

苹果砧木枝条电阻抗参数与其抗寒性的关系

金明丽, 徐继忠*, 张 钢

(河北农业大学园艺学院, 河北保定 071001)

摘 要: 以 18 株 2 年生苹果砧木西府海棠 (*Malus micromalus* Makino) 实生后代单株为试材, 研究了不经冷冻处理的枝条的电阻抗 (EIS) 参数与其抗寒性 (电导法测定枝条冷冻半致死温度) 的关系。结果表明, 3 个时期 (3 月、7 月、11 月) 枝条的 EIS 参数高频电阻率 r 和低频电阻率 r_1 、胞外电阻率 r_e 、弛豫时间 τ 与抗寒性呈显著负相关 ($r = -0.737^{**} \sim -0.877^{**}$), 在 11 月时胞内电阻率 r_i 与抗寒性也呈显著负相关 ($r = -0.857^{**}$), 表明在非冷冻条件下可采用枝条的电阻率 r 和 r_1 、胞外电阻率 r_e 、弛豫时间 τ 估测苹果砧木实生后代枝条的抗寒性。通过比较 3 个时期各参数的最终通径系数, 得出 r_e 为估测枝条抗寒性最佳的参数。

关键词: 苹果; 砧木; 实生后代; 电阻抗图谱; 抗寒性; 电阻; 弛豫时间

中图分类号: S 661.1

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2011) 06-1045-07

Relation Between Electrical Impedance Spectroscopy Parameters and Frost Hardiness in Shoots of Apple Rootstocks

JIN Ming-li, XU Ji-zhong*, and ZHANG Gang

(College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: The 18 two-year-old seedlings of the apple rootstocks (*Malus micromalus* Makino) were used to analyse the relation between non-frost-exposed electrical impedance spectroscopy (EIS) parameters and frost hardiness (LT_{50} measured by the electrolyte leakage) in shoots of apple rootstocks. Results showed that the high-frequency resistances (r) and low-frequency resistances (r_1), extracellular resistance (r_e), as well as relaxation time (τ) significantly correlated with the frost hardiness (r from -0.737^{**} to -0.877^{**}) in three different periods (March, July and November), and intracellular resistance (r_i) had significant correlation with the frost hardiness ($r = -0.857^{**}$) in November. The results suggested that these EIS parameters could be used to evaluate the frost hardiness of apple seedling rootstocks shoots without exposure to artificial freezing and according to path coefficient of every parameter in the three periods, r_e was the best parameter.

Key words: apple; rootstock; seedling plant; electrical impedance spectroscopy (EIS); frost hardiness; resistance; relaxation time

筛选抗寒性强的种质是果树抗寒性育种的主要目标, 其中寻找适宜、快速评价试材抗寒性的方

收稿日期: 2011-04-08; 修回日期: 2011-06-01

基金项目: 河北省科技厅科技攻关项目 (01820196D)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: xjzhxw@126.com)

法是研究的主要内容之一。评价抗寒性的方法很多，包括电导法、褐变法、恢复生长法等，其中应用最广泛的为电导法，一些研究者认为电导法与褐变法测定结果一致（贺普超和晁无疾，1982；朱根海 等，1986；贺普超和牛立新，1989；牛立新和贺普超，1993；高爱农 等，2000）。电阻抗图谱法（electrical impedance spectroscopy, EIS）是 20 世纪 80 年代发展的测定植物抗寒性的方法，其应用领域正在不断扩大（Ackmann & Seitz, 1984；Repo et al., 1994；Burr et al., 2001），但在苹果上还未见报道。

本试验在应用电导法测定苹果砧木实生后代枝条抗寒性的基础上，测定了不经冷冻处理砧木枝条的 6 个 EIS 参数（弛豫时间 τ 、弛豫时间的分布系数 ψ 、极高频电阻率 r 和低频电阻率 r_1 、胞外电阻率 r_e 和胞内电阻率 r_i ），并对其与抗寒性的关系进行了研究，旨在找到评价苹果抗寒性的简便方法，完善和丰富电阻抗图谱法测定植物抗寒性的技术。

