



## 关于我国林木育种向智能分子设计育种发展的思考

康向阳

### Thoughts on the development of forest tree breeding towards intelligent molecular design breeding in China

Kang Xiangyang

引用本文:

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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230338

Kang Xiangyang. 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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230338

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230338>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 关于林木育种策略的思考

Thoughts on tree breeding strategies

*北京林业大学学报*, 2019, 41(12): 15–22. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190412>

#### 关于林木无性系育种策略的思考

Thinking about clonal breeding strategy of forest trees

*北京林业大学学报*, 2019, 41(7): 1–9. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190098>

#### 中国原生种石斛兰的育种价值分析

Analysis on breeding value of native *Dendrobium* species in China

*北京林业大学学报*, 2018, 40(4): 102–108. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170341>

#### 不同世代樟子松育种资源遗传评价

Genetic evaluation of breeding resources of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* from different improved generations

*北京林业大学学报*, 2017, 39(12): 71–78. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170194>

#### 基于BWB的油松初级种子园混合子代优树选择与配置设计

BWB-assisted plus tree selection and deployment design for bulked progenies of the first-cycle Chinese pine seed orchard

*北京林业大学学报*, 2017, 39(11): 28–34. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160330>

#### 基因组选择研究进展及其在林木中的发展趋势

Advances in genomic selection and its development trend in forest

*北京林业大学学报*, 2020, 42(11): 1–8. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200152>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230338

## 关于我国林木育种向智能分子设计育种发展的思考

康向阳

(林木遗传育种国家重点实验室, 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:**“作物育种 4.0”的提出, 为我国林木遗传育种指明了向智能分子设计育种发展的前进方向。本文提出了理想品种的概念及其智能设计实现条件, 简要综述了我国林木遗传育种研究历史以及存在的问题, 并提出了推动我国林木智能分子设计育种的发展对策等。林木遗传育种应该瞄准国家林业重大需求, 有组织地选择重要树种系统布局, 在推动树种高世代遗传改良及其利用的同时, 准备系谱关系清晰的育种资源群体, 做到等位变异有迹可循; 解析重要性状遗传变异规律及其调控网络, 实现基因调控有据可查; 建立高效的多组学大数据整合分析以及育种群体构建、亲本选配和后代选择等分子设计育种技术方法体系, 保证智能育种有“法”可依等。逐步解决我国林木遗传育种中存在的问题, 为实施林木智能设计育种创造理想条件。在每一育种世代品种向理想品种选育的推进过程中, 尽可能将智能分子设计育种的最新理论和技术成果应用于育种实践, 选育出高产、优质、高抗的当前世代理想品种, 满足国家林业发展的现实需要。

**关键词:** 林木育种; 理想品种; 常规育种; 智能分子设计育种; 育种发展对策

**中图分类号:** S722 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)03-0001-07

**引文格式:** 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 Xiangyang. 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.

### Thoughts on the development of forest tree breeding towards intelligent molecular design breeding in China

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:** With the proposal of “Crop Breeding 4.0” being put forward, the developmental direction for the forest tree genetic breeding towards intelligent molecular design breeding has been pointed out in China. In this paper, the concept of ideal varieties and the conditions for their intelligent design implementation were put forward. The research history and existing problems of forest genetics and tree breeding in China were briefly reviewed, and some strategies to promote the development of intelligent molecular design breeding of trees were also proposed. It is believed that forest genetics and tree breeding should aim at the major needs for national forestry development and select important tree species in an organized way and layout. It is necessary to prepare breeding population resources with clear pedigree relationships and trackable allelic variation patterns while promoting high-generation genetic improvement and utilization of the tree species. Moreover, the variation rules and genetic regulatory network of important traits should be analyzed to

收稿日期: 2023-11-23 修回日期: 2024-01-10

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2021YFD2200105)。

作者简介: 康向阳, 博士, 教授。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。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

achieve well-documented gene regulation. Meanwhile, a system of molecular design breeding technology, such as efficient multi-omics big data integration, breeding population construction, parental selection, and progeny screening, also should be established to ensure the methodological basis of the intelligent breeding. As a result, the existing problems in forest genetics and tree breeding of China could be solved, providing ideal conditions for the implementation of intelligent design breeding of trees. In each breeding generation, the latest achievements in theories and technologies of intelligent molecular design breeding should be applied to breeding practice as far as possible, to produce ideal varieties for the current generation with high yield, good quality, and strong resistant, meeting the needs of national forestry development.

