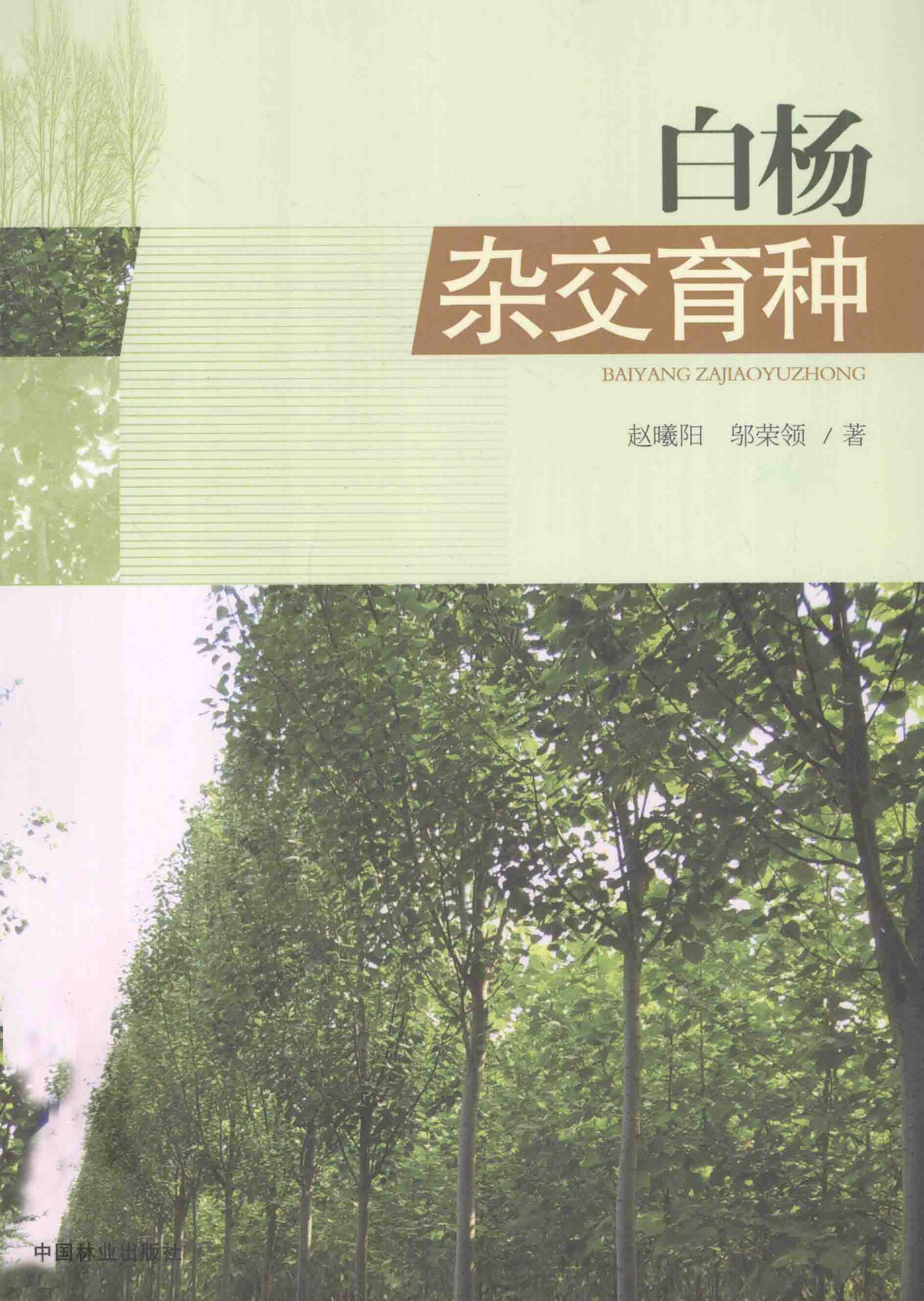


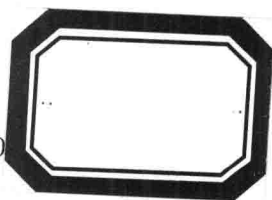


白杨 杂交育种

BAIYANG ZAJIAOYUZHONG

赵曦阳 邬荣领 / 著

本书的出版得到林木遗传育种国家重点实验室创新项目（2013B0



白杨杂交育种

赵曦阳 邬荣领 著

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

白杨杂交育种/赵曦阳, 邬荣领著. - 北京: 中国林业出版社, 2013. 7
ISBN 978-7-5038-7228-0

I. 白… II. ①赵… ②邬… III. ①白杨-杂交育种 IV. ①S792.119.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 235679 号

出版发行 中国林业出版社 (100009 北京西城区刘海胡同 7 号)
电 话 83229512
印 刷 北京中科印刷有限公司
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次
成品尺寸 170mm × 230mm
印 张 10.25 彩插 0.25
字 数 20 千字
定 价 35.00 元

