

DOI: 10.20103/j.stxb.202309252073

徐培培, 曹轶辰, 周涛, 赵祥. 各种属性森林对干旱胁迫的响应研究进展. 生态学报, 2024, 44(13): 5435-5443.

Xu P P, Cao Y C, Zhou T, Zhao X. Research progress and prospect on the response of forest with different attributes to drought. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5435-5443.

各种属性森林对干旱胁迫的响应研究进展

徐培培^{1,*}, 曹轶辰¹, 周涛², 赵祥²

¹ 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002

² 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘要: 全球气候变化的背景下, 干旱事件的发生频率、强度和持续时间不断增加, 增加了森林生态系统面临的风险, 探讨森林对干旱胁迫响应的规律与特征是生态学领域研究的热点。以干旱的定量表达为切入点, 总结和归纳了评估森林对干旱响应的常见指标、评估方法和应用案例, 特别是梳理了各种属性(如林龄、冠层高度等)的森林对干旱胁迫响应的差异性。基于当前研究进展和问题, 提出在未来研究中, 亟待发展多尺度综合解析各种属性森林对干旱胁迫响应差异的驱动机制研究; 各种属性森林生态系统稳态转换临界点的探测; 森林对干旱的响应规律在森林管理和模型优化的实践应用。

关键词: 森林; 干旱; 森林属性; 气候变化

Research progress and prospect on the response of forest with different attributes to drought

XU Peipei^{1,*}, CAO Yichen¹, ZHOU Tao², ZHAO Xiang²

¹ School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China

² Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Global climate change leads to gradual increases in the frequency, intensity, and duration of extreme drought events, which reduces the resilience of forest ecosystems. It is urgent to explore and reveal the characteristics of forest responses to drought. Taking the quantification of drought as a starting point, this study summarizes common indicators, evaluation methods and application cases for understanding forest responses to drought. It also examines the impacts of inherent attributes (e.g. stand age and canopy height) on forest responses to drought. Based on the research progress, it is urgent to develop multi-scale comprehensive analysis to understand the driving mechanisms why the differences in attributes could lead to diverse forest responses to drought, deepen the research of detecting regime shift of forest ecosystem with different attributes and its tipping point, and develop the application of forest management practices and model optimization.

Key Words: forest; drought; forest attributes; climate change

森林是陆地生态系统的重要组成部分, 也是连接自然生态系统物质与能量循环的重要载体^[1-3]。然而, 气候变化造成全球范围内极端干旱事件的频率、强度和持续时间呈现增加的趋势, 对森林的健康和稳定产生了显著的影响^[4]。深入研究森林对干旱的响应规律并探索潜在的人为干预途径, 对于理解生态系统对干旱的适应能力、制定管理策略以及评估生态系统稳定性和可持续性至关重要^[5-7]。

基金项目: 国家自然科学基金(42001348); 安徽省重点研究与开发计划项目(2022107020028)

收稿日期: 2023-09-25; **网络出版日期:** 2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xupei@ahnu.edu.cn

准确评估当前及预测未来气候变化情景下森林生态系统的过程必须基于森林对干旱胁迫的响应的深入理解,充分认识气候因素与森林属性因素在动态变化过程中的作用^[8]。森林对干旱胁迫的响应规律不仅受到外界气候因子(如温度、降水)的控制^[9],还依赖于林龄、冠层高度和胸径等内在属性因子^[10]。各种属性森林的结构和功能存在明显差异,低林龄、矮冠层高度和低蓄积量森林具有较高的碳汇潜力,而高林龄、高冠层高度和高蓄积量森林则具有更高碳汇量和碳储量^[4]。因此,干旱对森林结构和功能的影响取决于哪些属性的森林更容易受到影响^[11-13]。低林龄、矮冠层森林的死亡率更高可能会改变森林碳汇潜力,而高林龄、高冠层森林的高死亡率则可能会造成更大的碳汇和生态系统功能损失^[12, 14-15]。这些属性因子易受人类活动(如植树造林与森林砍伐)的影响,揭示其对森林干旱响应的影响,是人类寻求对应全球变化影响的可能途径之一^[16]。

如何有效管理森林,以用做缓解气候变化的最佳森林管理方式正受到学术界的激烈争辩。一种观点认为,应该长期保护森林,以利于森林所固定的大气碳能够长久保持^[17]。另一种观点则认为,随着林龄等属性的增长,森林的光合能力有所下降,碳汇作用减弱,最佳的管理方式是定期的人为砍伐和重新造林以保持森林强的碳吸收能力^[18]。从经济效益的角度来看,随着林龄、冠层高度和蓄积量的增加,森林可提供的材积越大,经济效益越高。然而,未来全球范围内干旱发生的频率和持续时间都会增加,也就意味未来各种属性森林面临的死亡与退化风险存在差异。对于管理者来说,如何充分发挥森林的生态和经济价值,需要在决策中综合考虑林龄等属性变化的收益和风险^[19]。因此,深入理解森林对干旱胁迫的响应规律,准确揭示哪些属性森林对干旱更加敏感,提高森林对气候变化的适应能力,是生态学领域研究的重点和难点,也是森林生态系统稳态转换临界点研究和适应性管理研究的关键问题^[20-21]。

