北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

晋西黄土区油松人工林径向生长对气候变化的响应

梁龙玥 张建军 李阳 胡亚伟 赵炯昌 杨周

Response of radial growth of *Pinus tabuliformis* plantations to climate change in loess area of western Shanxi Province of northern China

Liang Longyue, Zhang Jianjun, Li Yang, Hu Yawei, Zhao Jiongchang, Yang Zhou

引用本文:
梁龙玥, 张建军, 李阳, 胡亚伟, 赵炯昌, 杨周. 晋西黄土区油松人工林径向生长对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):59–71. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240140
Liang Longyue, Zhang Jianjun, Li Yang, Hu Yawei, Zhao Jiongchang, Yang Zhou. Response of radial growth of *Pinus tabuliformis* plantations to climate change in loess area of western Shanxi Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):59–71. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240140

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240140

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

将乐林场马尾松树轮宽度对气候变化的响应

Response of *Pinus massoniana* tree–ring width in the Jiangle Area of Fujian Province to climate change

北京林业大学学报, 2019, 41(9): 30–39. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190067

普达措国家公园海拔上限3个针叶树种径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of three conifer trees to climate change at their upper distribution limits in Potatso National Park, Shangri–La, southwestern China

北京林业大学学报, 2017, 39(1): 43–51. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160184

沙地天然樟子松径向生长对干旱的响应

Climatological response of radial growth for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to drought in Hulun Buir Sandland, Inner Mongolia of northern China

北京林业大学学报, 2018, 40(7): 27–35. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170467

秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应

Age–dependent radial growth responses of *Larix chinensis* to climatic factors in Qinling Mountains, northwestern China

北京林业大学学报, 2017, 39(9): 58–65. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170161

晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应

Response of soil nutrients and their stoichiometric ratios to stand density in *Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81–93. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190287

大兴安岭北部不同降水梯度下兴安落叶松生长对升温的响应差异

Differences in response of *Larix gmelinii* growth to rising temperature under different precipitation gradients in northern Daxing’an Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(6): 1–14. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190007

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240140

晋西黄土区油松人工林径向生长对气候变化的响应

梁龙玥[1]　张建军[1,2]　李　阳[1]　胡亚伟[1]　赵炯昌[1]　杨　周[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083）

摘要:【目的】油松是黄土高原重要的水土保持树种。研究其径向生长对气候因子的响应机制，有助于深入了解其对气候变化的适应能力，为现有油松人工林管理和应对气候变化提供科学依据。**【方法】**以山西吉县蔡家川流域的油松人工林为研究对象，采集 49 棵油松的树盘样本。根据树木径向生长速率随树龄变化的特征，将油松生长变化趋势划分为快速生长期（1～7 年）、生长速率下降期（8～27 年）和生长平缓期（>28 年）3 个阶段。通过建立树轮宽度标准化年表，分析油松径向生长量的年际变化特征，并探讨不同生长阶段对气候因子的响应规律。**【结果】**（1）全生长周期内，油松径向生长主要受当年 3 月和 6 月温度、上年 5 月和当年 3 月相对湿度的影响。快速生长期油松径向生长主要受当年 3 月降水量、上年 3 月和当年 1 月相对湿度的影响；生长速率下降期主要受上年及当年 3 月、5—7 月温度以及上年及当年 8—9 月最低温的影响；生长平缓期油松径向生长与各气候因子无显著相关性。滑动相关分析结果表明，快速生长期油松对最高温度和降水的敏感性减弱，而生长速率下降期油松对最低温度和相对湿度的敏感性减弱。（2）气温突变前，快速生长期和生长速率下降期油松径向生长主要受降水和相对湿度影响显著（$P < 0.05$）；气温突变后，快速生长期的油松径向生长对降水和相对湿度的敏感性增强；而生长速率下降期油松径向生长对降水和相对湿度的敏感性减弱，对温度因子的敏感性增强。**【结论】**不同生长阶段油松人工林对气候响应的敏感性存在差异，快速生长期油松径向生长主要受降水量影响，生长速率下降期受最高温影响较大，生长平缓期受气候因素的干扰程度较小。若未来气候继续向暖化方向发展，油松径向生长将会进一步受限。

关键词：油松；树木年轮；径向生长；升温突变；气候响应
中图分类号：S791.254；S718.4　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)05−0059−13
引文格式：梁龙玥，张建军，李阳，等. 晋西黄土区油松人工林径向生长对气候变化的响应［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：59−71. Liang Longyue, Zhang Jianjun, Li Yang, et al. Response of radial growth of *Pinus tabuliformis* plantations to climate change in loess area of western Shanxi Province of northern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 59−71.

Response of radial growth of *Pinus tabuliformis* plantations to climate change in loess area of western Shanxi Province of northern China

Liang Longyue[1]　Zhang Jianjun[1,2]　Li Yang[1]　Hu Yawei[1]　Zhao Jiongchang[1]　Yang Zhou[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］*Pinus tabuliformis* is an important tree species for soil and water conservation on the Loess Plateau of northern China. Studying the response of radial growth of *P. tabuliformis* to climate factors is beneficial for deeply understanding the adaptability of *P. tabuliformis* plantations to climate change. Moreover, it can provide a basis for management and response to climate change of existing *P. tabuliformis* plantations.［**Method**］This study took *P. tabuliformis* plantations in the Caijiachuan Basin, Jixian County, Shanxi Province of northern China as the research object. Tree-disk samples of 49 *P. tabuliformis* trees were

收稿日期: 2024−05−07　**修回日期:** 2024−10−27
基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF130040103）。
第一作者: 梁龙玥。主要研究方向：林业生态工程。Email: lly598165682@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 张建军，教授，博士生导师。主要研究方向：水土保持与森林水文研究。Email: zhangjianjun@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

collected. Based on the characteristics of changes in radial growth rate of trees with age, growth process of *P. tabuliformis* was divided into three stages: rapid-growth stage (1−7 years), growth rate decline stage (8−27 years), and growth-plateau stage (> 28 years). By establishing a standardized tree-ring width chronology, interannual variation characteristics of radial growth of *P. tabuliformis* were analyzed, and the response laws of radial growth of *P. tabuliformis* to climate factors at different growth stages were identified. [**Result**] (1) During entire growth cycle, radial growth of *P. tabuliformis* was mainly affected by temperature factors in March and June of current year, as well as relative humidity in May of the previous year and March of current year. For *P. tabuliformis* in rapid growth stage, its radial growth was mainly affected by precipitation in March of current year, and the relative humidity in March of the previous year and January of the current year. For those in growth rate decline stage, the radial growth of *P. tabuliformis* was mainly influenced by temperature factors in March, May to July of the previous year and the current year, as well as the minimum temperature in August to September of the previous year and current year. For *P. tabuliformis* in growth plateau stage, there was no significant correlations between its radial growth and various climate factors. The results of sliding correlation analysis showed that the sensitivity of *P. tabuliformis* in early growth stage to the maximum temperature and precipitation decreased, and the sensitivity of *P. tabuliformis* in mid-growth stage to the minimum temperature and relative humidity weakened. (2) Before the abrupt change of temperature, the radial growth of *P. tabuliformis* in the rapid-growth stage and growth rate decline stage was significantly affected by precipitation and relative humidity ($P < 0.05$). After abrupt change of temperature, the sensitivity of radial growth of *P. tabuliformis* in rapid-growth stage to precipitation and relative humidity increased. However, the sensitivity of radial growth of *P. tabuliformis* in growth rate decline stage to precipitation and relative humidity decreased, while the sensitivity to temperature factors increased. [**Conclusion**] The sensitivity of artificially planted *P. tabuliformis* forests to climate varies at different growth stages. In the rapid-growth stage, its radial growth is mainly affected by precipitation; in the growth rate decline stage, by the maximum temperature; in the growth-plateau stage, the interference of climate factors is relatively small. If the climate continues to warm in the future, the radial growth of *P. tabuliformis* will be further restricted.

