北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

东北地区杨树无性系抗虫性评价

沈佳佳 刘宇博 王汉时 赵曦阳 蒋路平

Evaluation of the insect resistance of poplar clones in Northeast China

Shen Jiajia, Liu Yubo, Wang Hanshi, Zhao Xiyang, Jiang Luping

引用本文:
沈佳佳, 刘宇博, 王汉时, 赵曦阳, 蒋路平. 东北地区杨树无性系抗虫性评价[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(6):164–173. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250526
Shen Jiajia, Liu Yubo, Wang Hanshi, Zhao Xiyang, Jiang Luping. Evaluation of the insect resistance of poplar clones in Northeast China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6):164–173. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250526

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250526

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于潜在郁闭度估算和NPP趋势的东北地区森林退化评估
Analysis of forest degradation characteristics in Northeast China based on spatial distribution of canopy closure and NPP decreasing trend
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 46–63. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250288

杨树*PtoXTH*34基因过表达提高烟草抗旱性
Overexpression of poplar *PtoXTH*34 gene to enhance drought resistance of tobacco
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 63–71. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240219

基于转基因741杨与新疆杨杂交创制抗虫非整倍体毛白杨新种质
Creating a new germplasm of aneuploid *Populus tomentosa* with insect–resistance based on hybridization of transgenic 741 poplar and *P. alba* var. *pyramidalis*
北京林业大学学报, 2024, 46(12): 92–102. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240021

东北地区榛园内一种小蠹的外部形态特征描述及分子鉴定
Description of external morphological characteristics and molecular identification of a bark beetle in hazel garden of northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(10): 120–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230359

毛果杨丝氨酸蛋白酶抑制子PtrSPI的抗虫能力分析
Analysis of insect resistance ability of the serine protease inhibitor PtrSPI from *Populus tomentosa*
北京林业大学学报, 2021, 43(9): 51–58. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210163

毛白杨耐寒种质资源遗传鉴定及评价
Genetic identification and evaluation of cold–resistant germplasm resources in *Populus tomentosa*
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 59–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220363

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250526

东北地区杨树无性系抗虫性评价

沈佳佳[1,2] 刘宇博[1] 王汉时[1] 赵曦阳[1] 蒋路平[1]
（1. 吉林农业大学林学与草学学院，吉林 长春 130000；2. 吉林农业大学生命科学学院，吉林 长春 130000）

摘要:【目的】杨树人工林病虫害频发已成为制约产业可持续发展的关键瓶颈，选育抗虫良种是环境友好的重要途径。本研究旨在系统评价 94 个杨树无性系对蛀干和食叶害虫的抗性表现，筛选抗虫种质，以期为杨树遗传改良及区域可持续发展提供科学依据。**【方法】**以吉林省梨树县榆树台林场 94 个 7 年生杨树无性系为试验材料，开展田间蛀干害虫（青杨天牛、杨干象）与食叶害虫（黄刺蛾、杨皱背叶蝉、杨扁角叶蜂、杨叶甲）自然危害调查，通过室内叶碟法测定各无性系对美国白蛾幼虫的取食指数，采用田间套袋法观测幼虫存活率、增重指数、预蛹率及化蛹率等发育指标，利用综合隶属函数法进行多指标抗虫性综合评价。**【结果】**（1）94 个参试杨树无性系蛀干害虫整体发生率为 92.55%，仍有 7 个无性系未受到两种蛀干害虫的危害，表明虽然该试验林杨树蛀干害虫压力较大，但存在可挖掘的高抗资源。（2）食叶害虫发生种类明显不均衡，其中杨皱背叶蝉是优势害虫，T521、T726 等 15 个杨树无性系完全未受 4 种食叶害虫危害，表现出对食叶类害虫的广谱抗性。（3）不同无性系间对美国白蛾幼虫的取食指数差异明显（$F = 9.451$，$P = 0.000$），属于高变异类型。其中取食指数较低的无性系 T722 和 T717 作为优良种质，可应用于抗虫品种选育。（4）根据套袋接虫试验对白蛾幼虫发育的影响可将 94 个杨树无性系划分为 3 类，包括强抑制（28 个）、抑制（26 个）以及高感（40 个）无性系。（5）通过隶属函数法进行综合评价最终得出 T717、T421、T731 等综合抗性排名前 10 的杨树无性系，其中无性系 T717、T421 在室内取食和田间接虫两种条件下均表现出一致的高抗性，实现了对不同害虫类型的广谱抗虫。**【结论】**通过杂交构建的杨树无性系群体蕴含丰富的抗虫遗传变异，本研究筛选出的 T717、T421 无性系在田间自然条件和人工接虫条件下均表现突出，具备对多种害虫的复合抗性，可作为东北杨树人工林抗虫育种的核心亲本及推广材料，为我国杨树产业可持续经营提供重要种质支撑。

关键词：东北地区；杨树；蛀干害虫；食叶害虫；抗虫性评价；遗传改良；抗虫育种
中图分类号：S792.11；S722 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)06−0164−10
引文格式：沈佳佳，刘宇博，王汉时，等. 东北地区杨树无性系抗虫性评价［J］. 北京林业大学学报，2026，48(6)：164−173.
Shen Jiajia, Liu Yubo, Wang Hanshi, et al. Evaluation of the insect resistance of poplar clones in Northeast China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6): 164−173.

Evaluation of the insect resistance of poplar clones in Northeast China

Shen Jiajia[1,2] Liu Yubo[1] Wang Hanshi[1] Zhao Xiyang[1] Jiang Luping[1]
(1. College of Forestry and Grassland Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130000, Jilin, China;
2. College of Life Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130000, Jilin, China)

Abstract:［**Objective**］The frequent occurrence of pests and diseases in poplar plantations has become a key bottleneck restricting the sustainable development of the industry. Breeding insect-resistant varieties is an important way to be environmentally friendly. This study aims to systematically evaluate the resistance of 94 poplar clones to trunk borers and foliage-feeding pests, screen insect-resistant germplasms, and provide a scientific basis for genetic improvement of poplar and regional sustainable development.［**Method**］Taking

收稿日期: 2025−12−31 **修回日期:** 2026−05−05
基金项目: 农业生物育种重大专项（2022ZD0401504）。
第一作者: 沈佳佳，博士生。主要研究方向：植物种质资源研究与利用。Email：shenjj126@126.com 地址：130000 吉林省长春市南关区新城大街 2888 号吉林农业大学林学与草学学院。
责任作者: 蒋路平，讲师。主要研究方向：林木遗传改良。Email：jiangluping@jlau.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

