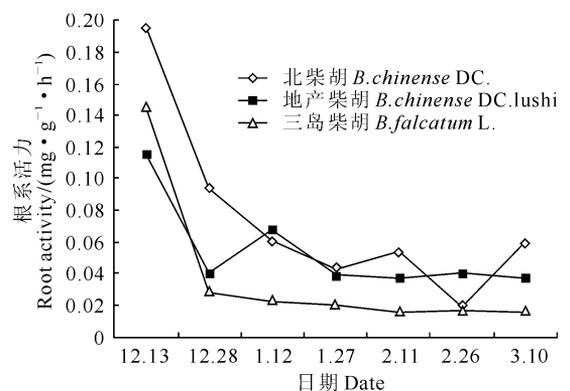


图 6 越冬期不同柴胡品种根系活力的动态变化
Fig. 6 The dynamic changes of root activity among different *Bupleurum* cultivars in wintering period

表 1 3 种植物 6 项指标的隶属函数值及抗寒性综合评价结果

Table 1 Subordinate function values of six indices of 3 species and comprehensive appraisal for cold resistance

植物种 Species	隶属函数值 Membership function value						隶属函数均值 Average of membership function	抗寒能力排序 Cold resistance capability order
	电导率 Relative conductivity	可溶性糖 Soluble sugar content	脯氨酸 Proline content	可溶性蛋白 Soluble protein content	丙二醛 Malonaldehyde content	根系活力 Root activity		
北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i> DC.	0	1	1	1	0	1	0.439	1
地产柴胡 <i>Bupleurum chinense</i> DC. lushi	0.090	0.730	0.241	0.480	0.061	0.434	0.377	2
三岛柴胡 <i>Bupleurum falcatum</i> L.	1	0	0	0	1	0	0.348	3

表 2 柴胡抗寒性综合评价与主要抗寒生理指标的通径系数和相关系数

Table 2 Path coefficient & coefficient between evaluation D and physiological indexes of cold resistance

抗寒生理指标 Physiological index of cold resistance	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					根系活力 Root activity	相关系数 Correlation coefficient	决策系数 Decision coefficient
		脯氨酸含量 Protein content	电导率 Electric conductivity	可溶性蛋白 Soluble protein content	可溶性糖 Soluble sugar content	丙二醛 Malonaldehyde content			
脯氨酸含量 Protein content	0.529		0.053	0.282	-0.053	0.009	0.048	0.772 **	0.537
电导率 Electric conductivity	-0.360	-0.078		-0.215	0.079	0.030	0.080	-0.464 *	0.163
可溶性蛋白 Soluble protein content	0.719	0.207	0.108		-0.176	-0.037	-0.195	0.626 **	0.383
可溶性糖 Soluble sugar content	-0.224	0.125	0.127	0.566		-0.035	-0.167	0.391	-0.225
丙二醛 Malonaldehyde content	0.063	0.079	-0.169	-0.418	0.126		0.159	-0.160	-0.024
根系活力 Root activity	-0.251	0.102	0.114	0.557	-0.149	-0.040		0.332	-0.023

注: * 和 ** 分别表示相关性在 0.05 和 0.01 水平显著。

Note: * and ** mean the correlation coefficient are significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.5.2 通径分析 柴胡抗寒性综合评价与主要抗寒生理指标的通径分析结果(表 2)表明:脯氨酸含量与抗寒性综合评价呈极显著正相关($r=0.772, P<0.01$),电导率与抗寒性综合评价呈显著负相关($r=0.464, P<0.05$),可溶性蛋白含量与抗寒性综合评价呈极显著正相关($r=0.626, P<0.01$)。各生理指标对抗寒性综合评价的直接通径系数大小依次为脯氨酸含量>可溶性蛋白含量>电导率,生理指标决策系数的大小顺序依次为脯氨酸含量>可溶性蛋白含量>电导率,可见,脯氨酸含量是影响抗寒性综合评价的主要影响因素。