杨树是杨柳科 (Salicaceae) 杨属 (*Populus*) 树种的统称, 其栽培历史悠久、分布广泛、种类繁多且与人们的生活密切相关, 无论在平原、山区、丘陵均有广泛栽培。近百年来, 杨树人工栽培品种已经在生产上广泛应用, 这些品种或是经过天然林选出的优良个体, 或是经过杂交、诱变等手段所获得。随着现代遗传学理论的发展, 多倍体诱导、转基因等技术的应用, 人工创造变异的方法和途径逐渐增多, 但无论是过去、现在还是将来, 杂交育种仍然是培育杨树新品种的重要手段。

1912 年英国学者 Henry A 利用棱枝杨与毛果杨进行首次杨树人工杂交试验, 选育出了速生、适应性强的格氏杨, 此后杨树杂交育种得到迅速发展, 美国、前苏联、加拿大、波兰等国先后培育并推广许多优良品种, 意大利在杨树育种中一直处于世界前列, 所选育的众多欧美杨杂交品种在世界广泛栽培。

杨树分为 5 大派系, 其中白杨派树种有极强的适应性, 在不同纬度地带, 都可以见到白杨派树种生长。我国自 20 世纪 40 年代开始白杨派种间杂交试验, 至今已选育出大批生长表现优良的品种, 在生态防护林建设和生产建设中发挥了巨大的作用。但是, 我国杨树育种工作也存在许多不足, 长期以来, 育种专家进行大批量的杨树杂交工作, 但选育出的优良无性系较少, 选择效率比同期的国外杨树良种选育效率低。在选择方法上, 单纯考虑生长量、抗逆性等方面, 利用多角度、多方面联合评价选择研究较少。研究中通常忽视基因型与环境的互作, 对品种的遗传稳定性分析较少。在区域化试验中, 测定时间短, 不能正确选定不同栽培区的适应品种。随着新品种的增多, 品种混杂现象严重, 而常规形

态学鉴定方法不完善,分子手段与常规育种结合不够紧密等。

我们开展了白杨派内杂交试验,对子代苗期生长模型进行构建,并在前期杂交获得杂种无性系基础上,对白杨杂种无性系进行遗传稳定性分析,生物量、干形、叶片性状、抗氧化系统等多指标分析,研究无性系间变异规律,对无性系进行综合评价。同时利用 SSR 分子标记手段对无性系进行指纹图谱的构建和遗传距离分析,探讨不同无性系间遗传变异规律,为杨树遗传改良和优良无性系评价筛选提供依据。

在此书稿付梓之际,谨向参加课题工作的所有科研人员表示诚挚的谢意。由于水平有限,本书尚存疏漏和不当之处,敬请广大读者批评指正。

著 者

2013 年 5 月

目 录

前 言

绪 论	1
1 杨树杂交育种研究进展	1
1.1 国外杨树杂交育种概况	1
1.2 中国杨树杂交育种概况	4
2 杨树无性系选择研究进展	11
2.1 杨树叶片性状研究进展	11
2.2 杨树生长节律研究进展	12
2.3 杨树生长数学模型研究进展	13
2.4 杨树无性系多性状综合选择	14
2.5 无性系稳定性评价	16
2.6 光合指标辅助杨树无性系选择	17
2.7 抗氧化酶系统辅助无性系选择	19
3 分子标记及其在杨树育种中的应用	20
3.1 树种育种中常用的分子标记种类	20
3.2 SSR 分子标记在杨树育种中的应用	21
第 1 章 白杨杂交试验及杂种子代变异分析	25
1.1 材料与方法	25
1.1.1 试验条件概况	25
1.1.2 试验材料概况	25
1.1.3 交配设计	25
1.1.4 杂交方法	25
1.1.5 花序表型调查方法	26
1.1.6 幼胚培养	27
1.1.7 数据分析	27
1.2 结果与分析	28

