

气候环境变化对区域林木生长节律的影响分析

木希叶乐

鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心 内蒙古 鄂尔多斯 017004

摘要：本文全面总结了温度升高、降水格局变化、太阳辐射波动以及大气CO₂浓度增加等主要气候因素对林木生长节律影响方式及其机制。结果表明，气温升高一般使温带及高纬度地区春季物候期提前、秋季物候期延迟，从而导致生长季变长，但是冬季低温需求量降低又会抵消一部分提前效应；降水有效性的改变对于不同地区的生长节律有不同的影响，干旱、半干旱地区的树木生长开始受到水分制约明显；光周期与温度共同影响物候的关键时期，在一些情况下，极端天气事件（例如晚霜冻害、热浪、干旱等）会影响正常的生长节律甚至导致生长停滞。加强对多种因素相互作用的研究并结合多层次观测与过程模型进行分析有利于提高预测准确性。

关键词：气候变化；林木生长周期；物候；年轮；生理反应；极端天气

引言

林木生长节律是其一年中周期性的生长、发育和休眠的变化规律，包括芽萌动、展叶、抽梢、开花、结实、落叶和休眠等物候现象以及年轮形成的时间变化。这都是由于林木长期适应季节变化而产生的反应，在碳固定、水分利用和养分循环方面发挥重要作用。在当前全球气候变化背景下，温度、降水量、辐射强度和大气成分的变化已经对许多地方林木生长节律产生重要影响，从而影响到森林生产力、物种间竞争关系以及碳汇能力。近年来的研究通过对物候观察、遥感NDVI、年轮分析以及控制实验表明：大多数地区春季提前、秋季延迟、生长时间加长；但是也有部分地区由于冬季增温导致冷量不够而使春季物候推迟甚至缩短生长期。目前对于气候变化如何影响林木生长节律存在诸多争议，主要集中在多个因素之间相互作用、林木自身适应能力和不同模型预测结果上。本文总结了气候对林木生长节律的影响以及不确定性问题，以供森林管理和生态系统模拟参考。

1 气候环境变化的主要特征与趋势

1.1 温度变化

全球表面平均温度自工业革命以来一直在升高，而且近50年来升温速度加快。据政府间气候变化专门委员会（IPCC）最新评估报告，2014-2023年全球平均温度比1850-1900年升高约1.2℃。气温变化具有明显的区域性，在高纬度及陆地生态系统中升温幅度大于全球平均水平，在冬季和春季更为明显。对森林生态系统而言，气温升高会使得全年热量总值发生变化的同时也会使冬季冷量累积、春季霜冻次数、夏季热浪强度有所不同，而这些都对林木生长节奏产生影响。

1.2 降水与水分有效性变化

全球降水分布出现“越早越早、越湿越湿”的趋势，在中纬度很多地方年降雨量减少或者降雨季节分配发生变化，而在高纬度以及部分热带地区降雨增多。另外随着气温升高，蒸散发能力也增大，造成土壤含水量降低，尤其是在生长期中期。水分有效性变化对于林木生长影响一般是通过植物水分关系来起作用，比如保持膨压、控制气孔以及光合作用速率的变化等^[1]。从区域性来看，缺水可能会使春季萌动推迟，也可能使树木因缺水而早关气孔停止木质部生长，从而使整个生长季变短。

1.3 辐射与CO₂浓度变化

到达地面太阳总辐射受云量以及气溶胶的影响，在一些工业区出现“变暗”之后又逐渐“变亮”，但是变化幅度不大。更重要的是大气中二氧化碳浓度不断增加，已经达到了420ppm以上。二氧化碳浓度增加一方面有利于植物光合作用，另一方面也因为其能够降低叶片气孔导度从而减少植物水分消耗，进而影响森林生长过程中碳源供给以及水循环。但是二氧化碳对于生长节奏的影响还不清楚，更多的是通过改变碳氮代谢以及源库关系来控制物候期的到来。另外紫外线以及光照条件的变化也可能参与到光周期信号调控之中。

2 林木生长节律的内涵与表征指标

2.1 生长节律的定义与阶段划分

林木生长节律实际上是一种林木内部节律（如生物钟基因表达等）以及外界周期性影响因素（温度、光照周期、降水等）相互作用的结果而产生的对自身生命活动的一种调节方式。一个完整的年度周期可以分为五个部分：休眠期（冬季）、休眠解除和萌动期（早春）、快速生长期（春末到夏季初期）、生长下降和木质化