**Key words:** forest tree breeding; ideal variety; conventional breeding; intelligent molecular design breeding; breeding development strategy

2018年,美国康奈尔大学玉米(*Zea mays*)遗传育种学家、美国科学院院士 E. Buckler 教授等提出“作物育种 4.0”理念,也称为智能设计育种,认为未来育种将通过基因组与生物信息学、大数据与人工智能、基因编辑与合成生物学等多学科、多技术整合应用,实现智能、高效、精准亲本选配和品种选育<sup>[1]</sup>。这是一种理想的育种工作状态。的确,遗传改良水平较高的现代玉米育种经过 100 多年的发展,长期坚持按照母本群(SS 群)和父本群(NSS 群)开展多世代轮回选择,不断累积亲本群体内不同目标性状的优良等位基因频率,进而通过群体间的亲本选配及其杂交,获得了不断显著提高的遗传增益<sup>[2-3]</sup>。但这样获得的亲本组合远没有达到精准水平,其中仍有一定的随机性。这些不能做到精准选配亲本,甚至存在有可能遗漏一些重要目标性状的优良等位变异等问题,应该是目前玉米等作物育种遗传进展越来越缓慢的主要原因。智能设计育种是作物、畜牧、园艺植物尤其是林木育种实现快速发展的努力方向。

林以种为本,种以质为先,林木良种是人工林经营的核心。与作物相比,树木生长周期长,大多栽培环境为荒山荒地,仅仅依靠改善外部栽培条件的作用是有限的,甚至是难以实施的,林木育种的作用更为关键且重要。选育并应用高产、优质、抗逆性强的新品种,可以使林地相同的管理水平下仅依靠自然力就可以获得更高的收益。现代林木育种也有近百年的历史,取得了显著研究进展,对世界林业发展尤其是森林工业发展做出了巨大贡献<sup>[4]</sup>。但限于树木生长和开花结实周期长等影响,遗传改良和利用水平仍然相对较低。而对于遗传改良水平相对更低的我国林木育种而言,如何推动常规育种、非常规育种<sup>[4-5]</sup>与现代基因组和生物信息学、大数据和人工智能的有机结合,逐步积累达到理想智能设计育种的条件,是每一位林木育种人必须思考并为之努力的问题。

## 1 林木理想品种及其智能设计实现条件

林木育种具有明确的目标指向和效益要求,决定了品种的经济属性。林木品种是指经人工选育,经济性状与生物学特性稳定且符合社会需要,适应一定的自然和栽培条件并具有一定种植规模的特异性林木繁殖材料。而林木良种是通过审定或认定的林木品种。良种审定要求必须以当地主栽品种为对照,且其目标性状与对照品种相比要达到一定的标准。因此,林木良种的产量、品质、抗逆性等明显优于普通品种。使用良种造林,可带来更高的经济和生态效益。

树木的异交特性,以及不同树种的繁殖方式和采取的育种方法不同,决定了林木育种获得并应用的优良品种类型不同,大概可归类为单系品种和混系品种。其中,单系品种是指由一个无性系或一个家系组成的栽培群体。对于可以无性繁殖的树种而言,单系品种是指通过选择自然变异或人工创制变异获得的一个优良株系,并经无性繁殖而形成的无性系品种,具体包括:在一定区域长期无性系繁殖并栽培利用的地方优良类型或农家品种;从自然群体中选优获得的选种无性系;在种内不同地理种源内选择优良亲本或优良类型,杂交获得的种内杂交无性系;基于高世代育种群体选配优良亲本杂交获得的杂交无性系;通过种间杂交获得的单交、三交、双杂交、回交等远缘杂交无性系;通过染色体加倍获得的多倍体无性系;通过转基因或基因编辑获得的基因工程无性系等。而对于通过种子有性繁殖的树种而言,单系品种是指由一个优良母本株系种子构成的家系品种,具体包括:通过种内或种间杂交获得的全同胞或半同胞杂交种子;通过四倍体与二倍体间杂交获得的三倍体杂交种子;通过无融合生殖途径(不经过精卵融合形成胚)获得的某一品种种子等。由于树木大多异交且存在自交不亲和现象,很

难获得自交系等纯系品种,除了花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)等部分无融合生殖品种<sup>[6]</sup>的种子属于同型纯合类品种外,大多数林木的单系品种均为同型杂合类品种。这些林木单系品种大多来源于初代选择群体亲本,很少来源于高世代育种群体亲本。