1.2.1	花序长度、宽度变异分析	28
1.2.2	杂交组合亲和力分析	30
1.2.3	种子发芽率及成苗率分析	31
1.2.4	杂交苗苗高、地径变异分析	31
1.3	讨论	33
第2章	毛白杨种内杂交无性系苗期生长模式变异分析	35
2.1	材料与方法	35
2.1.1	实验材料	35
2.1.2	试验条件与试验方法	35
2.1.3	数据处理	36
2.2	结果与分析	37
2.2.1	毛白杨种内杂交无性系苗高方差分析	37
2.2.2	毛白杨种内杂交无性系苗期年生长模型构建	38
2.2.3	毛白杨种内杂交无性系苗木年生长阶段划分	40
2.2.4	苗高年生长量与极值的关系	42
2.2.5	速生期各参数与最终生长量的关系	43
2.2.6	无性系生长过程比较	43
2.3	结论与讨论	45
第3章	毛白杨种内杂交无性系叶片性状变异分析	47
3.1	试验材料与方法	47
3.1.1	试验地点和试验材料	47
3.1.2	统计分析方法	48
3.2	结果与分析	48
3.2.1	毛白杨种内杂交无性系各性状遗传变异分析	48
3.2.2	毛白杨种内杂交无性系各指标相关性分析	50
3.2.3	毛白杨种内杂交无性系苗高和地径回归方程构建	51
3.2.4	毛白杨种内杂交无性系选择评价	52
3.3	结论和讨论	54
第4章	不同地点白杨杂种无性系联合分析	56
4.1	材料与方法	56
4.1.1	试验地概况	56
4.1.2	试验材料	57
4.1.3	数据调查和计算	57
4.1.4	统计分析方法	58

4.2	结果分析	60
4.2.1	不同试验地点白杨杂种无性系保存率分析	60
4.2.2	不同地点白杨杂种无性系树高、胸径、材积方差分析	61
4.2.3	不同试验地点白杨杂种无性系树高、胸径、材积变异参数	62
4.2.4	不同试验地点白杨杂种无性系树高、胸径、材积重复力分析	63
4.2.5	白杨杂种无性系树高、胸径和材积的相关性分析	64
4.2.6	白杨杂种无性系稳定性评价	66
4.2.7	白杨杂种无性系遗传增益估算	67
4.2.8	不同地点白杨杂种无性系树高、胸径和材积的综合评价	69
4.3	讨论	70
第5章	白杨杂种无性系表型性状变异分析	72
5.1	试验条件与方法	72
5.1.1	试验地条件	72
5.1.2	试验材料	72
5.1.3	研究方法	72
5.2	结果与分析	74
5.2.1	白杨杂种无性系各性状方差分析结果	74
5.2.2	白杨杂种无性系间各性状遗传变异参数分析	74
5.2.3	白杨杂种无性系各性状相关性分析	76
5.2.4	主成分分析评价无性系	76
5.2.5	无性系综合评价	79
5.3	讨论	79
第6章	白杨杂种无性系光合特性分析	81
6.1	试验条件与方法	81
6.1.1	试验地概况	81
6.1.2	试验材料概况	81
6.1.3	实验仪器概况	81
6.1.4	研究方法	82
6.2	结果与分析	83
6.2.1	白杨杂种无性系叶片 P_n 变化规律	83
6.2.2	白杨杂种无性系光合指标日变化	84

6.2.3	白杨杂种无性系的光合—光强($P_n - Par$)响应曲线	84
6.2.4	白杨杂种无性系光合—二氧化碳($P_n - C_a$)响应 曲线	86
6.2.5	白杨杂种无性系光合指标变异分析	88
6.2.6	白杨杂种无性系光合指标与环境因子相关性分析	90
6.2.7	白杨杂种无性系树高、胸径与光合指标相关性分析	91
6.3	讨论	91
第7章	白杨杂种无性系叶绿素含量与抗氧化系统分析	94
7.1	材料与方法	95
7.1.1	试验地概况	95
7.1.2	试验材料概况	95
7.1.3	试验方法	95
7.1.4	统计分析方法	96
7.2	结果分析	96
7.2.1	不同时间白杨杂种无性系叶绿素含量变异分析	96
7.2.2	不同时间白杨杂种无性系MDA、POD、SOD变异分析	99
7.3	讨论	103
第8章	白杨杂种无性系多性状综合评价	106
8.1	试验条件和方法	106
8.1.1	试验地条件和试验材料	106
8.1.2	研究方法	106
8.1.3	统计分析方法	107
8.2	结果与分析	107
8.2.1	方差分析及遗传变异参数分析	107
8.2.2	各性状相关性分析	109
8.2.3	树高、胸径回归方程的建立	110
8.2.4	回归方程中各变量对树高、胸径、材积的通径分析	111
8.2.5	光合因子与叶片因子辅助无性系选择	111
8.3	结论与讨论	112
第9章	白杨杂种无性系不同地点生长量模型分析	115
9.1	材料与方法	115
9.1.1	研究材料	115
9.1.2	研究方法	115
9.1.3	分析方法	116

9.2	结果分析	119
9.2.1	生长曲线的拟合结果	119
9.2.2	基因型与环境互作关系	122
9.3	结论与讨论	123
第 10 章	白杨杂种无性系 SSR 标记指纹图谱构建	125
10.1	材料与方法	126
10.1.1	试验材料概况	126
10.1.2	提取 DNA 的方法	126
10.1.3	SSR 分子标记技术分析	127
10.1.4	结果记录	132
10.1.5	数据统计分析	132
10.2	结果与分析	132
10.2.1	引物筛选	132
10.2.2	白杨杂种无性系遗传距离分析	133
10.2.3	白杨杂种无性系指纹图谱的构建	134
10.3	讨论	135
参考文献		137
后 记		153