从干旱的量化入手,回顾过去几十年来森林对干旱响应的研究历程,重点讨论干旱对森林功能、结构和植被指数等方面的影响。总结气候因素和内在属性因素与森林干旱响应的关系,以期气候变化背景下森林生态系统的保护和管理提供科学依据,为构建可持续和适应性强的森林生态系统提供理论指导。

1 干旱的定量化

干旱的时空格局特征是分析评估干旱影响的基础,需要具体的干旱指数来定量表达^[21-22]。目前正在使用的干旱指数众多^[21],较为常用的干旱指数包括帕默尔干旱指数(palmer drought severity Index, PDSI)、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)、标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)、水分亏缺指数(water deficit index, WDI)、相对湿度指数(relative moisture index, MI)和饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)等^[23-26]。这些干旱指数是通过通过对气象和环境要素进行综合分析和计算,从而评估某区域在一定时间内的干旱程度和变化情况(表1)。每种指数都有各自的优缺点且适用于不同的场景和需求,在使用时需要根据实际情况选择合适的指数进行应用和分析^[21]。

2 森林对干旱的响应

2.1 森林功能参数对干旱的响应

初级生产力、生物量和树木年轮等相关指标可以反映生态系统生产力,是体现森林功能重要的参数,被广泛应用于森林对干旱响应的研究中^[30-33]。大部分站点试验的结果表明干旱期间的生态系统生产力会有所降低^[2, 31],其减少的程度取决于植物对有限的水分利用的生理反应,例如干旱引发植物酶活性的降低以及为了减少水分过分流失关闭气孔等^[32]。生态系统生产力减少的程度还取决于植被的结构变化,干旱会造成植被结构发生变化引起生产力下降,例如叶片衰老、水分亏损而导致叶片萎缩脱落,叶面积减少等^[32-33]。

特定时间点的生物量就是指在此时间点之前生态系统积累下来的物质总量。当外界环境条件适宜时,会加速森林生物量积累的过程,相反则会被限制^[34-38]。树木年轮表征的是树干径向生物量的积累^[34]。干旱期间光合作用产生的干物质会优先分配于根部以吸收更多水分^[35-36],树干径向生长减弱,导致树木年轮宽度变

窄或缺失^[37-38]。Gao 等人利用自然实验的方法分析了干旱的强度、频率、发生时间和持续时间对树轮生长的影响。结果表明高强度的干旱产生的“遗留效应”(legacy effect)以及高频率、长持续时间的干旱产生的“累积效应”(cumulative effect)会增加树木受损的风险^[30]。

表 1 常用干旱指数的定义及干旱等级划分^[27-29]

Table 1 Definition of drought indices and scale of drought severity based on their values

序号 No.	干旱指数 Drought index	定义 Definition	干旱等级 Grades of drought	数值范围 Range of values			
1	帕默尔干旱指数 (PDSI)	基于土壤水分平衡原理,考虑降水量、蒸散量、径流量和土壤有效储水量等要素	无旱	(-1, +∞)			
			轻旱	(-2, -1]			
			中旱	(-3, -2]			
			重旱	(-4, -3]			
			特旱	(-∞, -4]			
2	标准化降水指数 (SPI)	假设某时间段降水量服从 Γ 概率分布,经过正态标准化处理后的指数	无旱	(-0.5, +∞)			
			轻旱	(-1.0, -0.5]			
			中旱	(-1.5, -1.0]			
			重旱	(-2.0, -1.5]			
			特旱	(-∞, -2]			
3	标准化降水蒸散指数(SPEI)	假设某时间段降水量与潜在蒸散量之差服从 log-logistic 概率分布,经过正态标准化处理后的指数。	无旱	同 SPI			
			轻旱				
			中旱				
			重旱				
			特旱				
4	相对湿润度指数 (MI)	某时段的降水量与同期潜在蒸散量之差除以同期潜在蒸散量的值。	无旱	(-0.4, +∞)			
			轻旱	(-0.65, -0.4]			
			中旱	(-0.8, -0.65]			
			重旱	(-0.95, -0.80]			
			特旱	(-∞, -0.95]			
5	水分亏缺指数 (WDI)	结合地表和空气之间的温差与植被指数而建立的干旱监测指标,单位用百分率(%)表示。	无旱	(-∞, 15)			
			轻旱	(15, 30]			
			中旱	(30, 45]			
			重旱	(45, 65]			
			特旱	(65, +∞)			
6	饱和水汽压差 (VPD)	指在一定温度下空气中饱和水汽压与实际水汽压之间的差值。	湿润区	春季	夏季	秋季	冬季
			半湿润区	0.50	0.66	0.49	0.28
			半干旱区	0.63	0.77	0.47	0.24
			干旱区	0.61	0.82	0.45	0.21
			干旱区	0.93	1.53	0.66	0.19

2.2 森林结构参数对干旱的响应

健康稳定的森林生态系统具有一定的自我调节能力,但是超越森林自我调节极限的扰动(如极端干旱等)会造成森林的死亡和退化^[37,39]。森林死亡与退化相关的参数可以反映干旱对森林的影响程度,常用指标有死亡率和林木覆盖率。这类指标主要是从森林树木死亡和群落演替的角度,评估森林结构特征对干旱的响应^[4]。

