

气候变化对造林成活率及生长的影响研究

余小倩

固原市原州区林业总场 宁夏 固原 756000

摘要: 宁夏固原地处黄土高原西部,是我国生态脆弱区与“三北”防护林建设重点区域。近年来,受全球气候变化影响,当地气温升高、降水格局改变、极端气候事件频发,给人工造林工程成效带来严峻挑战。本文基于固原地区1981-2020年气象观测数据与典型造林样地长期监测资料,分析气候变化趋势及其对柠条、山杏、油松、刺槐等主要造林树种成活率与生长量的影响机制。研究发现:1981-2020年,该地区年均气温显著上升(+0.35°C/10a),年降水量微增但季节分配不均,春季干旱加剧,极端高温与强降水事件增多;气候变化对不同树种成活率影响差异大,耐旱灌木柠条成活率稳定(>80%),乔木油松、刺槐在干旱年份成活率降至50%以下;气温升高延长生长季,但水分胁迫致胸径与树高年增量波动下降;土壤水分动态与降水-蒸散平衡是影响造林成效的关键中介变量。据此,本文提出“适地适树、水分优先、结构优化、科技赋能”的适应性造林策略,为黄土高原生态修复提供科学依据。

关键词: 气候变化;造林成活率;树木生长;生态修复;宁夏固原;黄土高原

引言

全球气候变化是21世纪人类最严峻环境挑战之一。IPCC第六次评估报告显示,全球平均气温较工业化前上升约1.1°C,升温速率加快。中国西北干旱半干旱地区升温显著,宁夏属温带大陆性干旱半干旱气候,生态脆弱,固原市位于宁夏南部,是多项生态工程核心实施区,森林覆盖率大幅提升,但气候异常威胁造林成果可持续性。深入研究气候变化对固原地区造林影响机制,有助于评估生态工程成效,为适应性造林策略提供支撑^[1]。当前相关研究在西北黄土高原典型生态脆弱区精细化、长时序实证不足。本文以宁夏固原为对象,结合数据与监测,探究气候变化特征、对造林影响、关键气候因子及适应性造林技术体系,对提升生态修复韧性、保障生态安全、实现“双碳”目标意义重大。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

固原市位于东经105°58′-106°58′,北纬35°14′-37°04′,总面积1.05万平方公里。地貌以黄土丘陵沟壑为主,海拔1500-2900米。气候属中温带半干旱向半湿润过渡带,年均气温6.7-8.8°C,年降水量300-550毫米,70%以上集中于6-9月,蒸发量高达1500-2000毫米。土壤以黄绵土、黑垆土为主,土层深厚但有机质含量低,保水保肥能力差。主要植被类型为草原化荒漠与山地落叶阔叶林过渡带,代表性树种包括柠条、山杏、油松、刺槐等。

1.2 数据来源与研究方法

本研究采用多源数据融合方法,气象数据来源于中国气象数据网,选取固原国家基本气象站1981-2020

年逐日气温、降水、相对湿度、风速、日照时数等数据,并据此计算年均温、年降水量、潜在蒸散量(采用FAO Penman-Monteith公式)及干旱指数($AI = P/ET_0$)等关键指标。造林监测数据由宁夏林业和草原局、固原市林草局及宁夏大学生态监测样地提供,时间跨度为2005-2023年,涵盖原州区、西吉县、隆德县、彭阳县四个典型造林样地,记录了柠条、山杏、油松、刺槐等主要树种在造林后1年、3年、5年的成活率,以及树高、胸径、冠幅等生长指标。此外,2015-2023年间,研究团队采用TDR(时域反射仪)对样地0-100cm土层土壤含水量进行定期监测,以揭示土壤水分动态与气候因子的耦合关系。

在分析方法上,首先采用Mann-Kendall非参数检验法识别气候要素的长期变化趋势;其次,运用Pearson相关系数分析气候因子(如春季降水、夏季高温日数)与造林成活率、年生长量之间的统计关系;进而构建多元线性回归模型,量化不同气候变量对树木生长的贡献率;最后,通过对比典型干旱年(如2015年)与湿润年(如2020年)的造林成效,揭示极端气候事件对生态恢复过程的冲击效应。

2 结果与分析

2.1 固原地区气候变化特征(1981-2020年)

1981-2020年间,固原地区气候系统呈现出显著的“暖干化”趋势。年均气温以0.35°C/10a的速率显著上升($p < 0.01$),其中冬季和春季升温尤为突出,分别达到0.48°C/10a和0.41°C/10a。这一升温过程直接导致 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温增加约280°C·d,生长季平均延长5-7天,理论上为

