

引用格式: 周莹, 马龙, 刘廷玺, 黄星, 孙柏林. 杜松树轮年表记录的 192 a 阴山地区最低气温变化[J]. 山地学报, 2021, 39(3): 316-326.  
ZHOU Ying, MA Long, LIU Tingxi, HUANG Xing, SUN Bolin. Changes of minimum temperature recorded by *Juniperus* tree ring chronology during 192a in the Yinshan mountains area of China [J]. Mountain Research, 2021, 39(3): 316-326.

## 杜松树轮年表记录的 192 a 阴山地区最低气温变化

周莹, 马龙\*, 刘廷玺, 黄星, 孙柏林  
(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 利用树木年轮重建长历史气候因子并揭示其变化规律, 可充分弥补现代实测数据的不足。本研究在内蒙古阴山地区采集杜松树种样本, 经过运用 ARSTAN 程序去除生长趋势, 采用双权重平均法合成年表, 建立了 192 a 内蒙古阴山地区杜松 (*Juniperus rigida* S. et Z.) 树木年轮标准化年表, 分析了杜松生长与气候因子变化间的响应关系, 重建了年平均最低气温序列。结果表明: (1) 三类气温对杜松生长影响均呈显著负相关, 其中最低气温尤为显著; (2) 相对湿度、降水对杜松径向生长影响相对较弱; (3) 192 a 以来该地区平均最低气温出现了三次突变和两次停滞, 经历了五个偏暖期 (1825—1829 年、1870—1887 年、1894—1918 年、1934—1945 年、1981—2016 年) 以及四个偏冷期 (1829—1870 年、1887—1894 年、1918—1934 年、1945—1981 年), 存在 2 a、11 a 和 30 a 的变化周期, 与 ENSO、太阳黑子活动等周期较为接近。本研究丰富了树轮年表库, 并为区域长期气候变化以及生态环境问题的应对提供了参考。

**关键词:** 树轮年表; 气候变化; 杜松; 阴山地区

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

树木的生长不仅受自身生长特性的控制, 还受周边生长环境的制约<sup>[1]</sup>。通过树木年轮气候代用资料, 揭示过去长期气温变化规律, 充分弥补了现代实测数据的不足<sup>[2]</sup>。树木年轮具有定年准确等优点<sup>[3]</sup>, 较完整地记录了长历史气候变化规律<sup>[4]</sup>。例如, 在美洲的美国<sup>[5]</sup>、巴西<sup>[6]</sup>、欧州的德国<sup>[7]</sup>、瑞士<sup>[8]</sup>、俄罗斯<sup>[9]</sup>等地区, 学者们利用奥地利黑松 (*Pinus thunbergii* Parl.)<sup>[9]</sup>、白云杉 (*Picea glauca*)<sup>[11]</sup>、苏格兰松 (*Pinus sylvestris*)<sup>[12]</sup>、赤松 (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)<sup>[13]</sup> 等树轮资料进行树轮气候学研究; 分析树木年轮与气候因子间的响

应关系, 反演了气温和降水等气象要素<sup>[14-17]</sup>, 对降雪<sup>[18]</sup>、太平洋涛动<sup>[19]</sup>、CO<sub>2</sub><sup>[22]</sup> 浓度<sup>[20]</sup> 等方面也进行了重建。

我国在树木年轮与气候因子间的关系及气候因子长序列的重建研究<sup>[31-34]</sup> 中取得较大进展, 已有研究在新疆<sup>[21]</sup>、甘肃<sup>[22]</sup>、黑龙江<sup>[23]</sup>、陕西<sup>[24]</sup>、内蒙古<sup>[25]</sup> 等地区分别利用赤松<sup>[26]</sup>、落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen)<sup>[27]</sup>、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carrière)<sup>[28]</sup>、云杉 (*Picea asperata* Mast.)<sup>[29]</sup>、巴山冷杉 (*Abies fargesii* Franch.)<sup>[30]</sup> 等建立了年表。研究表明: 近 400 a 新疆在 1841—1865 年间最为干

