

气候变化背景下森林植被分布格局演变预测

陈艳梅 李乔昕

沙坡头区林业技术推广服务中心 宁夏 中卫 755000

摘要: 森林是陆地生态系统核心,在全球碳循环、气候调节等方面作用关键。但工业革命后,人类活动致温室气体浓度剧增,全球气候系统改变,成为驱动森林植被分布深刻演变的关键因素。本文梳理了气候变化对森林植被分布的影响机制,综述物种分布模型(SDMs)、动态全球植被模型(DGVMs)等预测植被分布格局演变的主要模型及其优缺点。基于多源数据与模型模拟,分析全球及中国区域森林植被在气候变化下的演变趋势,未来森林将向更高纬与海拔迁移,热带雨林有退化风险,北方森林组成和生产力或波动。此外,探讨了预测中的不确定性来源,如模型结构等,展望未来需发展集成模型、加强监测,提升预测精度,为森林适应性管理策略提供理论支撑。

关键词: 气候变化; 森林植被; 分布格局; 物种分布模型; 动态全球植被模型

引言

地球气候系统正经历末次冰期以来最剧烈扰动,IPCC 第六次评估报告显示,全球平均气温较工业化前升高约 1.1°C,且升温速率正在加快,同时降水格局改变、极端气候事件频发、季节节律紊乱,构成挑战自然生态的新环境。森林覆盖地球约 31% 的陆地面积,是最复杂、生产力最高的陆地生态系统,是众多物种家园和巨大碳库,关乎全球生态安全与人类福祉。但森林对气候变化高度敏感,气候因子严格调控其生长发育过程,气候变化超其适应能力会打破原有分布格局,引发连锁反应,甚至加剧气候变化。如亚马逊雨林退化或变碳源。在此背景下,科学准确预测未来森林植被分布演变意义重大,是制定生态保护策略、实现可持续森林管理的迫切需求。本研究将整合成果,剖析机理,评述模型,探讨方向与管理启示。

1 气候变化影响森林植被分布的机制

1.1 直接生理胁迫

温度和水分是决定植物生存与生长的两个最基本气候因子。(1) 温度胁迫: 每种树种都有其特定的温度耐受范围(生态幅)。持续的高温会抑制光合作用、加速呼吸消耗,并破坏细胞膜结构,导致热损伤甚至死亡;反之,异常低温或霜冻事件则会冻伤组织,影响越冬存活率。随着全球变暖,许多树种在其分布区南缘(低纬度/低海拔)因无法忍受日益频繁的极端高温和干旱而衰退。(2) 水分胁迫: 降水格局的改变,特别是干旱频率和强度的增加,是当前森林面临的主要威胁。水分亏缺会直接限制光合作用,导致气孔关

闭,减少碳同化,并可能引发木质部栓塞,阻断水分运输,最终造成树木死亡。地中海气候区、美国西部以及中国西南地区的森林近年来频发的大规模死亡事件,均与严重干旱密切相关。

1.2 物候失配

气候变化打乱了长期稳定的物候节律。春季提前到来可能导致树木展叶、开花时间提前,但若遭遇晚霜,则新生组织极易受损。更重要的是,植物物候的变化可能与其传粉者、种子传播者或共生微生物的活动周期不同步,从而影响繁殖成功率和幼苗更新。例如,依赖特定昆虫传粉的树种,若其花期与昆虫活跃期错开,结实率将大幅下降。

1.3 分布边界迁移

为了追踪其适宜的气候生态位,森林植被整体呈现出向更高纬度(极地方向)和更高海拔迁移的趋势。这是一种被动的、空间上的适应策略。然而,这种迁移受到多重因素的制约:(1) 迁移速率限制: 树木种子的扩散能力有限,自然迁移速率通常远低于气候变化所要求的“气候速度”(即等温线移动的速度)。例如,许多温带树种的年均迁移速率仅为数百米,而某些地区所需的气候速度可达每年 1 公里以上。(2) 地理障碍: 山脉、河流、城市、农田等景观障碍会阻断物种的迁移路径,形成“气候陷阱”,使物种被困在日益恶化的栖息地中。(3) 土壤与地形限制: 高纬度或高海拔地区可能存在不适宜的土壤条件(如贫瘠、永久冻土)或陡峭地形,限制了森林的成功定植。

1.4 群落组成与结构更替

气候变化并非均等地影响所有物种。不同树种对气候变化的敏感性和适应能力存在显著差异。这将改变原有森林群落内部的竞争格局。耐旱、喜暖的先锋树种或外来入侵种可能获得竞争优势,而一些特化程度高、适应能力弱的原生树种则可能被排挤甚至局部灭绝^[1]。这种物种组成的更替会深刻改变森林的垂直结构、冠层郁闭度以及凋落物特性,进而影响整个生态系统的功能。

