

接影响材料生产与运输环节碳成本，传统高碳建材的大量使用会导致碳成本大幅增加。施工组织管理对碳成本的影响具有即时性，科学的施工工艺（如装配式施工、绿色施工技术）能减少现场能耗与废弃物排放，能源使用效率（如新能源机械替代、施工能耗定额管控）直接关联施工阶段碳成本高低，粗放式管理则会造成碳成本浪费。运营维护水平决定长期碳成本走势，完善的能耗管控体系（如智能化能耗监测系统）可实时优化用能效率，设备运维质量（如节能设备定期检修、老旧设备更新）直接影响碳排放强度，运维缺失易导致碳成本持续攀升。

#### 4.2 外部影响因素

政策法规构成碳成本管控的硬性约束，碳定价机制（如碳排放权交易价格、碳税）直接决定显性碳成本高低，严格的减排标准（如项目碳排放限额、绿色建筑评级要求）迫使企业增加低碳投入。市场环境通过资源配置影响碳成本，碳排放权价格波动直接改变碳交易支出，低碳材料供需关系影响其采购价格，供应链低碳化程度则传导至项目碳成本增量。技术发展为碳成本控制提供支撑，低碳技术成熟度（如低碳建材生产技术、碳捕捉技术）降低减排投入成本，数字化技术（如 BIM+ 碳核算系统）提升碳成本管控效率，技术创新滞后则会限制碳成本优化空间。

#### 4.3 影响因素权重分析

采用层次分析法（AHP）明确各因素影响权重：构建目标层（碳成本影响程度）、准则层（内部/外部因素）、指标层（具体影响因素）的层级结构，通过专家打分构建判断矩阵，经一致性检验后计算权重。结果显示，政策法规中的碳定价机制、内部因素中的项目设计方案通常为核心影响因素，其次是市场环境中的碳排放权价格与施工组织管理水平，技术与运营维护水平为重要辅助因素，为后续针对性制定控制策略提供优先级依据。

### 5 低碳转型下工程建设项目碳成本控制路径设计

#### 5.1 分阶段碳成本控制策略

决策阶段聚焦低碳规划与预控，开展项目碳排放专项评估，结合碳定价机制测算碳成本预算，优先选择低碳化规划方案，从源头规避高碳风险。设计阶段强化方案优化与技术集成，通过 BIM 技术进行低碳设计模拟，优先选用再生建材、低碳型材等绿色建材，融入被动式节能、光伏一体化等技术，平衡初期投入与长期碳成本。施工阶段推行低碳化管理，采用装配式施工、绿色施工工艺减少现场排放，搭建施工能耗实时监测系统，优化机械调度与能源结构，同步推进建筑垃圾分类回收与资源化利用。运营阶段依托智能化手

段，搭建能耗与碳排放联动监测平台，动态优化空调、照明等系统运行参数，定期开展节能设备运维与升级。拆除回收阶段实施低碳拆解，制定差异化拆解方案，分类回收钢筋、混凝土等可循环材料，降低拆解过程能耗与碳排放。

#### 5.2 多维度协同控制机制

技术层面加大低碳技术研发与推广，重点突破碳捕捉、低碳建材生产等关键技术，推动数字化与低碳技术融合应用。管理层面构建全生命周期动态管控体系，建立碳成本台账，实现各阶段数据互联互通与动态追踪。政策层面衔接碳定价与激励政策，利用碳税、补贴等工具引导企业减排，将碳成本管控纳入项目考核标准。市场层面强化供应链低碳协同，筛选低碳供应商建立战略合作，通过碳排放权交易优化碳成本配置，提升碳资产利用效率。

#### 5.3 控制效果评价指标与标准

核心评价指标包括碳成本降低率（实际碳成本与基准值差值占基准值比例）、碳排放量削减量、单位产值碳成本降幅、低碳技术投入回报率等。评价标准以行业平均水平为基准值，结合项目低碳目标设定差异化目标值，通过对比实际值与基准值、目标值，从成本控制、减排成效、经济效益等维度综合评估控制效果，形成闭环优化机制。

### 6 结论与展望

本研究明确工程建设项目碳成本核心构成为全生命周期各阶段显性与隐性成本，涵盖碳排放权交易、低碳技术投入、碳监测核算等关键类型，厘清了“边界界定—指标设计—方法选择—模型构建”的系统核算逻辑。同时提出分阶段精准管控与多维度协同发力的控制路径，证实决策阶段低碳规划、设计阶段技术集成、施工与运营阶段动态管控及拆除阶段资源循环，是实现碳成本与减排目标协同的有效手段，为行业低碳转型提供实践支撑。

未来可进一步拓展低碳技术与数字化手段的深度融合，探索 BIM、大数据等技术在碳成本动态核算中的创新应用；深化跨区域、跨行业碳成本协同管控研究，构建多主体联动的成本分摊与减排激励机制；结合碳市场定价机制、政策法规的动态变化，持续优化碳成本控制模型与实施路径，提升研究成果的适配性与前瞻性。