1 材料与方

1.1 试验材料

试材取自河北农业大学标本园苹果砧木保存圃，试材共计 18 株，均为西府海棠（*Malus micromalus* Makino）实生后代，树龄 2 年。

分别于 2009 年 3 月 20 日、7 月 20 日和 11 月 20 日取样，每次从每株砧木上随机剪取 3 根一年生枝条或新梢用于测定。

1.2 电导法（EL）测定冷冻枝条半致死温度

参照张钢等（2005）的方法，将所采样品用清水清洗，再用去离子水清洗 3 遍。分别装于封口袋中，每袋两个枝段。袋中喷少量去离子水，以免材料发生过冷。使用变温冰箱进行温度处理。为了求样品的半致死温度，设 6 个不同梯度的冷冻处理温度（表 1），获得电导率随不同冷冻温度处理的 S 变化曲线，即 Logistic 方程。降温速率为 $6\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ ，至设定温度时保持 12 h。以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温处理的枝条为对照。处理完毕的枝条再升温到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ （升温速率同降温速率），静置 8 h 后，以同样速率缓慢升至室温。解冻后的枝条置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 24 h 后用于抗寒性测定。

参照 Wilner（1959）的方法，选择直径相近的枝条中部，切成 15 mm 的小段，置于盛有 30 mL 超纯水的试管中，测出初电导值 E_1 和终电导值 E_2 。配合 Logistic 方程拟合求出该曲线出现拐点时的温度，可以得出各自测定的抗寒性。

表 1 3 次冷冻处理测定抗寒性所设温度
Table 1 The temperatures used for determining frost hardiness (FH) in 3 controlled freezing test

采样日期/M - D	Sample date	温度/ $^{\circ}\text{C}$	Temperature					
03 - 20		4	- 10	- 15	- 20	- 25	- 30	- 35
07 - 20		4	- 5	- 10	- 15	- 20	- 25	- 30
11 - 20		4	- 15	- 20	- 25	- 30	- 35	- 45

1.3 电阻抗图谱法（EIS）测定枝条抗寒性

取砧木实生后代的枝条，除去芽和叶片后，从中部切取 15 mm 用于电阻抗测定。参照 Zhang 等（2002）的方法，测定样本在 42 个频率下的电阻值和电抗值。测定频率为 $80\text{ Hz} \sim 1\text{ MHz}$ 。以上频率下测定的样本电阻和电抗值分别作为实部和虚部，作出电阻和电抗随频率的变化曲线，即 EIS。

根据样本的 EIS 确定适用的等效电路。植物等效电路的确定一般分为两种类型：集总模型和分布模型。苹果砧木实生后代的枝条的 EIS 图谱为单弧，用单 - DCE (distributed circuit element) 模型 (属于分布模型) (Zhang et al., 2002)。等效电路参数用 LEVM 8.06 (Macdonald JR) 软件 (Repo et al., 1994) 进行拟合。电抗及胞内电阻和胞外电阻的计算参照 Repo 等 (2000) 的公式。

1.4 统计分析

EL 法测定抗寒性，用 Microsoft Excel 2003 计算相对电导值 E ，作图，参照 Logistic 方程，用 SPSS 17.0 软件计算抗寒性。用 SPSS 17.0 对不经冷冻处理枝条的 EIS 参数与 EL 法求出的抗寒性指标进行回归分析，相关性及通径分析，给出线性相关系数 r 和通径系数。

2 结果与分析

2.1 苹果砧木枝条的电阻抗图谱的变化

电阻抗图谱中弧大小的变化说明在不同时期植物的解剖结构及生理生化特性发生改变。苹果砧木实生后代枝条的电阻抗图谱始终只出现一个弧，而且 3 月、7 月和 11 月的图谱形状有显著变化 (图 1)。7 月的弧小于 3 月和 11 月，表明在 7 月生长季节植物的抗寒性弱，11 月和 3 月植物器官的阻抗增加，抗寒性增强，说明用 EIS 参数可以反映植物抗寒性的季节变化。

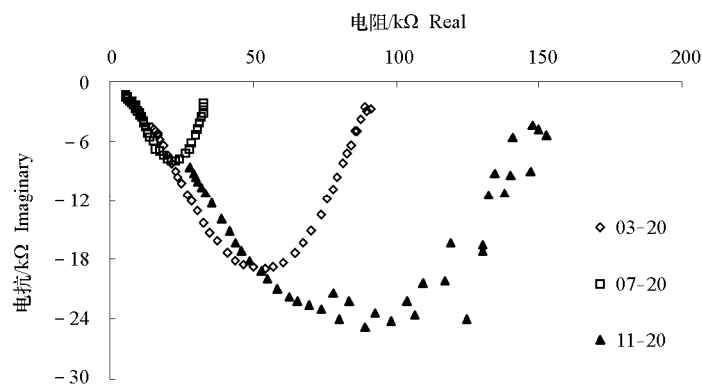


图 1 不同时期未冷冻苹果砧木的电阻抗图谱

从左至右，从 80 Hz 到 1 MHz 共 42 个频率。

Fig. 1 Impedance spectra of non-frost-exposed apple seedling rootstocks

The spectra are the pooled data of composed of 42 different frequencies ranging from 80 Hz to 1 MHz, from left to right, respectively.

