

从福建杉木第4代 看向全球——国外主要林木高世代育种简述

近日，福建在杉木育种领域实现了一项具有里程碑意义的突破——国际上第一个杉木第4代种子园全国首批采种实现，相关科研工作同步迈入第4代新纪元。

相比五六十年前的普通品种，新一代杉木良种年均蓄积生长量提升超40%，抗病、耐瘠薄能力与木材材性也显著增强。这一突破有力驱动了林业种业创新与产业化，将科技优势直接转化为生产与生态建设优势，为更好地发挥森林“四库”作用提供了良种保障。

福建所取得的这一成就，在全球林木育种领域中处于什么水平？本期《海纳集成》，我们将目光投向国际前沿，审视全球林业强国在林木高世代育种领域的发展足迹，旨在以全球视野为镜，精准定位自身坐标；更冀以他山之石，攻琢自主创新之玉，助推福建杉木育种再上层楼。

01

● 美国：产学研多方协作的育种体系 ●

美国林木育种体系以多方协作为特色，大学、研究机构与私营企业共同参与。其中，北卡罗来纳州立大学（NCSU）主导的“火炬松改良项目”便是典范。得益于产学研协作，火炬松育种进程得以系统推进，并拥有详实的数据作为支撑。

1. 美国火炬松 (*Pinus taeda*)

美国火炬松育种在连续多代改良中展现出显著的遗传增益。相较未改良种源，第1代种子园材积增益提高7-12%，第2代提高21%，经子代测定去劣疏伐后的第2代种子园增益更达30%，而第3代种子园在此基础上进一步提高了约15%。目前，该体系已完成第4代育种，并进入了第5代育种阶段。依托高强度的育种策略，实现了显著的经济、社会与生态效益。

在技术层面，美国正大规模推广控制授粉（CMP）技术，利用高育种值的亲本进行特定配对，通过捕获非加性遗传效应及消除花粉污染，将遗传增益提升至60%的高水平。此外，为加速育种周期，北卡罗来纳州立大学采用“高接换种（Top-grafting）”策略：将基于全基因组选择（GS）筛选出的幼年期优良单株嫁接至成熟种子园母树树冠顶部，以诱导其提早开花。此外，育种目标也已从单一的木材生产转向综合性状改良，涵盖生长速度、木材质量、抗病虫害能力以及气候变化适应性等多项指标，逐步形成了多目标的林木育种体系。



图 1 美国育种人员对第五代选育优树开展高位嫁接

https://static1.squarespace.com/static/53d80341e4b04ced59322afa/t/67cbb18039e59d48125da9d8/1741402513931/24+AR_wp.pdf

2. 美国湿地松 (*Pinus elliottii*)

作为美国南方松的重要树种，湿地松育种与火炬松同步推进。目前，佛罗里达大学主导的湿地松遗传研究项目（CFGRP）进入第4代育种阶段。鉴于湿地松主要分布在沿海平原，其第4代育种策略在持续提升材积生长的同时，强调对梭形锈病（Fusiform Rust）等病害的抗性改良。

该育种体系充分利用第3代测定积累的遗传数据，通过建立“现实增益试验林”来校准预测模型。尽管在总体规模上小于火炬松项目，但湿地松育种在抗逆性选育与适应性改良方面积累了丰富经验，其高世代种子园正持续为市场供应兼具高抗病性与高生长势的优良种质。

