

DOI: 10.20103/j.stxb.202209062544

乔晶晶, 王轶夫, 孙玉军, 邱思玉, 谢运鸿. 基于红松树轮重建小兴安岭南麓过去 140 年 6 月份平均温度变化. 生态学报, 2023, 43(21): 8769-8779.
Qiao J J, Wang Y F, Sun Y J, Qiu S Y, Xie Y H. Tree-ring based June mean temperature reconstruction over the past 140 years in the southern Lesser Khingan Mountains, northeastern China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8769-8779.

基于红松树轮重建小兴安岭南麓过去 140 年 6 月份平均温度变化

乔晶晶, 王轶夫, 孙玉军*, 邱思玉, 谢运鸿

北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点开放性实验室, 北京 100083

摘要: 基于建立的小兴安岭南麓红松树轮宽度标准年表, 分析红松径向生长与该地区温度和降水间的关系以及 1982 年升温突变对此相关性的影响。结果表明: 6 月平均温度与树轮宽度年表在变暖前后始终呈极显著负相关, 是该地区红松径向生长的主要限制因子。基于此构建的区域 1843—1982 年 6 月平均温度重建方程稳定可靠。重建温度序列的偏暖时期和偏冷时期分别持续 7 年和 29 年, 偏暖时段为 1915—1921 年, 偏冷时段为 1880—1891 年和 1932—1948 年。小波分析结果显示 6 月平均温度存在 2—7a 周期变化。空间相关分析结果表明重建温度序列能很好的代表小兴安岭南麓及附近区域的温度变化。本研究拓展了研究区现有的气候数据, 可为掌握小兴安岭气候变化规律和科学预测未来气候提供数据支撑。

关键词: 小兴安岭; 红松; 树轮宽度年表; 气候重建

Tree-ring based June mean temperature reconstruction over the past 140 years in the southern Lesser Khingan Mountains, northeastern China

QIAO Jingjing, WANG Yifu, SUN Yujun*, QIU Siyu, XIE Yunhong

State Forestry & Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources & Environmental Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Based on the standard tree-ring width chronology of *Pinus koraiensis* in the southern Lesser Khingan Mountains, we examined the effects of temperature and precipitation on radial growth and whether these correlations were stable before and after the abrupt warming in 1982. The results showed that the mean temperature in June was extremely significantly negatively correlated with its radial growth throughout the duration of the test. Based on the growth-climate response relationship, the mean temperature in June was reconstructed from 1843 to 1982, which explained 44.3% of the variance in the reconstruction ($F=8.730$, $P<0.005$). The warmer and colder periods of the reconstruction sequence lasted 7a (1915—1921) and 29a (1880—1891, 1932—1948), respectively. The reconstructed sequence had an evident 2—7a periodic variation and significantly spatial correlation based on Wavelet analysis and spatial correlation analysis, indicating that it can scientifically represent the temperature change in the southern Lesser Khingan Mountains and their surrounding areas. This study expands the existing regional temperature data, providing a basis for systematical mastery of climate change laws and scientific prediction of the future tendency of climate change in the Lesser Khingan Mountains.

Key Words: Lesser Khingan Mountains; *Pinus koraiensis*; tree-ring width chronology; climate reconstruction

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31870620); 中央高校基本科研业务费专项资金(PYX202107)

收稿日期: 2022-09-06; 网络出版日期: 2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunyj@bjfu.edu.cn

气候变暖加剧,全球升温 1.5℃ 时间将提前约 10 年。气候变暖已持续对区域和全球自然生态系统产生重大影响,尤其在北半球中高纬度地区^[1-2]。了解历史气候特征对掌握气候变化规律、预测未来气候趋势、揭示物种生命历程及其演替更新等意义重大^[3]。树木年轮以其定年准确、连续性强、分布广泛、对环境波动极为敏感等特点,已成为研究气候变化的重要载体^[4-5]。

我国树轮气候研究开始于 20 世纪 30 年代,于 21 世纪迅猛发展,主要集中在西北、东北和西南地区^[5-6]。依托树木年轮宽度、密度和同位素等代用指标,已先后对阿尔泰山、祁连山、天山、长白山、大兴安岭、青藏高原东南缘和横断山脉等周边区域的历史气候资料进行重建^[5,7-10]。且树轮样本主要来源于西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)和紫果云杉(*Picea purpurea*)^[8,11-12]。树木年轮记录历史气候过程的准确性已得到众多研究证实,重建资料已被广泛应用于大尺度气候研究^[5,13]。

小兴安岭属我国高纬度区域,受气候变化影响显著^[14]。该区域的树轮气候研究主要围绕阔叶红松林、针阔混交林以及云冷杉林展开,且多针对单个或多个树种^[14-17],如臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、红松、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、长白落叶松等,探究树木的径向生长规律及其与气候因子的关系,鲜有对区域历史气候数据的挖掘^[18]。目前,仅利用红松树轮样本对小兴安岭南麓 1796—2004 年 10 月平均温度^[19]、1772 年以来的夏季温度^[18]以及中部伊春地区 1748 年后的年降水量^[20-21]进行重建。

本研究运用树轮气候学方法,以小兴安岭南麓东折棱河红松为研究对象,分析其径向生长对气候因子的响应特征,并在此基础上重建了区域过去 140 年 6 月的平均温度变化。研究结果填补了区域相应时段温度数据的空白,可为进一步理解我国东北地区的气候变化规律提供科学依据,为区域红松林的合理经营提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于小兴安岭南麓东折棱河自然保护区(46°29′—47°06′ N, 128°30′—129°24′ E, 图 1),海拔

