

过去百年吕梁山南端油松生长特征及其与气候变化的关系

谢梅^{1,5}, 蔡秋芳^{1,2,3,4*}, 刘禹^{1,2,3,4}, 张涵玉^{1,5}, 李腾^{1,5}, 叶远达^{1,5}

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061
2. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061
3. 崂山实验室, 青岛 266237
4. 陕西关中平原区域生态环境变化与综合治理国家野外科学观测研究站, 西安 710061
5. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 理解树木生长对气候变化和人类活动干扰的响应有助于未来森林管理和双碳政策的落实。本文基于采自吕梁山南端的油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 树轮样本建立了标准树轮宽度年表。通过 Pearson 相关分析发现树轮年表对研究区 3—7 月土壤湿度 ($r=0.60$, $P<0.01$, $n=37$)、5—6 月平均最低温度 ($r=-0.37$, $P<0.01$, $n=63$) 和 5 月降水量 ($r=0.31$, $P<0.05$, $n=64$) 响应敏感, 说明水分条件 (降水和土壤湿度) 是影响研究区油松径向生长的主要限制因子, 温度则是通过调控土壤湿度进而影响树木径向生长过程。近百年来 (1926—2011 年), 研究区油松发生了三次生长释放事件 (1932 年, 1977—1980 年, 2001—2011 年) 和一次生长抑制事件 (1991—1994 年)。生长释放事件在次数、持续时间和发生强度上都高于生长抑制事件。适宜 (不适宜) 的水热组合能够促进生长释放 (抑制), 人类活动干扰也能够诱发生长事件。空间相关分析揭示树轮年表与研究区及周边较大范围的气候环境变化密切相关。本研究对深入了解该地区油松树种生长特征及其对气候与人类活动干扰的响应具有重要意义。

关键词: 生长事件; 油松; 树轮宽度; 生长 - 气候关系

Growth characteristics of *Pinus tabulaeformis* Carr. and its relationship with climate change in the south of Lüliang Mountains in the past century

XIE Mei^{1,5}, CAI Qiufang^{1,2,3,4*}, LIU Yu^{1,2,3,4}, ZHANG Hanyu^{1,5}, LI Teng^{1,5}, YE Yuanda^{1,5}

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
2. CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China
3. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China
4. National Observation and Research Station of Regional Ecological Environment Change and Comprehensive Management in the Guanzhong Plain, Shaanxi, Xi'an 710061, China
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

收稿日期: 2022-01-25; **录用日期:** 2022-04-27; **网络出版:** 2022-05-10

Received Date: 2022-01-25; **Accepted Date:** 2022-04-27; **Online first:** 2022-05-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB40010300); 崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202203300); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG2139)

Foundation Item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB40010300); Science and Technology Innovation Project of Laoshan Laboratory (LSKJ202203300); Open Fund of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (SKLLQG2139)

通信作者: 蔡秋芳, E-mail: caiqf@ieecas.cn

Corresponding Author: CAI Qiufang, E-mail: caiqf@ieecas.cn

引用格式: 谢梅, 蔡秋芳, 刘禹, 等. 2023. 过去百年吕梁山南端油松生长特征及其与气候变化的关系 [J]. 地球环境学报, 14(1): 62–73.

Citation: Xie M, Cai Q F, Liu Y, et al. 2023. Growth characteristics of *Pinus tabulaeformis* Carr. and its relationship with climate change in the south of Lüliang Mountains in the past century [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(1): 62–73.

Abstract: Background, aim, and scope Disturbance plays an important role in the ecosystems. To fully understand the law of climate/environment evolution and the mechanism by which human activity affects tree growth, it is necessary to explore the relationship between tree growth and climatic/environment factors, and the growth history of trees. In this study, climatic/environment signals in the tree-ring width chronology of *Pinus tabuliformis* Carr. in the southern Lüliang Mountains were explored, and the characteristics of tree growth were investigated. **Materials and methods** The tree-ring width STD chronology of *P. tabuliformis* in the south of the Lüliang Mountains (36°37'12"N, 111°12'00"E, 1530—1560 m) was developed based on 53 well cross-dated tree-ring cores. Pearson correlation analysis was adopted to analyze the relationship between tree-ring width and monthly/seasonal mean temperature, mean minimum temperature, total precipitation and 0—40 cm soil moisture. Percentage of growth change (GC) of *P. tabuliformis* was calculated to identify the growth release/inhibition events. When the GC is greater than or equal to 25%, the growth release event occurs, when the GC is less than or equal to -25%, the growth of *P. tabuliformis* is inhibited. Spatial correlation analysis (<http://climexp.knmi.nl/>) was performed to explore the relationship between tree growth and large-spatial area climatic/environment factors. **Results** The correlation analysis revealed that tree growth showed a significantly negative relationship with May—June mean minimum temperature ($r=-0.37$, $P<0.01$, $n=63$), whereas significantly positive relationships with May precipitation amount ($r=0.31$, $P<0.05$, $n=64$) and the March—July mean soil moisture ($r=0.60$, $P<0.01$, $n=37$). In the past century, tree growth release events occurred during three times (1932, 1977—1980 and 2001—2011), while growth inhibition occurred only once (1991—1994). **Discussion** The negative correlation between May—June mean minimum temperature and tree-ring width might be that high temperature resulted in water stress and then limited tree growth. Tree growth is positively correlated with May precipitation since water shortage in the early growing season would lead to narrow rings of *P. tabuliformis*. The soil moisture is determined by various climatic factors such as precipitation and temperature. The strong positive correlation between soil moisture and tree growth indicates that precipitation and temperature work together to control tree growth. Both the growth release and inhibition events can be attributed to the impacts of climate change. Growth release was generally induced by favorable climatic conditions, such as abundant precipitation and low temperatures during growing season. Growth inhibition was closely related to harsh climatic conditions, such as low precipitation and high temperature. Human activities, such as deforestation, might induce growth release events. **Conclusions** It showed that tree growth of *P. tabuliformis* in the study area was limited by hydrothermal conditions in the pre-growing and growing season. Growth release and growth inhibition occurred in the entire growth history of *P. tabuliformis* in the past century, and the growth events were closely related to the changes of environmental conditions. The growth of *P. tabuliformis* in the study area is also related to the large-scale climate change in North China, which means it can reflect the characteristics of climate change in North China to a certain extent. **Recommendations and perspectives** Tree-ring width can record a large amount of disturbance information, and further studies are needed to deeply understand disturbance in the study area.

