

DOI: 10.20103/j.stxb.202211103243

李宗善, 陈维梁, 焦磊, 张钦弟, 李兆林, 王聪, 高光耀, 卫伟, 孙婧雅, 白应飞. 黄土高原健康和衰退刺槐林径向生长对气候的响应. 生态学报, 2024, 44(2): 757-769.

Li Z S, Chen W L, Jiao L, Zhang Q D, Li Z L, Wang C, Gao G Y, Wei W, Sun J Y, Bai Y F. The climate-response pattern of radial growth for the health and decline black locust plantations on the Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 757-769.

## 黄土高原健康和衰退刺槐林径向生长对气候的响应

李宗善<sup>1, 2, \*</sup>, 陈维梁<sup>1</sup>, 焦磊<sup>3</sup>, 张钦弟<sup>4</sup>, 李兆林<sup>1, 2</sup>, 王聪<sup>1, 2</sup>, 高光耀<sup>1, 2</sup>, 卫伟<sup>1, 2</sup>, 孙婧雅<sup>5</sup>, 白应飞<sup>5</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061

3 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

4 山西师范大学 生命科学学院, 太原 030032

5 延安市退耕还林工程管理办公室, 延安 716000

**摘要:** 全球气候变化导致的区域森林生长衰退和死亡普遍发生, 并对森林生态系统结构和组成以及主要生态系统服务功能产生重要影响, 然而相关研究在国内还显偏少。根据黄土高原延安羊圈沟小流域人工刺槐林健康和衰退个体分别构建了刺槐健康和衰退树轮年表, 并对人工刺槐林健康和衰退年表特征及对气候响应敏感性进行了对比分析。结果表明刺槐衰退年表质量较低, 其年表统计参量, 包括平均敏感度、样芯间相关系数、信噪比和样本群体代表系数均要低于刺槐健康年表。刺槐衰退年表在生活史早期(1985—2007年)与生长健康年表的波动趋势相类似, 而在生活史晚期(2008—2016年)与健康年表指数出现生长分离现象, 生长速率明显偏低。年表与气候要素响应分析表明刺槐生长衰退年表对气候要素响应敏感性要低于刺槐生长健康年表, 但是两者均含有干旱胁迫气候信号, 主要体现在与温度呈负相关关系, 与降雨和干旱指数的正相关关系。年表与极端气候年份的时序叠加分析表明, 生长健康和衰退年表对极端干旱年份响应敏感性均较高, 表明极端干旱胁迫条件对刺槐生长健康和衰退个体均有抑制性影响; 生长健康年表对极端湿润年份响应敏感性明显高于衰退年表, 表明刺槐健康个体比衰退个体更有效利用湿润年份有利条件, 而具有较高的生长速率。研究揭示出黄土高原健康和衰退刺槐个体生长趋势变化及对气候响应敏感性均存在明显差异性, 将为气候变化背景下人工刺槐林生长衰退和死亡预测模型建立提供科学依据, 因而对黄土高原人工刺槐林生态恢复和保护及可持续经营具有科学价值。

**关键词:** 树木年轮; 气候响应; 生长衰退; 人工刺槐林; 黄土高原

## The climate-response pattern of radial growth for the health and decline black locust plantations on the Loess Plateau, China

LI Zongshan<sup>1, 2, \*</sup>, CHEN Weiliang<sup>1</sup>, JIAO Lei<sup>3</sup>, ZHANG Qindi<sup>4</sup>, LI Zhaolin<sup>1, 2</sup>, WANG Cong<sup>1, 2</sup>, GAO Guangyao<sup>1, 2</sup>, WEI Wei<sup>1, 2</sup>, SUN Jingya<sup>5</sup>, BAI Yingfei<sup>5</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China

3 School for Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

4 College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030032, China

5 Grain to Green Project Management Office of Yan'an Government, Yan'an 716000, China

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFF130040003, 2022YFF0801802); 国家自然科学基金面上项目(42071125, 41877539)

**收稿日期:** 2022-11-10; **网络出版日期:** 2023-10-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zslst@rcees.ac.cn

**Abstract:** Episodes of forest mortality have been observed worldwide associated with climate change, which has affected forest structure and species composition, as well as the essential ecosystem services and functions. There is increasing body of empirical studies to elucidate the spatiotemporal pattern and inherent driving mechanisms of forest growth decline and tree mortality, but related studies in China have not received much attention. Tree-ring width chronologies of growth health and decline black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations in the Yangjuangou catchment in the central Loess Plateau of China were constructed, and the differences of climatic sensitivity in tree-ring annual data of growth health and decline black locust plantations were analyzed. The results showed that the quality of tree-ring chronology for growth decline black locust was lower than growth health chronology, representing the comparatively lower value of several statistical parameters, including mean inter-series correlation ( $R_{bar}$ ), mean sensitivity (MS), signal-to-noise ratio (SNR), and express population signal (EPS). The growth health and decline chronologies of black locust had similar growth fluctuations in the early stage of lifespan (from 1985 to 2007), but two series had increasingly diverged at the late stage of lifespan (from 2008 to 2016) as tree-ring indices of growth decline trees had progressively fallen. The analysis of climate-growth response indicated the radial growth of growth health and decline black locust trees were both mainly controlled by drought stress, but the climatic sensitivity of growth decline trees was relatively lower and the correlations with different climatic variables (temperature, precipitation and Palmer Drought Severity Index) were also comparatively weaker. Superposed Epoch Analysis (SEA) indicated that ring width variance of growth decline and growth healthy black locust trees were both sensitive to extreme drought years, indicating that extreme drought events could significantly inhibit radial increment for black locust trees with growth decline and healthy status. In contrast, ring width variance of growth health black locust trees was more sensitive to extreme wet years than growth decline trees, indicating that growth health locust trees could gain a higher growth rate than growth decline trees, beneficial from favorable climatic conditions during the humid years. Overall, our results presented the substantial differences on annual growth trends and climatic sensitivities between growth health and decline locust trees, which could benefit the building of modelling approaches to predict forest growth decline and tree mortality of the black locust plantations on the Loess Plateau and provide scientific basis for ecological restoration and sustainable management for regional planted forests in China.

**Key Words:** tree rings; climatic response; growth decline; black locust plantations; the Loess Plateau

全球气候变暖导致的降雨格局空间变化,特别是极端干旱事件频发上升,已导致世界广泛出现森林生长衰退和树木死亡问题,而气候驱动的森林生长衰退和树木死亡现象在气候近代趋于暖干旱化的地区尤为严重<sup>[1-3]</sup>。Choat 等<sup>[4]</sup>发现全球尺度的森林 226 个树种面对干旱胁迫条件下,木质部导水脆弱性安全阈值较窄且具有趋同性特征,这表明世界范围森林树种导水功能在干旱胁迫下均有脆弱性特征,具有同等的森林生长衰退和树木死亡的潜在风险。极端干旱导致的森林生长衰退和树木死亡问题深刻影响着区域森林空间分布和群落结构特征<sup>[5-6]</sup>,并显著削弱各项森林生态系统功能,特别是固碳功能在世界范围森林已出现明显下降趋势<sup>[7-8]</sup>,有研究表明在本世纪末世界热带地区森林由于干旱胁迫可能有碳汇转为碳源,因而探讨气候变化背景下森林生长对于干旱胁迫响应和适应性机制问题已成为国际热点<sup>[9-10]</sup>。

