

DOI: 10.5846/stxb202102060392

杨镒如,张茗珊,张凌楠,路强强,洪艺雪,刘晓宏.秦岭中西部油松径向生长对气候因子的响应差异研究.生态学报,2022,42(4):1474-1486.

Yang Y R, Zhang M S, Zhang L N, Lu Q Q, Hong Y X, Liu X H. Different responses of radial growth of *Pinus tabulaeformis* to climate in the middle and western Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1474-1486.

秦岭中西部油松径向生长对气候因子的响应差异研究

杨镒如¹,张茗珊¹,张凌楠^{1,*},路强强^{1,2},洪艺雪¹,刘晓宏^{1,3}

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119

2 陕西省西安植物园(陕西省植物研究所),西安 710061

3 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室,兰州 730000

摘要:在气候变暖背景下,树木径向生长对气候因子的响应会随区域干湿变化而有所差异。秦岭属于气候敏感区和生态脆弱区,南北气候特征差异明显,分析气候变化背景下树木径向生长对气候因子及干旱事件的响应,对准确预测未来气候变化对树木生长的影响至关重要。为探究该地区不同干湿环境下油松对气候因子及干旱事件响应的特点及差异,共采集秦岭中西部南北坡共 4 个样点的油松树轮样芯,利用树木年轮生态学的方法,分析各地油松年表与气候因子之间的关系,通过计算抵抗力、恢复力、恢复弹力等指标探究树木径向生长对干旱事件的应对能力,结果表明:1)在西部和北坡的 3 个样点,油松径向生长主要与前一年 7—9 月、当年 5—7 月的气温呈显著负相关,与当年 5 月降水呈显著正相关,在中部南坡油松径向生长主要与当年 2—4 月、9 月气温呈显著正相关,与当年 4 月降水呈显著负相关;2)生长季气温升高所引发的水分亏缺,是研究区西部和北坡油松径向生长受限制的主要原因,且中部南坡油松生长受气温和干旱因子的制约要明显弱于其它 3 个样点;3)西部北坡油松对干旱的抵抗能力、恢复能力及恢复弹力均弱于西部南坡及中部北坡油松。在未来对研究区树木的管理与保护工作中,应更加关注西部北坡树木生长状况,中部树木则无需进行过多的人工干预。

关键词:秦岭中西部;树木年轮;径向生长;对气候因子响应;干旱事件

Different responses of radial growth of *Pinus tabulaeformis* to climate in the middle and western Qinling Mountains

YANG Yiru¹, ZHANG Mingshan¹, ZHANG Lingnan^{1,*}, LU Qiangqiang^{1,2}, HONG Yixue¹, LIU Xiaohong^{1,3}

1 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 Xi'an Botanical Garden of Shaanxi Province (Institute of Botany of Shaanxi Province), Xi'an 710061, China

3 State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: In the context of global warming, the responses of tree radial growth to climate factors usually vary with the regional dryness and wetness. Qinling Mountains is located in a climate-sensitive and ecologically fragile region, whose north slope and south slope show different climatic characteristics. It is essential for accurately predicting the impact of climate change on tree growth by analyzing the response of trees radial growth to climate factors and drought events in the context of climate warming. In order to explore the response of the radial growth of *Pinus tabulaeformis* in the Qinling Mountains to climatic factors and drought events in different moisture conditions, we collected tree-ring cores at four sampling sites on the south and north slopes of middle and western Qinling Mountains. We analyzed the relationships between the chronology of *Pinus tabulaeformis* and climate factors at different sites by using the method of dendroecology. Indices, e.g. resistance, recovery, and resilience, were defined and used to explore the coping capacity of radial growth to drought events. Our

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42171055);国家自然科学基金青年项目(41801024);中国博士后科学基金项目(2018M640946)

收稿日期:2021-02-06; **网络出版日期:**2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zln@snnu.edu.cn

results indicated that: 1) in western and north slope Qinling Mountains, the radial growth of *Pinus tabuliformis* was negatively correlated with mean temperature from July to September in the previous year and that from May to July in the current year, and was also positively correlated with monthly total precipitation in May. On the south slope of middle Qinling Mountains, *Pinus tabuliformis* was positively correlated with mean temperature from February to April, monthly mean temperature and mean minimum temperature in September in the current year. *Pinus tabuliformis* was also negatively correlated with monthly total precipitation in April. 2) The main factor restricting the radial growth of *Pinus tabuliformis* in the western and north slopes of the study area was the water deficit caused by the increased temperature in the growing season. The limiting effects of temperature and drought on the radial growth of *Pinus tabuliformis* in the south slope of middle Qinling Mountains were significantly weaker than those at the other three sampling sites. 3) *Pinus tabuliformis* in the north slope of Qinling Mountains showed lower resistance, recovery and resilience to drought events than trees on the south slope of western Qinling Mountains and on the north slope of middle Qinling Mountains. In the future management and protection for the trees in the study area, more attention should be paid to the growth of the trees on the north slope of the western Qinling, and the trees in the middle Qinling do not require excessive manual intervention.

Key Words: middle and western Qinling Mountains; tree-ring; radial growth; response to climate; drought events

自 20 世纪 80 年代以来,全球变暖已成不争的事实^[1]。有研究表明,全球气候变暖会导致干旱事件频发^[2-3],威胁树木的生长,甚至直接或间接引发森林死亡^[4]。目前不仅在干旱、半干旱区,在温带甚至是热带地区也出现了干旱加剧导致森林树木生长衰退和死亡的现象^[5-7]。因此,分析气候变化背景下树木径向生长对气候因子及干旱事件的响应机制,对准确预测未来气候变暖进一步加剧对树木生长的影响至关重要。秦岭是我国重要的南北地理分界线和气候分界线^[8],也是树木生长对气候变化响应的敏感区和脆弱区^[9]。在气候暖干化背景下,秦岭地区的气候要素变化及其可能产生的影响备受学者关注^[10-11]。树木年轮因其连续性好、定年准确、分辨率高、容易获取等特点,已被广泛用于指示树木的径向生长^[12]。油松(*Pinus tabuliformis*)作为一种在秦岭中低海拔地区分布广泛的针叶树,因其对气候因子响应敏感,其年轮数据已被广泛用于树木年轮学的研究中。例如华亚伟等利用秦岭中部油松树轮样芯重建了陕西省镇安县过去近 165 年 3—4 月平均最高气温^[13],宋慧明等利用油松树轮样芯重建了秦岭北坡石门山地区过去近 400 年 5—7 月平均温度^[14]。

秦岭地区地形复杂,南北气候特征差异明显,在该地区已开展的树轮生态学研究中发现,限制树木径向生长的关键气候因子具有明显的空间差异性。例如 Shi 等在秦岭东部伏牛山的研究发现,油松径向生长与当年 5—6 月平均最高气温显著负相关,与当年 5 月的降水显著正相关^[15];Sun 等在秦岭石门山和华山对油松及华山松(*Pinus armandii*)的研究发现,油松生长主要受生长季平均最高气温的限制,华山松主要受 4—6 月降水的限制^[16]。Qin 等在秦岭中部太白山对太白红杉(*Larix chinensis*)的研究发现,树木径向生长与当年 6 月平均气温以及前一年 6 月和当年 4 月降水显著相关,且与降水的相关性强于与温度的相关性^[17]。有研究在综述秦岭地区已有的树木年轮学研究后认为,在秦岭以北的地区气候偏干旱,水分是限制树木径向生长的主要因子,同时高温引起的土壤水分胁迫也对树木生长有显著抑制作用,因此树木多表现为与降水因子显著正相关,与气温因子显著负相关;而在秦岭分水岭和南坡地区,由于东亚夏季风能够带来充沛的降水,因而树木径向生长多与气温因子相关性显著,而与降水因子关系不明显^[18]。

