

阻抗谱和电导法测定的桃树抗寒性与生理指标通径分析

钱 稷¹ 周 娟² 邸 葆¹ 丁 钿冉³ 张海旺⁴ 陈海江¹

(1. 河北农业大学园艺学院, 保定 071001; 2. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001;
3. 东芬兰大学森林与科学学院, 约恩苏 80101; 4. 辽宁省干旱地区造林研究所, 朝阳 122000)

摘要: 以8年生的桃树枝条为试材,采用通径分析方法对电解质渗透率(EL)法和电阻抗图谱(EIS)法测定的桃树抗寒性与生理指标(脯氨酸含量、可溶性糖含量、淀粉含量、含水率)的关系进行分析。结果表明:EIS参数胞外电阻率(r_e)测定的抗寒性与生理指标关系中,脯氨酸含量、可溶性糖含量直接通径系数分别为 $-0.35(P<0.05)$ 和 $-0.61(P<0.05)$,含水率的间接通径系数为 $0.53(P<0.05)$;EL法测定的抗寒性与生理指标关系中,脯氨酸含量、含水率直接通径系数分别为 $-0.51(P<0.05)$ 和 $0.50(P<0.05)$,可溶性糖含量的间接通径系数为 $-0.75(P<0.05)$ 。在影响2种方法测定桃树抗寒性的生理指标中,脯氨酸含量、可溶性糖含量与含水率都是重要的生理指标。同时,EIS也可以作为快速测定桃树抗寒性的方法。通径分析方法能够充分反映自变量对因变量的影响,同时也可以反映因变量之间的关系,能够应用于研究影响桃树抗寒性与生理指标相关性的分析中。

关键词: 桃树; 抗寒性; 生理指标; 通径分析

中图分类号: S662.1; Q945.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)06-0210-07

Path Analysis of Cold Resistance Measured by EIS and EL Methods with Physiological Indicators of Peach Trees

QIAN Ji¹ ZHOU Juan² DI Bao¹ DING Tianran³ ZHANG Haiwang⁴ CHEN Haijiang¹

(1. College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China
3. School of Forest Sciences, University of Eastern Finland, Joensuu 80101, Finland
4. The Afforestation Research Institute in Arid Zones of Liaoning Province, Chaoyang 122000, China)

Abstract: The purpose of this experiment was to find scientific statistic method to analyze physiological indicators of cold resistance of peach trees (*Prunus persica* L.). The relations among cold resistance and the four physiological indicators, including soluble sugar, proline, starch and water contents were studied by path analysis. Cold resistance was determined by parameters of electrical impedance spectroscopy (EIS) and electrolytic leakage (EL). Shoots of 8-year-old peach trees were collected for the experiment from Shibei Village (Heibei Province, China, 37°96' N, 115°44' E, altitude of 31 m). The results showed that parameter of EIS had a direct relation to proline and soluble sugar contents, with -0.35 and $-0.61(P<0.05)$ as direct path coefficients, respectively, and indirect relation to water content, with $0.53(P<0.05)$ as indirect path coefficient. EL parameter had direct relation to proline and water contents, with $-0.51(P<0.05)$ and $0.50(P<0.05)$ as direct path coefficients and indirect relation to soluble sugar content, with $-0.75(P<0.05)$ as indirect coefficient. The results indicated that proline, soluble sugar and water contents were significant physiological indicators for both EIS- and EL-methods which played a decisive role in cold resistance. An experiment on path analysis method was carried out, which was purposed to be firstly used to prove that EIS as a fast method was also appropriate to test cold resistance of peach trees. Especially, extracellular resistance (r_e) was the most significant parameter that can reflect cold resistance of peach trees. The results also indicated that path analysis was a reasonable, scientific statistic method to analyze relations to physiological indicators for cold resistance. The results of this experiment can be applied to study the correlation analysis of cold resistance of peach trees and the physiological indicators, as well as increasing the effectiveness and accuracy of selecting physical indicators.

Key words: peach tree; cold resistance; physiological indicators; path analysis

引言

桃树原产于中国,既能采果,又能观赏。其果实营养价值丰富,含有蛋白质、脂肪、糖、钙、磷、铁和维生素 B、维生素 C 等。桃树是一种温带植物,不耐寒。在长期的自然选择和人工驯化栽培过程中形成了众多的品种和类型。河北省是中国桃的主产区,地处东部季风区,属暖温带半湿润大陆性气候。近几年,由于极端天气频繁,桃树冻害偶有发生,造成桃树大面积减产,给果农带来了巨大的经济损失。据调查,冻害大约每 10 年发生一次^[1-3]。因此生产中进行抗寒性研究具有重要的意义,而对新品种抗寒性的早期鉴定更为重要。所以研究快速、准确地测定桃树抗寒性的方法至关重要。