1.5 极端气候事件与干扰加剧

气候变化显著增加了野火、病虫害爆发、风暴等干扰事件的发生概率和强度。这些干扰事件往往是森林分布格局发生突变的直接导火索。例如,北美西部由树皮甲虫引发的森林大面积死亡,其背后是暖冬减少了甲虫的越冬死亡率,以及干旱削弱了树木的防御能力。同样,更强烈的风暴可以成片摧毁成熟林,为新物种的入侵创造机会。

2 森林植被分布格局演变预测的主要模型

为了量化和预测上述复杂过程,科学家们发展了一系列模型工具,其中以物种分布模型(SDMs)和动态全球植被模型(DGVMs)为代表。

2.1 物种分布模型(SDMs)

SDMs,也被称为生态位模型或生境适宜性模型,其基本原理是建立物种当前的已知分布点与其所在位置的环境变量(主要是气候变量)之间的统计关系,然后将此关系外推至未来不同的气候情景下,以预测该物种潜在分布区的变化。常用方法包括最大熵模型(MaxEnt)、广义线性模型(GLM)、随机森林(Random Forest)等。MaxEnt因其仅需存在点数据、对小样本数据表现良好而被广泛应用。优点是概念直观,计算相对简单,所需输入数据(物种分布点、气候栅格数据)易于获取。能够有效识别关键的限制性气候因子。然而,SDMs本质上是静态的、相关性的模型。它假设物种与其环境处于平衡状态,忽略了物种间的竞争、捕食、共生等生物相互作用;未考虑物种的扩散能力和迁移过程;也无法模拟生态系统内部的动态过程(如演替、碳氮循环)。因此,SDMs更适合于预测物种潜在分布区的变化,而非实际分布。

2.2 动态全球植被模型(DGVMs)

DGVMs是一类更为复杂的、过程导向的模型。它们试图在网格尺度上模拟植被的动态变化,包括光合作用、呼吸作用、碳分配、物候、水热传输、土壤有机质分解、植被竞争与演替等关键生态生理过程。代表模型有LPJmL、ORCHIDEE、IBIS、CLM等。优点是能够模

拟植被与气候之间的双向反馈(如植被变化如何通过反照率、蒸散发影响局地气候);可以输出连续的生物物理变量(如净初级生产力NPP、叶面积指数LAI、碳储量);能够处理植被群落的动态演替过程。然而,模型结构复杂,参数众多,需要大量高质量的输入数据(气象、土壤、地形等);计算成本高昂;对于物种水平的细节刻画不足,通常以植物功能型(PFTs)为模拟单元,难以精确反映特定树种的命运;对火灾、病虫害等干扰过程的模拟能力仍有待提高。

2.3 模型集成与多尺度融合

鉴于单一模型的局限性,当前研究趋势倾向于采用模型集成的方法,即结合多个SDMs或DGVMs的预测结果,通过加权平均等方式降低单个模型的不确定性。此外,将大尺度DGVMs的宏观格局与小尺度SDMs或基于个体的模型(IBM)的精细过程相结合,实现多尺度融合,是提升预测精度的重要方向。

3 全球及区域森林植被分布格局演变趋势预测

3.1 全球尺度

(1) 高纬度地区扩张与转型: 北极和亚北极地区的北方森林(Boreal Forest)预计将向北扩张,侵入苔原带。然而,这种扩张可能伴随着内部组成的重大转变,即耐寒的针叶树(如云杉、冷杉)可能被更喜暖的落叶阔叶树(如白桦、杨树)所取代^[2]。同时,升温导致的永久冻土融化会改变水文条件,可能在部分地区形成湿地,抑制森林生长。(2) 中纬度地区重组与压力: 温带森林将面临复杂的重组。一方面,部分树种向更高海拔迁移;另一方面,夏季干旱的加剧将对许多现有森林构成严峻挑战,可能导致森林稀疏化甚至向灌丛或草地转化。地中海盆地、美国西南部等地的森林生态系统尤其脆弱。(3) 热带地区退化风险: 尽管CO₂施肥效应可能在短期内促进热带雨林生长,但长期来看,降雨模式的改变(如干季延长)和极端干旱事件的频发,将大大增加亚马逊、刚果盆地等主要热带雨林发生大规模退化甚至“稀树草原化”的风险。一旦越过临界点,这种转变可能是不可逆的。