94 7-year-old poplar clones in Yushutai Forest Farm of Lishu County, Jilin Province as experimental materials, field surveys were conducted on natural damage caused by trunk borers (*Saperda populnea*, *Cryptorhynchus lapathi*) and foliage-feeding pests (*Cnidocampa flavescens*, *Rhytidodus poplara*, *Stauronematus platycerus*, *Chrysomela populi*). The feeding index of *Hyphantria cunea* larvae of each clone was determined by indoor leaf-disc method. The development indexes such as larval survival rate, weight gain index, prepupal rate and pupation rate were observed by field bagging method. The multi-index comprehensive evaluation of insect resistance was carried out by comprehensive membership function method. [**Result**] (1) The overall incidence rate of stem-boring pests among the 94 tested poplar clones was 92.55%, yet seven clones remained free from damage by both types of trunk borers, indicating that although the pressure of trunk borers in this experimental forest was high, there were high resistance resources that could be excavated. (2) Foliage-feeding pests species occurred with significant imbalance, among which *Rhytidodus poplara* was the dominant pest. Fifteen poplar clones, including T521 and T726, remained completely free from damage by the four defoliating pests, demonstrating broad-spectrum resistance to defoliating insects. (3) The feeding index of *Hyphantria cunea* larvae varied significantly among different clones (F = 9.451, P = 0.000), indicating a high level of variation. Among them, clones T722 and T717, which have lower feeding indices, serve as elite germplasm and can be used for breeding insect-resistant varieties. (4) Based on the effects on the development of *Hyphantria cunea* larvae in the bagging and insect inoculation test, the 94 poplar clones can be divided into three categories: strongly inhibiting (28 clones), inhibiting (26 clones), and highly susceptible (40 clones). (5) Through comprehensive evaluation using the membership function method, ten poplar clones including T717, T421, and T731 were identified as the top-ranked in terms of overall resistance. Among them, clones T717, T421 exhibited consistently high resistance under both indoor feeding conditions and field infestation conditions, achieving broad-spectrum resistance to different pest types. [**Conclusion**] The poplar clone population constructed through hybridization contains abundant insect-resistant genetic variation. The clones T717 and T421 selected in this study exhibited outstanding performance under both natural field conditions and artificial infestation conditions, demonstrating composite resistance to multiple pests. They can serve as core parents and promising materials for insect resistance breeding for deployment in poplar plantations in Northeast China, providing important germplasm support for the sustainable management of China's poplar industry.

Key words: Northeast China; poplar; trunk borers; foliage-feeding pests; insect resistance evaluation; genetic improvement; insect resistance breeding

杨树属于杨柳科（Salicaceae）杨属（*Populus*）的落叶乔木。由于其栽植面积大、分布范围广，在用材、生态治理方面扮演重要角色，已广泛用于“三北”防护林建设[1]。我国杨树基因资源丰富，在发展经济和改善生态环境方面有着不可替代的作用。此外，杨树作为生物能源原料来源之一，在短轮伐期模式的采用上，展现了其独特的价值[2]。但是，随着造林面积扩大，种植品种单一，加上环境变化影响，导致病虫害问题已成为制约杨树可持续发展的关键瓶颈之一[3]。据统计，我国以杨树为食的害虫高达 1 600 余种[4]，每年有多个林地受到食叶害虫与蛀干害虫危害，造成了较大的经济损失，其中东北地区尤为严峻。青杨天牛（*Saperda populnea*）[5]、杨干象（*Cryptorrhynchus lapathi*）[6]等蛀干害虫以及美国白蛾（*Hyphantria cunea*）[7]等外来入侵害虫可通过钻蛀树干、破坏疏导组织或取食叶片、抑制光合作用，导致林木生长衰退、材积下降，甚至成片死亡，严重影响了杨树的健康生长，更阻碍了杨树产业持续稳步发展，给林业生产及环境保护造成了巨大损失。

面对这一严峻挑战，化学防治可通过精准施用在短期内迅速压低虫口密度，但其对环境的污染、农药残留及害虫抗药性的加强等问题不容忽视。尽管以 Bt 为主的杀虫蛋白推动了基因工程在防虫和育种方面的研究，但出于对其潜在环境风险的担忧，林木基因安全管理仍限制其应用[8]。林木抗虫性能够减少或防止害虫对树木的侵害，从而保障其正常的生长和生存。抗虫性强的林木不仅减少了对化学农药的依赖，也降低了防治害虫所需的人力和物力成本。这不仅对林业生产本身有利，也提高了经济效益，使林木的种植和管理更具可持续性，以保持生态

系统的多样性和稳定性[9]。因此，从林木自身遗传特性入手，选育抗虫性强的杨树良种，被普遍认为是实现杨树害虫可持续治理最经济、有效且环境友好的根本途径。

杨树种类繁多，具有较广的遗传基础，开展杨树抗虫性研究具有较大的选择空间。目前，通过常规杂交及生物技术手段培育抗虫良种是防治林木病虫害的有效途径。我国东北地区地域广阔，具有松嫩平原、三江平原和吉中、松辽平原区等杨树主要栽植地域，但由于环境恶化、栽培品种单一和部分品种老化等原因，杨树人工林病虫害频发，对东北地区林业生产造成了大量损失。因此，系统评价不同种质资源的抗虫性表现，筛选出高抗性种质，对区域可持续发展具有重要意义。

为全面评价杨树无性系抗虫性，本研究以 94 个 7 年生杨树无性系为试验材料，针对东北地区主要蛀干和食叶害虫虫害情况开展调查，对其田间自然条件下抗虫性进行评价，同时采用人工接虫方法对其进行定向害虫抗性评价，最终利用田间与室内试验数据综合筛选抗蛀干害虫和食叶害虫无性系，为杨树抗虫性良种选育和推广提供材料，同时为杨树优良抗虫无性系的评价筛选提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点及材料

