

4 个白杨派新无性系抗寒性鉴定和综合评价

曹佳乐, 延 娜, 樊军锋*, 周永学, 高建设

(西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:以西北农林科技大学选育的意大利银白杨(I-101)×毛白杨 4 个优良杂种无性系和 84k、I-101、新疆杨和毛白杨 30 号 4 个对照无性系的 1 年生休眠苗为试验材料, 对其进行低温处理, 以常温(CK)为对照, 设置 5 个温度梯度: -10、-15、-20、-25℃和 -30℃, 低温冷冻处理 24 h, 研究 8 个白杨无性系 1 年生枝条生理生化指标的变化, 包括半致死温度、丙二醛(MDA)、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性 5 个指标, 并利用隶属函数法对 8 个无性系的抗寒性进行评价。结果表明: 各无性系间抗寒性差异明显, 抗寒性强弱表现为‘03-4-22’> 84k > I-101 > 新疆杨>‘03-5-17’>毛白杨 30 号 >‘03-6-11’>‘03-4-9’; 研究认为无性系‘03-4-22’在 5 个抗寒指标综合评价结果中表现最好, 属于抗寒无性系, 可为白杨派优良新品种的选育、推广提供理论依据。

关键词: 白杨派; 半致死温度; 隶属函数法; 抗寒能力

中图分类号: S792.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2016)02-0130-05

Determination and Comprehensive Evaluation on Cold-tolerance of Four New Populus Clones

CAO Jia-le, YAN Na, FAN Jun-feng*, ZHOU Yong-xue, GAO Jian-she

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Taking four hybrid clones of I-101×*Populus tomentosa* bred by Northwest A&F University and four control clones (84k, I-101, *P. alba*, *P. tomentosa* No. 30) as experimental materials, we studied the changes of dehydration rate, LT₅₀, MDA, soluble protein contents, SOD and POD activities after the plants were treated under a series of low temperatures (10, 15, 20, 25, 30℃, ambient temperature as control) for 24 h, aimed to analyze the differences of eight kinds of *Populus* species in cold resistance by using membership function method. There were obvious differences among the clones in the ability of cold resistance. The order was ‘03-4-22’>84k>I-101>*Populus alba*>‘03-5-17’>*Populus tomentosa* No. 30>‘03-6-11’>‘03-4-9’. Clone ‘03-4-22’ showed the best resistance to cold stress among the five evaluated indicators, which could provide a theoretical basis for the new breeding of *Populus*.

Key words: *Populus*; semi-lethal temperature(LT₅₀); membership function method; cold resistance

白杨派树种速生丰产, 生态效能好, 是西北地区造林绿化的重要树种之一, 同大多数树种一样其分布范围和栽培区域受寒冷、干旱气候条件的制约^[1]。因此抗寒性在白杨优良品种选育中具有重要意义。对植物生长不利的环境主要影响植物细胞酶活性、细胞膜通透性等, 间接影响到植物体内的正常代谢。为适应不良环境造成的伤害, 植物体内会产生一系

列复杂的生理生化反应来提高植物对恶劣环境的抗性。众多研究者已证实依据低温胁迫下植物体内生理生化指标的变化来评价不同植物的抗寒性具有一定的科学意义^[2-3]。近年来多采用测定多个抗寒指标, 并采用模糊数学隶属函数法将各指标进行综合分析, 以其试验结果更加准确^[4-5]。以西北农林科技大学林学院经多年筛选的白杨派 4 个优良杂种无性

收稿日期: 2015-06-05 修回日期: 2015-09-11

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201404113)。

作者简介: 曹佳乐, 女, 在读硕士, 研究方向: 林木遗传育种林业生物技术。E-mail: 18829785829@163.com

* 通信作者: 樊军锋, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 杨树新品种选育及油松遗传改良。E-mail: fanjf28@163.com