2.2 苹果砧木枝条的电阻抗参数的变化

苹果砧木枝条的电阻抗图谱所有参数从 3 月到 11 月都发生了变化 (表 2)。其中参数 r 、 r_1 、 r_e 、 r_i 的变化均是 3 月到 7 月呈下降趋势，从 7 月到 11 月呈上升趋势，例如，18 株试材电阻率 r 的平均值，3 月时为 $10.936 \Omega m$ ，7 月为 $6.307 \Omega m$ ，11 月为 $8.810 \Omega m$ 。弛豫时间 τ 和弛豫时间分布系数 ψ 的变化趋势相近，都是从 3 月到 7 月呈上升趋势，从 7 月到 11 月呈下降趋势。 τ 在 3 月的平均值为 29.347，7 月为 105.74，11 月为 9.148。

表 2 未经冷冻处理苹果砧木枝条的 EIS 参数与电导法 (EL) 测定抗寒性的相关分析

Table 2 The correlation analysis of the frost hardness in non-frost-exposed apple seedling rootstocks shoots measured by the electrolyte leakage (EL) method and the parameters of EIS

单株编号 No.	抗寒性 (半致死温度) / $^{\circ}\text{C}$ Frost hardness (LT_{50})			$r/\Omega\text{m}$			$r_1/\Omega\text{m}$		
	03 - 20	07 - 20	11 - 20	03 - 20	07 - 20	11 - 20	03 - 20	07 - 20	11 - 20
1	-18.05	-10.28	-20.15	4.99	6.45	6.19	51.8	47.5	35.8
2	-20.6	-10.21	-21.24	17.09	6.68	5.92	94.54	37.03	38.84
3	-18.23	-10.03	-23.93	4.97	5.52	9.21	57.97	36.87	44.49
4	-19.33	-10.27	-25.02	14.01	6.81	5.98	81.06	48.51	51.7
5	-20.4	-10.22	-25.03	10.72	8.51	7.8	91.94	40.48	50.5
6	-20.74	-10.23	-25.05	13.01	6.36	8.65	102.27	39.22	51.99
7	-9.73	-10.21	-25.07	1.12	6.68	8.42	33.64	38.24	50.51
8	-20.04	-10.33	-25.1	17.51	7.24	8.35	76.47	45	59.76
9	-19.75	-10.37	-25.1	15.1	7.28	8.4	64.91	47.82	60.2
10	-19.31	-10.23	-25.11	11.37	6.32	9.4	78.99	39.33	60.15
11	-22.39	-9.21	-27.22	21.27	5.46	9.05	149.8	33.97	63.79
12	-21.18	-10.28	-27.22	11.27	6.86	9.09	107.8	47.33	64.43
13	-20.28	-9.09	-27.22	10.88	5.67	10.2	82.11	33.38	64.53
14	-19.82	-10.14	-27.22	11.21	6.29	10.2	74.34	37.76	56.2
15	-18.62	-8.59	-28.16	8.39	4.42	9.35	65.33	32.52	64.45
16	-19.26	-8.98	-30.11	11.8	5.25	9.69	76.01	32.75	57.15
17	-15.72	-10.26	-30.11	2.04	6.47	10.26	46.56	37.82	69.94
18	-19.75	-9.52	-35	10.1	5.28	12.42	73.35	31.57	72.66
R^2				0.75	0.78	0.78	0.83	0.82	0.74
r				-0.78**	-0.84**	-0.84**	-0.78**	-0.74**	-0.85**
通径系数 Path coefficient				0.194	-0.269	-0.269	-0.079	-0.258	0.211