人们在关注气候变暖导致气温升高对树木生长产生影响的同时,也更加关注干旱事件对树木生长的影响,因为相较于气温逐渐升高带来的影响,干旱事件的发生对陆地植被光合作用和生长状况的影响更加明显^[19]。干旱事件不仅使林冠光合作用减弱,并且会对树木的生长造成长期、滞后的影响^[20]。抵抗力、恢复力等指标已被广泛用于评估树木应对干旱事件能力的研究当中,并且这些指标会随分布区域、气候环境的差异而有所不同^[21]。例如 Antonio 等对地中海白松(*Pinus halepensis*)的研究发现,在西班牙东部干旱地区的树木比在湿润地区的树木具有更差的抵抗力,且该研究区树木的抵抗力随干旱程度的增加而下降^[22];而 Cavin 等对欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)的研究发现,生长在该物种分布区干旱边缘的树木表现出更强的抵抗力^[23]。

在全球气候变化背景下,确定不同干湿区域树木对于干旱事件的抵抗力和恢复力,明晰其对于干旱事件的响应策略,对于制定正确的森林经营方法以进行森林管理和保护具有重要意义。

本研究以秦岭中西部南北坡的油松年轮样品为研究对象,基于树轮宽度,建立标准年表(STD),计算树木径向生长抵抗力、恢复力、生长减少量等指标,并结合气温、降水及帕默尔干旱指数(PDSI)等气候资料,旨在:(1)分析秦岭中西部南北坡油松径向生长对气候因子的响应差异;(2)探究在不同干湿环境下油松应对干旱事件能力的差异,为评估全球气候变化背景下秦岭地区油松群落动态变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦岭位于中国东部季风区,海拔大致在 1500—3000 m 之间,北坡山势陡峻,南坡较缓,是暖温带和北亚热带的分界线^[24],夏季温暖湿润,冬季寒冷干旱。由于秦岭山脉对气流的阻隔效应明显,致使其南北气候差异较大,年降水量整体表现为南坡多于北坡,年均温呈现由东南向西北递减、南麓明显高于北麓的特征^[24]。本文涉及的 4 个采样点分别位于秦岭中部和西部的南北坡两侧(图 1),石门山(SMS)位于秦岭西部北坡,张家庄(ZJZ)位于秦岭西部南坡,南五台(NWT)位于秦岭中部北坡,木王山(MWS)位于秦岭中部南坡。秦岭具有明显的植被垂直更替,以 MWS 为例,海拔 1500 m 左右的植被林以油松、栎类为优势树种,海拔 1500 m 以上以秦岭冷杉(*Abies chensiensis*)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)、铁杉(*Tsuga chinensis*)为主要优势树种,混交有华山松、山杨(*Populus davidiana*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、云杉(*Picea asperata*)、白桦(*Betula platyphylla*)等树种。油松是秦岭地区分布广泛的优势针叶树种,且年轮样芯具有分辨率高、对主控因子响应积极等特点,因此选其作为本文的研究对象。

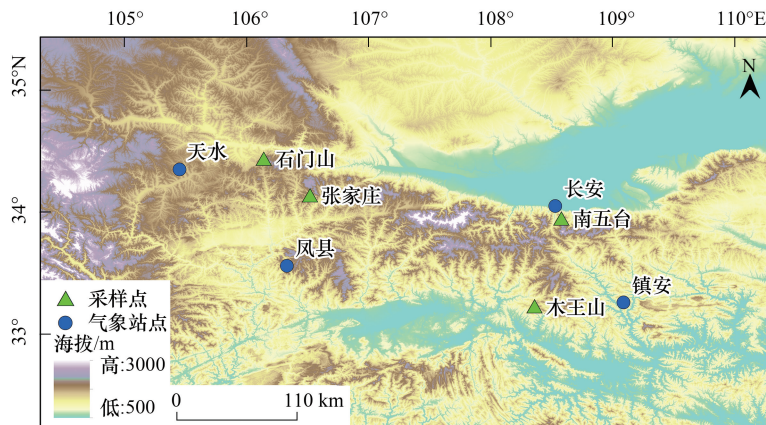


图 1 树轮采样点示意图

Fig.1 Tree-ring sampling sites map

研究区气候受到我国东南季风和西南季风的影响。4 个采样点附近气象站数据显示年平均降水量在 521—839 mm 之间,季节分布不均,且主要集中在 7—9 月。天水、凤县、长安以及镇安气象站数据显示,在 1960—2017 年间,4 个气象站点最热月(7 月)平均气温在 21—26.7°C 之间,最冷月(1 月)平均气温在 -4.2—3°C 之间(图 2)。通过对 4 个站点 1991—2000 年气温数据的趋势检验发现,凤县年平均气温和 5—7 月均温呈显著上升趋势,天水和镇安年平均气温呈显著上升趋势(图 3)。

1.2 样品采集与年表建立

2017 及 2018 年 7 月分别在秦岭中西部南北坡的石门山(SMS)、张家庄(ZJZ)、南五台(NWT)、木王山(MWS)共 4 处设立采样点开展油松树芯样品采集工作(表 1)。样点选取在具有一定倾角的坡地或崖边地带,以保证树木生长对气候变化的响应较为敏感。使用生长锥在每棵树胸径(距地面 1.3 m)处相互垂直的两

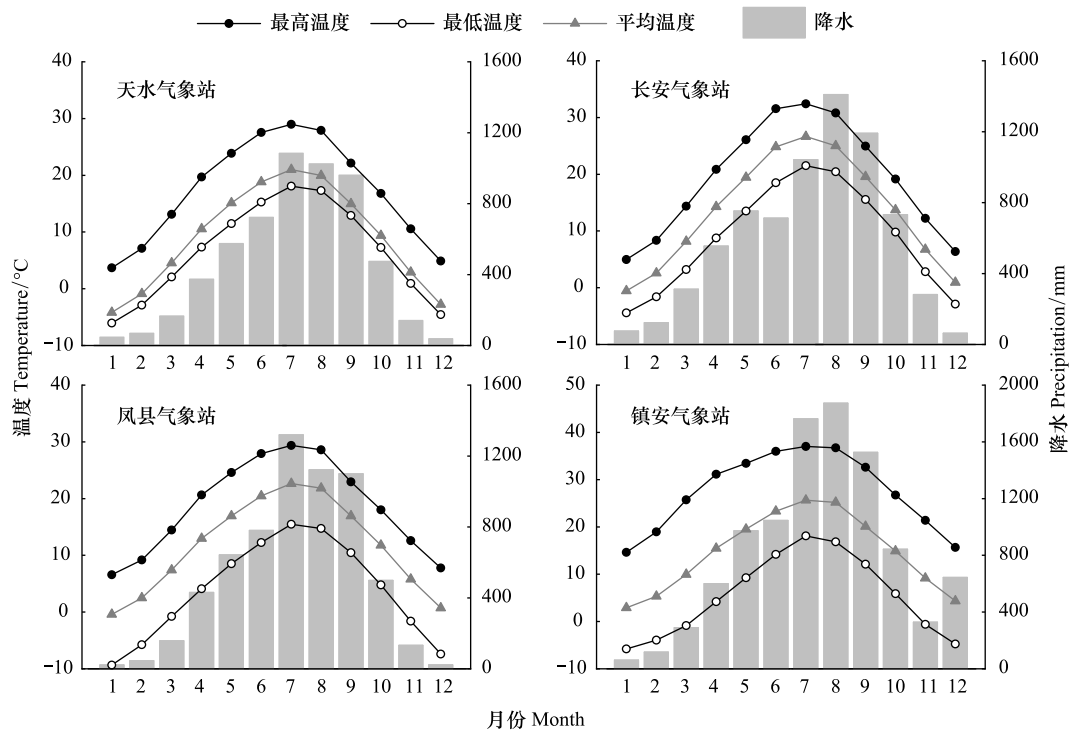


图2 研究区 1960—2017 月平均最高气温、平均气温、平均最低气温及总降水

Fig.2 Monthly mean maximum temperature, mean temperature, mean minimum temperature and mean precipitation in the study area from 1960 to 2017