试验林位于吉林省四平市梨树县榆树台林场（43°02′N，124°54′E），该地区属于北温带半湿润大陆性季风气候。年平均降水量为 480 mm，降雨集中在每年 5—9 月份，年平均气温 6.9 ℃，无霜期 130 d。试验材料为实验室 2014 年开展杂交实验获得的杂交苗，2015—2016 年扩繁初筛。2017 年以 92 个初选无性系和 2 个良种（白城小黑杨、白林 3 号杨）作为参试材料（表 1），采用 2 m × 4 m 株行距，在吉林省梨树县榆树台林场开展试验，采用随机完全区组设计，6 株小区，5 次重复，试验林每个区组间均设置单行保护行，四周设置两行保护行。于 2023 年 7 月林木生长季，对 94 个杨树无性系进行抗虫指标调查。

1.2 研究方法

1.2.1 杨树无性系田间虫害调查

为了探究榆树台林场试验林 94 个杨树无性系的蛀干害虫与食叶害虫危害情况，于 2023 年 7 月采用样株调查法（每个无性系设 3 株重复），记录各无性系主干及侧枝上青杨天牛、杨干象 2 种蛀干害虫的虫孔株数及刻槽数量，同时采集各无性系植株树冠下层南向的枝条，记录黄刺蛾（*Cnidocampa flavescens*）、杨皱背叶蝉（*Rhytidodus poplara*）、杨扁角叶蜂（*Stauronematus platycerus*）、杨叶甲（*Chrysomela populi*）等食叶害虫的有虫株数。

1.2.2 室内饲虫试验

为了分析不同杨树无性系叶片对美国白蛾幼虫取食行为的影响，采集各无性系同一方向、同一冠层且无损伤的 6～9 片长枝上的功能叶片，采用叶碟法，避开主叶脉，使用直径为 3 cm 的打孔器制作圆形叶碟，混合后随机选取 6 枚放入直径 6 cm 培养皿中，接入提前饥饿 12 h 的 3 头美国白蛾二龄幼虫（温度（26 ± 2）℃、相对湿度 70%、光周期 16 光照/8 h 黑

表 1 无性系名称及杂交组合信息

Tab. 1 Clone names and cross combination information

杂交组合	参试无性系
小黑杨 × 美洲黑杨 （*P. simonii* × *P. nigra*）× *P. deltoides*	T413、T421、T422、T423、T424、T425、T427、T428、T431、T432、T433、T434、T435、T436、T437、T438、T441、T445、T447
小黑杨 × 迎春5号杨 （*P. simonii* × *P. nigra*）×（*P. nigra* × *P. simonii*）	T501、T502、T504、T505、T506、T513、T514、T516、T518、T520、T521、T524、T536、T538、T539、T540、T541、T542、T544、T545、T547、T548、T549、T550、T551、T807、T853
黑小2号杨 × 迎春5号杨 （*P.nigra* × *P.simonii*）×（*P. nigra* × *P. simonii*）	T05、T06
美黑3号杨 × 小黑杨 （*P. pyramidalys* × *P. nigra*）×（*P. simonii* × *P. nigra*）	T33、T34
山地1号杨 × 小黑杨 （*P. deltoides* × *P. nigra*）×（*P. simonii* × *P. nigra*）	T210、T231、T233、T28、T29、T602、T621
山地1号杨 × 迎春5号杨 （*P. deltoides* × *P. nigra*）×（*P. nigra* × *P. simonii*）	T131、T132、T211
小叶杨 × 欧洲黑杨 *P. simonii* × *P. nigra*	T901、T902、T903、T904、T907、T909、T920、T928、T930、T935、T948、T953、T954
小叶杨 × 迎春5号杨 *P. simonii* ×（*P. nigra* × *P. simonii*）	T712、T713、T714、T717、T722、T723、T724、T725、T726、T727、T728、T729、T730、T731、T732、T733、T734、T735
小叶杨 *P. simonii*	XY
白城小黑杨 *P. simonii* × *P. nigra*	XH
白林3号杨 *P. simonii* × *P. nigra*	BL3H

暗），同时记录接虫时间，12 h 后将叶片取出，拍照并用 ImageJ 计算取食面积。按照下式计算各无性系取食指数。

$$I = \frac{S_{取食}}{S_{总}} \times 100\%$$

式中：I为取食指数，$S_{取食}$为叶片取食面积，$S_{总}$为初始试验面积。

1.2.3　田间大树套袋接虫试验

为了分析不同杨树无性系对美国白蛾幼虫生长发育及存活的影响，本试验将美国白蛾幼虫发育依次划分为幼虫、预蛹期、蛹期 3 个阶段，以各虫态个体占比作为评价不同树种对美国白蛾发育影响的核心指标。其中，幼虫以典型取食活动幼虫为判定依据，预蛹为停食、躯体收缩静伏的虫体，化蛹为完成蜕皮形成的蛹体。选取各无性系 3 株长势一致且长度大于 60 cm 的枝条，采用套袋（30 cm × 45 cm）接虫法，每袋接入 10 头称好质量的白蛾 3 龄幼虫，接虫 2 d 后随机抽检 10 个无性系确认无幼虫死亡（后续计算基数均采用初始接虫数）。

接虫 15 d 后测定网袋中活虫数量、活虫质量（未预蛹和化蛹的虫质量）、预蛹个数、预蛹虫质量、化蛹数量、化蛹虫质量和虫粪质量，分别取平均值作图，并按照下式计算幼虫增重指数，绘制柱形图，评估无性系对美国白蛾种群增长的影响差异。

$$I_{增} = \frac{W_h}{W_3}$$

式中：$I_{增}$为美国白蛾的幼虫增重指数；W_h为取出时平均活虫质量；W_3为 3 龄美国白蛾平均质量。

1.2.4　方差分析与差异分析

为了评估不同杨树无性系对害虫取食的影响，利用 SPSS 25.0 软件 Shapiro-Wilk 和 Levene 检验评估变量正态性和方差齐性，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）检验各无性系叶片取食情况的差异性，计算变异系数，检验试验材料的变异程度，探究试验材料的选择潜力。对不同无性系间取食指数进行多重比较，以 $P < 0.05$ 作为检验差异性的阈值，进一步探究不同无性系抗虫性差异选择抗虫材料。