系为供试材料,采用人工低温胁迫的方法研究其枝条在低温条件下 5 个生理生化指标的变化特征,应用隶属函数法对各指标进行综合评价,并求出各无性系的半致死温度,比较各无性系抗寒性强弱,以期 为白杨派优良新品种的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验以西北农林科技大学经多年筛选的意大利银白杨(I-101)×毛白杨 4 个优良杂种无性系为供试树种,编号分别为‘03-4-9’、‘03-4-22’、‘03-5-17’、‘03-6-11’,以 84k、新疆杨、I-101 和毛白杨 30 号为对照种。8 个样本于 2015 年 12 月下旬取自西北农林科技大学渭河试验站苗圃,选各无性系无病虫害的 1 年生休眠苗 5 株、取地径约 2 cm 以上枝条。

1.2 试验处理

用自来水将采集的的枝条冲洗干净后剪成 15~20 cm 的枝段,再用去离子水漂洗 3~5 次,用滤纸吸干,分 6 组分装好,置于超低温冰箱中低温胁迫处理。设定 5 个温度梯度:−10、−15、−20、−25℃ 和 −30℃,并以常温(CK)为对照。在既定温度下处理 24 h。

1.3 测定方法

1.3.1 相对电导率的测定 随机抽取 3 根低温处理后的各无性系枝条,用去离子水冲洗 3 次,滤纸吸干,切成 0.5 cm 长小段,各称取约 1 g,分别置于三角瓶中,加入去离子水 25 mL,封口膜封口,于摇床上 25℃ 振荡浸提 12 h,之后用电导率仪测定各样品浸提液初始电导值;之后将样品浸提液在沸水浴中加热 35 min,冷却后测定其电导率作为终电导值。

表 1 低温处理下各无性系的 Logistic 方程及其半致死温度

Table 1 Logistic equation of eight poplar clones under different low temperatures and estimation of LT₅₀

无性系	回归方程	半致死温度/℃ LT ₅₀	拟合度 R ²	排序
84k	$y=101.502\ 9/(1+6.597\ 6e^{-0.059\ 4x})$	−31.76 f	0.994 **	2
I-101	$y=99.411\ 7/(1+6.282\ 8e^{-0.064\ 3x})$	−28.59 e	0.988 **	3
毛白杨 30 号	$y=97.153\ 7/(1+5.566\ 9e^{-0.069\ 5x})$	−24.69 c	0.996 **	5
新疆杨	$y=102.671\ 6/(1+8.316\ 4e^{-0.079\ 2x})$	−26.75 d	0.978 **	4
‘03-4-9’	$y=90.659\ 8/(1+6.754\ 1e^{-0.105\ 3x})$	−18.13 a	0.996 **	8
‘03-4-22’	$y=100.579\ 1/(1+7.090\ 8e^{-0.057\ 7x})$	−33.95 g	0.992 **	1
‘03-5-17’	$y=100.689\ 1/(1+6.061\ 5e^{-0.068\ 3x})$	−26.38 d	0.992 **	6
‘03-6-11’	$y=99.671\ 9/(1+7.046\ 8e^{-0.089\ 4x})$	−21.85 b	0.997 **	7

注: *、** 分别表示拟合度达显著或极显著水平;同列数据后标不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。表 2~表 6 同。

2.2 低温处理下各无性系的 MDA 含量变化

丙二醛含量是反映膜系统受伤害程度的重要指标^[10]。由表 2 可知,随着温度的降低,8 个无性系的 MDA 含量均出现先升高后下降的趋势,但含量高低差异显著,达到峰值时各无性系含量在 2.12~

三角瓶在整个处理过程中均以封口膜封口,以保持水量不变^[6]。

1.3.2 生理生化指标的测定 分别采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,愈创木酚显色法测定过氧化物酶(POD)活性,巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量,考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量^[7],各无性系重复 3 次。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 进行处理、作图,并根据隶属函数法综合各项指标进行抗寒性评价;以不同温度处理下的相对电导率拟合 Logistic 方程,用 SPSS 13.0 分析确定低温半致死温度;采用 DPS 7.05 完成数据的差异显著性测验。

2 结果与分析

2.1 低温处理下各无性系的半致死温度(LT₅₀)