期（夏季后期到秋季中期）、落叶并进入休眠期（秋季）。各个时期的转换都是由一定量的外界刺激以及自身的条件决定的，是有一定的顺序并且不能逆转的。不同的生活型（落叶阔叶树、常绿针叶树、半落叶树种等）它们的节律虽然不同，但是其基本原理是一样的。

2.2 物候指标

物候是表示树木生长季节性变化最直观标志。一般有如下几个物候阶段：芽萌动期（春季芽鳞开裂现出幼叶或花序）、展叶期（叶片展开达到一定比例）、开花期（花药或柱头显露）、果实成熟期、叶变色期（秋季叶片开始褪色）以及落叶期（叶片脱落到一定程度）。而这些物候发生的顺序经过多年的观察就可以形成一个物候谱^[2]。另外，在生态学上生长季开始（SOS）与生长季结束（EOS）是两个重要时点，它们之间差值就是生长季长度（LOS），遥感反演得到植被指数的时间序列也可以用来获取区域内平均物候参数。

2.3 年轮指标

年轮是林木木质部生长节律的年度档案，在温带及寒带地区一般由早材（春季形成，细胞壁薄、管腔大）、晚材（夏季至秋季形成，细胞壁厚、管腔小）组成。年轮宽度、早材宽度、晚材宽度、木材密度和稳定碳氧同位素组成等均可反映一年中树干向外生长的时间长度及其速度的变化情况，而高精度微取样可以做到每周甚至每天观察形成层活动状况，从而进一步研究生长节律对于气候变化的快速响应。

3 气候环境因子对生长节律的影响机制

3.1 温度对物候的调控：积温与冷温需求

温度是影响林木物候最主要环境因素。春季物候开始一般由两种相反作用力决定：一方面冷温积累（冬季低温时间积累）打破植物体内自身休眠；另一方面热温积累（春季有效积温）促使植物萌动以及展叶。如果冬天增温使得冷温积累不够充分，在春天就需要更多的热量来满足植物萌动要求，这可能会削弱甚至抵消由于全球气候变化而引起的春季提前现象。“冷温补偿”这一说法已经被许多实验研究以及长期观测结果所证实。而对于秋季物候来说，则主要受到气温降低速度以及日照长短共同作用，较高秋季温度会延缓落叶和生长停止，但是光照强度变化对延缓时间有上限。另外，严重的低温天气（例如晚霜）会对已经萌芽的部位造成伤害，使植物再次萌发或者降低当年生长量，打乱正常发展进程。

3.2 水分胁迫对生长启动与终止的影响

水分有效性对生长节律的影响在干旱和半干旱地区更为显著，在春季，由于土壤水分缺乏而导致根系吸水不足

以及细胞膨压降低，在气温适宜的情况下，形成层活动及芽萌发也会推迟；而在生长季后期，缺水会造成树木大量合成脱落酸（ABA），引起气孔关闭、光合作用下降以及衰老相关基因表达量增加从而加快落叶过程，使生长季缩短；而在丰水年或者灌溉条件下，则因为有足够的水分供应而使得生长季适当延长^[3]。但是需要注意的是，水和热之间对于生长节律的作用往往是相互配合或者相抵触的关系——温暖但干旱环境下比冷湿环境下更不利于生长发育，因此不能仅从一个方面来判断。

3.3 光周期与温度的交互作用

光周期（日长变化）是树木识别季节变化的重要线索，在春分、秋分时日长变化最快，给树木提供了一个很好的“时间表”。但是，光周期每年都是恒定不变，气候变化主要是通过温度改变树木对光周期敏感度从而影响物候。比如，在温暖的年份，一些温带树种可能会降低对光周期反应灵敏度，导致秋季进入休眠推迟；但是光周期仍然有一个“最后期限”，如果过了这个时期，不管多么温暖，生长都会因为基因所决定的原因而停止。所以这就造成了秋季物候对于气候变化的影响大于春季，并且具有地域性特点。

3.4 CO₂施肥效应与节律改变

大气中CO₂浓度上升可以显著提高叶片净光合作用并有利于碳水化合物的形成，进而可能以改变碳氮比的方式影响花芽分化以及贮藏物质的积累。一些研究表明，在较高CO₂浓度下植物开花时间会提早或者花芽数量增多，但是开花时间提早的程度低于仅增加温度所带来的效应。同时由于较高CO₂浓度下叶片光合作用加强可能会使叶片的功能期延长而延迟落叶时间。但是长期处于较高CO₂环境中也有可能出现光合作用下降（适应现象）从而降低施肥效果。总体来说，CO₂对于生长季节长度的影响较小，更多的是通过对碳源供给及水分利用的影响而对物候产生影响，而且这种影响往往被温度所掩盖。