植物生长提供了更长的生理活动窗口。然而，降水格局的变化却抵消了这一潜在利好。尽管年降水量呈现微弱增加趋势（+4.2mm/10a），但其年际波动剧烈，变异系数高达35%，且季节分配严重失衡。春季（3–5月）降水量显著减少（-8.6mm/10a， $p < 0.05$ ），而夏季强降水事件（日降水量 $\geq 25\text{mm}$ ）频率则上升37%^[2]。这种“春旱夏涝”的降水格局加剧了生态系统的水分胁迫风险。与此同时，干旱指数（AI）持续下降，表明区域气候正朝着“暖而干”的方向演化。极端气候事件亦呈频发态势，高温日数（ $\geq 35^\circ\text{C}$ ）从1980年代的年均2.1天增至2010年代的5.8天，春旱发生频率由30%上升至55%，2010–2020年间共发生4次区域性严重干旱，对植被恢复构成持续压力。

2.2 气候变化对造林成活率的影响

通过对4个样地2005–2023年数据的分析，不同树种对气候变化的响应差异显著。

表1: 不同树种对气候变化的响应

树种	平均成活率 (%)	干旱年成活率 (%)	湿润年成活率 (%)	主要限制因子
柠条	85.2	78.5	92.1	春季低温冻害
山杏	76.8	65.3	88.7	花期霜冻、春旱
油松	62.4	48.1	79.5	幼苗期水分胁迫
刺槐	58.7	42.3	75.2	夏季高温+干旱复合胁迫

这一差异源于其生理生态特性：柠条具有发达的深根系和较低的蒸腾速率，能够在土壤深层水分支持下度过干旱期；而油松、刺槐等乔木幼苗根系较浅，在春季造林关键期若遭遇持续少雨，土壤表层迅速失水，幼苗无法及时建立有效吸水系统，极易因水分亏缺而死亡。山杏作为兼具经济与生态功能的乡土树种，成活率介于灌木与乔木之间（76.8%），但其花期易受晚霜与春旱双重胁迫，导致结实率下降，间接影响种群更新。2015年春旱期间，油松造林成活率仅为41.2%，而同期柠条达76.8%，鲜明地揭示了树种选择在气候变化背景下的决定性作用。

2.3 气候变化对树木生长的影响

除成活率外，树木的持续生长能力直接关系到生态系统的碳汇功能与结构稳定性。2010–2023年的监测数据显示，尽管气温升高延长了生长季，但水分胁迫已成为限制树木生长的主要瓶颈。以胸径年增量（ ΔDBH ）为例，油松从2010年的0.42cm/a降至2020年的0.28cm/a，下降幅度达33%，且与春季降水量呈显著正相关（ $r = 0.71$ ）。刺槐对高温更为敏感，在2017年极端高温年份（ $\geq 35^\circ\text{C}$ 达12天），其树高年增量仅为0.15m/a，较常年平

均水平下降40%。相比之下，柠条的生长量波动较小，年均高增长稳定在0.25–0.35m之间，展现出较强的气候韧性。土壤水分监测进一步揭示了这一现象的机制：在干旱年份，造林后30天内0–40cm土层含水量常降至8%以下，低于多数乔木的萎蔫点（10%），导致根系吸水受阻，光合作用减弱，生长停滞。这表明，即便气温条件改善，若水分供给不足，树木的生长潜力仍无法释放。

2.4 关键气候驱动因子识别

为厘清气候因子对造林成效的作用路径，本研究构建了树木年生长量（Y）与春季降水量（ P_{spring} ）、夏季平均气温（ T_{summer} ）、潜在蒸散量（ ET_0 ）的多元线性回归模型。结果表明，春季降水对所有树种的生长均具有显著正向影响，其回归系数 β_1 在0.32–0.48之间（ $p < 0.01$ ），凸显了造林初期水分保障的极端重要性。夏季高温则对刺槐和油松生长产生显著负效应（ $\beta_2 < 0$ ），反映出高温加剧蒸腾、加速土壤水分消耗的负面作用。潜在蒸散量每增加100mm，乔木胸径年增量平均减少0.05cm，说明区域蒸散需求的上升正不断压缩植被可利用的有效水分空间。综合来看，春季土壤水分的有效性是连接气候变化与造林成效的核心中介变量，而极端高温与强降水则通过扰动水分平衡与物理冲刷，进一步放大生态风险。