3.2 中国区域

中国地域辽阔,气候梯度巨大,森林类型多样,对气候变化的响应也呈现出鲜明的区域分异特征。(1) 东北地区: 作为中国北方森林的主要分布区,预计将经历明显的组成变化。兴安落叶松等寒温性针叶林的适宜区将收缩,而蒙古栎等温性阔叶树的分布范围可能扩大。同时,暖干化趋势可能加剧森林火灾和病虫

害风险。(2) 华北及西北地区:本就处于半干旱-半湿润过渡带的森林(如油松、侧柏林)将面临更加严峻的水分胁迫。其分布区可能进一步萎缩,林线(森林上限)虽有上升趋势,但受限于土壤和地形,实际迁移可能滞后。荒漠化与森林退化的边界可能向东南方向推移。(3) 青藏高原:高寒灌丛草甸带预计将向上(向更高海拔)压缩,而高山针叶林(如云杉、冷杉林)的林线上限有望抬升。然而,这种“绿化”效应受到土壤发育缓慢、生长季长度限制等因素的制约,且可能对独特的高寒生物多样性构成威胁。(4) 南方地区:亚热带常绿阔叶林整体上可能受益于冬季变暖,冻害减少。但夏季极端高温和伏秋连旱的加剧,将对部分树种(尤其是浅根性树种)构成威胁。同时,热带季雨林的北界有望向北推进,但其进程同样受到人为活动(如土地利用)的强烈干扰。

4 预测的不确定性与挑战

4.1 气候情景的不确定性

模型预测高度依赖于对未来温室气体排放路径的假设,即共享社会经济路径(SSPs)与代表性浓度路径(RCPs)的组合^[3]。不同的社会经济发展模式、能源政策和技术进步会导致截然不同的排放轨迹,从而产生差异巨大的气候强迫。这是预测不确定性的首要来源。

4.2 模型本身的不确定性

无论是SDMs还是DGVMs,其内部结构、参数化方案、对关键过程(如CO₂施肥效应、水分利用效率、干扰动态)的描述都存在简化和假设。不同模型对同一情景的模拟结果往往存在显著分歧。例如,对于CO₂施肥效应的强度,各模型的估计值差异很大。

4.3 非气候因子的交互作用

模型预测通常聚焦于气候驱动,但现实中,森林分布还受到土壤、地形、火灾、病虫害、土地利用/覆被变化(LUCC)以及大气氮沉降等多种非气候因子的强烈影响。这些因子与气候变化之间存在复杂的交互作用^[4]。例如,氮沉降可能缓解养分限制,增强森林对CO₂的响

应;而城市化和农业扩张则直接侵占森林土地,阻碍其自然迁移。忽略这些交互作用会严重高估或低估气候变化的真实影响。

4.4 生物适应性与进化潜力

现有模型大多假设物种的生理生态特性是固定的,忽略了物种通过表型可塑性(同一基因型在不同环境下表现出不同性状)或微进化(种群基因频率的改变)来适应新环境的可能性。虽然这种适应在短期内可能有限,但对于长期预测而言,是一个不可忽视的未知数。

结语

气候变化正深刻重塑全球森林植被分布格局,总体呈现向高纬、高海拔迁移趋势,热带雨林退化、北方森林转型、中纬度森林面临复合压力,演变过程复杂且充满不确定性。为应对挑战,未来研究需在多方面突破:发展新一代集成模型,耦合多系统、融合多尺度过程并模拟关键干扰;深化多源数据融合,利用多种数据严格校准、验证和约束模型以降低预测不确定性;量化非气候因子贡献,加强对多重胁迫因子交互作用机制研究并发展综合评估框架;探索适应性管理路径,基于可靠预测制定前瞻性策略,包括辅助迁移、调整造林树种、加强监测预警、保护修复生态廊道等。森林命运与人类未来紧密相连,只有持续深入研究并采取有效适应行动,才能守护好地球之肺,维系人与自然和谐共生。

参考文献

- [1] 李雅妮,梁海斌,温海瑞等.气候变化和人类活动驱动的森林衰退特征及机制[J].生态学报,2025,45(12):6081-6094.
- [2] 包奎麟.近40年气候变化背景下北方森林时空动态变化及对比分析[D].桂林电子科技大学,2025.DOI:10.27049/d.cnki.ggldc.2025.000532.
- [3] 梁钟文.气候变化对森林经营策略的影响及适应性管理措施[J].农村科学实验,2024,(21):123-125.
- [4] 张佳兴,杨小飘,卢俊杰.浅析气候变化对森林树木的影响[J].现代园艺,2024,47(12):168-170.