个方向上钻取 2 根样芯,编号后放入纸管封存。

将样品带回实验室进行固定、风干、打磨等预处理,利用显微镜进行目视交叉定年,利用精度为 0.01 mm 的 LINTAB 6.0 年轮宽度测量仪测量轮宽,而后利用 COFFECHA 程序对定年及测量结果进行检验,剔除质量较差、无法正常交叉定年的样品序列,最终保留 SMS 处 27 棵油松 53 根样芯、ZJZ 处 23 棵油松 46 根样芯、NWT 处 37 棵油松 73 根样芯以及 MWS 处 36 棵油松 72 根样芯进入主序列(表 1)。

运用 ARSTAN 程序里的负指数函数,对树轮宽度数据进行去趋势和标准化,建立标准年表、差值年表及自回归年表,通过比较,最终确定采用标准年表(STD)进行后续研究。采用子样本信号强度 $SSS > 0.85$ 的年份作为年表的起始年,最终得到 4 个样点处年表的可靠区间分别为 1863—2017 年、1929—2017 年、1844—2018 年和 1874—2017 年(图 4)。

1.3 树木径向生长与气候因子关系分析

从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)分别获取 4 个采样点附近的天水气象站(34.35°N , 105.45°E , 海拔 1141.6 m)、凤县气象站(33.56°N , 106.33°E , 海拔 984 m)、长安气象站(34.05°N , 108.53°E , 海拔 445 m)、镇安气象站(33.26°N , 109.09°E , 海拔 693.7 m) 1962—2017 年的气象数据,包括月降水量、月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温(图 2、图 3)。从荷兰皇家气象研究所数据共享网(<http://climexp.knmi.nl>)获取各样点所在 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格的帕默尔干旱指数(PDSI)。

采用 1962—2017 年 4 个样点油松 STD 年表与所获气象数据进行分析。考虑到树木径向生长对气候的响应存在“滞后效应”,即树木径向生长状况不仅与当年的气候因子有关,也受前一年气候的影响^[25],且秦岭树木的生长季通常在 4—9 月^[26],因此采用各样点前一年 6 月到当年 9 月的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量以及 PDSI 数据,分别与该样点油松 STD 年表做 Pearson 相关分析,以此描述树木径向生长状况对气候因子的响应。

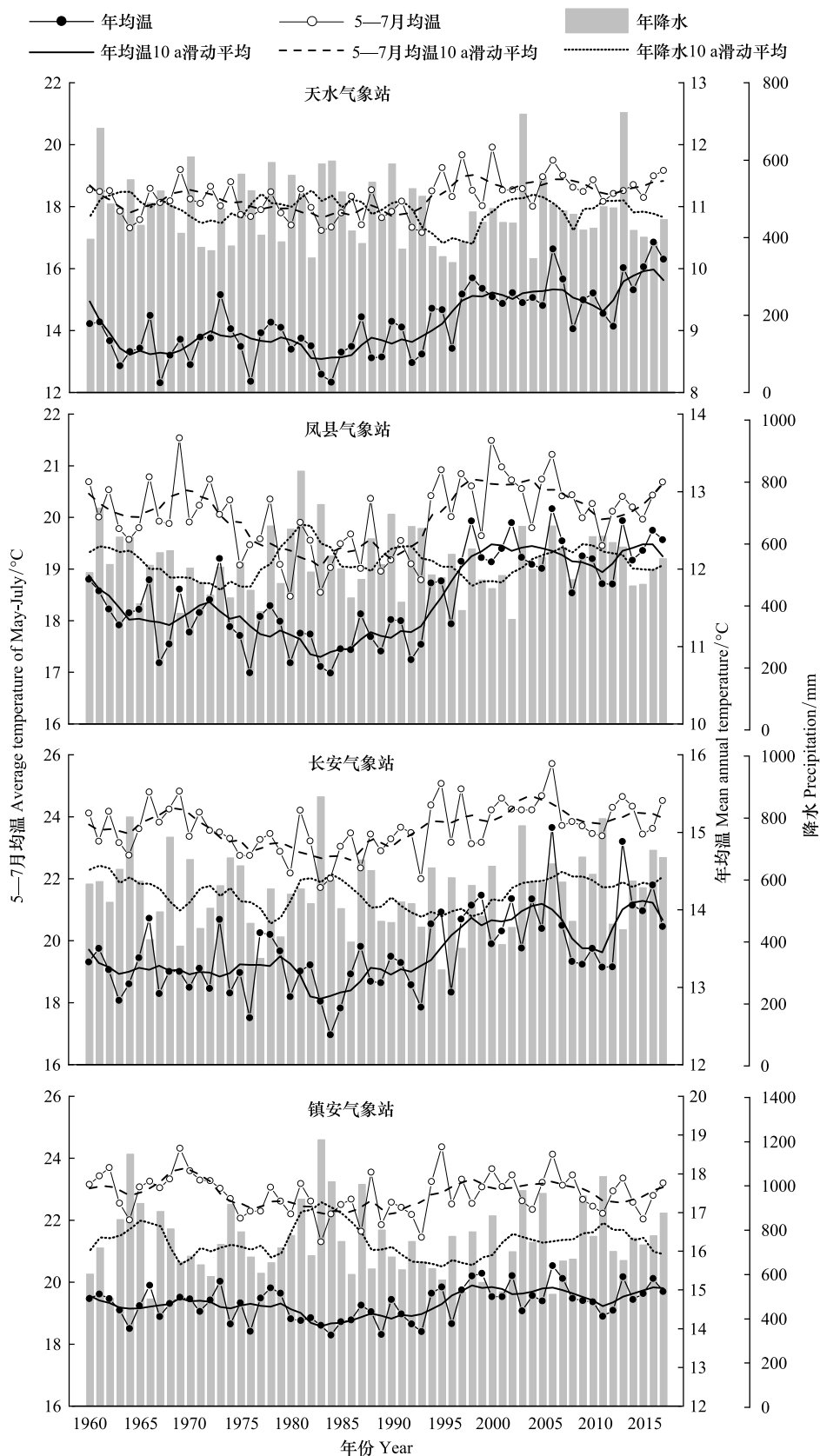


图3 研究区 1960—2017 年平均最高气温、平均气温、平均最低气温及总降水

Fig.3 Changes of annual mean maximum temperature, mean temperature, mean minimum temperature and total precipitation in the study area from 1960 to 2017

1.4 干旱发生年及其前后树木径向生长变化

各样点 STD 年表与该地 PDSI 做 Pearson 相关分析结果表明,在 SMS、ZJZ、NWT 树木径向生长与各月 PDSI 均呈显著正相关,但 MWS 树木与 PDSI 相关性极弱(图 5),因此选取前三个样点开展树木径向生长对干旱事件响应的进一步分析。

为分析干旱事件对树木径向生长的影响,将 PDSI 小于-3 的年份定义为干旱年^[27]。计算 STD 年表在 1963—2017 的平均值与标准差,求得平均值与 1.5 倍标准差的差值,定义 STD 年表中小于这一差值的值为生长极低值。通过比较发现 5 月 PDSI 与 STD 年表两序列同步性较高,且 2000 年的 PDSI 极低值与树木径向生长极低值相对应。因此选择 2000 年为目标干旱年,进一步分析树木应对此干旱事件的能力。