混系品种或称为多系品种,是指由多个无性系或多个家系组成的栽培群体。对于可以无性繁殖的树种而言,是指通过选择自然变异或人工创制变异获得的多个优良株系经混合无性繁殖而形成的无性系品种。如‘群众杨’(*Populus* ‘*Popularis* 37’)就是徐纬英等<sup>[7]</sup>以小叶杨(*P. simonii*)为母本,钻天杨(*P. nigra* var. *italica*)和旱柳(*Salix matsudana*)的混合花粉为父本杂交选育出的由10个雌雄无性系组成的混系品种。对于通过种子有性繁殖的树种而言,是指由2个或2个以上优良母本株系种子构成的家系品种,具体包括:在一定区域长期种子繁殖并栽培利用的地方优良类型或农家品种;经过种源试验证明的优良种源区种子;优良种源区内经过去劣的优良林分—母树林种子;优良种源区内选优营建的种子园种子;从基于育种群体交配建立的子代测定林选优而营建的高世代种子园种子;种间杂交种子园种子;多倍体种子园种子等。这些林木混系品种均属于异型杂合类品种。

智能设计育种的目标就是精准高效地利用基因加性效应和非加性效应。因此,在众多林木品种类型中,能充分利用基因加性效应和非加性效应的无性系品种和全同胞家系品种应该是林木智能设计育种的最佳应用路径。对于众多的目标性状相关基因,林木的正向等位变异多分散保存于不同基因型内<sup>[5]</sup>。因此,最基本的林木理想品种应该是基于轮回选择清除树种全部目标性状的负向等位变异,并保证决定多目标性状的正向等位变异完全聚合且均处于杂合状态的无性系品种或全同胞家系品种。而在基于常规育种获得的理想品种基础上,进一步叠加非常规育种可以获得更为显著的改良成效。如果树种具有远缘杂交优势,可以通过轮回选择创制并选配优良且纯化的种间杂交亲本,进一步通过增大目标性状变异幅度提高遗传增益;如果树种多倍体具有优势,还可以在已选配的杂交亲本基础上,通过多倍体育种利用基因剂量效应提高遗传增益;如果已推广应用的林木优良品种仍存在“短板”性状,可以进一步针对相关品种开展转基因或基因编辑,通过分子育种激活或抑制目标基因,或添加外源基因提高遗传增益。

不言而喻,要实现理想的智能设计育种,选育出理想品种,至少应该在育种资源储备、遗传基础研

究、生物信息和育种技术保障等方面满足以下3个条件:其一,拥有系谱清楚且经过一定程度选择的育种群体资源,掌握世代遗传过程中重要目标性状决定基因的等位变异规律;其二,完成全基因组测序及其序列注释,掌握多世代测试群体目标性状多组学数据,揭示重要目标性状的分子调控网络及其关键基因;其三,建立高效的多组学大数据整合、分子设计育种技术方法,保证更加精准地完成育种群体构建以及理想品种的杂交亲本选配,实现基因加性效应和非加性效应的高效利用等。

## 2 我国林木遗传育种研究进展及存在的问题

我国现代林木遗传育种研究始于1945年叶培忠在甘肃天水开展河北杨(*P. hopeiensis*)×毛白杨(*P. tomentosa*)等杂交试验<sup>[8]</sup>。1953年,林业部发布《关于东北国有林内划定母树及母树林有关问题的决定》,这是我国第一份关于林木良种化的文件。此后,受欧美种源试验、种子园建设和杂交育种等工作成效的影响,我国也开始了积极的探索。1955年,徐纬英等<sup>[9]</sup>开始启动杨树杂交育种试验。1956年,原林业部召开了第一次全国林木种子工作会议,提出重点开展基于国营苗圃的林木种子生产基地建设。1957年,林业部发布了《采种技术规程》,指导科学采种<sup>[10]</sup>。俞新妥<sup>[11]</sup>在福建开始杉木(*Cunninghamia lanceolata*)种源试验,朱之悌、王明麻等受国家选派赴原苏联学习林木遗传育种。1959年,林业部将良种壮苗作为科学造林的6项基本措施之一<sup>[10]</sup>。1963年,周恩来总理出访阿尔巴尼亚,为改善我国食用油匮乏的局面,引进了5个品种油橄榄(*Olea europaea*)苗木1万株,分发到8个省区12个引种点进行试种,总理的嘱托也成为项目负责人徐纬英的终生事业<sup>[12]</sup>。1964年,中国林学会组织召开林木良种选育学术会议,报告了包括杨树(*Populus* spp.)、柳树(*Salix* spp.)、桉树(*Eucalyptus* spp.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、杉木、马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、油茶(*Camellia oleifera*)、油桐(*Vernicia fordii*)、乌桕(*Triadica sebifera*)、板栗(*Castanea mollissima*)、核桃(*Juglans regia*)、榛子(*Corylus heterophylla*)等近20个树种的选种、引种效果以及种子园营建准备工作等,并讨论了如何进一步提高我国林木种子生产水平、加强母树林经营、种子园营建以及主要造林树种种源区划等林木良种化的关键问题,对我国林木育种工作产生了积极的推动作用<sup>[13]</sup>。1966年,陈岳武等<sup>[14]</sup>以闽北2年生的杉木优树为材料,在洋口林场建设了我