干旱会诱导植被木质部形成栓塞导致水力失效,是否会造成树木死亡依赖于其水势是否低于其死亡阈值^[40-41]。死亡率是指死亡树木个体数在树木种群数量中的比例,是森林对干旱响应研究中的常用指标之一^[26, 42]。气候变化造成长期变干的趋势使森林生态系统的稳定性变差,森林中死亡的树木难以恢复,进而向其他生态系统演替,在此过程中生态系统的乔木数量会逐渐减少^[4, 8, 43]。林木覆盖率(tree cover)是量化生态

系统演替进程的重要指标之一。Van Nes 等人模拟了不同降水量下热带地区的林木覆盖率,发现降水的减少会使得林木覆盖率降低,驱动林地生态系统向非林地生态系统(如稀树草原或草原)演替^[44]。气候变化使得全球范围水热条件空间分布发生变化,水热条件变差区域的森林逐渐退化,而水热条件变好(如部分高纬度地区)的区域生态系统则开始向森林生态系统演替,造成全球植被分布格局的改变^[4]。

2.3 遥感植被指数对于干旱的响应

基于遥感观测的植被指数可以较好地反映地表绿色植被的生长状况^[15,45-46],被广泛应用于大尺度的干旱监测研究^[45,47]。常用的植被指数有归一化差值植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、归一化湿度指数(NDMI)和归一化多波段干旱指数(normalized multi-band drought index, NMDI)等^[45,48-49]。Huang 等人利用 NDVI 评估了 2002 年美国西南部极端干旱对当地森林生态系统的影响,结果表明干旱的强度超过森林的忍耐极限(临界点)时,理论上会造成森林树木死亡,对应的 NDVI 低于正常状态下均值 1.22 个标准差^[39]。然而,植被指数仅能反映植被冠层光谱响应特征,其本身并没有明确的生态学意义。Assal 等人通过构建植被指数与森林参数的关系以揭示光谱变化所蕴含的生态学意义,进而分析植被指数的时空变化及其与干旱之间的联系^[45]。Wu 等人结合遥感观测和地面调查数据发现,极端干旱会导致植被指数残差时间序列自相关系数升高和树木死亡率增加,且两者存在稳健的非线性关系^[50]。这些研究为结合多源、多尺度数据准确评估和预测干旱的影响提供了新的思路(图 1)。

综上所述,用以评估森林对于干旱响应的指标很多,这些响应指标各具特色,既具有明显的优点也存在不足。野外实测、控制实验和模型估算是获取森林参数的常用方法。基于野外实测和控制实验获得的数据精度可靠,且有利于揭示森林对于干旱响应的机理过程^[51-53]。然而,这些手段易受地域的限制,通常只能在小尺度上进行,大范围内的测量与实验实施难度较大。模型可以反演不同时间和空间尺度上的森林结构功能参数,但是估算结果的不确定性较大^[54-55]。遥感观测突破了数据获取受时间和地域等方面的限制,可以保证观测数据在时间和空间上的连续性。然而,植被指数仅能反映森林的光谱响应特征与变化,对于引起光谱变化的森林结构功能改变状况是不明确的。将植被指数与森林结构功能参数两者结合使用是目前研究区域尺度上森林对气候变化响应的研究前沿之一^[49-50]。

2.4 森林对于干旱胁迫响应的定量表达

森林对于干旱胁迫的响应可通过抵抗力、恢复和恢复力三种指标来量化^[56-57]。抵抗力是指森林在干旱期间能够保持正常功能和生长的能力。恢复是指干旱期结束后森林从受损状态恢复到正常状态的能力。恢复力是指森林受到干旱的影响后,通过适应和调整能够保持功能和结构稳定的能力。抵抗力高、恢复快、恢复力高的森林能够更好适应干旱环境,减少干旱带来的影响。这些指标可用干旱前、中、后期的森林结构或功能参数(如植被指数、树轮宽度等)来计算以量化干旱对森林的影响程度(图 2)。

3 属性对森林干旱响应的影响

森林对于干旱胁迫的响应不仅受气候与环境条件等外在因素的影响,也受物种组成、群落结构和林龄等自身属性因素控制^[58-59]。不同树种的栓塞抗性具有差异性,其水力性状对森林干旱的响应存在差异^[50, 60-62],且这种差异可能存在不确定性。一些研究认为,常绿树种叶片和木材更密,木质部栓塞抗性更大,负水势更

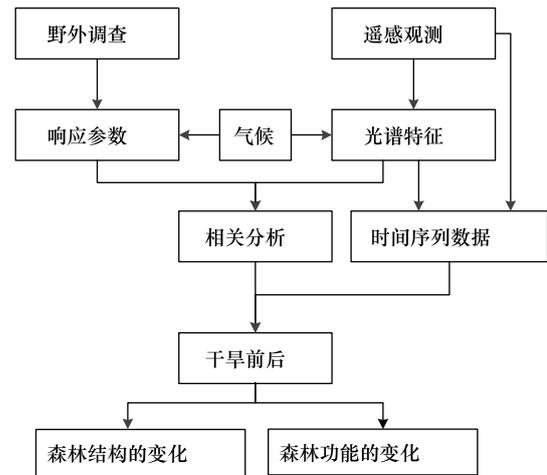


图 1 遥感观测和地面实测结合评估干旱对森林的影响

Fig.1 Combining remote sensing observations and field measurement to assess the impact of drought on forests