人工刺槐林生长快、存活率高、萌芽力强、根系发达且耐旱性强,在黄土高原广泛种植,是黄土高原最为重要的退耕还林和生态恢复林型,具有重要防风固沙和水土保持功能,对黄土高原自然环境改善和生态系统服务功能提升具有重要意义<sup>[11-12]</sup>。然而由于林木不合理经营方式、刺槐本身耗水量大以及区域气候暖干旱化等因素综合影响条件下,黄土高原北部人工刺槐林出现了大面积森林生长衰退和树木死亡现象,深层土壤含水量严重亏缺,出现持续性土壤干化层,严重影响了黄土高原人工刺槐林的可持续生长<sup>[13-14]</sup>。Feng 等<sup>[15]</sup>构建自然-社会-经济水资源可持续利用的耦合框架,指出在气候变化和人为活动共同影响下,黄土高原现有人工林恢复规模已接近该区域水分承载力上限,因而探讨黄土高原人工林生长对于干旱胁迫响应特征及人工林生

长衰退机制问题成为人们关注话题。树木年轮材料以定年准确、分布范围广、时序时间长等优势成为研究森林生长对气候响应的重要手段之一<sup>[16-17]</sup>, 树轮材料同样也被广泛应用于揭示世界不同地区的森林生长衰退和树木死亡机制问题<sup>[18-19]</sup>。然而, 黄土高原地区树木年轮学研究大多集中在天然林树种的气候响应和气候重建方面<sup>[20-22]</sup>, 而基于人工林树种的树木年轮材料探讨人工林生长衰退和树木死亡问题还未引起人们的普遍关注。

本研究以黄土高原北部地区延安羊圈沟小流域人工刺槐林为研究对象, 在小流域内健康和衰退刺槐林典型分布地段分别获取树木年轮材料并构建树轮年表, 重点研究健康和衰退刺槐生长趋势及其对气候响应特征的差异性特征, 以为科学阐明黄土高原人工刺槐林生长衰退和死亡机制提供科学依据。

## 1 材料与方方法

### 1.1 研究区概况

羊圈沟小流域位于陕北延安宝塔区李渠镇, 属于黄土高原中部地区(图 1), 东经 109°31'—109°71', 北纬 36°42'—36°82'。海拔在 1050—1295m 之间。地貌类型为黄土梁和黄土沟, 沟谷密度为 2.74km/km<sup>2</sup>, 属典型黄土丘陵沟壑区。区域气候为半干旱大陆性季风气候, 年日照时数 2528.8h, 年平均气温 9.4℃, 气温年较差

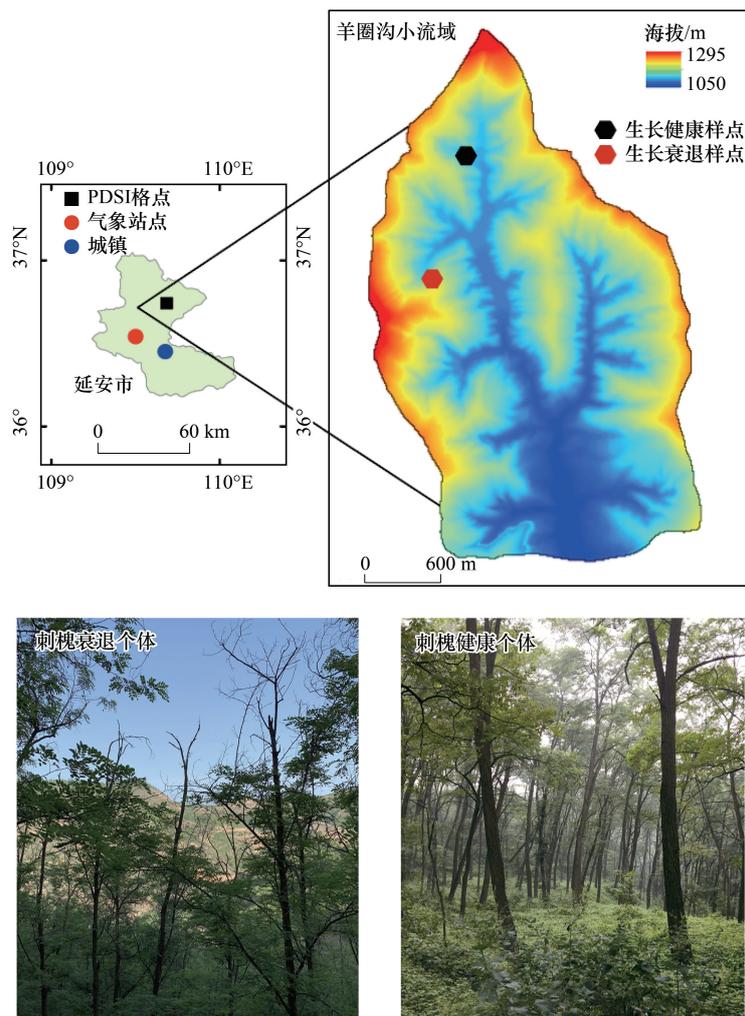


图 1 黄土高原延安羊圈沟小流域刺槐年轮采样点示意图

Fig.1 Location map of tree-ring sampling sites in the Yangjuangou catchment of Yan'an city in the Loess Plateau

PDSI: 帕默尔干旱强度指数 Palmer Drought Severity Index

29.4℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温 2500—3400℃。年平均降水量 535mm, 降水多集中在 7 月—9 月, 占全年降雨量的 79% (图 2)。流域内土壤以黄绵土为主, 抗蚀性差, 水土流失严重<sup>[23]</sup>。流域植被在区划上属于森林草原过渡带。流域内由于人为活动的干扰, 自然植被破坏殆尽, 如今多以人工种植的次生植被为主, 植物种类中人工物种主要有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、小叶杨 (*Populus simonii*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、紫苜蓿 (*Medicago sativa*) 等; 自然物种主要有山杏 (*Armeniaca sibirica*)、荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、大针茅 (*Stipa grandis*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、委陵菜 (*Potentilla chinensis*) 绣线菊 (*Spiraea salicifolia*) 等<sup>[12]</sup>。

羊圈沟小流域人工刺槐林是在 20 世纪 80 年代末至 90 年代的退耕还林工程中在坡耕地上种植的, 初始种植的密度大约为 2500—300 株/hm<sup>2</sup>, 刺槐林种植后未受人为活动显著干扰, 至今刺槐林龄大致在 30—40 年左右。小流域内健康刺槐林一般分布在梁峁阳坡中下部阴面, 局地小生境较为优越, 刺槐个体一般径级较大、树干较高、树冠较大, 树冠无明显枯稍现象, 植株密度大约为 1800 株/hm<sup>2</sup>, 林下较为郁闭, 物种以铁杆蒿、胡枝子、绣线菊、杠柳 (*Periploca sepium*) 和北柴胡 (*Bupleurum chinense*) 等为主; 衰退刺槐林一般分布在梁峁坡中上部阳坡, 具体小生境较为恶劣, 刺槐个体一般径级较小、树干较低、树冠较小且有枯稍现象, 群落内刺槐个体发生较为严重的自疏现象, 植株密度大约为 1500 株/hm<sup>2</sup>, 林下较为开阔, 物种以大针茅、白羊草、铁杆蒿和岩败酱 (*Patrinia rupestris*) 等。

## 1.2 样本采集及年表建立

于羊圈沟小流域健康和衰退刺槐林分布典型地段分别采集树木年轮样芯, 对刺槐取样时, 在树高胸径大约 1.3m 处用 5.15mm 生长锥钻取树芯, 根据采样环境及条件, 样芯的钻取高度和方向有所不同。将取到的样芯放在塑料管内编号封存, 考虑在相同取样强度下在较大空间范围获取更多植株个体年轮样品, 本研究中每株刺槐只采集 1 根年轮样芯, 这种取样策略能最大程度上消除因植株个体差异对构建年表的潜在影响, 最终刺槐衰退和健康植株个体分别采集了 30 根样芯。将样品取回室内后, 按照美国亚利桑那大学年轮实验室公布的常规步骤对年轮样芯进行处理<sup>[24]</sup>, 首先对年轮样品进行自然晾干后用白乳胶对其进行固定, 然后分别经过 120、400、600、800 目干砂纸逐次打磨抛光, 直到树芯表面光滑清晰, 达到树木年轮学分析要求。再用德国 Frank Rinn 公司生产的 LINTAB 轮宽分析仪测量树轮

