

Analysis of technical advantages and challenges of modern biotechnology in forestry breeding

Yujuan Zhang

State-owned Forest Farm, Qianjiang District, Chongqing, Chongqing, 409000, China

Abstract

Amid intensifying global climate change, sustained growth in timber demand, and the inherent limitations of traditional forestry breeding—such as lengthy cycles, low efficiency, and genetic improvement challenges—modern biotechnology has emerged as a pivotal solution to overcome breeding bottlenecks. To address the challenge of rapidly developing high-resistance, high-quality, and high-yield new tree varieties through conventional methods, technologies like genome editing enable precise breeding, transgenic approaches enhance stress tolerance and productivity, while molecular markers accelerate screening of superior traits. These innovations significantly shorten breeding cycles and improve genetic gains. This paper systematically examines the technological advantages of modern biotechnology in forestry breeding alongside its ethical controversies, ecological risks, and regulatory constraints. The analysis provides theoretical support for optimizing application pathways and balancing innovation with safety, ultimately contributing to sustainable forestry development and efficient resource utilization.

Keywords

modern biotechnology; forestry breeding; technological advantages; challenges

现代生物技术在林业育种中的技术优势与挑战分析

张玉娟

重庆市黔江区国有林场, 中国·重庆 409000

摘要

在全球气候变化加剧、木材需求持续增长及传统林业育种周期长、效率低、遗传改良难度大的背景下, 现代生物技术已成为突破林业育种瓶颈的关键手段。针对传统方法难以快速获得高抗、优质、高产新品种的问题, 其通过基因组编辑推动育种精准化、转基因提升树种抗逆性与产量、分子标记加速优良性状筛选等技术, 在缩短育种周期、提高遗传增益等方面发挥重要作用。本文系统分析现代生物技术在林业育种中的技术优势及面临的伦理争议、生态风险、法规制约等挑战, 为优化技术应用路径、平衡创新与安全提供理论支撑, 助力林业可持续发展和资源高效利用。

关键词

现代生物技术; 林业育种; 技术优势; 挑战

1 引言

全球气候变化加剧与木材资源需求持续攀升的背景下, 林业作为生态屏障与经济产业的双重属性日益凸显, 但传统林业育种依赖杂交选育、实生苗筛选等方法, 存在周期长(通常需 10-20 年)、遗传增益有限、抗逆性改良难度大等瓶颈, 难以满足现代林业对高产、优质、多抗树种的迫切需求。现代生物技术如基因组编辑、转基因及分子标记等技术的突破, 为突破育种限制提供了新路径, 其在林业领域的应用潜力与潜在风险交织, 亟待系统探讨技术优势与挑战, 以推动林业育种创新发展。

2 现代生物技术在林业育种中的技术优势

2.1 基因组编辑技术推动育种精准化

基因组编辑技术以 CRISPR-Cas9 系统为核心工具, 通过对植物基因组特定核苷酸序列的定向修饰, 实现对目标性状的精准调控, 显著提升了林业育种的可控性与准确性。传统林业育种依赖随机突变或杂交选育, 难以精准定位并修改关键功能基因, 常导致目标性状分离率高、稳定周期长; 而基因组编辑技术可基于已知基因功能信息, 直接针对调控抗逆性、生长速率或木材品质的核心基因, 设计 sgRNA (单链引导 RNA), 引导 Cas9 核酸酶在特定位点产生 DNA 双链断裂, 进而通过非同源末端连接 (NHEJ) 或同源重组修复 (HDR) 机制实现基因敲除、插入或替换。例如, 在杨树抗虫育种中, 通过编辑 Bt 受体基因 (如 ABCC2) 破坏害虫取食信号通路, 可使转基因植株对天牛幼虫的抗性显著高

【作者简介】张玉娟 (1977-), 女, 土家族, 中国重庆人, 本科, 高级工程师, 从事林业研究。

于野生型；在落叶松材性改良中，针对控制木质素合成的CAD基因进行定点突变，可有效调整木材中纤维素与木质素的比例，直接改善木材加工性能。相较于传统方法需通过表型筛选耗时5-10年，基因组编辑技术可将目标性状固定周期缩短至2-3代，且能精准规避不良性状连锁累赘，为林业良种培育提供了“按需设计”的技术路径。

2.2 转基因技术提升树种抗逆性与产量

转基因技术通过将外源功能基因，包括微生物源、动物源或其他植物源基因）整合至林木基因组中，突破物种生殖隔离限制，使受体树种获得传统育种难以获得的抗逆性或产量提升性状，有效拓展了林业育种的遗传基础。传统杂交育种受限于近缘种间亲缘关系，难以聚合多抗基因或引入远缘优异基因；而转基因技术可通过农杆菌介导法、基因枪法等转化体系，将功能明确的基因转入目标树种，使其表达相应蛋白质或代谢产物以应对外界胁迫。例如，转Bt基因欧美杨对光肩星天牛的抗性显著高于野生型，田间试验显示其能有效降低虫害发生率；转DREB1A基因的樟子松在干旱胁迫下，存活率明显提高，生物量显著增加；转BADH基因的耐盐桉树可在土壤含盐量较高的条件下正常生长，耐盐能力显著增强。此外，通过调控生长相关基因的表达，转基因技术还可促进林木速生性，如转过表达GA20ox基因的杨树，胸径年生长量较对照明显增加，轮伐期可缩短3-5年。