计算树木径向生长对干旱事件响应的两个基础指标:抵抗力(Resistance)和恢复力(Recovery),分别表征树木在干旱事件发生后保持生长的能力以及恢复生长的能力。此外根据 Schwarz 等^[28]提出的新评估方法计算恢复期(Recovery period)、总生长减少量(Total growth reduction)、平均生长减少量(Average growth reduction)以及平均恢复速率(Average recovery rate)4 个指标。其中,恢复期为树木生长在干旱发生后达到干旱前生长水平所需的时间;总生长减少量为在恢复期内的每一年生长降低的累积值,即因干旱造成的增量总损失;平均生长减少量为总生长减少量除以恢复期,量化了恢复期内平均每年树木生长受干旱影响的程度;平均恢复速率为干旱年生长减少的速率(等于 1 减抵抗力)除以恢复期,表示恢复期内平均每年生长减少的速率。假设在任意抵抗力下树木的恢复弹力(Resilience)均等于 1,将其定义为完全恢复弹力标准线,表示在干旱事件发生前后树木的生长可以完全恢复;通过比较树木生长的实际抵抗力、恢复力关系与完全恢复弹力标准线,以探究树木实际恢复弹力。上述计算公式如下:

$$\text{Resistance} = G_d / G_{\text{prev}} \quad (1)$$

$$\text{Recovery} = G_{\text{post}} / G_d \quad (2)$$

$$\text{Resilience} = G_{\text{post}} / G_{\text{prev}} \quad (3)$$

$$\text{Average recovery rate} = (1 - \text{Resistance}) / \text{Recovery period} \quad (4)$$

式中, G_d 表示干旱年的 STD 年表值, G_{prev} 和 G_{post} 分别表示干旱事件发生前 5 年和后 5 年 STD 年表的算术平均值。

2 结果与分析

2.1 树轮年表及参数

由表 1 可知,4 个样地标准年表统计特征值之间差异较为明显。信噪比(SNR)在 ZJZ 最高为 39.485,其次为 MWS(25.1)、NWT(16.962)、SMS(13.091),各年表 SNR 均处于较高水平,说明样本包含丰富的环境信息;样本总体代表性(EPS)均大于 0.85,表明样本所含信号基本能代表总体特征;ZJZ 处树间平均相关系数(r_3)最大,其次是 SMS、MWS、NWT,表明在 ZJZ、SMS 树木径向生长能够更好地反映气候变化的一致性。西部 SMS、ZJZ 的标准差(SD)和平均敏感度(MS)均大于中部 NWT、MWS,总体而言,西部地区树木包含更多气候信息且径向生长对气候变化的敏感度更高^[29]。

对 4 个样地的一阶差年表进行 Pearson 相关,结果发现 SMS 和 ZJZ、SMS 和 NWT、NWT 和 MWS 的一阶差年表之间均呈现 0.01 水平上的极显著相关;ZJZ 与 NWT、MWS 的一阶差年表之间也具有 0.05 水平上的显著相关(表 2),表明样点间树木生长的年际高频变化有较高的一致性(图 4)。

2.2 树木径向生长对气候因子的响应

各样地 STD 年表与气候因子的相关关系分析结果表明(图 5),SMS 树木径向生长与前一年 7 月的平均气温、平均最高气温、平均最低气温均显著负相关(r 介于-0.396—-0.286),与前一年 9 月的平均最高气温显著负相关($r=-0.294$),与当年 5—7 月的平均气温和平均最高气温显著负相关(r 介于-0.471—-0.412);ZJZ 树木径向生长与前一年 7—9 月平均气温和平均最高气温显著负相关(r 介于-0.439—-0.291),与当年 4 月的平

均最高气温、当年5—7月的平均气温和平均最高气温显著负相关(r 介于-0.468—-0.280);NWT 树木径向生长与前一年7—9月的平均气温、前一年7—8月的平均最低气温、前一年8—9月的平均最高气温均呈显著负相关(r 介于-0.395—-0.278),与当年5月的平均气温呈显著负相关($r=-0.402$);MWS 树木径向生长与前一年8月的平均气温呈显著负相关($r=-0.370$),与当年2月的平均最高气温和平均最低气温、当年3—4月的平均气温呈显著正相关(r 介于0.295—0.351)。

表1 样地信息及树轮宽度特征

Table 1 Information of sampling sites and chronological characteristics

类型 Type	石门山	张家庄	南五台	木王山
纬度 Latitude	34.44°N	34.14°N	33.95°N	33.23°N
经度 Longitude	106.14°E	106.52°E	108.58°E	108.36°E
海拔 Altitude/m	1994	1400	1600	2065
样本量 Sample depth	53	46	73	72
公共区间 Common interval	1863—2017	1929—2017	1844—2018	1874—2017
标准差 Standard deviation(SD)	0.377	0.303	0.201	0.170
信噪比 Signal to noise ratio(SNR)/%	13.019	39.485	16.962	25.100
平均敏感度 Mean sensitivity(MS)	0.223	0.296	0.136	0.138
所有样芯平均相关系数 Mean correlation coefficient among all series(r_1)	0.310	0.473	0.200	0.206
树间平均相关系数 Mean correlation coefficient between trees(r_2)	0.669	0.774	0.661	0.576
树内平均相关系数 Mean correlation coefficient within trees(r_3)	0.301	0.467	0.181	0.195
样本群体表达信号 Express population signal (EPS)	0.929	0.975	0.944	0.962
一阶自相关系数 Auto-correlation order(ac1)	0.657	0.190	0.623	0.527
第一主成分所占方差量 Variance in the first principal comment (pc1)	0.356	0.519	0.234	0.291

* 代表在 0.05 水平显著相关; * * 代表在 0.01 水平显著相关

表2 STD 年表一阶差序列的 Pearson 相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the first order difference series of STD chronologies

	SMS	ZJZ	NWT	MWS
SMS	1	0.578 **	0.592 **	0.246
ZJZ		1	0.287 *	0.272 *
NWT			1	0.462 **
MWS				1

STD:标准年表 Standard chronology;SMS:石门山;ZJZ:张家庄;NWT:南五台;MWS:木王山;

SMS 树木径向生长与当年5月和7月降水呈显著正相关(r 介于0.314—0.369),ZJZ 树木径向生长与前一年9月和当年5月降水呈显著正相关(r 介于0.316—0.372),SMS、ZJZ 年表与全年各月 PDSI 均呈正相关(r 介于0.206—0.572),尤其以当年5—7月最为显著(r 介于0.468—0.526);NWT 树木径向生长与前一年9月和当年5月降水显著负相关(r 介于0.276—0.348),与各月 PDSI 均呈正相关(r 介于0.248—0.469),尤其以前一年9月和当年5—6月最为显著(r 介于0.422—0.469);MWS 年表与当年4月降水显著正相关($r=0.32$),与 PDSI 未呈现显著相关关系。

2.3 树木径向生长对干旱事件的响应

研究结果表明3个样地树木对干旱的抵抗力表现为在NWT最强,在SMS最弱(即NWT>ZJZ>SMS);总生长减少量表现为在SMS最高,在NWT最低(即SMS>ZJZ>NWT);平均减少量在SMS和ZJZ处较为一致且均高于NWT;3个指标综合表明NWT 树木径向生长对干旱的抵抗能力最强,其次为ZJZ和SMS(图6)。树木对干旱事件的恢复力在SMS与ZJZ较为一致,均小于NWT;平均恢复速率则表现为ZJZ和NWT较为一致,均高于SMS,因此树木对干旱事件的恢复能力总体表现为SMS弱于NWT和ZJZ(图6)。