Key words: *Pinus tabuliformis*; tree ring; radial growth; temperature rise mutation; climate response

气候变化对生态环境的影响是全球关注的核心问题之一，也是研究和应对环境变化的重要内容，20 世纪以来，全球气候呈现变暖趋势[1]。气候与森林生态系统之间存在着密切而复杂的关系，剧烈的气候变化可能引起大面积植被变化，影响树木径向生长，进而影响森林生态系统的结构、功能以及森林生产力[2]。因此，探明树木径向生长与气候要素之间的关系，揭示不同生长阶段树木径向生长对气候变化的响应机制，明确气候变化对树木生长和森林生态环境的影响，从而为未来气候变化背景下水土保持植被的管理以及森林固碳释氧等生态服务功能的科学评价提供依据。

树木年轮具有定年准确、连续性强、高分辨率、复本量大等优点，被广泛应用于全球气候变化研究中[3]。年轮指数中不仅记录了树木自身生长与过去气候变化的信息，还保留了历史气候变化的数据[4]。目前，关于树木径向生长对气候变化响应的研究主要围绕不同海拔、不同坡向[5−7]的树木以及不同树种[8−10]的响应特征上，并在树轮早材、晚材宽度对气候因素的响应方面取得了显著进展[11−12]。近年来，不同龄组树木的径向生长对气候变化的响应引起了国内外的广泛关注[13]。Carrer 等[14]研究发现，欧洲落叶松（*Larix decidua*）和瑞士石松（*Pinus cembra*）树龄越大包含的气候信号越强；Linderholm 等[15]研究发现，成熟组的赤松（*Pinus sylvestris*）对气候因子的响应敏感度高于中龄组；许玲玲等[16]研究发现，温度是影响油松（*Pinus tabuliformis*）幼龄期和中龄期径向生长的主要因子，而降水量则是近熟期、成熟期以及过熟期木质部生长的主要制约因子；Wu 等[17]研究发现，天山雪岭云杉（*Picea schrenkiana*）幼树径向生长对气候的敏感性比老龄树更强；张晓等[18]研究发现，幼龄樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）径向生长主要受气温和降水的综合影响，而高龄樟子松主要受水分的影响。上述研究显示，根据龄组划分的树木生长对气候的响应在不同国家和地域呈现出显著差异。然而针对实测树轮宽度数据划分的不同生长阶段林分对气候的响应研究相对较少，因此我们对不同生长阶段油松径向生长对气候的响应展开研

究，为未来气候变化背景下人工林的经营管理提供依据。

黄土高原位于黄河中游，历史上由于人类过度开垦、放牧、乱砍滥伐，导致天然植被和草原严重退化。这种生态平衡的破坏加剧了水土流失，使该区域成为全球水土流失最严重的地区之一[19]。

油松作为优良的水土保持先锋树种，凭借其强适应力与耐干旱、瘠薄土壤的特性，在保持水土、改善生态环境、防风固沙等方面作用显著。因此，该树种已在黄土高原形成大面积人工林[20]。研究表明[21]，黄土高原气候正呈现“暖干化”趋势，与历史时期相比发生显著改变。在此背景下，剧烈气候变化对现有油松个体生长的影响机制尚不明确，特别是不同生长阶段的油松的响应差异亟待进一步研究。

因此，本研究以山西吉县蔡家川流域的油松人工林为研究对象，采用树木年轮学方法分析油松径向生长过程，探究其在不同生长阶段及气温突变前后油松径向生长对气候因子的响应规律，明确影响油松生长的主要气候因素，科学评价不同生长阶段油松人工林对气候变化的适应能力，旨在为黄土高原油松人工林的科学管理及生态服务功能的精准评估提供有力支撑。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域（110°39′45″～110°47′45″E，36°14′27″～36°18′23″N）。蔡家川流域呈东西走向，海拔 895～1 580 m，属于黄土梁状丘陵沟壑区，褐土，暖温带大陆性季风气候，多年平均降水量 575.9 mm，主要集中在 6—9 月。20 世纪 90 年代为改善生态环境，防治水土流失，蔡家川流域内营造了大面积以油松、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）等为主的人工林。

1.2　样本采集与处理

2023 年 4—8 月，根据最小面积法在小流域内设置 49 块大小为 20 m × 20 m 的油松人工林样地，调查样地海拔、坡向、坡度、样地密度等情况（表 1），进行每木检尺并记录详细信息。选取胸径、树高和形数基本符合林分平均胸径、平均树高和平均形数且干形中等的油松作为采集的标准木，记录标准木的经纬度信息（表 1），并对标准木进行树干生长解析，共获得 49 个标准木的胸径树盘。树盘采集后带回实验室，放置于通风处晾干，使用 200、400、600 目的砂纸依次打磨至树盘表面年轮清晰可见为止。

表 1　样地基本信息

Tab. 1　Basic information of sample plots

样地号	样地位置	样地密度/(株·hm^{-2})	海拔/m	坡度/(°)	坡向	标准木纬度	标准木经度
1	油松峁	1 100	1 125.0	31	阳坡	36°16′26″N	110°45′33″E
2	油松峁	1 025	1 087.0	28	阳坡	36°16′28″N	110°45′31″E
3	油松峁	700	1 212.0	27	阳坡	36°16′25″N	110°45′32″E
4	油松峁	1 250	1 278.0	30	阳坡	36°16′26″N	110°45′31″E
5	油松峁	1 125	1 267.0	32	阳坡	36°16′24″N	110°45′30″E
6	教场坪	2 150	1 075.0	30	阳坡	36°15′45″N	110°43′46″E
7	教场坪	1 875	1 171.0	27	阳坡	36°15′16″N	110°43′46″E
8	教场坪	2 100	1 196.0	30	阳坡	36°15′09″N	110°43′46″E
9	人祖山	4 475	1 252.0	34	阳坡	36°16′60″N	110°41′34″E
10	人祖山	4 000	1 290.0	29	阳坡	36°17′00″N	110°41′33″E
11	人祖山	3 600	1 255.0	28	阳坡	36°16′53″N	110°41′28″E
12	人祖山	3 600	1 304.0	26	阳坡	36°16′56″N	110°41′30″E
13	人祖山	4 000	1 240.0	31	阳坡	36°16′57″N	110°41′34″E
14	人祖山	4 000	1 298.8	31	阳坡	36°16′57″N	110°41′33″E
15	人祖山	5 050	1 277.3	28	阳坡	36°16′51″N	110°41′19″E
16	人祖山	3 200	1 284.2	25	阳坡	36°16′50″N	110°41′18″E
17	人祖山	4 775	1 308.3	25	阳坡	36°16′49″N	110°41′16″E
18	人祖山	5 550	1 307.0	25	阳坡	36°16′50″N	110°41′16″E
19	人祖山	5 900	1 273.0	28	阳坡	36°16′49″N	110°41′15″E
20	人祖山	5 900	1 277.1	33	阳坡	36°16′49″N	110°41′16″E

表 1(续)

Tab.1 (continued)

样地号	样地位置	样地密度/(株·hm^{-2})	海拔/m	坡度/(°)	坡向	标准木纬度	标准木经度
21	人祖山	3 650	1 275.2	27	阳坡	36°16′52″N	110°41′17″E
22	人祖山	2 900	1 336.2	34	阳坡	36°16′40″N	110°41′00″E
23	人祖山	2 975	1 336.5	30	阳坡	36°16′41″N	110°41′02″E
24	人祖山	3 500	1 270.0	30	阳坡	36°16′40″N	110°41′03″E
25	人祖山	3 700	1 301.3	30	阳坡	36°16′49″N	110°41′09″E
26	人祖山	4 025	1 323.0	29	阳坡	36°16′50″N	110°41′12″E
27	人祖山	3 000	1 333.1	31	阳坡	36°16′49″N	110°41′10″E
28	人祖山	5 250	1 333.6	26	阳坡	36°16′45″N	110°41′07″E
29	人祖山	2 875	1 339.8	34	阳坡	36°16′36″N	110°40′53″E
30	人祖山	4 050	1 355.7	28	阳坡	36°16′39″N	110°40′56″E
31	人祖山	2 900	1 358.0	26	阳坡	36°16′40″N	110°40′57″E
32	人祖山	4 088	1 344.0	30	阳坡	36°16′38″N	110°40′55″E
33	人祖山	2 600	1 354.0	25	阳坡	36°16′39″N	110°40′52″E
34	人祖山	2 075	1 343.8	30	阳坡	36°16′40″N	110°40′50″E
35	人祖山	1 866	1 350.0	28	阳坡	36°16′39″N	110°40′49″E
36	人祖山	2 175	1 403.0	30	阳坡	36°16′35″N	110°40′48″E
37	人祖山	1 875	1 346.8	28	阳坡	36°16′25″N	110°40′46″E
38	人祖山	4 200	1 279.0	32	阳坡	36°16′23″N	110°40′49″E
39	人祖山	3 288	1 370.3	33	阳坡	36°16′26″N	110°40′48″E
40	人祖山	4 225	1 410.4	28	阳坡	36°16′32″N	110°40′32″E
41	人祖山	3 675	1 394.6	24	阳坡	36°16′30″N	110°40′30″E
42	人祖山	3 821	1 348.2	28	阳坡	36°16′23″N	110°40′48″E
43	人祖山	3 400	1 350.0	28	阳坡	36°16′21″N	110°40′48″E
44	人祖山	4 500	1 339.7	26	阳坡	36°16′21″N	110°40′49″E
45	人祖山	4 425	1 365.7	30	阳坡	36°16′21″N	110°40′48″E
46	人祖山	4 100	1 357.0	31	阳坡	36°16′19″N	110°40′50″E
47	人祖山	3 000	1 368.4	30	阳坡	36°16′17″N	110°40′52″E
48	人祖山	3 000	1 374.2	33	阳坡	36°16′23″N	110°40′50″E
49	人祖山	3 550	1 227.0	33	阳坡	36°17′02″N	110°41′34″E