宽度, 其精度为 0.01mm。为确保测量的准确性, 最后利用 COFECHA<sup>[25]</sup> 程序对交叉定年和测量结果进行校验, 对于那些生长不规则、腐烂和断碎的样芯, 与主序列相关系数达不到 95% 的置信水平的予以剔除, 最终刺槐生长健康和生长衰退个体分别保留 22、20 根样芯 (表 1)。通过 ARSTAN<sup>[26]</sup> 程序利用负指数函数 (或者样条函数) 拟合去掉树木本身遗传因子产生的生长趋势和树木之间干扰竞争产生的释放和抑制等的非气候信号, 达到标准化的目的并对去趋势序列以双重平均法合成标准年轮宽度年表。另外, 为了能体现健康和衰退刺槐逐年生长累计量的差异性, 利用未进行去趋势的年轮数据构建树木材积年表<sup>[27]</sup>, 以便与树木宽度标准年表进行比较。

## 1.3 气象资料与数据分析

气象数据选取距采样点最近的延安李渠镇气象台站 (109.5°E, 36.6°N 海拔为 958.5m 图 1)。延安李渠

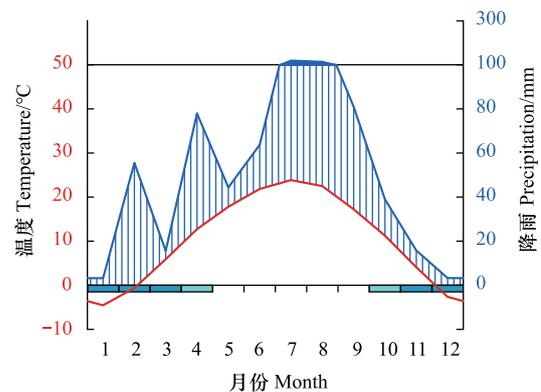


图 2 延安气象站在逐月温度和降雨数据分布图 (1951—2016 年时段)

Fig.2 The climatic diagram of monthly temperature and precipitation data for Yan'an meteorological station during 1951—2016 period

镇气象资料来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),资料时段为 1951—2016 年,包括月均温、最高温、最低温、年降水量 4 个气象要素。考虑到上年气候因子对当年树木生长的影响,选用前一年 6 月至当年 9 月的气象数据与所得的树轮标准和材积年表进行相关分析。本文也选取了距离采样点最近的帕默尔干旱指数(PDSI)数据,数据来自 CRU TS v. 3.22 全球气候数据(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>)<sup>[28]</sup>,精度为 0.5°(约为 25km),PDSI 干旱指数的时段为 1951—2016 年。PDSI 干旱指数是一个基于降水、温度、土壤有效水分等指数来衡量地区干湿程度的指标,被广泛应用于区域旱情时空分布特征、干旱气候评价和干旱面积评估等方面<sup>[28]</sup>。年轮数据与气候要素数据之间的相关分析过程由软件 DendroClim2002 实现<sup>[29]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 健康和衰退刺槐年表统计参量和生长趋势

从树轮年表的统计特征来看(表 1),刺槐生长健康年表的样芯间相关系数( $R_{bar} = 0.487$ )和样本群体表达信号( $EPS = 0.954$ )数值要高于刺槐生长衰退年表( $R_{bar} = 0.325$ ,  $EPS = 0.862$ );健康年表的平均敏感度( $MS = 0.318$ )、标准差( $SD = 0.256$ )和信噪比( $SNR = 20.917$ )数值也要高于衰退年表( $MS = 0.274$ ,  $SD = 0.256$ ,  $SNR = 6.263$ )。另外,健康年表的一阶自相关系数( $AC1$ )数值较高,为 0.378,而衰退年表的  $AC1$  数值较低,仅为 0.068。

表 1 延安羊圈沟健康和衰退刺槐林树木年轮年表统计量

Table 1 Main characteristic parameters of tree-ring chronologies developed from growth normal and decline types of black locust plantations of the Loess Plateau

生长状态 Growth status	样本量 Sample depth	年龄 Age/a	年份 Year	$R_{bar}$	MS	SD	SNR	AC1	EPS
生长健康 Growth health	22	32	1985—2016	0.487	0.318	0.369	20.917	0.378	0.954
生长衰退 Growth decline	20	33	1984—2016	0.325	0.274	0.256	6.263	0.068	0.862

$R_{bar}$ :样芯间相关系数 Mean inter-series correlations; MS:平均敏感度 Mean sensitivity; SD:标准差 Standard deviation; SNR:信噪比 Signal-to-noise ratio; AC1:一阶自相关系数 First-order autocorrelation; EPS:样本群体表达信号 Expressed population signal

从年表指数随时间的变化特征来看(图 3),刺槐生长健康和生长衰退标准宽度年表在生活史早期(1985—2007 年)的波动特征基本一致,两者在生活史晚期(2008—2016 年)出现分离现象,其中生长健康年表指数较高,而生长衰退年表指数较低;刺槐生长健康和衰退材积年表的波动特征体现出与标准宽度年表一致的特征,即在生活史早期(1980—2008 年)两者波动特征基本吻合,在生活史晚期(2009—2016 年)由于衰退材积年表数值较低,造成两者之间出现分离现象。

### 2.2 健康和衰退刺槐年表对气候要素响应特征

年表与气候要素的响应分析结果表明(图 4),刺槐生长健康宽度年表对气候要素相关性较强,对气候响应敏感性较高;刺槐生长衰退宽度年表对气候要素相关性较弱,对气候响应敏感性较低。刺槐生长健康和衰退宽度年表对气候响应具有相似性特征,主要体现出与温度(当年 5 月至 9 月)的负相关关系,与降雨则有正相关关系(上一年 7 月、9 月、11 月,以及当年 2 月、5 月、7 月、9 月),另外宽度年表与 PDSI 干旱指数呈明显正相关关系(从上一年 9 月到当年 9 月份)。刺槐树轮材积年表对气候要素的响应特征大致与宽度年表基本一致,也体现出刺槐生长健康材积年表与气候要素的相关系数较高,对气候响应敏感性较高;而生长衰退材积年表与气候要素的相关系数较低,对气候响应敏感性较低。刺槐生长健康和衰退材积年表宽度对气候响应基本相似,与温度主要成负相关关系,而与降雨和 PDSI 干旱指数呈正相关关系,这也是与年轮宽度年表的响应结果相一致的。

根据刺槐年轮宽度和材积年表与气候要素和 PDSI 指数相关特征,挑选与年表相关性较强的气候要素(当年 5—9 月平均温度、当年 2 月降雨、上一年 7 月降雨和上一年 9 月降雨)进行多元线性回归分析构建气候