通过比较干旱年(2000年)树木径向生长的实际恢复弹力与完全恢复弹力标准线发现(图7),在SMS对

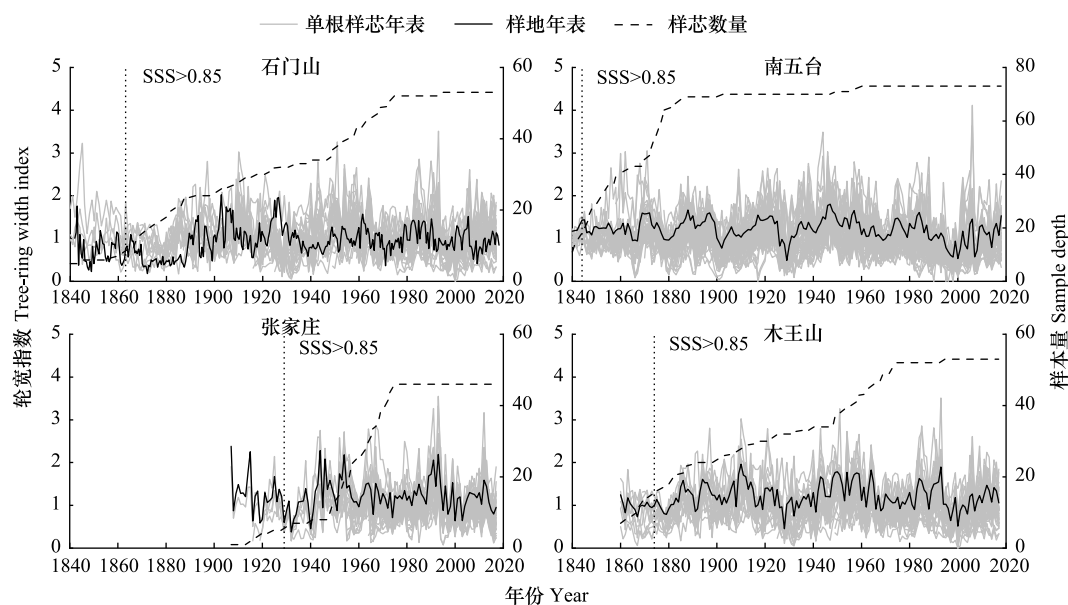


图4 各采样点标准年表(虚线),单根树芯的标准年表(灰线)及样本量(点线),SSS为子样本信号强度

Fig.4 Standard chronology of the site(the dash lines), standard chronology of each tree-ring core(the gray lines) and sample depth(the scatter lines) at each sampling site(SSS is subsample signal strength)

于抵抗力低于 0.54 的样芯年表,其实际恢复弹力低于完全恢复弹力标准线,并且随着抵抗力减弱,实际恢复弹力逐渐远离完全恢复弹力标准线;在 ZJZ 和 NWT,年表的实际恢复弹力在完全恢复弹力标准线上方,表明这两点的树木恢复弹力均强于 1,即干旱后树木能完全恢复到干旱发生之前的状态,甚至比之前的状态更好;因此树木对于干旱事件的恢复弹力同样表现为 SMS 弱于 NWT 和 ZJZ。

3 讨论

3.1 秦岭中西部南北坡油松径向生长与气候因子的关系差异

秦岭地区由于地势复杂,气候差异大,年降水量整体表现为南坡多于北坡,年均温由东南向西北递减,因此势必会造成限制其南北树木径向生长的关键气候因子有所差异。在秦岭北部为暖温带季风区,较南部更加干旱,升温容易引起土壤水分胁迫,从而对树木生长产生不利影响。研究结果表明在 SMS、ZJZ 及 NWT 3 个位于西部及北坡的样点,树木径向生长与前一年生长季中后期、当年生长季早期及中期的气温呈显著负相关关系。这可能是由于生长季中后期温度升高导致油松为减少水分蒸腾而关闭气孔,光合速率下降,有机物的合成及储存减少,不利于当年树木的生长,甚至影响下一年树木的生长^[30]。同时夏季气温升高通常会引起干旱事件,使木质部导水管道栓塞,降低树木对水分的获取能力,造成树木生长下降^[31-33]。此现象在我国西北干旱区也较为普遍,例如侯迎等在崆峒山对油松的研究表明径向生长与夏季均温呈显著负相关关系^[34],在青藏高原东缘的研究中也发现冷杉的径向生长与前一年 8 月温度显著负相关^[35]。生长季初期平均最高气温升高可能导致土壤水分蒸发加剧,同时树木蒸腾作用增强会进一步加快土壤水分的消耗,春季高温导致的干旱加剧会对树木生长产生明显的抑制作用,故表现为树木径向生长与生长季早期温度呈显著负相关^[36]。Shi 等在东秦岭的研究发现油松径向生长与当年 5—6 月平均最高气温显著负相关^[15]。Sun 等在秦岭北部的研究同样表明油松生长受 5 月平均最高气温的限制^[16]。秦岭西部及北部 3 个样点 STD 年表均与当年生长季初期降水显著正相关,这是由于在较干旱的样点,生长季初期气温开始上升,若降水不足则容易造成严重的水分胁迫^[37],此时充足的降水能够提高土壤的含水量,为树木形成层启动提供必要的水分条件。在秦岭伏牛山的研究中也表现出当年 5 月降水对油松生长有显著促进作用^[15]。ZJZ、NWT 年表与前一年生长季中后期降水显