大,饱和含水量更低。在较低水势条件下能继续吸收土壤水分,对干旱的抵抗力强于落叶树种^[60-61]。另一些结果认为,常绿树种需要更多的水分维持叶片生长,加剧了干旱的影响,对干旱的抵抗力弱于落叶树种^[50, 62]。森林的物种组成越丰富、群落结构越复杂,生态系统越稳定,其对干旱的抵抗能力越强^[63-64]。林龄及其相关的冠层高度、胸径、林分密度等因素不仅会影响森林对水分的汲取和消耗能力^[16],也可能会影响树木的水分传输效率和栓塞抗性,这些因素增加了森林对干旱响应研究中的不确定性。

早期的研究结果存在较大的争议,一部分研究认为高冠层、高林龄、高胸径和高蓄积量的森林生长对水分的需求更高,对干旱的抵抗力更弱^[11, 65]。另一部分研究则认为矮冠层、低林龄、低胸径和低蓄积量的森林对干旱的抵抗力更弱,因为这些森林树木的根系较浅,汲取土壤水的能力较弱^[66-69]。这些结果主要是基于站点尺度上的观测和控制实验结果,这些结果可以准确地揭示森林对干旱胁迫响应的过程与机制,但是受站点特异性以及样本数量和代表性的影响较大,很难用于区域尺度上的规律预测,且站点尺度上存在的争议性结果在区域尺度上的表现以及造成争议性结果的潜在原因都是不明确的。从已有文献中收集了全球范围内 53 次干旱事件,分析这些事件中各种属性森林对干旱响应的差异(图 3)。结果发现 43 次(81%)干旱事件中,高大的森林树木对干旱的抵抗力更弱;7 次(13%)干旱事件中,矮小的森林树木的干旱抵抗力更弱;3 起事件中(6%),两者的干旱抵抗力相近。因此,从全球范围来看高大的森林树木对干旱的抵抗力更弱,在干旱中更容易达到死亡阈值,这也意味着高林龄、高冠层的森林生态系统可能更容易达到稳态转换的临界点。

已有研究认为高大的森林树木对干旱抵抗力更弱的潜在原因主要包括以下三点^[55, 70-73]:第一,林龄、冠层高度等属性不仅是影响森林水分收支平衡的主要因素,也是影响森林系统生产力的重要因素^[55]。高大的树木从根部到冠层的水分传输路径更长,蒸腾作用产生的拉力更大,需要更高的蒸腾速率和水分需求。干旱会造成蒸腾速率的降低,拉力不足以将水分传输到冠层,影响树木生长^[70-71]。高大树木的发达根系在干旱中

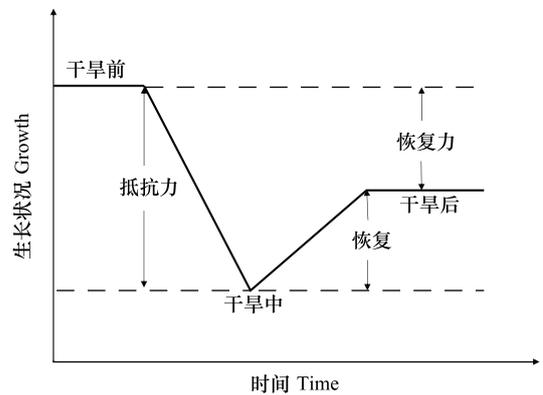


图 2 森林对干旱响应的量化指标定义与计算方法

Fig.2 Definition and calculation of quantitative indicators of forest response to drought

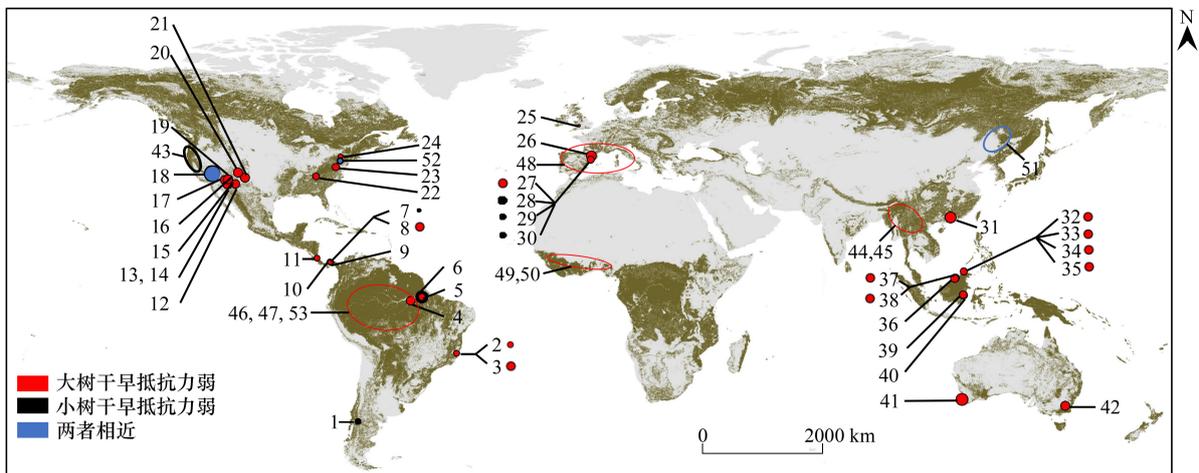


图 3 已有文献中全球范围内各种属性的森林对干旱响应的差异性

Fig.3 Diverse responses of different structured forest to drought worldwide from previous studies