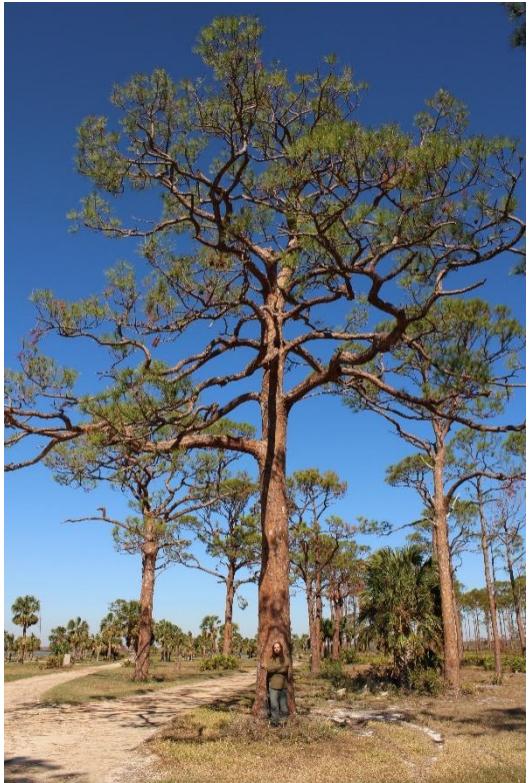


图 2 美国的湿地松

<https://fsus.ncbg.unc.edu/cust/2024/main.php?pg=show-taxon-detail.php&taxonid=246>

02

● 欧洲：科技引领的迭代创新体系 ●

1. 法国海岸松 (*Pinus pinaster*)

法国海岸松的育种工作由法国林业与木材技术研究院 (Institut Technologique FCBA) 主导，是欧洲集约化程度最高的针叶树育种项目之一。该项目自 20 世纪 60 年代初启动，在“未来海岸松科学兴趣联合体”框架下，联合了法国国家农业食品与环境研究院、阿基坦地区林业研究中心、法国私人林业中心和法国国家森林局等多家核心机构协同推进。

该育种计划以从约 600 株林分中筛选出的优树为基础群体，确立了周期 15 – 20 年的轮回选择策略。每一周期均通过“性状评估—亲本筛选”的循环推进遗传改良，并利用所选优良基因型建立种子园，以生产改良品种。亲本筛选核心指标包括生长量、树干通直度，同时兼顾气候适应性及孢锈病抗性。

目前，法国海岸松造林面积中超过 90% 采用自由授粉种子园所生产的苗木，主要品种为第 2 代和第 3 代改良品种。自 2016 年起，已逐步开展第 4 代改良品种专用种子园建园工作。为确保高世代种子园的遗传质量与纯度，法国建立了覆盖从育种群体到种子批次的全程分子标记监控体系。科研人员利用 SNP 标记开发了低成本、高通量的基因分型工具，对种质资源保存、嫁接繁殖到种子园建设等关键环节进行身份验证与质量控制，有效识别并纠正了系谱记录错误。



图 3 法国的海岸松种子园

<https://peercommunityjournal.org/articles/10.24072/pcjournal.302/>

2. 瑞典挪威云杉 (*Picea abies*)

瑞典的挪威云杉育种受限于寒带树种极长的开花等待期（自然状态需 20-25 年），目前商业化种子园主要处于第 1.5 代至第 2 代水平。为突破这一生物学瓶颈，瑞典林业研究所（Skogforsk）开发并应用了全球领先的“室内种子园（Indoor Seed Orchards）”技术。通过在温室内精确调控温度和光照，育种师能够诱导幼树提早开花，结合 GS 技术可将世代间隔从 25 年压缩至 12-15 年，显著缩短育种周期。目前，瑞典正在构建第 3 代育种群体，并结合基因组选择(GS) 技术在苗期进行遗传评估。尽管代数在数字上未达第 4 代，但其在生殖生物学调控和基因组辅助育种方面的技术储备已达到世界顶尖水平，为未来快速实现高世代育种奠定了坚实的方法学基础。



图 4 瑞典温室内控制授粉的挪威云杉

https://news.cision.com/sodra/r/better-spruce-trees-from-greenhouse-orchards_c2_685909

03

● 日本：社会需求驱动的精细化育种体系 ●

日本柳杉（*Cryptomeria japonica*）育种始于 20 世纪 50 年代，由森林树木育种中心（FTBC）主导，现已进入从第 1 代向第 2 代优树的全面过渡，并启动第 3 代杂交选育。