应用电阻抗图谱(Electrical impedance spectroscopy, EIS)法对植物抗逆性的研究已颇为广泛。EIS 参数能够从电学的角度反映植物的生理变化^[4-8]。通过不同频率的电压激励,测量不同状态下的电阻抗变化,反映细胞膜的破坏程度。张海旺等^[9]以“燕红”和“中华寿桃”桃树品种为对象,研究了用 EIS 参数快速测定桃树抗寒性的方法,并与电解质渗透率法(Electrolyte leakage, EL)进行了比较。实际抗寒性与生理指标之间彼此相互影响,同时再次影响抗寒性。相关性分析和偏回归系数是在假定其它变量不变的情况下对自变量效应强度的估计,因此简单的回归分析不能真实反映生理指标对抗寒性的实际综合效应。通径分析(Path analysis)是研究变量间相互关系、自变量对因变量作用方式和程度的多元统计分析技术;通过通径分析,能够找出自变量对因变量影响的直接效应和间接效应以及总效应,发现由于自变量间相关性很强而引起多重共线性的自变量;通径分析能够比简单相关分析更深入的分析指标间相互影响程度,揭示内生变量、外生变量以及结果变量之间的关系^[10-13]。

本文采用河北省辛集市 3 个常见桃树品种为试材,应用电阻抗图谱法(EIS)和电解质渗透率法(EL)研究不同时期桃树的抗寒性,探明 EL 法测定抗寒性与 EIS 参数法测定抗寒性的相关性,建立线性回归方程,确定 EIS 法测定抗寒性的具体参数。同时,测定与抗寒性相关的生理指标(可溶性糖含量、脯氨酸含量、淀粉含量、含水率),利用通径分析方法,将 2 种方法测得的抗寒性与不同桃树品种的生理指标进行通径分析,探讨影响桃树抗寒性的直接效应生理指标、间接效应生理指标以及总效应指标,验证通径分析方法在桃树抗寒性研究领域的合理性、科学性和优越性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试材取自河北省辛集市石碑村(37.96'N、115.44'E,海拔高度 31 m)。以生产实践中 8 年生的 3 个主栽桃树品种——“大久保”、“21 世纪”、“新农 14 号”桃树为试材。每个品种 4 次重复,每次重复选择树势相近,长势良好的 3 株,从每株桃树各主枝上分别采集 30~40 cm 新梢 6 枝,用于抗寒性和生理指标的测定。取样时间自 2014 年 9 月 15 日开始,每隔 30 d 取样一次,至 2015 年 5 月 15 日结束。

1.2 试验方法

1.2.1 冷冻处理

首先用清水将剪好的茎段洗净,然后用去离子水清洗。冲洗完毕后用吸水纸将所有茎段擦干,放入已准备好的保鲜袋中。每袋放 8 个茎段包括 4 次重复,每个品种需要 7 个保鲜袋用于不同温度处理。袋中喷入少量的去离子水,防止过冷。不同时期的试材其冷冻处理温度均设置 7 个梯度(表 1),保证 2 个存活温度、2 个致死温度、3 个中间温度,以 4℃ 为对照。降温速率为 6℃/h,每个处理温度保持 4 h,然后放入 4℃ 冰箱中解冻 24 h。

表 1 冷冻处理所设温度
Tab.1 Temperatures used for freezing test

日期	设定温度/℃						
09-15	4	-6	-10	-15	-20	-25	-35
10-15	4	-8	-16	-20	-26	-34	-45
11-15	4	-8	-15	-22	-34	-45	-70
12-15	4	-8	-16	-25	-34	-43	-54
01-15	4	-10	-22	-34	-45	-55	-65
02-15	4	-8	-16	-25	-34	-45	-55
03-15	4	-8	-15	-22	-34	-42	-50
04-15	4	-8	-16	-22	-34	-42	-50
05-15	4	-6	-10	-15	-25	-35	-45

1.2.2 抗寒性的测定

EIS 法或 EL 法评价抗寒性均可用 Logistic 方程描述^[14-15]。

用 EIS 法测定抗寒性时,Logistic 方程描述为

$$y = \frac{A}{1 + e^{B(C-x)}} + D \tag{1}$$

式中 y——EIS 参数
x——冷冻处理温度,℃
A——函数上渐近线和下渐近线之间的距离
B——温度拐点曲线斜率
C——拐点温度,即冷冻变化率(dy/dx)达最大值时的温度,℃