Key words: growth events; *Pinus tabuliformis* Carr.; tree-ring width; growth-climate relationship

气候变化深刻影响着自然系统和人类社会的发展,但气候变化在各地区的表现和影响程度是不同的(任国玉等,2005; Song et al., 2012)。树木生长既受遗传因子控制,也受气候环境变化的影响。树木在不同气候条件影响下会生长出宽度各异的树木年轮(吴祥定,1990)。正常年份,

树木在一年中能够形成一圈完整且清晰的树轮,但在气候条件较为恶劣的年份,由于树木得不到足够的水分补给或合适的生长温度,只能形成窄窄的树轮甚至出现伪轮、缺轮现象。因此,树木年轮宽度的变化适合作为反映气候环境变化的指标,利用此指标已经成功挖掘多种气候环境信息

(蔡秋芳和刘禹, 2015; 蔡秋芳等, 2019; 张涵玉等, 2020; Zhang et al., 2022)。

森林是陆地生态系统的重要组成部分, 对全球气候与碳循环都具有重要意义。在全球变暖和人类活动加剧背景下, 大多数的森林生态系统都受到不同程度的扰动 (Anderegg et al., 2016; Fang and Zhang, 2019)。深入研究森林干扰史对准确评估气候变化和人类活动影响下的森林生态系统变化至关重要。生长释放事件是指树木受干扰后径向生长率明显增加的现象, 生长抑制事件则是指树木受干扰后径向生长率明显降低的现象 (王树芝和赵秀海, 2010)。生长事件能够反映树木对外界干扰的响应, 因此被广泛应用于林分干扰、森林衰退、生态弹性和生长动态等森林生态问题研究。国际上已涌现出大量研究成果 (Black and Abrams, 2003; Itaka et al., 2013; Piraino et al., 2017)。国内相关研究则开展得较少, 已有研究更多地关注青藏高原高寒区的森林生长史。如 Fang et al. (2018) 发现 18 世纪末青藏高原东北部树木相继出现了长达 19 a 的生长趋势下降现象与树木生长释放现象, 推测长时期的干旱条件造成森林死亡事件, 幸存树木由于可利用资源的增加而发生生长释放。Mou et al. (2019) 研究青海囊谦县过去 400 a 树木生长历史, 指出在 20 世纪发生了区域森林历史上最为强烈的生长衰退事件。程雪寒等 (2022) 通过青海都兰县古木研究得出由于转湿的气候条件是导致森林发生大范围生长释放的主要原因, 而人类活动干扰则有可能诱发局部林木发生生长释放事件。

吕梁山位于黄土高原东部, 山脉从北向南延伸约 400 km, 最高海拔超过 2800 m (王琰等, 2013; 杨晓艳等, 2018)。同时, 吕梁山处于我国 400 mm 降水等值线附近, 也是半湿润区向半干旱区过渡的地带, 属于气候变化敏感区。目前吕梁山树木年轮学研究多集中在山脉北部 (张文涛等, 2013; 王振威等, 2020) 和中部 (Cai et al., 2010), 南部 (蔡秋芳和刘禹, 2013) 相对较少, 且现有研究多集中在气候学领域 (Li et al., 2016), 对于区域森林生长动态的研究仍然缺乏。本文利用在吕梁山南端山西隰县上庄林场采集到的油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 树轮样本, 期望达到: (1) 建立隰县油松树轮宽度年表; (2) 研究油松径向生长与气候变化的关系; (3) 分析过

去百年中发生的树木生长释放及抑制事件, 及其与气候波动的联系。该研究对深入了解研究区油松树种生长特征及其对全球变化下的森林管理具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 树轮数据

上庄林场处于吕梁山支脉紫荆山、姑射山和五龙山会合地带, 最高峰海拔 2012 m, 最低处海拔 1090 m, 平均海拔 1450 m。采样点位于林场海拔 1530—1560 m 的一处山顶 (36°37'12"N, 111°12'00"E), 土壤层较厚, 为典型褐土。油松 (*Pinus tabulaeformis*) 为采样点冠层优势树种, 另有白皮松 (*Pinus bungeana*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、落叶松 (*Larix gmelinii*)、山杨 (*Populus davidiana*) 和白桦 (*Betula platyphylla*) 等幼树 (王月东, 2019)。2021 年 7 月在研究区选取 27 棵未受病虫害或人类活动扰动的健康油松, 利用生长锥在每棵树上采集 2 根树芯, 共采集到 54 根树芯样品。经过实验室处理, 剔除 1 根树芯, 最后使用 53 根健康树芯进行本次研究, 建立起 1895—2020 年的树轮宽度 STD 年表, 年表可信时段为 1926—2020 年。

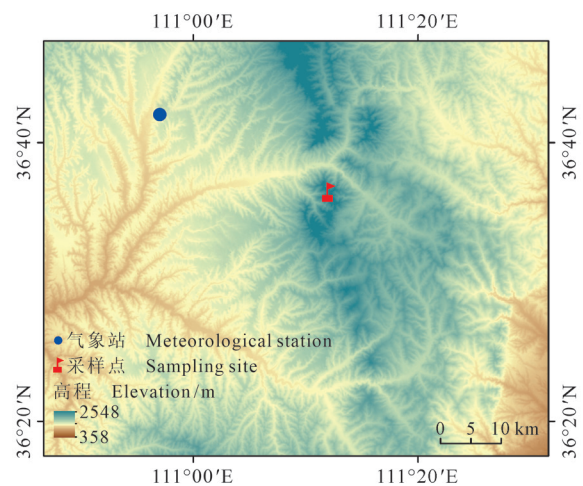


图 1 采样点和隰县气象站分布示意图

Fig. 1 Distribution of the sampling site and nearby Xixian meteorological station

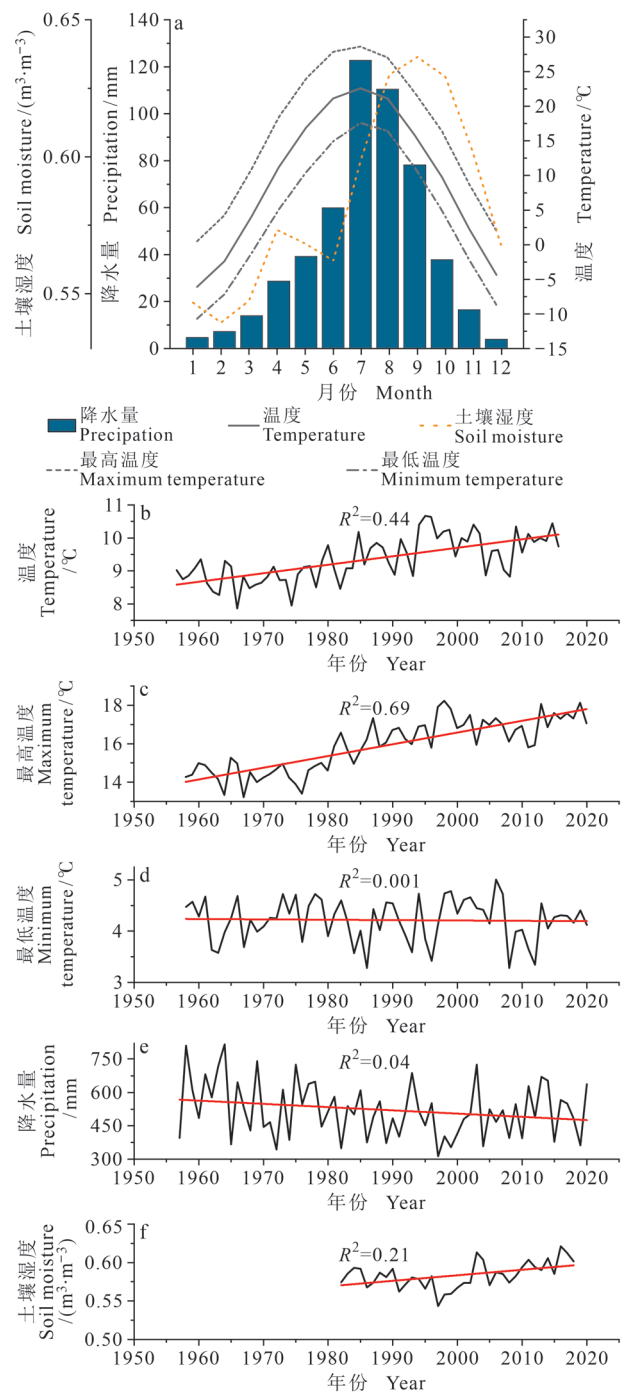
按照国际树木年轮分析标准 (吴祥定, 1990), 野外样本采集后装在纸管内带回实验室依次进行晾干、固定、砂纸打磨和目测定年与标记, 继而使用精度为 0.01 mm 的 LINTAB 仪器

