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

关于林木育种、制种和用种的几点认识

康向阳

Several understandings on forest tree breeding, seed production and seed utilization

Kang Xiangyang

引用本文:
康向阳. 关于林木育种、制种和用种的几点认识[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(6):1–8. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260171
Kang Xiangyang. Several understandings on forest tree breeding, seed production and seed utilization[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6):1–8. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260171

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260171

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

关于理想森林及其经营的遗传学思考
Genetic thinking on ideal forest and its management
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240093

论林木常规育种与非常规育种及其关系
On conventional and unconventional tree breeding and their relationships
北京林业大学学报, 2023, 45(6): 1–7. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230042

关于我国林木育种向智能分子设计育种发展的思考
Thoughts on the development of forest tree breeding towards intelligent molecular design breeding in China
北京林业大学学报, 2024, 46(3): 1–7. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230338

基于NbS的北京市乔木林固碳能力分析
Carbon sequestration capacity of Beijing arbor forest based on NbS
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200145

热带橡胶林不同经营模式对土壤呼吸及其组分的影响
Effects of management patterns on soil respiration and its components in tropical rubber plantations
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 82–91. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250097

基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素
Driving factors of carbon sink in natural *Larix gmelinii* forests based on structural equation models
北京林业大学学报, 2024, 46(9): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230284

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260171

关于林木育种、制种和用种的几点认识

康向阳

（林木遗传育种全国重点实验室，林木花卉遗传育种教育部重点实验室，城乡生态环境北京实验室，北京林业大学生物科学与技术学院，北京 100083）

摘要:中国是世界森林资源增长最多的国家，但森林质量相对较差。针对主要分布于山地和丘陵等立地的我国森林，涉及遗传改良的林木育种在国家森林质量提升中的作用更为突出。通过良种选育，不仅能够满足集约经营的商品林培育需求，保证林地产出最大化，而且可以用于遗传品质劣化的次生林和过伐林改造或更新，促进分布面积占比更大的国家重要树种天然林遗传品质的提升。其中，基于轮回选择理论构建育种群体，推动交配、遗传测定、选择的育种循环是充分利用自然存在的目标性状相关基因正向等位变异的有效途径，也是林木育种的核心和基石，而非常规育种尤其是新技术育种则是林木育种的创新与发展。根据树种的繁殖方式和利用途径不同，林木良种制种可分为两类，其中，基于有性繁殖的种子园制种的建园亲本配置应首先考虑特殊配合力利用，保证森林在自然稀疏或人工抚育间伐后，所保留优势木的基因加性效应和非加性效应利用最大化；而无性系制种则需重视无性繁殖材料幼化、保幼问题，防止因繁殖材料老化、退化给生产造成损失。良种用于次生林和过伐林为主的兼用林改造或更新时，种子园良种应混杂一定量遗传品质低劣的种子，在充分利用精选种子园种子遗传增益的同时，保证森林具备形成自然稀疏、自然更新能力的遗传基础；而用于集约经营的商品林时，应采用无性系或家系良种，以及精选亲本种子园良种，以保证创造更高的木材等林产品产出以及经济效益等。当前，急需建立森林经营尤其是兼用林改造或更新良种化的国家机制，保证重要树种按育种区育种，按种子区制种和用种，从根本上保证国家森林质量提升。

关键词：森林经营；兼用林；商品林；育种；制种；用种；森林质量

中图分类号：S72；S75　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)06−0001−08

引文格式：康向阳. 关于林木育种、制种和用种的几点认识［J］. 北京林业大学学报，2026，48(6)：1−8. Kang Xiangyang. Several understandings on forest tree breeding, seed production and seed utilization［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6): 1−8.

Several understandings on forest tree breeding, seed production and seed utilization

Kang Xiangyang

(State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plants, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, School of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: China is the country with the greatest increase in forest resources in the world, yet its forest quality remains relatively low. Given that China's forests are primarily distributed across mountainous and hilly terrains, genetic improvement through forest tree breeding plays a prominent role in promoting national forest quality enhancement. Developing improved varieties not only meets the demands of intensive plantation forestry and maximize timber yield, but also achieves the rehabilitation and renewal of genetically degraded secondary and overcut forests, thereby improving the genetic quality of natural forest stands of

收稿日期: 2026−04−11　**修回日期:** 2026−05−22

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD2200105)。

作者简介: 康向阳，教授，博士生导师。主要研究方向：林木细胞遗传与细胞工程育种。Email：kangxy@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生物科学与技术学院。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