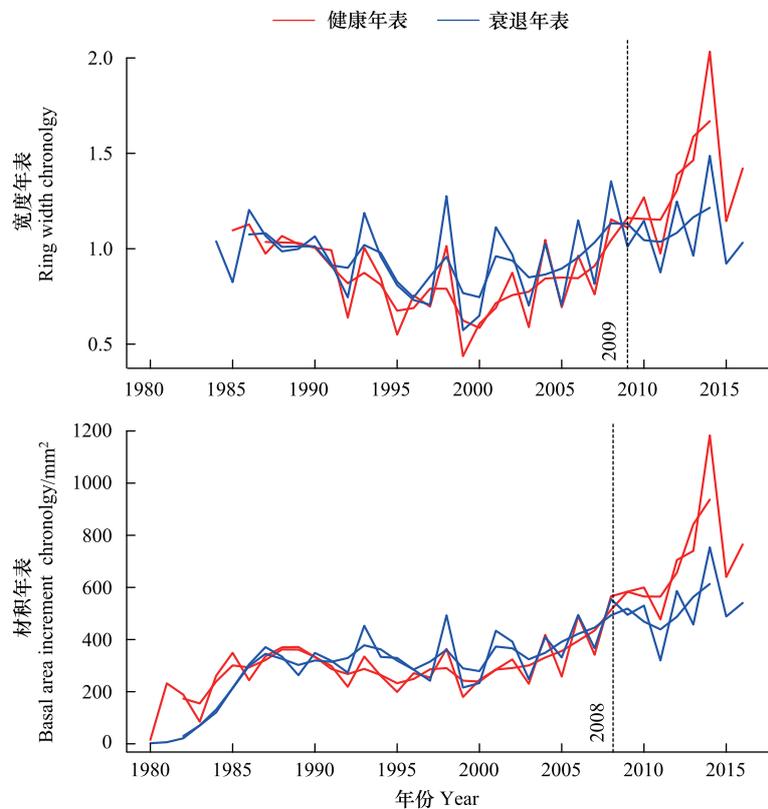


图3 延安羊圈沟健康和衰退刺槐林树木年轮宽度和材积年表序列

Fig.3 Tree-ring width and BAI (Basal Area Increment) chronologies of growth healthy and decline types of black locust plantations of the Loess Plateau

模型,挑选与年表相关性较好的 PDSI 指数(春季、夏季、秋季、冬季 PDSI)进行多元线性回归分析构建 PDSI 模型,以期从整体上看生长健康和生长衰退刺槐年表对气候响应特征的差异性。结果表明(表 2),气候模型结果显示生长健康宽度年表与气候要素的多元线性拟合最好,气候要素可以解释 67.7% 的年轮数据方差,其次是生长健康材积年表,气候要素可以解释 45.6% 的方差;而生长衰退的年轮宽度和材积年表与气候要素多元线性拟合效果较差,气候要素仅可以解释 29.7%—36.9% 的年轮数据方差。PDSI 模型结果显示生长健康宽度年表与 PDSI 指数线性拟合较好,PDSI 指数可以解释 62.4% 的年轮数据方差;而生长衰退年轮宽度年表与 PDSI 指数线性拟合较差,PDSI 指数可以解释 47.4% 的年轮数据方差。另外,PDSI 模型还显示生长健康和衰退材积年表与 PDSI 指数线性拟合均较差,进入模型中的 PDSI 因子均未通过显著性检验(表 2)。

### 2.3 健康和衰退刺槐年表对极端气候年份响应特征

为了揭示刺槐生长健康和衰退年表对极端降雨事件的响应特征是否存在差异性,进一步分析了刺槐年表与极端湿润年份和极端干旱年份的时序叠加分析(SEA)。极端湿润年份(1988年、2003年、2009年、2013年的2014年)的年平均降雨量为734mm,高于多年平均年降雨量(536mm)1.6个标准差(198mm),极端干旱年份(1995年、1997年、1999年、2000年的2004年)的年平均降雨量为368mm,低于多年平均年降雨量(536mm)1.34个标准差(168mm)。

SEA 分析结果表明(图 5),刺槐生长健康和衰退宽度年表在极端干旱年份的年轮指数均有明显下降现象,且健康年表下降幅度要略大于衰退年表,而在干旱发生的后续年份的年轮指数无下降现象;生长健康宽度年表对极端湿润年份响应较为敏感,在极端湿润年份和第二年的年轮指数均明显上升现象,而生长衰退宽度年表对极端湿润年份响应较不敏感,在极端湿润年份的年轮指数无明显上升趋势,而仅在第二年的年轮指数

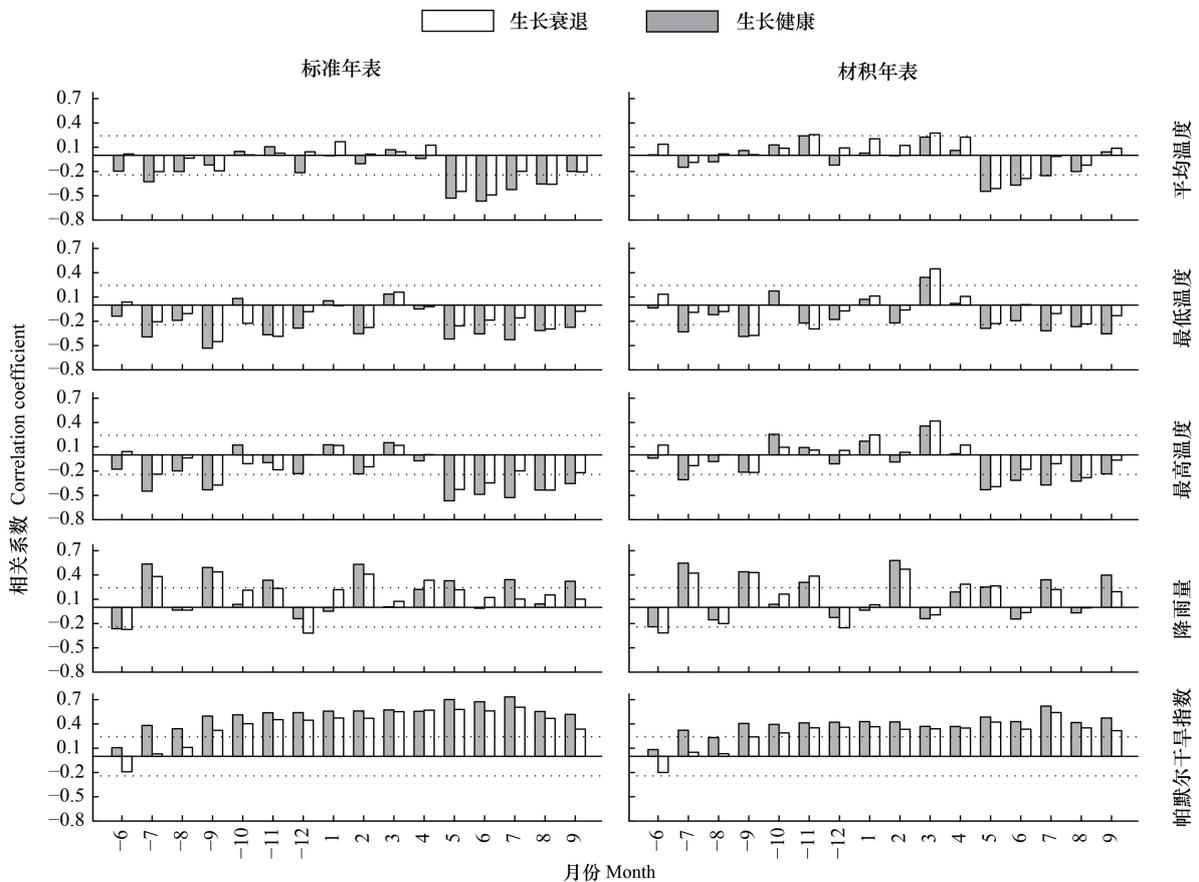


图4 延安羊圈沟健康和衰退刺槐林标准和材积年表与气候要素的响应分析

Fig.4 Correlation analysis of climate data with tree-ring standard and BAI (Basal Area Increment) chronology of black locust plantations in the Loess Plateau of China

虚线表示年表与气候要素相关程度达到95%的可信水平; -6至-12表示去年6至12月份, 1至9表示当年1至9月份

较高。刺槐生长健康和衰退的材积年表的 SEA 分析结果表明(图6), 生长健康和衰退年表在极端干旱年份的年轮指数均有下降趋势, 但是下降幅度未达到显著性水平; 生长健康和衰退材积年表对极端湿润年份均有较为敏感的反应, 在极端湿润年份和第二年年轮指数具有显著上升趋势, 但是生长健康年表的上升幅度要明显高于生长衰退年表。