单株编号 No.	$r_1/\Omega\text{m}$			$r_2/\Omega\text{m}$			ψ			$\tau/\mu\text{s}$		
	03 - 20	07 - 20	11 - 20	03 - 20	07 - 20	11 - 20	03 - 20	07 - 20	11 - 20	03 - 20	07 - 20	11 - 20
1	20.17	8.08	6.88	39.62	52.88	38.20	0.51	0.54	0.47	19.38	112.22	4.39
2	0.58	8.92	9.39	106.31	55.13	43.09	0.64	0.62	0.42	35.40	122.49	5.52
3	13.16	8.74	8.70	46.35	48.10	52.03	0.49	0.54	0.46	19.62	82.35	5.75
4	10.84	6.23	10.75	93.09	47.51	61.86	0.54	0.62	0.44	25.31	106.97	4.36
5	27.48	10.36	8.28	71.45	53.49	65.05	0.57	0.58	0.49	38.37	132.20	4.89
6	12.78	7.75	9.62	112.28	45.59	62.79	0.57	0.60	0.53	46.84	120.09	5.01
7	9.63	9.53	9.63	20.62	46.14	62.01	0.31	0.58	0.48	10.97	87.91	7.01
8	12.32	9.72	10.29	132.42	52.24	68.12	0.51	0.60	0.43	33.59	135.96	7.99
9	11.16	6.46	11.78	93.58	62.67	69.34	0.53	0.61	0.48	23.13	147.38	8.30
10	0.31	7.51	13.10	93.58	39.64	71.45	0.54	0.59	0.49	25.36	181.48	9.65
11	15.06	7.13	13.27	108.27	36.37	72.29	0.62	0.68	0.50	53.12	77.34	9.61
12	2.97	7.11	12.89	76.49	48.86	75.57	0.59	0.62	0.54	48.48	116.76	11.43
13	15.95	7.66	12.84	92.98	35.13	65.26	0.54	0.54	0.50	39.75	74.40	10.14
14	11.30	7.16	12.05	75.08	37.37	66.40	0.59	0.58	0.47	27.84	101.64	7.74
15	3.03	7.68	13.57	65.15	28.93	67.80	0.51	0.48	0.48	18.91	48.79	9.95
16	12.88	7.08	13.25	92.87	31.32	76.53	0.53	0.50	0.52	20.25	50.14	14.67
17	16.32	8.01	12.33	37.33	43.77	71.20	0.47	0.63	0.44	16.72	131.08	19.10
18	10.82	7.74	16.32	71.32	37.49	86.39	0.55	0.53	0.51	25.21	74.12	19.16
R^2	0.032	0.13	0.76	0.80	0.84	0.82	0.92	0.83	0.11	0.77	0.87	0.76
r	-0.006	-0.232	-0.86**	-0.75**	-0.81**	-0.88**	-0.93**	-0.54**	-0.32	-0.74**	-0.80**	-0.87**
通径系数 Path coefficient	-0.116	-0.125	-0.147	-0.395	-0.261	-0.496	-0.772	0.098	0.047	0.006	-0.382	-0.37

注: ** $P < 0.01$ 。 R^2 . 决定系数; r . 相关系数。Note: ** Correlation is significant at the 0.01 level. R^2 . Determination coefficient; r . Correlation coefficient.

2.3 苹果砧木枝条 EIS 参数与其抗寒性的相关性

应用电导法测定的枝条半致死温度见表 2。由表 2 可以看出, 18 株试材 3 月的半致死温度在 $-9.73 \sim -22.39$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 7 月的半致死温度在 $-8.59 \sim -10.37$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 11 月半致死温度在 $-20.15 \sim -35.00$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内。

应用统计分析方法对枝条冷冻半致死温度和未冷冻电阻抗参数的关系进行了研究, 由表 2 可见在 3 个测定时间下电阻率 r 、 r_1 , 胞外电阻率 r_e 和弛豫时间 τ 均与抗寒性呈极显著负相关 ($R^2 = 0.74^{**} \sim 0.87^{**}$, $r = -0.737^{**} \sim -0.877^{**}$)。而胞内电阻率 r_i 在 3 月和 7 月与抗寒性不存在相关性 ($R^2 = 0.032 \sim 0.013$, $r = -0.006 \sim -0.232$), 在 11 月与抗寒性呈极显著负相关。弛豫时间分布系数 ψ 在 3 月和 7 月与抗寒性呈极显著的负相关, 在 11 月与抗寒性不相关, 这个试验结果与前人研究结果不同, 可能是由于树种不同所致。