图中深绿色表示森林覆盖地区,数字表示干旱实例的编号

更容易吸收带有空气的水,在木质部中形成气泡造成气穴栓塞,导致树木死亡。森林的系统生产力与林龄等属性密切相关,过熟林的系统生产力低于中龄林和成熟林^[55]。高大树木光合作用制造的干物质更少,而维持生长生存需消耗的干物质更多,增加了这些树木在干旱中受损和死亡的风险。第二,高大的森林树木对辐射、水分和养分的需求更高,个体之间的物种竞争更强,加剧了干旱的影响^[72]。第三,高强度、高频率和长时间的水分亏缺加剧了干旱对森林树木的影响^[30]。长时间、高频率和高强度的干旱会耗尽深层的土壤水,尽管高大的森林树木的根系更加发达也无法汲取足够的土壤水,更高的水分需求使其在干旱中生长更差、死亡率更高^[47,73]。上述的潜在原因主要是从前人的相关研究中总结和推理得到的,如何量化这些机理过程是森林管理和生态学过程模型优化等研究需要思考的问题。

4 研究趋势与展望

一直以来,森林对干旱胁迫的响应研究都是全球变化研究的热点。近年来,各种属性森林对干旱胁迫响应的差异研究也逐渐起步,在多尺度上的研究深度、广度和应用等方面需要进一步深入和扩展。为更好地理解生态系统对气候变化的适应能力,通过人类管理实现森林生态系统的可持续发展,应对全球变化带来的挑战,仍需针对多尺度综合解析各种属性森林对干旱响应差异的驱动机制,生态系统稳态转换临界点的探测,森林对干旱的响应规律在森林管理和模型优化的实践应用等方向进行研究。

(1) 多尺度综合解析各种属性森林对干旱响应差异的驱动机制。目前不同空间尺度上的研究结果表明高大的树木在干旱中的更加脆弱,然而产生这一现象的机制依然不明确。目前研究常利用小尺度上的控制实验分析树木个体对干旱响应的机理和过程,然后这些机理过程在面对大尺度复杂现实森林生态系统方面有待深入研究。另一方面,时间尺度的选择与森林演替过程有关,目前研究主要关注的是属性因素对森林干旱抵抗力的影响,而干旱结束后各种属性森林恢复轨迹的差异有待进一步深入研究。因此,未来应整合多要素、多过程、多尺度信息,识别和区分不同要素与森林生态系统响应的动态关系,结合控制实验、模型模拟和长时间序列监测,从个体-种群-群落-生态系统四个不同组织尺度上综合评判各种属性森林对干旱响应差异的驱动机制。

(2) 各种属性森林生态系统稳态转换临界点的探测。一直以来,哪些生态系统更容易抵达临界点以及如何识别生态系统濒于临界点是生态学领域重要的科学问题,也是生态系统退化预警与恢复实践的关键问题^[74]。目前研究表明冠层高度、林龄等属性会显著影响森林对干旱胁迫的响应,这是否意味着森林生态系统临界点并非固定值,而是依赖其属性的动态变化,这个问题有待深入研究。因此,未来在森林生态系统稳态转换、树木干旱死亡等临界值相关研究中,应充分考虑属性的影响。

(3) 森林对干旱的响应规律在森林管理和模型优化的实践应用。干旱胁迫会影响森林的生产力^[34],高林龄、高冠层森林的死亡率更高则会造更大的碳汇和生态系统功能损失^[75]。随着林龄、冠层高度和蓄积量的增加,森林可提供的材积越大,经济效益越高。然而,未来全球范围内干旱发生的频率和持续时间都会增加,高冠层、高林龄和高蓄积量的森林将有可能面临更高的死亡与退化风险。对于管理者来说,如何有效管理森林,充分发挥森林的生态和经济价值,这需要在管理决策中多考虑森林属性的差异^[14]。许多生态学过程模型都是基于平衡态假设构建的^[76],这种假设忽视了森林内在属性因素的差异,增加模拟结果的不确定性。利用过程模型评估干旱对森林的影响时,可考虑采用差异化的参数方案以体现内在属性差异,优化模型模拟以得到更准确的结果。

参考文献 (References):

- [1] Case M J, Johnson B G, Bartowitz K J, Hudiburg T W. Forests of the future: climate change impacts and implications for carbon storage in the Pacific Northwest, USA. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118886.
- [2] Nelson J A, Pérez-Priego O, Zhou S, Poyatos R, Zhang Y, Blanken P D, Gimeno T E, Wohlfahrt G, Desai A R, Gioli B, Limousin J M, Bonal D, Paul-Limoges E, Scott R L, Varlagin A, Fuchs K, Montagnani L, Wolf S, Delpierre N, Berveiller D, Gharun M, Marchesini L B, Gianelle