方差分析线性模型为

$$y_{ij} = \mu + C_i + e_{ij}$$

式中：μ 为总体平均值，C_i 为无性系效应，e_{ij} 为随机误差。

变异系数（CV）计算公式为

$$CV = \frac{\sqrt{\sigma_p^2}}{\overline{X}} \times 100\%$$

式中：σ_p^2为表型方差，$\overline{X}$为性状平均值。

1.2.5　综合评价

采用模糊隶属函数法[10]构建多维度评价模型，融合田间蛀干害虫、食叶害虫发生率及室内取食指数计算无性系的隶属函数值，根据各指标所占权重进行综合评价，从而直观评估不同杨树无性系对美国白蛾等几种害虫的综合抗性差异，筛选出广谱抗虫杨树无性系材料。

1.3　数据统计

所有数据采用 Excel 和 SPSS 25.0 软件进行整理与分析。

2　结果与分析

2.1　无性系田间抗虫性差异分析

2.1.1　无性系田间抗蛀干害虫发生率分析

田间蛀干害虫调查结果（表 2）表明，试验林蛀干害虫整体危害率达 92.55%，仅 7 个无性系（T28、T722、T731、T542、T545、T948、T445）未发现任何蛀干害虫，具有潜在的双抗性。其余 87 个受害无性系的有虫株率 33.33% ~ 100.00%，刻槽密度 0.33 ~ 20.67 个/株。同时遭受青杨天牛、杨干象 2 种蛀干害虫危害的无性系有 51 个（占受害株系的 58.62%），其有虫株率普遍较高（66.67% ~ 100.00%），但部分无性系（如 T502、T231）受害率高而刻槽密度低，提示可能存在一定耐虫性。在仅受单种害虫危害的无性系中，未受杨干象危害的 19 个无性系（如 T501、T717）对青杨天牛有虫株率低至 33.33%，刻槽密度≤0.67

表 2　94 个无性系蛀干虫害发生情况统计

Tab. 2　Statistics for trunk borers resistance in 94 clones

无性系	有无蛀干害虫	
	青杨天牛	杨干象
T28、T722、T731、T542、T545、T948、T445	无	无
T501、T712、T714、T717、T520、T724、T725、T726、T727、T732、T733、T536、T539、T540、T541、T901、T909、T432、T807	有	无
T05、T210、T521、T723、T735、T551、T421、T422、T423、T436、T438、T441、T602、T621、T233、T132、T504	无	有
T33、T34、T29、T211、T713、T516、T518、T728、T729、T730、T734、T538、T544、T547、T548、T549、T550、T902、T903、T904、T907、T920、T930、T953、T954、T928、T935、T853、T506、BL3H、T413、T424、T425、T427、T428、T431、T433、T434、T435、T437、T447、T06、T231、T131、XH、XY、T502、T505、T513、T514、T524	有	有

个/株；未受青杨天牛危害的 17 个无性系（如 T723、T421）对杨干象刻槽密度低至 0.33 个/株。由此可知，不同杨树无性系对蛀干害虫的抗性差异显著，其中完全未受害的上述 7 个无性系是抗虫育种的重要备选种质，部分仅受害于单种害虫且刻槽密度极低的无性系可用于针对性选育。

2.1.2 无性系田间食叶害虫发生率分析

对 94 个杨树无性系田间食叶害虫发生率调查结果（表 3）表明，共有 15 个杨树无性系（T521、T726、T733、T542、T413、T422、T424、T427、T428、T431、T434、T435、T233、T504、T524）未发现食叶害虫，表现出广谱抗虫性。其余 79 个受害无性系中，多数（约 83.5%）仅遭受 1～2 种害虫危害，遭受 3 种及以上害虫的无性系比例较低（约 16.5%）。从害虫种类看，4 种害虫整体危害率排序为杨皱背叶蝉（61.70%）> 杨扁角叶蜂（45.74%）> 杨叶甲（24.47%）> 黄刺蛾（21.28%）。说明不同杨树无性系对食叶害虫的抗性存在明显分化，未发现食叶害虫的 15 个杨树无性系是选育抗食叶害虫品种的优良种质；而杨皱背叶蝉和杨扁角叶蝉是试验林中的优势害虫种类，应在后续抗虫育种及林间管理中重点关注。

2.2 室内饲喂条件下无性系对美国白蛾幼虫抗性分析

表 4 显示：取食指数差异显著（$F = 9.451$，$P = 0.000$），整体均值为 14.18%，变幅为 1.17%～38.20%；变异系数为 76.59%，属高变异类型，说明有利于抗虫无性系的筛选。取食指数低于 5.00% 的无性系共有 9 个，其中无性系 T722（1.17%）与 T717（1.29%）取食指数最低，表明这两个无性系对美国白蛾幼虫具有较高的抗性；取食指数最高的参试无性系为 T210（38.20%），属于高感无性系（表 5）。由此说明，不同杨树无性系对美国白蛾的抗性存在显著遗传差异，高变异性有利于从现有种质中筛选出抗虫优良无性系，其中 T722、T717 等极低取食指数无性系具有直接应用于抗虫品种选育的潜力。

2.3 田间无性系套袋接虫条件下美国白蛾幼虫发育分析

根据套袋接虫 15 d 后美国白蛾的发育进程差异，

表 3 94 个无性系食叶害虫发生统计

Tab. 3 Statistics of the foliage-feeding pests in 94 clones

无性系	食叶害虫种数
T521、T726、T733、T542、T413、T422、T424、T427、T428、T431、T434、T435、T233、T504、T524	0
T05、T28、T29、T713、T516、T717、T520、T723、T725、T727、T731、T536、T544、T545、T548、T901、T903、T907、T930、T506、T421、T423、T432、T433、T436、T441、T447、T602、T231、T502、T505	1
T501、T33、T210、T211、T712、T714、T518、T722、T728、T729、T730、T732、T734、T540、T541、T547、T549、T551、T948、T954、T928、T935、T853、BL3H、T425、T437、T438、T445、T621、T132、XH、XY、T513、T514、T807	2
T34、T724、T735、T538、T550、T902、T904、T953、T06、T131	3
T539、T909、T920	4

表 4 不同杨树无性系对美国白蛾幼虫取食指数的影响方差及变异系数

Tab. 4 Variances and coefficient of variation of different poplar clones on feeding index of *Hyphantria cunea* larval

性状	均值/%	标准差/%	变幅/%	变异系数/%	*F*	显著性
取食指数（*I*）	14.18	10.86	1.17～38.20	76.59	9.451	0.000