根据相对电导率的改变结合回归方程,求出各无性系的半致死温度^[8-9](表 1)。8 个白杨派无性系的半致死温度差异极显著。根据该结果可将此 8 个无性系抗寒性大致分为 3 类:第 1 类为抗寒性最强的,LT₅₀在 −28℃ 以下,包括无性系‘03-4-22’、84k 和 I-101;第 2 类为抗寒性较强的,LT₅₀在 −26℃ 左右,包括毛白杨 30 号、新疆杨和‘03-5-17’;第 3 类为抗寒性较弱的,LT₅₀在 −20℃ 左右,包括无性系‘03-4-9’和‘03-4-11’。

各无性系按 LT₅₀从低到高的顺序依次为:‘03-4-22’> 84k > I-101 > 新疆杨> ‘03-5-17’> 毛白杨 30 号> ‘03-6-11’> ‘03-4-9’。其中无性系‘03-4-22’的 LT₅₀最低,抗寒性最强;无性系‘03-4-9’的 LT₅₀最高,抗寒性最弱。

3.00 mmol·g^{−1} 范围内;整个过程中毛白杨 30 号和‘03-4-9’的 MDA 含量增加迅速且含量较大,而‘03-4-22’MDA 含量增长较为缓慢且含量最低;与对照相比增幅最大为‘03-4-9’,上升了 2.57 倍,最小为‘03-4-22’,增幅为 1.43 倍。

2.3 低温处理下各无性系的抗氧化酶活性变化

SOD、POD 可有效清除因环境胁迫而累积的生物自由基,是植物体内的内源保护酶系统,因而在保护植物体免遭不利环境伤害具有重要作用^[10]。表 3 所示,在低温处理下各无性系枝条中的 SOD 活性变化趋势为先升高后降低,但它们达到峰值的温度不同,其中,‘03-4-9’SOD 活性在-20℃时达到最大值(251.29 U·g⁻¹),‘03-4-22’在-25℃时 SOD 酶活性达最大值(325.46 U·g⁻¹);在整个过程中‘03-4-9’SOD 活性均低于其他无性系,而‘03-4-22’相反,

均高于其他无性系,说明这 2 种无性系抗寒差异较大。

表 4 显示,8 个白杨无性系枝条中 POD 活性变化趋势与 SOD 活性变化趋势基本一致。在-20℃时‘03-4-9’达到 POD 活性峰值,含量为 8789.1 U·g⁻¹·min⁻¹。其余无性系在-25℃达到峰值,含量变化范围为 8 523~10 546 U·g⁻¹·min⁻¹,此时 POD 含量最大为‘03-4-22’,与对照相比增加了 92.1%,含量最小为‘03-5-17’,较对照增加了 40.2%。

表 2 低温处理对各无性系 MDA 含量的影响
Table 2 Effects of different temperature stresses on MDA content of different poplar clones (mmol·g⁻¹)

无性系	温度/℃					
	CK	-10	-15	-20	-25	-30
84k	0.96±0.01b	1.77±0.06a	1.98±0.06bc	2.20±0.07d	2.57±0.07d	2.23±0.06d
I-101	1.01±0.04a	1.67±0.05b	1.96±0.06c	2.30±0.07cd	2.63±0.06cd	2.37±0.07c
毛白杨 30 号	0.87±0.02d	1.58±0.05c	2.01±0.07b	2.66±0.05b	2.88±0.08b	2.12±0.05e
新疆杨	0.70±0.01f	1.44±0.05d	1.87±0.06d	2.13±0.07d	2.46±0.07e	2.36±0.06c
‘03-4-9’	0.84±0.01e	1.80±0.06a	2.13±0.07a	2.75±0.06a	3.00±0.05a	2.47±0.07b
‘03-4-22’	0.87±0.01de	1.33±0.04e	1.7±0.05f	1.92±0.05e	2.12±0.06f	1.93±0.06f
‘03-5-17’	0.91±0.002c	1.70±0.06b	1.98±0.07bc	2.37±0.07c	2.67±0.08c	2.54±0.08a
‘03-6-11’	0.98±0.01ab	1.43±0.04d	1.78±0.05e	2.23±0.04d	2.63±0.07cd	2.34±0.07c