- D, Šigut L, Mammarella I, Siebicke L, Black T A, Knohl A, Hörtnagl L, Magliulo V, Besnard S, Weber U, Carvalhais N, Migliavacca M, Reichstein M, Jung M. Ecosystem transpiration and evaporation: insights from three water flux partitioning methods across FLUXNET sites. *Global Change Biology*, 2020, 26(12): 6916-6930.
- [3] 刘坤, 张慧, 孔令辉, 乔亚军, 胡梦甜. 陆地生态系统碳汇评估方法研究进展. *生态学报*, 2023, 43(10): 4294-4307.
- [4] Allen C D, Breshears D D, McDowell N G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 2015, 6(8): 1-55.
- [5] 李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展. *干旱气象*, 2017, 35(5): 709-723.
- [6] Nolan R H, Gauthey A, Losso A, Medlyn B E, Smith R, Chhajer S S, Fuller K, Song M, Li X E, Beaumont L J, Boer M M, Wright I J, Choat B. Hydraulic failure and tree size linked with canopy die-back in eucalypt forest during extreme drought. *New Phytologist*, 2021, 230(4): 1354-1365.
- [7] Cordeiro A L, Norby R J, Andersen K M, Valverde-Barrantes O, Fuchslueger L, Oblitas E, Hartley I P, Iversen C M, Gonçalves N B, Takeshi B, Lapola D M, Quesada C A. Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. *Plant-Environment Interactions*, 2020, 1(1): 3-16.
- [8] 陈德亮, 秦大河, 效存德, 苏勃. 气候恢复力及其在极端天气气候灾害管理中的应用. *气候变化研究进展*, 2019, 15(2): 167-177.
- [9] 杜晓铮, 赵祥, 王昊宇, 何斌. 陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展. *生态学报*, 2018, 38(23): 8296-8305.
- [10] 赵福年, 王润元, 王莺, 王鹤龄, 张凯, 赵鸿. 干旱过程、时空尺度及干旱指数构建机制的探讨. *灾害学*, 2018, 33(4): 32-39.
- [11] Bennett A C, McDowell N G, Allen C D, Anderson-Teixeira K J. Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants*, 2015, 1: 15139.
- [12] Lindenmayer D B, Laurance W F, Franklin J F. Ecology. Global decline in large old trees. *Science*, 2012, 338(6112): 1305-1306.
- [13] Esteban E J L, Castilho C V, Melgaço K L, Costa F R C. The other side of droughts: wet extremes and topography as buffers of negative drought effects in an Amazonian forest. *New Phytologist*, 2021, 229(4): 1995-2006.
- [14] Bo Y, Li X K, Liu K, Wang S D, Zhang H Y, Gao X J, Zhang X Y. Three decades of gross primary production (GPP) in China: variations, trends, attributions, and prediction inferred from multiple datasets and time series modeling. *Remote Sensing*, 2022, 14(11): 2564.
- [15] Nie J, Deng L, Hao X L, Liu M, He Y. Application of GF-4 satellite in drought remote sensing monitoring: a case study of Southeastern Inner Mongolia. *National Remote Sensing Bulletin*, 2018, 22(3): 400-407.
- [16] Bellassen V, Luysaert S. Carbon sequestration: managing forests in uncertain times. *Nature*, 2014, 506(7487): 153-155.
- [17] Lippke B, Oneil E, Harrison R, Skog K, Gustavsson L, Sathre R. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. *Carbon Management*, 2011, 2(3): 303-333.
- [18] Hudiburg T W, Law B E, Wirth C, Luysaert S. Regional carbon dioxide implications of forest bioenergy production. *Nature Climate Change*, 2011, 1: 419-423.
- [19] Yang J, Tian H Q, Pan S F, Chen G S, Zhang B W, Dangal S. Amazon drought and forest response: largely reduced forest photosynthesis but slightly increased canopy greenness during the extreme drought of 2015/2016. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 1919-1934.
- [20] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Semerci A, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [21] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [22] Alahacoon N, Edirisinghe M. A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 762-799.
- [23] Wei W, Zhang J, Zhou J J, Zhou L, Xie B B, Li C H. Monitoring drought dynamics in China using Optimized Meteorological Drought Index (OMDI) based on remote sensing data sets. *Journal of Environmental Management*, 2021, 292: 112733.
- [24] Alley W M. The palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(7): 1100-1109.
- [25] Spinoni J, Barbosa P, De Jager A, McCormick N, Naumann G, Vogt J V, Magni D, Masante D, Mazzeschi M. A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, 22: 100593.
- [26] Ficklin D L, Maxwell J T, Letsinger S L, Gholizadeh H. A climatic deconstruction of recent drought trends in the United States. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(4): 044009.
- [27] Eslamian S, Ostad-Ali-Askari K, Singh V P, Dalezios N R, Ghane M, Yihdego Y, Matouq M. A review of drought indices. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering*, 2017, 3(4): 48-66.
- [28] 袁瑞瑞, 黄萧霖, 郝璐. 近 40 年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析. *气候与环境研究*, 2021, 26(4): 413-424.
- [29] Rahimzadeh-Bajgiran P, Omasa K, Shimizu Y. Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 68: 1-12.
- [30] Gao S, Liu R S, Zhou T, Fang W, Yi C X, Lu R J, Zhao X, Luo H. Dynamic responses of tree-ring growth to multiple dimensions of drought. *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5380-5390.