国第一个杉木初级无性系种子园。同时,广东台山市红岭林场建设了湿地松种子园,黑龙江青山林场建立了日本落叶松(*Larix kaempferi*)、兴安落叶松(*L. gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)种子园。此后,相继在福建、吉林、贵州、辽宁、山西等地建设了马尾松、红松(*P. koraiensis*)、华北落叶松、油松、乌桕等树种种子园。截至1972年,全国11个省共收集杉木、马尾松、落叶松、油松等树种优树1500多株,建设初级种子园240 hm<sup>2</sup>,建立母树林2000 hm<sup>2</sup>等<sup>[4,15]</sup>。

1972年,国家启动了“选育和培育速生用材树种的优良品种科研协作计划”,林木良种基地建设纳入国家财政预算<sup>[16]</sup>。1978年,林业部制定了《全国林木种子发展规划》,提出“实现林木种子生产专业化、质量标准化、造林良种化”的目标,强调建设国家种子生产基地和良种繁育体系<sup>[10]</sup>。1979年,部省联营林木良种基地建设纳入国家基本建设投资计划<sup>[10]</sup>。同年9月7—14日,中国林学会在青岛市召开全国林木遗传育种学术讨论会,按种源、杂交育种、种子园和组织培养这4个专题进行了学术交流,正式成立了中国林学会林木遗传育种专业委员会。此时期内,油松、马尾松、杉木、杨树、泡桐(*Paulownia* spp.)、油桐、油茶、油橄榄、核桃等近20个主要造林树种开展了种源试验、杂交育种技术及其遗传基础研究,尤以杨树引种和杂交育种成绩最为突出,选育出‘群众杨’、‘北京杨’(*P. ‘Beijingensis’*)、‘小黑杨’(*P. ‘Xiaohei’*)、‘白城杨’(*P. ‘Baicheng’*)等一系列新品种<sup>[17]</sup>。杨树、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等树种组织培养研究获得突破,于国内首次获得杨树花粉培养再生植株,开始有了同工酶和染色体核型分析、原生质体分离研究报告等<sup>[17]</sup>。截至1979年,全国已选出优树19300株,建立种子园6130 hm<sup>2</sup>,较早开展了一些树种(如杉木、湿地松、乌桕、油茶、核桃等)的选优建园,并提供了一定数量种子和子代测定结果<sup>[4,17]</sup>。但大多数树种缺乏长期育种计划和育种策略,研究工作较为零散且缺乏系统性,尤其是科技人员对于良种基地建设的参与度较低。

1983年3月22—30日,林业部在长沙组织召开全国林业科技计划会议,启动“六五”至“七五”国家科技攻关项目计划(1983—1990年),其中林木良种选育项目包括:涉及杉木、马尾松等15个树种的“重要造林树种的种源选择”;涉及红松、樟子松等7个针叶树种的“天然优良林分的选择改良和促进结实技术”;杨、柳、榆(*Ulmus* spp.)、泡桐等9个树种的“平原区速生阔叶树种良种选育及品种区域化”;落叶松等14个树种的“主要针叶造林树种种子园建