3.5 极端气候事件的干扰

极端气候事件（如春季异常高温、晚霜冻害、夏季热浪、干旱以及秋季暴雨等）对于林木生长节律的影响一般比普通的气候变化要更大。一次极端晚霜可以造成新生幼嫩叶片或者花器被冻死，使树木不得不再次消耗体内储存的非结构性碳水化合物重新长出新叶，从而延迟一年中生长高峰期的到来并且耗费大量的碳库，影响第二年的发芽率。而夏季热浪加上干旱可以在几天之内使树叶失水、叶绿素分解以及光合作用受损，从而使植物停止生长甚至形成“伪年轮”或是年轮缺失^[4]。这些都使得生长节律的年际变化更加剧烈，增加了树木生活史

上的不确定性以及应变能力的要求。

4 综合响应模式与区域分异及不确定性

4.1 生长季延长与缩短的争议

依据北半球大规模物候观测资料,大多数研究发现生长季在过去数十年中每十年增加1到3天,主要是由于春季提前。但是近年来有学者认为,在气候变暖情况下,一些地方生长季增长速率降低甚至开始缩短,这与冬季寒冷不足以提供足够热量、春季高温造成物候饱和以及秋季干旱加剧有关。这些都不符合生长季增长是随着气温升高而线性增长的假设。因此笼统地说“生长季增长”,忽略了不同地区差异性和阶段性变化特点。

4.2 纬度与海拔梯度的差异

不同纬度区域气候变化速度及季节差异引起森林生长节律地带性变化,高纬度地区升温最多,春季物候提前最明显,而秋季物候推迟也十分显著,所以生长季增加最多;中纬度地区夏季高温天气频繁出现,往往造成生长季中间停止发展,抵消首尾两端延长所带来的利益;低纬度热带地区一年之内气温波动较小,生长节律主要由干湿季交替决定,温度变化的影响常常被降水变化所掩盖。而在海拔梯度上,高山林线附近树木一般受到低温影响,在温度方面最为敏感,但是高山地区降水变化以及太阳辐射加强也会起到重要作用。

4.3 适应性与可塑性

林木并不是消极地应对气候变化,它具有一定程度上的表型可塑性和遗传适应能力,在个体层面上,同样一种树可以调整其物候临界温度阈值、减少所需的冷温天数或者改变生长期来缓解气候的影响;而在种群和物种层面上,自然选择以及基因交流可以使控制物候的相关基因(例如FLC、FT、CBF等)频率发生改变而产生进化反应。但是由于树木寿命较长且活动范围较小,它们适应的速度可能赶不上目前所经历的气候变化速度,在

一些极端天气频繁出现的情况下,可塑性资源会被耗尽而导致无法适应环境变化的风险增加,所以分辨出短期的可塑性变化和长期的适应性进化对于预测未来的生长节律的变化是一个很大的挑战。

5 结语

气候环境变化已从多维度、多尺度上改变了区域林木的生长节律。温度上升总体上驱动春季物候提前和秋季物候推迟,但冷温不足、水分限制和极端事件会削弱甚至逆转这一趋势。光周期作为稳定的季节信号,始终调控着响应幅度,而CO₂施肥效应更多起到间接调节作用。林木具备一定的可塑性和适应能力,但其速率可能难以追赶气候变化的节奏,尤其在半干旱区和高寒林线等地带,生长节律的脆弱性更为突出。当前研究仍需在以下方面深化:一是加强不同气候因子交互作用的机理解析,尤其是温度-水分-光周期的非加和效应;二是发展集成地上地下物候的完整节律框架,避免仅以叶片物候替代整株生长节律;三是构建兼顾过程机理与数据驱动的混合模型,降低未来预测的不确定性。这些工作的推进,对于准确评估森林碳汇潜力、指导林业适应对策以及维护生态安全具有重要意义。

参考文献

- [1]王玉辉,周广胜,蒋延玲.气候变化对中国温带典型树种物候的影响及其机制研究进展.生态学报,2022,42(15):6123-6138.
- [2]张雷,刘世荣,孙鹏森.树木年轮对气候变化的响应及形成机制.林业科学,2023,59(4):1-15.
- [3]赵宁,郭建平,周莉.极端气候事件对森林生态系统物候干扰的研究综述.气候变化研究进展,2025,21(1):78-90.
- [4]刘利民,何兴元,陈玮.冷温积累与热温积累对木本植物春季物候的联合调控.植物生态学报,2021,45(10):1055-1068.