收稿日期 (Received date): 2019-06-11; 改回日期 (Accepted date): 2021-04-23

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (51669016, 51869016); 内蒙古自治区“草原英才”工程 [National Natural Science Foundation of China (51669016, 51869016); Inner Mongolia Autonomous Region "Grassland Talents" Project]

作者简介 (Biography): 周莹 (1995-), 女, 内蒙古乌兰察布市人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水文学及水资源、气候变化、环境演变及三者间的响应关系。[ZHOU Ying (1995-), female, born in Wulanchabu, Inner Mongolia Autonomous Region, M. Sc. candidate, research on hydrology and water resources, climate change, environmental evolution and their response] E-mail: 1352348024@qq.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 马龙 (1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 水文学及水资源、气候变化、环境演变及三者间的响应关系。[MA Long (1978-), male, Ph. D., professor, specialized in hydrology and water resources, climate change, environmental evolution and their response] E-mail: malong4444333@163.com

早<sup>[21]</sup>;甘肃在 1916—1933 年期间是最早阶段<sup>[22]</sup>;黑龙江 10 月平均气温在 1848—1860 年、1873—1899 年处于冷期<sup>[23]</sup>;陕西 3—4 月平均最高气温在 1868—1892 年、2001—2012 年处于暖期<sup>[24]</sup>。目前我国最长的年表是青海地区 3500 a 圆柏(*Sabina chinensis* (L.) Ant.) 年表<sup>[35]</sup>。

杜松(*Juniperus rigida* S. et Z.) 生长缓慢且适应性很强,属柏科小乔木或灌木,主要分布在山地区及荒漠草原地区,成熟后逐渐由聚集变为随机分布<sup>[36]</sup>。杜松多用于改善气候、水土保持等研究<sup>[37]</sup>,较少地用于气温重建。已有学者在内蒙古包头地区建立了主体油松(85%)混合杜松(15%)年表并重建了 PDSI 指数<sup>[39]</sup>。杜松对气候的敏感程度普遍高于当地其他树种<sup>[40]</sup>,因此本研究选用树种杜松用以揭示长历史的气候特征。

内蒙古处于干旱、半干旱地区,经度跨度较大、区域辽阔、气候类型多<sup>[41]</sup>,气候响应敏感<sup>[42]</sup>、生态环境脆弱。本研究在内蒙古阴山地区(乌拉特前旗大桦背地区)采集杜松树种 66 根样芯,建立树轮标准化年表,揭示杜松生长与气候因子变化间的响应关系,重建年平均最低气温序列,揭示其长期变化规律,丰富了树轮年表库和气候变化研究成果,为该区长期气温规律和生态环境问题应对提供了参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点概况

采样点位于乌拉特前旗大桦背地区(见图 1),经纬度范围为 40°41′30.64″~40°42′34.96″N、109°28′48.21″~109°29′19.97″E 之间。杜松为大桦背地区主要建群树种,主要分布在阳坡、半阳坡,喜光、耐干旱瘠薄和寒冷气候<sup>[43]</sup>。大桦背地区属于阴山山系,不仅处于我国西风带,亦处于温带大陆性、温带季风性气候过渡带,降水主要集中在七八月份<sup>[44]</sup>。

### 1.2 样本采集

本次采样点区域海拔高度为 1340~1609 m,样本采集时间为 2017 年 8 月,采样高度位于胸高部位(1.2 m 处)<sup>[50]</sup>。钻取的样芯放置在 PVC 塑料管内,每棵树采集两个样芯,共采集 33 棵树(66 根样芯),定名为 DHB。样芯带回实验室后检查了结疤、破碎等问题,经过干燥、固定、打磨等处理过程后,最终全部参与分析。