表 5 不同杨树无性系的美国白蛾幼虫取食指数分级

Tab. 5 Feeding index classification of *H. cunea* larvae of different poplar clones

取食指数/%	无性系
0.00～5.00	T722、T717、T233、T421、T540、T903、T902、T520、T729
5.01～10.00	T513、T725、T544、T853、T431、T713、T724、T516、T34、T930、T734、T524、T541、T714、T735、T935、T539、T28、T33、T712、T432、T907、T723、T435、T437、T425、T445、T413
10.01～15.00	T441、T211、T428、T422、T231、T423、T909、T549、BL3H、T731、T506、T433、T447、T548、T132、T545、T904、T928、T807、T538、T424、T727
15.01～20.00	T901、T502、XH、T726、T948、T536、T131、T732、T550、T954、T518
20.01～25.00	T05、T621、T728、T505、T730、T427、T501、XY、T29、T504、T547、T551、T602
25.01～30.00	T542、T514、T438、T436
30.01～35.00	T434、T920、T06、T521、T953
35.01～40.00	T733、T210

将 94 个无性系分为 3 类：第 1 类(29.79%，28 个无性系)为存活白蛾均处于幼虫阶段，第 2 类(27.66%，26 个无性系)为预蛹阶段，第 3 类(42.55%，40 个无性系)为化蛹阶段。该分类直观反映了不同无性系对害虫发育进程的抑制或促进作用。

第 1 类无性系(幼虫阶段)：幼虫存活率普遍较低，虫粪质量较小(0.28 ~ 4.30 g)(图 1)。其中，无性系 T421、T422、T428、T437、T541、T621 和 T726 虫粪质量和成活率均较低，表明这些无性系能显著抑制幼虫存活并减少取食量，具有较高的抗虫性。从幼虫质量增加情况看，T920、T717、T714 等 12 个无性系增重指数较低，均小于 10，而无性系 T505、T211 等活虫质量和增重指数均较大(图 2)，说明不同无性系对幼虫生长发育的抑制能力差异显著，低增重指数无性系可用于延缓害虫种群增长。

第 2 类无性系(预蛹阶段)：整体存活率、幼虫占比率和预蛹率变化范围分别为 13.33% ~ 50.00%、3.33% ~ 46.67% 和 3.33% ~ 20.00%(图 3)。无性系 T807、T520 和 T434 整体存活率较高(> 43.00%)，而 T723、T506 和 XH 预蛹率超过 10.00%。各无性系活虫质量与增重指数呈显著正向关系(图 4)，无性系 T424 活虫质量和增重指数最小，而 T518 最高，相差 3.5 倍以上。在预蛹虫质量方面，12 个无性系(如 T520、T807)的预蛹虫质量低于 0.05 g(图 5)，表明这些无性系能有效抑制预蛹期质量增长。虫粪质量以 T514 最大(3.15 g)，说明其被取食量最大，属于易感无性系。

第 3 类无性系(化蛹阶段)：平均幼虫占比 19.42%，平均预蛹率 4.33%，平均化蛹率为 9.67%(图 6)。无性系 T06、XY 和 T436 化蛹率较高，超过 25%，且这些无性系的幼虫质量、预蛹质量、蛹质量

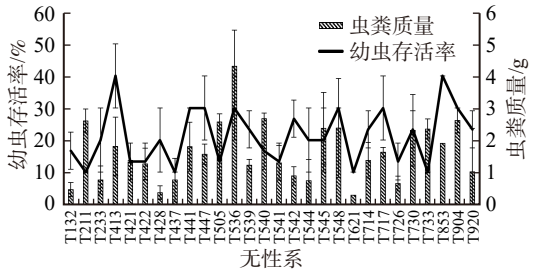


图 1　第 1 类无性系幼虫存活率与平均虫粪质量

Fig. 1　Larval survival rate and mean frass mass for the first type clones

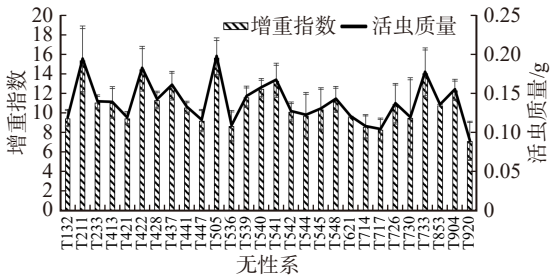


图 2　第 1 类无性系活虫质量与增重指数

Fig. 2　Live insect mass and weight gain index of the first type clones

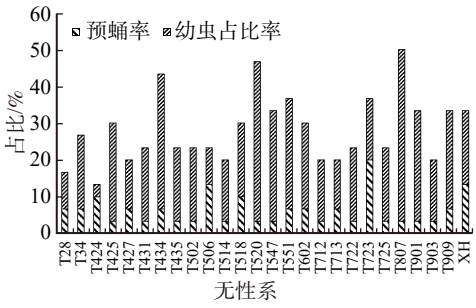


图 3　第 2 类无性系幼虫占比率、预蛹率及整体存活率

Fig. 3　Larval percentage, pre-pupation rate and overall survival rate of the second type clones

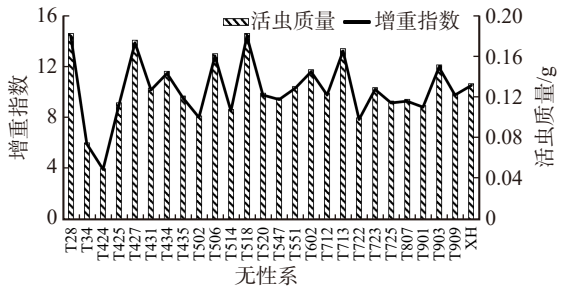


图 4　第 2 类无性系活虫质量和增重指数

Fig. 4　Live insect mass and weight gain index of the second type clones

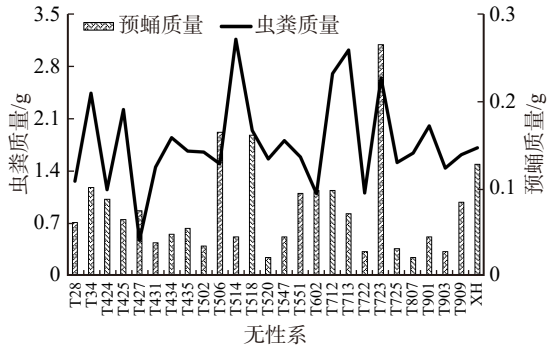


图 5　第 2 类无性系预蛹虫质量和虫粪质量统计

Fig. 5　Pre-pupal insect mass and fecal mass of the second type clones

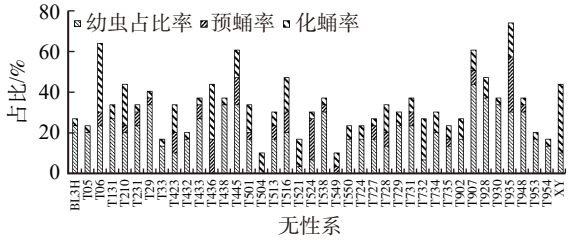


图 6　第 3 类无性系幼虫占比率、预蛹率及化蛹率

Fig. 6　Larval percentage, pre-pupation rate and pupation rate of third type clones