important tree species accounting for a larger proportion of the distribution area. Constructing breeding populations and driving the breeding cycle of mating, genetic testing and selection based on recurrent selection theory is an effective way to fully utilize the naturally occurring positive allelic variations of genes related to target traits. It also serves as the core and foundation of forest tree breeding. By contrast, unconventional breeding, especially novel biotechnological breeding, represents the innovation and development of forest tree breeding. According to reproductive mode and utilization pathway, seed production of improved varieties is divided into seed orchard production and clonal seed production. Among these, the utilization of specific combining ability should be considered in parental deployment to ensure maximum utilization of both additive and non-additive genetic effects of retained superior trees after natural thinning or artificial thinning when the seed orchard production is conducted. However, to prevent losses due to aging or degradation of propagation materials, rejuvenation and maintenance of juvenility should be emphasized during clonal seed production. When improved varieties are used for the rehabilitation or renewal of multiple-use natural forests dominated by secondary and overcut forests, a certain number of seeds with inferior genetic quality should be mixed into the seeds produced by seed orchards with elite parents, to ensure the maintenance of genetic basis for natural thinning and renewal, as well as fully utilization of the genetic gains from the superior seeds. In contrast, superior clones, family seeds or seeds from elite-parent seed orchards should be employed for intensive commercial plantations to enhance timber and other forest product yields and economic value. It is imperative to establish a national mechanism for forest management, particularly for the deployment of improved seeds in multiple-use forest rehabilitation and renewal. This mechanism should ensure that the important tree species are bred according to the breeding zones, and that seed production and utilization of improved varieties follow the seed zones, thereby fundamentally promoting the improvement of national forest quality.

Key words: forest management; multiple-use forest; commercial forest; breeding; seed production; seed utilization; forest quality

当人类走出森林形成聚落并开始种植、养殖时，动植物育种活动就已经开始了[1−2]。树木育种应该始于果树和桑树(*Morus alba*)，我国西汉末期的《氾胜之书》[3]中就有“择美桑种椹”的选种记载。而目标更为明确的林木育种实践则起始于 1880 年，为稳定生产高奎宁(quinine)含量的优质种子，荷兰人在爪哇营建了金鸡纳树(*Cinchona calisaya*)种子园[4]。显然，自林木育种诞生之日起，就有其明确的社会经济属性。尤其是人类社会进入 20 世纪之后，第二次工业革命带动木材需求剧增以及人工林发展，推动了林木育种理论和技术进步及其应用。近百年来的国内外林业实践证明，良种可以使人工林轮伐期缩短 1/3 ~ 1/2，单位面积林地林木材积生长提高 20% ~ 50%[5−9]。

随着现代生物学的发展，尤其是抗除草剂转基因杨树(*Populus* spp.)成功[10]之后，分子生物学、合成生物学、生物信息学等不断涌现的理论与技术成果对林木遗传育种形成越来越强烈的冲击。仅从我国林木遗传育种领域的研究现状看，这种影响是多方面的，其中大量的人力和财力资源集中于基因组解析、目标性状关键基因挖掘及其遗传调控机制揭示等研究，固然相应基础研究的加强有益于未来基于分子设计的育种路径重塑，但同时也出现了一些偏离林业用种实际的无效育种和制种研究，甚至一些天然林树种或未来将转为借助自然力经营的树种被“过度育种”，导致有限的科技资源浪费，而一些重要树种育种群体构建及其交配、测定、选择等常规育种——林木育种核心与基础工作相对弱化，需要引起我们足够的重视。

近年来，笔者在努力推动杨树、桉树(*Eucalyptus* spp.)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)等树种遗传改良[11−17]的同时，针对前述问题，分别就林木无性系林业与无性系育种策略[18−19]、林木育种策略[9,20]、林木常规育种(包括选择育种和种内杂交)与非常规育种(包括远缘杂交、多倍体育种、基因工程等)的关系[21−22]、林木良种在理想森林经营中的应用路径[23]等进行了探讨，并总结了我国林木育种与良种应用需重视的问题[24]等。在此，本文拟在上述论述的基础上，进一步基于森林遗传学理论，针对为何育种，以及如何育种、如何制种和如何用种的“育种四何”及其关系问题展开讨论，期望能起到抛砖引玉的作用，推动国家林木育种事业的经济高效发展以及森林质量的有效

提升。

1　为何育种

一般而言，林木育种主要服务于人工林经营，通过选育优良品种造林，增加木材产量，改善木材品质，降低采伐年龄，保证加工原料与工艺及产品的性能稳定，减少生产投入，以及满足社会和市场多样化需求等。为何育种？这似乎是一个不是问题的问题，但至少对于当前的我国而言，还应该有其更重要的应用——基于良种辅助自然更新甚至重建，促进分布面积占比更大的国家重要树种天然林的遗传品质提升。

我们知道，树木属于多年生植物且分布广泛，经过长期自然演化和自然选择，大多数树种进化出雌雄异株、雌雄蕊异熟、自交不亲和等保证其异花授粉特性，异交重组决定了树木拥有更丰富的群体遗传多样性，以适应其复杂多变的生存环境[21, 25–26]。就天然林而言，在林分郁闭前，群体首先受到选择的是适应性状，其中不适应环境的基因型被淘汰，适应环境的基因型被保留下来，初步形成与当地环境相适应的群体遗传结构；天然林在林分郁闭后，高生长竞争加剧，自然稀疏导致一部分树木死亡，林分稳定性增强，从而形成与经度、纬度、海拔以及相应生态环境因子变化相关的地理种源变异——环境适合度最佳[21]。也就决定了育种目标性状相关基因正向等位变异分散保存于群体内不同基因型之中，即环境适合度最佳的天然林并不是土地木材生产力等育种目标性状表现最优的森林[23–26]。同时也说明人类可以通过育种及良种应用，促进树木群体遗传结构改善以及目标性状遗传品质提高，实现理想森林经营[23]。