立和经营管理技术研究”;以及“主要经济林树种油茶、油桐良种选育”等。这是我国首次系统开展主要造林树种的遗传改良科技攻关,研究取得了丰硕的成果,有效支撑了良种基地建设,也为以后其他树种良种选育提供了范例。成果具体包括:建成40多个主要造林树种的468处良种基地,主要造林树种平均良种使用率达20%。其中,对34个种(属)的重要造林树种进行了全域性种源试验,杉木、马尾松、落叶松、白榆(*U. pumila*)等13个树种制定出“林木种子区的区划”,优良种源种子造林材积增益达10%~50%;14个树种选优3万余株,建立种子园9940 hm<sup>2</sup>;7个树种(属)营建母树林22800 hm<sup>2</sup>,其中69%开始结实,增益达5%左右;柚木(*Tectona grandis*)、马占相思(*Acacia mangium*)、木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、墨西哥柏(*Hesperocyparis lusitanica*)等一批新树种引种成功;美洲黑杨(*P. deltoides*)、泡桐、柳树、刺槐、毛白杨、白榆等阔叶树通过选优、无性系测定和区域化试验,选育出优良无性系品种70余个,建立良种采穗圃518 hm<sup>2</sup>,平均增益20%~50%等<sup>[4,18-20]</sup>。

1989年1月20日,中国国务院颁布《中华人民共和国种子管理条例》。1994年10月30日,林业部第一届林木品种审定委员会成立。1999年4月23日,我国加入国际植物新品保护联盟。2000年7月8日,《中华人民共和国种子法》施行。2003年6月24日,国家林业局审议通过《主要林木品种审定办法》。尤其是2011年,国务院办公厅发布了《关于加快推进现代农作物种业发展的意见》(国发〔2011〕8号),2012年国务院办公厅印发了《关于加强林木种苗工作的意见》,2013年国务院办公厅印发《深化种业体制改革提升创新能力的意见》等。这些国家林木良种政策法规的颁布以及科技攻关、科技支撑或重点研发等系列国家科研计划的持续实施,极大地促进了我国林木遗传育种研究进展和良种化进程。具体成果如下:完成毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、油松等树种全基因组测序,定位、克隆了大量调控林木重要性状的功能基因,解析了一些生长、发育、抗逆等重要性状的遗传调控机制;在前期种源试验的基础上,完成20余个树种的种子区划,以及枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、四川桤木(*Alnus cremastogyne*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)等近30个树种的种源试验,揭示了相关树种的生长、适应性等性状地理变异规律;于国内首次获得了对叶部虫害有较强抗性的转*Bt*基因欧洲黑杨(*P. nigra*),建立了高效遗传转化技术;突破了配子、合

子和体细胞染色体加倍技术,选育出一批表现优良的三倍体毛白杨、杜仲、桉树等林木新品种;创建了显著缩短育种周期的白桦强化育种技术,以及杉木、马尾松、火炬松(*P. taeda*)、红松、油松等树种种子园矮化技术;开发了杂交鹅掌楸体胚规模化高效快繁技术、桉树等树种良种组培快繁技术,以及杉木、马尾松、落叶松、思茅松(*P. kesiya*)等树种良种采穗圃营建和嫩枝扦插技术等,并在生产中规模化应用等<sup>[4,21-32]</sup>。据国家林业和草原局相关数据统计,截至2022年末,我国已通过国家审(认)定林木良种558个,授权林木植物新品种3414个;共建成各类良种生产单位1500多处,其中国家重点林木良种基地294处,省级重点林木良种基地355处等,主要造林树种平均良种使用率提至65%,林木良种数量、质量和生产能力显著提高。

总之,我国林木遗传育种研究取得的成绩和社会贡献是十分显著的,有力推动了林木遗传育种科技进步,以及国家用材林、经济林建设和产业发展。但与林业发达国家的林木育种尤其是作物育种相比,因时间短、投入少,其差距是比较大的,存在的主要问题包括以下3点。(1)林木育种资源的遗传品质和遗传多样性偏低。一些树种的种质资源收集数量偏少,导致初代选择群体的遗传多样性偏低,或因地理距离偏近导致的高世代育种群体同祖率偏高;制定的选优标准偏低,或标准执行不严格,甚至从择优采伐后形成的低质林中选优等,导致初代选择群体的遗传品质较差等<sup>[5]</sup>。(2)高世代育种群体构建执行不力。大多数树种遗传改良尚处于第一育种世代甚至母树林采种,缺少系谱清楚的多世代育种群体和测试群体,目标基因聚合不足;随机选亲问题较为突出,育种效率低且效果差;种子园兼作基于自由授粉交配设计的高世代育种群体应用的现象较为普遍,导致高世代育种群体同祖率高,可持续遗传改良后续乏力等<sup>[5,26]</sup>。(3)遗传基础研究对育种计划支撑不够。大多数树种缺少精细基因组序列,重要性状遗传调控网络及其调控机理多未系统揭示,多组学数据和基因调控研究零散且关联度低。