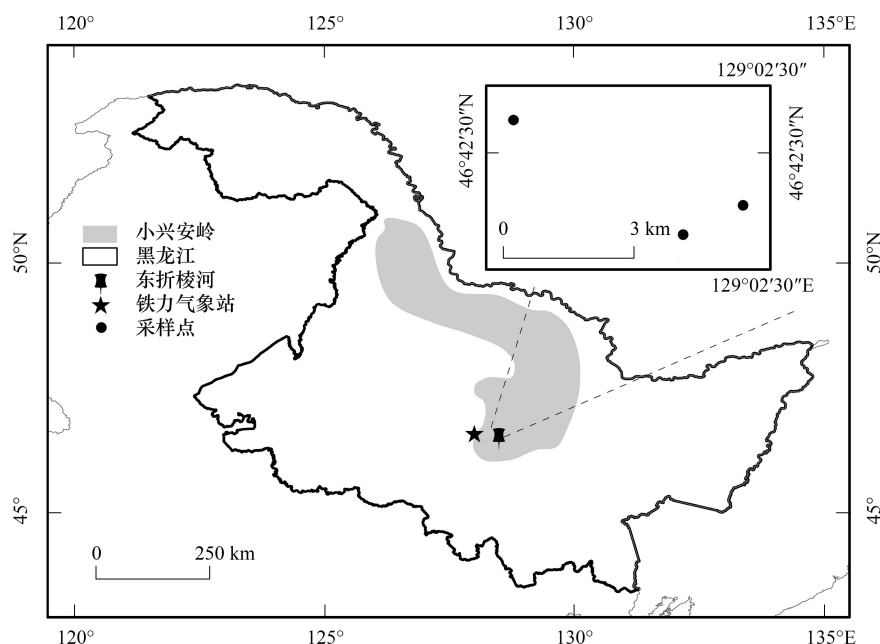


图 1 东折棱河自然保护区树木年轮采样点及气象站

Fig.1 Location of sampling sites and meteorological station in Dongzhelenghe Nature Reserve

200—970 m, 总面积 7039 hm², 属北温带大陆性季风气候。受太平洋季风和西伯利亚寒冷气候的影响, 区域四季分明, 冬季寒冷漫长, 夏季温暖多雨。研究时段内(1958—2018 年), 区域年平均气温 1.8℃, 最冷月为 1 月, 最热月为 7 月, 月平均最低气温 -28.5℃, 月平均最高气温 26.9℃。年平均降水量 639.4 mm, 其中暖季(5—9 月)降水量占全年降水量的 84.79%。霜冻现象时常发生且较严重, 无霜期 90—110 d。区域内森林资源丰富, 长白落叶松和红松为主要树种, 分布广泛。

1.2 气象资料

选取距离采样点最近的铁力气象站(46°35' N, 128°00' E, 海拔 210.5 m, 图 1) 1958—2018 年的气象资料, 主要包括平均气温和降水量(图 2)。选用帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)描述研究区域的干湿变化^[22], 数据来源于英国东英吉利大学气候研究中心(CRU)矫正帕默尔干旱指数数据集(scPDSI), 精度 0.5°×0.5°, 时间跨度为 1958—2018 年(<http://climexp.knmi.nl>)。

采用 Mann-Kendall 方法以及子序列长度为 5a 的滑动 *t* 检验对年气象资料进行突变及趋势分析。结果表明, 年降水量未发生突变($T=3.269$, $P>0.01$), 1982 年为年平均气温突变点($T=-3.814$, $P<0.01$)。突变点后年平均气温显著增加, 气候倾向率为 0.340℃/10a($R^2=0.371$, $P<0.01$)。1958—2018 年, PDSI 年际间波动明显, 年内最小值出现在 6 月(-0.402), 区域干湿状况处于正常等级(-0.5—0.5)^[22]。

1.3 样本采集与年表建立

依据国际树轮数据库(ITRDB)标准^[23], 于 2019 年 7 月在原始天然红松林集中分布的 56 号林班(平均海拔 441.0 m, 平均坡度 12°, 土壤为典型暗棕壤, 平均胸径(47.55 ± 2.08) cm)进行树轮样本的采集。为减少对树木的损害, 每株树仅钻取一根样芯^[14—15], 共计 48 个样芯。

严格按照树木年轮学方法对采集的样芯进行预处理, 直至其年轮边界清晰。使用 LIN-TAB™ 6.0 树轮宽度测量系统(Rinntech, Heidelberg, Germany)对交叉定年后的树轮样芯进行逐年宽度测定, 精度为 0.01mm。应用 COFECHA 程序对定年和测量结果进行检验, 剔除与主序列相关性差且难以交叉定年的样芯, 最终保留 46 个样芯用于年表的构建。

运用 ARSTAN 程序, 选用步长为 2/3 年龄的样条函数去除树木因自身遗传因子及非气候因素产生的生长趋势, 建立了红松标准年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。本研究选用统计特征值更高, 年表质量更好且包含更多低频气候信号的标准年表进行分析, 并以 0.85 作为子样本信号强度(Subsample signal strength, SSS)的阈值确定年表的可靠区间。红松标准年表的可靠区间为 1843—2018 年(图 3)。

1.4 研究方法

利用 SPSS 20.0 软件中的 Pearson 法和 DendroClim 2002 程序^[24]分析标准年表与气候因子间的相关关系, 并使用偏相关分析进一步确定限制研究区红松径向生长的关键气候因子^[25]。运用 R 软件中的多元线性逐步回归方法构建重建方程, 并采用逐一剔除法^[26]检验重建方程的稳定性及可靠性。计算重建序列的平均值及 11a 滑动平均值, 明确研究区冷暖时段的分布及波动特征。使用 MATLAB 软件进行小波分析^[27]以确定重建序列的周期变化。最后通过 KNMI Climate Explorer(<http://climexp.knmi.nl>)将重建序列与同期 CRU TS 4.05 (0.5°×0.5°)格点数据进行空间相关分析^[28], 以探究重建序列的区域代表性。