新中国成立以来，通过持续推动国土绿化，我国成为全球森林资源增长最多的国家[27–28]。然而，虽然拥有 13 867.77 × 10^4 hm^2 天然林[28]，但蓄积量只有 94.83 m^3/hm^2，为世界平均水平的 74%，不到德国等林业发达国家的 1/3[28–29]。其原因在于：(1)因战争、日寇盗伐等破坏，留给新中国的天然林只有 0.828 亿 hm^2[30]。(2)自 1950 年起，因国家建设需要，在东北、西南、西北等 9 个省区陆续建立 138 个国有林业局，开始大面积采伐木材[31],导致原始林目前仅余 0.08 亿 hm^2 左右,约 94% 的天然林为过伐林和次生林[29]。(3)有一些地区为了短期利益，在一些树种的天然林抚育时不按作业设计留优去劣，而是采取“拔大毛”式间伐[32]，进一步导致森林的遗传品质劣化。显然，面对我国一些重要用材树种遗传品质劣化的过伐林或次生林，若仅依靠自然交配促进生长等目标性状遗传品质提高，而达到森林质量提高之目的，可能需要经历多轮次的实生天然更新才能实现，过程极其缓慢。只有通过采取遗传品质提升且遗传多样性丰富的种子园良种重建或辅助更新等措施引入优良种质，才有可能从根本上快速促进国家森林质量提升。

我国人工用材林几乎从零起步，迄今已超过 7 954.28 × 10^4 hm^2[28]。但人工林年均生长量仅为欧美等林业发达国家的 1/2[28–29]，主要与大多数造林树种的良种化水平以及良种遗传品质较低有关：(1)自 20 世纪 80 年代初开始，系统开展林木育种研究只有 40 多年，时间短、投入不足且时断时续，导致多数树种尚处于第一育种世代，且良种遗传品质不高。(2)一些重要造林树种的现存原始林因育种区所限，其优良种质资源大多数难以利用。(3)一些树种从过伐林或次生林中选优，只能“矬子里拔将军”，收集的优树资源遗传品质较差而影响育种效果等[22, 26]。不言而喻，就难以像农业那样通过栽培措施促进增产的林业而言，选育并应用遗传增益更高的良种，对于保证人工林获得较高的产出和经济收益更为重要。

2021 年 5 月 18 日，国务院办公厅印发《关于科学绿化的指导意见》(国办发〔2021〕19 号)，提出实施森林质量精准提升工程，优化森林结构和功能[27]。与农作物增产还得益于占 60% 的化肥、农药、薄膜、改进灌溉技术等科技贡献[33–34]不同，树木生长周期长，种子质量优劣甚至影响几十年；况且其栽培环境大多为荒山荒地，仅仅依靠改善栽培条件的作用是有限的，甚至是难以实施的[26]。因此，涉及遗传品质改变的林木育种在国家森林质量提升中将肩负更重要的责任——选育林木良种用于森林经营，不仅可以使宜林地人工林经营产出最大化，使难以造林的困难立地实现造林，而且更重要的是可以用于遗传品质劣化的次生林和过伐林更新改造，促进我国森林整体遗传品质提高。

2　如何育种

育种是以遗传进化理论为基础，以遗传变异为对象，以提高经济性状为目标，定向选育和繁殖林木良种的实践活动[25]。当一个树种的育种计划立项后，育种目标也随之确定，包括产量、品质、采伐周期、形质、抗逆性等性状目标[24–26]。其后需要调研树种的自然分布，并基于地貌、气候、性状表现等完成种子区甚至种子亚区区划，以及育种区划分[25]。在同一育种区内按一定标准和选择方法完成种质资源收集，即初代选择群体构建。因该选择群体及其后代群体在适应性方面保持与原始群体相似的群体遗传结构，可显著提高育种效率，保证用种安全[24–25, 35]。

按育种区育种，按种子区制种、用种具有如下优点：其一，按育种区育种，不需要考虑适应性状，保证聚焦主要目标性状遗传改良；其二，同一种子区内基于种子园制种，用种不需要开展品种区域试验工作，经济而安全；其三，可根据未来全球气候变化情况，简单而高效地通过树种育种区平移，保证其生态系统修复、重建的用种安全等。但需要注意平衡育种区大小与遗传增益和育种成本的关系。当然，如利用了育种区之外的基因资源，或属于基因型与环境互作效应显著的无性系品种，则需要通过严格的区域试验保证适地适品种栽培。