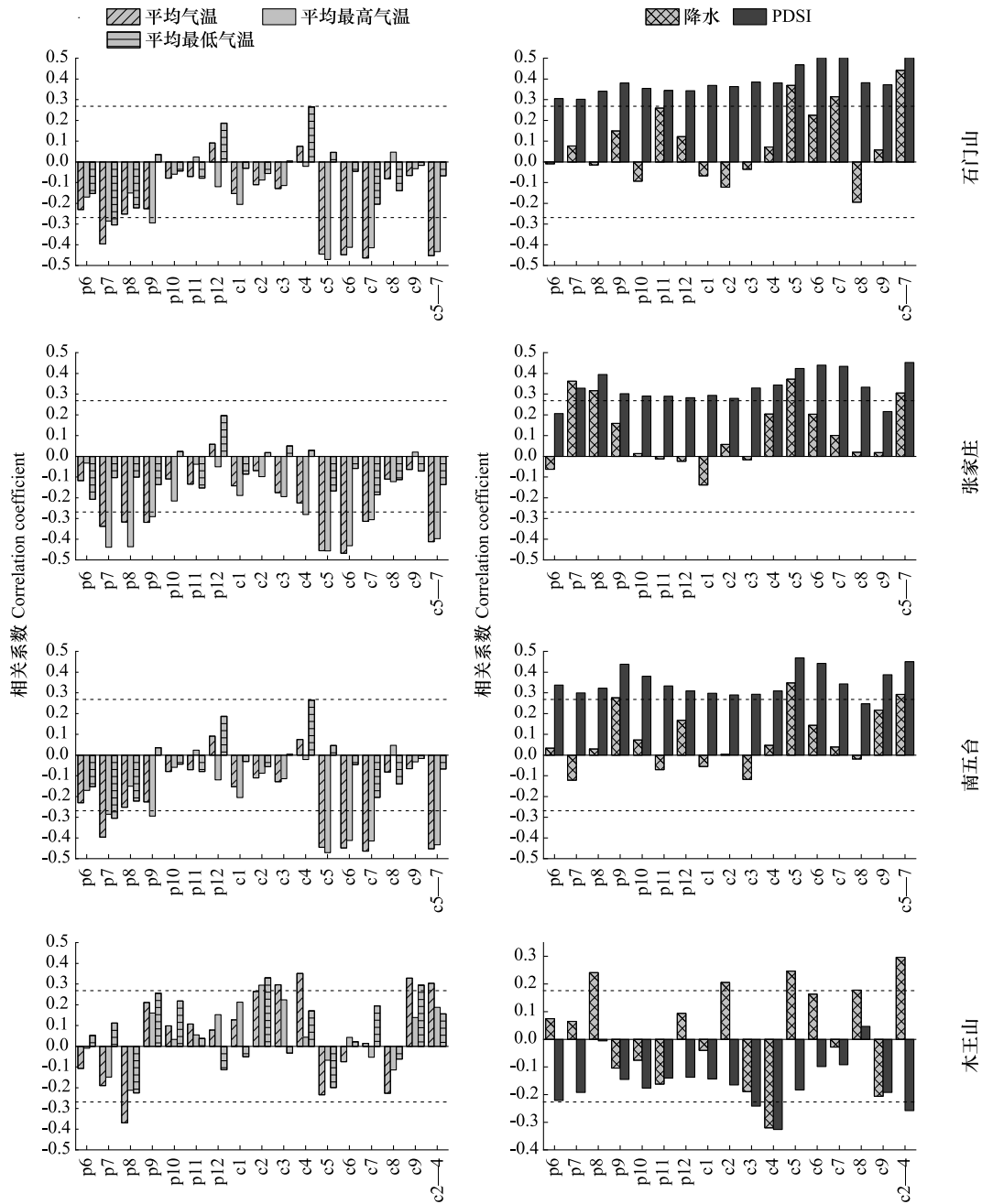


图5 各采样点标准年表与月气候因子在 1962—2017 年间的相关系数

Fig.5 Correlation coefficients of the standard chronology of each sampling point and the monthly climate factors during 1962—2017

虚线代表 0.05 水平的显著水平, p6—p12 表示前一年 6—12 月, c1—c9 表示当年 1—9 月; PDSI: 帕默尔干旱指数 Palmer drought severity index

著正相关,这是由于前一年降水量充沛,土壤含水量较高,有利于土壤水源的涵养,甚至可以延长生长季从而使树木积累更多的营养物质,为来年树木形成层活动提供良好条件^[37-39]。

秦岭南坡受东亚季风的影响,气候相对北坡更加湿润,树木生长的主要限制因子为温度^[18],降水对树木生长的限制作用不显著,故而秦岭中部南坡样点(MWS)树木径向生长与当年初春休眠期的气温表现为显著正相关。休眠期较高的温度能够减轻冻害,促进积雪融化,为生长季开始时树木生长提供充足的水分,甚至能够提前生长季开始时间^[40-41]。这与刘洪滨等在秦岭南坡的研究结论一致^[42]。Dang 等人的研究也表明早春温度是控制大陆气候区亚高山环境的主要限制因子^[43]。MWS 油松与生长季末期平均最低气温及平均气温

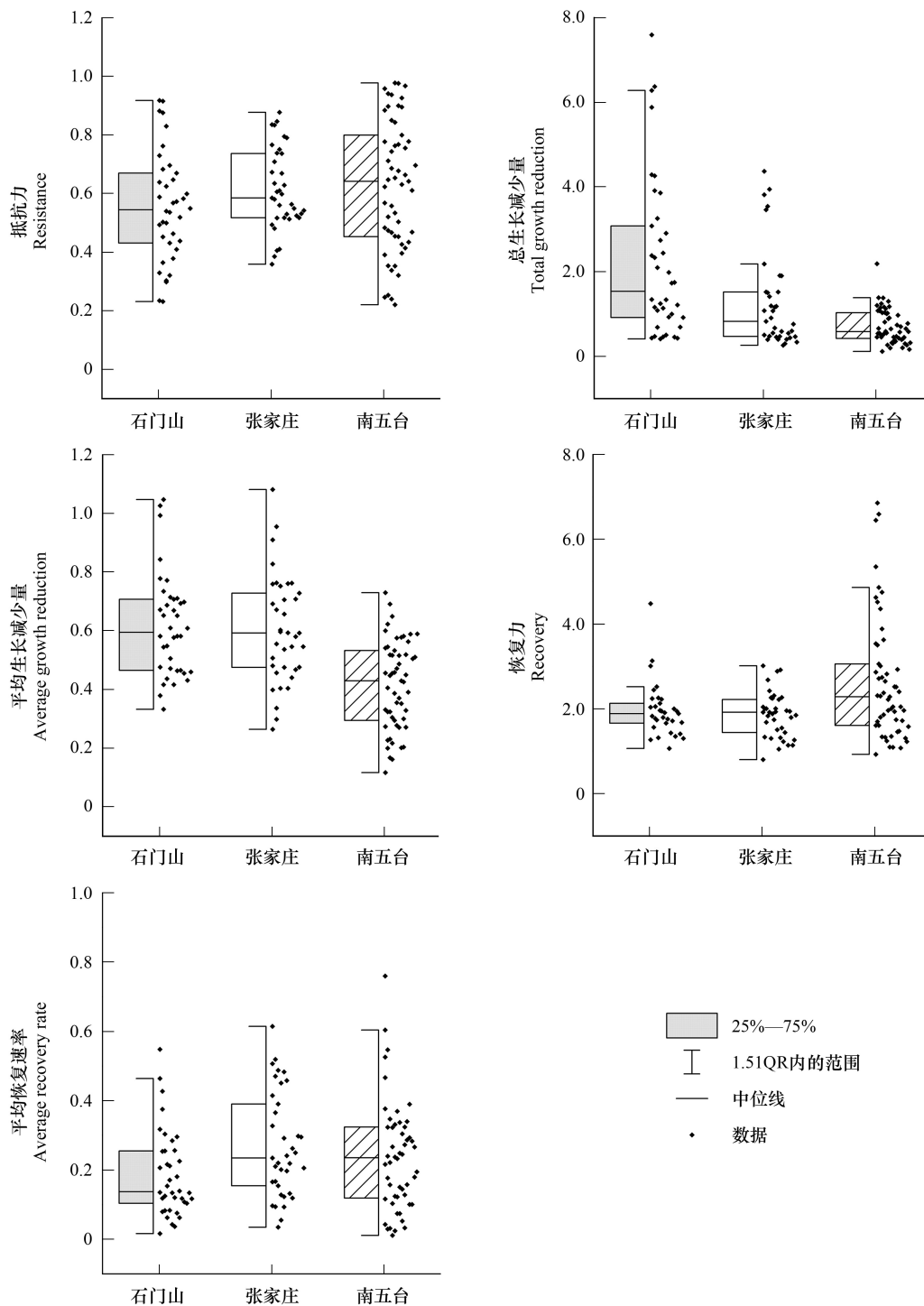


图 6 SMS、ZJZ、NWT 单根 STD 年表的抵抗力、总生长减少量、平均生长减少量、恢复力以及平均恢复速率

Fig.6 Resistance, total growth reduction, average growth reduction, resistance, and average recovery rate of each single STD chronology at SMS, ZJZ, and NWT

表现为显著正相关,这可能是因为油松生长季末期平均气温升高能够有效延长生长季的结束时间^[44]。MWS 年表与生长季早期降水显著负相关,初春积雪融化,土壤含水量充足,过多的降水会造成云量过多,阻碍光合作用,这也印证了 4 月气温与径向生长的显著正相关关系。Chen 等在秦岭西部舟曲县对岷江冷杉的研究也得出了相似的结论^[45]。