2 结果与分析

2.1 年表统计特征

由表 1 可知, 红松标准年表序列长度为 176 年(1843—2018 年, SSS>0.85)。标准偏差、树间相关系数和第一主成分方差解释量分别为 0.202, 0.321 和 34.53%, 表明样芯具有较一致的轮宽变化, 可代表区域红松的平均生长状况。一阶相关系数为 0.303, 说明树木前一年的生长状况对其当年的生长有一定的影响。样本总体代表性为 0.956, 超过了临界阈值 0.85, 平均敏感度为 0.188, 信噪比高达 20.790, 表明所建年表质量较好且保留了较丰富的气候信号, 适用于树轮气候学研究。

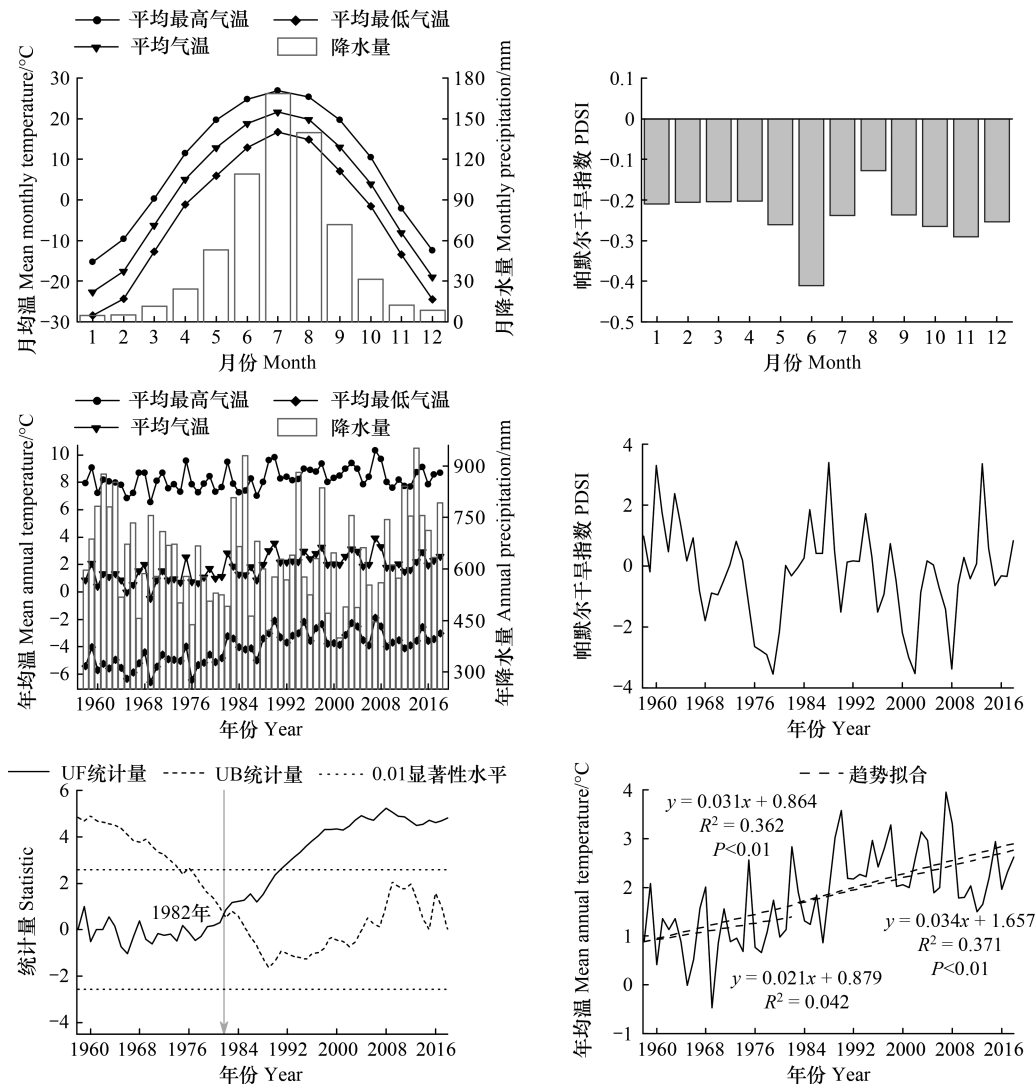


图 2 研究区 1958—2018 年气象要素变化特征

Fig.2 Characteristics of Climate factors in the study area from 1958 to 2018

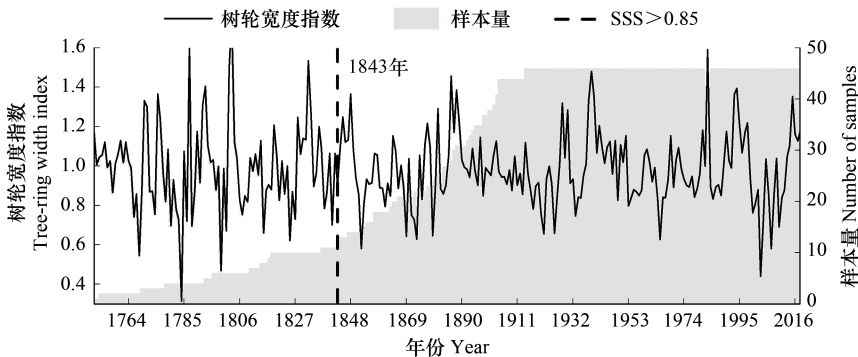


图 3 红松树轮宽度标准年表及样本量

Fig.3 The standard tree-ring width chronology of *Pinus koraiensis* and number of samples

表 1 标准年表统计参数及公共区间分析

Table 1 Statistics of standard chronology and common interval analysis

标准年表特征值 Standard chronology statistics		公共区间分析(1905—2016) Common interval analysis	
信号强度>0.85 起始年 First year of SSS>0.85	1843	树间相关系数 Correlation between trees	0.321
年均生长速率 Mean growth rate (mm/a)	0.984	一阶相关性 First order autocorrelation	0.303
样本量(建表/采样) Number of cores/trees	46/48	信噪比 Signal-to-noise rate	20.790
平均敏感度 Mean sensitivity	0.188	样本总体代表性 Expressed population signal	0.956
标准偏差 Standard deviation	0.202	第一主成分方差解释量 Variation in first eigenvector/%	34.53