### 3 讨论

#### 3.1 健康和衰退刺槐年表质量和生长趋势特征对比

基于全球尺度 190 个样点、36 个物种生长死亡和健康植株生长速率对比分析, Cailleret 等<sup>[30]</sup>发现大多数树木在树木死亡前有一段生长衰退时期, 即生长速率较低时期, 并发现树木在生长衰退时期伴随发生木质部水力输导障碍或木质部栓塞, 从而导致生长速率下降和竞争能力下降, 容易引发病虫害、真菌等病原体侵染, 从而进一步加快树木生长衰退和死亡过程<sup>[31-32]</sup>。本研究也表明延安羊圈沟刺槐生长衰退年表在生活史早期(1980—2007年)与生长健康年表的波动趋势基本一致, 而在生活史晚期(2008—2016年)与生长健康年表指数出现生长分离现象, 生长速率明显偏低, 树木生长进入生长衰退阶段。刺槐生长衰退年表的各项统计参量(样芯间相关系数、标准差、信噪比、样本群体表达信号)均要明显低于生长健康年表, 这表明生长衰退年表的质量较差, 组成年表的刺槐个体生长变化一致性上要低于健康年表。

表 2 黄土高原羊圈沟小流域健康和衰退刺槐林标准和材积年表与气候要素的多元线性回归方程

Table 2 Most supported ordinary least-squares regression models of climate on tree-ring standard and BAI (Basal Area Increment) chronologies of growth normal and decline types for black locust plantations in the Yangjuangou Catchment of the Loess Plateau

回归类型 Regression types	年表类型 Chronology types	生长状态 Growth status	线性模型 Linear model	$R^2$	Adjusted $R^2$	$P$ value	AIC
气候模型 Climatic models	宽度年表	生长健康	$Y = -0.186 \times TMP_{5-9}^* + 0.161 \times PRE_2^* + 0.069 \times PRE_{-7} + 0.171 \times PRE_{-9}^* + 4.467$	0.677	0.629	< 0.01	-100.09
	宽度年表	生长衰退	$Y = -0.083 \times TMP_{5-9}^* + 0.011 \times PRE_2^* + 0.131 \times PRE_{-9}^* + 2.506$	0.369	0.302	< 0.01	-105.48
	材积年表	生长健康	$Y = 23.64 \times PRE_2^* + 1.134 \times PRE_{-9}^* + 156.204$	0.456	0.423	< 0.01	382.4
	材积年表	生长衰退	$Y = 16.34 \times PRE_2^* + 248.052$	0.297	0.277	< 0.01	369.17
PDSI 模型 PDSI models	宽度年表	生长健康	$Y = 0.144 \times PDSI_{sum}^* - 0.033 \times PDSI_{aut}^* + 0.050 \times PDSI_{win}^* + 1.135$	0.624	0.585	< 0.01	-97.27
	宽度年表	生长衰退	$Y = 0.117 \times PDSI_{sum}^* - 0.041 \times PDSI_{aut}^* + 1.135$	0.474	0.438	< 0.01	-113.31
	材积年表	生长健康	—	—	—	—	—
	材积年表	生长衰退	—	—	—	—	—

多元线性回归模型是用线性回归方法阐明因变量(Y)被多个自变量( $X_1, X_2, \dots, X_i$ )线性拟合程度和解释方差量; \* 自变量和因变量之间的相关程度达到 95%的可信水平;  $R^2$ : 解释方差量 Explained variance; Adjusted  $R^2$ : 调整自由度的解释方差量 Adjusted explained variance for the degree of freedom; AIC: 线性模型间对比的 AIC 标准 Akaike information criterion for multi-linear model comparison;  $TMP_{5-9}$ : 当年 5—9 月平均温度 Mean temperature from May to September in current season;  $PRE_2$ : 当年 2 月降雨 February precipitation in current season;  $PRE_{-7}$ : 上一年 7 月降雨 July precipitation in previous season;  $PRE_{-9}$ : 上一年 9 月降雨 September precipitation in previous season; PDSI: 帕默尔干旱指数 Palmer Drought Severity Index;  $PDSI_{spr}$ : 春季 PDSI 指数 PDSI value in spring season;  $PDSI_{sum}$ : 夏季 PDSI 指数 PDSI value in summer season;  $PDSI_{aut}$ : 秋季 PDSI 指数 PDSI value in autumn season;  $PDSI_{win}$ : 冬季 PDSI 指数 PDSI value in winter season

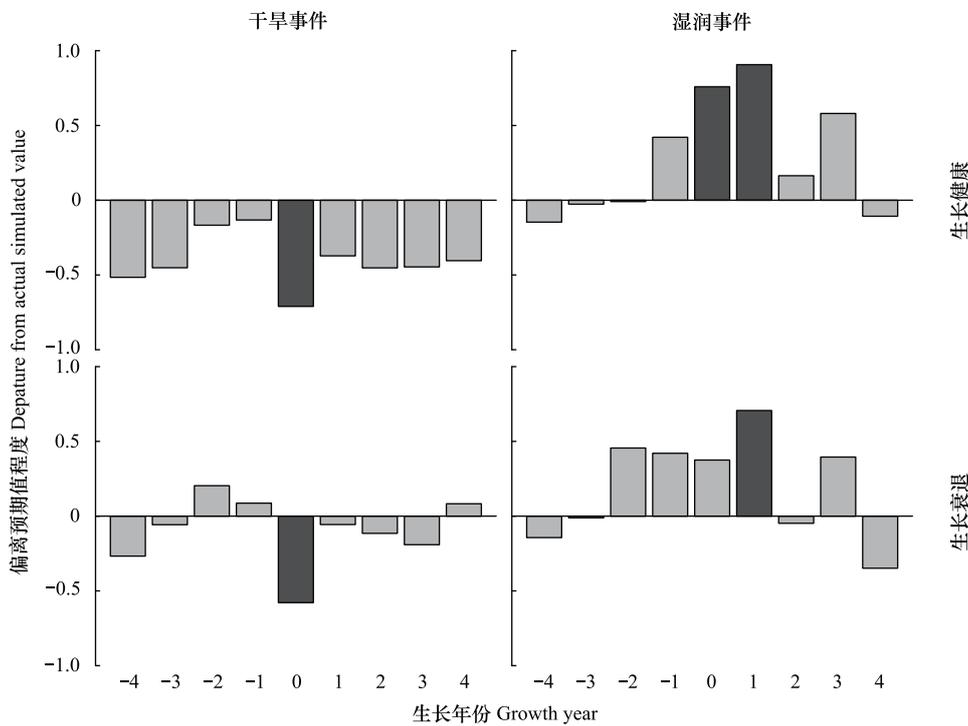


图 5 延安羊圈沟健康和衰退刺槐林标准年表与极端干旱和湿润事件的时序叠加分析

Fig.5 Superposed epoch analysis (SEA) of extreme dry and wet events with tree-ring standard chronology of black locust plantations in the Loess Plateau of China