表 3 低温处理对各无性系 SOD 活性的影响
Table 3 Effects of different temperature stresses on SOD activities of different poplar clones (U·g⁻¹)

无性系	温度/℃					
	CK	-10	-15	-20	-25	-30
84k	198±3.5a	233±4.7b	261±8.3b	299±7.5a	318±9.4bc	271±7.7bc
I-101	172±5.1b	208±7.2d	254±5.9bc	281±11.0bc	306±3.9b	264±10.7bc
毛白杨 30 号	160±8.0bc	241±2.5ab	265±8.1b	275±10.5c	281±8.7d	269±9.6b
新疆杨	169±7.0bc	226±5.0bc	266±7.7ab	289±5.2ab	306±3.1bc	263±7.9bc
‘03-4-9’	164±2.5bc	182±7.9e	205±5.2d	250±10.8d	224±6.5f	209±3.7e
‘03-4-22’	212±8.4a	254±8.3a	278±7.1a	301±9.8a	325±7.0a	296±9.5a
‘03-5-17’	156±2.5c	217±4.2cd	249±4.6c	278±10.4bc	301±3.7c	256±4.9c
‘03-6-11’	159±3.9bc	206±2.8d	253±5.7c	274±7.9c	250±9.7e	212±4.7d

2.4 低温处理下各无性系枝条可溶性蛋白含量变化

由表 5 可知,整个低温处理过程中,同一无性系的可溶性蛋白含量变化不明显,但不同无性系间差异显著。大部分无性系在-25℃时含量迅速上升,并达到整个处理过程的最大值,说明此温度对植物组织伤害较大,植株出现应激生理反应。其中上升幅度最大也是可溶性蛋白含量最高的是‘03-4-22’,为 15.41 mg·g⁻¹,增幅为 39.2%;‘03-4-9’和‘03-6-11’可溶性蛋白含量在-20℃时达到最大值,增幅较小,且在整个过程中含量较低,含量分别 9.11 mg·g⁻¹和 10.98 mg·g⁻¹,增幅分别为 16%和 17%。

2.5 各无性系的抗寒性综合评价

通常采用隶属函数法来评价植物的抗寒性,其隶属函数值的大小反应抗寒性的强弱^[11]。通过对 8 个白杨派无性系的 MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、可溶性蛋白含量及电解质渗出率 5 项指标综合分析发现,枝条的 SOD 活性、POD 活性、可溶性蛋白含量与各无性系的抗寒性呈正相关,丙二醛含量和电解质渗出率与其呈负相关;同时,隶属函数值(表 2)以‘03-4-22’最大(0.68),其次是 84k(0.67),‘03-4-9’的隶属函数值最小(0.39)。8 个白杨无性系的抗寒性强弱顺序为:‘03-4-22’>84k>I-101>新疆杨>‘03-5-17’>毛白杨 30 号>‘03-6-11’>

表 4 低温处理对各无性系 POD 活性的影响

Table 4 Effects of different temperature stresses on POD activities of different poplar clones (U · g ⁻¹ · min ⁻¹)						
无性系	温度/℃					
	CK	−10	−15	−20	−25	−30
84k	5 184±61e	7 720±80b	9 065±67a	9 592±67a	10 023±108b	9 834±97b
I-101	5 024±47f	7 953±57a	8 876±93a	9 600±79a	9 856±60b	9 098±77d
毛白杨 30 号	6 408±102a	7 032±60e	7 980±73c	8 675±65c	9 355±94c	8 977±71d
新疆杨	5 968±46bc	7 324±59d	8 566±96b	9 123±73b	9 567±99c	9 231±75c
‘03-4-9’	5 872±60c	7 824±86b	7 976±56c	8 789±85c	8 567±100d	7 832±85f
‘03-4-22’	5 489±71d	7 537±94c	8 446±97b	9 568±89a	10 546±55a	10 321±72a
‘03-5-17’	6 080±87b	6 880±65f	7 480±63d	8 288±56d	8 523±62d	8 007±95e
‘03-6-11’	6 088±66b	6 824±74f	8 032±95c	9 112±69b	9 376±98c	9 354±84c