针对国民日益严重的花粉症问题，日本将“无花粉/少花粉”性状确立为柳杉育种的核心目标。为实现生长性能与花粉控制的平衡，科研人员从初代优树的 9000 个杂交组合、20 万株子代中，系统筛选出生长优良的第 2 代优树，并将其中生长量突出、花粉量减半的顶级无性系品种列为“特定母树”，作为高世代种子园的核心遗传材料。

2023 年，关西育种场通过人工杂交成功培育出三个新的无花粉品种，标志着第 3 代育种在功能性状上取得关键突破。

在推广体系上，日本采用集约化的“微型种子园”模式，通过控制母树高度、实施高密度种植、赤霉素诱导开花技术，实现种子快速量产。FTBC 作为国家种质资源核心库，负责“原种”保存与分发，并建立 DNA 追溯系统保障遗传纯度。

当前，日本正利用“杂交温室”与基因组编辑技术，加速选育生长优良且完全不产花粉的新品种。尽管全基因组选择已用于辅助预测，现阶段仍以推广第 2 代改良种与特定母树为主，计划至 2050 年优良种苗使用率实现 90% 以上，系统推动林业育种与公共健康的协同配合。



图 5 少花粉柳杉品种的微型种子园

<https://www.ffpri.go.jp/ftbc/en/documents/overview.pdf>

04

● 南半球：产业驱动的规模化高效体系 ●

1. 新西兰辐射松 (*Pinus radiata*)

新西兰的辐射松育种始于 20 世纪 50 年代。在完成第 3 代育种后，其育种体系不再沿用传统的“代际”划分，转而采用“滚动前沿”策略。该策略将种子园划分为“储备区”与“核心区”两部分：候选基因型在储备区生长至生殖成熟后，表现最优的个体被移入核心区进行种子生产，实现种质的持续评估与动态更新，并以保持遗传多样性为关键目标。通过这一策略，育种专家每年从核心群体中筛选顶级个体进行杂交，实现了遗传增益的连续积累，其核心种质的改良程度已达到传统定义的第 4 代。

在性状选择方面，育种目标已从早期侧重生长量与树形，发展为基于“经济指数”的综合选择，涵盖木材硬度、树干通直度等多类性状。目前，新西兰辐射松育种公司（RPBC）已广泛应用 SNP 芯片进行系谱确认，并采用基因组选择技术快速预测数千个基因型的育种值。这种基于基因组学的性状预测大幅缩短了育种周期，使抗病性、木材材质等最新遗传改良成果能够通过种子园和无性系林业体系迅速应用于商业造林。



图 6 新西兰辐射松人工套袋授粉

https://cdn.prod.website-files.com/5d4797a2a904cdf4df041fd6/5ecde867274c003f9d1848d6_Radiata_the%20race%20to%20grow%20a%20better%20tree.pdf

2. 巴西桉树（*Eucalyptus*）

巴西桉树产业受高度集约化的纸浆需求驱动，凭借 6-7 年的超短轮伐期，成为全球迭代速度最快的林木育种典范之一。巴西桉树育种体系以书赞桉诺（Suzano）等大型浆纸企业深

度主导，育种目标服务于工业化原料需求。与常规模式不同，巴西主要采用“高世代育种+无性系测试”模式：在高度改良的第4/5代杂交群体（主要为巨桉×尾叶桉）中筛选超级单株，直接通过组培和扦插进行大规模无性系造林。目前，育种重点已从生长量转向利用分子标记辅助育种（MAS）提升对干旱和生物胁迫的抗性，部分企业已涉及转基因品种的生物安全评估与商业化探索。

