

引用格式: 管增艳, 石松林, 金亚宁, 陈圣宾, 夏中林. 四川峨眉山不同年龄冷杉径向生长对气候变化的响应差异[J]. 山地学报, 2023, 41(1): 56-67.

GUAN Zengyan, SHI Songlin, JIN Yaning, CHEN Shengbin, XIA Zhonglin. Response of radial growth of *Abies fabri* at different ages to climate change in Mount Emei, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(1): 56-67.

## 四川峨眉山不同年龄冷杉径向生长对气候变化的响应差异

管增艳<sup>1a</sup>, 石松林<sup>1a,2\*</sup>, 金亚宁<sup>1a</sup>, 陈圣宾<sup>1b</sup>, 夏中林<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 a. 旅游与城乡规划学院; b. 生态环境学院, 成都 610059; 2. 四川省社会科学重点研究基地(扩展) 国家公园研究中心, 成都 610059; 3. 峨眉山林业管理所 峨眉山森林生态系统国家定位观测研究站, 四川 峨眉山 614201)

**摘要:** 准确评估森林对极端气候事件的生态弹性有助于预测森林对未来气候变化的适应能力。林龄是影响树木生长对气候响应敏感性的重要因素, 目前关于不同林龄树木对极端干旱事件的生态弹性研究有限。本研究以四川峨眉山冷杉(*Abies fabri*)林为对象, 采用树轮生态学方法获取冷杉幼龄林(<60 a)、近熟林(60~80 a)和成熟林(>80 a)的年轮宽度、年轮宽度指数和断面积增量, 分析不同树龄冷杉径向生长对气候变化响应的敏感性及其对3次干旱事件(2007年、2010年和2012年)的生态弹性差异。结果表明:(1)不同年龄冷杉径向生长对气候变化的响应特征存在明显差异, 幼树径向生长与温度、水分和光照因子的相关性最强, 温度升高会抑制幼龄林和近熟林冷杉径向生长, 而对成熟林的生长影响较小。(2)不同年龄冷杉对干旱事件的响应不一致, 抵抗力由大到小依次为幼龄林、近熟林、成熟林, 干旱事件后恢复力由大到小为成熟林、近熟林、幼龄林。(3)各年龄组冷杉的生态弹性均有所增加, 其中成熟林最大。未来气候变化背景下, 峨眉山幼龄冷杉更容易受气候变暖和频发的极端干旱事件的影响而发生生长衰退, 将潜在改变森林动态。本研究可为预测冷杉对未来气候变化的生态适应性及区域森林保护与管理提供科学依据。

**关键词:** 树木年轮; 生态弹性; 极端干旱; 冷杉; 峨眉山

**中图分类号:** K903

**文献标志码:** A

全球气候变化导致极端气候事件发生频率和强度增加<sup>[1-2]</sup>, 引发局地或区域尺度森林生态系统发生衰退<sup>[3-5]</sup>, 进而影响人类社会从森林生态系统获得的供给服务<sup>[6]</sup>。气候变暖引起的频发极端干旱事件, 导致森林生长下降甚至死亡, 造成森林生态系统出现不同程度衰退现象<sup>[7-8]</sup>, 进而通过不同的生物-物理过程影响气候系统<sup>[9]</sup>。森林会通过改变自身的群落组成和结构来响应适应干旱, 表现出一定的生态弹性<sup>[10-11]</sup>。生态弹性是指树木在生长过程

遭受极端事件时所表现出的环境适应性, 可以量化为抵抗力和恢复力<sup>[12]</sup>。准确评估森林对极端气候事件的生态弹性有助于理解和预测森林对未来气候变化的适应能力。

亚高山针叶林是我国西南高山、亚高山地区的主要森林类型, 维持着水源涵养、碳固持、生物多样性保护和气候调节等多种生态系统服务功能, 对保障区域及长江上游地区的生态安全发挥着重要作用<sup>[13]</sup>。近几十年来, 气候变暖背景下我国西南地区

收稿日期(Received date): 2022-10-17; 改回日期(Accepted date): 2023-02-14

基金项目(Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0402)。[Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program(2019QZKK0402)]

作者简介(Biography): 管增艳(1997-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向: 全球变化。[GUAN Zengyan(1997-), female, born in Weifang, Shandong province, M. Sc. candidate, research on global change] E-mail: guanzengyan@stu.cdut.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 石松林(1986-), 男, 四川巴中人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 全球变化。[SHI Songlin(1986-), male, born in Bazhong, Sichuan province, Ph. D., associate professor, research on global change] E-mail: shisonglin17@cdut.edu.cn

在季风前期面临极端干旱事件发生频率和强度上升,致使部分地区森林出现树冠枯梢、生长减弱、死亡风险增加和生产力下降等现象<sup>[14]</sup>。基于树轮生态学的研究表明<sup>[15-16]</sup>,亚高山针叶林生长对气候变化响应较为敏感,气候变暖将促进大部分亚高山地区森林生长,而季风前期(3—5月)的干旱胁迫则会抑制部分树木生长,如冷杉、云南松(*Pinus yunnanensis*)和大果圆柏(*Sabina tibetica*)等<sup>[17-19]</sup>。年龄作为森林群落结构的重要指标,将影响树木生长评估的准确性及其对气候的响应<sup>[20]</sup>,不同年龄树木径向生长对气候变化的响应不一致<sup>[21-22]</sup>,如有研究发现幼树比老龄树有更强的气候敏感性<sup>[20-23]</sup>,也有研究发现树木生长对气候的敏感度随年龄增大而逐渐增强<sup>[24-25]</sup>。此外,有研究揭示了不同树种对极端干旱事件的生态弹性存在差异<sup>[26-27]</sup>,但是有关不同年龄树木对极端干旱事件的生态弹性研究有限<sup>[28-29]</sup>。探究不同年龄树木生长动态及其对气候变化的响应特征对于理解未来全球变化背景下森林动态至关重要。

冷杉作为我国特有树种,是大渡河和青衣江流域亚高山暗针叶林的主要建群种或优势种。四川峨眉山作为冷杉的模式标本产地,在海拔 2800 ~ 3099 m 地带分布着大面积冷杉林,对维持区域生态系统服务具有重要意义。近几十年来,该区域不同海拔冷杉径向生长对气候变化的响应存在明显差异,气候变暖引起的春季干旱胁迫抑制峨眉山山顶附近(海拔 3000 m 左右)的冷杉径向生长,使其出现生长衰退现象<sup>[30]</sup>。除了海拔,林龄也是影响树木生长对气候响应敏感性的重要因素<sup>[31]</sup>。目前针对区域冷杉的相关研究不足。本文以峨眉山万佛顶冷杉林为研究对象,利用树轮生态学的方法评估不同年龄的冷杉林生长动态特征及其对春季干旱的生态弹性差异,为预测冷杉对未来气候变化的生态适应性及区域森林保护与管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地西南部的峨眉山万佛顶附近(图 1),属典型的亚热带湿润性季风气候,具有云雾多、雨量充沛和干湿季分明的气候特点。根据峨眉山气象站(1951—2020 年)气象数据统计,年平均