均处于较高水平(图 7)，表明它们显著促进美国白蛾的生长发育，属于高感无性系。相反，无性系 T436、T504 和 T549 虽然化蛹率较高，但增重指数为 0(图 8)。

综上所述，不同杨树无性系对美国白蛾的发育进程存在不同影响。第 1 类中存活率低且增重指数小的无性系(如 T421、T422 等)可作为抗虫育种的首选材料；第 2 类中低预蛹虫质量、低增重指数的无性系(如 T424)对抑制种群转化有效；第 3 类中高化蛹率、高虫粪质量的无性系(如 T06、XY)应避免在虫害高发区种植。

2.4 无性系田间条件抗虫性综合评价

以蛀干害虫(有虫株率、刻槽密度)和食叶害虫发生率为评价指标，按 30% 入选率对无性系进行初选(表 6)，共有 11 个无性系(T542、T545、T723、T717 等)同时对两类害虫表现出良好抗性，表明这些无性系在自然林间具有广谱抗虫潜力。

室内叶碟法以取食指数为指标，30% 入选率下筛选出 28 个高抗美国白蛾幼虫的无性系(表 6)。大树套袋法以幼虫增重指数为指标，因第 3 类无性系均出现化蛹现象，仅对第 1、2 类中无性系进行评价：第 1 类按 50% 入选率进行筛选共有 T920、T717、T714 等 14 个无性系入选；因第 2 类部分出现化蛹现象，以 20% 入选率进行筛选共有 T424、T34、T722 等 5 个无性系入选。综合室内外试验结果，T722、T717、T421、T544、T853、T34 和 T714 均表现出稳定抗性。

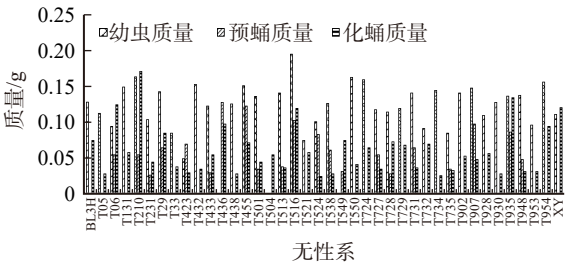


图 7 第 3 类无性系幼虫质量、预蛹虫质量及化蛹虫质量

Fig. 7 Larval mass, pre-pupal mass and pupal mass of the third type clones

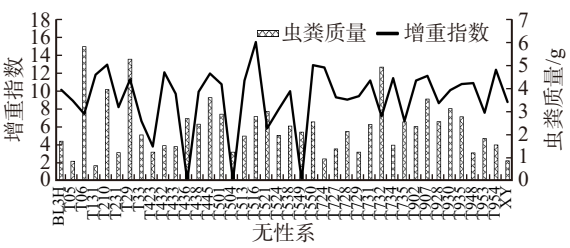


图 8 第 3 类无性系增重指数及虫粪质量

Fig. 8 Weight gain index and worm droppings mass for the third type clones

表 6 初选优良抗虫无性系

Tab. 6 Primary selection of elite clones for insect resistant

高抗蛀干害虫无性系（有虫株率 + 刻槽密度）	抗食叶害虫		
	食叶害虫发生率	取食指数	增重指数
T28	T233	T722	T920
T722	T413	T717	T717
T731	T422	T233	T714
T542	T424	T421	T536
T545	T427	T540	T447
T948	T428	T903	T132
T445	T431	T902	T421
T501	T434	T520	T730
T723	T435	T729	T621
T441	T504	T513	T544
T621	T521	T725	T542
T717	T524	T544	T545
T541	T542	T853	T441
T725	T726	T431	T853
T727	T733	T713	T424
T735	T231	T724	T34
T421	T421	T516	T722
T714	T423	T34	T502
T422	T436	T930	T514
T211	T502	T734	
T726	T506	T524	
T210	T520	T541	
T730	T536	T714	
T540	T545	T735	
T733	T713	T935	
T728	T717	T539	
T536	T723	T28	
T423	T725	T33	

由于田间大树套袋试验中美国白蛾的发育情况不一致，为进一步综合评价所有无性系的整体抗虫性能，采用隶属函数法，融合田间蛀干害虫、食叶害虫发生率及室内取食指数等多项指标，计算每个无性系的综合隶属函数值。结果(表 7)表明，无性系 T717、T421、T731、T545、T28 综合表现较为突出，是本次试验中抗虫性最优的候选种质。

3 讨 论

杨树是我国重要的速生用材树种，但其幼龄阶段易受多种害虫侵袭，尤其蛀干害虫和食叶害虫常

表 7　各杨树无性系隶属函数均值及综合评价

Tab. 7　The mean value of membership function and comprehensive evaluation of poplar clone