我们知道，育种的目标性状多为数量性状，呈连续性变异，受众多微效基因调控。如生长性状涉及的基因模块包括激素代谢、萌芽、休眠、高生长、径生长、叶形、叶绿素代谢、光合与碳代谢、株型、根型等等[24]。就一个具体基因而言，群体内往往存在两种或以上的等位变异，即群体遗传多样性。这些基因复等位变异的遗传效应存在差异，相对于树木自身或我们人类而言，可简单区分为正向等位变异、中性等位变异和负向等位变异等。育种的目的就是如何实现分散于不同种质资源中的目标性状微效基因正向等位变异聚合，向选育理想品种的目标推进[24–26]。因此，育种实际是一个不断解决正向等位变异聚合技术局限与育种群体种质资源贫乏限制的过程，即存在每次授粉杂交只涉及两个亲本，且育种群体大小及其所包含的目标性状正向等位变异有限性的限制等[26]。鉴于当前决定每个林木目标性状的功能基因及其调控网络等尚未完全明晰，且树种内每个目标性状相关基因的等位变异数量及其效应几乎未知[22]，加之全基因组选择尚未开发出可以解析同源重组影响[12, 26]以及复等位基因效益的算法和模型[26,36–37]等，智能分子设计尚难在当前育种中充分发挥作用。此时，基于表型目标性状配合力轮回选择的常规育种仍然是相当长时间内林木育种的主要方法[7,20–26,38–39]。

构建育种群体，推动交配、遗传测定、选择为核心的育种循环，是林木育种充分利用自然变异的有效途径[7,24–26]。理论上有效大小（Ne）为 20~40 个亲本的育种群体就可以保证几个世代轮回选择的遗传增益，而 30~50 个亲本至少可保证短期内获得较高的遗传增益并避免近交衰退[7,38–40]。但是，由于林木育种目标性状多未经历高强度选择，其正向等位变异多分散保存于不同的基因型中，且当前尚难实现育种亲本基因型精准选择，基于表型选择存在遗漏优异等位变异等影响，只有相当大的育种群体（一般 300~400）才能汇聚大多数正向等位变异，并保证其在育种群体中保持数个世代[7, 38, 41]。而通过设置核心群体和主群体，以及划分为亚系等的育种群体结构化，可兼顾遗传增益提高、工作量降低，以及群体遗传多样性保持[7, 26, 42–43]。其中，核心群体大小多控制在 30~40 个亲本[42–43]，主群体的主要作用是保持育种群体遗传多样性，并在遗传进展乏力时能提供拥有新的正向等位变异的种质资源。进一步配合科学合理的交配设计和选择方法，可以获得能保留更多目标性状相关基因正向等位变异和最大数目无亲缘关系家系的子代测定群体（即下一世代基本群体）。此时，可以借助分子遗传学理论与技术成果提高育种效率，如通过半同胞子代优株父本鉴定，以及分子标记遗传距离或功能基因等位变异选配亲本等措施[16–17, 26]，保证交配获得较高的遗传增益等。如此，通过连续多世代的轮回选择，不断提高育种群体目标性状相关基因正向等位变异频率，降低负向等位变异频率，并通过当代生产群体实现遗传增益利用。而对于其中一些可以集约化经营的商品林树种，可在持续推动育种循环内的每一世代，进一步根据其树种特性、制种技术以及应用等有针对性地引入非常规育种技术，如通过远缘杂交或三倍体育种利用基因杂合效应和剂量效应，通过转基因或基因编辑定向改良已经育成良种的“短板”性状等[21, 24–26]。

综上所述，基于育种群体轮回选择的常规育种是林木遗传改良的核心和基石，非常规育种则是林木育种的创新与发展[21]。我们尤其期待全基因组选择的诸多理论和技术瓶颈问题的全面突破，做到基因调控有据可查，等位变异有迹可循，智能育种有“法”可依[22, 26]，从而推动林木育种群体构建和亲本选配真正进入智能分子设计的“育种 4.0”时代[2]。但也需要注意育种是一个科学引领、社会与经济多重驱动的系统性工作。育种技术并非越新奇或越微观就越有效，关键在于是否匹配林业生产实际需求。用简单而经济的技术路线快速选育最契合生产需求的品种，就是最佳的育种策略。若选育的品种不被市场和生产接受，或是推高生产成本、引发生态灾害等，其育种实践不仅徒劳无功甚至有过。成功的林木育种应避免陷入实验室成功、田间失败、市场冷遇的悖论，且能够与适宜的制种、用种技术方案密切配合，实现科学可行性、经济合理性与生态安全性的统一。

3 如何制种

制种是指大规模繁殖生产已经培育成功的林木良种的过程，即运用遗传育种的理论与技术，在保持并不断提高良种种性、良种纯度与生活力的前提下，

通过生产群体建设生产林木良种有性或无性繁殖材料的良种繁育过程[24–26]。其主要任务包括：在保证品种遗传品质的前提下，采取一定制种技术迅速扩大良种数量，满足生产需求；采取科学的制种技术，防止因生物学混杂等原因导致的品种退化，保持良种种性；采取科学的良种繁育制度和复壮技术，防止品种因繁殖技术和栽培条件导致的生活力下降等品种退化问题，保持良种生活力；在保证品种遗传品质前提下，尽可能降低制种技术难度、劳动强度和生产成本，提高良种繁殖系数和产量等[25–26]。