气温为 3.2 ℃,最暖月 7 月,月平均温度为 15.2 ℃,最冷月 1 月,月平均温度 -9.2 ℃;年均降水量为 1793.8 mm,降水主要集中在 6—9 月,占年总降水量的 70%(图 2)。该区土壤类型主要为山地暗棕壤。植被为由冷杉、金顶杜鹃(*Rhododendron faberi*)和冷箭竹(*Arundinaria faberi*)等组成的亚高山暗针叶林,在野外调查过程中发现,近年来,局部地段出现冷杉衰退甚至死亡的现象(图 1)。

### 1.2 年轮样品采集、处理与年表建立

冷杉树轮样品采集于 2019 年 10 月峨眉山万佛顶附近(29.51°N、103.33°E,海拔 3050 m),设置 3 个典型样地(30 m × 35 m)作为采样点,对样地内所有胸径(1.3 m 处)超过 5 cm 的冷杉植株,各采集 1 或 2 根样芯。在实验室内,按照树木年轮学样品标准处理流程,将树芯固定在木槽上,风干后用不同粗细砂纸打磨至显微镜下木质部细胞清晰可见。采用骨架图法对样本进行交叉定年后,使用树轮宽度测量仪(LINTAB-6, Rinntech, Germany, 精度 0.01 mm)测量每个样芯的树轮宽度。用 COFECHA 程序对测量后的年轮宽度序列进行质量检验和校准<sup>[32]</sup>,去除质量较差的序列,最终保留 139 根样芯。本研究主要关注不同年龄冷杉对气候响应的生态弹性,根据主要树种龄级与龄组划分行业标准<sup>[33]</sup>,将样品分成幼龄林组(<60 a)、近熟林组(60 ~ 80 a)和成熟林组(>80 a),3 个龄组样芯数量分别为 50、45 和 44 根。使用 R 语言的 dplR 包中“ModNegExp”方法对每个年轮宽度序列进行去趋势和标准化处理<sup>[34]</sup>,计算年轮宽度指数,建立不同年龄组冷杉标准年表(Standard Tree-ring Chronology, STD)。此外,利用断面积增量(Basal Area Increment, BAI)指示冷杉树木年生长量:

$$BAI = \pi(R_t^2 - R_{t-1}^2) \quad (1)$$

式中, $R_t$  和  $R_{t-1}$  分别为第  $t$  年和第  $t-1$  年对应的树木半径(cm)。

### 1.3 气象数据获取

本研究采用的气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)峨眉山气象站,包括月平均温度、平均最低温度、平均最高温度、降水量、相对湿度、日照时数和日照百分率(1951—2020 年)。本研究关注冷杉生长衰退是否受极端干旱事件的影响,选用自校准的帕默尔干旱指数(self-calibrating Palmer Drought Severity Index, scPDSI)指示土壤水

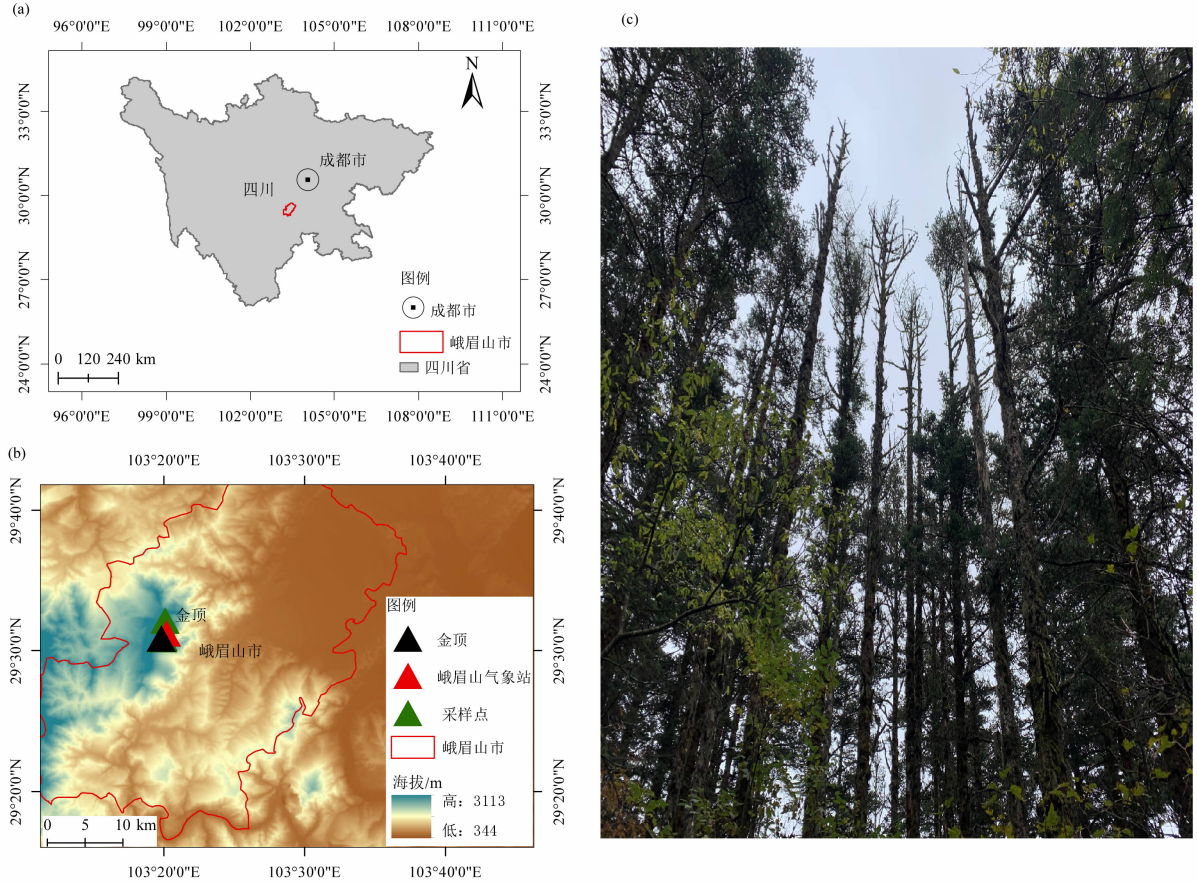


图 1 峨眉山冷杉采样点与气象站位置:(a)峨眉山市位置;(b)采样点;(c)采样点冷杉  
Fig. 1 Location of sampling site of *Abies fabri* and meteorological station in Mount Emei, Sichuan, China:  
(a) location of Emeishan city; (b) location of sampling site; (c) *Abies fabri* at sampling site

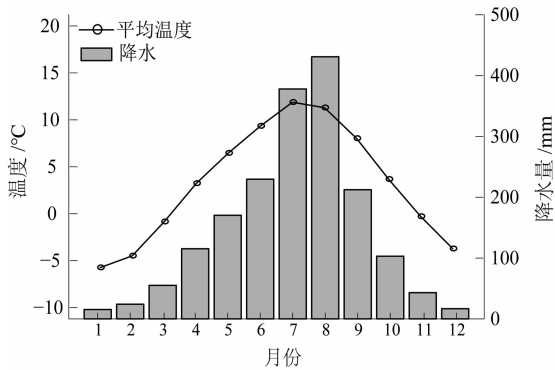


图 2 1951—2020 年峨眉山月平均温度和降水量  
Fig. 2 Monthly temperature and precipitation in Mount Emei from 1951 to 2020

分状况,其数据来源于荷兰皇家气象局服务网 (<http://climexp.knmi.nl/start.cgi>) CRU 网格点数据,选择离采样点最近的栅格点 (103. 25° E、29. 25° N),时间跨度为 1901—2020 年。