黑色柱表示差异显著年份,灰色柱表示差异不显著年份;-1至-4表示生长年份前4年,0表示生长年份,1至4表示生长年份后4年

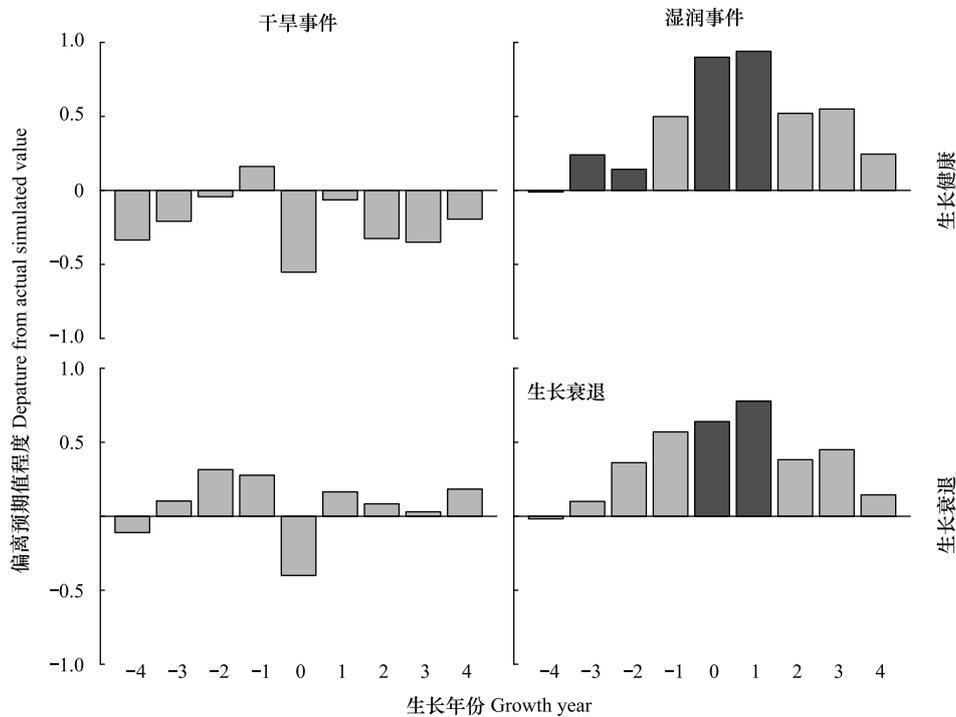


图6 延安羊圈沟健康和衰退刺槐林材积年表与极端干旱和湿润事件的时序叠加分析

Fig.6 Superposed epoch analysis (SEA) of extreme dry and wet events with tree-ring BAI (Basal Area Increment) chronology of black locust plantations in the Loess Plateau of China

黑色柱表示差异显著年份,灰色柱表示差异不显著年份;-1至-4表示生长年份前4年,0表示生长年份,1至4表示生长年份后4年

另外,刺槐生长衰退年表的一阶自相关系数要明显低于生长健康年表,这表明衰退刺槐个体当年生长状态受前一年生长条件影响较小,而健康刺槐个体当年生长状态在一定程度上受前一年生长条件影响较大。

### 3.2 健康和衰退刺槐年表对气候响应特征差异性

年表与气候的响应特征和多元线性回归模型均表明刺槐生长健康年表(宽度和材积)与对应生长衰退年表与气候要素关系特征具有较好的一致性特征,集中表现为生长季节水分胁迫条件对树木生长的限制性影响作用,体现为与生长季(5—9月)温度的负相关关系和与上一年生长季(上一年7月、9月)降雨的正相关关系,另外当年冬季(2月)降雨对树木生长也有明显的促进性影响作用。黄土高原地区已有较多研究证实生长季节水分胁迫是限制该地区树木年轮生长的主要气候因素<sup>[33-34]</sup>,树木年轮材料已被广泛应用于重建黄土高原不同地区的降雨、干旱和径流过去数百年的波动历史<sup>[21-22]</sup>。生长季高温少雨的气候条件会加快土壤蒸发失水量并提高蒸腾气压,使土壤水分不足而不利于树木生长;另外夏季干旱胁迫条件下,木质部形成层分裂速率下降,树木提前从早材生长阶段过渡到晚材生长阶段,导致生长窄轮的出现<sup>[35-36]</sup>。刺槐年表与上一年夏季降雨较强的关系是由于树木生长的滞后效应导致的,上一年夏季充足的降雨使得树木在生长季末期具有良好的土壤水分条件,利于树干和根系储存较多的水分和养分,从而利于第二年春天树木正常生长发育<sup>[37]</sup>;而刺槐年表与冬季2月份降雨的正相关特征也具有生态学意义,冬季降雨在黄土高原一般以降雪形式存在,冬季较厚的积雪覆盖一方面可以形成隔温层,有效保护土壤浅层细根遭受冻害影响<sup>[38]</sup>,另一方面冬季积雪在春季融化会有效改善土壤水分条件,从而促进树木生长<sup>[39-40]</sup>。

年表与气候响应关系表明刺槐生长衰退年表对气候响应敏感度要明显低于健康年表,一方面刺槐生长衰退年表与不同气候要素(温度、降雨和PDSI指数)相关性强度均要低于健康年表,多元线性回归模型表明刺槐衰退年表模型中气候解释年轮变化总方差要明显低于生长健康年表。另一方面,多元线性回归模型分析表明刺槐生长衰退年表对气候响应窗口要明显小于健康年表,譬如生长健康宽度年表与多个气候要素(当年

5—9月温度、当年2月降雨、上一年7月和9月降雨、年际PDSI指数)均有一定相关关系,而生长衰退宽度年表则仅与上一年9月降雨和年际PDSI有相关关系;生长健康材积年表具体体现为与当年2月降雨和上一年9月降雨的相关性,而生长衰退材积年表则仅体现为与当年2月降雨的相关性。刺槐林既喜湿润肥沃的土壤又耐干旱贫瘠,具有较强的适应性和抗逆性<sup>[41-42]</sup>,是黄土高原地区植被恢复和重建的重要人工林型,然而刺槐又是速生深根型树种,往往在生活史早期严重消耗深层土壤水分储备,形成持续型土壤干层<sup>[11-13]</sup>;已有大量研究表明土壤干化是黄土高原北部人工刺槐林生长衰退和死亡的重要诱因,黄土高原延安以北地区刺槐林地土壤水分亏缺尤为严重,在2 m以下能形成深达数米的土壤干层,导致局地小生境恶化和地上植被衰败,使得刺槐林生长迟滞而进入老龄化阶段,最终形成生态低效的刺槐“小老头树”林出现<sup>[12-14]</sup>。本研究中生长衰退刺槐年轮采样点分布在梁峁坡中上部阳坡,水热条件较差,刺槐林径级普遍偏小且有较为明显的枯梢现象,土壤干化已导致刺槐林具有明显生长衰退特征。因而,本文发现的刺槐生长衰退年表对气候响应窗口较窄和敏感度较差的一个重要原因是土壤干化导致树木生长的亚健康状态,已有研究表明生长处于停滞亚健康状态树木个体往往对外界环境响应敏感度也较低<sup>[43-45]</sup>。本研究中生长健康刺槐年轮采样点分布在梁峁坡的中下部阴坡,水热条件较好,局地小生境也较为优越,刺槐林分径级较大,树木林冠无枯梢现象,刺槐生长处于健康生长状态,因而树木年际生长能较好反映出外界气候变化特征,树轮年表对气候响应敏感性也较高。

### 3.3 健康和衰退刺槐年表对极端干旱事件响应差异性

时序叠加分析表明刺槐生长健康和衰退年表与极端降雨事件的响应特征也存在较为明显的差异性特征,具体体现为生长健康年表对极端干旱年份和湿润年份的响应敏感性均要高于生长衰退年表,特别是生长健康年表对极端湿润条件响应最为敏感,在极端湿润年份发生年和次年生长速率均有显著上升,而生长衰退年表对极端湿润气候条件响应不敏感性,在极端湿润年份的生长速率没有明显上升,仅在次年生长速率有所上升。本研究刺槐生长衰退样点局地小生境条件恶化,土壤干层充分发育,土壤干旱化层导致土壤孔隙度下降和板结程度上升,使降雨土壤入渗量显著下降,进一步阻碍了刺槐对土壤水分的正常利用,使得刺槐生长处于更加干旱气候胁迫当中,这应该是刺槐衰退年际生长对极端湿润气候条件响应不敏感的原因之一<sup>[46-47]</sup>。刺槐属于环孔材树种,导管直径较大、导管较长,运输水分效率较快但容易发生木质部空穴化和栓塞问题,使树木水分运输的安全性和有效性均受到威胁<sup>[48]</sup>,已有研究表明刺槐是抗栓塞能力较低的树种,在土壤水势下降后,其木质部导水能力急剧下降,木质部立即发生栓塞<sup>[49]</sup>。本研究中生长衰退刺槐林分在长期的水分胁迫条件下,木质部空穴化和栓塞导致的水力运输障碍问题应较为突出,木质部栓塞有效降低了树木蒸腾耗水能力,是其干旱胁迫环境的一种适应<sup>[4, 50]</sup>,但是木质部栓塞也使得生长衰退刺槐树木无法有效利用湿润年份的有效降雨进行生长发育,从而进一步降低了其对极端干旱气候的适应能力,这应该也是刺槐生长衰退年表对极端降雨事件响应敏感性较低的重要原因。