2.2 树木径向生长与气候因子的关系

依据红松在研究区域内的生长特性,考虑树木生长对气候响应的“滞后效应”^[4],选取上年 5 月至当年 9 月的平均气温和降水量进行相关分析(图 4)。结果表明,气候因子对红松径向生长的影响存在差异,6 月各气候因子的影响极为显著($P<0.01$)。其中,红松径向生长与当年 6 月平均气温呈极显著负相关($r=-0.334$, $P<0.01$),与当年 6 月降水量和 PDSI 均呈极显著正相关($r=0.360$, $r=0.351$, $P<0.01$)。升温突变后,气候因子的作用趋势及影响程度均有一定的改变,温度的促进作用普遍减弱,冬季降水的抑制作用明显增强,而夏季降水的促进作用显著增加。仅当年 6 月平均气温与红松径向生长在 1982 年温度突变前后始终呈极显著负相关($r=-0.408$, $r=-0.430$, $P<0.01$)。

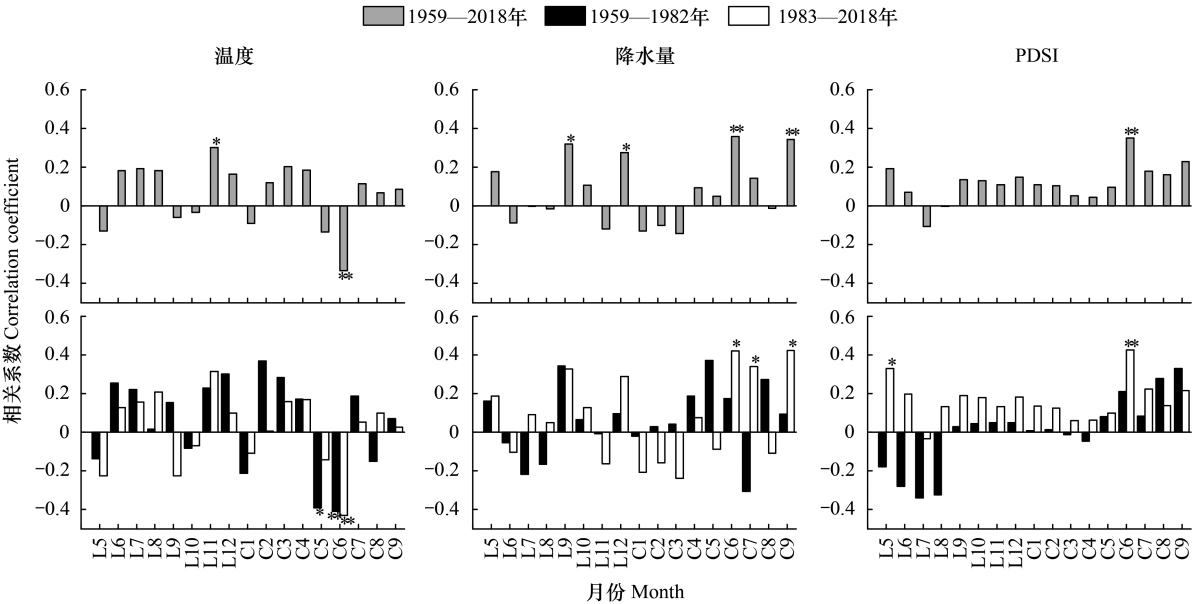


图 4 红松标准年表与月平均气温、降水量及 PDSI 的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between the standard tree-ring width chronology of *Pinus koraiensis* and mean monthly temperature, precipitation and PDSI

PDSI: 帕默尔干旱指数 Palmer Drought Severity Index; L: 上年 Last year; C: 当年 Current year. * $P<0.05$; ** $P<0.01$

考虑到各气候因子间存在的相互作用,本研究分别将红松标准年表与当年 6 月平均气温、降水量和 PDSI 进行偏相关分析,以进一步确定该地区红松径向生长的主控气候因子。偏相关分析结果如表 2 所示;在固定降水量和 PDSI 的前提下,各时段红松径向生长与 6 月平均气温的偏相关系数均达到 0.05 显著性水平($R_p =$

-0.270, $R_p = -0.345$, $R_p = -0.304$, $P < 0.05$);而在固定温度和 PDSI 以及温度和降水量的情况下,红松径向生长与 6 月降水量和 PDSI 的偏相关系数普遍较低,均未通过显著性检验($P > 0.05$)。由此可知,排除平均温度、降水量和 PDSI 的相互影响,研究区红松的径向生长对 6 月平均气温更为敏感。综上可知,6 月平均气温是该地区红松径向生长的主要限制性气候因子,适合开展气候重建。

表 2 红松标准年表与 6 月平均气温(T)、降水量(P)及 PDSI 的偏相关系数

Table 2 Partial correlation coefficients (R_p) between the standard tree-ring width chronology of *Pinus koraiensis* and June mean temperature (T), precipitation (P) and PDSI

时段 Time	1959—2018		1959—1982		1983—2018	
	R_p	p	R_p	p	R_p	p
$T/(P+PDSI)$	-0.270	0.039	-0.345	0.028	-0.304	0.045
$P/(T+PDSI)$	0.240	0.070	0.170	0.450	0.186	0.293
$PDSI/(T+P)$	0.233	0.078	0.046	0.838	0.288	0.081

$T/(P+PDSI)$: 在降水和 PDSI 固定条件下,温度与红松径向生长的相关分析 Partial correlation analysis between radial growth and temperature when precipitation and PDSI were the control variables; $P/(T+PDSI)$: 在温度和 PDSI 固定条件下,降水与红松径向生长的相关分析 Partial correlation analysis between radial growth and precipitation when temperature and PDSI were the control variables; $PDSI/(T+P)$: 在温度和降水固定条件下,PDSI 与红松径向生长的相关分析 Partial correlation analysis between radial growth and PDSI when temperature and precipitation were the control variables; R_p : 偏相关系数 Partial correlation coefficients