#### 1.4 数据分析与处理

本研究采用树木径向生长变化率判定冷杉生长是否发生衰退现象,计算公式<sup>[35]</sup>如下:

$$GC_i = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \quad (2)$$

式中, $GC_i$  为树木在第  $i$  年表现出的前后各 5 年生长变化率(%) (为了减小个别年份树木自身生长异常对生长抑制事件检测的影响,以 5 年为滑动平均计算冷杉径向生长变化率); $M_1$  为树木在第  $i+1$  年至第  $i+6$  年的树轮宽度指数平均值; $M_2$  为树木在第  $i-5$  年至第  $i$  年的树轮宽度指数平均值。生长变化率为负值表示树木生长受到抑制,低于 -25% 表示发生了生长衰退,大于 75% 表示树木生长释放。

根据 Lloret 等<sup>[36]</sup> 的定义,树木的生态弹性是指在生长过程中遭受极端气候事件干扰后能够恢复到干扰前生长状态的能力,主要通过抵抗力 (Resistance,  $R_l$ )、恢复力 (Recovery,  $R_c$ ) 和弹性

(Resilience,  $R_s$ ) 来量化评价。抵抗力指树木在干旱事件中保持生长速度的能力,恢复力指树木从干旱事件遭受的损失中恢复的能力,弹性表示树木干旱事件后生长水平恢复到干旱事件前的能力。计算不同年龄冷杉的抵抗力  $R_t$ 、恢复力  $R_e$  和弹性  $R_s$ ,用以评估其对极端干旱事件的响应:

$$R_t = \frac{D_r}{D_{r1}} \tag{3}$$

$$R_e = \frac{D_{r2}}{D_r} \tag{4}$$

$$R_s = \frac{D_{r2}}{D_{r1}} \tag{5}$$

式中,  $D_r$  为干旱年份生长量 (mm);  $D_{r1}$  和  $D_{r2}$  分别为干旱前、后 4 年的平均生长量 (mm)。  $R_t > 0.75$  表示树木对极端干旱有较高的抵抗力,  $R_e > 1.25$  表示在极端干旱事件发生后有较强的恢复力。

所有数据处理、分析与作图均用 R 语言 (4.0.1) 的 treeclim 包和 dplR 包完成。

2 研究结果

2.1 极端干旱年的界定

研究区气候主要受到西南季风的影响,降水集中在 6—9 月,3—5 月 (春季) 为旱季,将 3—5 月平均 scPDSI 序列上低于平均值减去 1.5 倍标准差所对应的年份确定为极端干旱年<sup>[26]</sup>。由图 3 可知,1950—2020 年期间,该区域呈现出显著变干趋势,确定 2007 年、2010 年以及 2012 年为极端干旱年。

2.2 不同年龄冷杉生长特征

由表 1 可以看出,3 个年龄组冷杉标准年表的样本总体代表性 (Expressed Population Signal, EPS) 分别为 0.951、0.957 和 0.926,均大于 0.85,表明所有年表质量较高,总体代表性强。随林龄增加,年表的平均敏感度和标准差均呈现增加趋势,表明成熟冷杉林对气候的敏感性高于幼林,近熟林和幼龄林

冷杉的信噪比高于成熟林,表明近熟和幼龄冷杉年表承载的气候信息更多。

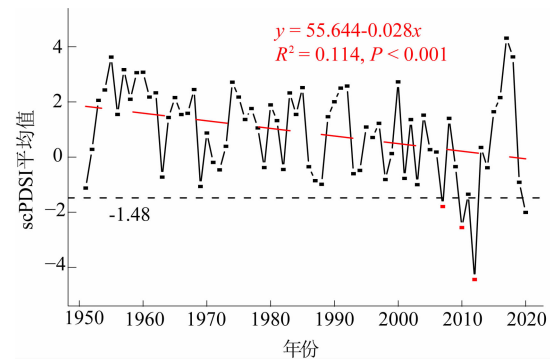


图 3 研究区 3—5 月 scPDSI 序列平均值  
Fig. 3 Mean value of the scPDSI sequence from March to May in the study area

由图 4 可知,不同年龄组冷杉年轮宽度、年轮宽度指数和断面积增量的变化规律基本一致,3 个龄组冷杉树轮宽度指数在 1979—1980 年、1988—1999 年、2007—2008 年和 2010—2012 年间均明显下降。同时,依据冷杉径向生长变化率 (图 5),幼龄冷杉径向生长变化率在 2005—2007 年间小于 -25%,表明幼龄林冷杉在 2005—2013 年间发生了生长衰退;近熟林组冷杉径向生长变化率在 1977 年、1993—1996 年和 2004—2006 年间小于 -25%,最低值 1995 年达 -31.59%,2005 年低至 -29.69%,表明近熟林冷杉在 1977—1982 年、1993—2001 年和 2004—2011 年间发生了生长衰退;成熟林组冷杉径向生长变化率在 1923—1925 年、1975—1978 年和 1994—1997 年间低于 -25%,表明成熟林组在 1923—1930 年、1975—1983 年和 1994—2002 年间发生了生长衰退。

2.3 不同年龄冷杉径向生长与气候因子的关系

由图 6 可知,幼龄冷杉年轮宽度指数与当年 1—5 月平均最高温度和平均温度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ),近熟龄组冷杉与当年 1—6 月及上一年

表 1 不同年龄冷杉树轮宽度标准年表 (STD) 统计特征

Tab. 1 Statistics of standard tree-ring width chronologies (STD) of *Abies fabri* at different ages

树龄组	样芯数量/根	时间序列	平均敏感度	标准差	样芯间平均相关系数	样本总体代表性	信噪比
幼龄林	50	1965—2018 年	0.111	0.187	0.379	0.951	19.514
近熟林	45	1945—2018 年	0.118	0.217	0.353	0.957	22.390
成熟林	44	1918—2018 年	0.144	0.257	0.229	0.926	12.464