我们知道，根据树种繁殖方式和利用途径差异，林木育种又可分为家系育种和无性系育种[25–26]，也就决定了育成品种类型的差异性，大概可归类为单系品种和混系品种[21]。其中，家系育种主要选育基于种子繁殖的混系品种种子，如优良种源区种子、母树林种子、全同胞家系种子、半同胞家系种子、多倍体杂交种子、初级种子园种子、高世代种子园种子、杂交种子园种子等；而无性系育种主要选育基于无性繁殖的单系品种，如选优无性系、芽变无性系、种内杂种无性系、种间杂种无性系、多倍体无性系、转基因或基因编辑无性系等。当然，有时无性系混合利用也会形成混系品种，如‘群众杨’（*Populus* ‘Popularis 35-44’）是由 10 个雌雄无性系混合繁殖的混系品种[44]。

林木遗传改良的制种主要包括基于有性繁殖的种子园（包括母树林）制种，以及基于无性繁殖的无性系制种[24–26]。其中，种子园制种是只能或必须采取种子繁殖树种的良种繁育途径。种子园的建园亲本数量多建议为 10 到 90 个甚至更多[7, 26, 45–47]。选择核心育种群体的全部或部分亲本建园，可获得相对最高的预期遗传增益。具体数量可根据树种经营方式确定。需要注意的是，以往种子园的建园亲本配置并不关心亲本间的特殊配合力问题，理由是种子园种子造林主要利用基因加性效应，非加性效应有正有负，群体平均值趋于零。认为自交或近交率过高会降低种子园遗传增益，故亲本配置的重点是控制自交或近交，并提出了许多控制近交的种子园配置设计方案[25–26, 48–50]。而从森林经营的用种实际看，如此则存在本末倒置的问题。我们知道，种子园属于生产群体，其种子主要用于当前育种世代下的林业生产。而从森林经营的实际看，林分幼龄期需要维持较高的密度促进树高增长，郁闭后因自然稀疏或人工抚育间伐，保留的个体属于加性效应和非加性效应均突出的少数优势基因型。况且将种子园种子用于理想森林经营辅助更新时，有一定量的自交或近交种子应该更有利于复层林形成和自然稀疏。因此，种子园制种的建园亲本配置首先应该考虑特殊配合力利用，即让每个重复内高特殊配合力亲本相邻配置；其次考虑控制自交和近交的同时促进亲本随机交配提高遗传多样性等。

无性系制种可以通过无性繁殖实现群体的最优基因型利用，是能够或只能无性繁殖树种的良种繁育途径。生产中主要有基于采穗圃的无性系制种，以及基于组织培养的无性系制种[25–26]。需要注意的是，在林木无性繁殖时，由于扦插或嫁接的品种穗条往往采自一定年龄母树的一定部位，因此，无性系会表现出一定的年龄效应与位置效应[18, 25–26]。对于利用木材等营养器官的树种，无论是扦插还是组织培养，在制种过程中必须注意无性繁殖材料的幼化和保幼问题，防止因繁殖材料老化、退化给生产造成损失。具体幼化和保幼措施如采用根萌苗或组培苗建采穗圃、采穗圃及时修剪保幼、重新采集伐桩萌条组培或通过分化培养返幼等[18–19, 26, 51]。砧木选配适宜，基于嫁接也可以实现无性系品种的大规模制种。如采用芽苗砧嫁接技术，解决了油茶（*Camellia oleifera*）良种繁育问题[52]。但有时嫁接砧木与接穗基因型互作显著，会影响品种产量和品质。毛白杨（*Populus tomentosa*）多圃配套系列育苗技术通过“四圃”配套，不但解决了无性系品种幼化和规模繁殖问题，而且还通过繁殖圃培土促进品种自生根形成等措施，解决了品种与砧木互作影响等问题[51–52]，值得借鉴。

4　如何用种

用种就是将选育的林木良种用于森林经营生产实际的过程。我们知道，森林是需要经营的，只有实现科学可持续经营，才能让森林在实现生态价值最大化的同时，为社会经济发展提供持续供给。因此，森林经营具有社会、经济、科技等多重属性。就我国而言，森林被划分为严格保育的公益林、多功能经营的兼用林和集约经营的商品林等 3 大类[53]。其中兼用林则要求既具有商品林功能，也兼具公益林的生态价值。因此，森林经营对象不只是人工林，还包括天然林。而从我国的森林资源现状看，完全依靠自然力恢复并不是最优的策略。主动作为，从良种抓起，铸牢森林遗传基础，推动森林遗传进展，重塑森林遗传品质，才是快速提高国家森林质量的根本途径[23]。

多功能经营的兼用林是国家森林经营的重心，其中以生态服务为主导功能的兼用林主要发挥生态保护调节、生态文化服务或生态系统支持等主导功能，兼顾林产品生产；而以林产品生产为主导功能的兼用林主要保护和培育珍贵树种、大径级用材林和特种经济林资源，兼顾生态保护调节、生态文化服务或生态系统支持功能[53]。该类森林主要为分布在山