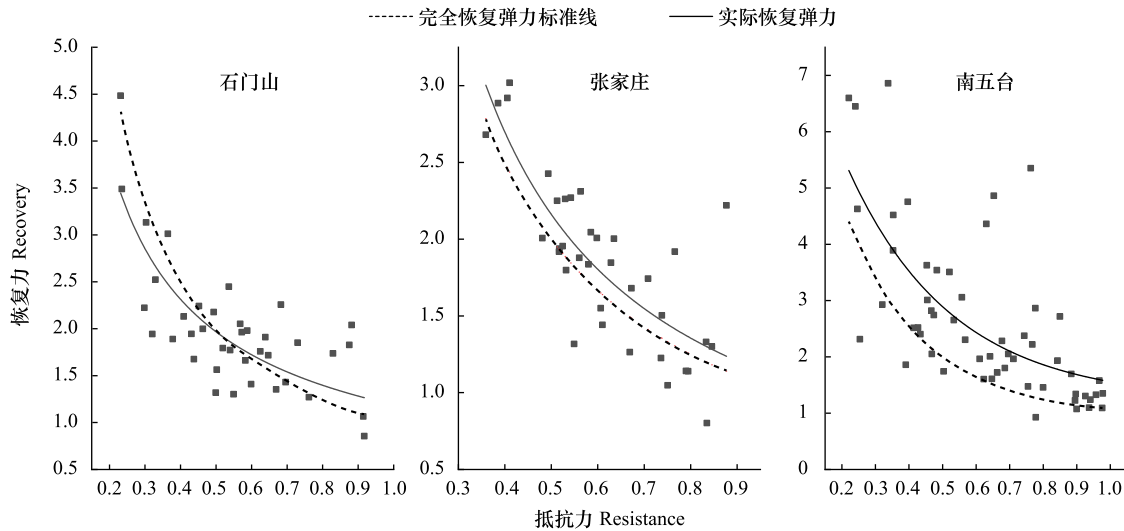


图7 SMS、ZJZ、NWT 树木对 2000 年干旱事件完全恢复弹力标准线和实际恢复弹力

Fig.7 The full resilience line and the actual resilience about drought event in 2000 at SMS, ZJZ, and NWT

3.2 秦岭中西部南北坡油松径向生长对干旱事件响应差异

研究通过分析 2000 年干旱事件前后树木径向生长状况变化发现,与秦岭南坡较为湿润的 ZJZ 相比,北坡 SMS 树木对干旱的抵抗能力较差,且恢复能力和恢复弹力也更差;而相较位于中部北坡的 NWT,西部北坡较干旱的 SMS 树木同样表现出应对干旱事件抵抗能力、恢复能力及恢复弹力更差的特点。这可能是由于 NWT 位于秦岭中部,气温和降水条件均优于西部,更利于树木生长。同时,NWT 树木对气候变化的敏感度低于 SMS、ZJZ 树木,因此受干旱事件产生的影响也相对较小,具有较强的抵抗力。NWT 树木在干旱发生后的生长减少量低,且气候条件适宜,更利于树木的生长,因此该处树木对干旱的恢复能力同样强于其它两样点,甚至很快可以恢复至干旱前的生长水平。传统研究发现,抵抗力较高的树木通常恢复力较低,两者之间通常呈现相反的关系,反映了树木应对干旱事件时抵抗能力和恢复能力之间的一种权衡,例如在对北美和欧洲 100 多个树种树木的年轮研究发现,干旱环境下树木径向生长对干旱的抵抗力和恢复力之间通常呈显著负相关^[24]。但有学者提出,这种抵抗力与恢复力的权衡可能是由于传统的计算方法所导致的,并不具有显著的实际意义^[28],因此本研究引用新的参数评估树木对干旱的抵抗能力和恢复能力,结果发现这种权衡现象并非在所有地区都存在。

树木应对干旱事件的能力会因区域干湿差异而有所不同,此现象在其他地区的研究中也有相应发现。例如有研究发现,西班牙东部干旱地区的地中海白松 (*Aleppo pine*) 比湿润地区树木的抵抗力更差^[22];在对祁连山青海云杉的研究中发现,西部较干旱地区树木的抵抗力同样比东部较湿润地区更差,且树木从干旱中恢复的能力主要取决于该地的降水量^[46],均与本文研究结果一致。Gazol 等对北美和欧洲 2000 多个样点的 100 多种树木的研究中发现,湿润区域的温带阔叶林对干旱有更强的抵抗力,而干旱半干旱区域的针叶林的抵抗力则更差^[21],同样印证了这一结论。然而,也有研究得出相反的结论,对欧洲山毛榉的研究发现,生长在该物种分布区干旱边缘的树木抵抗力更强^[23],这说明并非所有树木的抵抗力都表现为在湿润地区更强,因此在不同环境下分析树木径向生长应对干旱事件的能力和策略需要更深入的分析。抵抗力与恢复弹力的指标对树木径向生长应对干旱事件时树木的长期存活非常重要,有研究表明,对于恢复弹力较差的树木,在干旱发生后常会出现生长严重下降乃至死亡的现象。DeSoto 等利用超过 3500 棵树的存活和已死亡树木的树轮数据库分析发现,与存活树木相比,在缺水期间死亡的同树种树木对干旱事件的抵抗力较弱;对于被子植物,较低的抵抗力往往使得树木在干旱事件中有较高的死亡风险^[47]。因此在未来对研究区树木的管理与保护工作中,应更加关注西部北坡树木生长状况,中部树木则无需进行过多的人工干预。

4 结论

秦岭西部及北坡油松径向生长均受到前一年生长季中后期及当年生长季早中期高温的制约,且会受到生长季初期降水不足的影响。中部南坡样点的油松则与休眠期和当年生长季末期气温显著正相关,并受当年生长季早期降水不足的制约。总而言之,生长季气温升高所引发的水分匮乏,是研究区西部和北坡油松径向生长受限制的主要原因;且中部南坡树木受温度因子和水分的制约要明显弱于其他 3 个样点。西部及北坡的 3 个样点树木径向生长均受到 2000 年干旱事件的影响,通过对于干旱事件发生前后各样点油松生长状况的分析发现,秦岭西部北坡的油松相比西部南坡及中部北坡对于干旱具有更差的抵抗力及恢复力,这体现了干旱地区树木生长对气候变化的响应更为敏感的特征。本研究比较了秦岭中西部不同干湿环境下油松对气候因子响应及应对干旱事件能力的差异,可为气候变暖背景下该区域油松生长的管理及森林生态系统的保护提供理论依据。