测量年轮宽度。比较不同树芯的年轮宽度序列,使用COFECHA程序(Holmes, 1983)对原始测量序列和初步定年结果进行质量检验,鉴别可能存在的缺轮、伪轮以及测量误差,最终确定样芯上每个年轮准确的生长年份。由于年轮宽度序列中包含了与年龄相关的生长趋势导致的非气候信号,因而在制作年表过程中需要将这一非气候信号去除。本文选取负指数函数或斜率为负的线性函数去趋势方法对生长趋势进行拟合,最终通过ARSTAN程序(Cook, 1985)得到树轮宽度的标准化树轮年表(STD)、差值年表(RES)及自回归标准化年表(ARS)。相对RES年表来说,STD年表由于能够保存相对较多的低频和高频变化信息,常被用于气候学研究。本文选取STD年表作为分析对象,年表的起始年份以子样本信号强度 $SSS > 0.85$ (Wigley et al., 1984)为标准进行确定。

1.2 气候环境数据

隰县气象站($36^{\circ}42'00''N$, $110^{\circ}57'00''E$, 海拔为1052.70 m)与采样点空间上最为接近。据气象站多年(1957—2020年)资料显示(图2a),隰县年均温度为 $9.34^{\circ}C$,年平均降水总量为523.18 mm,气候较为干燥,其中最冷月(1月)平均温度为 $-6.04^{\circ}C$,最热月(7月)平均温度为 $22.6^{\circ}C$,全年降水主要集中在6—9月,为典型的温带季风气候,雨热同期。分析器测时段的气候记录,发现年平均温度和年平均最高温度均表现出显著的增加趋势(图2b,图2c),而年平均最低温度与年降水量则呈现出并不显著的降低趋势(图2d,图2e);其中年降水量波动较大,1997年降水量仅312.4 mm,1964年降水量则高达816.3 mm。本文分析选取了隰县站1957—2020年的月降水量和月平均温度与1958—2020年月平均最低、最高温度数据。

树木从环境中吸收的水分主要是通过根系从土壤中吸取,土壤水分含量的多少直接影响到树木径向生长状况。本研究从荷兰皇家气象研究所数据共享平台(<http://climexp.knmi.nl>)获得研究区0—40 cm的土壤湿度数据(1982—2018年)用于分析。从图2a可以看出研究区月平均土壤湿度从2月至9月波动递增,从10月至次年1月逐月递减。年平均土壤湿度呈显著递增趋势(图2f),在 $0.54\text{--}0.62\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内波动。



a: 温度、降水和土壤湿度月平均记录; b: 1957—2020 年平均温度; c: 1958—2020 年平均最高温度; d: 1958—2020 年平均最低温度; e: 1957—2020 年降水量; f: 1982—2018 年 0—40 cm 平均土壤湿度。

a: monthly mean temperature, mean minimum temperature, mean maximum temperature, precipitation and soil moisture records; b: annual mean temperature during 1957—2020; c: annual mean maximum temperature during 1958—2020; d: annual mean minimum temperature during 1958—2020; e: annual precipitation amount during 1957—2020; f: annual mean 0—40 cm soil moisture record during 1982—2018.

图2 隰县气象站气候记录与研究区土壤湿度格点数据
Fig. 2 Climatic records from Xixian meteorological station and the gridded soil moisture record in the study area

1.3 分析方法

为确定影响树木径向生长的气候环境限制因子, 计算了油松树轮宽度 STD 年表与气候环境因子之间的 Pearson 相关系数。考虑到“滞后效应”影响 (Cai and Liu, 2017; Cai et al., 2018; Cai et al., 2022), 选取上一年 10 月至当年 9 月的单月 and 不同连续月份组合的气候环境数据进行分析。

为确定过去百年树木的生长特征, 选取树木径向生长变化百分率 (growth change rate, GC) 这一指标来辨识径向生长变化中的生长抑制和生长释放事件 (Nowacki and Abrams, 1997)。

$$G = (M_2 - M_1) \div M_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: G 为树木径向生长变化百分率 (GC), M_1 与 M_2 分别是前 10 a (包含当年) 与随后 10 a (不含当年) 轮宽指数的均值。 G 为负值表示发生生长抑制, G 为正值则表示发生生长释放, $|G| < 25\%$ 时属于正常生长情况, 不作为真正的生长抑制或释放事件, $|G| \geq 25\%$ 时表示发生生长抑制或释放事件 (程雪寒等, 2022)。由于采用 10 a 滑动均值, 最终得到的年份为 1904—2011 年 (图 3b), 鉴于可信年表起始于 1926 年 (图 3a), 本文研究油松的生长特征时段为 1926—2011 年。

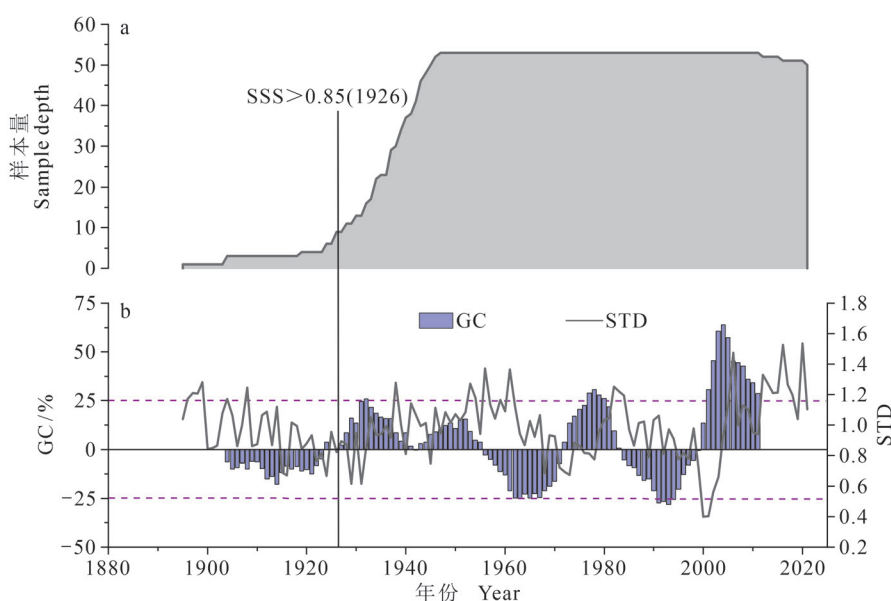


图 3 样本量 (a)、树轮宽度 STD 年表和生长变化百分率 (GC) (b)
Fig. 3 Sample depth (a), ring-width STD chronology and growth change rate (b)

为确定研究区树轮宽度所能反映气候环境信息的空间尺度, 在荷兰皇家气象研究所数据共享平台对油松树轮 STD 年表和气候环境要素开展空间相关分析。

2 研究结果

2.1 油松树轮宽度标准化年表特征

基于 53 个油松树轮宽度序列建立了 1895—2020 年的树轮宽度 STD 年表 (图 3), 年表可信时段为 1926—2020 年。表 1 给出年表的统计特征, 其中年表的平均敏感度为 0.16, 表明采样点环境条件较好, 油松年轮径向生长对气候的变化敏感性较差, 但平均敏感度的大部分值在 0.1—0.4,