1.3 年表建立

利用分辨率为 6 800 × 9 359 dpi 的 EPSON V600 扫描仪对打磨清晰的树盘进行扫描。利用万深 LA-S 年轮分析测量系统进行油松树轮宽度的测量，每个树盘选取东南西北 4 个方向的树轮宽度序列求平均，得到原始树轮宽度信息。在获取初步测定的树轮宽度数据后，借助 COFECHA 程序开展交叉定年检验工作，把相关性差的序列剔除，剩余的序列用于年表的建立。交叉定年完成后的树轮宽度序列通过 R 语言“dplR”安装包中的“ModNegExp”方法进行去趋势，消除树木随年龄增长的内在生长趋势以及其他干扰信号的影响，最终建立了油松树轮宽度标准化年表。

1.4 气象数据

选择山西吉县气象站的气象数据进行分析。本研究采用的气象数据涵盖 1977—2020 年多年平均温度、最高温度、最低温度、降水量以及相对湿度。数据均来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。多年平均温度 10.5 ℃，7 月平均温度最高(23.6 ℃)，1 月平均温度最低(−4.7 ℃)(图 1)。多年平均降水量 575.9 mm，主要集中在 6—9 月，约占全年降水总量的 69 %。多年平均相对湿度 60%，4 月相对湿度最低(48%)，8 月相对湿度最高(74%)。

1.5 数据处理方法

采用 SPSS 软件计算标准年表与气候因子之间的相关系数，考虑到树木生长与气候因子响应的“滞

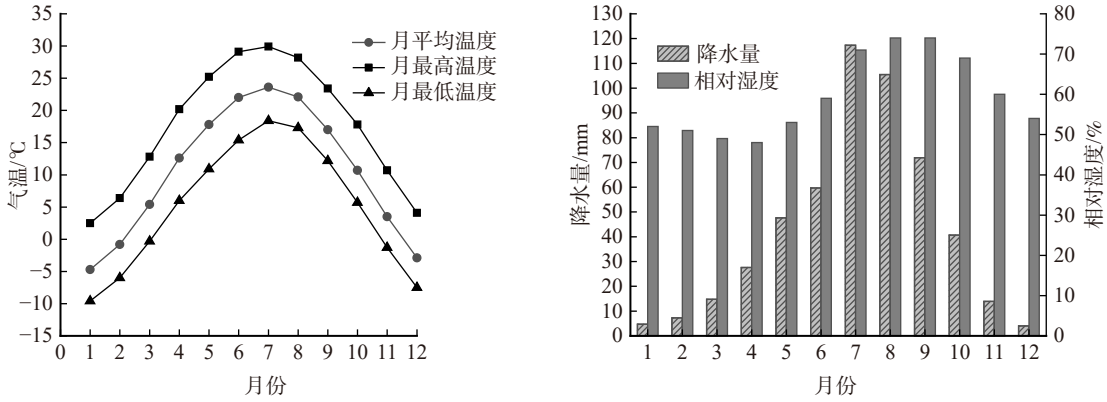


图 1　1977—2020 年气候因子变化趋势

Fig. 1　Changing trend of climate factors from 1977 to 2020

后效应”[22]，树轮宽度标准化年表与上年 3 月至当年 9 月共计 19 个月的月气象数据进行相关性分析，与前年、上年、当年共计 3 年的年气象数据进行相关性分析。采用 Mann-Kendall（M-K）趋势检测法检验油松树轮宽度的变化[23]，使用 R 语言的“treeclim”包对油松径向生长与气候因子进行滑动相关分析。使用 Origin 2022 进行全部图表的制作。

2　结果与分析

2.1　树轮年表特征

由表 2 可知，油松树轮年表的标准差 0.226 > 0.2，信噪比为 16.227，说明该年表所含的气候信息较多；平均敏感度数值 0.312 > 0.3，表明树轮宽度具有较强的高频波动信号；一阶自相关系数 0.838 > 0.5，说明油松更易受上一年气候的影响；样本间平均相关系数为 0.284，表明序列间的树轮宽度变化具有较好的一致性；样本总体代表性 0.942 > 0.85，表明样本包含的气候信息具有较好的区域代表性。综上所述，油松年表质量较好，可用于气候响应分析。

油松的树轮宽度指数总体上呈下降趋势（图 2），生长衰退现象比较明显。

2.2　气象数据变化趋势

图 3 为 1977—2020 年期间年平均温度、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度的变化趋势。由图 3 可见平均温度、最高温度、最低温度分别以 0.017、0.03 和 0.016 ℃/a 速率上升（$P < 0.05$）。年降水量以 0.99 mm/a 的趋势缓慢上升，而年相对湿度以每年 0.15 个百分点的趋势波动下降。

应用 M-K 突变检验验证气温突变（图 4），发现平均温度在 1995 年存在突变点，突变前（1977—1994 年）的年均温为 9.95 ℃，上升趋势为 0.025 ℃/a，突变后（1996—2020 年）的年均温为 10.95 ℃，上升趋势为 0.055 ℃/a，气温突变前后温度整体上升 1 ℃。年降水量的 M-K 检验表明在 1977—2020 年存在多个交点，且相邻交点在时间上相隔较近，意味着样本在交点时间区间内处于不稳定状态。

2.3　油松径向生长变化趋势

从油松树轮宽度的生长过程来看（图 5），呈现

表 2　油松年表的统计特征

Tab. 2　Statistical characteristics of *Pinus tabuliformis* chronology

年份区间	标准差	信噪比	平均敏感度	一阶自相关系数	样本间平均相关系数	样本总体代表性
1977—2020	0.226	16.227	0.312	0.838	0.284	0.942