### 3 推动我国林木智能分子设计育种发展对策

可以预见,在我国林木遗传育种同仁的共同持续努力下,利用经过一定程度的常规育种选择、重要目标性状决定基因高度聚合的育种资源,并通过生物技术、人工智能、大数据等技术方法整合,一定能够实现“林木育种4.0”的跨越。而为了早日达到这一目标,需要瞄准国家林业重大需求,有组织地选择

重要树种系统布局,围绕育种资源、遗传基础以及生物信息和育种技术等持续开展研究,解决我国林木遗传育种研究中存在的问题,逐步向满足智能设计育种的理想条件靠近(图1)。其中,重视如下工作是非常必要且迫切的。

(1)在推动树种高世代遗传改良及其利用的同时,准备系谱关系清晰的育种群体资源,做到等位变异有迹可循。相关工作与遗传改良同步进行,主要包括围绕育种目标按标准开展优良种质资源收集、保存工作,构建具有一定规模且遗传多样性丰富的初代选择群体,进而通过种质资源评价和选择构建高质量的初代育种群体,在此基础上推动基于育种群体的交配、测定与选择的育种循环,并通过促进开花结实、早期选择和分子辅助选择等技术措施加速育种进程,快速推动树种遗传改良向高世代发展。在不断剔除负向等位变异,促进正向等位变异聚合、当代生产群体建设与良种利用的同时,为智能设计育种提供世代系谱清晰的育种资源群体。

(2)完成树种全基因组测序及其序列注释,解析重要性状遗传变异规律及其调控网络,实现基因调控有据可查。在精准解析树种全基因组信息的基础上,基于泛基因组、表型组、转录组等多组学数据,开展育种资源群体遗传多样性和重要性状等位变异,以及目标性状基因模块及其基因表达调控网络和关键基因等研究。其中,生长和木材材性等目标性状基因模块可能包括树木萌芽、生长与休眠、叶片大小与数量形成、叶片光合与衰老、叶形和枝形决定、水分和营养的吸收与利用、次生生长期与木质部形成等。揭示相关树种基因组结构和特点,育种资源群体遗传多样性水平与主要目标性状等位变异规律,以及目标性状相关基因模块及其调控网络、关键基因表达特点及其遗传效应等,为智能设计育种提供系统、全面的性状遗传变异规律和目标基因信息。

(3)建立高效的多组学大数据整合、育种群体构建和亲本选配等分子设计育种技术方法体系,保证智能育种有“法”可依。在实现等位变异有迹可循、基因调控有据可查的同时,建立高效的多组学信息的采集、处理、存储以及大数据整合与智能分析技术方法,以及相关树种的远缘杂交、染色体加倍、离体再生与遗传转化、基因编辑等技术体系,保证通过“生物技术、人工智能、大数据”整合应用,智能、精准、高效地完成基本群体评价与选择,以及高世代育种群体构建、杂交或染色体加倍亲本选配、多基因转化或基因编辑等,实现当代基因加性效应、非加性效应甚至剂量效应的充分利用,为智能设计育种提供