绪 论

杨树是杨柳科 (*Salicaceae*) 杨属 (*Populus*) 树种的统称。其生长迅速, 发育周期短, 一般 6~10 年达到成熟, 开花结果。杂种更早, 如山杨与毛白杨杂种, 3 年生即可开花。杨树在世界主要分布于北半球温带和寒带地区。我国杨树资源十分丰富, 包含 5 大派 53 种 (徐纬英, 1988), 是我国人工林产业化栽培的主要树种之一, 为我国生态环境的改善和生态工程建设作出了积极贡献 (李文荣, 2008)。目前, 世界林业生产中推广应用的优良杨树树种主要是经过人工杂交培育的, 杂种往往比双亲表现出更优良的生长速率和代谢功能, 具有生长快、抗病、抗虫、抗逆强的特点, 已经在生产上取得了巨大经济效益、生态效益和社会效益 (李善文, 2004)。

1 杨树杂交育种研究进展

1.1 国外杨树杂交育种概况

国外杨树杂交育种已有近 100 年的历史。1912 年, 英国学者 Henry A 首次进行杨树杂交 (斯塔罗娃 H B, 1984), 采用棱枝杨 (*P. deltoides* var. *angulata*) 与毛果杨 (*P. trichocarpa*) 杂交, 选育出速生、环境适应性强的格氏杨 (*P. generosa*)。随后, 各国均开展了杂交育种研究。

1.1.1 美国

自 1924 年, 美国进行了系统的杨树杂交育种工作, 用美洲山杨 (*P. tremuloides*)、银白杨 (*P. alba*) 等为亲本做了 100 个杂交组合, 得到上万株杂种苗。明尼苏达州大学北方中心实验站进行了毛果杨和不同种源的美洲黑杨 (*P. deltoides*) 杂交, 以速生、抗寒为目标选育出 NE-311、NE-296、NE-200 等杂种无性系 (Dickmann et al, 1985)。东北林业试验站培育成功欧美杨无性系 NE 222 号杨 (*P. × euramericana* 'NE222') (李文荣, 2008)。Li 等 (1993) 对大湖州 40 年的白杨派杂交育种工作进行总结, 结果发现美洲山杨 × 欧洲山杨的杂种单株材积生长量是美洲山杨的 2 倍。太平洋西北地区从

毛果杨和美洲黑杨的杂交开始, 已经完成了一个完整的育种周期(Stettler, 1996)。Stettler R F 等以毛果杨为母本、美洲黑杨为父本杂交选育出 11-11、15-29、23-91、24-305、49-177、184-411 等优良无性系, 这些无性系具有生长快、叶片大、生根能力强等特性(Stettler et al, 1988; Ceulemans et al, 1992)。

1.1.2 前苏联

前苏联于 1933 年开始进行杨树杂交育种工作, 从银白杨(*P. alba*)与新疆杨杂交后代(*P. bolleana*)中选出莫斯科银毛杨(*P. suaveolens* × *P. tremula*)和苏维埃塔型杨(*P. alba* × *P. bolleana*), 从欧洲山杨和新疆杨的杂交后代中选出雅布洛考夫杨(*P. treaula* × *P. bolleana*) (叶培忠, 1955; 施溯筠等, 2000)。并于 1958~1967 年从雪白杨(*P. alba* var. *nivea*)与巨型山杨杂交组合中得到乌兹别克先锋杨, 用欧洲山杨和灰杨(*P. canescens*)杂种与新疆杨杂种杂交获得绿化观赏用品种黑加杨。从欧洲黑杨 × 钻天杨组合中选出适合培育胶合板材的良种, 且培育出少先队员杨、俄罗斯杨、米丘林工作者杨等。从欧美杨(*P. × euramericana*) × 钻天杨组合中选出特洛波格李茨基杨, 10 年树高达 23m, 胸径 29.7cm (马常耕, 1984)。在香脂杨育种中育成了莫斯科郊区杨和伊凡切夫杨, 用毛果杨与苦杨杂交, 培育出抗寒、抗病、速生的友谊杨(马常耕, 1984)。从钻天杨 × 毛果杨杂交组合中选出鲁宾杨 2 号, 该无性系抗寒、抗锈病。用钻天杨与苦杨培育出新中东杨(马常耕, 1984)。Tsarev A P 利用优良性状个体做杂交组合, 获得杂交苗木 5.9 万株, 经长期测定, 选出 135 株表现最好的杂种个体(施溯筠等, 2000)。