D ——函数下渐进线

用 EIS 法测定抗寒性,选取最合适的 EIS 参数,可用其配合 Logistic 方程,估测抗寒性。当 $x \rightarrow -\infty$ 时, $y = D$, 表示受冻害时 EIS 参数的最小值; 当 $x \rightarrow \infty$ 时, $y = A + D$, 为函数的上渐进线, 表示未受冻害时 EIS 参数的基础值。应用 SPSS 22.0 软件通过计算方程的拐点温度 (C 值) 表示组织的半致死温度 (LT50), 估算抗寒性。

用 EL 法测定抗寒性时, Logistic 方程描述为

$$y' = \left[\frac{A}{1 + e^{B(C-x)}} + D \right] \times 100\% \tag{2}$$

式中 y' ——相对电导率, %

EL 法中, 当 $x \rightarrow \infty$ 时, $y' = D$, 表示未受冻害时相对电导率的基础值; 当 $x \rightarrow -\infty$ 时, $y' = A + D$, 为函数的上渐进线, 表示受冻害时相对电导率的最大值。

1.2.3 可溶性糖含量和淀粉含量的测定

按照李合生^[16]的方法测定可溶性糖和淀粉含量。将茎样品用去离子水洗净擦干后, 放于 80℃ 干燥箱干燥至质量恒定, 然后将样品研磨成粉末, 用 80% 乙醇离心萃取可溶性糖, 最后加入蒽酮试剂混匀, 在 630 nm 波长下比色测定可溶性糖含量。离心后的残渣用 30% 高氯酸离心提取淀粉, 加入蒽酮试剂混匀, 在 625 nm 波长下比色测定淀粉含量。

1.2.4 游离脯氨酸的测定

用茚三酮显色法^[16]测定游离脯氨酸含量。利用磺基水杨酸使脯氨酸游离于磺基水杨酸的溶液中, 然后用酸性茚三酮加热处理后, 再用甲苯处理, 在 520 nm 波长下比色, 利用标准曲线计算出脯氨酸含量。

1.2.5 含水率的测定

枝条含水率的测定参照李合生^[16]的方法。每个品种随机取枝条中部 15 cm, 取 5 条, 称量。然后

将枝段放入 80℃ 干燥箱中, 干燥 48 h, 取出后置于干燥皿中 24 h, 称量。计算出含水率。

1.3 统计分析

利用 LEVM 8.6 软件拟合出 EIS 参数胞外电阻率 (r_e) 和胞内电阻率 (r_i), 通过 Logistic 方程得出对应的抗寒性 (半致死温度), 然后将 3 个桃树品种作为一个整体, 对各个参数进行分析。利用 SPSS 22.0 将 2 种方法测得的抗寒性与脯氨酸含量、淀粉含量、可溶性糖含量、含水率做通径分析, 得到直接通径系数、间接通径系数和总通径系数, 揭示影响抗寒性的直接效应与间接效应, 建立在 EIS 参数法快速测定桃树抗寒性条件下影响桃树抗寒性主要生理指标的最优结构方程组。

2 结果与分析

2.1 抗寒性

2.1.1 利用 EIS 参数 r_e 和 r_i 测定半致死温度

2014 年 9 月—2015 年 1 月, 由 EIS 参数 r_e 和 r_i 测得 3 个品种的抗寒性增强, 1 月份半致死温度绝对值达最大值 (表 2、3)。1—5 月份, 随着外界温度的逐渐上升, 3 个品种的抗寒性减弱, 5 月份抗寒性最弱 (表 2、3)。“大久保”桃树抗寒性在 1 月份达到最强, 通过 r_e 和 r_i 测得的半致死温度分别为 -40.09℃ 和 -34.76℃。“新农 14 号”桃树在 1 月份达到最强抗寒性, 半致死温度分别为 -34.99℃ 和 -29.65℃。“21 世纪”桃树在 r_e 和 r_i 测得的抗寒性中, 12 月份和 1 月份达到最强抗寒性, 半致死温度分别为 -24.30℃ 和 -27.67℃。根据 EIS 2 种参数得到的抗寒性显示, “大久保”桃树的抗寒性明显强于其他 2 个品种。

2.1.2 EL 法测定半致死温度

2014 年 9 月—2015 年 1 月, EL 法测得 3 个品

表 2 胞外电阻率 (r_e) 法测定的枝条半致死温度

Tab.2 Semi-lethal temperatures of shoots using method of extracellular resistance (r_e)										℃
品种	月份									
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
“大久保”桃树	-15.12	-17.92	-25.18	-36.96	-40.09	-33.82	-23.23	-21.16	-10.08	
“新农 14 号”桃树	-19.49	-17.26	-22.25	-30.09	-34.99	-24.81	-24.05	-17.65	-6.75	
“21 世纪”桃树	-17.69	-17.28	-22.30	-24.30	-23.57	-20.39	-23.93	-12.52	-9.95	