2.3 分子标记技术加速优良性状的筛选

分子标记技术基于DNA序列多态性与目标性状的紧密连锁或共线性关系，通过在苗期或组织培养阶段检测分子标记，实现对优良个体的早期、精准筛选，显著缩短了传统表型鉴定的周期并降低了环境干扰。传统表型筛选需待植株生长至一定阶段才能评估目标性状，且易受光照、水分等环境因素影响，导致误判率高，而分子标记可在种子萌发或愈伤组织阶段通过PCR扩增或芯片检测直接识别含目标基因的个体，将筛选周期缩短至数周甚至数天。例如，在马尾松抗松材线虫病育种中，利用与抗病基因R基因共分离的SSR标记，可从F2代群体中快速筛选出携带R基因的阳性植株，筛选效率显著高于表型鉴定，且不受松材线虫侵染季节限制；在水稻抗倒伏性状改良中，通过SNP标记定位控制茎秆强度的基因（如OsSPL14），已成功培育出茎秆机械强度较高的品系，相关技术已拓展至林业领域，如针对杨树倒伏问题的茎秆木质素含量SNP标记筛选，准确性较高^[1]。此外，分子标记辅助选择（MAS）可与杂交育种、基因组编辑等技术协同应用，通过构建高密度遗传图谱，实现对多个性状的聚合筛选，推动林木育种从“经验导向”向“基因型导向”转变，为规模化、高效化培育优良品种提供了技术保障^[2]。

3 现代生物技术在林业育种中的挑战

3.1 技术应用中的伦理问题与公众争议

现代生物技术在林业育种中的应用突破了传统杂交育

种的自然遗传边界，但也引发了多维度的伦理讨论与公众争议。其中，基因组编辑技术通过定点修饰目标基因实现精准性状改良，虽提升了育种效率，却被部分群体质疑“人为干预自然演化进程”的伦理合理性，如对杨树次生生长基因的编辑可能改变其生命周期特征，影响林地生态系统的动态平衡；转基因技术将外源功能基因（如Bt毒蛋白基因、DREB抗逆基因）导入林木基因组，模糊了物种间遗传屏障，被质疑是否符合“尊重生物固有遗传完整性”的伦理原则，尤其在涉及多年生木本植物时，其遗传改变可能通过花粉传播或根系交互影响周边野生种群，进一步加剧伦理争议。公众层面，由于对基因编辑、转基因等技术原理的认知差异，部分群体担忧技术应用可能引发生态风险（如基因漂移、抗性进化），进而反对其在自然林或生态敏感区的推广。同时，林木作为长期存活的生物类群，其遗传修饰的影响可能跨越数十年甚至上百年，现有伦理评估体系多基于短期农业生物技术，难以全面覆盖林业场景的代际风险，导致伦理审查标准的制定面临科学依据与公众接受度双重挑战^[3]。

此外，林业生物技术的伦理问题还涉及“风险责任主体”的划分与监管制度的适配性。目前多数伦理评估框架依赖农业作物的案例，而林木育种的长生命周期与复杂生态交互使得责任归属难以界定，如基因漂移引发的跨林分遗传效应究竟由科研机构、推广企业还是林地管理者负责，尚缺乏统一规范。再者，部分技术成果在商业化推广环节往往存在信息披露不足的问题，公众难以获取透明的实验数据与风险评估过程，进一步放大了社会层面的信任危机。

3.2 环境与生态风险的潜在影响

现代生物技术在林业育种中的应用虽能显著提升树种的经济与生态价值，但其释放至自然环境后可能引发多维度、长周期的生态风险，这些风险的复杂性源于林木作为多年生木本植物的生物学特性与生态系统的交互作用。其中，基因漂移是首要风险源，转基因或基因编辑林木通过花粉传播与野生近缘种发生杂交，可能将外源功能基因整合至野生种群基因组中，导致野生种遗传多样性稀释或生态位偏移。此外，抗逆性性状的导入虽能增强改良树种对胁迫环境的适应性，却可能使其获得超出原生境的竞争优势，增加生态入侵风险。如转耐盐基因（如BADH甜菜碱醛脱氢酶基因）的桉树在土壤含盐量0.5%的条件下仍能正常生长，而野生桉树通常仅能耐受0.3%以下的盐渍环境。