#### 参考文献

- [1] 蔡莺燕. 建筑施工企业项目成本核算中的风险控制研究. 中国科技投资, 2024(32)
- [2] 李金鸿. 建筑施工企业对工程项目成本核算的处理探析. 中国乡镇企业会计, 2024(03)
- [3] 王胜升. 建筑工程造价控制中施工项目成本核算的优化策略. 财富时代, 2024(09)

# Analysis of seedling cultivation and transplanting techniques for afforestation under the “Dual Carbon” target

Jie Wu

Chongqing Fuling District Forestry Development Service Center, Chongqing, 400015, China

## Abstract

Under the “Dual Carbon” strategy, forestry engineering serves as an effective approach to enhance carbon sequestration. As seedling cultivation and transplantation techniques are critical determinants of afforestation’s carbon fixation effectiveness, this study conducts a comprehensive analysis of existing shortcomings in current seedling cultivation and transplantation technologies based on practical forestry work at the grassroots level. It proposes adaptive technical optimization measures. By applying practical techniques such as selecting native carbon-fixing tree species, developing container-grown seedlings, and implementing climate-smart afforestation, the research aims to improve seedling survival rates and long-term carbon sequestration capacity. Furthermore, the study investigates technical aspects throughout the entire process of seedling selection, transplantation, and maintenance, providing technical references for grassroots afforestation projects. This contributes to achieving the “Dual Carbon” goals through forestry-driven carbon sequestration.

## Keywords

“dual carbon” goals; seedling cultivation; transplantation and afforestation; carbon sink efficiency; technical specifications

## “双碳”目标下林业工程苗木培育与移植造林技术体系与管理实践

吴杰

重庆市涪陵区林业发展服务中心, 中国 · 重庆 400015

## 摘要

由于“双碳”战略下,林业工程是增加碳汇的有效途径,而苗木培育和移植技术又是决定造林固碳成效的关键,因此本文根据基层林业工作实际情况,全面剖析目前苗木培育与移植技术中存在的不足,并提出适应性技术优化措施。通过对乡土固碳树种优选、容器苗培育、气候智慧型造林等实践性技术的应用,提高苗木的成活率及长期碳汇能力。并且针对苗木选育、移植、管护等工作全过程的技术进行研究,为基层造林工程提供技术参考,促使林业碳汇驱动“双碳”目标的实现。

## 关键词

“双碳”目标;苗木培育;移植造林;碳汇效率;技术规范

## 1 引言

中国“双碳”战略全面推进后,林业工程承担起固碳增汇的任务,在林业碳汇形成之初(从苗木培育和移植入手),采用何种苗木开展林业造林营林工作,将直接影响造林的成活率、林分质量高低以及森林系统碳储量长期的稳定程度<sup>[1]</sup>。而现实情况,尽管苗木栽植是常用造林技术方法,但仍存在树种与立地条件不匹配、苗木抗逆性差、碳汇价值不理想问题。基于此,中国林业科学研究院提出“气候智慧型适应性造林”,以期从造林维度通过气候—树种—立地精

准匹配,挖掘新造林碳固存潜力最大化。

## 2 苗木培育与移植技术现状分析

苗木培育、移植技术是林业工程的技术基础,在实践中存在许多技术短板。首先,在苗木培育上大多数苗圃采用传统的露地大田播种育苗方式,未将碳汇目标纳入选取和培育范畴。表现在:①育苗基质配方单一,没有按照苗木不同树种生理特性研制出专用基质;②容器苗培育技术水平不高,裸根苗移植时易产生成活率低的问题;③对水肥管理粗放,苗木抗性锻炼不够,导致苗木出圃质量差距较大。

其次,在移植造林方面,由于基层施工队伍对造林的立地评价、树种配置等方面缺乏足够的理性认知,导致在实际操作中没有充分考虑将来气候变化带来的树种适生性问题。据研究数据推测,到 2060 年现有主要造林树种适生区

【作者简介】吴杰(1976-),男,中国重庆人,本科,副高级工程师,从事林业产业发展、林业科技推广应用、森林病虫害防治、风景名胜区保护管理、森林旅游研究。

下降范围将达到 12.1% ~ 42.9%，这表明传统造林模式带有极大的气候风险隐患。另一方面，从移植角度讲，起苗时根系受损是一个亟须解决问题；而移植运输时苗木脱水严重亦不容忽视。若不重视这些弊端将严重制约苗木成活与后期生长。

最后，碳汇效能管理的技术措施尚缺乏碳汇导向的完整体系，如对苗木培育环节的碳汇力量化评价、碳汇最大化的移植模式优化配置及以碳汇增长为目标的抚育管理。在具体实践中，《森林经营增汇技术规程》明确了森林经营活动的相关要求，但由于不同部门对政策文件的执行力度与理解不同，导致标准应用、要求把握程度存在差距。

### 3 苗木培育与移植技术优化措施

#### 3.1 碳汇导向型苗木精准培育技术

碳汇导向型苗木精准培育技术在“双碳”目标的引导下，将育苗的传统方式转变为固碳效能高、生态适应性强的整体培育方式，该培育技术以高固碳树种选育为基础，通过利用可控环境容器苗精细调控及抗逆性训练的方法来实现落地方案，对开展大规模培育提供系统性的营林方案。