## 4 结论

本研究在黄土高原延安羊圈沟小流域选取典型人工刺槐林生长健康和衰退样点,分别构建了树轮标准年表和材积年表,研究发现生长健康和衰退刺槐林在年际生长趋势、年表统计特征和气候响应特征上均存在明显的差异性。健康刺槐林年表生长速率较快、年表质量较高,年表对气候响应敏感性也较高,而衰退刺槐林年表生长速率较低、年表质量较低,年表对气候响应敏感性也较低。本研究发现健康和衰退刺槐在生长趋势特征在2008年(林龄大约为30年)开始出现明显分异特征,产生这种分异现象应该是区域干旱气候条件、刺槐自身的树木生理状态以及不合理人工林经营和管理方式共同造成的<sup>[11-12]</sup>。一方面刺槐属于起源于北美亚热带地区的深根性、高耗水、速生树种,其生活史早期较高的生长速率显著消耗土壤深层土壤水分而形成土壤干层,使得树木水分输导出现障碍而生长速率维持较低水平,这也是其对当地干旱气候的一种被迫适应特征<sup>[13, 51]</sup>;另一方面刺槐林初始种植密度过大且缺少管护也是造成衰退的重要原因,当地刺槐林初始种植密度为2500—3000株/hm<sup>2</sup>,有研究表明延安地区刺槐林适宜种植密度约为750—900株/hm<sup>2</sup><sup>[52]</sup>,研究区刺槐林已

出现严重的群落自疏问题,因而目前刺槐植株密度下的植被生产力远远超出当地土壤水分承载能力而造成群落生长衰退。本研究揭示了延安地区生长健康和衰退刺槐林生长分异特征及原因分析,将有助于科学理解黄土高原人工刺槐林生长衰退过程及生态影响机制,也为区域生态低效刺槐林的结构改造和功能提升研究提供科学依据。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Klein T, Hartmann H. Climate change drives tree mortality. *Science*, 2018, 362(6416): 758.
- [ 2 ] Wang W Z, English N B, Grossiord C, Gessler A, Das A J, Stephenson N L, Baisan C H, Allen C D, McDowell N G. Mortality predispositions of conifers across western USA. *New Phytologist*, 2021, 229(2): 831-844.
- [ 3 ] McDowell N G, Allen C D, Anderson-Teixeira K, Aukema B H, Bond-Lamberty B, Chini L, Clark J S, Dietze M, Grossiord C, Hanbury-Brown A, Hurtt G C, Jackson R B, Johnson D J, Kueppers L, Lichstein J W, Ogle K, Poulter B, Pugh T A M, Seidl R, Turner M G, Uriarte M, Walker A P, Xu C G. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 2020, 368(6494): eaaz9463.
- [ 4 ] Choat B, Jansen S, Brodribb T J, Cochard H, Delzon S, Bhaskar R, Bucci S J, Feild T S, Gleason S M, Hacke U G, Jacobsen A L, Lens F, Maherali H, Martínez-Vilalta J, Mayr S, Mencuccini M, Mitchell P J, Nardini A, Pittermann J, Pratt R B, Sperry J S, Westoby M, Wright I J, Zanne A E. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 2012, 491(7426): 752-755.
- [ 5 ] Engelbrecht B M J, Comita L S, Condit R, Kursar T A, Tyree M T, Turner B L, Hubbell S P. Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests. *Nature*, 2007, 447(7140): 80-82.
- [ 6 ] Potkay A, Trugman A T, Wang Y J, Venturas M D, Anderegg W R L, Mattos C R C, Fan Y. Coupled whole-tree optimality and xylem hydraulics explain dynamic biomass partitioning. *New Phytologist*, 2021, 230(6): 2226-2245.
- [ 7 ] Phillips O, Aragão L, Lewis S, Fisher J, Lloyd J, Lopez-Gonzalez G, Malhi Y, Monteagudo A, Peacock J, Quesada C, van der Heijden G V D, Almeida S, Amaral I, Arroyo L, Aymard G, Baker T, Bánki O, Blanc L, Bonal D, Brando P, Chave J, de Oliveira A A D, Cardozo N D, Czimczik C, Feldpausch T, Freitas M A, Gloor E, Higuchi N, Jimenez E, Lloyd G, Meir P, Mendoza C, Morel A, Neill D, Nepstad D, Patiño S, Peñuela M, Prieto A, Rami F, Schwarz M, Silva J, Silveira M, Thomas A S, Steege H, Stropp J, Vasquez R, Zelazowski P, Dávila E A, Andelman S, Andrade A, Chao K, Erwin T, Di Fiore A, Euri H C, Keeling H, Killeen T, Laurance W, Cruz A P, Pitman N, Vargas P N, Rami-Angulo H, Rudas A, Salamão R, Silva N, Terborgh J, Torres - Lezama A. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 2009, 323: 1344-1347.
- [ 8 ] Lewis S L, Brando P M, Phillips O L, van der Heijden G M F, Nepstad D. The 2010 Amazon drought. *Science*, 2011, 331(6017): 554.
- [ 9 ] Venturas M D, Todd H N, Trugman A T, Anderegg W R L. Understanding and predicting forest mortality in the western United States using long-term forest inventory data and modeled hydraulic damage. *New Phytologist*, 2021, 230(5): 1896-1910.
- [ 10 ] McDowell N G, Sapes G, Pivovarov A, Adams H D, Allen C D, Anderegg W R L, Arend M, Breshears D D, Brodribb T, Choat B, Cochard H, De Cáceres M, De Kauwe M G, Grossiord C, Hammond W M, Hartmann H, Hoch G, Kahmen A, Klein T, MacKay D S, Mantova M, Martínez-Vilalta J, Medlyn B E, Mencuccini M, Nardini A, Oliveira R S, Sala A N, Tissue D T, Torres-Ruiz J M, Trowbridge A M, Trugman A T, Wiley E, Xu C G. Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO<sub>2</sub> and vapour pressure deficit. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(5): 294-308.
- [ 11 ] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究. *林业科学*, 2004, 40(1): 84-91.
- [ 12 ] 韦景树, 李宗善, 焦磊, 陈维梁, 伍星, 王晓春, 王帅. 黄土高原羊圈沟小流域人工物种和自然物种径向生长对气候变化的响应差异. *生态学报*, 2018, 38(22): 8040-8050.
- [ 13 ] 郭小平, 朱金兆, 余新晓, 罗晶. 论黄土高原地区低效刺槐林改造问题. *水土保持研究*, 1998, 5(4): 77-82.
- [ 14 ] 王力, 邵明安, 王全九, 贾志宽. 黄土高原子午岭天然林与刺槐人工林地土壤干化状况对比. *西北植物学报*, 2005, 25(7): 1279-1286.
- [ 15 ] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [ 16 ] Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, Kim H, Wang S S, Linderholm H W, Fang K Y, Wu X C, Chen D L. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. *Science*, 2020, 370(6520): 1095-1099.
- [ 17 ] Yang B, Qin C, Bräuning A, Osborn T J, Trouet V, Ljungqvist F C, Esper J, Schneider L, Griebinger J, Büntgen U, Rossi S, Dong G H, Yan M, Ning L, Wang J L, Wang X F, Wang S M, Luterbacher J, Cook E R, Stenseth N C. Long-term decrease in Asian monsoon rainfall and abrupt climate change events over the past 6, 700 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(30): e2102007118.
- [ 18 ] Williams A P, Allen C D, Millar C I, Swetnam T W, Michaelsen J, Still C J, Leavitt S W. Forest responses to increasing aridity and warmth in the