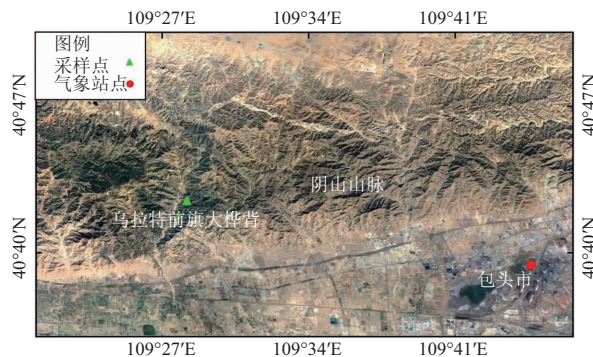


图 1 采样点和气象站点位置分布示意图

Fig. 1 Distribution map of sampling points and meteorological stations

### 1.3 数据处理

本文使用年轮分析系统对轮宽进行测量,之后利用 COFECHA 程序剔除效果较差的<sup>[45]</sup>,使用 ARSTAN 程序进行去趋势和标准化,合成标准化年表,并将年表的一阶自相关系数、平均敏感度、信噪比等统计特征值进行分析<sup>[41]</sup>。然后使用 SPASS 程序对年表与年(月)气温、降水等数据进行相关性分析,之后利用一元线性回归方程重建了年平均最低气温,并对重建方程特征值进行检验<sup>[26]</sup>。采用 M-K 检验法对气温突变年份进行确定<sup>[45]</sup>,结合气温阶段趋势线与 3~5 a 滑动值对变暖停滞年份进行确定<sup>[46]</sup>,使用变异系数 CV 来表示气温变化剧烈程度<sup>[46]</sup>。采用气候倾向率法对气温时间序列趋势进行分析,将气温进行冷暖阶段划分,计算如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (1)$$

式中, $\sigma$  为标准差(℃); $X_i$  为第  $i$  年对应的气温值(℃); $\mu$  为平均值(℃); $N$  为样本数量(个)。

将气温高于  $\mu + \sigma$  的时段定义为偏暖期,将气温低于  $\mu - \sigma$  的时段定义为偏冷期。最后采用 Matlab 软件编程进行小波周期分析<sup>[47]</sup>。

### 1.4 气象资料

本次气象资料采用杜松采样点距离最近(28.58 km)的包头气象站(40°39′N、109°46′E)气象资料,其包括 1951—2016 年各年(月)三类气温、降水以及相对湿度,对数据进行了检验,数据均无随机突变等现象,均稳定可靠。该站多年平均气温为 7.1℃,平均降水量为 256 mm,平均湿度为 51.90%,由图 2 可见,气温和降水年内变化呈现典

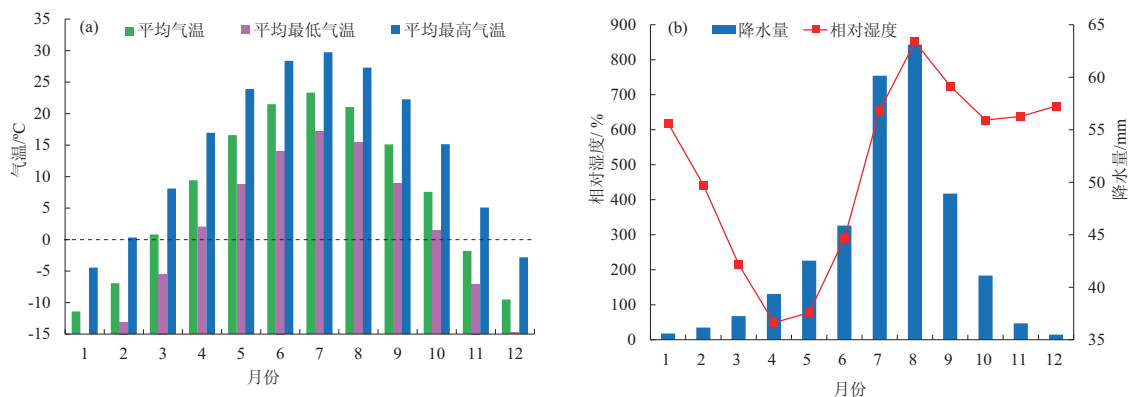


图2 包头站 1951—2016 年各月气温、降水及相对湿度变化:(a) 平均气温、平均最低气温、平均最高气温;(b) 降水量、相对湿度

Fig.2 Monthly changes of air temperature, precipitation and relative humidity in Baotou station from 1951 to 2016:

(a) average temperature, average minimum temperature, and average maximum temperature; (b) precipitation and relative humidity