表 3 胞内电阻率 (r_i) 法测定的枝条半致死温度

Tab.3 Semi-lethal temperatures of shoots using method of intracellular resistance (r_i)										℃
品种	月份									
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
“大久保”桃树	-16.19	-17.07	-30.28	-30.66	-34.76	-34.48	-32.11	-16.84	-10.07	
“新农 14 号”桃树	-18.51	-17.97	-29.05	-29.58	-29.65	-27.46	-24.14	-16.09	-11.02	
“21 世纪”桃树	-18.00	-17.53	-26.73	-27.32	-27.67	-26.00	-24.58	-15.16	-10.13	

种的抗寒性均逐渐增强,1 月份“大久保”和“新农 14 号”桃树同时达到最强抗寒性,其半致死温度分别为 -36.89°C 和 -30.90°C ,而“21 世纪”桃树在 2 月份达到最强的抗寒性,半致死温度为 -29.43°C 。

“大久保”桃树在 3 个品种中表现出最强的抗寒性。2015 年 1 月—2015 年 5 月,抗寒性减弱,5 月份抗寒性达到最弱,“新农 14 号”桃树在 3 月份半致死温度有所增加(表 4)。

表 4 电解质渗透率 (EL) 法测定的枝条半致死温度

Tab.4 Semi-lethal temperatures of shoots using method of electrolyte leakage (EL method) $^{\circ}\text{C}$

品种	月份								
	9	10	11	12	1	2	3	4	5
“大久保”桃树	-9.71	-19.60	-37.71	-34.58	-36.89	-35.36	-27.76	-18.38	-13.05
“新农 14 号”桃树	-12.69	-20.95	-24.15	-28.87	-30.90	-25.86	-29.50	-16.45	-12.93
“21 世纪”桃树	-10.53	-20.20	-23.79	-25.79	-24.26	-29.43	-23.86	-17.29	-11.06

2.2 生理指标

2.2.1 脯氨酸含量

9 月份,各品种枝条内脯氨酸含量较低,10 月份,脯氨酸含量极显著增加 ($P<0.01$)。随着抗寒锻炼的深入,各品种枝条内脯氨酸含量仍呈上升趋势,均在 3 月份达到最高值,极显著高于其它月份 ($P<0.01$) (2 月份除外);3 月份后,脯氨酸含量开始迅速下降,在脱锻炼末期 5 月份达到最低值,各品种脯氨酸含量与 9 月份基本达到同一水平(图 1a)。

2.2.2 可溶性糖含量

9 月—翌年 1 月,3 个品种的可溶性糖含量整体呈现上升趋势。1 月份,3 个品种的可溶性糖含量均达到最大值,“大久保”、“新农 14 号”、“21 世纪”桃树枝条可溶性糖含量分别为 9.24%、9.13%、7.75% (图 1b)。“大久保”、“新农 14 号”桃树枝条

可溶性糖含量显著高于“21 世纪”桃树枝条 ($P<0.05$),“大久保”和“新农 14 号”桃树枝条可溶性糖含量没有显著性差异。“大久保”桃树枝条在 1 月份的可溶性糖含量显著高于其他 2 个品种。1—5 月份,各品种的可溶性糖含量不断降低,5 月份,可溶性糖含量达到最低,同时抗寒性也达到最弱。

2.2.3 淀粉含量

9 月—11 月,3 个品种枝条的淀粉含量呈下降趋势,11 月份含量最低,“大久保”、“新农 14 号”、“21 世纪”桃树枝条的淀粉含量分别为 1.45%、1.28%、0.91% (图 1c)。从 12 月份开始,各品种淀粉含量升高,到 2 月份,各品种枝条内的淀粉含量变化不显著,基本维持在同一水平。而“新农 14 号”桃树枝条在 3 月份达到淀粉含量的最大值