样品能够用于树轮气候学分析。该年表的一阶自相关系数为 0.52, 说明油松生长受前一年环境要素影响较大, 分析时需考虑环境对树木生长的滞后影响。在公共分析时段 (1950—2020 年), 序列间平均相关系数为 0.38, 信噪比达 30.01, 样本总体解释量为 0.97, 表明不同树芯的年轮宽度逐年变化共性较高, 年表中扰动信号小, 包含了较多的环境信息, 适合用于树轮气候学研究。

2.2 树轮宽度对环境因子的响应

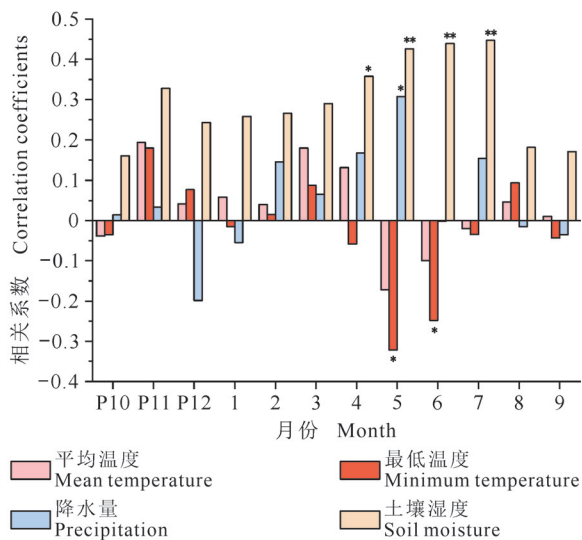
相关分析表明: 研究区油松树轮宽度 STD 年表与当年 5 月降水量呈显著正相关关系 ($r=0.31$, $P<0.05$), 而与 5 月 ($r=-0.32$, $P<0.05$)、6 月 ($r=-0.25$, $P<0.05$) 的平均最低温度显著负

相关(图 4)。此外, 树轮宽度与 4—7 月的单月土壤湿度相关性都达到了 95% 的置信度, 其中与当年 7 月土壤湿度的相关性最高, 达到 0.45 ($P < 0.01$, $n=37$)。由于月平均最高温度对树轮宽度的影响和平均温度、平均最低温度对树木生长的影响相似, 但程度不如后两者, 因此不再赘述。

在季节尺度上, STD 年表与 3—7 月土壤湿度 ($r=0.60$, $P < 0.01$)、2—5 月降水量 ($r=0.36$, $P < 0.01$) 及 5—6 月平均最低温度 ($r=-0.37$, $P < 0.01$) 都显著相关。

表 1 油松树轮宽度 STD 年表统计特征值
Tab. 1 Statistical characteristics of *Pinus tabuliformis* Carr. ring-width chronology

统计指标 Statistical item	标准年表 STD chronology
年表样本量 (芯 / 棵) Samples depth (cores/trees)	53/27
平均敏感度 Mean sensitivity	0.16
标准差 Standard deviation	0.20
一阶自相关系数 First-order autocorrelation	0.52
公共区间 (年) Common period (year)	1950—2020
所有样芯间相关系数 All series correlation	0.38
树内相关系数 Correlation within trees	0.62
树间相关系数 Correlation between trees	0.37
信噪比 Signal-noise ratio	30.01
样品总体解释量 Expressed population signal	0.97



P: 上一年; *: 95% 置信度; **: 99% 置信度。

P: the previous year; *: the 95% confidence level; **: the 99% confidence level.

图 4 树轮 STD 年表与气候环境因子相关分析结果
Fig. 4 Correlations between tree-ring STD chronology and climatic and environmental factors

2.3 树木径向生长变化百分率

油松树轮宽度标准年表(图 3b)显示: 树轮宽度指数在 1895—1898 年、1930—1960 年、1974—1981 年和 2004—2011 年增大, 2006 年轮宽度指数达最高值 1.47; 在 1899—1929 年、1961—1973 年和 1982—2003 年明显减小, 2000 年和 2001 年树轮宽度指数都降至最低值 0.4。

树轮宽度指数的递增趋势表现在 GC 为正值, 树轮宽度指数的递减趋势表现在 GC 为负值。油松径向生长变化百分率在 1932 年、1977—1980 年和 2001—2011 年都大于 25%, 其中 2003—2005 年大于 50%, 2004 年达最高值 64%。在 1962 年、1963 年、1965 年和 1967 年接近 -25%, 1991—1994 年小于 -25%, 1993 年降至最低值 -27.98%。

隰县油松在 1926—2011 年这 86 a 生长释放和抑制现象交替出现, 生长释放事件次数多于生长抑制事件, 主要的生长释放事件有三次, 分别发生在 1932 年、1977—1980 年和 2001—2011 年; 生长抑制事件仅 1 次, 发生于 1991—1994 年。三次生长释放持续 1—11 a, 生长抑制持续 4 a, 2001—2011 年生长释放事件持续的时间长于生长抑制持续的时间。另外, 三次生长释放事件中 GC 最高分别达到 25.75%、30.55% 和 64%, 而唯一一次生长抑制事件中径向生长变化百分率低至 -27.98%, 可见, 生长释放事件的总体强度大于生长抑制事件强度。

3 讨论

3.1 树木径向生长对气候变化的响应

油松为深根性树种, 喜温凉气候, 直径生长开始的平均温度为 9.3℃, 结束的平均温度为 15.9℃(徐化成, 1993), 即径向生长开始期在 3 月中旬或下旬, 径向生长结束期在 9 月, 油松耗水高峰期 5—8 月(李明明和李刚, 2021)。

油松的径向生长与 5—6 月平均最低温度存在负响应 ($r=-0.37$, $P < 0.01$)。5—6 月平均最低温度已达到 10℃以上, 较高的温度虽然有利于树木开展光合作用 (Yang et al., 2017), 但是此时雨季还未到来, 油松又是处于高耗水期, 高温同时加强了土壤水分的蒸发和植物体内的蒸腾作用, 产生生长季的水分胁迫进而限制树木生长 (Liang et al., 2007)。且最低温度一般发生在夜间, 树木主要进行呼吸作用, 温度过高导致呼吸作用加

强，不利于光合作用物质转换和储存。北方春夏两季气温普遍对树木径向生长产生负面效应，如内蒙古中部油松（Liu et al., 2017）、河南尧山油松（杨柳等，2021）和宁夏贺兰山油松（史江峰等，2006）等的径向生长变化均与当年春、夏季温度要素（平均温度、平均最高温度或平均最低温度）呈显著负相关。