未经冷冻处理枝条的 6 个电阻抗参数对枝条抗寒性 (半致死温度) 的影响各不相同 (表 2)。3 月弛豫时间分布系数 ψ 的影响力最大, 通径系数的绝对值达到了 0.772, 弛豫时间 τ 影响力最小, 通径系数的绝对值仅为 0.006; 7 月弛豫时间 τ 的影响力最大, 通径系数的绝对值为 0.382, 电阻率 r 的影响力最小, 通径系数的绝对值为 0.033; 11 月时胞外电阻率 r_e 的影响力最大, 通径系数的绝对值为 0.496, 弛豫时间分布系数 ψ 影响力最小, 通径系数的绝对值为 0.047。电阻抗参数对苹果砧木实生后代枝条抗寒性的相对重要性按 3 个时期直接通径系数之和 (许中坚 等, 2002) 的绝对值从大到小排序为: r_e (1.152)、 τ (0.746)、 ψ (0.627)、 r_i (0.388)、 r_1 (0.124) 和 r (0.108)。

综合不同时期未经冷冻处理的 6 个电阻抗参数与抗寒性的相关系数和通径系数, 胞外电阻率 r_e 和弛豫时间 τ 对苹果砧木枝条抗寒性影响较大。

3 讨论

3.1 枝条电阻抗参数与抗寒性

本试验中未经冷冻处理的苹果砧木实生后代枝条电阻抗图谱的弧始终为单弧, 与 Repo 等 (2000) 在欧洲赤松 (*Pinus sylvestris* P.) 茎上的研究结果有所不同, 后者的结果表明, 温度较高时 (如在 8 月初), 欧洲赤松茎的 EIS 图谱有两个弧, 随着温度的降低 (如在 11 月末) 趋向于一个弧。分析原因, 可能与树种不同有关系, 欧洲赤松为针叶树种, 苹果砧木为阔叶树种, 其他类似的研究报道也表明一般阔叶树种的 EIS 弧是单弧 (刘辉和张钢, 2008)。

枝条抗寒性较强时的 EIS 弧大于抗寒性较弱时的 EIS 弧, 随着抗寒性的增强, 在相同频率下电抗值降低, 电阻值增大。这与 Repo 等 (2000) 在欧洲赤松茎上发现低频弧和高频弧的比例随抗寒性的变化而改变的研究结果相同。

本试验中, 7 月是植物抗寒能力最差的时期, 在这个时期, 砧木的电阻率 r_x (r 、 r_1 、 r_e 、 r_i), 达到最小值, 弛豫时间 τ 和弛豫时间分布系数 ψ 达到最大值。因为植物的抗寒性与植物体内含水量高度相关 (刘辉和张钢, 2008), 体内含水量增加, τ 和 ψ 会随之增加, 电阻率 r_x 会随之减低。11 月和 3 月, 苹果砧木经过了一段时间的低温, 抗寒性逐渐提高, 枝条细胞会合成某种蛋白或者可溶性糖含量会增加 (董胜豪 等, 2009), 蛋白和糖是低流动性电解质, 其含量的增加提高了细胞液浓度, 这就导致了细胞质电阻的提高。对欧洲赤松 (Repo et al., 2000; Zhang et al., 2003)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、鸟爪三叶草 (*Lotus corniculatu* T.) (Stout, 1988a; 1988b) 和蒿柳 (*Salix viminal* L.) (Repo et al., 1998) 的研究结果也表明, 胞内电阻率 r_i 随抗寒锻炼进程而提高。

3.2 利用枝条电阻抗参数估测抗寒性

研究人员已经在欧洲赤松茎的 EIS 分析中发现, 分布模型的等效电路参数经历季节变化, 一些测定的电阻抗参数在不同季节显示的变化与抗寒性的变化相吻合 (Stout, 1988b; Repo et al., 2000; Zhang et al., 2002, 2003)。近年来在对欧洲赤松、蒿柳和杜鹃 (*Rhododendron simsii* R.) 等几个树种的研究中发现, 不经冷冻处理的样品的某些参数变化与样品冷冻处理后估测的抗寒性明显相关, 弛豫时间 τ 及胞内电阻率 r_i 与抗寒性的相关最高。研究结果显示, τ 和 r_i 均随抗寒性的增强而提高 (Repo et al., 1998, 2000; Vainola & Repo, 2000; Zhang et al., 2003)。