2.3 温度重建与检验

考虑到气候因子对树木生长的滞后影响^[4],选用红松当年(t)及后续 2 年($t+1$ 、 $t+2$)的树轮宽度序列,与区域 6 月平均温度实测序列进行逐步回归,得到回归方程(表 3)。由表 3 可知,考虑 1982 年存在的温度突变可显著提高重建方程的可靠性,鉴于 1982 年后研究区已具有详实且无缺失的器测气象数据(图 2),故对研究区 1843($SSS > 0.85$)至 1982 年 6 月平均温度进行重建。重建方程如下:

$$T_{6,t} = 19.021 - 4.971 \times HS_t + 3.998 \times HS_{t+1}$$

式中: $T_{6,t}$ 为 t 年 6 月平均温度, HS_t 为 t 年红松标准年表树轮宽度序列, HS_{t+1} 为 $t+1$ 年红松标准年表树轮宽度序列。

表 3 重建方程的统计特征

Table 3 Statistics of the reconstruction model

时段 Time	最优多元回归模型 Optimal multiple regression model	R	R^2	R_{adj}^2	F
1958—2017	$T_{6,t} = 19.625 - 3.896 \times HS_t + 3.082 \times HS_{t+1}$	0.501 **	0.251	0.224	9.526 **
1958—1982	$T_{6,t} = 19.021 - 4.971 \times HS_t + 3.998 \times HS_{t+1}$	0.665 **	0.443	0.392	8.730 **

$T_{6,t}$: t 年 6 月平均温度 the mean temperature reconstruction of June in t ; HS_t : t 年红松标准年表树轮宽度序列 tree-ring width index of STD of HS in t ; HS_{t+1} : $t+1$ 年红松标准年表树轮宽度序列 tree-ring width index of STD of HS in $t+1$; R : 相关系数 correlation coefficient between observation and estimated series; R^2 : 方差解释量 explained variance; R_{adj}^2 : 调整方差解释量 adjusted R-squared; F : F 检验 F -test

重建方程的相关系数为 0.665,方差解释量为 44.3%, F 值为 8.730,系数值及常数值均达到 0.005 显著性水平(表 3)。采用逐一剔除法对重建方程的稳定性和可靠性进行检验(表 4)。结果表明,重建方程的误差缩减值为 0.336,交叉检验的相关系数(r 、 r_1)及符号检验值(ST 、 ST_1)均达到 0.005 显著性水平。重建序列与实测序列具有较一致的波动趋势及变化幅度(图 5),表明重建序列可较好地拟合器测数据的波动规律。基于以上分析,该重建方程稳定、重建序列真实可信。

2.4 重建温度序列的波动特征

研究区 6 月平均温度上下波动明显,存在明显的冷暖变化(图 5,图 6)。重建序列的最高值和最低值分别为 20.41 ℃(1982 年)和 16.14 ℃(1881 年),多年平均值为 18.09 ℃,略高于实测期(1958—1982 年)的平均值(18.21 ℃),标准差(σ)为 0.83 ℃。

表 4 重建方程的逐一剔除统计检验

Table 4 Statistics of the Leave-one-out verification tests for the reconstruction model

时段 Time	r	r_1	ST	ST_1	RE	Pmt	DW
1958—2017	0.407 **	0.572 **	38+/22- **	41+/18- **	0.157	1.862	1.588 *
1958—1982	0.586 **	0.583 **	18+/7- **	17+/7- **	0.336	2.216 *	2.394

r : 相关系数 correlation coefficient between the observed data and the estimations obtained using leave-one-out verification; r_1 : 一阶差相关系数 the first-difference correlation coefficient between the observed data and the estimations obtained using leave-one-out verification; ST : 原序列符号检验 the general sign test; ST_1 : 一阶差符号检验 the first-difference sign test; RE : 误差缩减值 reduction of error; Pmt: 乘积平均数 product mean test; DW : Durbin-Watson 检验 Durbin-Watson test

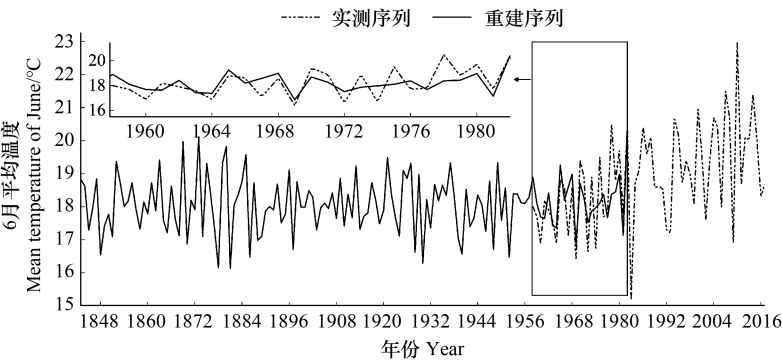


图 5 6 月平均温度的实测序列与重建序列

Fig.5 Measured sequence and reconstruction sequence of mean temperature of June

本研究将温度大于 $T_{\text{mean}} + 1\sigma$ (18.92 °C) 的年份定义为高温年份;将温度小于 $T_{\text{mean}} - 1\sigma$ (17.26 °C) 的年份定义为低温年份;将温度处于 17.26—18.92 °C 的年份定义为正常年份^[12]。由表 5 可知,1843—1982 年研究区偏暖年份共出现 20 次,偏冷年份共出现 21 次,分别占重建年份的 14.3%和 15.0%。

表 5 6 月平均温度重建序列统计特征

Table 5 Statistical characteristics of the reconstructed mean temperature sequence of June