型的抛物线型式,相对湿度在 4 月处于最小,8 月达到最大,具有典型温带大陆性季风气候特点。

2 结果与分析

2.1 年表的建立

运用 ARSTAN 程序去除生长趋势,采用双权重平均法<sup>[47]</sup>,建立了杜松 192 a 的树轮标准化年表(STD)(见图 3)。由表 1 可知,年表特征值均达到了较高的水平,表明该年表是可靠的<sup>[45]</sup>。

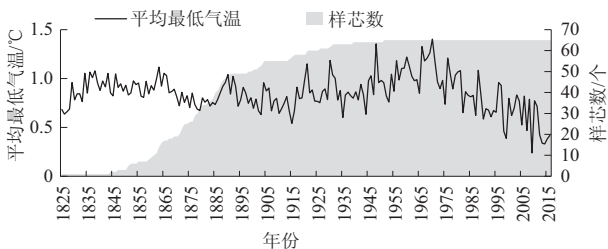


图3 杜松树木年轮标准化年表序列及样本数量

Fig.3 Standardized chronology sequence and sample size of *Juniperus.* tree rings

2.2 树木生长对气候要素的响应

如图 4 所示,阴山地区杜松 STD 年表与三类气温年(月)序列间普遍存在显著负相关关系( $P < 0.05$ ),其中与年平均最低气温呈极显著负相关( $-0.79$ )。因 STD 年表与三类气温序列间具有较好的自回归特征,对三类气温与一阶自差年表序列进行相关分析,结果表明:均存在负相关关系,其中年平均气温呈极显著负相关关系( $-0.24$ )。与气

表 1 杜松树木年轮标准化年表统计量汇总

Tab.1 Summarization of statistics of standardized chronology of *Juniperus.* tree rings

统计量	统计值
年表长度/a	192
个数/个	65
偏度系数	-0.41
一阶自相关系数	0.57
样本间的平均相关系数	0.49
高度/m	1340 ~ 1609
平均敏感度	0.56
标准差	0.49
信噪比	10.51

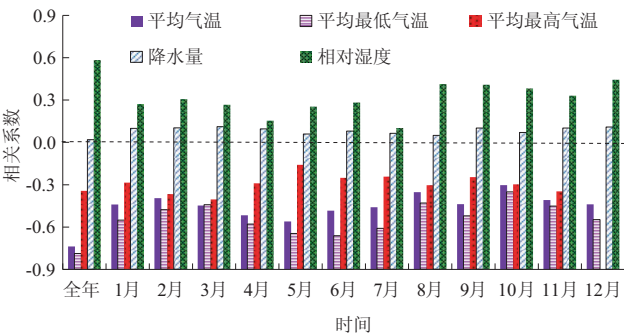


图4 杜松树木年轮标准化年表与年(月)气候因子间的相关性

Fig.4 Correlation between standardized chronology of *Juniperus.* tree rings and climatic factors

温相比,STD 年表与降水的相关性整体偏弱且呈正相关关系,其中 STD 年表与生长季初期的 3 月降水相关性最强,但均未通过显著性检验;与年相

对湿度相关性较为显著(0.58)。由此可知,杜松生长受气温和相对湿度的影响较大,降水量影响则相对微弱。

2.3 年平均最低气温的重建及检验

利用标准化年表序列与实测年平均最低气温序列之间的相关性,建立了线性回归方程,进而重建了1825—2016 年年平均最低气温(见图 5),方程如下:

$$y = -2.5996x + 3.0431 \quad (2)$$

式中, $y$  为 1951—2016 年年平均最低气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $x$  为标准化年表序列。

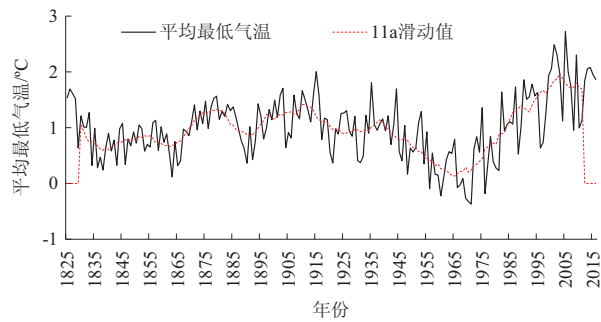


图 5 重建的阴山地区年平均最低气温序列

Fig. 5 Reconstructed series of annual mean minimum temperature series in the Yinshan mountains area, China