油松的径向生长对 5 月降水存在正响应（ $r=0.31$, $P<0.05$ ），可能与这段时间降水量少有关。5 月平均温度增加到 16.9℃，油松处于生长季早期，形成层活跃，同时 5 月油松开始进入耗水高峰期，这一时期降水越多越有利于树木生长，易形成宽轮。而低降水量（5 月平均降水量为 39.16 mm，仅占全年的 7.5%）加上逐月递增的温度，势必导致土壤湿度降低（图 2a），从而减缓生长速率致使形成窄轮。到了 6—9 月，区域处于降水高峰期，降水量可达 371.31 mm，占全年的 70% 以上，丰沛的降水解决了油松径向生长缺水的问题，降水不再构成树木生长的限制条件，因而这一时期降水对油松径向生长不产生显著影响。河北木兰围场（崔明星等，2008）、宁夏罗山（王亚军等，2009）和宁夏贺兰山（Li et al., 2007）等研究中树木与降水量的关系类似于本文情况，除了不同地区时间上有一定的差异外，都是在雨季前树木生长对降水量呈显著正响应，在雨季时两者相关性减弱。

树轮年表与土壤湿度的关系整体强于温度与降水，尤其是在 3—7 月呈现出显著正相关关系（ $r=0.60$, $P<0.01$ ）。土壤湿度本质上体现的是水热组合情况，将土壤湿度与气候因子进行相关分析（表 2），可以发现研究区土壤湿度对降水的依赖性高，而与温度的关系较弱，说明温度对土壤湿度有影响，但影响有限。在降水的驱动下，土壤湿度成为制约油松径向生长的直接因子。由此可见，研究区油松径向生长的主要限制因子是水分条件（降水和土壤湿度），温度则是通过调控土壤湿度进而影响树木径向生长过程。3—7 月土壤湿度对油松生长的限制作用凸显，尤其是 5—7 月，降水量虽逐步递增，但继续升高的温度加快土壤水分的蒸散以及植物体的蒸腾作用（李广起等，2011；郭滨德等，2016），使得土壤湿度成为制约油松径向生长的因素。

表 2 土壤湿度与气候因子的关系		
Tab. 2 Correlation coefficients between soil moisture and climatic factors		
因子 Factors	年 Year ($n=37$)	3—7 月 March—July ($n=37$)
降水 Precipitation	0.570***	0.483**
平均温度 Mean temperature	-0.262	-0.224
最低温度 Minimum temperature	-0.056	-0.065
** 和 *** 分别代表 99% 和 99.9% 置信度。		
** and *** represent the 99% and 99.9% confidence level, respectively.		

3.2 油松生长抑制与释放的解释

通过树轮年表与气候环境因子的相关分析可知：油松径向生长与 3—7 月土壤湿度、5 月降水正相关，同时与 5—6 月平均最低温度负相关。进一步计算油松 STD 年表和 3—7 月土壤湿度、5 月降水、5—6 月平均最低温度的 21 a 滑动相关系数（图 5a），判断整个时段气候要素对油松径向生长影响的稳定性以及关键影响时段。由于窗口滑动长度为 21，因此得到的年表与 3—7 月土壤湿度滑动相关年份为 2002—2018 年，与 5 月降水滑动相关年份为 1977—2020 年，与 5—6 月平均最低温度滑动相关年份为 1978—2020 年。采用与树木生长变化百分率相同的方法计算这 3 个环境因子的变化率（图 5b—5d），由于采用的是 10 a 滑动均值，因此得到的降水变化率年份为 1966—2010 年、平均最低温度变化率年份为 1967—2010 年、土壤湿度的年份为 1991—2008 年。

图 5a 展示了各主要气候环境因子在时间维度上对树木径向生长的影响。其中，3—7 月土壤湿度与树轮宽度的滑动相关系数随时间变化虽然有波动，但始终对油松径向生长产生积极作用。5 月降水和 5—6 月平均最低温度对油松径向生长的影响表现出随时间变化一致增强的趋势，即从不相关转变为显著相关（ $P<0.05$ ）；5 月降水对油松的关键影响时段明显多于 5—6 月平均最低温度的关键影响时段。从图 5b—5d 中可以看出：降水变化率在最近几十年变化较大，波动范围为 -50.96%—144.75%，而平均最低温度和土壤湿度的变化率则相对变化较小，范围分别是 -7.37%—4.48% 和 -3.69%—3.75%。

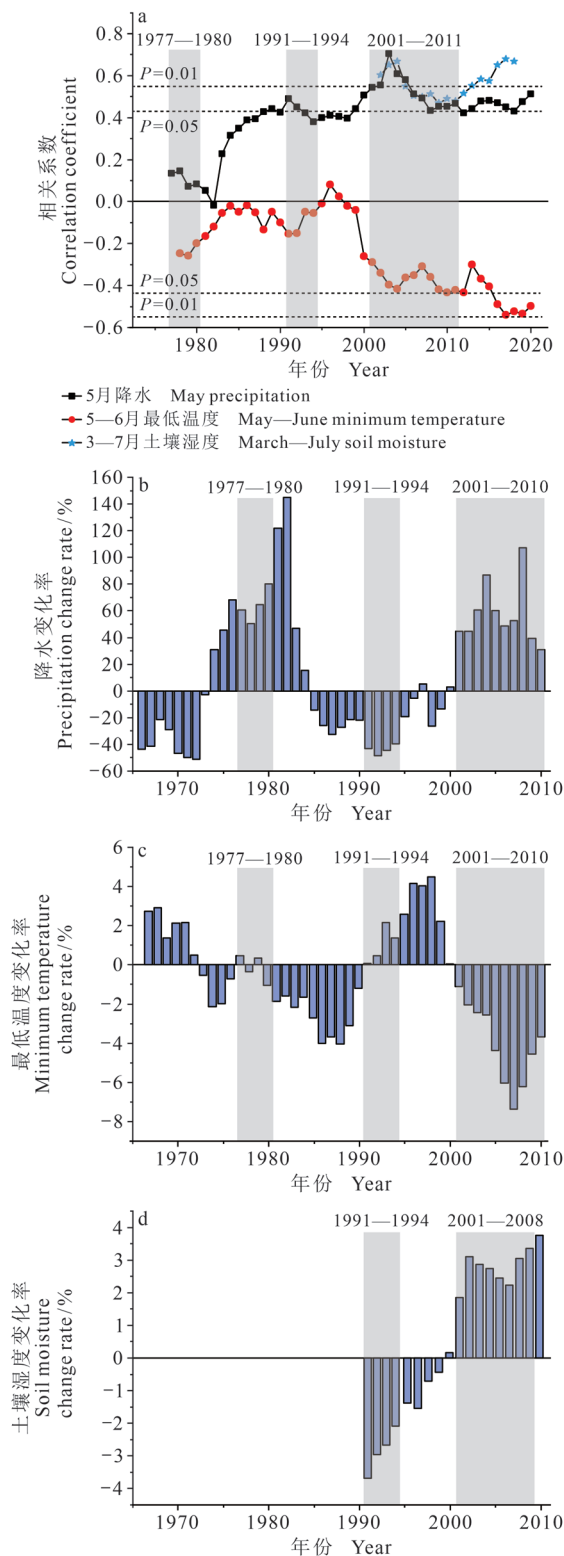


图5 油松树轮 STD 年表与气候环境因子的 21 a 滑动相关分析 (a) 与 5 月降水 (b)、5—6 月平均最低温度 (c) 和 3—7 月平均土壤湿度 (d) 变化率

Fig. 5 21-year running correlations between STD chronology and climatic/environmental factors (a), change rate of May precipitation (b), May—June minimum temperature (c) and March—July soil moisture (d)