1.1.3 意大利

意大利在杨树育种方面一直处于世界前列, 1923 年意大利育种先驱 Jacometti 用欧美杨雌株与欧洲黑杨回交, 培育出抗春季落叶病的 I-154 杨(*P. × euramericana* cl. I-154)。1929 年 Jacometti 教授用欧美杨与卡罗林杨杂交, 经 Piccarolo 教授选育出一批欧美杨无性系, 如 I-214、I-488、I-455 和 I-262 等。其中 I-214 无性系生长快, 适应性强而被世界广泛引种。1963 年发现 I-214 杨易感染褐斑病(*Marssonina brunnea*), 杨树育种学家 Avanzo E 教授与病理学家 Cellerina G P 教授合作, 选育出抗褐斑病的无性系阿万佐杨(*P. × euramencana* cl. 'Luisa Avanzo')和西玛杨(*P. × euramencana* cl. 'Cima'), 并用这两个无性系逐渐更替 I-214 杨(张绮纹, 1987)。1968 年从天然杂种欧美杨中选育出无性系比利尼杨(*P. × euramericana* 'Bellini') (李文荣, 2008)。还利用美国伊利诺伊州的美洲黑杨作为母本, 与意大利欧洲黑杨杂交得到欧美杨 107 杨(*P. × euramericana* '74/76'), 利用欧美杨

天然杂种选育欧美杨 108 杨 (*P. × euramericana* ‘Guariento’), 这两个无性系因速生、易繁殖, 干形和冠形优良, 材质好, 抗逆性和抗病虫性较强, 适生范围广而在中国广泛栽培 (斯塔罗娃 H B, 1984; 张绮纹, 1984)。意大利杨树所还利用美国伊利诺伊州的美洲黑杨 *P. deltoides* ‘71/75’ 为母本, 意大利 Carapelle 的银白杨为父本进行杂交, 获得派间杂种米奇 109 杨 (*P. deltoides* × *P. alba* ‘Mincio’), 此品种早期速生, 在保证水肥条件下, 一般造林成活率都在 95% 以上, 木材基本材性较好, 抗旱能力较强, 较抗病虫害 (李文荣, 2008)。利用美洲黑杨 (*P. deltoides* ‘I-37’) 为母本, 日本青杨派马氏杨 (*P. maximowiczii*) 为父本进行杂交, 获得艾瑞达诺 110 杨 (*P. deltoides* × *P. maximowiczii* ‘Eridano’), 该品种早期速生, 易繁殖, 树形优美, 材质好, 抗逆性强。利用美国的美洲黑杨 (*P. deltoides* ‘217/958’) 作为母本, 自由授粉所获半同胞家系的欧美杨无性系作为父本进行杂交获得贝洛托 111 号杨 (*P. × euramericana* ‘Bellotto’), 该无性系造林成活率高达 95% 以上, 木材韧性强且树冠窄, 抗风折能力强 (李文荣, 2008)。

1.1.4 加拿大

加拿大 20 世纪 40 年代开始杨树育种工作, 并获得了许多杂种。利用美洲黑杨与欧洲黑杨杂交获得欧美杨 113 号 (*P. × euramericana* ‘DN113’), 此品种耐寒速生, 树干与冠形优良, 抗逆性强, 抗病虫害强, 木材材质好, 是工业用材的优良树种 (李文荣, 2008)。安大略省以速生、抗寒和提高插穗生根能力为目标, 选育出最佳杂交组合美洲山杨 × 大齿杨 (*P. grandidentata*) (徐纬英, 1960)。自 1971 年以来, 加拿大完成了以美洲黑杨为母本的杂种田间试验, 培育了以美洲黑杨为杂交亲本的 50 多个组合 (尹伟伦, 2001)。

1.1.5 其它国家

Krzan Z (1976) 在波兰做了美洲黑杨不同种源 44 个无性系的抗锈病试验, 结果发现南方种源和以南方种源做亲本的欧美杨抗锈病 (施溯筠等, 2000)。波兰从马氏杨 (*P. maximowiczii*) × 毛果杨杂交组合中选出抗寒、易生根、生长较快的杂种无性系。法国发现欧洲山杨 × 美洲山杨、欧洲山杨 × 银白杨的杂种具有明显的杂种优势, 同时选择出 11 个杂种无性系 (Bouvatelet *et al*, 1959)。比利时于 1948 ~ 1992 年, 在美洲黑杨、欧洲黑杨、毛果杨和马氏杨之间进行了大量种间控制杂交、回交, 对杂交苗进行大量的抗锈病和抗溃疡病的筛选试验, 培育出具有速生、抗病且材质好的优良无性系 (黄金东等, 1998)。韩国育种专家进行了杨树种内和种间 1200 多个杂交组合试验, 以材质及生长量选择为目标, 选育了 6 个适于韩国气候和土壤的新品种: 欧美杨 I-476 和 I-214、银白杨 × 腺毛杨 F_1 、黑杨 × 辽杨 F_1 、香杨 ×