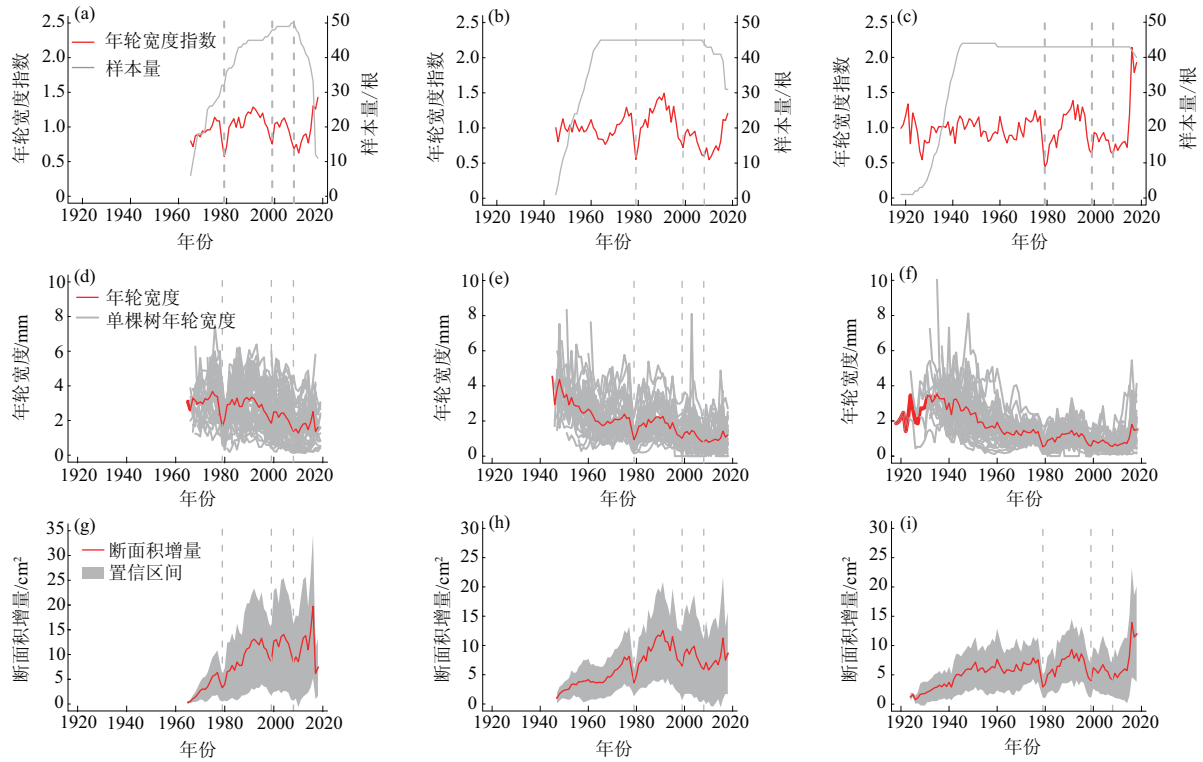


图 4 不同年龄冷杉生长模式: (a) 幼龄林标准年表; (b) 近熟林标准年表; (c) 成熟林标准年表; (d) 幼龄林年轮宽度; (e) 近熟林年轮宽度; (f) 成熟林年轮宽度; (g) 幼龄林断面积增量年表; (h) 近熟林断面积增量年表; (i) 成熟林断面积增量年表

Fig. 4 Growth pattern of *Abies fabri* at different ages: (a) standard chronologies of young forests; (b) standard chronologies of near mature forests; (c) standard chronologies of mature forests; (d) ring width of young forests; (e) ring width of near mature forests; (f) ring width of mature forests; (g) basal area increment chronologies of young forests; (h) basal area increment chronologies of near mature forests; (i) basal area increment chronologies of mature forests

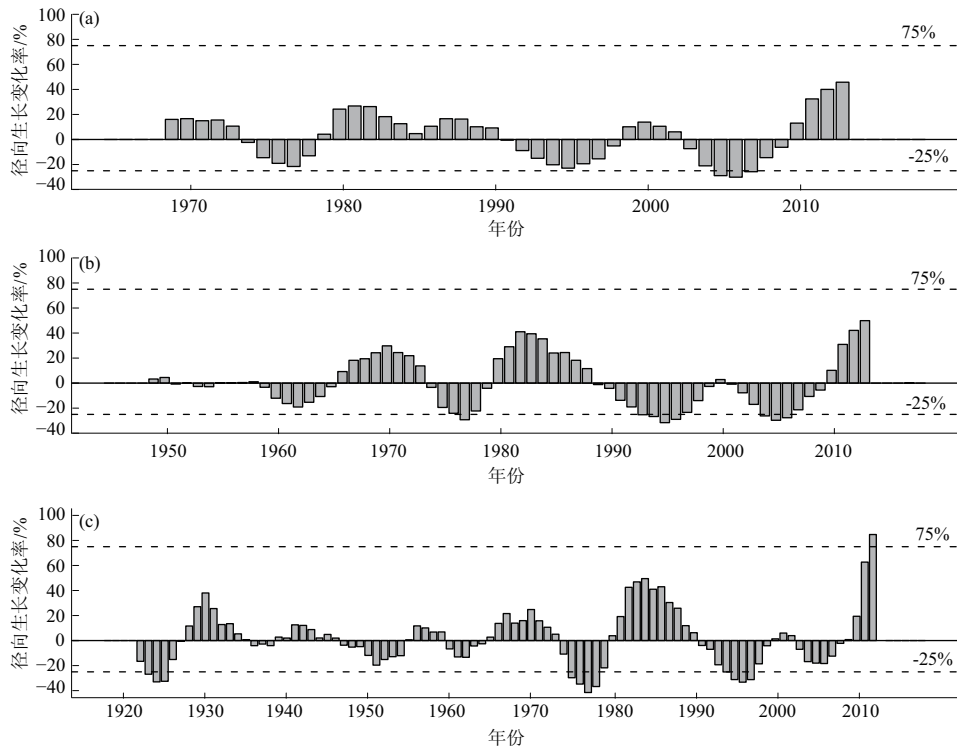


图 5 不同年龄冷杉径向生长变化率: (a) 幼龄林; (b) 近熟林; (c) 成熟林

Fig. 5 Percentage change in radial growth of *Abies fabri* at different ages: (a) young forests; (b) near mature forests; (c) mature forests