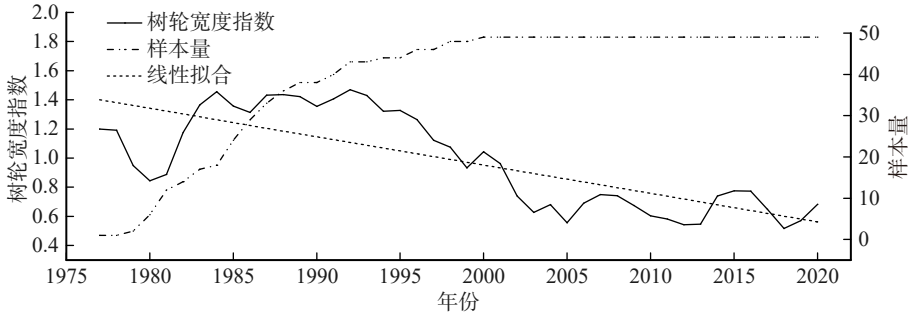


图 2　油松树轮宽度标准年表

Fig. 2　Standard chronology of *Pinus tabuliformis* tree ring width

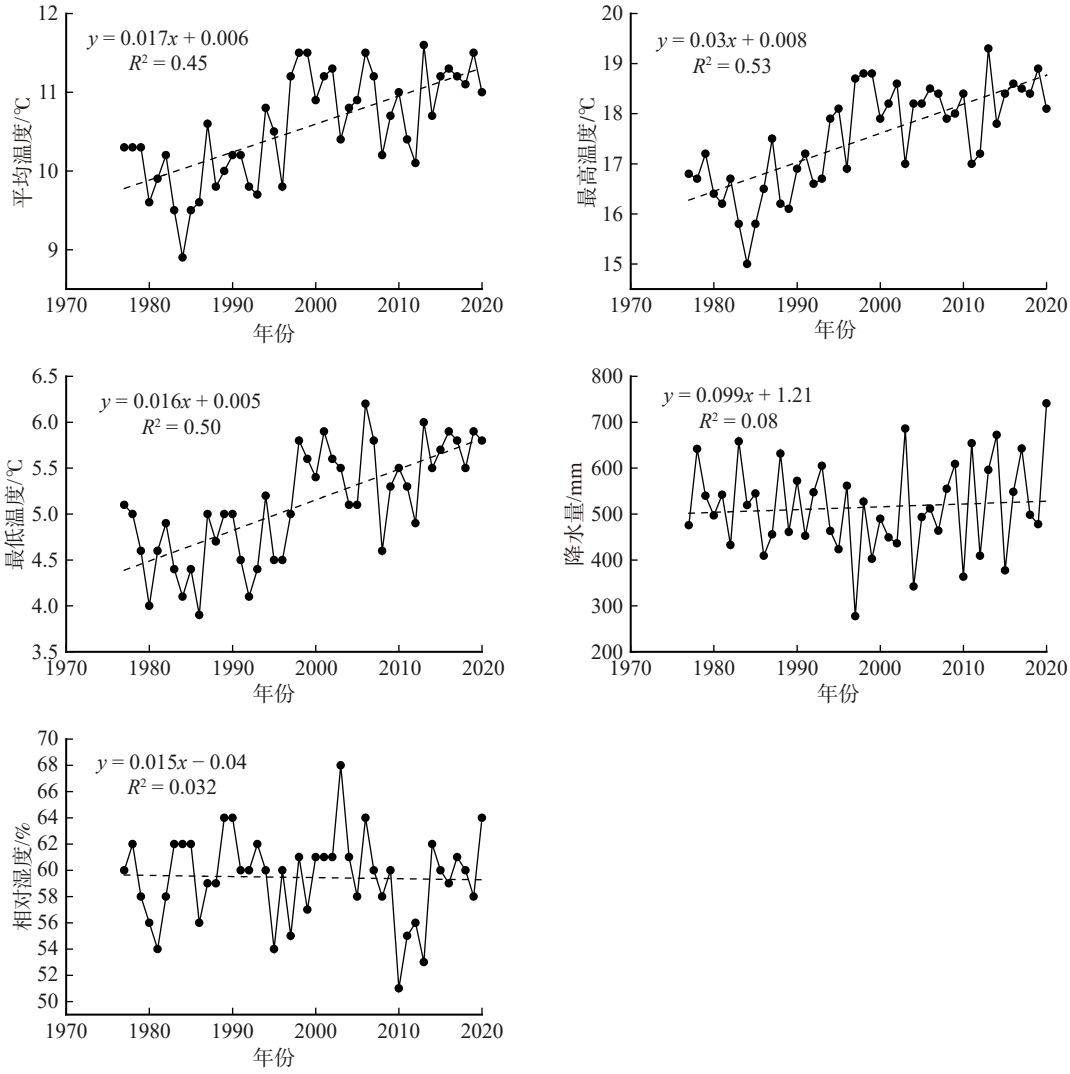
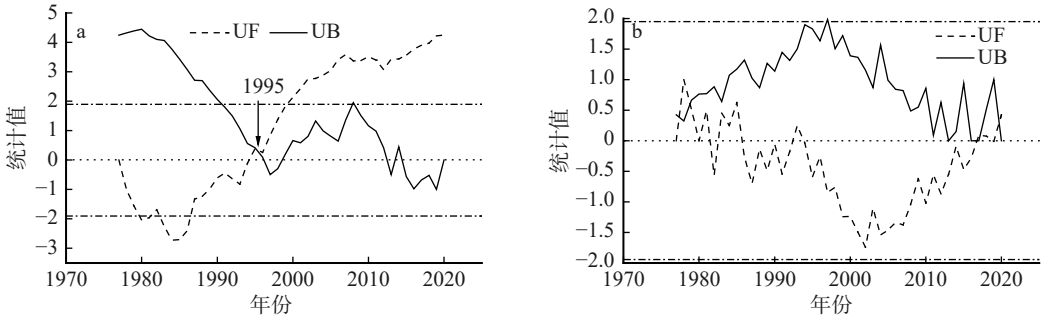


图 3 1977—2020 年各气候因子的年际变化趋势

Fig. 3 Interannual variation trend of climate factors from 1977 to 2020



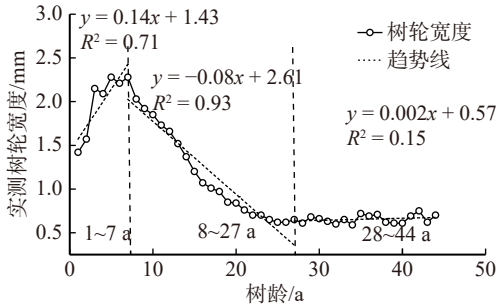
UF. 正向曼−肯德尔统计量; UB. 逆向曼−肯德尔统计量。

图 4 年平均温度(a)和降水量(b)的突变检验

Fig. 4 Mutation test of average temperature (a) and precipitation (b)

先增大后减小再平缓波动的趋势，在第 7 年时树轮宽度最大，达 2.28 mm，在第 32 年时树轮宽度最小，仅为 0.60 mm。根据油松树轮宽度随树龄的变化，油松的径向生长变化趋势分可为 3 个阶段：快速生长期(树龄 1~7 年)油松的树轮宽度以(0.14 ± 0.33) mm/a 的速率快速增长；生长速率下降期(树龄为 8 ~ 27 年)油松的径向生长量呈下降趋势，树轮宽度以(0.08 ± 0.23)mm/a 的速率快速减小；生长平缓期(树龄 > 28 年)油松树轮的生长量为平缓波动趋势，树轮宽度的平均生长率维持在(0.002 ± 0.05)mm/a。

气温突变前油松轮宽指数与平均温度同向增长，拟合斜率均大于 0；气温突变后，油松轮宽指数与均温的变化趋势相反，轮宽指数由上升变为下降趋势(图 6)。由此可见，气温突变对油松径向生长有



1~7 a. 快速生长期; 8~27 a. 生长速率下降期; 28~44 a. 生长平缓期。下同。

图 5　蔡家川流域油松实测树轮宽度随树龄变化趋势

Fig. 5　Variation trend of measured tree ring width of *Pinus tabuliformis* with tree age in Caijiachuan Watershed

一定影响，油松在气温突变前长势较好，而在突变升温后径向生长下降，表明这种突变升温对油松径向生长起到抑制作用。

2.4　油松径向生长与气候因子的相关性分析

根据不同生长阶段油松树轮宽度标准化年表与年气候因子相关分析可知(图 7)，快速生长期油松径向生长与前年的相对湿度显著正相关($P < 0.05$)；生长速率下降期油松径向生长与连续 3 年的温度因子呈极显著负相关($P < 0.01$)；生长平缓期油松径向生长与温度因子没有相关关系。总体来看，生长速率下降期径向生长的温度因素敏感性更强，说明温度是限制油松径向生长的主要因子。

全生长阶段油松标准年表与上年 3 月至当年 9 月间气候因子相关分析表明(图 8)，全生长阶段油松径向生长与上年和当年 3、5 月的最高温度显著负相关($P < 0.05$)，与上年和当年 6 月的均温和最高温极显著负相关($P < 0.01$)。在降水方面，与上年和当年 3 月降水量正相关($P < 0.05$)，与上年 5 月和当年 3 月相对湿度极显著正相关($P < 0.01$)。

不同生长阶段油松标准年表与气候要素相关分析表明(图 9)，在油松快速生长期阶段，其径向生长

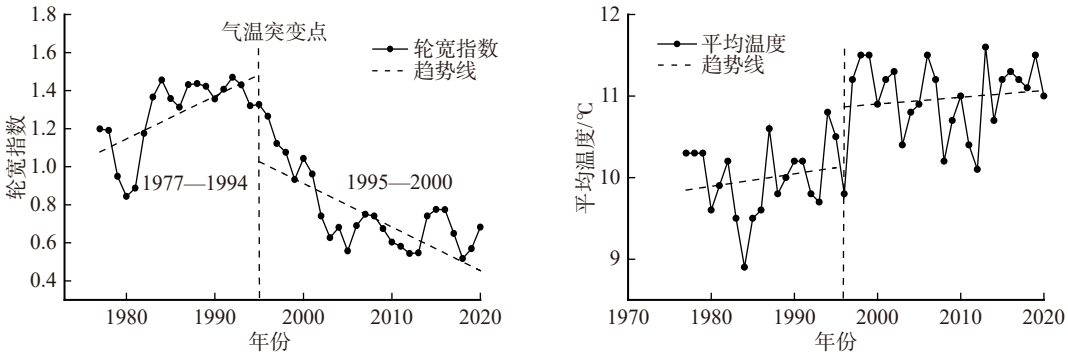
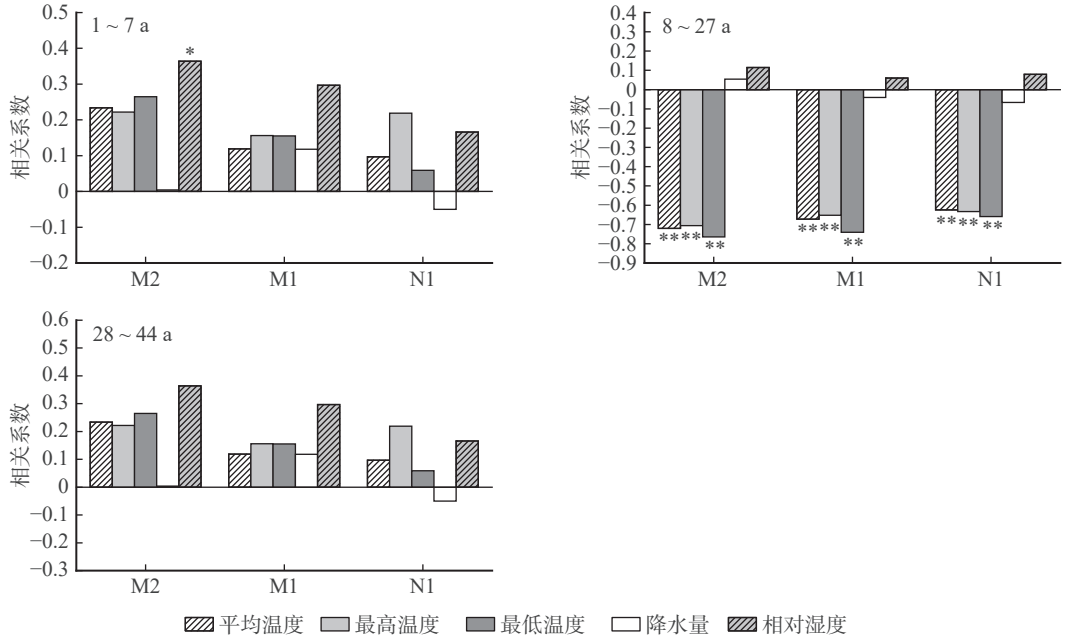