1932 年 GC 为 25.75%, 油松发生生长释放事件 (图 3b)。由于缺乏器测资料, 无法得知 1932 年气候因子的具体变化情况。不少研究证明 1932 年之前的 20 世纪 20 年代我国气候出现大范围干旱和高温现象, 比如 Liu et al. (2017) 利用内蒙古中部油松重建区域 PDSI 序列, 揭示了 20 世纪 20 年代我国北方发生严重干旱事件; 陈旭东等 (2021) 认为 1929—1930 年我国气候经历“大旱—冷冬—洪涝”的极端模式。一般情况下, 持续的恶劣环境会促进树木在之后的正常年份出现生长释放 (赵玉芳, 2011; Fang et al., 2018)。山西长治 3 个样点的森林在 1930—1935 年同步发生生长释放事件 (张启等, 2017), 显然 1932 年的生长释放事件不是局地现象。一般情况下森林同步发生的生长抑制与释放现象, 极有可能是气候事件导致的, 人类活动往往触发局部林木发生生长事件 (程雪寒等, 2022)。因此, 1932 年生长释放事件发生的原因可能是 20 世纪 20 年代干旱气候环境使得采样区树木经历长时间的负面影响, 生长受制, 恶劣气候过后, 树木得到丰富的水资源等从而形成宽年轮。

1977—1980 年 GC 范围为 26.19%—30.55%, 油松发生生长释放事件 (图 3b)。滑动相关分析显示这时期 5 月降水量和 5—6 月平均最低温度都未能起到促进或抑制油松生长的作用 (图 5a)。图 5c 中 5—6 月平均最低温度变化率在 0 值附近波动, 同样印证了这 4 a 的 5—6 月平均最低温度变化不大, 且是处于平均水平, 对油松生长既无促进作用也无抑制作用。何如梦等 (2018) 通过研究山西临汾人工油松林指出: 1978—1981 年受气候影响, 样方内树木年轮宽度指数都在减小, 其中 1 个样方油松出现生长抑制现象, 该发现与本文结果相左。张启等 (2017) 利用 3 个样点的油松与白皮松探究山西长治森林生长事件历史, 并未发现 1977—1980 年存在生长释放事件。森林的生长抑制或释放现象的不一致性, 往往说明不存在共同的外部影响因子 (如气候环境变化)。综合本文数据 (图 5) 和其他学者的研究, 认为 1977—1980 年生长释放现象可能由人类活动或者微环境改变导致。

1991—1994 年 GC 范围为 -25.57%—-27.98%, 并且 1993 年达最低值 -27.98%, 油松发生生长抑制事件 (图 3b)。在这期间邻近的森林同样存在生长抑制现象 (张启等, 2017; 何如梦等,

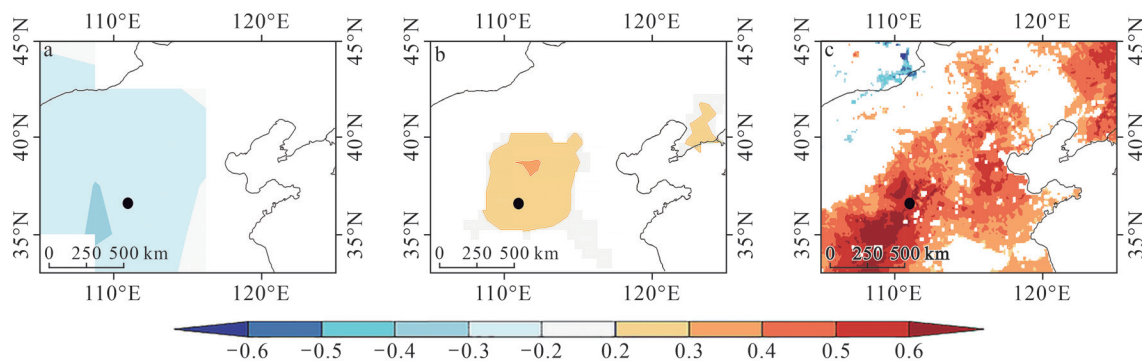
2018)。1991—1992 年, 5 月降水要素对油松生长起到了限制作用(图 5a), 降水变化率为 -43.27% — -48.61% (图 5b), 表明这 2 a 的 5 月降水量较少, 匮乏的降水满足不了生长季油松的正常生长。采样区土壤湿度高低主要依赖于降水量多少, 土壤湿度变化率在这 4 a 均处于负值, 范围为 -2.08% — -3.69% (图 5d), 土壤湿度低, 油松根系无法从中吸取更多的水分, 不利于产生宽年轮。平均最低温度变化率是 0.08% — 2.17% (图 5c), 表明这 4 a 的 5—6 月平均最低温度偏高, 可能是这一波动幅度处在油松忍受的范围内, 该要素并没有起到抑制油松生长的作用(图 5a)。可见, 1991—1994 年发生的生长抑制事件主要是由水分条件引起的。

2001—2011 年 GC 范围为 28.51% — 64% , 其中 2003—2005 年大于 50% , 2004 年油松生长变化率表现出历史最大值 64% , 油松发生长达 11 a 的最高强度的生长释放事件(图 3b)。在这 11 a 中, 5 月降水和 3—7 月土壤湿度要素始终对油松生长起作用, 2002—2005 年降水、2002—2004 年土壤湿度对油松的限制作用达到了极显著水平($P < 0.01$), 在此降水和土壤湿度影响最突出的时段油松达到其历史生长释放峰值; 5—6 月平均最低温度则仅在 2010 年对油松表现出显著影响(图 5a)。由于取 10 a 滑动均值计算, 只能得到 2001—2010 年平均最低温度和降水的变化率(图 5b—5c), 土壤湿度也仅能得到 2001—2008 年的变化率(图 5d), 但不影响对此期间环境因子总体情况的判断。2001—2010 年 5 月降水变化率为

30.77% — 107.32% , 表明这 10 a 的 5 月降水量丰沛, 可以满足生长季油松的正常生长; 2001—2008 年土壤湿度变化率同样处于较高值, 波动在 2.22% — 3.75% , 表示土壤中有较充足的水分, 可以通过根系满足油松生理活动需要; 2010 年 5—6 月平均最低温度变化率是 -3.67% , 温度偏低, 与水分条件组合一起创造出良好的局地环境条件, 利于油松径向正常生长, 因而出现生长释放事件。对邻近森林的研究同样发现这一时期存在生长释放事件(张启等, 2017; 何如梦等, 2018), 但其持续的时间都较短, 晋西的油松人工林生长释放时间段是 1999—2003 年, 晋东的油松和白皮松生长释放时间段是 1999—2004 年。人类砍伐活动可为生存下来的林木减少种间资源竞争压力, 易诱发林木生长释放现象(何志斌等, 2009)。考虑到本研究样品均来自同一采样区, 无法辨识生长事件与其他样地林木生长事件是否具有同步性, 不排除有人类活动干扰诱发生长事件的可能。此次长达 11 a 的生长释放可能是气候条件改善和人类活动共同作用的结果。

3.3 空间相关分析

图 6 表明油松树轮 STD 年表与格点 5—6 月平均最低温度、5 月降水量和 3—7 月 0—40 cm 土壤湿度在一定空间范围内具有显著的相关关系, 相关最好的区域主要分布在华北地区; 年表与东北地区一定空间范围的土壤湿度也存在显著正相关。表明山西隰县油松径向生长在一定程度上可以反映华北地区大范围空间尺度的气候环境变化特征, 具有记录过去环境信息的巨大潜力。



黑色圆圈代表采样点。The black dot represents the sampling site.