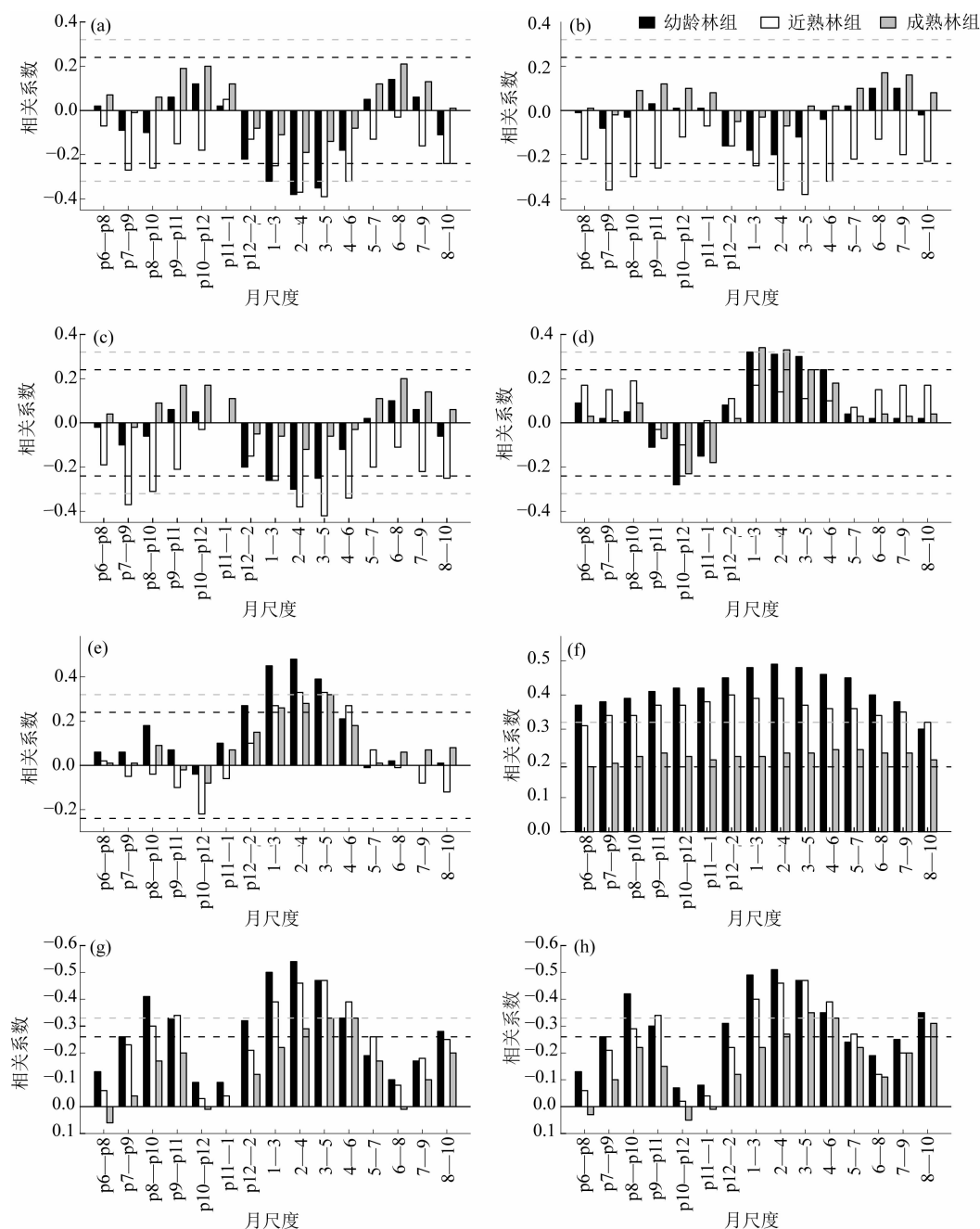


图6 不同年龄冷杉树轮宽度指数与3个月尺度气候因子的相关关系:(a)平均最高温度;(b)平均最低温度;(c)平均温度;(d)总降水量;(e)相对湿度;(f)自校准帕默尔干旱指数(scPDSI);(g)日照百分率;(h)日照时数

Fig.6 Correlation coefficients between chronologies of *Abies fabri* and 3-month-scale climatic factors at different ages:

(a) mean maximum temperature; (b) mean minimum temperature; (c) mean temperature; (d) total precipitation;

(e) relative humidity; (f) self-calibrating Palmer Drought Severity Index(scPDSI); (g) percentage of sunshine; (h) sunshine duration

注:p代表上一年,如“p6—p8”表示上一年6月到上一年8月;“p11—1”表示上一年11月到当年1月。

7—10月的平均最高温度、最低温度和平均温度均呈显著负相关;而成熟林与各温度因子均未表现出显著相关关系,这表明了温度升高会对幼龄和近成熟林冷杉生长产生消极影响,而对成熟冷杉的生长影响较小。3个龄组冷杉年轮宽度指数与当年1—5

月相对湿度和 scPDSI 均呈显著正相关( $P < 0.05$ ),相关系数由大到小分别为幼龄、近熟龄和成熟龄;同时,幼龄还与当年1—5月降水呈显著正相关,说明幼龄冷杉径向生长会受到降水的强烈影响。3个龄组冷杉年轮宽度指数与当年2—6月日照时数和日

照百分率均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数由大到小分别为幼龄、近熟林和成熟林; 此外, 幼龄冷杉还与前一年 7—11 月及当年 8—11 月的日照时数和日照百分率显著正相关, 表明充足的光照也会对幼龄冷杉径向生长产生积极影响。

#### 2.4 不同年龄冷杉生长抵抗力、恢复力和弹性

由图 7 可见, 在 2007 年、2010 年和 2012 年 3 次极端干旱事件过程中, 3 个龄组冷杉生长抵抗力均呈逐次增加趋势, 在前两次干旱事件 (2007 年和 2010 年) 中抵抗力随年龄增加呈增加趋势, 而在 2012 年抵抗力随年龄增加呈下降趋势, 成熟林的抵抗力最弱。与抵抗力相反, 成熟林的恢复力较高, 幼龄林的恢复力较低, 且幼龄林恢复力在 3 次干旱事件中呈现先升高后下降的趋势。所有龄组冷杉弹性指数在 3 次事件中均呈显著增加趋势, 其中成熟龄冷杉提升速度更快, 弹性指数更高, 说明所有龄组冷杉在干旱事件中生长变化幅度增加, 生态弹性普遍增强, 其中成熟林表现出更强的弹性。在对 2007 年干旱的响应中, 幼龄林恢复力最低, 同时幼龄林的弹性也最低, 且全部林组的弹性均低于 1, 表明所有龄组冷杉在干旱后 3 年内都没有恢复到原来的水平, 后两次干旱事件中 (2010 年和 2012 年), 冷杉林生长恢复较好。

### 3 讨论

#### 3.1 不同年龄冷杉径向生长对气候变化的响应

年龄因素会影响树木径向生长对气候变化的敏感性<sup>[20,31]</sup>。有研究表明, 成熟个体通常比幼龄个体包含更多的气候信息, 对温度、降水和土壤水分的变

化更加敏感<sup>[20,31]</sup>。如在对中国西北部天山山脉雪岭杉 (*Picea schrenkiana*) 林的研究中发现, 老树比幼龄树对气候响应更为敏感<sup>[31]</sup>, 与本研究结果一致, 冷杉 3 个年龄组中, 年龄较大的冷杉对气候响应应具有更高的敏感性。这些差异, 可能是由树龄引起的生理过程差异导致。一方面, 随着树龄增加, 树木叶片的固碳效率降低、叶面积减小<sup>[38]</sup>, 光合速率降低<sup>[39]</sup>。另一方面, 水分的限制也可以用来解释年龄对气候敏感性的控制, 随着树木生长到其最大高度, 水分运输通过的枝干和茎更长, 路线也更复杂。水阻力的增加会导致供给蒸腾作用的水量减少, 气孔提前关闭, 进而限制气孔导度和气体交换<sup>[40]</sup>。此外, 在对四川贡嘎山冷杉林对气候变化的响应研究发现<sup>[18]</sup>, 年龄对冷杉径向生长-气候关系影响较小, 这可能是由于该研究中仅将年轮样品分成两个年龄组 ( $\leq 120$  a 和  $> 120$  a), 主要为年龄较大的个体, 而年龄较小的个体相对较少。

本研究发现, 幼龄林与当年生长季前最高温和平均温度均呈显著负相关, 近熟林与当年生长季前和上一年生长季温度显著负相关, 而成熟林与温度的相关性均不显著, 表明生长季前后的温度是限制幼龄冷杉生长的主要因子, 温度升高会抑制幼树径向生长, 而对成熟林的生长影响较小。相似的结论也被其他研究证明, 温度升高使得中国东北部幼龄红松生长受限, 而老龄红松则生长稳定<sup>[41]</sup>, 中国西北部天山温带森林幼龄树也表现出生长速率减缓<sup>[42]</sup>, 气候敏感性高的幼龄白桦比老龄白桦死亡率高<sup>[43]</sup>, 与本研究结果一致。也有研究表明, 在中国亚热带地区大树比小树承受更多来自环境变暖变干的压力<sup>[44]</sup>, 与本研究结果不一致, 这可能是由于气