- southwestern United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(50): 21289-21294.
- [19] Liu H Y, Park Williams A, Allen C D, Guo D L, Wu X C, Anenkhonov O A, Liang E Y, Sandanov D V, Yin Y, Qi Z H, Badmaeva N K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [20] Liu Y, Cai Q F, Shi J F, Hughes M K, Kutzbach J E, Liu Z Y, Ni F B, An Z S. Seasonal precipitation in the south-central Helan Mountain region, China, reconstructed from tree-ring width for the past 224 years. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(10): 2403-2412.
- [21] Liu Y, Zhang X J, Song H M, Cai Q F, Li Q, Zhao B Y, Liu H, Mei R C. Tree-ring-width-based PDSI reconstruction for central Inner Mongolia, China over the past 333 years. *Climate Dynamics*, 2017, 48(3): 867-879.
- [22] Cai Q F, Liu Y, Liu H, Ren J L. Reconstruction of drought variability in North China and its association with sea surface temperature in the joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 417: 554-560.
- [23] Jiao L, Lu N, Sun G, Ward E J, Fu B J. Biophysical controls on canopy transpiration in a black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantation on the semi-arid Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, 2016, 9(6): 1068-1081.
- [24] Stokes M A, Smiley T I J. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.
- [25] Grissino-Mayer H. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 2001, 57(2): 205-221.
- [26] Cook E. *Methods of Dendrochronology*. New York: Springer, 1990.
- [27] Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. New York: Academic Press, 1976.
- [28] Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623-642.
- [29] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303-311.
- [30] Cailleret M, Jansen S, Robert E M R, Desoto L, Aakala T, Antos J A, Beikircher B, Bigler C, Bugmann H, Caccianiga M, Čada V, Camarero J J, Cherubini P, Cochard H, Coyea M R, Čufar K, Das A J, Davi H, Delzon S, Dorman M, Gea-Izquierdo G, Gillner S, Haavik L J, Hartmann H, Hereš A-M, Hultine K R, Janda P, Kane J M, Kharuk V I, Kitzberger T, Klein T, Kramer K, Lens F, Levanić T, Linares Calderon J C, Lloret F, Lobo-Do-Vale R, Lombardi F, López Rodríguez R, Mäkinen H, Mayr S, Mészáros I, Metsaranta J M, Minunno F, Oberhuber W, Papadopoulos A, Peltoniemi M, Petritan A M, Rohner B, Sangüesa-Barreda G, Sarris D, Smith J M, Stan A B, Sterck F, Stojanović D B, Suarez M L, Svoboda M, Tognetti R, Torres-Ruiz J M, Trotsiuk V, Villalba R, Vodde F, Westwood A R, Wyckoff P H, Zafirov N, Martínez-Vilalta J. A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology*, 2017, 23(4): 1675-1690.
- [31] 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.
- [32] Anderegg William R L, Tamir K, Megan B, Lawren S, Pellegrini Adam F A, Brendan C, Steven J. Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(18): 5024-5029.
- [33] Mei R C, Song H M, Liu Y, Payomrat P, Cai Q F, Sun C F, Fang C X. Tree-ring width-based precipitation reconstruction in Zhaogaoguan, China since 1805 AD. *Quaternary International*, 2019, 510: 44-51.
- [34] Liu R S, Liu Y, Li Q, Song H M, Li X X, Sun C F, Cai Q F, Song Y. Seasonal Palmer drought severity index reconstruction using tree-ring widths from multiple sites over the central-western Da Hinggan Mountains, China since 1825 AD. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5): 3661-3674.
- [35] Barber V A, Juday G P, Finney B P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 2000, 405(6787): 668-673.
- [36] 王婷, 于丹, 李江风, 马克平. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 23-33.
- [37] Oberhuber W, Stumböck M, Kofler W. Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees-Structure and Function*, 1998, 13(1): 19-27.
- [38] Mäkinen H, Nöjd P, Mielikäinen K. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in southern Finland. *Trees-Structure and Function*, 2001, 15(3): 177-185.
- [39] Vaganov E A, Hughes M K, Kiryanov A V, Schweingruber F H, Silkin P P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 1999, 400(6740): 149-151.
- [40] Auclair A N D, Heilman W E, Brinkman B. Predicting forest dieback in Maine, USA: a simple model based on soil frost and drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(4): 687-702.
- [41] 马玉玺, 杨文治, 韩仕峰, 杨新民. 黄土高原刺槐生长动态研究. *水土保持学报*, 1990, 4(2): 26-32.

- [42] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999(5): 11-14.
- [43] Bigler C, Bugmann H. Predicting the time of tree death using dendrochronological data. *Ecological Applications*, 2004, 14(3): 902-914.
- [44] Camarero J J, Gazol A, Sangüesa-Barreda G, Oliva J, Vicente-Serrano S M. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology*, 2015, 103(1): 44-57.
- [45] Cailleret M, Dakos V, Jansen S, Robert E M R, Aakala T, Amoroso M M, Antos J A, Bigler C, Bugmann H, Caccianaga M, Camarero J J, Cherubini P, Coyea M R, Čufar K, Das A J, Davi H, Gea-Izquierdo G, Gillner S, Haavik L J, Hartmann H, Hereş A M, Hultine K R, Janda P, Kane J M, Kharuk V I, Kitzberger T, Klein T, Levanic T, Linares J C, Lombardi F, Mäkinen H, Mészáros I, Metsaranta J M, Oberhuber W, Papadopoulos A, Petritan A M, Rohner B, Sangüesa-Barreda G, Smith J M, Stan A B, Stojanovic D B, Suarez M L, Svoboda M, Trotsiuk V, Villalba R, Westwood A R, Wyckoff P H, Martínez-Vilalta J. Early-warning signals of individual tree mortality based on annual radial growth. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 9: 1964.
- [46] 李军, 陈兵, 李小芳, 赵玉娟, 次仁央金, 蒋斌, 胡伟, 程积民, 邵明安. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应. *生态学报*, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [47] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
- [48] 李荣, 党维, 蔡靖, 张硕新, 姜在民. 6个耐旱树种木质部结构与栓塞脆弱性的关系. *植物生态学报*, 2016, 40(3): 255-263.
- [49] 张硕新, 申卫军, 张远迎. 六种木本植物木质部栓塞化生理生态效应的研究. *生态学报*, 2000, 20(5): 788-794.
- [50] DeSoto L, Cailleret M, Sterck F, Jansen S, Kramer K, Robert E M R, Aakala T, Amoroso M M, Bigler C, Camarero J J, Čufar K, Gea-Izquierdo G, Gillner S, Haavik L J, Hereş A M, Kane J M, Kharuk V I, Kitzberger T, Klein T, Levanič T, Linares J C, Mäkinen H, Oberhuber W, Papadopoulos A, Rohner B, Sangüesa-Barreda G, Stojanovic D B, Suárez M L, Villalba R, Martínez-Vilalta J. Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. *Nature Communications*, 2020, 11: 545.
- [51] Li G Q, Zhang X Q, Huang J H, Wen Z M, Du S. Afforestation and climatic niche dynamics of black locust (*Robinia pseudoacacia*). *Forest Ecology and Management*, 2018, 407: 184-190.
- [52] 杨文慧, 焦磊, 买尔当·克依木, 李宗善, 高光耀, 王聪, 白应飞, 孙婧雅, 温润泉. 疏伐对黄土丘陵区刺槐林蒸腾的影响. *生态学报*, 2021, 41(12): 4923-4934.