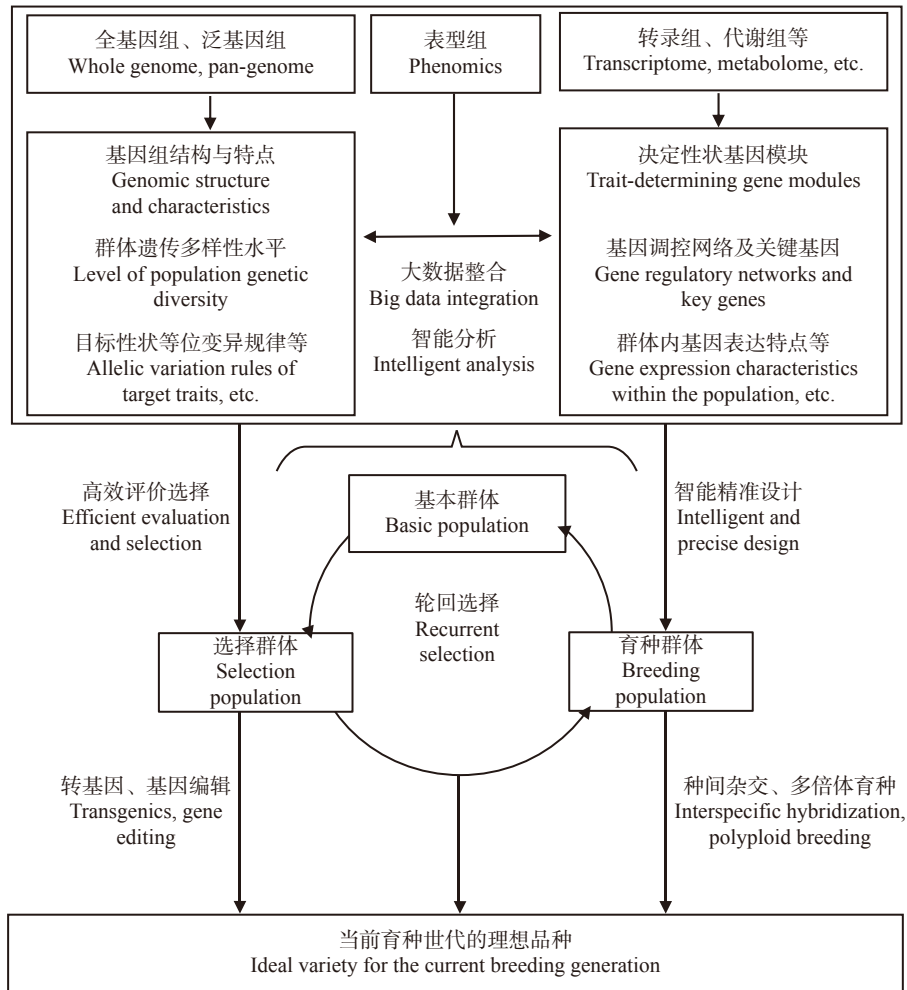


图1 林木智能分子设计育种路线图

Fig. 1 Roadmap for intelligent molecular design breeding of forest trees

科学、智慧、系统的方法保障。

需要特别指出的是：推动林木遗传改良向理想的智能设计育种发展，是一个需要系统布局、有组织实施的宏大工程，且需要多代育种人长期坚持不懈的努力才能实现。而在坚持一个树种基于轮回选择的长期育种计划的同时，应尽可能立足相关树种当前已有的育种资源和技术基础，每一育种世代在向理想品种选育推进的过程中，应充分利用已成熟的生物技术、人工智能、生物信息等现代技术方法，高效推动常规育种与非常规育种的有机结合，选育高产、优质、高抗的当前育种世代理想品种，最大限度地满足国家林业发展的现实需要。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 王振华, 刘文国, 高世斌, 等. 玉米种业的昨天、今天和明天[J]. *中国畜牧业*, 2021(19): 26-32.  
Wang Z H, Liu W G, Gao S B, et al. Past, now and future of corn seed industry[J]. *China Livestock Industry*, 2021(19): 26-32.
- [3] Duvick D. Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.)[J]. *Maydica*, 2005, 50: 193-202.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Fei X, Shi Q, Qi Y, et al. ZbAGL11, a class D MADS-box transcription factor of *Zanthoxylum bungeanum*, is involved in sporophytic apomixis[J]. *Horticulture Research*, 2021, 8: 23.
- [7] 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.
- [8] 叶培忠. 白杨繁殖育种法[J]. *林业科学*, 1955, 1(1): 37-46.  
Ye P Z. Poplar propagation and breeding method[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1955, 1(1): 37-46.
- [9] 徐纬英. 杨树[M]. 哈尔滨: 黑龙江出版社, 1988.