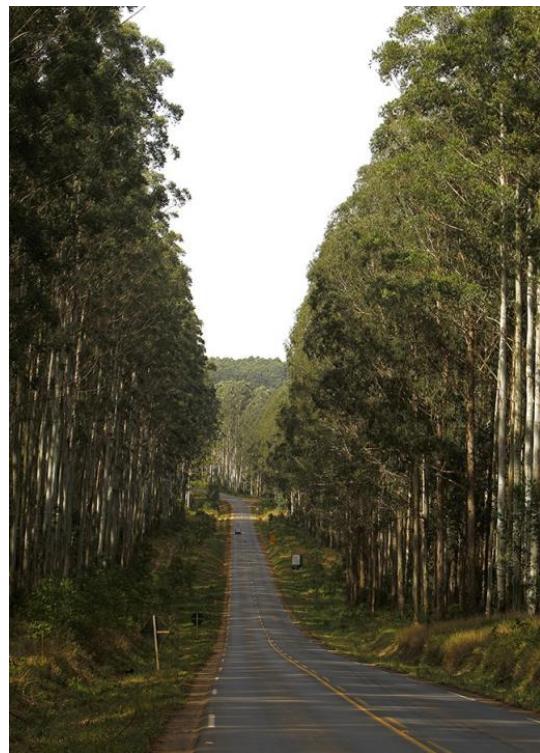


图 6 巴西的桉树

[https://www.embrapa.br/en/flor
estas/busca-de-noticias/-/noti
cia/busca/Eucalyptus](https://www.embrapa.br/en/flor_estas/busca-de-noticias/-/noticia/busca/Eucalyptus)

05

● 启示与展望 ●

林木育种每推进一代，都需要数十年“优中选优、代际传承”的研究和积累，是对科研耐力与制度性投入的全面考验。因此，高世代育种已成为衡量一个国家林业科研实力与持续创新能力的关键标尺。当前，福建实现第4代杉木良种成功批量生产，标志着我国杉木多世代育种和生产应用进入世界林木育种先进行列。

该成果将显著提升福建省木材供给的质量与效率，是服务国家木材安全战略的重要支撑，蕴含巨大的经济、生态与社会价值。这不仅是一项科研突破，更是福建省长期坚持绿色发展、重视科技创新的生动体现，是“绿水青山就是金山银山”理念的实践典范。

展望未来，我们应在现有成就基础上，继续向智能化、精准化育种方向寻求突破，力争从当前与发达国家“并跑”的阶段，稳步迈向“领跑”的新高度，为全球林业可持续发展贡献更多的“福建智慧”与“中国方案”。

参考资料：

- 王章荣. 2019. 国外种子园研究热点及对我国营建高世代种子园的启示. 南京林业大学学报(自然科学版), 43(1): 161–166.
- IUFRO. 2024. Seed Orchards Conference. Brasov, Romania.
- Laurent B, Sandrine D, Pierre A, Annie R, Patrick P, Jean-François T. 2023. Pollen contamination and mating structure in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) clonal seed orchards revealed by SNP markers. Peer Community Journal, 3: e68.
- https://60f00f7e-c173-476d-8b41-a427f5ebe3b5.filesusr.com/ugd/6600dd_ab4ea35fbdf04076ba0780cdb9aa7637.pdf
- https://static1.squarespace.com/static/53d80341e4b04ced59322afa/t/6468019796ef9c650e3687e0/1684537754825/23+AR+w_final.pdf
- <https://static1.squarespace.com/static/53d80341e4b04ced59322afa/t/68268dc2f5617612d41bffca/1747357138422/WP25+AR+Inside.pdf>
- https://static1.squarespace.com/static/53d80341e4b04ced59322afa/t/67cbb18039e59d48125da9d8/1741402513931/24+AR_wp.pdf
- <https://www.treeimprovement.org/>
- <https://www.fcba.fr/>
- <https://www.scionresearch.com/>
- <https://www.rpbc.co.nz/categories/media>
- https://cdn.prod.website-files.com/5d4797a2a904cdf4df041fd6/5ecdf3330995e5f0e8484e5b_Unleashing%20the%20genomics%20genie.pdf
- https://cdn.prod.website-files.com/5d4797a2a904cdf4df041fd6/5ecde867274c003f9d1848d6_Radiata_the%20race%20to%20grow%20a%20better%20tree.pdf
- <https://programs.ifas.ufl.edu/cfgrp/>
- <https://www.skogforsk.se/>
- https://www.ipef.br/programas_cooperativos.aspx
- <https://news.cision.com/sodra/r/better-spruce-trees-from-greenhouse-orchards,c2685909>