表 5 低温处理对各无性系可溶性蛋白含量的影响

Table 5 Effects of different temperature stresses on soluble protein content of different poplar clones (mg · g ⁻¹)						
无性系	温度/℃					
	CK	−10	−15	−20	−25	−30
84k	12.56±0.41a	13.87±0.56ab	14.54±0.67ab	15.00±0.74ab	15.12±0.81ab	14.23±0.85b
I-101	12.18±0.42ab	12.94±0.26c	14.28±0.69ab	14.66±0.39ab	14.85±0.54ab	14.28±0.65b
毛白杨 30 号	12.12±0.28ab	13.06±0.40bc	13.55±0.80bc	14.45±0.32b	13.85±0.80c	12.91±0.45c
新疆杨	11.58±0.55bc	12.22±0.71c	13.21±0.25c	14.11±0.50b	14.78±0.85b	13.67±0.58bc
‘03-4-9’	7.83±0.70f	8.06±0.62f	8.83±0.72f	9.11±0.73e	8.43±0.63f	7.10±0.40f
‘03-4-22’	11.23±0.48c	14.01±0.22a	14.58±0.40a	15.34±0.80a	15.58±0.73a	15.30±0.39a
‘03-5-17’	10.32±0.24d	11.13±0.71d	12.08±0.62d	12.73±0.65c	12.89±0.60d	11.75±0.48d
‘03-6-11’	9.18±0.41e	10.03±0.68e	10.45±0.38e	10.98±0.62d	9.90±0.40e	9.08±0.51e

表 6 无性系各指标隶属函数值

Table 6 Analysis results of membet ship function values of cold resistance among different kinds of <i>Populus</i>								
项目	POD 活性	丙二醛含量	相对电导率	可溶性蛋白含量	SOD 活性	ΣT _{ij}	T _{ij}	抗寒能力顺序
84k	0.642 1	0.543 7	0.714 8	0.824 5	0.635 7	3.360 8	0.672 2	2
I-101	0.611 6	0.560 3	0.674 2	0.778 7	0.541 4	3.166 1	0.633 2	3
毛白杨 30 号	0.551 8	0.574 2	0.602 8	0.708 8	0.535 5	2.973 2	0.594 6	5
新疆杨	0.592 6	0.489 0	0.645 1	0.700 9	0.575 0	3.002 5	0.600 5	4
‘03-4-9’	0.504 5	0.636 7	0.479 2	0.053 4	0.294 7	1.968 5	0.393 7	8
‘03-4-22’	0.667 0	0.410 4	0.756 7	0.840 0	0.720 5	3.394 6	0.678 9	1
‘03-5-17’	0.456 2	0.577 3	0.620 6	0.514 4	0.513 8	2.682 3	0.536 5	6
‘03-6-11’	0.562 7	0.521 3	0.526 1	0.284 9	0.412 3	2.307 3	0.461 5	7

‘03-4-9’,该结果与通过建立 Logistic 方程而推算出的抗寒性强弱顺序基本吻合。

3 结论与讨论

相对电导率与植物组织在低温胁迫后细胞原生质膜受害程度呈正相关,依据相对电导率与温度的关系拟合 Logistic 方程,推算出植物的半致死温度(LT₅₀)被广泛用作植物抗寒性强弱评价的一个重要方法^[12]。本试验采用此方法计算出‘03-4-22’、84k、I-101、新疆杨、‘03-5-17’、毛白杨 30 号、‘03-6-11’和’03-4-9’的 LT50 分别为−33.95、−31.76、−28.59、−26.75、−26.38、−24.69、−21.85℃和−18.13℃。由此可见,白杨无性系的抗寒性强弱表