区的天然林，也就是占天然林 94% 的过伐林和次生林部分，其质量提升是未来国家森林经营的重点，尤其是以林产品生产为主导功能的兼用林。目前，我国的策略是自然恢复为主[27]，采用良种提升天然林质量的工作尚少；而且大多数树种也未实现按育种区育种、按种子区制种和用种，或布局不够合理，遗传改良水平也比较低等。针对相关问题，需要建立森林经营良种化的国家机制，完成相适应的森林法等相关法律、法规、标准的修订和完善，严格规定国家森林修复和经营必须使用遗传基础宽泛的良种辅助森林更新甚至重建[23]。为保证森林形成复层结构以及自然稀疏能力，良种的遗传多样性及其组成个体遗传品质的差异性非常重要，这也就决定了相关良种只能来自于常规育种途径。而将非常规育种技术选育的遗传基础窄化的良种用于天然林修复，容易发生因难以自然稀疏而导致的森林群体衰退[18, 23]，以及因远缘杂交或转基因品种的外源基因渐渗而影响森林生态系统稳定性等。因此，每一育种世代应立足于常规育种的根本，并采取如下利于森林自然稀疏能力形成的良种制种和用种策略：①为保证种子供应且方便采种，可从核心群体和主群体中选择 100 ~ 200 个花期一致、种子产量高的亲本建设种子园，全园混合采种、用种，其中核心群体来源的亲本固定配置，主要为林分提供遗传增益。②为保证更高的遗传增益和制种的经济性，也可采用核心群体的全部或部分亲本建设精选种子园，用种时根据林分的初植密度和自然稀疏后成熟林密度的差值，与同种子区初级种子园或母树林等种子按一定比例混合使用等。在此基础上，通过一定的人工抚育措施，帮助退化的森林形成异龄、复层结构以及自然稀疏、自然更新能力，促进具天然林特质的森林土壤培育（无此土壤则“森林四库”之水库功能弱化，也难以维持其生态稳定尤其是自然更新等功能），推动可以借助自然力的理想森林经营以及森林高质量发展[23]。

集约经营的商品林主要分布于自然条件优越、立地质量好、地势平缓、交通便利的区域，用于培育短周期纸浆材、人造板材以及生物质能源和优势特色经济林果等[53]。该部分商品林用种主要为采用遗传基础窄化的优良无性系、优良家系，以及含较少精选基因型的种子园良种，甚至采用在常规育种基础上进一步叠加非常规育种技术选育的林木良种，其林相整齐，易于管理甚至机械化作业，可以获得更高的生产力。但林木异交特性决定无性系品种难以产生种子实现自然更新；而家系品种即使能够自然更新，也会因近交引起后代群体遗传品质劣变而导致森林生产力下降；加之林分内个体遗传组成和生活习性相似甚至相同，郁闭后因个体竞争力相似而无法自然稀疏，容易导致人工林群体衰退等，这样的人工林不可能成为环境适合度最佳的森林[23]；也不适合作为公益林，而主要追求高产出、高收益。因此，在该类森林经营过程中，林分一旦达到经济成熟，应及时采收、更新利用。需要指出的是，随着社会发展和市场变化，一些树种可能会因用工成本增加、市场需求缩减等导致经营亏损，从而转为主要靠自然力经营的兼用林，此时就需要采用遗传基础宽泛的种子园良种进行生态系统重建。

总之，林木育种不仅高效服务于集约经营的商品林建设，更重要的是还可以用于占我国森林大多数的次生林和过伐林的遗传品质提高。因此，育种和制种应围绕相关树种的用种实际需求进行。对于需要借助自然力经营的兼用林，并不适合应用遗传基础窄化的林木良种，而选育并应用遗传基础宽泛的良种，促进森林遗传品质提高以及自然稀疏和自然更新能力形成[23]。当前，急需建立森林经营尤其是兼用林改造或更新良种化的国家机制，保证重要树种按育种区育种，按种子区制种和用种。而对于经济价值高、可以集约经营的商品林，则需要选育并应用遗传基础窄化的林木良种，用更少的林地生产更多的木材等林产品，满足社会需求，并为国家理想森林经营的时空腾挪提供支撑[23]。如此，基于良种并通过理想森林与集约化商品林相互配合经营，逐步实现国家森林遗传基础重塑，让绿水青山变成真正意义的金山银山，藏富于林，福泽千秋。

参 考 文 献

[1] 蔡旭. 植物遗传育种学 [M]. 北京: 科学出版社, 1976.
Cai X. Plant gentics and breeding[M]. Beijing: Science Press, 1976.

[2] Wallace G, Rodgers-Melnick E, Buckler E. On the road to breeding 4.0: unraveling the good, the bad, and the boring of crop quantitative genomics [J]. Annual Review of Genetics, 2018, 52(1): 421−444.

[3] 万国鼎. 氾胜之书辑释 [M]. 北京: 农业出版社, 1980.
Wan G D. Collected interpretations of the manual of agriculture [M]. Beijing: Agricultural Press, 1980.

[4] 袁树杰. 国外林木种子园发展情况 [J]. 四川林业科技通讯, 1979(2): 39−44.
Yuan S J. Development of forest seed orchards abroad [J]. Sichuan Forestry Science and Technology Communication, 1979(2): 39−44.

[5] Fox T R, Jokela E J, Allen H L. The development of pine plantation silviculture in the southern United States [J]. Journal of Forestry, 2007, 105(7): 337−347.