意大利杨 F_1 、欧美杨 'E28' $\times$ 黑杨 'Lux' F_1 (吴晓春等, 1994)。韩国杨树育种专家玄信圭以银白杨 *P. alba* 为母本, 腺毛杨 *P. grandulosa* 为父本, 杂交培育出 84K, 84K 扦插成活率高, 苗木生长量大, 12 年生平均高 15.11m, 胸径 32.78cm, 根系发达, 抗寒、抗旱且适应性较强 (李文荣, 2008)。日本 Shigern (1984) 在研究马氏杨种源的同时, 对种源内不同个体进行遗传交配设计, 测定一般配合力和特殊配合力, 为杂交亲本选择提供理论依据。捷克学者进行了不同种源欧洲山杨与银白杨之间的杂交 (Pospisil, 1985)。荷兰 20 世纪 40 年代开始杨树杂交育种工作, 获得了很多杂种, 如 N3016 杨 (*P. $\times$ euramericana* '3016')。是荷兰森林及城市研究所选育成功的优良欧美杨无性系, 1980 年引入我国, 4 年材积生长量超过 I-214 杨 87.81% (李文荣, 2008)。

综上所述可知, 国外杨树杂交育种工作开展较早, 派间、派内杂交组合丰富, 杂交新品种较多, 产生了较好的生态效益和经济效益。

1.2 中国杨树杂交育种概况

我国杨树引种已有悠久的历史, 但真正有计划的杨树育种研究是从 20 世纪 50 年代开始, 我国杨树育种经历了探索期、繁荣期和恢复期等 3 个时期 (马常耕, 1995), 不同时期有不同特点, 近 20 年已经选育出许多与五六十年代明显不同的杨树新品种 (苏晓华等, 2004)。目前, 我国林业生产中推广应用的杨树良种主要是通过人工杂交培育, 已经产生巨大的经济效益, 杂交育种仍然是目前及今后更长时期内培育杨树新品种的重要手段 (张志毅, 2006)。

1.2.1 派内种间杂交

1.2.1.1 白杨派

叶培忠先生于 1946 年在甘肃天水首次进行白杨派内种间杂交, 杂交组合有河北杨 $\times$ 山杨、河北杨 $\times$ 毛白杨等, 选育出银毛杨和南林杨 (*P. $\times$ 'Nanlin'*)。黑龙江省森林与环境科学研究院以山杨 (*P. davidiana*) 为母本, 以新疆杨 (*P. bolleana*) 为父本人工杂交选育出窄冠杨树品种山新杨 (*P. davidiana $\times$ P. bolleana*), 山新杨树冠狭窄, 树干通直圆满, 光滑色白, 树姿美丽, 生长快, 不飞絮, 是我国目前北方窄冠杨树中最耐寒、最美观的园林绿化树种之一 (李文荣, 2008)。徐伟英 (1991) 等通过杂交选育出毛新杨 (毛白杨 $\times$ 新疆杨)、银山杨 (银白杨 $\times$ 山杨)、山新杨 (山杨 $\times$ 新疆杨) 等优良无性系。王绍琰 (1985) 以银白杨为母本与新疆杨杂交, 选育出银新杨 1 号和银新杨 2 号等两个优良无性系, 2 个无性系树干通直圆满, 树形美观。王绍琰等 (1987) 以银白杨为母本, 以河北杨 $\times$ 山杨为父本杂交, 选育出银