致谢: 感谢张家庄林场工作人员在树轮样品采集中给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 葛全胜, 王芳, 王绍武, 程邦波. 对全球变暖认识的七个问题的确定与不确定性. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 1-6.
- [2] Vicente-Serrano S M, Camarero J J, Azorin-Molina C. Diverse responses of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(9): 1019-1030.
- [3] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [4] 贾飞飞, 孙翠洋, 孙红月, 李鑫. 昌岭山两个优势树种径向生长对气候变化的响应. *生态学报*, 2019, 39(17): 6332-6340.
- [5] Xu X T, Medvigy D, Trugman A T, Guan K, Good S P, Rodriguez-Iturbe I. Tree cover shows strong sensitivity to precipitation variability across the global tropics. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(4): 450-460.
- [6] Gazol A, Camarero J J, Vicente-Serrano S M, Sánchez-Salguero R, Gutiérrez E, de Luis M, Sangüesa-Barreda G, Novak K, Rozas V, Tiscar P A, Linares J C, Martín-Hernández N, del Castillo E M, Ribas M, García-González I, Silla F, Camisón A, Génova M, Olano J M, Longares L A, Hevia A, Tomás-Burguera M, Galván J D. Forest resilience to drought varies across biomes. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 2143-2158.
- [7] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, Fisher J B, Biondi F, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw J D, Wolf A, Huntzinger D N, Schaefer K, Cook R, Wei Y X, Fang Y Y, Hayes D, Huang M Y, Jain A, Tian H Q. Global patterns of drought recovery. *Nature*, 2017, 548(7666): 202-205.
- [8] 康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774-2784.
- [9] 周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化. *地理学报*, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [10] 延军平, 郑宇. 秦岭南北地区环境变化响应比较研究. *地理研究*, 2001, 20(5): 576-582.
- [11] 丁敏, 黄春长. 秦岭北麓平原对全球变暖的响应及其对果业发展的影响研究. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 235-239.
- [12] Herman F R. Tree rings and climate. *Forest Science*, 1978, 24(3): 409.
- [13] 华亚伟, 张红娟, 刘康. 基于油松树轮重建陕西省镇安县 165 年以来 3—4 月平均最高气温. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 381-387.
- [14] Song H M, Liu Y, Li Q, Gao N, Ma Y Y, Zhang Y H. Tree-Ring based May-July temperature reconstruction since AD 1630 on the western Loess Plateau, China. *PLoS One*, 2014, 9(4): e93504.
- [15] Shi J F, Li J B, Cook E R, Zhang X Y, Lu H Y. Growth response of *Pinus tabulaeformis* to climate along an elevation gradient in the eastern Qinling Mountains, central China. *Climate Research*, 2012, 53(2): 157-167.
- [16] Sun C F, Liu Y. Climate response of tree radial growth at different timescales in the Qinling Mountains. *PLoS One*, 2016, 11(8): e0160938.
- [17] Jin Q, Bai H Y, Su K, Li S H, Wang J. The response of tree-ring growth to climate at upper timberline of southern aspect of Mt. Taibai. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 49: 05003.
- [18] 王红桃, 包光. 秦岭及周边地区树木径向生长与气候因子的关系研究进展. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(1): 52-58.
- [19] Barbata A, Mejía-Chang M, Ogaya R, Voltas J, Dawson T E, Peñuelas J. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1213-1225.
- [20] Anderegg, W R L, Flint A, Huang C Y, Flint L, Berry J A, Davis F W, Sperry J S, Field C B. Tree mortality predicted from drought-induced vascular damage. *Nature Geoscience*, 2015, 8(5): 367-371.

- [21] Gazol A, Camarero J J, Anderegg W R L, Vicente-Serrano S M. Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(2): 166-176.
- [22] Gazol A, Ribas M, Gutiérrez E, Camarero J J. Aleppo pine forests from across Spain show drought-induced growth decline and partial recovery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 186-194.
- [23] Cavin L, Jump A S. Highest drought sensitivity and lowest resistance to growth suppression are found in the range core of the tree *Fagus sylvatica* L. not the equatorial range edge. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 362-379.
- [24] 傅抱璞, 李兆元. 秦岭山地的气候特点. *陕西气象*, 1983, (1): 1-11.
- [25] 张贇, 尹定财, 张卫国, 岳海涛, 杜杰次丹, 李秋平, 杨荣, 田昆. 普达措国家公园 2 个针叶树种径向生长对温度和降水的响应. *生态学报*, 2018, 38(15): 5383-5392.
- [26] 吴祥定, 邵雪梅. 中国秦岭地区树木年轮密度对气候响应的初步分析. *应用气象学报*, 1994, 5(2): 253-256.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/20481—2017 气象干旱等级. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [28] Schwarz J, Skiadreas G, Kohler M, Kunz J, Schnabel F, Vitali V, Bauhus J. Quantifying growth responses of trees to drought—a critique of commonly used resilience indices and recommendations for future studies. *Current Forestry Reports*, 2020, 6(3): 185-200.
- [29] Yamaguchi D K. Methods of dendrochronology, applications in the environmental sciences. *Arctic and Alpine Research*, 1991, 23(1): 120.
- [30] 陈力, 吴绍洪, 戴尔阜. 长白山红松和落叶松树轮宽度年表特征. *地理研究*, 2011, 30(6): 1147-1155.
- [31] Silva L C R, Anand M. Probing for the influence of atmospheric CO₂ and climate change on forest ecosystems across biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(1): 83-92.
- [32] Subedi N, Sharma M. Climate-diameter growth relationships of black spruce and jack pine trees in boreal Ontario, Canada. *Global Change Biology*, 2013, 19(2): 505-516.
- [33] Deslauriers A, Beaulieu M, Balducci L, Giovannelli A, Gagnon M J, Rossi S. Impact of warming and drought on carbon balance related to wood formation in black spruce. *Annals of Botany*, 2014, 114(2): 335-345.
- [34] 侯迎, 王乃昂, 李钢, 郑芳. 利用树轮资料重建 1751—2005 年崆峒山地区夏季温度变化. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 172-176.
- [35] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 刘普幸, 张永香, 张永, 田沁花. 阿尼玛卿山不同海拔祁连山圆柏树轮宽度年表特征对比分析. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 713-721.
- [36] 宋慧明, 刘禹, 梅若晨, 赵伯阳, Payomrat P, 张欣佳. 甘肃祁连山油松树轮宽度气候响应. *地球环境学报*, 2017, 8(2): 119-126.
- [37] 高尚玉, 鲁瑞洁, 强明瑞, 哈斯, 张登山, 陈原, 夏虹. 140 年来腾格里沙漠南缘树木年轮记录的降水量变化. *科学通报*, 2006, 51(3): 326-331.
- [38] 鲁瑞洁, 夏虹. 腾格里沙漠南缘油松树轮宽度变化及其对气候因子的响应. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 399-402.
- [39] 王亚军, 高尚玉, 马玉贞, 鲁瑞洁, 桑艳礼, 蒙红卫. 基于树轮重建的宁夏河东沙地西部公元 1899 年来年降水量的变化. *干旱区地理*, 2010, 33(3): 377-384.
- [40] Liu Y, Linderholm H W, Song H M, Cai Q F, Tian Q H, Sun J Y, Chen D L, Simelton E, Seftigen K, Tian H, Wang R Y, Bao G, An Z S. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qinling Mountains, central China. *Boreas*, 2009, 38(2): 285-291.
- [41] 李双双, 芦佳玉, 延军平, 刘宪锋, 孔锋, 王娟. 1970—2015 年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13-24.
- [42] 刘洪滨, 邵雪梅. 秦岭南坡佛坪 1789 年以来 1—4 月平均温度重建. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 188-196.
- [43] Dang H S, Jiang M X, Zhang Q F, Zhang Y J. Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain, China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1/3): 143-150.
- [44] 牛震敏. 基于树木年轮的川西高原气候变化历史重建[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [45] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Yu S L, Shang H M, Zhang T W, Zhang R B, Wang H Q, Qin L. Tree-ring based temperature reconstruction for the west Qinling Mountains (China): linkages to the High Asia, solar activity and Pacific-Atlantic Ocean. *Geochronometria*, 2014, 41(3): 234-244.
- [46] Zhang L N, Li H, Ran Y L, Wang K Y, Zeng X M, Liu X H. Regional and local moisture gradients drive the resistance to and recovery from drought of *Picea crassifolia* Kom. in the Qilian Mountains, Northwest China. *Forests*, 2019, 10(9): 817.
- [47] 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, Hereš 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, Suñez M L, Villalba R, Martínez-Vilalta J. Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 545.