偏暖年份 Warmer year				偏冷年份 Colder year			
年份 Year	重建值/°C Reconstruction value	年份 Year	重建值/°C Reconstruction value	年份 Year	重建值/°C ReconstructionValue	年份 Year	重建值/°C ReconstructionValue
1852	19.37	1921	19.49	1848	16.54	1897	16.72
1863	19.42	1925	19.10	1851	17.10	1924	17.12
1869	19.97	1927	19.31	1865	17.21	1928	16.63
1873	20.11	1929	18.97	1868	17.13	1930	16.29
1875	19.32	1937	19.33	1870	16.87	1939	17.06
1879	19.32	1949	19.34	1874	17.10	1940	16.57
1880	19.82	1965	19.26	1878	16.16	1948	16.71
1885	19.58	1968	18.99	1881	16.14	1952	16.48
1896	19.11	1980	18.97	1886	16.47	1969	16.85
1913	19.23	1982	20.41	1888	16.99	1981	17.14
				1889	17.10		

140 年来研究区存在 1 个明显的偏暖时期和 2 个明显的偏冷时期,总持续时间分别为 7 年(1915—1921 年)和 29 年(1880—1891 年、1932—1948 年)。其他时段的平均温度在平均值附近波动,变化较小(图 6)。

2.5 重建温度序列的周期变化

利用小波分析探究过去 140 年 6 月平均温度重建序列的周期变化,结果如图 7 所示。重建序列具有明显

的 2—7a 的周期变化特征 (95% 显著性水平), 但不存在规律的周期震荡。

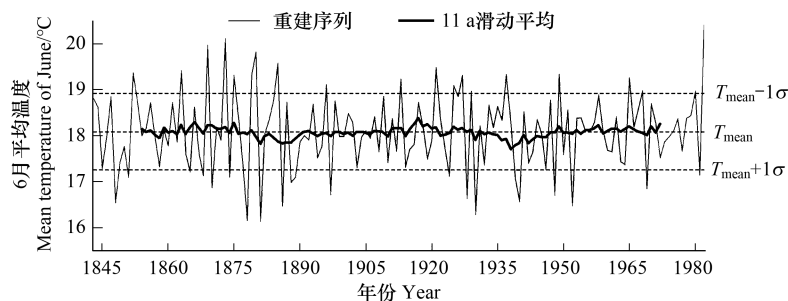


图 6 6 月平均温度重建序列及 11 年滑动平均

Fig.6 Reconstructed mean temperature sequence of June and 11a moving average curve

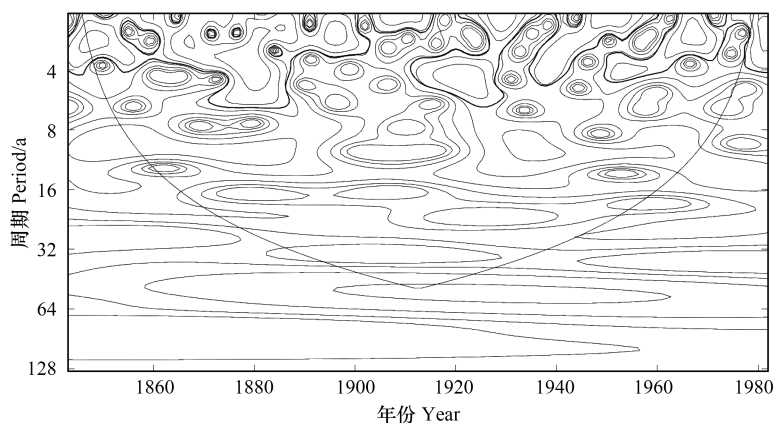


图 7 6 月平均温度重建序列的小波分析

Fig.7 Wavelet analysis of the reconstructed mean temperature sequence of June

黑色粗实线表示 0.05 显著性水平, 黑色轮廓线为影响锥

2.6 空间相关分析

选取 CRU TS 4.05 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 1901—1982 年 6 月平均温度格点数据与重建结果进行同期相关分析以评估重建序列的空间代表性。结果如图 8 所示, 重建序列与 CRU 数据相关性较好, 显著相关区域包括中国东北、蒙古东部和俄罗斯远东地区 ($P < 0.05$), 相关性最高发生在研究区附近。该结果表明重建的温度序列能代表小兴安岭南麓 6 月平均温度的变化, 也可以反映东北亚部分地区的温度变化。

3 讨论

3.1 区域升温突变

小兴安岭南麓地区平均温度于 1982 年发生突变 (图 2), 突变后增温显著, 呈现暖干化趋势。这与在大兴安岭主脉南段、中段、北段以及中国北方和周边地区开展的平均温度突变研究的结果基本一致^[29—30]。温度突变已导致区域内主要针叶树种的比例下降, 寒温带针叶林和温带针阔混交林的适宜分布区域面积减少^[31—32]。持续的气候变暖将对小兴安岭地区树木的生长与适应提出更严峻的挑战^[14—15, 33]。

3.2 树木径向生长对气候因子的响应

区域红松的径向生长受当年 6 月气候影响显著, 其与平均温度呈极显著负相关, 与降水量呈显著正相关, 且相关关系在升温突变后明显增强 (图 4)。这与在白石砬子自然保护区、凉水自然保护区、胜山自然保护区

和长白山低海拔地区开展的不同纬度红松径向生长对气候因子的响应研究^[33],以及在长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林过渡带、黑河、牡丹江以及韩国等东北亚地区开展的红松径向生长—气候关系研究的结果一致^[34—36]。红松喜光喜湿,对土壤和空气水分敏感^[11,18,34]。小兴安岭南麓地区 6 月平均温度较高,降水量为 108.9 mm,仅占区域全年降水量的 17.04%(图 2)。此时温度的升高会加速土壤水分蒸发,降低土壤含水量,还会加速植物根系的木质化进程,降低其水分吸收效率,使其遭受水分胁迫^[8,37]。与此同时,高温会促进呼吸作用,这会迅速消耗光合作用产生的有机物,不利于树木积累物质和形成木质部,进而呈现窄轮^[8,38]。然而,在小兴安岭西北坡软、硬阔叶林中开展的红松径向生长与气候变化的关系研究显示当年 6 月平均温度与此林型中红松径向生长的相关关系不显著^[35]。本研究样本来源于阔叶红松近、成熟林,与来源于软、硬阔叶林的红松相比已经处于演替的中晚期阶段^[16,35]。各演替时期红松存在的水热需求差异是造成分析结果不同的一个原因。此外,采样点地形、土壤、植被等微环境的不同也可能是结果产生差异的原因之一。