白杨×(河北杨×山杨)优良品种,其材积超过河北杨 109.8%,且抗病虫,易生根。庞金宣等利用南林杨与毛新杨杂交获得窄冠白杨(*P. leucopyramidalis*)1 号和窄冠白杨 5 号,利用响叶杨与毛新杨杂交获得窄冠白杨 3 号和 4 号,利用毛新杨与响叶杨杂交获得窄冠白杨 6 号,5 个无性系树冠窄,根系深,生长快,单株材积超过一般毛白杨 60% 以上(庞金宣等,2001)。黑龙江省防护林研究所利用银白杨与中东杨(*P. × berolinesis*)杂交获得银中杨(*P. alba × berolinesis*),银中杨属白杨派与黑杨派间杂种,该品种树姿优美,不飞絮,是城乡园林绿化的杨树首选品种(温宝阳,1998)。邱光明等(1991)从河北杨×毛白杨组合中选育出河北杨×毛白杨 1 号,10 年生材积超过河北杨 141%。刘培林等(1991)以银白杨为母本,山杨为父本,选育出银白杨×山杨 1333 号无性系。以山杨为母本,银白杨×山杨为父本,培育出山杨×银山杨 1132 号优良品种,该品种具有速生、抗寒等特点。北京林业大学 1982 年后广泛开展白杨派间杂交育种,采用秋水仙碱、射线处理花粉,选育出 6 个三倍体毛白杨优良无性系,这些无性系具有早期速生、材质优良等特点。李开隆等(2004)通过对中国山杨与美洲山杨杂交获得 Id42-3 等 4 个生长速度快,光合能力强,抗病虫能力强的杂交种。李善文(2004)以白杨派毛白杨、银腺杨、毛新杨、新疆杨等作为亲本进行 15 个杂交组合,其中 11 个组合获得后代植株,进行初步评价选出 123 个优良单株。赵淑芳等以银白杨为母本,84K 和毛白杨为父本进行杂交,发现银白杨×84K 杨比银白杨×毛白杨杂交苗的综合表现更好(赵淑芳,2009)。杨成超等通过花粉蒙导与未成熟胚离体培养技术,克服了科间远缘杂交障碍,获得了银白杨×白榆杂种苗(杨成超,2006)。综上所述,中国白杨派内杂交已经取得很好成绩,杂交方式从单交、双交到三交,育种方法以人工杂交为主,同时将加倍等技术应用到杂交育种中,培育出的新品种在林业生产中产生很大的经济效益。

1.2.1.2 黑杨派

中国林业科学研究院韩一凡等(1991)以 I-69 杨(*P. deltoids* 'Lux')为母本,I-63 杨(*P. deltoids* 'Harvard')为父本进行人工授粉获得杂交后代美洲黑杨南抗 1 号(*P. deltoides* 'Nankang 1')和南抗 2 号(*P. deltoides* 'Nankang 2'),南抗系列速生,木材细腻洁白,无黑心材,适用于长江中下游各地区及靠近南部的黄河流域、淮河流域及江汉地区(秦锡祥,1991)。李定航等(2001)利用美洲黑杨天然变种棱枝杨与密苏里三角杨、山海关杨杂交获得中林 2000 杨,该品种树干通直圆满,顶端优势明显,生长量大,与欧美杨(沙兰杨、I-214 杨)及美洲黑杨(69 杨、72 杨)相比生长量提高 15.2% 以

上。南京林业大学王明庥等(1991)利用美洲黑杨 I-69 杨作为母本, I-45 杨作为父本进行杂交, 获得南林 95 杨 (*P. × euramericana* ‘Nanlin-95’) 和 895 杨 (*P. × euramericana* ‘Nanlin-895’), 7 年生南林 95 杨材积生长量超过对照 I-69 杨 24.22%, 南林 895 杨生长量超过对照 I-69 杨 53.22%。黄东森等(1991)以 I-69 杨 (*P. deltoids* ‘Lux’) 为母本, 欧洲黑杨混合花粉为父本, 选育出中林 46 (*P. deltoides* ‘Zhonglin46’) 和中林 23 (*P. deltoides* ‘Zhonglin23’) 等优良无性系, 中林 46 杨在华北平原表现速生, 病虫害少, 其生长量较 I-214 杨大 75%。凌朝文利用山海关杨与美洲黑杨 I-63 杨、I-69 杨进行杂交选育出廊坊杨 1 号 (*P. deltoides* ‘Shanhaiguanensis’ × (*P. pyramidalis* × *P. deltoides* ‘Harvard’)); 廊坊杨 2 号 (*P. deltoides* ‘Lux’ × *P. deltoides* ‘Shanhaiguanensis’), 以山海关杨为母本, 利用小叶杨 × 美杨和白杨的混合花粉进行授粉获得廊坊杨 3 号杨 (*P. deltoides* ‘Shanhaiguanensis’ × (*P. simonii* × *P. pyramidalis* - 12 + *Ulmas pumila*)), 廊坊杨树干通直圆满, 侧枝细, 6 年生林分, 胸径年平均生长量为 4.4cm, 最大胸径年生长量为 5.6cm, 平均高 16.8m, 平均树高年生长量为 2.8m (刘月君等, 1998)。符毓秦等(1990)以 I-69 杨为母本, I-63 杨 (*P. deltoides* ‘Harvard’)、密苏里杨 (*P. deltoides* var. *missouriensis*) 和卡罗林杨 (*P. deltoides* var. *angulata* ‘Carolin’) 的混合花粉授粉, 选育出陕林 3 号优良无性系, 5 年生单株材积超 I-69 杨 24%, 具有抗病虫特点, 其耐寒性、耐旱性优于亲本 I-69 杨。何庆庚利用山海关杨作为母本与 I-63 杨杂交获得秦皇岛杨 (*P. deltoides* ‘Shanhaiguanensis’ × *P. deltoides* ‘Harvard’ I-63/51), 秦皇岛杨 13 年生平均胸径为 20.9cm, 是对照山海关杨的 151%, 平均树高 18.9m, 是对照山海关杨的 124% (刘志新等, 1996)。陈鸿雕等(1992)选出鲁克斯杨 (I-69 杨) × 山海关杨 (*P. deltoides* ‘Shanhaiguan’) 子代辽宁杨、山海关杨 × 哈佛杨 (I-63 杨) 子代辽河杨、圣马丁诺杨 (I-72 杨) × 山海关杨子代盖杨等三个优良品系, 这 3 个品种在良好立地条件下, 生长速度快, 干形良好, 且具有抗溃疡病和灰斑病的特点。刘月君等(1998)通过山海关杨 × (美杨 + 哈佛杨)、鲁克斯杨 × 山海关杨分别选出廊坊杨 1 号、2 号, 具有明显杂种优势。黄东森和韩一凡用抗性强、速生的美洲黑杨与干形优良速生的欧洲黑杨及青杨为亲本, 进行杂交选育出中金 2 号杨、中金 7 号杨和中金 10 号杨, 中金系列杨具有生长量大、成才早、繁殖容易、成活率高、材质优质、根系发达、抗逆性强、适生区域广泛等特点 (王继红等, 2001)。魏玉玲等(2005)利用 I-69 杨与美洲黑杨 + 山海关杨 + 三角杨的混合花粉杂交后代选出无性系 84-317、84-320 和无性系 84-315, 3 个品种作为造纸和人造板材, 木材性能