图 6　油松轮宽指数和平均温度突变趋势拟合

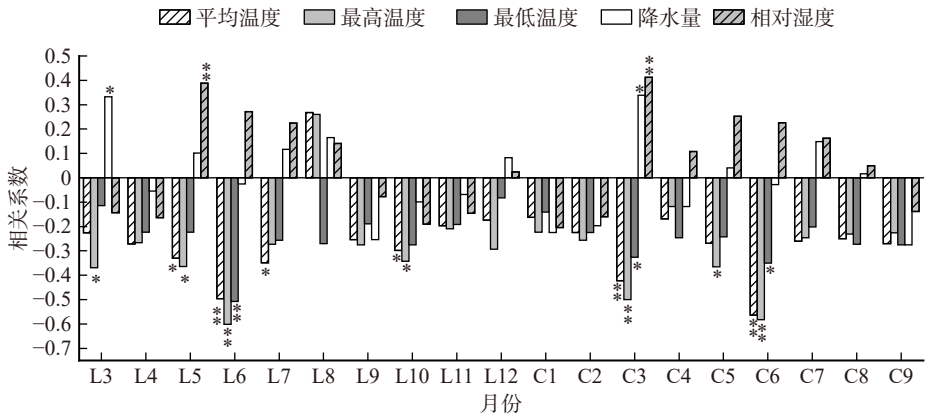
Fig. 6　Fitting of mutation trend of tree ring width index and average temperature of *P. tabuliformis*



*表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关; **表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。M1. 上年; M2. 前年; N1. 当年。下同。

图 7　油松树轮宽度标准化年表与年气候因子的响应

Fig. 7　Standardized tree ring width chronology of *Pinus tabuliformis* and response of annual climate factors



L3. L 表示上年、3 表示 3 月，C1. C 表示当年、1 表示 1 月，以此类推。下同。

图 8 全生长阶段油松年表与月气候因子的相关关系

Fig. 8 Correlations between chronology of *Pinus tabuliformis* in whole growth stage and monthly climate factors

与前一年 4 月最高温显著正相关($P < 0.05$)，与上年 10 月的平均温度显著负相关；当油松进入生长速率下降期，其径向生长同前一年以及当年 3 月、5—7 月期间各类温度指标均呈显著负相关关系($P < 0.05$)。在此期间，与这两年 8、9 月的最低温存在极显著负相关关系($P < 0.01$)，尤其与上年 10 月的平均温度负相关减弱；生长平缓期油松径向生长与温度因子不相关。就温度而言，生长速率下降期油松径向生长对温度的敏感性更强，其中对最低温度的响应更显著。

快速生长期油松径向生长与当年 3 月的降水极显著负相关($P < 0.01$)，与上年 3 月及当年 1 月的相对湿度显著正相关($P < 0.05$)。生长速率下降期油松径向生长和前一年以及当年 3 月的降水显著正相关($P < 0.05$)，与前一年和当年 9 月的降水显著负相关($P < 0.05$)，与前一年 5 月和当年 3 月的相对湿度呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。生长平缓期油松径向生长与降水和相对湿度均未达到显著水平。前两个阶段油松径向生长对降水和相对湿度响应的敏感性更强。

2.5 滑动相关分析

油松树轮宽度标准化年表的公共可靠区间(1977—2020 年)与气候因子进行滑动相关分析，由图 10 可见，快速生长期油松与上年 3 月和当年 1 月相对湿度相关关系在 1981 年前后发生了从正相关到负相关的转变。这一变化意味着处于快速生长期的油松，其径向生长和相对湿度之间的相关关系存在波动，正相关关系逐渐增强，相对湿度对油松径向生长有明显的促进作用。生长速率下降期油松与上年 6 月的最低温度的负相关关系在 1995 年之前较为稳定($P < 0.05$)，而 1995 年之后相关性变为不显著，并且相关系数值逐渐降低。油松径向生长与上年和当年 7 月平均温度，上年 7 月和当年 2 月最高温以及当年 5 月、上年和当年 6—7 月最低温呈现负相关且显著性逐渐下降。1981—2020 年期间，油松径向生长与上年和当年 6 月均温以及最高温呈显著负相关，但存在个别年份的波动情况，由此可见，温度升高影响油松径向生长。油松树轮宽度标准化年表与上年和当年 3 月均温、最高温的相关关系逐渐由负相关转变为正相关，且正相关关系也在逐渐增强。

2.6 突变升温前后油松径向生长与气候因子的相关性分析

由图 11 可知，气温突变前，全生长阶段油松径向生长与上年 6、10 月最高温、前一年 6 月平均温度、前一年 7 月降水均呈显著负相关($P < 0.05$)，与上年 7 月的最高温显著正相关($P < 0.05$)；气温突变后，油松径向生长与均温、最高温及降水均未达到显著水平。气温突变前油松径向生长与当年 5 月相对湿度极显著正相关($P < 0.01$)，与当年 6 月最低温、上年 7 月相对湿度显著负相关($P < 0.05$)，突变后径向生长与上年 9 月最低温及相对湿度均呈显著负相关($P < 0.05$)。总的来说，油松径向生长与气候变化关系不够稳定，油松生长对气候的敏感性有所降低。

由图 12 可知，突变升温前，快速生长期油松年表与当年 9 月最低温和降水呈显著负相关($P < 0.05$)，与上年 3 月相对湿度和当年 4 月降水量呈显著正相关($P < 0.05$)。气温突变后，油松年表与上年 9 月的最低温和当年 5 月的最高温显著正相关($P < 0.05$)，与当年 3 月降水量极显著负相关($P < 0.01$)，与当年 4 月的相对湿度极显著负相关($P < 0.01$)。

气温突变前，生长速率下降期油松年表与前一年 6 月、当年 9 月的最高温显著负相关($P < 0.05$)，与相对湿度显著正相关($P < 0.05$)。同时，油松年表