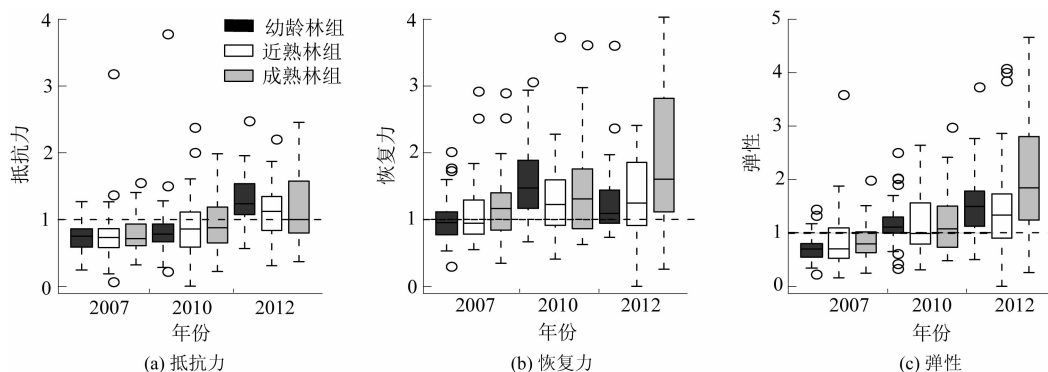


图 7 不同年龄冷杉对干旱事件的抵抗力、恢复力和弹性

Fig. 7 Resistance, recovery and resilience of *Abies fabri* at different ages to the drought events

候不同所导致,在热带亚热带地区大树对升温 and 干旱的敏感性更强,死亡率更高<sup>[45]</sup>。根系结构也会影响树木生长,本研究中冷杉主要生长在多砾石区,土层较薄,成熟冷杉扎根于砾石间,根系较深,而幼龄冷杉的根系较浅,对生长季初期的土壤表层和林间温度变化响应更为敏感,温度升高导致的干旱胁迫事件对幼龄冷杉生长的消极影响更大。

本研究结果显示,幼树与当年生长季前期和上一年生长季末的降水和相对湿度显著正相关,近熟林与降水的相关性不显著,与生长季前的相对湿度显著正相关,成熟林仅与当年生长季前的降水和相对湿度显著正相关,表明幼龄林对水分因子具有更高的敏感性。研究表明,需水量高的树更容易受到极端干旱事件的影响<sup>[46]</sup>。在干旱期间,幼树将面临更严重的水分胁迫和更高的死亡风险<sup>[47]</sup>,这可能是因为幼树根系不发达,汇聚水分和获取水分的能力有限,体内存储的可利用水分较少,易受到表层土壤和空气温度变化的影响,蒸散发加强而导致水分损失,另一方面,在空间和养分的争夺中,幼树往往处于不利地位,从而导致幼树在面临极端干旱时表现出高于成熟树的脆弱性<sup>[48]</sup>。

### 3.2 冷杉的生态弹性

研究区幼龄冷杉在 2005—2013 年发生了生长衰退,近熟冷杉在 1977—1982 年、1993—2001 年和 2004—2011 年发生了生长衰退;而成熟冷杉在 1923—1930 年、1975—1983 年和 1994—2007 年发生了生长衰退。不同年龄冷杉生长都与 scPDSI 呈正相关,明显的衰退发生在极端干旱年后,且年表与 3—5 月温度显著负相关,由此推测频发的早春干旱是导致冷杉生长衰退的主要气候因素。据资料显示,峨眉山金顶华藏寺曾于 1972 年 4 月发生火灾<sup>[49]</sup>,向周围释放热量,冷杉适宜于冷湿环境,生长季初期过高的温度将会使叶片失水甚至损伤细胞,火灾产生的二氧化硫(SO<sub>2</sub>)会损伤叶片,这可能为二十世纪七十年代近熟冷杉和成熟冷杉发生生长衰退的非气候因素。

在全球气候变暖引起极端干旱事件增加的背景下,峨眉山不同年龄冷杉生态弹性差异较为明显,抵抗力由大到小依次为幼龄林组、近熟林组、成熟林组,恢复力由大到小为成熟林组、近熟林组、幼龄林组,其抵抗力和恢复力之间存在一种互补的平衡关系,即树木在极端干旱事件中表现出较弱的抵抗力

则会表现出较强的恢复力<sup>[50]</sup>。研究表明,根冠比是决定树木抵抗力强弱的关键因子,根冠比越大,对干旱事件的抵抗力越强,反之越弱<sup>[51]</sup>,成熟冷杉的根冠比小于幼龄<sup>[52]</sup>,因此幼树对干旱事件的抵抗力更具优势。在本研究中,生态弹性在树木经历多次干旱事件后逐渐增强,这可以解释在各龄组中,成熟林的弹性提升更快,这表明峨眉山冷杉随着年龄增长将逐步提升自身生态弹性以应对区域化的气候变暖,但生态弹性的提升不是无限的,若持续变暖、极端干旱和火灾等环境变化突破生态弹性的阈值,将导致大面积森林衰退。

## 4 结论

本研究采用树轮生态学方法建立了四川峨眉山不同年龄冷杉树轮宽度、树轮宽度指数和断面积增量年表。在此基础上,通过树木径向生长与气候因子的相关性分析得出以下结论:

(1) 年龄会影响冷杉生长对气候变化响应的敏感性,3 个龄组中,成熟冷杉径向生长对气候变化的响应最为敏感,其生长主要受到生长季初期水分限制;生长季初期的温度、水分和光照条件均会限制幼龄冷杉生长;近成熟林生长主要受到生长季初期的温度和水分共同作用。

(2) 不同年龄冷杉生长对极端干旱事件的生态弹性存在明显差异,其抵抗力随着年龄增大而下降,恢复力随年龄增大而增强。

(3) 3 次极端干旱事件后,所有龄组冷杉弹性指数均增加。若未来全球气候持续变暖和极端干旱事件频发,四川峨眉山冷杉将面临严峻的生长衰退风险,从而直接影响该地区森林生态系统服务功能。

## 参考文献(References)

- [1] RAHMAN M, ISLAM M, BRÄUNING A. Species-specific growth resilience to drought in a mixed semi-deciduous tropical moist forest in South Asia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **433**: 487–496. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.11.034
- [2] GAZOL A, CAMARERO J J, VICENTE-SERRANO S M, et al. Forest resilience to drought varies across biomes [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(5): 2143–2158. DOI: 10.1111/gcb.14082
- [3] 岳伟鹏, 陈峰, 袁玉江, 等. 气候变暖背景下云南西北部大果红杉(*Larix potaninii*)径向生长衰退及其气候驱动因子分析[J]. *生态学报*, 2022, **42**(6): 2331–2341. [YUE Weipeng,