- [31] Baldocchi D, Chu H S, Reichstein M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes; a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 520-533.
- [32] Shi H, Tian H Q, Lange S, Yang J, Pan S F, Fu B J, Reyer C P O. Terrestrial biodiversity threatened by increasing global aridity velocity under high-level warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2021, 118(36): e201552118.
- [33] Baudena M, Tuinenburg O A, Ferdinand P A, Staal A. Effects of land-use change in the Amazon on precipitation are likely underestimated. *Global Change Biology*, 2021, 27(21): 5580-5587.
- [34] 贾敏, 朱万泽, 王文志. 树木径向生长主要趋势方法与误差分析. *世界林业研究*, 2017, 30(3): 59-63.
- [35] Sulis M, Couvreur V, Keune J, Cai G C, Trebs I, Junk J, Shrestha P, Simmer C, Kollet S J, Vereecken H, Vanderborght J. Incorporating a root water uptake model based on the hydraulic architecture approach in terrestrial systems simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270: 28-45.
- [36] Pivovarov A L, McDowell N G, Rodrigues T B, Brodrribb T, Cernusak L A, Choat B, Grossiord C, Ishida Y, Jardine K J, Laurance S, Leff R, Li W B, Liddell M, MacKay D S, Pacheco H, Peters J, de J Sampaio Filho I, Souza D C, Wang W Z, Zhang P P, Chambers J. Stability of tropical forest tree carbon-water relations in a rainfall exclusion treatment through shifts in effective water uptake depth. *Global Change Biology*, 2021, 27(24): 6454-6466.
- [37] Kolb T E. A new drought tipping point for conifer mortality. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(3): 031002.
- [38] Martinez-Vilalta J, Anderegg W R L, Sapes G, Sala A N. Greater focus on water pools may improve our ability to understand and anticipate drought-induced mortality in plants. *New Phytologist*, 2019, 223(1): 22-32.
- [39] Huang K C, Yi C X, Wu D H, Zhou T, Zhao X, Blanford W J, Wei S H, Wu H, Ling D, Li Z. Tipping point of a conifer forest ecosystem under severe drought. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024011.
- [40] Cochard H, Pimont F, Ruffault J, Martin-StPaul N. SurEau: a mechanistic model of plant water relations under extreme drought. *Annals of Forest Science*, 2021, 78(2): 55.
- [41] 刘燕, 张凌楠, 刘晓宏, 曾小敏, 贾瑞莹. 干旱胁迫植物个体生理响应及其生态模型预测研究进展. *生态学报*, 2023, 43(24): 10042-10053.
- [42] Stovall A E L, Shugart H, Yang X. Tree height explains mortality risk during an intense drought. *Nature Communications*, 2019, 10: 4385.
- [43] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Zhang Y T, Li S C. Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4095-4106.
- [44] van Nes E H, Staal A, Hantson S, Holmgren M, Pueyo S, Bernardi R E, Flores B M, Xu C, Scheffer M. Fire forbids fifty-fifty forest. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0191027.
- [45] Assal T J, Anderson P J, Sibold J. Spatial and temporal trends of drought effects in a heterogeneous semi-arid forest ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 2016, 365: 137-151.
- [46] Xie Y Y, Wang X J, Jr Silander J A. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(44): 13585-13590.
- [47] Xu P P, Zhou T, Zhao X, Luo H, Gao S, Li Z, Cao L Y. Diverse responses of different structured forest to drought in Southwest China through remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 69: 217-225.
- [48] 黄豪奔, 徐海量, 林涛, 夏国柱. 2001—2020年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2798-2809.
- [49] Castellaneta M, Rita A, Camarero J J, Colangelo M, Ripullone F. Declines in canopy greenness and tree growth are caused by combined climate extremes during drought-induced dieback. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152666.
- [50] Wu D H, German V G, Powers J S, McDowell N G, Becknell J M, Pérez-Aviles D, Medvigy D, Liu Y L, Katul G G, Calvo-Alvarado J C, Calvo-Obando A, Sanchez-Azofeifa A, Xu X T. Reduced ecosystem resilience quantifies fine-scale heterogeneity in tropical forest mortality responses to drought. *Global Change Biology*, 2022, 28(6): 2081-2094.
- [51] Fisher R A, Williams M, Da COSTA A L, Malhi Y, Da COSTA R F, Almeida S, Meir P. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2361-2378.
- [52] Nepstad D C, Tohver I M, Ray D, Moutinho P, Cardinot G. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology*, 2007, 88(9): 2259-2269.
- [53] Reichstein M, Tenhunen J, Rouspard O, Ourcival J M, Rambal S, Miglietta F, Peressotti A, Pecchiari M, Tirone G, Valentini R. Inverse modeling of seasonal drought effects on canopy CO₂/H₂O exchange in three Mediterranean ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D23): 4726.
- [54] Chirici G, Mura M, McInerney D, Py N, Tomppo E O, Waser L T, Travaglini D, McRoberts R E. A meta-analysis and review of the literature on the k-Nearest Neighbors technique for forestry applications that use remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 282-294.
- [55] Zhou T, Shi P J, Jia G S, Dai Y J, Zhao X, Shanguan W, Du L, Wu H, Luo Y Q. Age-dependent forest carbon sink: estimation via inverse modeling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(12): 2473-2492.
- [56] Yi C X, Jackson N. A review of measuring ecosystem resilience to disturbance. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(5): 053008.
- [57] Ovenden T S, Perks M, Clarke T, Mencuccini M, Jump A. Life after recovery: increased resolution of forest resilience assessment sheds new light