[6] Wu H X, Eldridge K G, Matheson A C, et al. Achievements in forest tree improvement in Australia and New Zealand 8:

successful introduction and breeding of radiata pine in Australia [J]. Australian Forestry, 2007, 70(4): 215−225.

[7] White T L, Adams W T, Neale D B. Forest genetics[M]. Wallingford: CAB International, 2007.

[8] Ruotsalainen S. Increased forest production through forest tree breeding [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2014, 29(4): 333−344.

[9] 康向阳. 林木遗传育种研究进展 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(3): 1−10.
Kang X Y. Research progress of forest genetics and tree breeding [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(3): 1−10.

[10] Fillatti J J, Sellmer J, McCown B, et al. Agrobacterium mediated transformation and regeneration of *Populus* [J]. Molecular & General Genetics, 1987, 206(2): 192−199.

[11] 康向阳, 王君. 杨树多倍体诱导技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Kang X Y, Wang J. Poplar polyploid induction technology research [M]. Beijing: Science Press, 2010.

[12] Dong C B, Mao J F, Suo Y J, et al. A strategy for characterization of persistent heteroduplex DNA in higher plants [J]. The Plant Journal, 2014, 80(2): 282−291.

[13] 康向阳. 林木三倍体育种研究进展及展望 [J]. 中国科学: 生命科学, 2020, 50(2): 136−143.
Kang X Y. Research progress and prospect of triploid breeding of forest trees [J]. Scientia Sinica Vitae, 2020, 50(2): 136−143.

[14] Kang X Y, Wei H R. Breeding polyploid *Populus*: progress and perspective [J]. Forestry Research, 2022(1): 4.

[15] 康向阳. 新一轮毛白杨遗传改良策略的思考和实践 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(7): 1−8.
Kang X Y. Thinking and practices for strategy on a new round genetic improvement of *Populus tomentosa* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(7): 1−8.

[16] Han Z Q, Gao P, Geng X N, et al. Identification of the male parent of superior half-sib *Populus tomentosa* individuals based on SSR markers [J]. Molecular Breeding, 2017, 37(12): 155−166.

[17] Han Z Q, Han Q, Xia Y F, et al. Construction of a breeding parent population of *Populus tomentosa* based on SSR genetic distance analysis [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 18573.

[18] 康向阳. 关于无性系林业若干问题的认识和建议——以杨树为例 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 1−7.
Kang X Y. Cognition and suggestions on some issues related to clonal forestry: taking poplar as an example [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 1−7.

[19] 康向阳. 关于林木无性系育种策略的思考 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(7): 1−9.
Kang X Y. Thoughts on clonal breeding strategies for forest trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(7): 1−9.

[20] 康向阳. 关于林木育种策略的思考 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 15−22.
Kang X Y. Thoughts on tree breeding strategies [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 15−22.

[21] 康向阳. 论林木常规育种与非常规育种及其关系 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(6): 1−7.
Kang X Y. On conventional and unconventional tree breeding and their relationships [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(6): 1−7.

[22] 康向阳. 关于我国林木育种向智能分子设计育种发展的思考 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3): 1−7.
Kang X Y. Thoughts on the development of forest tree breeding towards intelligent molecular design breeding in China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 1−7.

[23] 康向阳. 关于理想森林及其经营的遗传学思考 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6): 1−9.
Kang X Y. Genetic thinking on ideal forest and its management [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 1−9.

[24] 康向阳. 我国林木育种与良种应用需重视的问题再思考 [J]. 林业科学, 2025, 61(6): 224−231.
Kang X Y. Rethinking the issues that need to be taken seriously in forest tree breeding, seed production of improved variety and their application in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(6): 224−231.

[25] 康向阳. 林木遗传育种学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2024.
Kang X Y. Forest genetics and tree breeding [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2024.

[26] 康向阳. 现代林木遗传育种理论和方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2026.
Kang X Y. Advanced theories and methods of forest genetics and tree breeding[M]. Beijing: Science Press, 2026.

[27] 国务院办公厅. 关于科学绿化的指导意见 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021, 17(17): 178−182.
General Office of the State Council. Guiding opinions on scientific greening [J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021, 17(17): 178−182.

[28] 崔海鸥, 刘珉. 我国第九次森林资源清查中的资源动态研究 [J]. 西部林业科学, 2020, 49(5): 90−95.
Cui H O, Liu M. Analysis on the results of the 9th national forest inventory [J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(5): 90−95.

[29] 张会儒, 雷相东. 森林经理与森林质量精准提升 [J]. 国土绿化, 2017(8): 13−15.
Zhang H R, Lei X D. Forest management and precise enhancement of forest quality [J]. Land Greening, 2017(8): 13−15.

[30] 张蕾. 半个世纪的奋进——中国林业 50 年发展成就和展望 [J]. 中国林业, 1999(10): 4−7.
Zhang L. Half a century of endeavor: achievements and prospects of China·s forestry development in the past 50 years [J]. Forestry of China, 1999(10): 4−7.