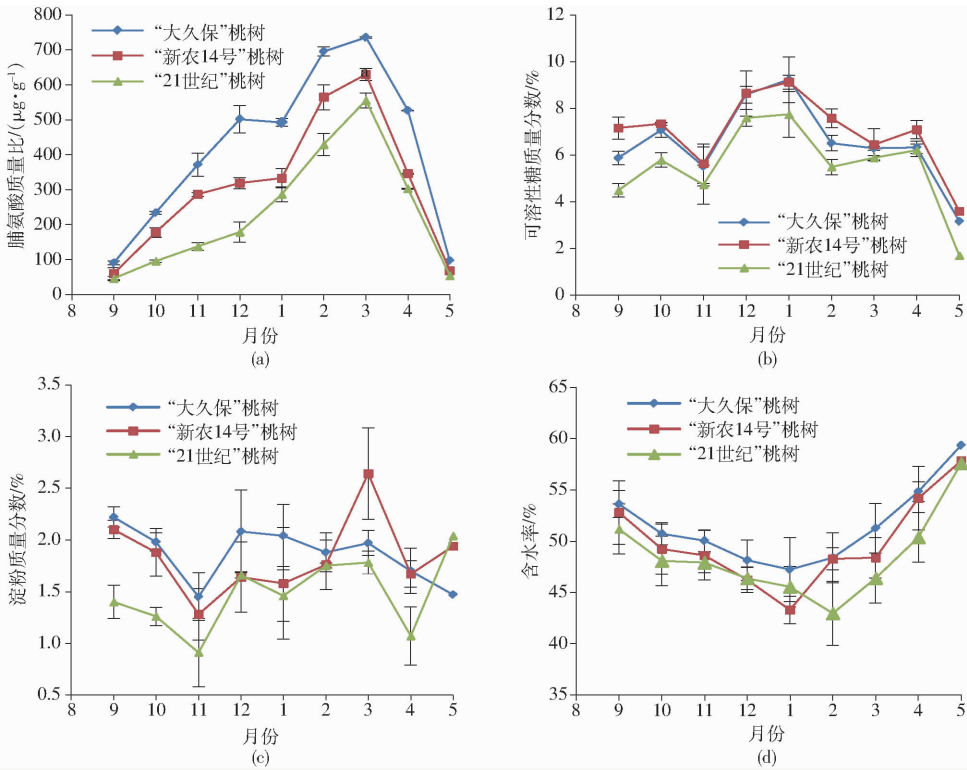


图 1 不同时期不同桃树品种生理指标变化

Fig.1 Changes of physiological indicators for different peach tree cultivars at different stages

(2.64%)。

2.2.4 含水率

9月—翌年1月,各品种枝条内含水率显著下降($P<0.05$)。“大久保”桃树在1月份枝条内含水率为47.23%,而“21世纪”枝条的含水率为45.56%(图1d)。1—5月份,含水率逐渐升高,在末期各品种枝条的含水率均达到最高。

2.3 EIS参数、EL测定的抗寒性与生理指标的通径分析

通径分析选取脯氨酸含量、可溶性糖含量、淀粉含量、含水率为影响抗寒性的因素,分别记为自变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。EIS参数 r_e 、 r_i 测定的半致死温度和EL测定的半致死温度分别作为因变量 y_1 、 y_2 、 y_3 。因为样本总数为27小于50,所以选择Shapiro—Wilk方法对所有变量进行正态分布检验。 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 y_1 、 y_2 、 y_3 的显著性 P 值分别为0.093、0.464、0.952、0.221、0.409、0.070、0.365,胞内电阻率测得抗寒性(y_2)的 P 值最接近0.05,所以正态分布不明显,去除该组数据,其他变量的 P 值均大于0.05,可以进行通径分析。

由表5可以看出各变量之间的相关关系,同时 y_1 和 y_3 在 $P<0.01$ 显著度水平上的相关系数 $r=0.85$ 。再利用SPSS建立两者的线性回归方程为: $y_3=0.872y_1-3.868$, $R^2=0.72$,通过 F 检验法找到线性回归方程的显著性,其 $F=64.59$ ($P<0.0001$),回归方程极显著,说明可以用胞外电阻率测定的抗寒性 y_1 来表示EL法测定的抗寒性 y_3 。 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 与 y_1 的相关性方面,可溶性糖含量(x_2)与 y_1 相关性最高,而淀粉含量(x_3)与 y_1 没有显著相关关系。

表 5 各变量之间的相关系数

Tab.5 Correlation coefficient between variables

变量	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_3
x_1	1	0.43 *	0.30	-0.38 *	-0.61 **	-0.70 **
x_2	0.43 *	1	0.16	-0.65 **	-0.76 **	-0.57 **
x_3	0.30	0.16	1	0.15	-0.14	-0.06
x_4	-0.38 *	-0.65 **	0.15	1	0.69 **	0.69 **
y_1	-0.61 **	-0.76 **	-0.14	0.69 **	1	0.85 **
y_3	-0.70 **	-0.57 **	-0.06	0.69 **	0.85 **	1

注: *表示在 $P<0.05$ 水平显著,**表示在 $P<0.01$ 水平显著,下同。

将 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 与 y_1 进行自变量逐步加入方法的回归分析,通过 F 检验发现线性回归方程的显著性,同时通过 t 检验寻找回归方程系数的显著性。去除在 $P<0.05$ 水平上显著性差的方程以及变量,结果表明 x_1 、 x_2 满足要求。直接通径系数(标准系数Beta)分别为-0.36和-0.61(表6)。