3.3 重建序列的波动特征及对比

6 月平均温度重建序列与实测序列的同步性较好,其年际变化仅在某些时段存在差异(图 5)。多种因子同时作用于树木生长可能会使重建序列的精度受到影响^[2,7,12,19]。例如,气象站实测温度与山地环境真实温度间存在的差异会影响其与年表的相关程度,进而使得重建序列对高温及低温具有响应偏差。此外,该重建序列与研究区周边区域的其他同时段的温度重建序列有着基本一致的波动特征^[39—42],如敦化、长白山北坡、大兴安岭北部等。尽管冷暖期的持续时间存在差异,但明显的冷暖时段,如 1880—1891、1932—1948 年的冷期和 1915—1921 年的暖期均在多个重建序列中同步出现。与此同时,重建序列与气象资料记录的一些特殊年份具有很好的对应关系^[43],如 1919—1952 年间的高温年份、1982 年 6、7 月东北大范围地区存在的异常高温以及 1940、1969 和 1981 年存在的异常低温等。由此可见,本研究树木年轮材料所指示的温度信号可靠。

3.4 重建序列的周期变化及大尺度气候驱动

重建温度序列具有 2—7a 的周期变化(图 7),处在公认的厄尔尼诺-南方涛动气候系统(ENSO)2—8a 的波动周期范围^[44]。大量研究表明,厄尔尼诺和拉尼娜事件已对小兴安岭地区的气候特征、景观格局、农林生态系统,甚至社会经济产生了一定的影响^[14,44]。重建序列 2—7a 的周期变化可能是 ENSO 引起的气候变化对该地区树木生长影响的体现^[2]。全球气候变暖将改变中国红松林的生长速率、区域面积以及分布边界^[14]。若变暖持续,东北阔叶红松林将面临快速衰退的局面,这将对东北乃至东北亚森林生态系统稳定性的维持发起挑战^[33,36]。因此,为更深入地了解大尺度气候对树木径向生长的作用机制,需在更大范围开展更密集的林轮气候研究。

4 结论

本研究建立了小兴安岭南麓红松树轮宽度标准年表,探讨了其与温度、降水间的相关关系,并基于此重建了过去 140 年 6 月平均温度变化。结论如下:

(1) 树轮宽度标准年表与研究区 6 月平均温度始终呈极显著负相关,表明 6 月平均温度是研究区树木径向生长的关键气候限制因子;

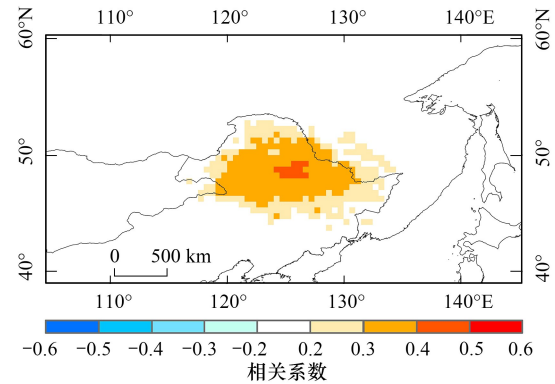


图 8 6 月平均温度重建序列与 CRU 格点数据的空间相关性 (1901—1982 年)

Fig.8 Spatial correlation of June mean temperature between reconstructed sequence and CRU grid data from 1901 to 1982

(2) 研究区过去 140 年温度波动明显, 存在 1 个偏暖时期和 2 个偏冷时期, 分别为 1915—1921 年、1880—1891 年和 1932—1948 年。