[31] 马国勇, 侯瑞环. 国有林区治理的历程、逻辑与启示 [J]. 改革, 2025(11): 147−159.
Ma G Y, Hou R H. The process logic and implications of state-owned forest areas governance [J]. Reform, 2025(11): 147−159.

[32] 王祝雄, 吴秀丽, 刘羿. 科学加强森林经营 创新推进森林质量

持续提升 [J]. 国土绿化, 2017(12): 14−17.
Wang Z X, Wu X L, Liu Y. Scientifically strengthening forest management and innovatively promoting the continuous improvement of forest quality [J]. Land Greening, 2017(12): 14−17.

[33] 张宏. 2025 年全国农业科技进步贡献率超 64%[N]. 每日经济新闻, 2026−01−23(002).
Zhang H. The national agricultural science and technology progress contribution rate exceeds 64% in 2025 [N]. Daily Economic News, January, 2026−01−23 (002).

[34] 付雪丽, 王赫扬, 李芳, 等. 我国小麦种业市场发展现状与未来趋势 [J]. 中国种业, 2017(10): 11−13.
Fu X L, Wang H Y, Li F, et al. The development status and future trends of China's wheat seed industry market [J]. China Seed Industry, 2017(10): 11−13.

[35] 杜康, 王加焕, 李俊恒, 等. 毛白杨耐寒种质资源遗传鉴定及评价 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 59−67.
Du K, Wang J H, Li J H, et al. Genetic identification and evaluation of cold-resistant germplasm resources in *Populus tomentosa* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 59−67.

[36] Meuwissen T H, Hayes B J, Goddard M E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps [J]. Genetics, 2001, 157(4): 1819−1829.

[37] 刘策, 孟焕文, 程智慧. 植物全基因组选择育种技术原理与研究进展 [J]. 分子植物育种, 2020, 18(16): 5335−5342.
Liu C, Meng H W, Cheng Z H. Plant genome-wide selection breeding technical principle and research progress [J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(16): 5335−5342.

[38] Namkoong G, Kang H C, Brouard J S. Tree breeding: principles and strategies[M]. New York: Springer, 1988: 35−73.

[39] Talbert J T. An advanced-generation breeding plan for the North Carolina State University-Industry pine tree improvement cooperative [J]. Silvae Genetica, 1979, 28(1): 72−75.

[40] Rosvall O, Andersson E. Group-merit selection compared to conventional restricted selection for trade-offs between genetic gain and diversity [J]. Forest Genetics, 1999, 6: 11−24.

[41] White T L, Matheson A C, Cotterill P P, et al. A nucleus breeding plan for radiata pine in Australia [J]. Silvae Genetica, 1999, 48(3): 122−133.

[42] Cotterill P P, Jackson N. Gains expected from clonal orchards under alternative breeding strategies [J]. Forest Science, 1989, 35(1): 183−196.

[43] White T L, Hodge G R, Powell G L. An advanced-generation tree improvement plan for slash pine in the southeastern United States [J]. Silvae Genetica, 1993, 2(6): 359−371.

[44] 徐纬英, 佟永昌. 新杂交种——群众杨 [J]. 林业科学, 1984, 20(2): 122−131.
Xu W Y, Tong Y C. A new hybrid 'Popularis' [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1984, 20(2): 122−131.

[45] Kang K S, Harju A M, Lindgren D, et al. Variation in effective number of clones in seed orchards [J]. New Forests, 2001, 21(1): 17−33.

[46] McKeand S E, Mullin T J, Byram T D, et al. Deployment of genetically improved loblolly and slash pines in the South [J]. Journal of Forestry, 2003, 101(3): 32−37.

[47] Lindgren B D, Prescher F. Optimal clone number for seed orchards with tested clones [J]. Silvae Genetica, 2005, 54(2): 80−92.

[48] Bell G D, Fletcher A M. Computer organised orchard layouts (COOL) based on the permutated neighbourhood design concept [J]. Silvae Genetica, 1978, 27: 223−225.

[49] El-Kassaby Y A, Fayed M, Klápště J, et al. Randomized, replicated, staggered clonal-row (R2SCR) seed orchard design [J]. Tree Genetics & Genomes, 2014, 10(3): 555−563.

[50] Chaloupková K, Stejskal J, El-Kassaby Y A, et al. Current advances in seed orchard layouts: two case studies in conifers [J]. Forests, 2019, 10(93): 1−6.

[51] 朱之悌. 毛白杨多圃配套系列育苗新技术研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(增刊): 4−33.
Zhu Z T. Study on new breeding techniques of many nursery supporting series of *Populus tomentosa* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(Suppl.): 4−33.

[52] 肖景治. 油茶芽苗砧劈接育苗 [J]. 湖南林业科技, 1982(2): 33−34.
Xiao J Z. Seedling cultivation in nurse seedling grafting of *Camellia oleifera* [J]. Hunan Forestry Science and Technology, 1982(2): 33−34.

[53] 张会儒. 当前森林经营需要注意的几个问题 [J]. 中国林业产业, 2019(6): 61−66.
Zhang H R. Several issues that need attention in current forest management [J]. China Forestry Industry, 2019(6): 61−66.

（责任编辑 赵田芸 李 契
责任编委 马履一）