现为‘03-4-22’> 84k > I-101 >新疆杨> ‘03-5-17’>毛白杨 30 号> ‘03-6-11’> ‘03-4-9’,这与采用隶属函数分析法所得的综合评价试验结果基本一致,只有‘03-5-17’和毛白杨 30 号的顺序有差异。

低温胁迫下植物产生的 MDA 会使膜系统遭受损伤,因此其含量可间接反映植物的抗逆性^[2,13]。一般情况下植物体内的 MDA 含量极少,遭到寒害后,随着植物受伤害程度的增加其含量也增多。在相同的胁迫条件下,MDA 含量相对低的品种抗寒性更强^[14]。因此,在本试验中‘03-4-22’细胞受伤害最小,抗寒力最强;‘03-4-9’细胞膜受伤害相对较重,抗寒性最差。

植物在低温胁迫下产生的活性氧自由基会对植

物内部结构、物质等造成损伤,进而影响植物正常的生长发育。超氧化物歧化酶和过氧化物酶作为植物体内保护酶系统的一部分,能够有效消除体内过剩的自由基进而保护植物。在本试验低温胁迫过程中,白杨无性系体内的保护酶活性发生动态变化,降温初期保护酶活性逐渐上升来减缓细胞内多余的自由基对细胞的伤害以维持活性氧代谢,但随着温度的继续降低,SOD 和 POD 活性开始不同程度的下降,表明此温度下过氧化物酶促防御系统遭到了破坏。试验结果显示抗寒性强的无性系 SOD 和 POD 活性达到峰值的温度较其他无性系低,且含量高于其他无性系,且 2 种酶活性测定的结果基本一致,均是‘03-4-22’达到峰值的温度最低,含量最大,因而抗寒性相对最强。

蛋白质作为重要的渗透调节物质之一在抗寒生理过程中起着重要的作用,如提高植物的渗透浓度、降低水势等,对植物细胞起保护作用^[15],因此其含量增加有利于增强植物抗寒性^[16-17]。周碧燕^[18]等发现相对于蛋白质的绝对含量,蛋白质的增加量可能在植物适应逆境时起着更为重要的作用。本研究中对照和处理枝条中的可溶性蛋白含量增加量最大为‘03-4-22’,最小为‘03-4-9’。因此,同理可以得出‘03-4-22’抗寒性最强,‘03-4-9’最弱。

植物的抗寒生理过程错综复杂,受多种因素的影响,同时,植物抗寒能力评价标准具有多样性,不同学者研究得出的结果具有一定的差异,为了准确判断植物的抗寒性需参考不同的鉴定方法进行综合比较分析^[19]。因此,本试验选用了抗寒性试验中准确度较高的 5 种抗寒性评价指标,所得结果显示各指标所测定各优系抗寒性结果差异较小,并应用隶属函数分析法综合各指标得出抗寒能力较强的无性系‘03-4-22’,可以作为我国白杨派树种优良抗寒种质资源的重要补充,对今后白杨派新品质选育、推广以及实现杨树产业可持续发展具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] 史清华,高建社,王军,等. 5 个杨树无性系抗寒性的测定与评价[J]. 西北植物学报,2003,23 (11):1936-1940.
SHI Q H,GAO J SH,WANG J,*et al.* Determination and evaluation of cold resistance of 5 poplar clones[J]. Acta Bot. Boreal-Occident. Sin. ,2003,23 (11):1936-1940. (in Chinese)

[2] 李晓东,樊军锋,邱兴,等. 美洲黑杨 × 青杨派杂种无性系苗期抗寒性的鉴定与筛选[J]. 西北林学院学报,2015,30(2):100-104.
LI X D,FAN J F,QU X,*et al.* Identification and selection on the cold tolerance in the hybrids of *Populus deltoids* × *Section tacamahaca*[J]. Journal of Northwest Forestry University,

2015,30(2):100-104. (in Chinese)

[3] 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 M L,XU J Z,ZHANG G. 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)