- Xu W Y. Poplar [M]. Harbin: Heilongjiang People's Publishing House, 1988.
- [10] 刘红. 国家林木种苗发展战略研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- Liu H. Research on national forest tree seedling development strategy [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [11] 俞新妥. 马尾松种源试验阶段报告 [J]. 中国林业科学, 1978, 14(1): 4-13.
- Yu X T. Masson pine provenance test phase report[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1978, 14(1): 4-13.
- [12] 徐纬英. 油橄榄在我国的引种 [J]. 林业科学, 1981, 17(1): 78-83.
- Xu W Y. Introduction of olive trees in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1981, 17(1): 78-83.
- [13] 徐纬英. 林木良种选育学术讨论会 [J]. 科学通报, 1964(8): 743.
- Xu W Y. Academic symposium on the selection and breeding of improved forest species[J]. *Science Bulletin*, 1964(8): 743.
- [14] 陈岳武, 施季森, 陈益泰, 等. 杉木的遗传变异及育种程序 [C]// 徐纬英, 张培杲. 全国林木遗传育种第五次学术报告会论文汇编. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1986.
- Chen Y W, Shi J S, Chen Y T, et al. Genetic variation and breeding procedures of Chinese fir[C]// Xu W Y, Zhang P G. Compilation of papers from the Fifth National Academic Conference on Forest Genetics and Breeding. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1986.
- [15] 左叶. 在全国林木优良品种协作会议总结会上的讲话 [J]. 新疆林业, 1975(4): 3-7.
- Zuo Y. Speech at the summary meeting of the National Collaborative Conference on Excellent Forest Varieties[J]. *Xinjiang Forestry*, 1975(4): 3-7.
- [16] 本刊编辑部. 积极开展林木良种的选育工作——全国林木优良品种科研协作会在南平召开 [J]. 林业科技通讯, 1973(1): 14.
- Editorial Department of this Journal. Actively carry out the breeding of improved forest varieties: the National Scientific Research Collaboration Conference on Excellent Forest Varieties was held in Nanping[J]. *Forestry Science and Technology Newsletter*, 1973(1): 14.
- [17] 梁彦. 中国林学会第二次林木遗传育种学术讨论会 [J]. 遗传, 1980, 1(1): 42.
- Liang Y. The second academic symposium on forest genetics and breeding of the Chinese Forestry Society[J]. *Heredity*, 1980, 1(1): 42.
- [18] 顾万春. 改革十年林木育种事业成绩斐然 [N]. 中国绿色时报, 1989年3月25(第03版).
- Gu W C. The forestry breeding industry has achieved remarkable results in the past ten years of reform[N]. *China Green Times*, March 25, 1989 (Page 03).
- [19] 游应添. 林木良种基地种子低产原因的分析及丰产措施综述 [J]. 林业科技通讯, 1989(10): 3-4.
- You Y T. Analysis of the causes of low seed yield in improved forest variety bases and review of high yield measures[J]. *Forestry Science and Technology Newsletter*, 1989(10): 3-4.
- [20] 徐纬英, 张培杲. 全国林木遗传育种第五次学术报告会论文汇编 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1990.
- Xu W Y, Zhang P G. Compilation of papers from the Fifth National Academic Conference on Forest Genetics and Tree Breeding[M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1990.
- [21] Peng Z H, Lu Y, Li L B, et al. The draft genome of the fast-growing non-timber forest species moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*)[J]. *Nature Genetics*, 2013, 45(4): 456-463.
- [22] Li Y, Wei H R, Yang J, et al. High-quality de novo assembly of the *Eucommia ulmoides* haploid genome provides new insights into the evolution and rubber biosynthesis[J]. *Horticulture Research*, 2020, 7: 183.
- [23] Niu S H, Li J, Bo W H, et al. The Chinese pine genome and methylome unveil key features of conifer evolution[J]. *Cell*, 2022, 185(1): 204-217.
- [24] 张守攻, 齐力旺, 李来庚, 等. 中国林木良种培育的遗传基础研究概览 [J]. 中国基础科学, 2016, 18(2): 61-66.
- Zhang S G, Qi L W, Li L G, et al. Overview of genetic basic research on the cultivation of improved forest varieties in China[J]. *China Basic Science*, 2016, 18(2): 61-66.
- [25] 马常耕. 我国林木无性系育种回顾和今后方向 [J]. 江西林业科技, 1989(6): 32-37.
- Ma C G. Review and future directions of forest tree clonal breeding in China[J]. *Jiangxi Forestry Science and Technology*, 1989(6): 32-37.
- [26] 王章荣. 林木高世代育种原理及其在我国的应用 [J]. 林业科技开发, 2012, 26(1): 1-5.
- Wang Z R. Principles of high-generation forest tree breeding and its application in China[J]. *Forestry Science and Technology Development*, 2012, 26(1): 1-5.
- [27] 王军辉. 林木新种质创制研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(12): 129-141.
- Wang J H. Research progress on development of new germplasm of forest trees[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(12): 129-141.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Xu C P, Zhang Y, Huang Z, et al. Impact of the leaf cut callus development stages of *Populus* on the tetraploid production rate by colchicine treatment[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 37: 635-644.
- [31] Xia Y F, Cao Y, Ren Y Y, et al. Effect of a suitable treatment period on the genetic transformation efficiency of the plant leaf disc method[J]. *Plant Methods*, 2023, 19(1): 15.
- [32] Kang X Y, Wei H R. Breeding polyploid *Populus*: progress and perspective[J]. *Forestry Research*, 2022, 1: 4.

(责任编辑 范娟 赵田芸  
责任编辑 张建国)