

# Study on the Supporting Role of Forestry Engineering in the Construction of Regional Ecological Barriers

Laijun Wang

Hebei Mulan Paddock State-owned Forest Farm, Hebei Province Chengde, Hebei, 068450, China

## Abstract

The forestry ecological engineering practices in Saihanba and its surrounding areas provide a unique research sample for exploring the support mechanisms of artificial forest systems on regional ecological barriers. Based on continuous monitoring data from Weichang County from 2019 to 2024, this paper comprehensively investigates the mechanical coupling characteristics of root-soil complexes, the hydrological regulation effects of forest canopies, and the aerodynamic response patterns of shelterbelts. Under the guidance of a site quality grading evaluation system, the trial of stress-resistant species configuration shows that the mixed conifer-broadleaf planting model has 27.83% higher soil shear strength compared to pure forest structures. The application of engineered afforestation techniques on difficult sites has broken the historical survival rate barrier of 78.50% for rocky mountain afforestation. A monitoring system integrating remote sensing inversion and ground measurements dynamically tracked the 12,000-hectare project area. The regional soil erosion modulus decreased from 4,680 tons per square kilometer per year in 2019 to 1,920 tons per square kilometer per year in 2024. Decoupling analysis of the contribution to ecological security patterns indicates that the independent contribution of forestry engineering accounts for 61.40%.

## Keywords

forestry engineering; ecological barrier; root soil stabilization; hydrological regulation; ecological service functions

## 林业工程对区域生态屏障构建的支撑作用研究

王来军

河北省木兰围场国有林场, 中国·河北承德 068450

## 摘要

塞罕坝及其周边区域的林业生态工程实践, 给探究人工林系统对区域生态屏障的支撑机制赋予了特别的研究样本, 依照围场县域2019—2024年连续监测数据, 本文全面探究了根系-土壤复合体的力学耦合特性, 林冠层水文调控效应以及防护林带的空气动力学响应规律, 在立地质量分级评价体系的引领下展开的抗逆性树种配置试验显示, 针阔混交模式比纯林结构的土壤抗剪强度高出27.83%, 困难立地工程化造林技术的应用使得石质山地造林成活率冲破78.50%的历史瓶颈, 遥感反演和地面实测相融合的监测体系对1.2万公顷工程区实施了动态追踪, 区域土壤侵蚀模数从2019年的4680吨每平方公里每年降到2024年的1920吨每平方公里每年, 生态安全格局贡献率解耦分析表明林业工程的独立贡献占比为61.40%。

## 关键词

林业工程; 生态屏障; 根系固土; 水文调控; 生态服务功能

## 1 引言

京津冀生态涵养区把围场县置于区域生态安全格局的中心位置, 浑善达克沙地南缘与燕山山脉北麓交汇的地方形成了典型的生态脆弱、敏感复合区, 土壤风蚀、水蚀的双重胁迫在此叠加形成极为复杂的侵蚀动力系统。塞罕坝机械林场六十多年的造林实践虽然在国际上得到了广泛的认可, 但是其成功经验一直停留在宏观叙述层面, 对于林业工程在生物物理尺度上重塑地表过程、调控物质循环、支撑生态屏障功能的机制性研究仍然薄弱, 理论供给与实践需求之间存在

落差, 制约了工程技术的精准化升级和区域推广。

## 2 林业工程构建生态屏障的生物物理机制

### 2.1 根系-土壤复合体的抗剪增强与固土保肥机理

根系对土体的力学加固, 是靠根系与土壤界面的摩擦锚固和根系网络张拉约束共同来完成的。原位直剪试验表明, 成熟落叶松林土层的黏聚力比未造林荒地高一倍多, 内摩擦角下降是根系分泌物和菌根网络对土壤团聚体结构的重塑效应。根系密度在10—25cm深度处达到峰值, 正好对应土壤剪切破坏的主控面, 有效地加强了土体抗剪的薄弱环节。针阔混交配置模式依靠根系互补达到更好的土体锚固, 表层土壤有机碳含量比纯林高, 团聚体水稳定性更好。