重建方程的相关系数(0.493)、方差解释量(24.3%)、调整后方差解释量(24.1%)均达到了95%的统计学显著水平。同时,重建方程的符号检验(27/33,  $p < 0.01$ )和乘积平均值检验(5.54,  $p < 0.01$ )也通过了显著性检验,缩减误差(0.40)和效率系数(0.38)的数值均较高且为正值,表明重建方程稳定可

靠,可用于该地区年平均最低气温的历史重建。

2.4 年平均最低气温重建序列的特征

2.4.1 冷暖变化阶段

192 a 以来,阴山地区存在 5 个偏暖期和 4 个偏冷期。由表 2 和图 6 可以看出,过去最为明显的两个寒冷时期发生在 19 世纪 30—70 年代和 20 世纪 40 年代中期至 80 年代,其中最长的冷期长达 41 a。最为明显的两个偏暖期发生在 19 世纪 90 年代至 20 世纪 10 年代后期和 20 世纪 80 年代至 21 世纪 10 年代,其中最长的暖期长达 35 a。

表 2 冷暖阶段及阶段平均温度

Tab. 2 Average temperature of the warm and cold period

阶段划分	年份	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
偏暖期	1825—1829 年	1.40
	1870—1887 年	1.28
	1894—1918 年	1.28
	1934—1945 年	1.05
	1981—2016 年	1.54
偏冷期	1829—1870 年	0.75
	1887—1894 年	0.89
	1918—1934 年	0.94
	1945—1981 年	0.40

2.4.2 变化趋势、突变与停滞及周期

近 200 年来,阴山地区年平均最低气温整体呈持续上升趋势( $0.002\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ),整体变化微弱,但阶段趋势明显。由图 7 可知,1825—1838 年

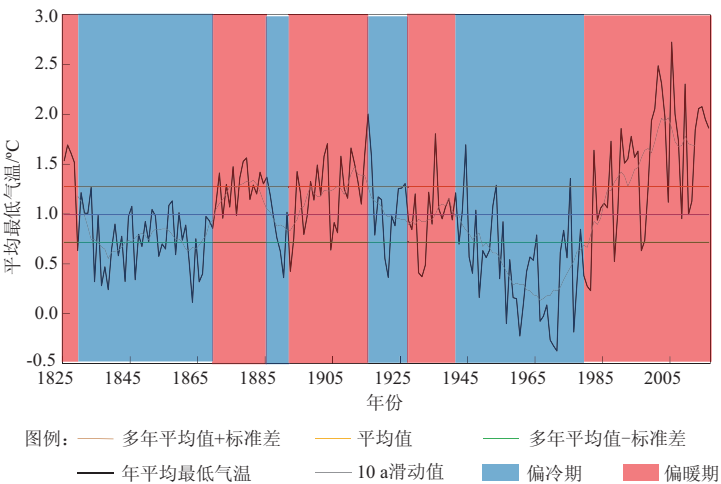


图 6 年平均最低气温的冷暖期变化

Fig. 6 Variation of cold and warm periods of annual mean minimum temperature

气温呈快速下降趋势( $-0.104\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ),其后 77 a 整体呈持续上升趋势( $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ),1915—1971 年气温整体呈快速下降趋势( $-0.156\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ )且在 1960—1970 年均值处于最小,其后 34 a 呈持续上升趋势( $0.053\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ )且在 2000—2010 年均值达到最大,2005 年之后气温呈缓慢下降趋势( $-0.012\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ )。由图 7 及表 3 可知,年平均最低气温历史上共发生了三次突变和两次停滞,突变年份分别出现在 1838 年、1915 年和 1971 年,停滞年份分别出现在 1921 年和 2005 年。年平均最低气温在 1838 年发生第一次变暖突变,突变前呈快速下降趋势( $-0.104\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ),持续下降 13 a 后发生变暖突变( $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ),突变后气温开始整体持续上升;在 1915 年,年平均最低气温发生第二次突变,此次突变为变冷突变( $-0.136\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ),突变后气温下降持续了 6 a,之后进入变冷停滞阶段(1921—1935 年)( $-0.007\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ),停滞前后气温变化剧烈程度均较弱,停滞持续 15 a 后,又开始大幅度持续下降( $-0.193\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ );在 1971 年发生最后一次变暖突变,突变后气温持续上升 34 a 后进入第二次变暖停滞阶段(2005—2016 年)( $-0.012\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ),停滞后气温变化较停滞前剧烈。由图 8 小波周期分析可知,阴山地区 192 a 年平均最低气温存在 2 a、11 a 和 30 a 准周期。