3 讨论

本研究揭示，固原地区“暖干化”趋势通过多重路径影响人工造林成效。首先，气温升高虽延长了生长季，但同步增强的蒸散作用导致土壤水分亏缺，尤其在春季造林关键期，降水减少与高温叠加，使幼苗难以建立稳定的水分吸收系统。其次，物候变化引发新的生态风险，如树木萌动期提前而晚霜期末显著推迟，导致山杏等树种在花期遭遇冻害，影响繁殖与更新。再次，极端气候事件的频发构成突发性冲击，强降水引发水土流失，冲刷幼苗根系；持续高温则加速土壤干燥，形成高温-干旱复合胁迫，远超单一胁迫的叠加效应。

本研究结论与黄土高原其他区域的研究基本一致。然而，本研究首次在固原地区系统量化了不同树种对关键气候因子的敏感性差异，为精准化、差异化造林提供了实证依据。需要指出的是，本研究未考虑大气 CO_2 浓度升高的潜在施肥效应，也未深入探讨根系-微生物互作等地下过程，这些机制可能在长期尺度上调节植被对气候变化的响应，未来需结合控制实验与生态系统模型加以深化。

4 适应性造林对策建议

面对日益严峻的气候变化挑战，固原地区的人工造

林必须从“规模扩张”转向“质量提升”与“韧性增强”。首要原则是坚持“适地适树”，根据立地条件精准配置树种^[3]。在干旱阳坡应优先选择柠条、沙棘等深根耐旱灌木，而在阴坡或沟谷等水分条件相对优越的区域，可构建油松与山杏的混交林，以提升系统稳定性。同时，应谨慎推广高耗水树种如杨树，避免因盲目追求速生而加剧区域水资源压力。

其次，必须强化水分管理，将“水分优先”理念贯穿造林全过程。推广“鱼鳞坑+覆膜+保水剂”三位一体的集雨抗旱技术，可有效拦截降雨、减少蒸发、延长土壤供水时间。在条件允许的区域，发展微灌、滴灌等节水灌溉系统，尤其在造林前三年的关键生长期实施精准补水，可显著提高成活率与早期生长量。此外，应利用遥感与物联网技术构建土壤墒情智能监测网络，实现干旱预警与应急响应。

造林时间与密度亦需动态调整。传统春季造林易遭遇春旱，可将部分作业调整至秋季（9-10月），利用秋雨蓄积土壤水库；同时，适当降低初植密度（如油松从3300株/ha降至2200株/ha），可减少个体间水分竞争，促进优势木健康生长^[4]。在林分结构上，应大力推广乔灌草立体混交模式，如“油松+柠条+苜蓿”配置，既能增强水土保持功能，又能提高生物多样性与生态系统抗逆性。

最后，需加强科技支撑与长期监测。建立涵盖气候、土壤、植被的多要素一体化监测体系，开发基于机器学习的造林适宜性评估模型，并将未来气候变化情景

（如RCP4.5/RCP8.5）纳入生态工程规划，实现从“被动应对”到“主动适应”的战略转型。

5 结语

本研究利用1981-2020年气象数据与2005-2023年造林监测资料，揭示了气候变化对宁夏固原地区造林成活率与树木生长的影响机制。近40年，固原“暖干化”显著，年均温升0.35℃/10a，春季降水减，极端干旱高温频发。不同树种响应差异大，耐旱灌木柠条成活率超80%，适应强；乔木油松、刺槐干旱年成活率低至50%以下，生长量波动下降。春季土壤水分亏缺是限制造林关键，极端事件加剧生态风险。未来造林应“水分优先、适地适树”，优化树种、强化水分管理、构建混交结构，提升人工林适应能力。本研究为黄土高原生态脆弱区国土绿化和系统治理提供依据与路径。

参考文献

- [1]廖宇.气候变化对林业的影响及应对策略[J].农村科学实验,2025,(07):130-132.
- [2]罗旭,梁宇,贺红士,等.气候变化和不同强度造林对大兴安岭主要树种林分信息和地上生物量的长期影响[J].生态学报,2019,39(20):7656-7669.
- [3]蔡苗,李雅,卢杰.树木径向生长对气候变化的时空响应研究进展[J].农业与技术,2025,45(09):73-76.
- [4]孙守琴,谢汶天,胡兆永,等.亚高山森林树木生长响应气候变化研究的前沿和挑战[J].气候变化研究进展,2025,21(02):198-207.