【作者简介】王来军(1990—), 男, 中国河北围场人, 本科, 工程师, 从事林业园林研究。

## 2.2 林冠截留与地表枯落物的水文过程调控机制

降水再分配过程具有明显的非线性，小雨时林冠截留率很高，随着降水量的增加截留率急剧下降并趋于稳定，这种阈值响应是由于冠层储水容量的物理限制所造成的。枯落物层二次拦截，最大持水量可达自身干重的 2.4 倍，延缓洪峰形成。林下土壤通过生物大孔隙构建优先流网络，稳定入渗率可以超过极端暴雨雨强，保证林地极端降水下仍然可以保持近乎完全入渗。

## 2.3 防护林带的空气动力学粗糙度与防风固沙效应

风沙流经过林带的时候动能非线性衰减，空气动力学粗糙度在林带内急剧上升两个数量级，使风速急剧降低。由于输沙率与风速的三次方成正比，风速的明显降低导致携沙能力崩溃式的衰减，背风面沙粒沉降带粗粒组分富集证明了细沙在林带内完成沉积的过程。

## 3 支撑生态屏障建设的关键林业工程技术

### 3.1 基于立地质量评价的抗逆性树种筛选与配置技术

立地质量的空间异质性决定了“一刀切”式的树种配置必然会遇到适应性困境，围场县 2020 年开始的立地类型精细划分工作把全县造林地划分为 6 个立地类型组、38 个立地类型，每个类型都建立有包含土层厚度、坡度、坡向、土壤质地、年均降水量等 12 项因子的立地质量指数 (SQI) 评分体系。在 SQI 小于 45 分的困难立地上，传统落叶松造林成活率一直维持在 40.00% 到 55.00% 之间，2021 年引进的樟子松、山杏、柠条灌草复合配置模式打破了这一僵局，樟子松用深根系来获取深层土壤水分，山杏用强萌蘖能力来保证群落自我更新的潜力，柠条用根瘤固氮来提高土壤肥力，它们在资源利用的维度上形成了生态位的分化。2024 年对模式配置区的回访调查显示，复合群落的盖度为 67.00%，樟子松个体保存率为 73.20%，山杏和柠条的盖度贡献分别是 28.00% 和 31.00%，比同立地条件下樟子松纯林的保存率 (48.60%) 高 50.62%。

### 3.2 困难立地的工程化造林复绿技术

石质山地造林的困境源于土壤发育的先天缺陷，基岩裸露率大于 60.00%、土层厚度小于 15 厘米的极端立地在围场县北部丘陵区面积达 3.2 万公顷，在这些立地上进行常规造林几乎注定失败。2022 年试点推行的“客土回填+鱼鳞坑整地+容器苗造林”工程化技术组合把造林成功率提高到了 78.50%，其核心是通过人工干预重建植物生存所必需的最低土壤条件：每个鱼鳞坑的规格是长 120 厘米、宽 80 厘米、深 60 厘米，坑底铺设 10 厘米厚的碎石排水层防止根系水涝，坑中间回填 40 厘米厚的外运客土，掺入 5.00% 的有机肥和保水剂，坑沿修筑半月形土埂来拦截坡面径流。容器苗的根系完整，在移栽后能很快恢复吸收功能，2023 年造林季对比试验表明容器苗当年高生长量是裸根苗的 1.68 倍，翌年保存率差距更大，容器苗 86.30%，裸根苗 52.70%。