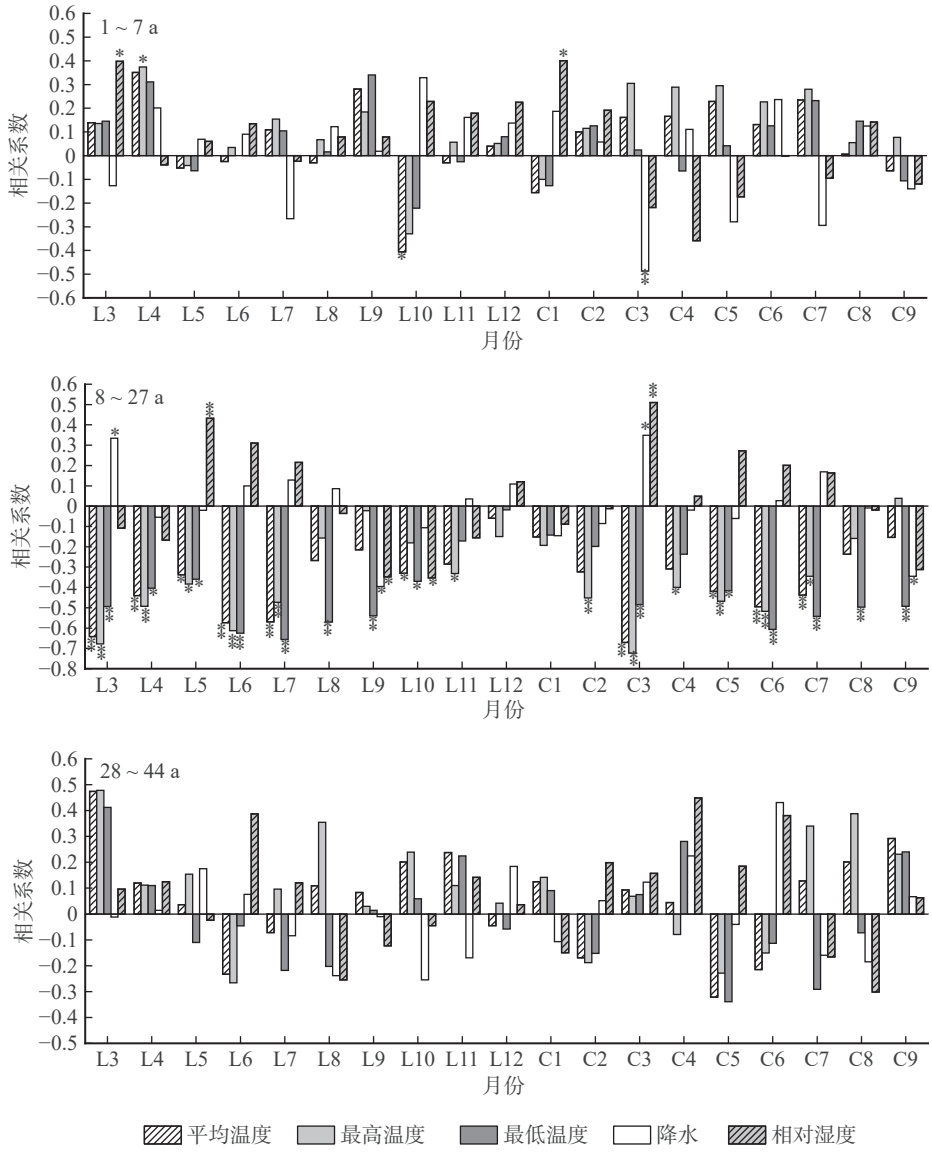


图 9　不同生长阶段油松年表与月气候因子的相关关系

Fig. 9　Correlations between chronologies of *Pinus tabuliformis* in different growth stages and monthly climate factors

与前一年 3 月相对湿度、当年 4 月的降水量呈极显著负相关($P < 0.01$)，与当年 5 月的相对湿度极显著正相关($P < 0.01$)。气温突变后，油松年表与前一年 3 月平均温度和最高温度、当年 3 月的最高温度显著负相关($P < 0.05$)，与上年 9 月最低温和相对湿度显著负相关($P < 0.05$)。

3　讨　　论

3.1　不同生长阶段油松径向生长对气候的响应

油松树轮宽度标准化年表与气候因子的相关性分析表明，油松径向生长对温度的响应明显强于降水和相对湿度。虽然温度和降水共同影响油松的整个生长阶段，但油松年表与温度的相关系数均高于降水和相对湿度，表明温度是影响油松径向生长的主要因子。快速生长期油松的生长主要受降水和相对湿度的影响。该阶段的油松生长重点主要是建立根系、扩展枝叶和适应环境，温度对这些生长过程影响较小[24]。幼龄油松的径向生长与当年 3 月降水呈显著负相关。由于幼树根系尚未发育完全，根系浅且不够发达，对水分的调节能力较弱，过多的降水会导致土壤含水量过高、透气性下降，导致植物根系缺氧，抑制树木的径向生长，这与崔佳月等[25]对嵩山地区油松的研究结果一致。幼龄油松的径向生长与上年 3 月和当年 1 月的相对湿度显著正相关。在气温较低的时期，较高的相对湿度可形成“水汽保温层”，减少幼树的热量散失，降低冻害风险[26]。生长速率下降期油松的主要受温度制约。该阶段油松根系已较为发达，对短期水分变化具有一定的缓冲能力，但温度仍是维持其代谢的关键因素。过高或过低的温度均会阻碍有机物合成与积累，进而影响径向生长。生长速率下降期油松径向生长与生长季(6—9 月)最低温呈显著负相关。最低温的回升会增

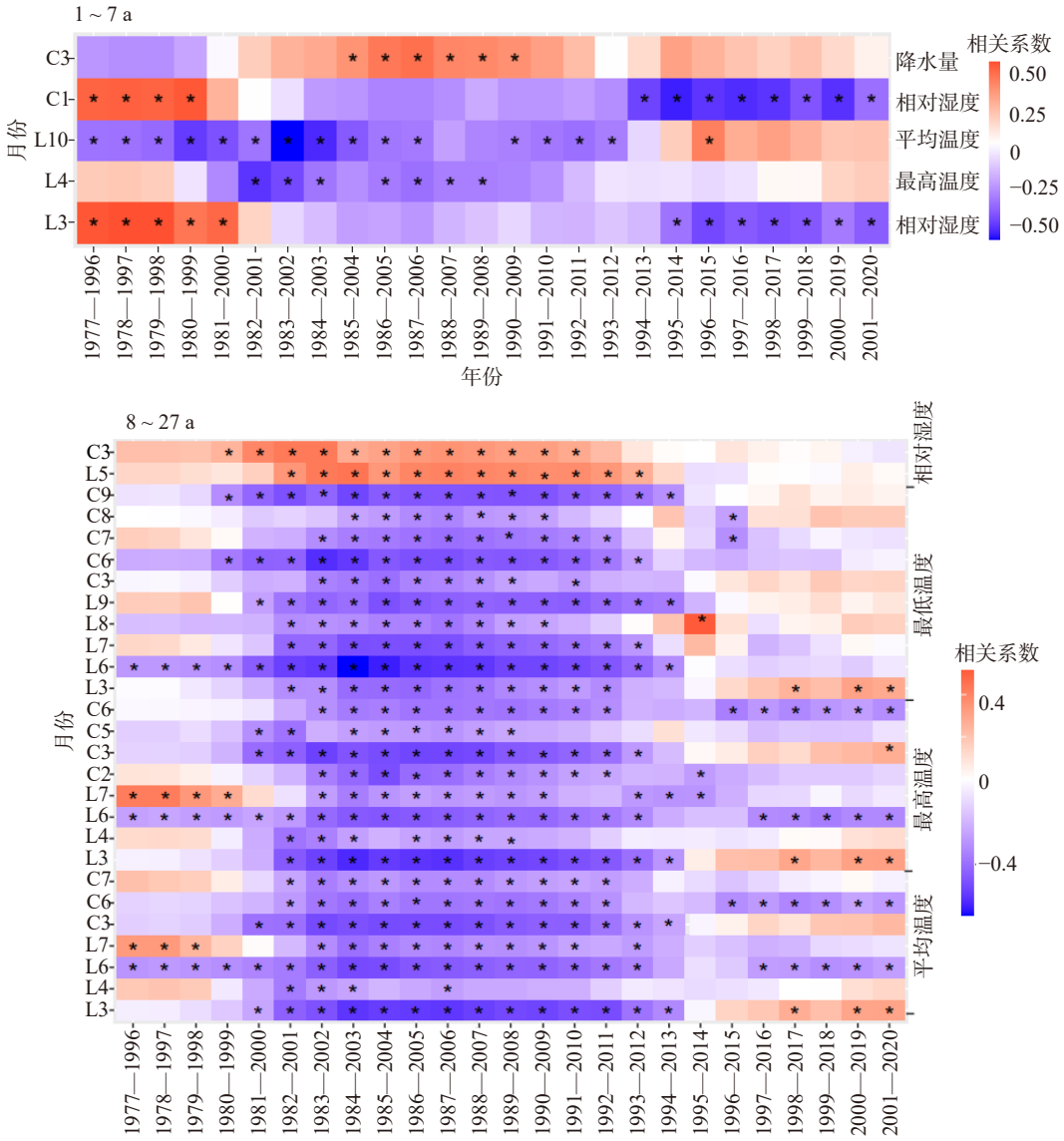


图 10 油松年表与气候因子的滑动相关分析

Fig. 10 Sliding correlation analysis between chronology of *Pinus tabuliformis* and climate factors

强树木夜间呼吸作用，消耗过多的有机物质，限制光合产物的积累；同时，较高的最低温使生长季整体温度升高，加剧油松蒸腾作用，导致失水过多影响水分平衡，进而抑制其生长[27]。生长速率下降期油松径向生长与上年和当年 3、5 月的最高温呈显著负相关。生长季前期温度过高会加速油松生理代谢，消耗大量能量和有机物质，同时，此时正值油松耗水高峰期，且雨季还未到来，高温加剧土壤水分蒸发和植物的蒸腾作用[28]，导致水分胁迫，限制油松径向生长。生长平缓期油松径向生长与温度、降水和相对湿度的相关性均未达到显著水平。该阶段油松已经建立较为稳定的生长模式，与幼龄阶段相比对环境变化的敏感度较低，对温度、降水、相对湿度的短期波动具有一定的耐受性。