3 讨论

3.1 柴胡越冬抗寒性及其鉴定方法

田间自然鉴定法是植物越冬抗寒性研究中比较常用的方法,通过将暴露在自然条件下的植物种类作为研究对象,使其经过冬季低温考验后,从外部性状上来观察,调查植株的冻害和存活情况,从而估计不同植物的越冬抗寒性^[8]。黄其椿等^[9]以红麻越冬期间梢部枯萎程度(梢部枯萎长度/株高)和早春植株成活率等为抗寒性指标,比较了 7 对红麻细胞质雄性不育系与保持系的抗寒性。

通过田间自然鉴定法可以很清楚地看到柴胡的

越冬率,但对于其在越冬期发生的生理指标的变化则为探究柴胡的抗寒性机制,提高柴胡的越冬率提供了理论依据。用电导法测定细胞外渗液电导率变化,可以反映细胞膜伤害程度的一个重要指标^[10]。相对电导率大,表示细胞膜受伤害程度严重,反之,相对电导率小,则表示细胞膜受到的伤害较轻^[11]。本实验中的 3 个柴胡品种的电导率在经历最冷月后电导率均达到最大值,并随着温度的升降,电导率呈现相应的减小增大的趋势,这和前人的研究成果一致。大量关于苜蓿的抗寒性研究表明游离脯氨酸含量的增加有利于提高其抗寒性^[12-13],与本实验中游离脯氨酸含量变化结果一致。

试验中北柴胡的抗寒性略高于另 2 个品种,而其游离脯氨酸含量也是高于另 2 个品种的。王微^[14]对低温胁迫下的苜蓿的抗寒性生理指标变化的研究表明:在低温条件作用下,苜蓿细胞内发生膜过氧化作用,使作为终产物的丙二醛含量逐渐累积。本试验中丙二醛含量在越冬期的动态变化证实了这一观点。有研究表明,无论植物本身抗寒性强还是弱,可溶性糖都会随温度下降而增加,以抗寒性强的品种增加幅度大^[15-19]。

不同植物的抗寒性机制不同,利用多个单一指标进行抗寒性评判容易造成片面性和不稳定性^[20]。

主成分分析可以从原始指标中抽提出更少的几个相关的指标来解释原始指标里所包含的信息,更客观,结果更可靠。由于主成分为综合变量且相互独立,所以用主成分值作为指标,可以比较准确地了解各性状的综合表现,同时根据各自贡献率大小可以确定其相对重要性,以此为基础,再采用隶属函数加权法,可以比较科学地对各品种的抗寒性进行综合评价。许瑛运用主成分分析方法对菊花 6 个品种 14 个指标进行了抗寒性综合评价,从 14 个指标提炼出了 3 个主成分,对抗寒性累积贡献率达 92.9%,有效地简化了数据。本试验依据综合评价值 D 的大小得出 3 个柴胡品种越冬抗寒性强弱顺序为:北柴胡 > 地产柴胡 > 三岛柴胡。

参考文献:

- [1] MENG J(孟杰), YAO R Y(姚入宇), CHEN X F(陈兴福), et al. Advances in studies on classification of *Bupleurum*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica* (中国中药杂志), 2012, **37**(11): 1 523-1 526(in Chinese).
- [2] XIE ZH M(谢志明), CHU J H(初敬华), ZHANG CH J(张朝举). Study on artificial culture of *Bupleurum chinense* in Baicheng area[J]. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技杂志), 2009, (4): 22(in Chinese).
- [3] XIANG Q(向琼), LI X L(李修炼), LIANG Z S(梁宗锁), et al. The main diseases and insect pests of *Bupleurum* and comprehensive prevention and control measures[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences* (陕西农业科学), 2005, (2): 39-41(in Chinese).
- [4] 朱再标. 柴胡配方施肥及需水规律研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2005: 14-25.
- [5] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导(第 4 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 102-103.
- [6] 乔富廉. 植物生理学实验分析测定技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 131-132.
- [7] HAN R H(韩瑞宏), LU X SH(卢欣石), GAO G J(高桂娟), et al. Analysis of the principal components and the subordinate function of alfalfa drought resistance[J]. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2006, **14**(2): 142-146(in Chinese).
- [8] 张文娥. 中国葡萄属野生种抗寒性鉴定与基因的 RAPD 标记[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2005: 55-56.
- [9] HUANG Q CH(黄其椿), LIU J M(刘吉敏), ZHOU R Y(周瑞阳), et al. Identification and correlated analysis on cold winter resistance of cytoplasm male sterile lines and maintainers in *Kenaf*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2012, **28**(12): 124-128(in Chinese).
- [10] JIN G(金戈), WANG H CH(王洪春). Dynamic course and property of permeability in plasma membrane of wheat leaves under low and non-freezing temperature stress[J]. *Plant Physiology Journal* (植物生理学报), 1991, (3): 295-300(in Chinese).
- [11] SHEN H B. Study on Freezing-resistance Mechanism of Apricot[D]. Shandong: Master's Thesis of Shandong Agriculture University, 2002.
- [12] ZHANG J D, LI Y M, CHEN Q Y, et al. Relationship between the soluble sugar content, proline content and the hardness of pear cultivars[J]. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2004, **26**(4): 281-285.
- [13] FENG CH J(冯昌军), LUO X Y(罗新义), SHA W(沙伟), et al. Effect of low temperature stress on SOD, POD activity and proline content of alfalfa[J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 2005, **22**(6): 29-32(in Chinese).
- [14] 王微. 低温胁迫下紫花苜蓿几个抗寒生理指标的变化规律[D]. 哈尔滨: 东北师范大学, 2009: 6
- [15] PERRAS M, SARHAN F. Energy state of spring and winterwheat during cold hardening: Soluble sugars and adenine nucleotides[J]. *Physiologia Plantarum*, 1984, **60**(2): 129-132.
- [16] GUY C L, HUBER J L A, HUBER S C. Sucrose phosphate synthase and sucrose accumulation at low temperature[J]. *Plant Physiology*, 1992, **100**(1): 502-508.
- [17] SASSAKI H, ICHIMURA K, ODA M, et al. Changes in sugar content during cold acclimation and deacclimation of cabbage seedlings[J]. *Annals of Botany*, 1996, **78**(3): 365-369.
- [18] WANG X X(王孝宣), LI SH D(李树德), DONG H R(东惠茹), et al. The correlation of cold-tolerance with ABA, soluble sugar and respiratory intensity in tomato[J]. *Acta Horticulturae* (园艺学报), 1998, **25**(1): 56-60(in Chinese).
- [19] CORDENUNSI B R, GENOVESE M, OLIVEIRA J R, et al. Effects of temperature on the chemical composition and antioxidant activity of three strawberry cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2005, **91**(1): 113-121.
- [20] TIAN ZH G(田治国), WANG F(王飞), ZHANG W E(张文娥), et al. Drought-resistance evaluation of marigold cultivars based on multiple statistics analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(12): 3 315-3 320(in Chinese).

3.2 柴胡越冬期抗寒性生理指标的筛选

柴胡在越冬期中各生理指标的表现存在差异,不同生理指标与越冬抗寒性的相关性不同,柴胡的抗寒机制是一个复杂的综合性过程,本研究结果表明,越冬期抗寒性以北柴胡最强,三岛柴胡最弱,地产柴胡介于两者之间。抗寒性强的柴胡品种可溶性糖含量、脯氨酸含量、蛋白质含量和根系活力值较高,而相对电导率值和丙二醛含量较低。研究中各生理指标对抗寒性综合评价值的直接途径系数大小依次为脯氨酸含量 > 可溶性蛋白含量 > 电导率,生理指标决策系数的大小顺序依次为脯氨酸含量 > 可溶性蛋白含量 > 电导率,可见,脯氨酸含量是影响抗寒性综合评价值的主要影响因素。