## 3.3 低效防护林结构优化与近自然改造提升技术

早期营造的大面积同龄纯林正在进入生理衰退期与病虫害高发期的双重风险窗口，围场县 1970 至 1985 年间营造的落叶松纯林现已普遍出现林分密度过大、自然整枝不良、枯落物分解受阻等典型的“绿色荒漠”症状，胸高断面积达到 42 平方米每公顷，而林下灌草盖度却不足 15.00%。近自然改造技术的核心就是通过人工疏伐来模拟自然干扰，重建林分的垂直层次和水平异质性，2021 年在御道口牧场启动的改造试验采用了保留株间伐法，将林分密度由改造前的 1850 株每公顷降低到 980 株每公顷，疏伐强度控制在 47.00%，间伐木的选择遵循“去劣留优、去密留稀、去小留大”的原则，但是特意保留了一些形态异常的个体来保持遗传多样性。改造三年后的监测结果表明，林下光照强度由改造前的相对光强 8.20% 提高到 34.60%，灌木层盖度由 12.00% 提高到 47.00%，草本层物种丰富度由 7 种增加到 23 种，林分结构正向复层异龄混交的近自然状态演替。

## 3.4 基于多源遥感的林业生态工程数字化监测与管理技术

传统的地面调查方法在面对数十万公顷尺度的工程区时陷入效率与精度的两难困境，围场县 2023 年建成运行的林业生态工程数字化监测平台整合了 Sentinel-2 光学影像、Sentinel-1 雷达数据与 ICESat-2 星载激光雷达测高数据，实现了对植被覆盖度、叶面积指数、森林蓄积量、林分高度等关键参数的季度级更新，10 米空间分辨率的植被指数时间序列能够捕捉到单个林班尺度的物候动态与生长异常，2024 年春季平台预警系统成功识别出 3 处共计 1200 公顷的落叶松毛虫潜在暴发区，较传统人工巡查提前了约 45 天，为防治决策争取了宝贵的时间窗口。无人机搭载的多光谱、热红外传感器在样地尺度上具有更好的观测能力，单木分割算法的应用使株数密度、冠幅分布、枯死木比例等指标的自动化提取成为现实。

## 4 林业工程生态服务功能的量化评估与时空响应

### 4.1 区域土壤侵蚀模数变化与水土保持效益的定量表征

土壤侵蚀模数的时空变化特点，可以清楚地体现林业工程的水土保持效果。修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 将土壤侵蚀量表达为降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡长坡度、植被覆盖与管理、水土保持措施等因子的乘积，能够有效揭示林业工程通过改变植被覆盖因子和水土保持措施因子而产生的减蚀效应。

根据 RUSLE 模型的时空模拟结果可知，研究区平均土壤侵蚀模数五年间由中度侵蚀等级跃迁到轻度侵蚀等级，降幅接近六成。转变具有明显的空间异质性特征，侵蚀强度的防止首先发生在中低山区的缓坡地带，然后逐渐向坡度较陡

的区域扩展,空间演进规律和林业工程“先易后难、由下至上”的实施策略高度吻合。

强烈侵蚀区面积大幅减少。强烈侵蚀区一般分布在坡度大、植被稀疏的脆弱地段,是区域水土流失的主要策源地,五年间这类区域面积收缩幅度超过四分之三,而且与新造林区重叠度超过八成。在强烈的侵蚀区营造防护林,林冠层截留作用削弱了降雨对地表的直接打击,枯落物层增大了地表糙率、减小了径流流速,根系网络固持了表层土壤,多种机制共同起作用使侵蚀强度迅速降低。

#### 4.2 植被恢复对区域水资源涵养能力的非线性响应分析

森林覆盖率同水资源涵养能力之间的联系不是简单的线性正相关,围场县滦河上游子流域长期水文观测数据表明,存在一条典型的S型响应曲线。

当森林覆盖率较低时,新造林地的蒸散发消耗占水量平衡中的主导部分,林木蒸腾、林冠截留蒸发量的增加基本上抵消了土壤入渗量增加带来的积极影响,流域枯水期径流量没有明显改善,这种情况称为“水文悖论”。当森林覆盖率超过某个临界值之后,林地土壤的蓄水调节功能才开始显现出来,随着林木的生长和枯落物的积累,土壤有机质含量提高、团聚体稳定性增强、大孔隙比例增大,土壤的入渗能力与蓄水容量得到实质性的提高,枯水期径流量呈持续增长的趋势。当森林覆盖率超过某一较高的阈值之后,水源涵养效益的增长趋势再次趋缓,这就是“天花板效应”,它与高密度林分林冠蒸腾耗水增加、土壤结构改善的边际效益递减有关。