[4] 胡建芳,陈建中,姚延涛. 杨树抗寒性研究进展[J]. 世界林业研究,2011,24 (3):32-36.
HU J F,CHEN J Z,YAO Y T. Research progress of cold resistance of poplar[J]. World Forestry Research,2011,24 (3):32-36. (in Chinese)

[5] 江锡兵,郭斌,宋跃朋,等. 美洲黑杨与大青杨杂种无性系耐寒性的初步研究[J]. 植物生理学报,2011,47 (8):771-776.
JIANG X B,GUO B,SONG Y P,*et al.* Elementary study on cold-tolerance of hybrid clones of *Populus deltoides* Bartr. × *P. ussuriensis* Kom. [J]. Plant Physiology Journal,2011,47 (8):771-776. (in Chinese)

[6] 李铁冰,杨顺强,任广鑫,等. 低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较[J]. 生态学报,2009,29 (3):1341-1347.
LI Y B,YANG S Q,REN G X,*et al.* Changes analysis in physiological properties of several gramineous grass species and cold-resistance comparison on under cold stress[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29 (3):1341-1347. (in Chinese)

[7] 余叔文,汤章城. 植物生理与分子生物学[M]. 2 版. 北京:科学出版社,1998.

[8] 左利萍,李毅,焦健. 渗透胁迫下河北杨叶片的生理响应及相关分析[J]. 林业科学,2008,44(8):56-61.
ZUO L P,LI Y,JIAO J. Physiological responses and their correlations of *Populus hopeiensis* leaves under osmotic stress [J]. Scientia Silvae Sinicae,2008,44(8):56-61. (in Chinese)

[9] 朱根海,刘祖祺,朱培仁. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究[J]. 南京农业大学学报,1986(3):11-16.
ZHU G H,LIU Z Q,ZHU P R. A study on determination of lethal temperature with Logistic function[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,1986(3):11-16. (in Chinese)

[10] WANG W J,CHEN Y Z,LIU M Q,*et al.* Effects of cold-hardening on compatible solutes and antioxidant enzyme activities related to freezing tolerance in *Ammopiptanthus mongolicus* seedlings[J]. Forestry Studies in China,2008,10(2):101-106.

[11] 李晓宇,杨成超,彭建东,等. 杨树苗期抗寒性综合评价体系的构建[J]. 林业科学,2014,50(7):44-51.
LI X Y,YANG C C,PENG J D,*et al.* Establishment of an integrated assessment system on cold resistance of poplars at the seedling stage[J]. Scientia Silvae Sinicae,2014,50(7):44-51. (in Chinese)

[12] 姜丽娜,张黛静,宋飞,等. 不同品种小麦叶片对拔节期低温的生理响应及抗寒性评价[J]. 生态学报,2014,34 (15):4251-4261.
JIANG L N,ZHANG D J,SONG F,*et al.* Evaluation of cold resistance of different wheat varieties based on physiological responses of leaves to low temperature at the jointing stage[J]. Acta Ecologica Sinica ,2014,34(15):4251-4261. (in Chinese)

height on trunk borer(*Arbela* spp.) damage to *Betula alnoides* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 27(6): 120-123. (in Chinese)

[10] 广西林业勘察设计院, 广西林学院. 森林调查手册[R]. 1986.

[11] 黄志森. 戴云山红楠种群直径分布规律[J]. 福建林学院学报, 2010, 30(2): 133-136.

[12] 王青天. 福建柏与马尾松混交造林模式的环境效应与生长分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 126-130.

WANG Q T. Environmental effects and growth analysis of the mixed forest plantations of *Fokienia hodginsii* and *Pinus massoniana* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 126-130. (in Chinese)

[13] 姚庆端. 不同杉木混交模式土壤肥力及土壤蓄水量研究[J]. 福建林学院学报, 1996, 16(3): 282-286.

[14] 叶存旺, 翟巧绒, 郭梓娟, 等. 沙棘-侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 1-6.