- on post-drought compensatory growth and recovery dynamics. *Journal of Ecology*, 2021, 109: 3157-3170.
- [58] Kannenberg S A, Schwalm C R, Anderegg W R L. Ghosts of the past: how drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling. *Ecology Letters*, 2020, 23(5): 891-901.
- [59] Xu P P, Zhou T, Yi C X, Luo H, Zhao X, Fang W, Gao S, Liu X. Impacts of water stress on forest recovery and its interaction with canopy height. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(6): 1257.
- [60] Choat B, Ball M C, Luy J G, Holtum J A M. Hydraulic architecture of deciduous and evergreen dry rainforest tree species from north-eastern Australia. *Trees*, 2005, 19(3): 305-311.
- [61] Chen Y J, Choat B, Sterck F, Maenpue P, Katabuchi M, Zhang S B, Tomlinson K W, Oliveira R S, Zhang Y J, Shen J X, Cao K F, Jansen S. Hydraulic prediction of drought-induced plant dieback and top-kill depends on leaf habit and growth form. *Ecology Letters*, 2021, 24(11): 2350-2363.
- [62] Schwartz N B, Budsock A M, Uriarte M. Fragmentation, forest structure, and topography modulate impacts of drought in a tropical forest landscape. *Ecology*, 2019, 100(6): e02677.
- [63] Ma Q, Su Y J, Niu C Y, Ma Q, Hu T Y, Luo X Z, Tai X N, Qiu T, Zhang Y, Bales R C, Liu L L, Kelly M, Guo Q H. Tree mortality during long-term droughts is lower in structurally complex forest stands. *Nature Communications*, 2023, 14: 7467.
- [64] 李江文, 何邦印, 张晓曦, 回虹燕, 李彩, 韩国栋. 荒漠草原异常降水对不同载畜率植物群落物种组成及多样性的影响. *生态学报*, 2023, 43(15): 6433-6442.
- [65] Giardina F, Konings A G, Kennedy D, Alemohammad S H, Oliveira R S, Uriarte M, Gentine P. Tall Amazonian forests are less sensitive to precipitation variability. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 405-409.
- [66] Giles A L, Rowland L, Bittencourt P R L, Bartholomew D C, Coughlin I, Costa P B, Domingues T, Miatto R C, Barros F V, Ferreira L V, Groenendijk P, Oliveira A A R, da Costa A C L, Meir P, Mencuccini M, Oliveira R S. Small understorey trees have greater capacity than canopy trees to adjust hydraulic traits following prolonged experimental drought in a tropical forest. *Tree Physiology*, 2022, 42(3): 537-556.
- [67] Ma T X, Liang Y, Li Z Y, Liu Z H, Liu B, Wu M M, Lau M K, Fang Y T. Age-related patterns and climatic driving factors of drought-induced forest mortality in Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 332: 109360.
- [68] Furniss T J, Larson A J, Kane V R, Lutz J A. Wildfire and drought moderate the spatial elements of tree mortality. *Ecosphere*, 2020, 11(8): e03214.
- [69] Aleixo I, Norris D, Hemerik L, Barbosa A, Prata E, Costa F, Poorter L. Amazonian rainforest tree mortality driven by climate and functional traits. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 384-388.
- [70] McGregor I R, Helcoski R, Kunert N, Tepley A J, Gonzalez-Akre E B, Herrmann V, Zailaa J, Stovall A E L, Bourg N A, McShea W J, Pederson N, Sack L, Anderson-Teixeira K J. Tree height and leaf drought tolerance traits shape growth responses across droughts in a temperate broadleaf forest. *New Phytologist*, 2021, 231(2): 601-616.
- [71] Olson M E, Soriano D, Rosell J A, Anfodillo T, Donoghue M J, Edwards E J, León-Gómez C, Dawson T, Camarero Martínez J J, Castorena M, Echeverría A, Espinosa C I, Fajardo A, Gazol A, Isnard S, Lima R S, Marcati C R, Méndez-Alonso R. Plant height and hydraulic vulnerability to drought and cold. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(29): 7551-7556.
- [72] 田育红, 刘怡青, 吴秀臣, 颜孟莹, 刘凤花, 栾静雅. 内蒙古东北段森林衰退现状及种群竞争对其生长的影响. *生态学报*, 2022, 42(17): 7222-7233.
- [73] He L, Guo J B, Jiang Q O, Zhang Z Y, Yu S P. How did the Chinese Loess Plateau turn green from 2001 to 2020? An explanation using satellite data. *Catena*, 2022, 214: 106246.
- [74] Ellis E C. Ecology in an anthropogenic biosphere. *Ecological Monographs*, 2015, 85(3): 287-331.
- [75] Jones G M, Keane J J, Gutiérrez R J, Peery M Z. Declining old-forest species as a legacy of large trees lost. *Diversity and Distributions*, 2018, 24(3): 341-351.
- [76] Shifley S R, He H S, Lischke H, Wang W J, Jin W C, Gustafson E J, Thompson J R, Thompson F R, Dijak W D, Yang J. The past and future of modeling forest dynamics: from growth and yield curves to forest landscape models. *Landscape Ecology*, 2017, 32(7): 1307-1325.