无性系	隶属函数值	无性系	隶属函数值	无性系	隶属函数值	无性系	隶属函数值
T717	0.077	T536	0.227	T539	0.299	T210	0.407
T421	0.079	T211	0.227	T132	0.301	T538	0.418
T731	0.088	T432	0.231	T413	0.303	T513	0.419
T545	0.095	T431	0.231	T504	0.312	T935	0.431
T28	0.103	T231	0.233	T602	0.322	T433	0.434
T725	0.110	T930	0.235	T427	0.323	T518	0.440
T723	0.110	T524	0.238	T904	0.325	T551	0.440
T233	0.114	T621	0.244	T33	0.331	T549	0.440
T422	0.121	T435	0.248	T437	0.334	T807	0.442
T722	0.133	T948	0.249	T548	0.336	T29	0.448
T542	0.139	T724	0.252	T734	0.339	T505	0.453
T441	0.151	T712	0.268	T903	0.339	T954	0.461
T726	0.164	T447	0.272	T907	0.341	T928	0.476
T423	0.166	T424	0.284	T516	0.348	BL3H	0.477
T540	0.174	T730	0.288	T544	0.353	T547	0.488
T714	0.177	T521	0.289	T34	0.357	T853	0.531
T520	0.178	T05	0.291	T434	0.358	T550	0.554
T713	0.180	T502	0.291	T909	0.359	T131	0.556
T445	0.180	T729	0.293	T438	0.360	T06	0.610
T541	0.182	T901	0.293	T902	0.365	T920	0.639
T727	0.191	T728	0.295	XH	0.373	T514	0.640
T428	0.207	T733	0.295	T425	0.377	T953	0.679
T735	0.209	T732	0.296	T506	0.390		
T501	0.218	T436	0.297	XY	0.399		

造成严重的经济损失[11]。我国杨树栽培区气候差异大，遗传资源丰富，筛选适应性强、抗虫性优的基因型是缓解虫害问题的有效途径。美国白蛾自 1979 年传入我国以来已扩散至多省市，其食性杂、寄主广，对杨树等林木危害严重[12]。因此，系统评价杂交杨树无性系对主要蛀干害虫、食叶害虫及美国白蛾的抗性，明确不同抗性种质资源，对杨树抗虫育种具有重要科学意义和实践价值。本研究以 94 个 7 年生杨树杂交无性系为材料，首先通过田间自然感虫调查，揭示了杂交杨树群体中丰富的抗虫遗传变异，进而结合室内叶碟法与套袋接虫法，筛选出一批具有明确应用价值的优良抗虫种质。这些结果不仅为东北地区杨树抗虫育种提供了核心材料，更在抗性机制解析、育种策略制定及人工林可持续管理上具有重要指导意义。

对各无性系蛀干害虫受害率（有虫株率）和受害程度（刻槽密度）进行调查发现，有 7 个杨树无性系对两种蛀干害虫完全耐受，这一结果表明，即使在高虫害压力下，杨树杂交群体中依然存在可遗传的抗虫变异，且抗性类型呈现明显分化——部分无性系表现为完全免疫，部分仅对特定蛀干害虫具有选择性抗性。同样地，在食叶害虫发生率调查结果中，15 个杨树无性系表现出了广谱抗虫性，多数遭受 1～2 种食叶害虫危害，该结果直接回应了“通过杂交能否创制多抗种质”的问题。研究[13−14]表明，杂交种能够融合亲本的优良基因，进而在生长势、生存力、繁殖力、抗逆性以及品质等方面表现出比双亲更优异的特性。何利明等[15]发现水曲柳（*Fraxinus mandshurica*）杂交后代生存率提高，并表现出显著的杂种优势，且 F_1 中优良单株的抗虫性超出总均值的 181.7%。本研究中完全未受蛀干害虫侵害的 7 个无性系源于多个亲本组合，表明抗蛀干害虫基因可能分散于多个亲本中，未局限于单一遗传背景。在食叶害虫方面，取食指数较低的几个高抗无性系中，“小叶杨（*P. simonii*）× 迎春 5 号杨（*P. nigra* × *P. simonii*）”亲本组合出现频率最高（如 T722、T717、T729）；综合隶

属函数排名前 5 的无性系也主要来自“小叶杨 × 迎春 5 号杨”和“小黑杨(*P. simonii* × *P. nigra*) × 迎春 5 号杨”杂交组合。与前人仅关注单一害虫类型的研究相比，本研究同时覆盖蛀干、食叶及入侵性害虫，揭示了不同抗性机制在杂交后代中的共分离现象，为多目标抗虫育种提供了关键的亲本组合指引。

田间自然感虫调查初步明确了不同无性系对蛀干害虫和食叶害虫的抗性分化特征，并筛选出具有广谱抗虫潜力的亲本组合。然而，自然条件下害虫种类和虫口密度的不可控性，在一定程度上难以精确量化各无性系对害虫的真实抗性水平。为此，本研究在室外进一步采用人工接虫法模拟虫害，以规避环境波动干扰，实现抗虫性鉴定[16−17]。该类方法同样在小麦(*Triticum aestivum*)对吸浆虫的抗性检测上得到应用[18]。通过大树套袋法对不同杨树无性系在美国白蛾整个发育过程的抗性能力进行测定，根据幼虫发育状态，将 94 个无性系分为 3 类，其中延缓幼虫发育的无性系有 28 个，有效抑制预蛹期质量增长的无性系有 26 个，对幼虫生长发育有显著促进的无性系有 40 个。但是通过幼虫发育进程这一单项指标对群体进行筛选，易出现漏选和错选现象，最终根据田间套袋与室内饲虫试验综合结果，仅筛选出 T722、T717、T421 等共计 7 个在室内和大田试验中均对美国白蛾具有良好抗性的杨树无性系。在后期的育种实践中，面对突发性、暴食性害虫的潜在危害时，可选择以上几个无性系进行培育，以实现在虫害压力下的林木稳定性。

本研究系统评价了 94 个杨树杂交无性系对 3 类主要害虫的抗性，筛选出 T717、T421 等优良抗虫种质，为东北地区杨树抗虫育种和林分更新提供了核心材料；同时证实了多指标综合评价法(隶属函数法)在林木抗虫性鉴定中的适用性。由于本研究的田间试验仅在一个试验林进行，未重复多年多点，可能受特定年份气候和害虫种群波动影响；室内叶碟法所用叶片来自田间大树，离体后生理状态可能改变，因此具有一定局限性。针对以上问题，未来应在不同生态区开展区域性验证，追溯无性系家系背景并进行全基因组关联分析，同时结合次生代谢物检测和幼虫生理指标阐明抗虫机制，最终实现抗虫速生杨树品种的精准分子设计育种。

4 结　　论

本研究针对我国东北地区榆树台林场试验林 94 个杨树无性系，采用田间害虫调查、室内叶碟及大树套袋等方法，系统评价了各无性系对蛀干害虫、食叶害虫及美国白蛾幼虫的抗性差异，并利用隶属函数法进行综合抗虫性评价。主要结论如下。