滑动相关分析显示，油松径向生长与上年和当年 6 月均温及最高温长期负相关波动。这表明油松径向生长并非始终能适应温度条件的变化，这种长期负相关波动可能使油松在不同年份受到不同程度的温度影响，此外，温度的波动还可能与其他气候因子，如降水等的相互作用共同影响油松的生长。尽管温度因子对油松生长的影响随时间的变化而变化，但大多数时间段内，显著相关的温度因子对油松径向生长仍表现出显著的负效应，进一步证实了温度因子对油松生长的主导作用。

3.2 气温突变前后油松径向生长对气候的响应

气温突变前，快速生长期和生长速率下降期油松径向生长主要受降水和相对湿度制约，此时油松处于幼龄阶段，水分是其生长发育的关键因素。快速生长期油松径向生长主要与上年 3 月相对湿度和当年 4 月降水显著正相关，此时处于油松生长季开始的关键时期，适量的降水和较高的相对湿度可以使土壤保持湿润，有利于油松根系在冬季休眠后快

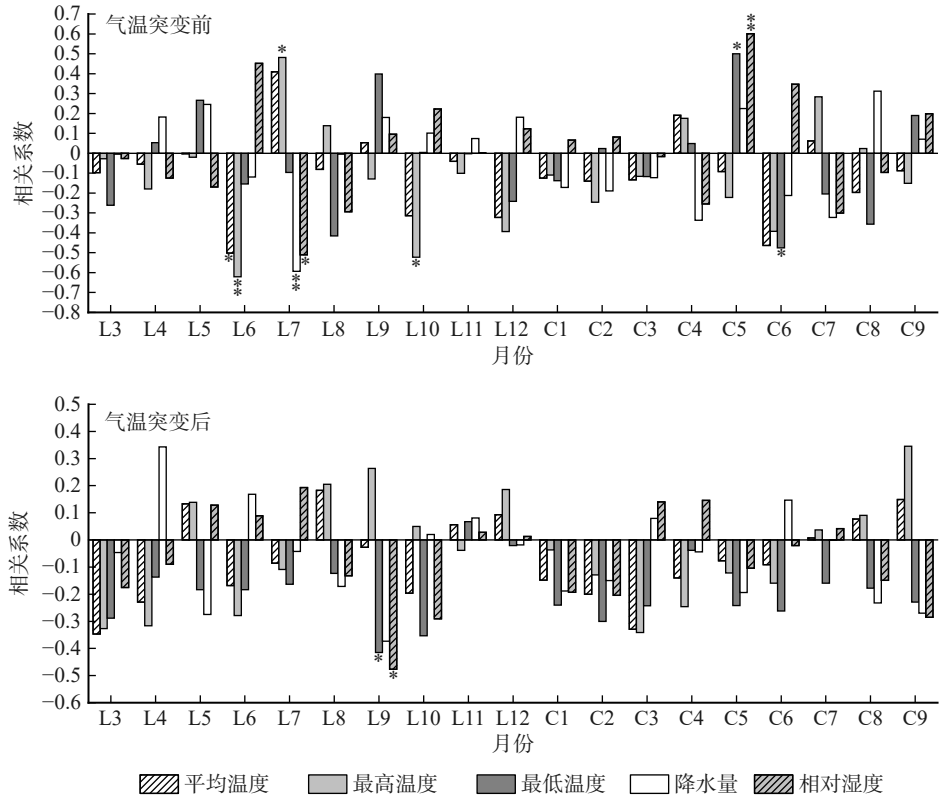


图 11　全生长阶段气温突变前后油松年表与气候因子的相关关系

Fig. 11　Correlations between standardized chronology of tree ring width and climatic factors before and after mutation of temperature in whole growth stage

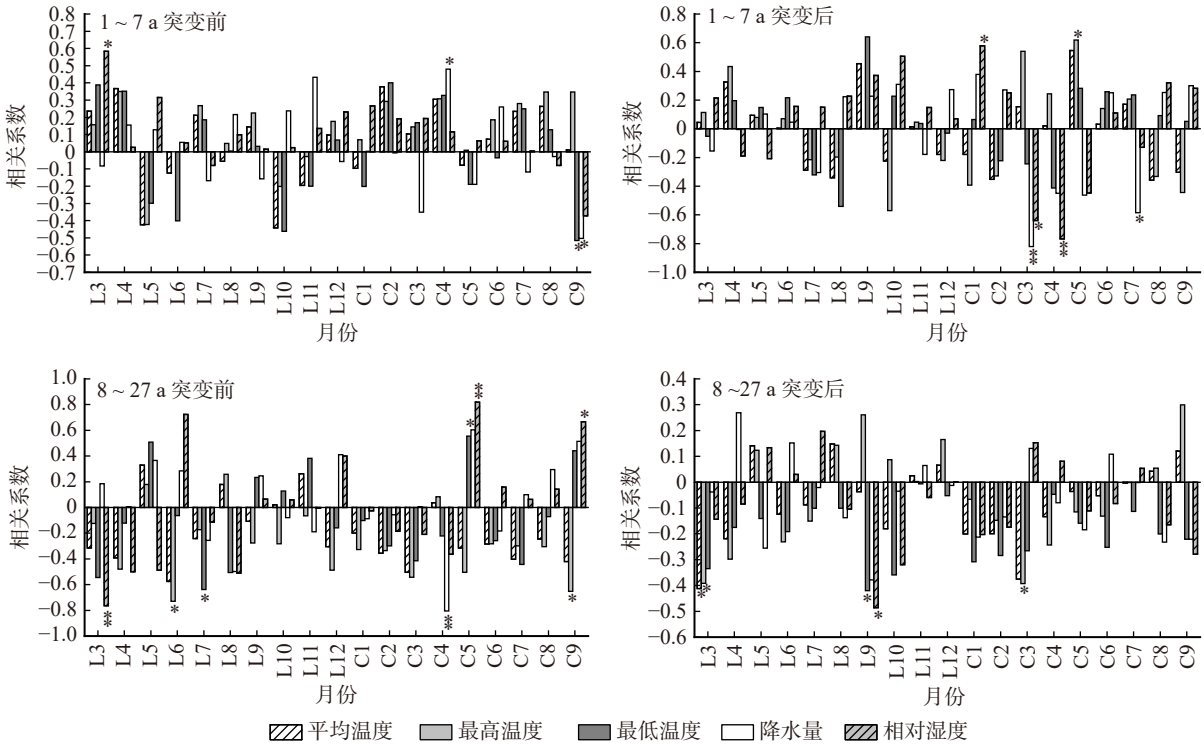


图 12　不同生长阶段气温突变前后油松年表与气候因子的相关关系

Fig. 12　Correlations between chronology of *Pinus tabuliformis* and climate factors before and after mutation of temperature in different stages

速恢复活性[29]。生长速率下降期油松径向生长主要与当年 5 月的相对湿度显著正相关，此时油松进入耗水高峰期，适宜的空气湿度减少油松叶片的水分蒸发，保持油松体内的水分平衡。

气温突变后，快速生长期油松径向生长对降水和相对湿度的敏感性增强，突变升温对于幼龄阶段

的油松有较大的环境压力，对水分条件的变化更加敏感。快速生长期的油松径向生长主要与当年 7 月的降水显著负相关，7 月属于生长较为旺盛的时期，此时降水过多会使土壤含水量过高，导致土壤透气性变差，进而导致根系缺氧影响对水分和养分的吸收[25]。气温突变后，生长速率下降期油松径向生长对降水和相对湿度的敏感性减弱，对温度因子的敏感性增强，突变升温导致温度因素的变化超过了降水和相对湿度对油松生长的影响。表现为生长速率下降期油松径向生长与上年和当年 3 月的最高温显著负相关，与上年 9 月的最低温显著负相关。黄土高原地区土壤水分含量较少，3 月温度升高导致土壤水分蒸发加快，尽管油松耐干旱瘠薄，但在初春生长关键时期，土壤水分供应不足会影响油松生长，导致径向生长减缓。9 月处于生长季末期，形成层活性降低，此时最低温回升及强烈的蒸发引起土壤水分流失，油松叶片气孔也因为高温而关闭，影响光合作用进行，进而使得用于生长的物质积累减少，从而抑制径向生长[30]。