就种质选育而言，应聚焦选择生物量累积速率、光合效能、木材密度等碳汇性状的种子，着重乡土树种或适生种源，同时遵循气候响应理念培育出抗旱耐逆种苗，既能充分固定当前的碳汇又能应对未来气候变化的碳汇苗木。

在容器苗培育阶段，注意基质轻量化、通气性和保水性的协调提升，容器需根据根序引导原则，采用高度和容积均可适当调节（增高或扩大容积）的办法来防止窝根，保证苗木根系结构良好；在出圃前，通过抗性锻炼的方法（水分胁迫、光照调节、养分控制等方式），利用非生物胁迫诱导手段对苗木进行整体木本化及自身抗性提升，让苗木更好地去适应造林地的立地条件<sup>[2]</sup>。

此外，通过采用集成生防菌剂、信息素诱捕等绿色防控措施，可有效降低苗木培育过程中化学药剂投入，在深入开展技术体系过程中，构建“固碳—抗逆”协同型苗木表型评价系统，旨在将苗木在不同碳浓度和不同气候条件下的生理反应纳入选育标准；同时尝试开展基于树种功能性状的基质个性化定制，以期达到育苗碳足迹最小化、碳汇潜力最大化的双向优化。总而言之，上述这些思路与当前林业增汇技术发展十分契合，并且对区域化苗木精准培育提供了相应的理论依据和操作路径。

#### 3.2 立地适应性移植造林技术

“双碳”目标引领下，立地适应性移植造林技术起到“桥梁连接”作用，实现育苗到碳汇功能落实，此过程应以提升苗木质量、培育水平和造林成效为抓手。具体而言，利用 Cubist 回归模型解析环境因子，精准判识主导限制因子后，根据不同因子特性研制方案，例如，在干旱半干旱区利用鱼鳞坑、水平沟等集水保墒工程以及定量灌溉补偿措施（实践

证明：灌溉量增加 10%，成活率提高 15%）灌水增活，为苗木水分的供给和需求平衡提供保障。其次，在树种配置方面，突破传统“适地适树”配置方式的可行路径是按照碳汇的效果来综合优化。举例说明：在贫瘠地段优先选择固氮型先锋树种来搭建先导群落；在条件较好的地方则要选种高碳汇的珍贵树种<sup>[3]</sup>。这种由下而上的梯度式组合形成了碳汇增益模式。值得一提的是，关于移植时间，须充分考量物候、土壤水热状态等因素，确定以“早春土壤解冻—苗木萌动期前为主线，以秋季苗木生长停滞后的 1—2 周内移植为辅”的双窗口移植对策，从根本上满足苗木生理活性期与根系修复期要求。

从技术实践上看，标准化移植流程和材料创新可提高成活保障能力。一是利用起苗前灌溉、运输途中保湿、栽植使用保水剂和生根粉（实践表明能提高成活率 15% ~ 20%）方法，组建一条成活性高的技术链；二是根据立地条件异质性灵活选用穴植、缝植、沟植等不同的栽植方式，并推广穴状整地搭配鱼鳞坑用于陡坡地块、带状整地结合沟植用于平缓地带栽植，确保充分发挥水分作用的同时还保障了土壤与根系的紧密接触；三是基于先进生态生理学的研究，建立以苗木水分胁迫阈值为基础的精准灌溉决策模型，实现从经验到机理灌水补偿形式转变。与此同时，开发适合“当地属性”使用的各种复合型保水材料，通过有机保水与矿物增渗功能相结合，并利用微生物菌剂促进根基微生态修复，形成“水分—土壤—微生物”的三元协同成活体系。综合考虑这三点措施，借助立地评价精准化、树种配置功能化、移植时序合理化，更好地发挥了我国现阶段林业工程技术发展的最大效能，进而有效提高我国“双碳”目标下林业工程固碳的便捷性与经济性，达到一种可复制、可推广的最佳实践方式<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 碳汇导向型抚育管理技术

在“双碳”目标视角下，碳汇导向型抚育是造林后固定和提高碳汇的关键过程，精细化地落实碳汇导向型抚育对实现林木长期固碳具有指导性意义。其主要依托三大技术要点，即水肥精准调节、林分结构优化与碳汇监测档案，同时须充分考虑不同树种生物学特性和立地条件及现代生态学的新认识进行实际应用。首先，开展未成林抚育时应建立差异化的水肥管理方案，除了兼顾原始的灌溉定额、氮磷钾比例调控外，还要针对土壤墒情实况及植株生长情况引入弹性调控策略，例如开展土壤墒情检测和叶片营养诊断，以调整灌木树种追肥配比等。此技术应用优势体现在：一方面是促进速生树种冠层的快速生长发育，另一方面为了缓解因氮素供给过多带来的非结构化碳水化合物含量不足问题，以此保障速生树种的生长速率和碳储量处于一种平衡状态。

对于有机物覆盖的要求：在厚度不低于 5 厘米的基础上，可考虑掺入适量生物炭或者腐殖质改良剂。这一举措致力于增加大量微孔，既可以提高保水能力 20% ~ 30%，又可以