表 6 脯氨酸、可溶性糖含量与半致死温度(r_e 测定)偏回归分析

Tab.6 Partial regression analysis of proline, soluble sugar contents and semi-lethal temperature (r_e measured)

模型	非标准系数		标准系数	t	P
	B	标准差	Beta		
常数	-0.08	3.48		-0.02	0.98
脯氨酸含量	-0.01	0.01	-0.36	-2.72	0.01
可溶性糖含量	-2.77	0.59	-0.61	-4.73	<0.01

以 x_1 、 x_2 分别作为因变量, x_3 、 x_4 作为自变量,建立 x_3 、 x_4 与 x_1 直接效能关系和 x_3 、 x_4 与 x_2 直接效能关系,得到各变量之间的结构方程组

$$\begin{cases} y_1 = -0.08 - 0.01x_1 - 2.77x_2 \\ x_1 = 1\,283.61 - 19.32x_4 \\ x_2 = 20.13 - 0.28x_4 \end{cases} \quad (3)$$

根据回归方程系数,进行标准化处理,可以得到各关系之间的直接通径系数。任一自变量对因变量的间接通径系数为两者相关系数(r_{ij})与直接通径系数(P_{ji})的乘积。从直接通径系数和间接通径系数可知,脯氨酸含量对抗寒性的综合影响系数为-0.61,可溶性糖含量对抗寒性的综合影响系数最高,为-0.76(表7)。

表 7 各生理指标对胞外电阻率测得的抗寒性的通径分析

Tab.7 Path analysis of cold resistance measured by r_e with various physiological indicators

变量	对 y_1 的直接 通径系数	间接通径 系数	间接通径 系数总和	x_i 对 y_1 的 总作用
x_1	-0.36 *	-0.26 * $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow y_1$	-0.26 *	-0.61 *
x_2	-0.61 *	-0.15 * $x_2 \rightarrow x_1 \rightarrow y_1$	-0.15 *	-0.76 *
x_3	剔除	0	0	0
x_4	剔除	0.39 * $x_4 \rightarrow x_2 \rightarrow y_1$ 0.13 * $x_4 \rightarrow x_1 \rightarrow y_1$	0.53 *	0.53 *

根据通径分析以及结构方程组可以得到生理指标与胞外电阻率测定桃树抗寒性的通径分析模型,如图2所示。

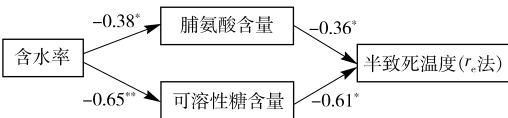


图 2 生理指标与抗寒性(r_e 法)通径分析图

应用同样的方法,得到生理指标与EL法测定

桃树抗寒性的通径系数和通径分析模型(图 3)。脯氨酸含量、可溶性糖含量、含水率对抗寒性产生影响。脯氨酸含量和含水率对 EL 法测定的抗寒性有直接作用,直接通径系数分别为 -0.51 和 0.50 。其中脯氨酸含量对 EL 法测定的抗寒性总作用最大,总通径系数为 -0.78 (表 8)。

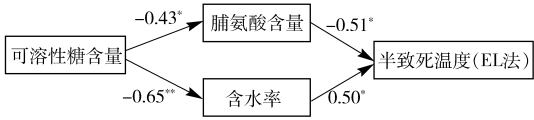


图 3 生理指标与抗寒性(EL 法)通径分析图
Fig.3 Chart of path analysis of physiological indicators and cold resistance (EL method)

表 8 各生理指标对 EL 测得的抗寒性的通径分析
Tab.8 Path analysis of cold resistance measured by EL method with various physiological indicators

变量	对 y_3 的直接 通径系数	间接通径 系数	间接通径 系数总和	x_i 对 y_3 的 总作用
x_1	-0.51^*	-0.27^* $x_1 \rightarrow x_4 \rightarrow y_3$ -0.30^*	-0.27^*	-0.78^*
x_2	剔除	$x_2 \rightarrow x_1 \rightarrow y_3$ -0.45^* $x_2 \rightarrow x_4 \rightarrow y_3$	-0.75^*	-0.75^*
x_3	剔除	0	0	0
x_4	0.50^*	0.27^* $x_4 \rightarrow x_1 \rightarrow y_3$	0.27^*	0.77^*

3 讨论

通过生理指标对 EIS 法和 EL 法测定桃树抗寒性影响的相关性分析表明,EL 法测定抗寒性和 EIS 参数中胞外电阻率测定的抗寒性有极显著的相关性。在同时为正态分布的情况下,相关系数为 $0.849(P < 0.01)$ 。说明胞外电阻测定抗寒性可以代表传统的 EL 法测定的抗寒性。