4 结　　论

整个生长阶段油松径向生长主要受当年 3、6 月的温度因子、上年和当年 3 月的降水制约，温度和降水共同影响油松的整个生长过程，温度是主要制约因子。快速生长期的油松径向生长主要受当年 3 月降水、上年 3 月和当年 1 月的相对湿度制约，降水和相对湿度是影响该阶段油松径向生长的主要因子，幼树阶段油松的生长重点为建立根系、扩展枝叶和适应环境，温度对这些生长过程影响较小，对此可以定期除草，减小杂草与油松的水分竞争。生长速率下降期的油松径向生长主要受上年及当年 3 月和 5—7 月的温度因子、上年及当年 8、9 月的最低温制约，温度则是该阶段的主要限制因子，该阶段油松生长稳定但仍需适宜的温度维持代谢，同时对短期的水分变化有一定的缓冲能力，受水分影响较小，可以通过疏伐调节林内小气候维持适宜的温度环境。生长平缓期油松径向生长与气候因子均未达到显著水平，该阶段油松具有较稳定的生长模式和较强的适应能力，对环境的变化不太敏感，可以保持现阶段稳定并定期进行生长监测。气温突变前，快速生长期和生长速率下降期油松径向生长主要受降水和相对湿度影响显著，水分是幼龄油松生长发育的关键因素；气温突变后，快速生长期的油松径向生长对降水和相对湿度的敏感性增强，生长速率下降期油松径向生长对温度因子的敏感性增强。若未来气候继续向暖化方向发展，油松径向生长将会进一步受限。

参 考 文 献

[1] 陈俣霏, 韩玉国, 孙明东, 等. 基于 CMIP6 气候模式对长江流域四川段的未来降水变化预估与分析 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 288−294.
Chen Y F, Han Y G, Sun M D, et al. Prediction and analysis of future precipitation changes in the Sichuan Section of the Yangtze River Basin based on the CMIP6 climate model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 288−294.

[2] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71−78.
Liu G H, Fu B J. Effects of global climate change on forest ecosystems[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 71−78.

[3] Gou X H, Deng Y, Chen F H, et al. Tree ring based streamlow rconstruclion for the upper Yellow River over the past 1234 years[J]. Chinese Science Blletin, 2010, 55(33): 3236−3243.

[4] 陈列, 高露双, 张赟, 等. 长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系 [J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1285−1291.
Chen L, Gao L S, Zhang Y, et al. Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1285−1291.

[5] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 阿尼玛卿山不同海拔祁连圆柏树轮宽度年表特征对比分析 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 713−721.
Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. The characteristics of tree-ring width of *Sabina przewalskii* Kom. for different elevations in the A'nyêmaqên Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 713−721.

[6] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 坡向对海拔梯度上祁连圆柏树木生长的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 517−525.
Peng J F, Gou X H, Chen F H, et al. Influences of slope aspect on the growth of *Sabina przewalskii* along an elevation gradient in China's Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 517−525.

[7] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化 [J]. 生态学报, 2004, 24(1): 172−176.
Gou X H, Chen F H, Yang M X, et al. Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 172−176.

[8] 詹思敏, 王可逸, 张凌楠, 等. 祁连山东部不同树种径向生长对气候因子的响应 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2007−2014.
Zhan S M, Wang K Y, Zhang L N, et al. Species-specific growth responses to climatic factors in the eastern Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7): 2007−2014.

[9] 杨婧雯, 张秋良, 宋文琦, 等. 大兴安岭兴安落叶松和樟子松径向生长对气候变化的响应差异 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3415−3427.
Yang J W, Zhang Q L, Song W Q, et al. Response differences of radial growth of *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Daxing'an Mountains, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3415−3427.

[10] 薛盼盼, 缪宁, 王东, 等. 川西亚高山林线岷江冷杉和红杉对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9701−9711.
Xue P P, Miao N, Wang D, et al. Responses of *Abies fargesii* var. *faxoniana* and *Larix potaninii* to climate change in the subalpine timberline of western Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9701−9711.

[11] 郭伊利, 李书恒, 王嘉川, 等. 芦芽山华北落叶松早晚材径向生长对气候变化响应的分离效应 [J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1449−1463.
Guo Y L, Li S H, Wang J C, et al. Response divergence of radial growth to climate change in earlywood and latewood of *Larix principis-rupprechtii* in Luya Mountain[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1449−1463.

[12] 马晓琦, 史江峰, 史逝远, 等. 江西三清山黄山松树轮早晚材宽度所指示的气候意义 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1825−1834.
Ma X Q, Shi J F, Shi S Y, et al. Climatic significance of the earlywood and latewood width of *Pinus taiwanesis* in Sanqingshan, Jiangxi Province of China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8): 1825−1834.

[13] 刘亚静, 周来, 张博, 等. 不同林龄杉木径向变化及其对气象因子的响应 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2021, 45(2): 135−144.
Liu Y J, Zhou L, Zhang B, et al. Radial variation of *Cunninghamia lanceolata* in different aged forests and its response to meteorological factors[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(2): 135−144.

[14] Carrer M, Urbinati C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*[J]. Ecology, 2004, 85(3): 730−740.

[15] Linderholm H W, Linderholm M K. Age-dependent climate sensitivity or *Pinus sylvestris* L. in the central Scandinavian Mountains[J]. Boreal Environment Research, 2004, 9(4): 307−317.

[16] 许玲玲, 同小娟, 张劲松, 等. 山西灵空山油松径向生长对气候变化的响应 [J]. 中国农业气象, 2020, 41(6): 357−367.
Xu L L, Tong X J, Zhang J S, et al. Response of radial growth of *Pinus tabulaeformis* to climatic factors in the Lingkong Mountain, Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(6): 357−367.

[17] Wu G, Xu G, Chen T, 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.

[18] 张晓, 吴梦婉, Se Myung Kwon, 等. 不同林龄樟子松人工林径向生长对气候及地下水位变化的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6827−6837.
Zhang X, Wu M W, Kwon S M, et al. Radial growth responses of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations at different ages to climate and groundwater level changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6827−6837.

[19] 秦伟, 朱清科, 张宇清, 等. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 403−409.
Qin W, Zhu Q K, Zhang Y Q, et al. Dynamics of plant community species diversity in the process of ecological rehabilitation in north Shaanxi loess area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 403−409.

[20] 于航, 冯天骄, 卫伟, 等. 晋西黄土区土壤理化特征对长期植被恢复的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(7): 1−13.
Yu H, Feng T J, Wei W, et al. Response of soil physicochemical characteristics to long-term vegetation restoration in loess region of western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 1−13.

[21] 安彬, 肖薇薇, 刘宇峰, 等. 1955—2021 年黄土高原地区相对湿度时空演变规律 [J]. 干旱区地理, 2023, 46(12): 1939−1950.
An B, Xiao W W, Liu Y F, et al. Temporal and spatial evolution of relative humidity in the Loess Plateau during 1955−2021[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(12): 1939−1950.

[22] Yuan M, Wang L, Lin A, et al. Variations in land surface phenology and their response to climate change in Yangtze River Basin during 1982−2015[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3−4): 1659−1674.

[23] Fritts H C. Tree rings and climate[M]. London: Academic Press, 1976.

[24] 张林林, 刘效东, 苏艳, 等. 马尾松人工林生物量与生产力研究进展 [J]. 生态科学, 2018, 37(3): 213-221.
Zhang L L, Liu X D, Su Y, et al. Research progress on the biomass and productivity of *Pinus massoniana* plantation[J]. Ecological Science, 2018, 37(3): 213−221.

[25] 崔佳月, 彭剑峰, 李静茹, 等. 嵩山地区油松人工林树轮宽度对气候因子的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3497−3504.
Cui J Y, Peng J F, Li J R, et al. Responses of tree-ring width of *Pinus tabuliformis* plantation to climatic factors in Songshan Mountains, central China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3497−3504.

[26] 彭剑峰, 孙小华, 王飞, 等. 西大别山百战坪黄山松径向生长对气候因子的响应 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1769−1773.
Peng J F, Sun X H, Wang F, et al. Climatic signals from the radial growth of Huangshan pine (*Pinus taiwanese*'s Hayata) in the western Dabie Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(11): 1769−1773.

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

[28] 史倩, 同小娟, 许玲玲, 等. 油松早晚材径向生长对气候因子的响应 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(8): 988−1000.
Shi Q, Tong X J, Xu L L, et al. Response of radial growth of early and late wood of planted *Pinus tabuliformis* to climate variables[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(8): 988−1000.

[29] 肖健宇, 张文艳, 牟玉梅, 等. 树木年轮揭示的东灵山主要树种间干旱耐受性差异 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3487−3496.
Xiao J Y, Zhang W Y, Mou Y M, et al. Differences of drought tolerance of the main tree species in Dongling Mountain, Beijing, China as indicated by tree rings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3487−3496.

[30] 王嘉川, 李书恒, 郭伊利, 等. 管涔山华北落叶松径向生长对温度变化的动态响应 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(7): 1568−1576.
Wang J C, Li S H, Guo Y L, et al. Dynamic response of radial growth of *Larix principis-rupprechtii* to temperature change in Guancen Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(7): 1568−1576.

（责任编辑　范　娟
责任编委　张会儒）