(3) 重建温度序列具有显著的 2—7a 变化周期以及良好的空间代表性, 可反映更大尺度的气候变化。

致谢:王童、潘磊、靳晓娟、韩培武、李芸、李豪伟参加野外取样工作, 中国科学院新疆生态与地理研究所买尔当·克依木博士、成都理工大学谢成晟博士在数据分析方法上给予帮助, 特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71-78.
- [2] 李宗善, 刘国华, 张齐兵, 胡婵娟, 罗淑政, 刘兴良, 何飞. 利用树木年轮宽度资料重建川西卧龙地区过去 159 年夏季温度的变化. 植物生态学报, 2010, 34(6): 628-641.
- [3] Cracknell A P, Varotsos C. Understanding global climate change: modelling the climatic system and human impacts. 2nd ed.
- [4] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990: 171-183.
- [5] He M H, Yang B, Bräuning A, Rossi S, Ljungqvist F C, Shishov V, Gießinger J, Wang J L, Liu J J, Qin C. Recent advances in dendroclimatology in China. Earth-Science Reviews, 2019, 194: 521-535.
- [6] Shi C M, Gao C, Zhang Y D, Shi F Z, Shen M G, Shi S L. The majority of tree growth on the monsoonal Tibetan Plateau has benefited from recent summer warming. CATENA, 2021, 207: 105649.
- [7] 焦亮, 马罗, 张同文, 王圣杰. 基于树轮记录的阿尔泰山中段 1798 年以来 6—7 月平均最低气温变化研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1944-1958.
- [8] 胡茂, 陈峰, 陈友平. 新疆阿勒泰地区西伯利亚红松径向生长对气候水文的响应. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3609-3617.
- [9] 牛豪阁. 祁连山东部三种针叶树径向生长动态对气候的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [10] 彭正兵, 李新建, 张瑞波, 秦莉, 张合理, 陈友平, 刘蕊. 不同趋势方法的新疆东天山高低海拔雪岭云杉树轮宽度年表对气候的响应. 生态学报, 2019, 39(5): 1595-1604.
- [11] 周子建, 江源, 董满宇, 陶岩, 王明昌, 丁新原. 长白山北坡不同海拔红松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应. 生态学报, 2018, 38(13): 4668-4676.
- [12] 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.
- [13] Babst F, Bodesheim P, Charney N, Friend A D, Girardin M P, Klesse S, Moore D J P, Seftigen K, Björklund J, Bouriaud O, Dawson A, DeRose R J, Dietze M C, Eckes A H, Enquist B, Frank D C, Mahecha M D, Poulter B, Record S, Trouet V, Turton R H, Zhang Z, Evans M E K. When tree rings go global: challenges and opportunities for retro- and prospective insight. Quaternary Science Reviews, 2018, 197: 1-20.
- [14] 于健, 刘琪璟, 周光, 孟盛旺, 周华, 徐振招, 史景宁, 杜文先. 小兴安岭红松和鱼鳞云杉径向生长对气候变化的响应. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3451-3460.
- [15] Qiao J J, Sun Y J. Effects of altitude and slope on the climate-radial growth relationships of *Larix olgensis* A. Henry in the southern Lesser Khingan Mountains, Northeast China. Ecological Processes, 2022, 11(1): 46.
- [16] 朱良军, 金光泽, 王晓春. 典型阔叶红松林干扰历史重建及干扰形成机制. 植物生态学报, 2015, 39(2): 125-139.
- [17] Zhu L J, Li Z S, Zhang Y D, Wang X C. A 211-year growing season temperature reconstruction using tree-ring width in Zhangguangcai Mountains, Northeast China: linkages to the Pacific and Atlantic Oceans. International Journal of Climatology, 2017, 37(7): 3145-3153.
- [18] Yu J, Zhou G, Liu Q J. Tree-ring based summer temperature regime reconstruction in XiaoXing Anling Mountains, northeastern China since 1772 CE. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 495: 13-23.
- [19] 尹红, 郭品文, 刘洪滨, 黄磊, 于宏敏, 国世友, 王芳. 利用树轮重建小兴安岭五营 1796 年以来的温度变化. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 18-23.
- [20] Li M Q, Deng G F, Shao X, Yin Z. Precipitation reconstruction based on tree-ring width over the past 270 years in the central Lesser Khingan Mountains, Northeast China. Climate of the Past Discussions, 2020.
- [21] Li M Q, Deng G F, Shao X M, Yin Z Y. Precipitation variation since 1748 CE in the central Lesser Khingan Mountains, Northeast China. Ecological Indicators, 2021, 129: 107969.
- [22] 彭剑峰, 刘玉振, 王婷. 神农山白皮松不同龄组年轮-气候关系及 PDSI 重建. 生态学报, 2014, 34(13): 3509-3518.
- [23] Grissino-Mayer H D, Fritts H C. The International Tree-Ring Data Bank: an enhanced global database serving the global scientific community. The Holocene, 1997, 7(2): 235-238.

- [24] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303-311.
- [25] 解晗, 同小娟, 李俊, 张静茹, 刘沛荣, 于裴洋. 2000—2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 4536-4549.
- [26] Michaelsen J. Cross-validation in statistical climate forecast models. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1987, 26(11): 1589-1600.
- [27] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [28] Jiao L, Wang S J, Jiang Y, Liu X R. A 333-year record of the mean minimum temperature reconstruction in the Western Tianshan Mountains, China. *Geochronometria*, 2019, 46(1): 37-48.
- [29] 常永兴, 陈振举, 张先亮, 白学平, 赵学鹏, 李俊霞, 陆旭. 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应. *植物生态学报*, 2017, 41(3): 279-289.
- [30] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 孙柏林, 周莹. 1951—2014 年中国北方地区气温突变与变暖停滞的时空变异性. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1601-1615.
- [31] Wang X Y, Zhao C Y, Jia Q Y. Impacts of climate change on forest ecosystems in northeast China. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 4(4): 230-241.
- [32] 刘丹, 于成龙. 气候变化对东北主要地带性植被类型分布的影响. *生态学报*, 2017, 37(19): 6511-6522.
- [33] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 孙涛, 李兴欢, 黄唯, 刘瑞鹏, 李元昊. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1341-1352.
- [34] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应. *植物生态学报*, 2011, 35(1): 27-34.
- [35] 梁鹏鸿, 王襄平, 吴玉莲, 徐凯, 吴鹏, 郭鑫. 黑龙江胜山保护区阔叶红松林不同演替阶段径向生长与气候变化的关系. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 425-435.
- [36] Wang X C, Zhang M H, Ji Y, Li Z S, Li M, Zhang Y D. Temperature signals in tree-ring width and divergent growth of Korean pine response to recent climate warming in northeast Asia. *Trees*, 2017, 31(2): 415-427.
- [37] 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2258-2264.
- [38] 贾凌云, 冯汉青, 孙坤, 李岩, 张晋平. 温度变化下银白杨叶片中线粒体呼吸对光合作用和异戊二烯释放的影响. *植物生理学报*, 2012, 48(10): 965-970.
- [39] 孙毓, 王丽丽, 陈津. 长白落叶松树轮生长对气候变化的响应以及对夏季气温的重建. *地球环境学报*, 2012, 3(3): 889-899.
- [40] 李牧, 王晓春. 敦化三大硬阔、红松年轮-气候关系及生长季低温重建. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(3): 29-34.
- [41] 孙毓, 王丽丽, 陈津, 段建平. 利用兴安落叶松树轮最大晚材密度重建大兴安岭北部 5—8 月气温变化. *科学通报*, 2012, 57(19): 1791-1799.
- [42] 丁士晟. 东北低温冷害和粮食产量. *气象*, 1980, 6(5): 1-3.
- [43] McPhaden M J, Zebiak S E, Glantz M H. ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 2006, 314(5806): 1740-1745.
- [44] Xiao M Z, Zhang Q, Singh V P. Spatiotemporal variations of extreme precipitation regimes during 1961-2010 and possible teleconnections with climate indices across China. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(1): 468-479.