同时，分子标记辅助选择（MAS）技术虽能高效筛选目标性状，但过度依赖少数关键基因（如控制纤维素合成的CesA基因家族、调控生长速率的FT基因）可能导致林木种群的遗传基础趋于狭窄。以杨树速生品种培育为例，若连续多代通过MAS筛选高表达CesA基因的个体，其子代中该基因的等位变异频率可能从野生型的15%提升至80%以上，当病原体进化出针对高CesA基因表达植株的致病机制时，缺乏遗传变异的林分可能大规模死亡，进而引发土壤侵

蚀、碳汇功能衰减等连锁生态问题。与农业作物相比，林木的生长周期长达 20-50 年甚至更久，遗传基础狭窄的潜在风险需经过多代累积才会显现，而传统的短期监测难以捕捉早期预警信号，导致风险防控措施往往滞后于问题爆发，进一步加剧了生态管理的难度。

3.3 法规与政策制约对技术应用的限制

现代生物技术在林业育种中的应用面临法规与政策的多重制约，不同国家或地区的监管框架差异显著影响了技术的推广效率与国际协同进程。以欧盟为例，其基于“预防原则”制定的《欧盟转基因生物指令》（2001/18/EC）对转基因林木实施全周期严格监管，要求环境释放前需完成实验室毒性测试、封闭田间试验、开放环境释放试验及长期生态监测等多阶段风险评估，涵盖基因漂移对野生种群的影响、目标与非目标生物的相互作用、抗性进化风险等具体指标，并明确规定转基因林木仅可在“高度可控条件”下种植，禁止大规模商业化推广至自然林区。与之形成对比的是美国，其遵循“实质等同性”原则（《生物技术监管协调框架》），对经评估与环境风险等同于传统品种的低风险转基因林木（如转低毒蛋白抗虫基因杨树）简化审批流程，仅需提交安全性报告即可获得田间试验许可，但对于基因编辑技术的监管仍存在法律空白——美国农业部（USDA）将未引入外源基因且未改变植物有害生物特性的基因编辑产品视为“非转基因”，无需按转基因法规管理，而欧盟部分成员国（如德国）则要求此类产品仍需履行转基因生物风险评估程序，导致跨国育种企业在技术转移时面临标准冲突，需针对不同市场重新设计试验方案，显著增加了合规成本。

除监管差异外，知识产权保护与遗传资源权属问题进一步制约了技术的普惠性应用。其中，分子标记技术涉及的 SNP 位点、基因序列等遗传资源的权属界定长期存在模糊性，跨国公司常通过专利布局强化技术垄断：例如某跨国农业生物技术企业曾对杨树中与耐旱性相关的 3 个 SNP 标记申请发明专利，主张其对含有该标记的林木品种享有排他性使用权，导致印度、巴西等发展中国家的育种机构因无法获得专

利授权，被迫放弃相关育种项目或支付高额许可费，直接限制了技术在这些地区的推广应用。

此外，林木遗传资源多属于公共资源，其开发利用的利益分配机制尚未完善——《名古屋议定书》虽要求遗传资源的获取与惠益分享需经资源提供国同意，但在实际操作中，公共资源的权属主体与育种机构的权益划分缺乏明确法律依据，导致资源提供方难以从技术商业化中获得合理回报，极大降低了其参与遗传资源开发的积极性^[4]。这些法规与政策的制约本质上是社会对技术风险的谨慎态度与技术创新需求之间的平衡结果，既反映了公众对生态安全、伦理风险的关切，也对技术研发机构提出了更高要求，需在设计实验方案时同步考虑不同国家的监管差异，在品种选育过程中注重遗传资源的公平获取与惠益共享，从而推动现代生物技术在林业育种中的可持续应用。

4 结语

本文系统梳理了现代生物技术在林业育种中的技术优势与挑战：基因组编辑推动精准化育种、转基因提升抗逆性与产量、分子标记加速性状筛选等技术，有效突破了传统育种周期长、效率低的瓶颈。同时，技术应用面临伦理争议、生态风险及法规制约等现实挑战。未来需通过完善跨区域监管协同、强化遗传资源公平共享及提升公众认知，推动现代生物技术与林业育种的深度融合，实现技术创新与生态安全的平衡发展，为林业可持续发展和资源高效利用提供更坚实的科技支撑。

参考文献

- [1] 董建民. 林木生物技术育种的现代应用[J]. 农家参谋, 2020, (17):121.
- [2] 姚凯. 生物技术在林业育种中的应用探究[J]. 现代园艺, 2019, (22):213-214.
- [3] 祝剑峰, 李芬. 生物技术在现代林业中的应用[J]. 农村经济与科技, 2015, 26(05):67+178.
- [4] 陈罡, 张素清, 马冬菁, 等. 现代生物技术在辽宁林业研究中的应用前景[J]. 辽宁林业科技, 2014, (03):61-63.