从实际观测数据可以看出,研究区枯水季径流量五年间明显增大,同期降水量增幅不大,差额部分可以合理地归因于森林涵养能力的提高。

#### 4.3 工程区生物多样性指数恢复特征与生境连接度评价

植被覆盖度快速提升的时候,生物多样性恢复就表现出明显的滞后性。在观测期中,植被覆盖度增长比多样性指数的增加大得多,两者相差了约十个点。时滞效应的产生有着深刻的生态学机理:人工林建群初期群落结构比较简单,林下灌木层和草本层的生长需要时间;很多物种的定植和扩散受到种源分布、传播能力等因素的限制;生态系统食物网结构具有层级性,初级生产者的恢复先于消费者,整个群落的重建是渐进的累积过程。

不同类群的动物恢复速度存在较大的差异,鸟类物种数增长速度是兽类物种数的两倍。差异与两类动物完全不同的生态学特性有关,鸟类具有很强的飞行扩散能力,可以快速发现并定殖新的恢复生境斑块;兽类尤其是中大型兽类的

扩散能力较弱,种群恢复很大程度上依靠生境网络的连通状况。根据最小成本路径模型对景观连接度的分析可以发现,林业工程的建设大幅缩短了大块森林斑块之间有效的距离,关键的生态廊道被贯通以后为野生动物种群交流创造了条件,红外相机监测数据显示典型指示物种的活动频次大幅增加。

#### 4.4 区域生态安全格局演变与林业工程贡献率的解耦分析

区域生态安全格局的演变是由多种因素共同作用而产生的,怎样从复杂的因果网络中解耦出林业工程独立贡献,是客观评价工程效果的关键方法论问题。本研究使用对数平均迪氏指数分解法(LMDI)来分解生态安全指数的变化,该方法具有分解无残差、路径独立等优点,可以将总量变化完全归因于各个驱动因素。

分解结果清楚地反映出主导因素的格局,林业工程对生态安全改善的贡献率大于六成,气候变化的贡献率不到两成,农业结构调整的贡献率约为一成。有力地回答了有关“区域生态改善是否主要归功于降水增加”的质疑,虽然观测期内年均降水量确有增加,但是气候因素贡献只有林业工程贡献的三分之一左右。

### 5 结语

围场县林业生态工程的实践表明,人工林系统对区域生态屏障的支撑作用源于根系、土壤耦合的力学增强,林冠、枯落物、土壤的水文调控链条,防护林带的空气动力学改造这三种生物物理机制。立地质量精准评价指导下的抗逆性树种配置、困难立地的工程化造林技术突破、低效林分的近自然改造升级构成技术支撑体系的主要内容,生态服务功能的量化评估显示土壤侵蚀模数降低58.97%、枯水期径流量增多23.40%、生物多样性指数改善25.35%的综合效益,解耦分析表明林业工程对区域生态安全格局改善的独立贡献率达到61.40%。

#### 参考文献

- [1] 陈月,高帆,彭祚登. 天保工程对京津冀地区天然林资源及生态系统服务功能影响的研究[J]. 西北林学院学报,2024,39(3):153-161.
- [2] 王亚明,王江,余涛,等. 基于京津风沙源治理工程的林业生态工程建设效果实证分析[J]. 林业经济,2017(7).
- [3] 姜雪梅,曹永强,么嘉祺,等. 基于最大光能利用率动态校正的京津冀地区植被碳汇反演研究[J]. 生态学报,2025,45(13):6374-6389.
- [4] 汪婧宇,卢泓钢,徐彩瑶,等. “山水工程”实施对林业绿色全要素生产率水平的影响[J]. 林业科学,2025,61(8):191-203.
- [5] 宋菲,吴松. 林业工程建设对生态环境影响的评估研究[J]. 花卉,2025(8):154-156.