本研究将 2 种抗寒性的测定方法分别与生理指标做通径分析,将相关系数分解为直接通径系数、间接通径系数和总通径系数。利用 3 类系数表示生理指标对抗寒性的直接作用、间接作用以及总作用。结果分析表明,在传统的 EL 法测定抗寒性分析中,脯氨酸含量、可溶性糖含量、含水率对抗寒性产生影响。而这 3 个生理指标对 EIS 参数中胞外电阻率法测定的抗寒性有影响,与 EL 法测定抗寒性一致。其中脯氨酸含量、可溶性糖含量为内生变量直接影响抗寒性;而外生变量含水率影响脯氨酸含量和可

溶性糖含量 2 个内生变量,进而影响抗寒性。金明丽等^[17]和邱葆等^[18]对苹果砧木、金丝楸的抗寒性研究表明,可溶性糖含量可以用于推测品种间抗寒性的差异。邵怡若等^[19]对盐肤木、假连翘、老鸭嘴和葛藤 4 种幼苗和董胜豪等^[20]对白皮松的抗寒性研究发现,游离脯氨酸含量可以用来鉴定不同品种的抗寒性。OUTI 等^[21]研究发现,枝条内含水率降低有利于植物抗寒,枝条内含水率的变化能够在一定程度上反映植物的抗寒性。以上研究只考虑了单一因素与抗寒性的关系,但是简单的相关关系与回归方程不能反映生理指标之间的相互影响。本研究首先对数据进行正态分布验证,在正态分布的前提下,进行通径分析。数据的正态分布在统计学中能够反映样本数据的准确性,统计结构具有实际意义。利用通径分析方法可以揭示生理指标之间的相互影响,建立生理指标之间的通径关系,进而分析影响桃树的抗寒性。通过胞外电阻率测定抗寒性与生理指标进行逐步回归分析,去除显著性影响小的生理因素(回归方程系数显著度 $P > 0.05$),得到影响抗寒性最大的直接生理因素。结果表明 3 种桃品种枝条可溶性糖含量对抗寒性的直接影响最大,直接通径系数为 $-0.61(P < 0.05)$,总通径系数为 $-0.76(P < 0.05)$ 。脯氨酸含量的直接通径系数为 $-0.35(P < 0.05)$,间接通径系数为 $-0.26(P < 0.05)$,总通径系数为 $-0.61(P < 0.05)$ 。可溶性糖和脯氨酸作为渗透调节物质,在植物遇到低温胁迫时,可以通过改变自身含量变化,有效增加植物抵御低温的能力。而含水率影响脯氨酸含量和可溶性糖含量的变化,进而影响桃树的抗寒性,其间接通径系数为 $0.53(P < 0.05)$,总通径系数为 $0.53(P < 0.05)$ 。含水率主要通过自身的变化影响可溶性糖含量和脯氨酸含量的相对变化,进而影响抗寒性的变化。

4 结束语

本研究利用通径分析方法对 EL 法和 EIS 法测定的桃树抗寒性与生理指标(可溶性糖含量、脯氨酸含量、淀粉含量和含水率)的关系进行了分析。结果表明,脯氨酸含量、可溶性糖含量和含水率对桃树的抗寒性产生直接或间接的影响。通径分析方法能够反映各生理指标间的相关关系,同时能够应用于研究影响桃树抗寒性生理指标的分析中,对其他木本植物的抗寒性研究具有借鉴作用,以此提高抗寒性和生理指标选择的效率与准确性。

参 考 文 献

1 汪祖华,庄恩及. 中国果树志:桃卷[M]. 北京:中国林业出版社,2001: 79-85.