图 6 油松 STD 年表与 1926—2010 年 HadEX2 TNn 5—6 月平均最低温度 (a)、1926—2020 年 CRU TS 4.05 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格点 5 月降水量 (b) 和 1982—2018 年 FLDAS 3—7 月平均土壤湿度 (c) 的空间相关

Fig. 6 Spatial correlations between tree-ring STD chronology and the mean minimum temperature in May—June of HadEX2 TNn grid data during 1926—2010 (a), the precipitation in May of CRU TS 4.05 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ grid data during 1926—2020 (b) and soil moisture in March—July of FLDAS grid data during 1982—2018 (c)

4 结论

利用采自吕梁山南麓山西隰县的油松树轮样本,建立了该区域1926—2020年的树轮宽度STD年表,研究了该区域油松过去百年的生长特征,并探讨了树木径向生长与气候因子的关系,得到以下结论:

(1) 油松STD年表与3—7月土壤湿度、5月降水量以及5—6月平均最低温度的关系显著,表明研究区油松径向生长的主要限制因子是水分条件(降水和土壤湿度),温度则是通过调控土壤湿度进而影响树木径向生长过程。

(2) 过去百年间生长释放和生长抑制遍布油松生长的全过程,生长事件与其生长环境条件的变化紧密相关。主要的生长释放事件有三次,分别是1932年、1977—1980年和2001—2011年;生长抑制事件仅1次,发生于1991—1994年。生长释放事件从次数、持续时间和发生强度上都较生长抑制事件占优势。气候和人类活动都可诱发油松生长事件。在气候因素里,不管是生长抑制事件还是生长释放事件,水分要素相较于温度都发挥了更为重要的作用。

(3) 研究区油松生长与华北地区大范围气候环境变化有关,可在一定程度上反映华北地区大范围尺度的气候环境变化特征。

参考文献

蔡秋芳,刘禹,段丙闯. 2019. 树轮多指标研究在亚热带古气候重建中的作用——以桂林地区为例[J]. *地球环境学报*, 10(2): 141–148. [Cai Q F, Liu Y, Duan B C. 2019. Role of tree-ring multiproxy in palaeoclimate reconstruction in subtropical China, taking Guilin as an example [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(2): 141–148.]

蔡秋芳,刘禹. 2013. 山西五鹿山油松树轮宽度年表的建立及过去百余年来5—6月平均气温变化[J]. *第四纪研究*, 33(3): 511–517. [Cai Q F, Liu Y. 2013. The development of a tree-ring width chronology and the May—June mean temperature variability in Wulu Mountain, Shanxi Province of north-central China [J]. *Quaternary Sciences*, 33(3): 511–517.]

蔡秋芳,刘禹. 2015. 山西中条山白皮松和华山松径向生长对气候变化的响应及气候意义[J]. *地球环境学报*, 6(4): 208–218. [Cai Q F, Liu Y. 2015. Climatic responses of *Pinus bungeana* Zucc. and *Pinus armandii* Franch.

in Mt. Zhongtiao, Shanxi Province, and May—July temperature variations since 1920 [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(4): 208–218.]

陈旭东,田芳毓,陈思颖,等. 2021. 1929—1930年中国极端冷冬事件的重建[J]. *古地理学报*, 23(5): 1048–1060. [Chen X D, Tian F Y, Chen S Y, et al. 2021. Reconstruction of the extreme cold winter events in China during 1929—1930 [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(5): 1048–1060.]

程雪寒,王树芝,朱岩石. 2022. 丝绸之路青海道吐蕃时期墓葬出土木材记载的森林干扰史[J]. *第四纪研究*, 42(1): 192–205. [Cheng X H, Wang S Z, Zhu Y S. 2022. History of forest disturbances recorded by timbers unearthed from Tubo tombs alongside the Silk Road's Qinghai routes [J]. *Quaternary Sciences*, 42(1): 192–205.]

崔明星,何兴元,陈玮,等. 2008. 河北木兰围场油松年轮生态学的初步研究[J]. *应用生态学报*, 19(11): 2339–2345. [Cui M X, He X Y, Chen W, et al. 2008. Dendrochronology of Chinese pine in Mulan-Weichang, Hebei Province: a primary study [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(11): 2339–2345.]

郭滨德,张远东,王晓春. 2016. 川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异[J]. *应用生态学报*, 27(2): 354–364. [Guo B D, Zhang Y D, Wang X C. 2016. Response of *Picea purpurea* and *Abies faxoniana* tree rings at different slope aspects to rapid warming in western Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(2): 354–364.]

何如梦,王百田,于显威,等. 2018. 晋西黄土区油松林的生长释放与生长抑制[J]. *应用与环境生物学报*, 24(6): 1204–1210. [He R M, Wang B T, Yu X W, et al. 2018. Growth release and growth inhibition of *Pinus tabulaeformis* forest in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 24(6): 1204–1210.]

何志斌,赵文智,张立杰,等. 2009. 祁连山青海云杉林采伐干扰与恢复过程[J]. *林业科学*, 45(2): 12–16. [He Z B, Zhao W Z, Zhang L J, et al. 2009. Logging disturbance and the restoration process of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(2): 12–16.]

李广起,白帆,桑卫国. 2011. 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应[J]. *植物生态学报*, 35(5): 500–511. [Li G Q, Bai F, Sang W G. 2011. Different responses of radial growth to climate warming in

- Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* at their upper elevational limits in Changbai Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35(5): 500–511.]
- 李明明, 李 刚. 2021. 贺兰山地区植被冠层物候与树干形成层物候的关系 [J]. *应用生态学报*, 32(2): 495–502. [Li M M, Li G. 2021. Relationship between phenology of vegetation canopy and phenology of tree cambium in Helan Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(2): 495–502.]
- 任国玉, 郭 军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 63(6): 942–956. [Ren G Y, Guo J, Xu M Z, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 63(6): 942–956.]
- 史江峰, 刘 禹, 蔡秋芳, 等. 2006. 油松 (*Pinus tabulaeformis*) 树轮宽度与气候因子统计相关的生理机制——以贺兰山地区为例 [J]. *生态学报*, 26(3): 697–705. [Shi J F, Liu Y, Cai Q F, et al. 2006. A case study of physiological characteristics of statistical correlation between *Pinus tabulaeformis* tree-ring widths and climatic factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 26(3): 697–705.]
- 王树芝, 赵秀海. 2010. 树轮生态学研究进展 [J]. *世界林业研究*, 23(2): 17–21. [Wang S Z, Zhao X H. 2010. Advances in dendroecology research [J]. *World Forestry Research*, 23(2): 17–21.]
- 王亚军, 马玉贞, 郑影华, 等. 2009. 宁夏罗山油松 (*Pinus tabulaeformis*) 树轮宽度对气候因子的响应分析 [J]. *中国沙漠*, 29(5): 971–976. [Wang Y J, Ma Y Z, Zheng Y H, et al. 2009. Response of tree-ring width of *Pinus tabulaeformis* to climate factors in Luoshan Mountains of Ningxia [J]. *Journal of Desert Research*, 29(5): 971–976.]
- 王 琰, 俞艳霞, 张先平, 等. 2013. 吕梁山南段森林碳密度及其空间分布格局研究 [J]. *生态环境学报*, 22(10): 1658–1664. [Wang Y, Yu Y X, Zhang X P, et al. 2013. Forest carbon density and its spatial distribution in the south Lüliang Mountains [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(10): 1658–1664.]
- 王月东. 2019. 上庄林场科学构建森林生态体系探讨 [J]. *山西林业*, (5): 12–13, 48. [Wang Y D. 2019. Discussion on scientific construction of forest ecosystem in Shangzhuang forest farm [J]. *Forestry of Shanxi*, (5): 12–13, 48.]
- 王振威, 李 强, 刘 禹, 等. 2020. 树轮记录的吕梁山北部过去 175 年来帕尔默干旱指数变化 [J]. *地球环境学报*, 11(1): 72–80. [Wang Z W, Li Q, Liu Y, et al. 2020. PDSI variations recorded by tree rings in the northern Lüliang Mountains during the past 175 years [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(1): 72–80.]
- 吴祥定. 1990. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社: 77–157. [Wu X D. 1990. Tree rings and climate change [M]. Beijing: China Meteorological Press: 77–157.]
- 徐化成. 1993. 油松 [M]. 北京: 中国林业出版社: 125–126. [Xu H C. 1993. Chinese pine [M]. Beijing: China Forestry Publishing House: 125–126.]
- 杨 柳, 李静茹, 彭剑峰, 等. 2021. 1801 年以来河南尧山地区油松高温变化及影响机制 [J]. *生态学报*, 41(1): 79–91. [Yang L, Li J R, Peng J F, et al. 2021. Temperature variation and influence mechanism of *Pinus tabulaeformis* ring width recorded since 1801 at Yao Mountain, Henan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(1): 79–91.]
- 杨晓艳, 张世雄, 温 静, 等. 2018. 吕梁山森林群落草本层植物物种多样性的空间格局及其对模拟增温的响应 [J]. *生态学报*, 38(18): 6642–6654. [Yang X Y, Zhang S X, Wen J, et al. 2018. Spatial pattern of herbaceous plant species diversity and its changes due to simulated warming in the forest community of the Lüliang Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(18): 6642–6654.]
- 张涵玉, 蔡秋芳, 刘 禹. 2020. 大别山 1846—2010 年干湿变化记录——来自树轮宽度的证据 [J]. *地球环境学报*, 11(6): 648–659. [Zhang H Y, Cai Q F, Liu Y. 2020. Tree-ring records revealed the dry/wet variation of the Dabie Mountains during 1846—2010 [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(6): 648–659.]
- 张 启, 闫 明, 梁寒雪. 2017. 山西省长治市过去 150 年森林的生长抑制和释放历史 [J]. *生态学报*, 37(9): 3115–3123. [Zhang Q, Yan M, Liang H X. 2017. History of growth suppression and release events in forests in Changzhi Prefecture, Shanxi Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(9): 3115–3123.]
- 张文涛, 江 源, 王明昌, 等. 2013. 芦芽山阳坡不同海拔白杆径向生长对气候变暖的响应 [J]. *植物生态学报*, 37(12): 1142–1152. [Zhang W T, Jiang Y, Wang M C, et al. 2013. Responses of radial growth to climate warming in *Picea meyeri* trees growing at different elevations on the southern slope of Luya Mountain [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37(12): 1142–1152.]
- 赵玉芳. 2011. 黑龙江省红松生长释放判定及解释 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学. [Zhao Y F. 2011. Growth release

- determination and interpretation of Korean pine in Heilongjiang Province, China [D]. Harbin: Northeast Forestry University.]
- Anderegg W R L, Martinez-Vilalta J, Cailleret M, et al. 2016. When a tree dies in the forest: scaling climate-driven tree mortality to ecosystem water and carbon fluxes [J]. *Ecosystems*, 19(6): 1133–1147.
- Black B A, Abrams M D. 2003. Use of boundary-line growth patterns as a basis for dendroecological release criteria [J]. *Ecological Applications*, 13(6): 1733–1749.
- Cai Q F, Liu Y. 2017. Two centuries temperature variations over subtropical southeast China inferred from *Pinus taiwanensis* Hayata tree-ring width [J]. *Climate Dynamics*, 48(5): 1813–1825.
- Cai Q F, Liu Y, Bao G, et al. 2010. Tree-ring-based May—July mean temperature history for Lüliang Mountains, China, since 1836 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(26): 3008–3014.
- Cai Q F, Liu Y, Duan B C, et al. 2018. Regional difference of the start time of the recent warming in eastern China: prompted by a 165-year temperature record deduced from tree rings in the Dabie Mountains [J]. *Climate Dynamics*, 50(5): 2157–2168.
- Cai Q F, Qian H J, Liu Y, et al. 2022. Recent intensification of hydroclimatic change in the middle reaches of the Yangtze River Basin driven by PDO, ENSO and WPSH [J]. *Climate Dynamics*, 58(5): 1775–1790.
- Cook E R. 1985. A time-series analysis approach to tree-ring standardization [D]. Tucson: University of Arizona.
- Fang O Y, Alfaro R I, Zhang Q B. 2018. Tree rings reveal a major episode of forest mortality in the late 18th century on the Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 163: 44–50.
- Fang O Y, Zhang Q B. 2019. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 25(1): 245–253.
- Holmes R L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69–78.
- Itaka S, Yoshida S, Mizoue N, et al. 2013. Identifying dendroecological growth releases in old-growth *Cryptomeria japonica* forest on Yakushima Island, Japan [J]. *Journal of Forest Planning*, 19(1): 9–16.
- Li J B, Chen F H, Cook E R, et al. 2007. Drought reconstruction for north central China from tree rings: the value of the Palmer drought severity index [J]. *International Journal of Climatology*, 27(7): 903–909.
- Li Y J, Wang S Y, Niu J J, et al. 2016. Tree-ring-based reconstruction of drought variability (1792—2011) in the middle reaches of the Fen River, North China [J]. *Dendrochronologia*, 40: 1–11.
- Liang E Y, Shao X M, Liu H Y, et al. 2007. Tree-ring based PDSI reconstruction since AD 1842 in the Ortindag Sand Land, east Inner Mongolia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(19): 2715–2721.
- Liu Y, Zhang X J, Song H M, et al. 2017. Tree-ring-width-based PDSI reconstruction for central Inner Mongolia, China over the past 333 years [J]. *Climate Dynamics*, 48(3): 867–879.
- Mou Y M, Fang O Y, Cheng X H, et al. 2019. Recent tree growth decline unprecedented over the last four centuries in a Tibetan juniper forest [J]. *Journal of Forestry Research*, 30(4): 1429–1436.
- Nowacki G J, Abrams M D. 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstruction disturbance histories from presettlement-origin oaks [J]. *Ecological Monographs*, 67(2): 225–249.
- Piraino S, Abraham E M, Hadad M A, et al. 2017. Anthropogenic disturbance impact on the stem growth of *Prosopis flexuosa* DC forests in the Monte desert of Argentina: a dendroecological approach [J]. *Dendrochronologia*, 42: 63–72.
- Song Y F, Liu Y J, Ding Y H. 2012. A study of surface humidity changes in China during the recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 26(5): 541–553.
- Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2): 201–213.
- Yang B, He M H, Shishov V, et al. 2017. New perspective on spring vegetation phenology and global climate change based on Tibetan Plateau tree-ring data [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(27): 6966–6971.
- Zhang H Y, Cai Q F, Liu Y. 2022. Altitudinal difference of growth-climate response models in the north subtropical forests of China [J]. *Dendrochronologia*, 72: 125935. DOI: 10.1016/j.dendro.2022.125935.