YE C W, ZHAI Q R, GUO X J, *et al.* Soil nutrient, microorganism and enzyme activity of *Hippophae rhamnoides* and *Platycladus orientalis* mixed forests [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(5): 1-6. (in Chinese)

[15] 盛炜彤. 人工林的生物学稳定性与可持续经营[J]. 世界林业研究, 2001, 14(6): 14-20.

[16] 张星耀, 吕全, 梁军, 等. 中国森林保护亟待解决的若干科学问题[J]. 中国森林病虫, 2012, 31(5): 1-6.

ZHANG X Y, LV Q, LIANG J, *et al.* Scientific problems to be solved for forest protection in China [J]. Forest Pest and Disease, 2012, 31(5): 1-6. (in Chinese)

[17] JACTEL H, BROCKERHOFF E G. Tree diversity reduces herbivory by forest insects [J]. Ecology Letters, 2007, 10(9): 835-848.

[18] PLATH M, MODY K, POTVIN C, *et al.* Establishment of native tropical timber trees in monoculture and mixed-species plantations: small-scale effects on tree performance and insect herbivory [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(3): 741-750.

[19] KLINGENBERG M D, STAFFAN LINDGREN B, GILLINGHAM M P, *et al.* Management response to one insect pest may increase vulnerability to another [J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 47(3): 566-574.

[20] STAMPS W T, MCGRAW R L, GODSEY L, *et al.* The ecology and economics of insect pest management in nut tree alley cropping systems in the Midwestern United States [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131(1): 4-8.

(上接第 134 页)

[13] 马文涛, 樊卫国. 贵州野生柑橘的抗寒性测定和综合评价[J]. 西北植物学报, 2014, 34(10): 2063-2069.

MA W T, FAN W G. Determination and comprehensive evaluation on cold-tolerance of wild citrus from Guizhou [J]. Acta Bot. Boreal-Occident. Sin., 2014, 34(10): 2063-2069. (in Chinese)

[14] 杨敏生, 王春荣, 裴保华. 白杨杂种无性系的抗寒性[J]. 东北林业大学学报, 1997, 25(4): 21-24.

YANG M S, WANG C R, PEI B H. Cold resistance of hybrid clone of white poplar [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1997, 25(4): 21-24. (in Chinese)

[15] 李小琴, 彭明俊, 段安安, 等. 低温胁迫对 8 个核桃无性系抗寒生理指标的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 12-15.

LI X Q, PENG M J, DUAN A A, *et al.* Effects of low temperature stress on physiological indices of eight cold resistance *Juglans sigillata* clones [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 12-15. (in Chinese)

[16] 陈贵, 胡文玉, 谢甫绶, 等. 提取植物体内 MDA 的溶剂及 MDA 作为衰老指标的探讨[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(1): 44-46.

CHEN G, HU W Y, XIE P T, *et al.* Solvent for extracting malondialdehyde in plant as an index of senescence [J]. Plant Physiology Communication, 1991, 27(1): 44-46. (in Chinese)

[17] 林善枝, 李雪平, 张志毅. 低温锻炼对毛白杨幼苗抗冻性和总可溶性蛋白质的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 137-141.

LIN S Z, LI X P, ZHANG Z Y. The effects of cold acclimation on the freezing resistance and total soluble protein in *Populus tomentosa* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(6): 137-141. (in Chinese)

[18] 周碧燕, 陈杰忠, 季作梁, 等. 香蕉越冬期间 SOD 活性和可溶性蛋白质含量的变化[J]. 果树科学, 1999, 16(3): 192-196.

ZHOU B Y, CHEN J Z, JI Z L, *et al.* Changes of superoxide dismutase activity and water-soluble protein content in bananas during winter [J]. Journal of Fruit Science, 1999, 16(3): 192-196. (in Chinese)

[19] AZZARELLO E, MUGNAI S, PANDOLFI C, *et al.* Comparing image (fractal analysis) and electrochemical (impedance spectroscopy and electrolyte leakage) techniques for the assessment of the freezing tolerance in olive [J]. Trees, 2009, 23(1): 159-167.