- CHEN Feng, YUAN Yujiang, et al. The decline in radial growth of *Larix potaninii* in northwestern Yunnan and its driving factors under the background of climate warming [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(6): 2331–2341 DOI: 10.5846/stxb202011303065
- [4] 薛儒鸿, 焦亮, 刘小萍, 等. 新疆阿尔泰山不同海拔西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的响应稳定性评价[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(5): 1275–1284. [XUE Ruhong, JIAO Liang, LIU Xiaoping, et al. Evaluation of the stability of the radial growth of *Larix sibirica* at different altitudes in response to climate change in Altai Mountains, Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(5): 1275–1284 DOI: 10.13292/j.1000-4890.202105.021
- [5] WANG Zhou, LYU Lixin, LIU Weixing, et al. Topographic patterns of forest decline as detected from tree rings and NDVI [J]. *Catena*, 2021, **198**: 105011. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105011
- [6] HESSE B D, HARTMANN H, RÖTZER T, et al. Mature beech and spruce trees under drought: Higher C investment in reproduction at the expense of whole-tree NSC stores [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, **191**: 104615. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2021.104615
- [7] GEA-IZQUIERDO G, VIGUERA B, CABRERA M, et al. Drought induced decline could portend widespread pine mortality at the xeric ecotone in managed mediterranean pine-oak woodlands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **320**: 70–82. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.02.025
- [8] SERRA-MALUQUER X, MENCUCINI M, MARTÍNEZ-VILALTA J. Changes in tree resistance, recovery and resilience across three successive extreme droughts in the northeast Iberian Peninsula [J]. *Oecologia*, 2018, **187**(1): 343–354. DOI: 10.1007/s00442-018-4118-2
- [9] ZHANG Qibin, FANG Ouya. Tree rings circle an abrupt shift in climate [J]. *Science*, 2020, **370**(6520): 1037–1038. DOI: 10.1126/science.abf1700
- [10] LONGO M, KNOX R G, LEVINE N M, et al. Ecosystem heterogeneity and diversity mitigate Amazon forest resilience to frequent extreme droughts [J]. *New Phytologist*, 2018, **219**(3): 914–931. DOI: 10.1111/nph.15185
- [11] HOLLUNDER R K, MARIOTTE P, CARRIJO T T, et al. Topography and vegetation structure mediate drought impacts on the understory of the South American Atlantic Forest [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **766**: 144234. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144234
- [12] 张齐兵, 方欧娅, 吕立新. 青藏高原树木年轮生态学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 19–37. [ZHANG Qibing, FANG Ouya, LYU Lixin. Tree ring ecology of Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2019: 19–37]
- [13] 刘庆, 吴彦, 何海. 中国西南亚高山针叶林的生态学问题[J]. *世界科技研究与发展*, 2001, **23**(2): 63–69. [LIU Qing, WU Yan, HE Hai. Ecological problems of subalpine coniferous forest in the southwest of China [J]. *World Sci-tech Research and Development*, 2001, **23**(2): 63–69 DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2001.02.024
- [14] 申佳艳, 李帅锋, 黄小波, 等. 金沙江流域不同海拔处云南松生态弹性及生长衰退过程[J]. *林业科学*, 2020, **56**(6): 1–11. [SHEN Jiayan, LI Shuaifeng, HUANG Xiaobo, et al. Ecological resilience and growth degradation of *Pinus yunnanensis* at different altitudes in Jinsha River Basin [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, **56**(6): 1–11 DOI: 10.11707/j.1001-7488.20200601
- [15] SHI Chunming, SCHNEIDER L, HU Yuan, et al. Warming-induced unprecedented high-elevation forest growth over the monsoonal Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(5): 054011. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7b9b
- [16] SHI Songlin, LIU Guohua, LI Zongshan, et al. Elevation-dependent growth trends of forests as affected by climate warming in the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **498**: 119551. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119551
- [17] SHEN Jiayan, LI Zongshan, GAO Chengjie, et al. Radial growth response of *Pinus yunnanensis* to rising temperature and drought stress on the Yunnan Plateau, southwestern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **474**: 118357. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118357
- [18] WANG Wenzhi, JIA Min, WANG Genxu, et al. Rapid warming forces contrasting growth trends of subalpine fir (*Abies fabri*) at higher- and lower-elevations in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, **402**: 135–144. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.07.043
- [19] 石松林, 靳甜甜, 刘国华, 等. 气候变暖抑制西藏拉萨河大果圆柏树木生长[J]. *生态学报*, 2018, **38**(24): 8964–8972. [SHI Songlin, JIN Tiantian, LIU Guohua, et al. Climate warming decelerates growth of *Sabina tibetica* in Lhasa River area of Tibet [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8964–8972 DOI: 10.5846/stxb201807131522
- [20] WU Guoju, XU Guobao, CHEN Tuo, et al. Age-dependent tree-ring growth responses of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) to climate: A case study in the Tianshan Mountain, China [J]. *Dendrochronologia*, 2013, **31**(4): 318–326. DOI: 10.1016/j.dendro.2013.01.001
- [21] 王彬, 于澎涛, 于艺鹏, 等. 祁连山不同年龄青海云杉径向生长对气候变化的响应[J]. *林业科学*, 2021, **57**(3): 1–8. [WANG Bin, YU Pengtao, YU Yipeng, et al. Response of radial growth of Qinghai Spruce at different ages to climate change in Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(3): 1–8 DOI: 10.11707/j.1001-7488.20210301
- [22] SCHUSTER R, OBERHUBER W. Age-dependent climate-growth relationships and regeneration of *Picea abies* in a drought-prone

- mixed-coniferous forest in the Alps [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2013, **43**(7): 609–618. DOI: 10.1139/cjfr-2012-0426
- [23] 赵志江, 康东伟, 李俊清. 川西亚高山不同年龄紫果云杉径向生长对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, **36**(1): 173–179. [ZHAO Zhijiang, KANG Dongwei, LI Junqing, et al. Age-dependent radial growth responses of *Picea purpurea* to climatic factors in the subalpine region of western Sichuan province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(1): 173–179] DOI: 10.5846/stxb201409121815
- [24] FANG Keyan, CHEN Dan, GOU Xiaohua, et al. Influence of non-climatic factors on the relationships between tree growth and climate over the Chinese Loess Plateau [J]. Global and Planetary Change, 2015, **132**: 54–63. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.06.008
- [25] 王晓明, 赵秀海, 高露双, 等. 长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2011, **31**(21): 6378–6387. [WANG Xiaoming, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al. Age-dependent growth responses of *Pinus koraiensis* to climate in the north slope of Changbai Mountain, northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(21): 6378–6387]
- [26] FANG Ouya, ZHANG Qibin. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2018, **25**(1): 245–253. DOI: 10.1111/gcb.14470
- [27] 曹新光, 胡红兵, 李颖俊, 等. 亚热带人工和天然马尾松、杉木林生长对干旱的生态弹性差异[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(10): 3531–3538. [CAO Xinguang, HU Hongbing, LI Yingjun, et al. Differences in the ecological resilience of planted and natural *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* forest in response to drought in subtropical China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(10): 3531–3538] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202110.035
- [28] ZHANG Xiao, FAN Zhaofei, SHI Zhongjie, et al. Tree characteristics and drought severity modulate the growth resilience of natural Mongolian pine to extreme drought episodes [J]. Science of the Total Environment, 2022, **830**: 154742. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154742
- [29] LUCAS-BORJA M E, BOSE A K, ANDIVIA E, et al. Assessing tree drought resistance and climate-growth relationships under different tree age classes in a *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* Forest [J]. Forests, 2021, **12**(9): 1161. DOI: 10.3390/f12091161
- [30] 白海, 许倩, 石松林, 等. 峨眉山不同海拔冷杉径向生长对气候变化的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, **40**(5): 128–138. [BAI Hai, XU Qian, SHI Songlin, et al. Radial growth of *Abies fabri* response to climate change along an altitudinal transect in the Mount Emei [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2020, **40**(5): 128–138] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.05.015
- [31] PRIMICIA I, CAMARERO J J, JANDA P, et al. Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate [J]. Forest Ecology and Management, 2015, **354**: 77–86. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.06.034
- [32] HOLMES R L. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurements [J]. Tree-Ring Bulletin, 1983(43): 69–78.
- [33] LY/T2908-2017. 主要树种龄级与龄组划分[S]. 北京: 国家林业局, 2017. [LY/T2908-2017. Regulations for age-class and age-group division of main tree-species [S]. Beijing: State Forestry Administration, 2017]
- [34] BUNN A G. A dendrochronology program library in R (dplR) [J]. Dendrochronologia, 2008, **26**: 115–124.
- [35] NOWACKI G J, ABRAMS M D. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks [J]. Ecological Monographs, 1997, **67**(2): 225–249. DOI: 10.1890/0012-9615(1997)067[0225:RGACFR]2.0.CO;2
- [36] LLORET F, KEELING E G, SALA A. Components of tree resilience: Effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests [J]. Oikos, 2011, **120**(12): 1909–1920. DOI: 10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x
- [37] PENG Jianfeng, PENG Kunyu, LI Jinbao. Climate-growth response of Chinese white pine (*Pinus armandii*) at different age groups in the Baiyunshan National Nature Reserve, central China [J]. Dendrochronologia, 2018, **49**: 102–109. DOI: 10.1016/j.dendro.2018.02.004
- [38] DAY M E, GREENWOOD M S, WHITE A S. Age-related changes in foliar morphology and physiology in red spruce and their influence on declining photosynthetic rates and productivity with tree age [J]. Tree Physiology, 2001, **21**(16): 1195–1204. DOI: 10.1093/treephys/21.16.1195
- [39] BOND B J. Age-related changes in photosynthesis of woody plants [J]. Trends Plant Science, 2000, **5**(8): 349–353. DOI: 10.1016/s1360-1385(00)01691-5
- [40] KOLB T E, STONE J E. Differences in leaf gas exchange and water relations among species and tree sizes in an Arizona pine-oak forest [J]. Tree Physiology, 2000, **20**(1): 1–12. DOI: 10.1093/treephys/20.1.1
- [41] WANG Xiaochun, PEDERSON N, CHEN Zhenju, et al. Recent rising temperatures drive younger and southern Korean pine growth decline [J]. Science of the Total Environment, 2019, **649**: 1105–1116. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.393
- [42] WU Xiuchen, LIU Hongyan, WANG Yufu, et al. Prolonged limitation of tree growth due to warmer spring in semi-arid mountain forests of Tianshan, northwest China [J]. Environmental Research Letters, 2013, **8**(2): 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024016
- [43] SUAREZ M L, GHERMANDI L, KITZBERGER T. Factors