在本试验中, 在样品不经冷冻处理情况下, 苹果实生砧木枝条的 6 个 EIS 参数与抗寒性呈负相关性, 其中苹果实生砧木枝条的弛豫时间 τ , 电阻率 r 、 r_i 及胞外电阻率 r_e 与电导法测定的抗寒性显著负相关 ($r = -0.737^{**} \sim -0.877^{**}$), 所以, 除了弛豫时间 τ , 电阻率 r 、 r_i 和胞外电阻率 r_e 也可以作为预测苹果砧木实生后代枝条抗寒性参数。通过电阻抗参数对抗寒性的通径分析, 可以得出, r_e 在影响苹果砧木实生后代枝条抗寒性中占主导地位, 这对在生产中快速估测抗寒性, 及早采取相应防寒措施有重要指导意义。

References

- Ackmann J J, Seitz M A. 1984. Methods of complex impedance measurements in biological tissue. *CRC Crit Rev Biomed Eng*, 11, 281 - 311.
- Burr K E, Hawkins C D B, L'Hirondelle S J, Binder W D, George M F, Repo T. 2001. Methods for measuring cold hardiness of conifers // *Bigras F J, Colombo S J. Conifer cold hardiness*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers: 369 - 401.
- Dong Sheng-hao, Zhang Gang, Que Shu-peng, Zhu Liang, Jin Xiu-mei. 2009. Response of parameters of electrical impedance spectroscopy to the content of soluble sugar and starch in *Pinus bungeana* Zucc. during cold acclimation. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (6): 891 - 897. (in Chinese)
- 董胜豪, 张 钢, 阙书鹏, 祝 良, 靳秀梅. 2009. 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. *园艺学报*, 36 (6): 891 - 897.
- Gao Ai-nong, Jiang Shu-rong, Zhao Xi-wen, Deng Ji-guang, Sha Shou-feng, Liu Zhi, Zhang Min. 2000. Study on the hardness of apple cultivars. *Journal of Fruit Science*, 17 (1): 17 - 21. (in Chinese)
- 高爱农, 姜淑荣, 赵锡温, 邓继光, 沙守峰, 刘 志, 张 敏. 2000. 苹果品种抗寒性测定方法的研究. *果树科学*, 17 (1): 17 - 21.
- He Pu-chao, Chao Wu-ji. 1982. Analysis on hardness of wild vitis species. *Acta Horticulturae Sinica*, 9 (3): 17 - 21. (in Chinese)
- 贺普超, 晁无疾. 1982. 我国葡萄属野生种质资源的抗寒性分析. *园艺学报*, 9 (3): 17 - 21.
- He Pu-chao, Niu Li-xin. 1989. Study on the hardness of wild vitis species. *Acta Horticulturae Sinica*, 16 (2): 81 - 87. (in Chinese)
- 贺普超, 牛立新. 1989. 我国葡萄属野生种抗寒性的研究. *园艺学报*, 16 (2): 81 - 87.
- Liu Hui, Zhang Gang. 2008. The influence of short-day on the frost hardiness and electrical impedance spectroscopy parameters in stems of *Ligustrum vicaryi* during hardening. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 23 (2): 173 - 179. (in Chinese)
- 刘 辉, 张 钢. 2008. 短日照对金叶女贞茎抗寒性和电阻抗参数图谱参数的影响. *华北农学报*, 23 (2): 173 - 179.
- Niu Li-xin, He Pu-chao. 1993. Comparison of three methods for examination of grape hardness. *Viticulture and Wine*, (2): 5 - 7. (in Chinese)
- 牛立新, 贺普超. 1993. 葡萄抗寒性三种鉴定方法的比较研究. *葡萄栽培与酿酒*, (2): 5 - 7.
- Repo T, Leinonen M, Paakkonen T. 1998. Electrical impedance analysis of shoots of Scots pine: Intracellular resistance correlates with frost hardiness // *Proceedings of the Finnish-Japanese Workshop on Molecular and Physiological Aspects of Cold and Chilling Tolerance of Northern Crops*. Jokioinen, Finland: 27 - 30.
- Repo T, Zhang Gang, Ryyppö A. 1994. Effects of freeze-thaw injury on parameters of distributed electrical circuits of stems and needles of Scots pine seedlings at different stages of acclimation. *Journal of Experimental Botany*, 45: 823 - 833.
- Repo T, Zhang Gang, Ryyppö A. 2000. The electrical impedance spectroscopy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) shoots in relation to cold acclimation. *Journal of Experimental Botany*, 51: 2095 - 2107.
- Stout D G. 1988a. Effect of cold acclimation on bulk tissue electrical impedance. I. Measurements with birds foot trefoil at subfreezing temperatures. *Plant Physiology*, 86: 275 - 282.