(1)蛀干害虫抗性：蛀干害虫整体危害率达 92.55%，仅 T28、T722、T731、T542、T545、T948、T445 共 7 个无性系未发现任何蛀干害虫(青杨天牛和杨干象)，具有潜在的双抗性，可用于针对性选育。

(2)食叶害虫抗性：15 个杨树无性系未发现任何食叶害虫(黄刺蛾、杨皱背叶蝉、杨扁角叶蜂、杨叶甲)，表现出广谱抗虫性；杨皱背叶蝉危害率最高，为 61.70%，是试验林中的优势害虫种类。

(3)美国白蛾幼虫取食抗性：不同无性系间叶片取食指数差异显著，变异系数达 76.59%，属高变异类型，有利于抗虫筛选。取食指数低于 5% 的无性系共 9 个，其中 T722(1.17%)和 T717(1.29%)取食指数最低，为高抗美国白蛾幼虫的优良种质，具有直接应用于抗虫品种选育的潜力。

(4)套袋接虫对幼虫发育的影响：根据发育进程将 94 个无性系分为 3 类。第 1 类(幼虫阶段，占比为 29.79%)中，T920、T717、T714 等 12 个无性系幼虫增重指数小于 10，表现出强抑制作用。第 2 类(预蛹阶段，占比为 27.66%)中，12 个无性系(如 T520、T807)预蛹虫质量低于 0.05 g，能有效抑制预蛹期质量增长。第 3 类(化蛹阶段，占比为 19.42%)中，无性系 T06、XY 和 T436 化蛹率较高，超过 25%，属于高感无性系。

(5)综合抗虫性评价：采用隶属函数法融合田间蛀干害虫、食叶害虫发生率及室内取食指数等多项指标，T717、T421 综合表现最为突出，是兼顾抗蛀干害虫、食叶害虫及美国白蛾的多抗优良种质，未来可进一步作为抗虫育种的核心亲本，用于多抗新品种的选育与推广。

本研究结果为杨树抗虫无性系的筛选与推广提供了直接的科学依据和核心种质资源。未来可进一步对入选的高抗无性系开展分子标记辅助育种、抗虫基因挖掘及区域化林间验证，加速抗虫杨树品种的选育进程。

参 考 文 献

[1] Enescu C M, Mihalache M, Ilie L, et al. Advancing the sustainability of poplar-based agroforestry: key knowledge gaps and future pathways [J]. Sustainability, 2026, 18(1): 341.

[2] Endre S, Attila B, Attila B. Economic modelling of poplar short rotation coppice plantations in Hungary [J]. Forests, 2021, 12(5): 623.

[3] Dickmann D I. Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: then and now [J]. Biomass and Bioenergy, 2005, 30(8): 696−705.

[4] 尚华丹, 张楚晴, 王梅, 等. 中国杨树害虫物种多样性及其地理分布 [J]. 生物多样性, 2025, 33(2): 84−92.

Shang H D, Zhang C Q, Wang M, et al. Species diversity and geographic distribution of poplar pests in China [J]. Biodiversity Science, 2025, 33(2): 84−92.

[5] Wang Y L, Zhang J, Chen Q, et al. Identification and evolution of olfactory genes in the small poplar longhorn beetle *Saperda populnea* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part D: Genomics and Proteomics, 2018, 26: 2658−2668.

[6] Cao Q J, Yu J, Ran Y L, et al. Effects of plant volatiles on electrophysiological and behavioral responses of *Cryptorhynchus lapathi* [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2015, 156: 105−116.

[7] Ning J, Lu P F, Fan J T, et al. American fall webworm in China: a new case of global biological invasions [J]. Innovation, 2022, 3(1): 100201.

[8] 张磊, 周星鲁, 王丽娟, 等. 杨树抗虫分子育种与转基因生物安全评价研究进展 [J]. 林业科学, 2025, 61(2): 190−203.
Zhang L, Zhou X L, Wang L J, et al. Advance of poplar molecular breeding with insect resistance and transgenic biosafety assessment research [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(2): 190−203.

[9] 杨洁, 张苏芳, 谢明慧, 等. 林木抗虫育种研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2024, 39(5): 22−28.
Yang J, Zhang S F, Xie M H, et al. Research progress on tree breeding for pest resistantce [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(5): 22−28.

[10] McKersie B D, Bowley S R, Harjanto E, et al. Water-deficit tolerance and field performance of transgenic alfalfa overexpressing superoxide dismutase [J]. Plant Physiology, 1996, 111(4): 1177−1181.

[11] Pike C C, Jennifer K, Dana N C. Breeding for resistance to tree pests: successes, challenges, and a guide to the future [J]. Journal of Forestry, 2021, 119: 96−105.

[12] Schowalter T D, Ring D R. Biology and management of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Erebidae) [J]. Journal of Integrated Pest Management, 2017, 8(1): 7.

[13] 崔会会, 项超, 石英尧, 等. 杂种优势形成的表观遗传学研究进展 [J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(5): 933−939.
Cui H H, Xiang C, Shi Y X, et al. The research progress of epigenetic insights into bases of heterosis [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(5): 933−939.

[14] Fritz R S, Moulia C, Newcombe G. Resistance of hybrid plants and animals to herbivores, pathogens, and parasites [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1999, 30: 565−591.

[15] 何利明. 水曲柳杂种优势分析及抗寒优势机制研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
He L M. Heterosis analysis and mechanism research of cold-resistant heterosis in *Fraxinus mandshurica* hybrids[J]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[16] 赵自成. 不同杨树品种对桑天牛抗虫性的试验 [J]. 江苏林业科技, 2019, 46(3): 24−28, 38.
Zhao Z C. Experiment on insect resistance of different poplar varieties to *Apriona germari* [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2019, 46(3): 24−28, 38.

[17] Zhou X L, Dong Y, Zhang Q, et al. Expression of multiple exogenous insect resistance and salt tolerance genes in *Populus nigra* L. [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 1123.

[18] 张哲, 王优信, 郭燕, 等. 小麦品种对人工接种吸浆虫的抗性反应 [J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(2): 6−11.
Zhang Z, Wang Y X, Guo Y, et al. Response of wheat varieties to artificial inoculation with wheat midge (*Sitodiplosis mosellana* Géhin) [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(2): 6−11.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　卢孟柱）