- predisposing episodic drought-induced tree mortality in *Nothofagus*-site, climatic sensitivity and growth trends [J]. *Journal of Ecology*, 2004, **92**(6): 954 – 966. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2004.00941.x
- [44] ZHOU Guoyi, PENG Chuanghui, LI Yuelin, et al. A climate change-induced threat to the ecological resilience of a subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in southern China [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(4): 1197 – 1210. DOI: 10.1111/gcb.12128
- [45] NEPSTAD D C, TOHVER I M, RAY D, et al. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest [J]. *Ecology*, 2007, **88**(9): 2259 – 2269. DOI: 10.1890/06-1046.1
- [46] OLSON M E, SORIANO D, ROSELL J A, et al. Plant height and hydraulic vulnerability to drought and cold [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(29): 7551 – 7556. DOI: 10.1073/pnas.1721728115
- [47] JIAO Liang, LIU Xiaoping, WANG Shengjie, et al. Radial growth adaptability to drought in different age groups of *Picea schrenkiana* Fisch. & C. A. Mey in the Tianshan Mountains of northwestern China [J]. *Forests*, 2020, **11**(4): 455. DOI: 10.3390/f11040455
- [48] MADRIGAL-GONZÁLEZ J, ZAVALA M A. Competition and tree age modulated last century pine growth responses to high frequency of dry years in a water limited forest ecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **192** – **193**: 18 – 26. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.02.011
- [49] 刘祖桂. 峨眉山金顶冷杉死亡与华藏寺火灾关系的探讨[J]. *生态学杂志*, 1990, **9**(1): 15 – 18. [LIU Zugui. Relations between fir mortality and Huazang Temple conflagration in Jinding of the Emei Mountain [J]. *Journal of Ecology*, 1990, **9**(1): 15 – 18] DOI: 10.13292/j.1000-4890.0004
- [50] GAZOL A, CAMARERO J J, ANDEREGG W R L, et al. Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, **26**(2): 166 – 176. DOI: 10.1111/geb.12526
- [51] AU T F, MAXWELL J T, ROBESON S M, et al. Younger trees in the upper canopy are more sensitive but also more resilient to drought [J]. *Nature Climate Change*, 2022, **12**(12): 1168 – 1174. DOI: 10.1038/s41558-022-01528-w
- [52] PERI P L, GARGAGLIONE V, PASTUR G M. Dynamics of above- and below-ground biomass and nutrient accumulation in an age sequence of *Nothofagus antarctica* forest of southern Patagonia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **233**(1): 85 – 99. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.06.009

## Response of Radial Growth of *Abies fabri* at Different Ages to Climate Change in Mount Emei, Sichuan, China

GUAN Zengyan<sup>1a</sup>, SHI Songlin<sup>1a,2\*</sup>, JIN Yaning<sup>1a</sup>, CHEN Shengbin<sup>1b</sup>, XIA Zhonglin<sup>3</sup>

(1. a. College of Tourism and Urban-Rural Planning; b. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Research Center of National Park, Sichuan Key Research Base for Social Sciences, Chengdu 610059, China; 3. Emei Mountain Station of Forest Ecosystem Studies, Forestry Management Agency of Mount Emei, Emeishan 614201, Sichuan, China)

**Abstract:** A scientific assessment of the ecological resilience of forests to climate extremities can help estimate the adaptability potential of forests to unexpected climate change. Forest age is an important factor, which largely decides the sensitivity of tree growth to climate alteration, but there was still a lack of a wide knowledge of the ecological resilience of trees with varied ages to drought calamities. In this study, samples of *Abies fabri* forests in Mount Emei of China were selected for control-experiment. It divided these samples into three groups, namely young forest group (<60 a), near mature forest group (60 ~ 80 a) and mature forest group (>80 a). Tree-ring width, tree-ring width index and basal area increment were measured and calculated in terms of dendroecology

method. The sensitivity of radial growth of the three groups to climate change were compared, and their eco-resilience differentiation in response to three droughts in 2007, 2010 and 2012, separately, were analyzed. Results show that: (1) The radial growths of fir forests at varied ages in response to climate changes exhibited remarkable difference. The radial growth of samplings had the strongest correlation with temperature, moisture and light. Rising temperature would inhibit the radial growth of fir in young and near-mature forests, but had little effect on the growth of mature forests. (2) The response capacity of fir in the three groups to drought events were inconsistent according to the radial growth. They can be arranged in descending order of resistance as young forest, near mature forest and mature forest, and vice versa for their resilience after drought events. (3) The eco-resilience of fir increased in all groups after drought events, and the mature forest showed the strongest resilience. The radial growth of young forest in Mount Emei was possible to decline affected by climate warming and frequent extreme drought events, which would potentially change the forest dynamics under climate change. This study is helpful to understand the ecological adaptability of fir forests to future climate change and provides scientific support for regional forest protection and management.

**Key words:** tree ring; ecological resilience; extreme drought; *Abies fabri*; Mount Emei

(责任编辑 钟雨倩)