均优于中林 46 杨。张春玲等(2008)以 50 号杨(*P. deltoides* cl. '55/65')为母本, 36 号杨(*P. deltoides* cl. '2KEN8')为父本杂交培育出新品种丹红杨(*P. deltoides* cl. 'Danhong'), 该品种耐桑天牛, 在适合的立地条件下胸径平均年生长量高达 6cm, 明显超过亲本与对照品种。山东省林业科学研究院以欧美杨 I-72 和美洲黑杨 I-69 为母本, 用美洲黑杨 PE-3-71(*P. deltoides* 'PE-3-71')花粉进行授粉, 获得鲁林 2 号杨(*P. × 'Lulin-2'*)和鲁林 3 号杨(*P. × 'Lulin-3'*), 在美洲黑杨 228-379(*P. deltoides* '228-379')母树上收集天然种子播种培育出鲁林 1 号杨(*P. × 'Lulin-1'*), 鲁林系列浆造纸和制作胶合板, 抗病虫、抗逆性强(姜岳忠等, 2009)。焦作林业科学研究所收集美洲黑杨(*P. deltoides*)优树天然杂交种培育出桑巨杨, 抗虫强、速生性和干形优良, 8 年生胸径达 29.64cm, 平均树高 23.04m(赵自成等, 2008)。李善文(2004)利用 I-69 与 D324(*P. deltoides* 'D324')、钻天杨杂交, 发现这两个组合可配性强。杜克兵等以适宜湖北地区栽培的 5 个黑杨优良品种为亲本进行杂交, 杂交子代获得显著的超亲优势和遗传增益(杜克兵等, 2009)。

1.2.1.3 青杨派

青杨派内杂交研究文献较少, 只有徐纬英(1960)进行了小叶杨×滇杨、小叶杨×香脂杨、小叶杨×青杨、青杨×苦杨、小青杨×滇杨等杂交组合研究。小叶杨×香脂杨在河北张家口 4 年生树高 4.61m, 胸径 3.98cm(赵天锡等, 1994)。

1.2.1.4 大叶杨派和胡杨派

大叶杨与胡杨派种间杂交均未见报道。

1.2.2 派间杂交

1.2.2.1 黑杨派与青杨派

黑杨派和青杨派派间杂种优势明显(李善文, 2008), 自然条件下很容易产生天然杂种且具有显著杂种优势。中国天然分布或广泛栽培的黑杨派与青杨派杂种很多, 在生产上产生巨大的经济效益。育种专家开展了多个黑杨派与青杨派的杂交试验, 1956 年育种学家针对我国华北北部及西北高寒地区的生态环境, 选择了生长迅速, 适应性较强的钻天杨为母本, 以青杨为父本杂交选育出北京杨(*P. pyramidalis × P. cathayana* 'Beijingensis')(徐纬英, 1960; 1988)。1957 年徐纬英等以小叶杨为母本, 以钻天杨和旱柳(*Salix × matsudana*)混合花粉为父本进行杂交育种, 获得比一般杨树种间杂种的遗传基础更丰富的育种材料群众杨(*P. simonii × (P. pyramidalis + Salix matsudana)*)(徐纬英, 1988), 20 世纪 50~60 年代, 中国林科院利用小叶杨为母