- 2 YUN S,BAE H,CHUNG K, et al. Sugar, starch, and proline in peach trees exposed to freezing temperatures during dehardening [J]. *Agricultural Sciences*, 2014, 5(10): 913–921.
- 3 郭振怀,葛海波,王秀伶,等. 桃属植物染色体核型及种间亲缘关系分析[J]. *园艺学报*, 1996, 23(3): 223–226.
GUO Zhenhuai, GE Huibo, WANG Xiuling, et al. The analysis of chromosome karyotypes and taxonomic relationships of amygdalus plants [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1996, 23(3): 223–226. (in Chinese)
- 4 REPO T, ZHANG G, RYYPÖ A, et al. The electrical impedance spectroscopy of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) shoots in relation to cold acclimation [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(353): 2095–2107.
- 5 CIEMENT Y, TAPANI R, RAIMO S. Dielectric relaxations in starch–water solutions[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 171: 42–48.
- 6 ABERG P, BIRGERSSON U, ELSNER P, et al. Electrical impedance spectroscopy and the diagnostic accuracy for malignant melanoma[J]. *Experimentl Dermatology*, 2011, 20(8): 648–652.
- 7 张钢,肖建忠,陈段芬. 测定植物抗寒性的电阻抗图谱法[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31(1): 19–26.
ZHANG Gang, XIAO Jianzhong, CHEN Duanfen. Electrical impedance spectroscopy method for measuring cold hardiness of plants [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(1): 19–26. (in Chinese)
- 8 王爱芳,张钢,魏士春,等. 不同发育时期樟子松的电阻抗参数与抗寒性的关系[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5741–5749.
WANG Aifang, ZHANG Gang, WEI Shichun, et al. Relation between frost hardiness and parameters of electrical impedance spectroscopy in saplings of different development stage of *Pinus sylvestis* L. var. *mongolica* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5741–5749. (in Chinese)
- 9 张海旺,陈海江,邸葆,等. 抗寒锻炼期间桃树枝电阻抗参数与抗寒性关系研究[J]. *河北农业大学学报*, 2014, 37(2): 45–48, 57.
ZHANG Haiwang, CHEN Haijiang, DI Bao, et al. Relationship between electrical impedance spectroscopy parameters and frost hardiness in peach shoot during cold hardening[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2014, 37(2): 45–48, 57. (in Chinese)
- 10 蔡甲冰,许迪,刘钰,等. 冬小麦返青后腾发量时空尺度效应的通径分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 69–76.
CAI Jiabing, XU Di, LIU Yu, et al. Path analysis on spatio-temporal scaling effect of crop evapotranspiration in growing seasons for winter wheat after reviving[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 69–76. (in Chinese)
- 11 李晓彬,汪有科,张平. 充分灌溉下梨枣树茎直径动态变化及 MDS 影响因子的通径分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 88–93.
LI Xiaobin, WANG Youke, ZHANG Ping. Dynamic changes of pear jujube stem diameter and path analysis of MDS in fluencing factors with full irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 88–93. (in Chinese)
- 12 郑健,蔡焕杰,王健,等. 日光温室西瓜产量影响因素通径分析及水分生产函数[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 30–34.
ZHENG Jian, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Path analysis of yield components and water production function of watermelon in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(10): 30–34. (in Chinese)
- 13 王晓森,刘祖贵,刘浩,等. 番茄茎直径 MDS 的通径分析与数值模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(8): 187–192.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120834&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.034.
WANG Xiaosen, LIU Zugui, LIU Hao, et al. Path analysis and numerical simulation of MDS of tomato stem diameter[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(8): 187–192. (in Chinese)
- 14 WILNER J J. Note on an electrolytic procedure for differentiating between frost injury of roots and shoots in woody plants[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1959, 39(4): 512–513.
- 15 ZHANG G, RYYPÖ A, VAPAAVUORI E. Quantification of additive response and stationarity of frost hardiness by photoperiod and temperature in Scots pine[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(9): 1772–1784.
- 16 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 17 金明丽,徐继忠,张钢. 苹果砧木枝条电阻抗参数与其抗寒性的关系[J]. *园艺学报*, 2011, 38(6): 1045–1051.
JIN Mingli, XU Jizhong, ZHANG Gang. Relation between electrical impedance spectroscopy parameters and frost hardiness in shoots of apple rootstocks[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(6): 1045–1051. (in Chinese)
- 18 邸葆,孟昱,张钢,等. 基于电阻抗图谱估测金丝楸茎和叶可溶性糖含量的模型[J]. *生物物理学报*, 2014, 30(6): 443–453.
DI Bao, MENG Yu, ZHANG Gang, et al. The estimation model of soluble sugar content in stems and leaves of *Catalpa bungei* C. A. Mey based on electrical impedance spectroscopy[J]. *Acta Biophysica Sinica*, 2014, 30(6): 443–453. (in Chinese)
- 19 邵怡若,许建新,薛立,等. 低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(14): 4237–4247.
SHAO Yiruo, XU Jianxin, XUE Li, et al. Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4237–4247. (in Chinese)
- 20 董胜豪,张钢,卻书鹏,等. 脱锻炼期间白皮松针叶的电阻抗图谱参数和生理指标的相关性[J]. *园艺学报*, 2009, 36(6): 891–897.
DONG Shenghao, ZHANG Gang, QUE Shupeng, et al. The relationship between parameters of electrical impedance spectroscopy and some physiological parameters in *Pinus bungeana* Zucc. needles during dehardening[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36(6): 891–897. (in Chinese)
- 21 OUTI S, FOLMER B, ROSARIO G, et al. Genetic variation in cessation of growth and frost hardiness and consequences for adaptation of *Pinus sylvestris* to climatic changes[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 197(1–3): 79–89.