- Stout D G. 1988b. Effect of cold acclimation on bulk tissue electrical impedance. II. Measurements with alfalfa and birds foot trefoil at nonfreezing temperatures. *Plant Physiology*, 86: 283 - 287.
- Vainola A, Repo T. 2000. Impedance spectroscopy in frost hardiness evaluation of rhododendron leaves. *Annals of Botany*, 86: 799 - 805.
- Wilner J J. 1959. Note on an electrolytic procedure for differentiating between frost injury of roots and shoots in woody plants. *Canadian Journal of Plant Science*, 39: 512 - 513.
- Xu Zhong-jian, Li Ke-bin, Liu Guang-shen, Liu Wei-ping. 2002. Path coefficient analysis of the relationship between major ions in acid rain in China and pH. *Journal of Xiangtan Mining Institute*, 17 (2): 44 - 48. (in Chinese)
- 许中坚, 李克斌, 刘广深, 刘维平. 2002. 通径系数法分析中国酸雨中主要离子与 pH 值的关系. *湘潭矿业学院学报*, 17 (2): 44 - 48.
- Zhang Gang, Ryppö A, Repo T. 2002. The electrical impedance spectroscopy of Scots pine needles during cold acclimation. *Physiologia Plantarum*, 115: 385 - 392.
- Zhang Gang, Ryppö A, Vapaavuori E. 2003. Quantification of additive response and stationarity of frost hardiness by photoperiod and temperature in Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 1772 - 1784.
- Zhang Gang, Xiao Jian-zhong, Chen Duan-fen. 2005. Determination of cold hardiness of electrical impedance spectroscopy. *Journal of Plant Physiology and Molecular*, 31 (1): 19 - 26. (in Chinese)
- 张 钢, 肖建忠, 陈段芬. 2005. 测定植物抗寒性的电阻抗图谱法. *植物生理与分子生物学学报*, 31 (1): 19 - 26.
- Zhu Gen-hai, Liu Zu-qi, Zhu Pei-ren. 1986. Study on Logistic Equation for low lethal temperature in plant tissue. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 9 (3): 12 - 16. (in Chinese)
- 朱根海, 刘祖祺, 朱培仁. 1986. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究. *南京农业大学学报*, 9 (3): 12 - 16.

欢迎订阅 2011 年《园艺学报》

《园艺学报》是中国园艺学会和中国农业科学院蔬菜花卉研究所主办的学术期刊, 创刊于 1962 年, 刊载有关果树、蔬菜、观赏植物、茶及药用植物等方面的学术论文、研究报告、专题文献综述、问题与讨论、新技术新品种以及园艺研究动态与信息, 适合园艺科研人员、大专院校师生及农业技术推广部门专业技术人员阅读参考。

《园艺学报》是全国中文核心期刊, 被英国《CAB 文摘数据库》、美国 CA 化学文摘、日本 CBST 科学技术文献速报、俄罗斯 AJ 文摘杂志、CSCD 中国科学引文数据库等多家重要数据库收录。《园艺学报》2005 年荣获第三届国家期刊奖, 2008 年获中国科技信息所“中国精品科技期刊”称号及武汉大学中国科学评价研究中心“中国权威学术期刊”称号, 2009 年获中国期刊协会和中国出版科学研究所“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。根据“中国学术期刊影响因子年报(2010 版)”, 《园艺学报》期刊综合总被引频次 4 699, 复合总被引频次 12 283, 期刊综合影响因子 1.069, 复合影响因子 1.910。

《园艺学报》为月刊, 每月 25 日出版。2011 年每期定价 40.00 元, 全年 480.00 元。国内外公开发行, 全国各地邮局办理订阅, 国内邮发代号 82 - 471, 国外发行由中国国际图书贸易总公司承办, 代号 M448。漏订者可直接寄款至本编辑部订购。

编辑部地址: 北京市海淀区中关村南大街 12 号 中国农业科学院蔬菜花卉研究所《园艺学报》编辑部;

邮政编码: 100081; 电 话: (010) 82109523。

E-mail: yuanyixuebao@126.com。网址: <http://www.ahs.ac.cn>。