表 3 年平均最低气温重建序列相关统计量

Tab.3 Correlation statistics of annual mean minimum temperature reconstruction sequence

阶段	倾向率/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ )	持续年份/a	变异系数
1825—1838 年	-0.104	13	0.507
1838—1857 年	0.012	19	0.337
1857—1863 年	-0.076	6	0.443
1863—1879 年	0.064	17	0.412
1879—1890 年	-0.082	11	0.309
1890—1915 年	0.017	26	0.344
1915—1921 年	-0.136	6	0.491
1921—1935 年	0.014	14	0.439
1935—1971 年	-0.193	36	0.951
1971—2005 年	0.053	34	0.621
2005—2016 年	-0.012	11	0.449

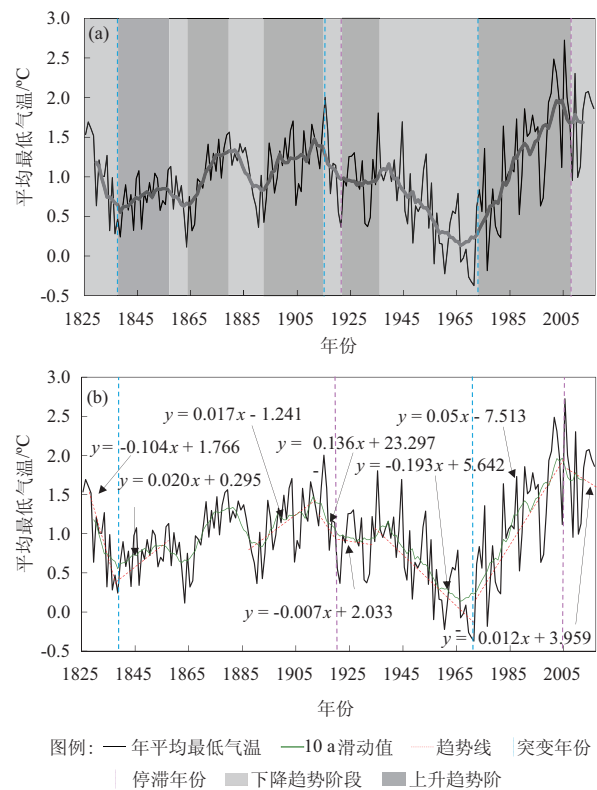


图 7 年平均最低气温重建序列变化:

(a)趋势阶段划分;(b)阶段趋势线

Fig.7 Reconstruction sequence change of annual mean minimum temperature: (a) phase division of trends; (b) phase trend lines

### 3 讨论

树木的生长受气温、水分、光照等多种因子影响<sup>[49]</sup>。在干旱—半干旱地区,气温和降水成为影响树木生长的主要气候因子<sup>[50]</sup>。阴山地区杜松生长对气候因子的变化响应较为明显,显著影响树木径向生长的主要限制因子为年平均最低气温。杜松径向生长对低温的响应在年、月尺度上均为负相关关系,当降水较少时,低温环境会降低杜松蒸发和光合作用能力,减弱杜松的生理作用,不利于杜松的正常生长,最终使杜松径向宽度减小,研究表明高原寒旱地区的树木径向生长对气温的响应可能存在特殊的负效应<sup>[51]</sup>;另外,降水对中、高海拔地区森林上线的树木生长具有一定的积累作用<sup>[52]</sup>,相对湿度控制植物叶片的气孔导度,从而控制植物的径向生长<sup>[53]</sup>。

阴山地区过去 192 a 来年平均最低气温经历了 1825—1829 年、1870—1887 年、1894—1918 年、1934—1945 年、1981—2016 年 5 个偏暖期以及



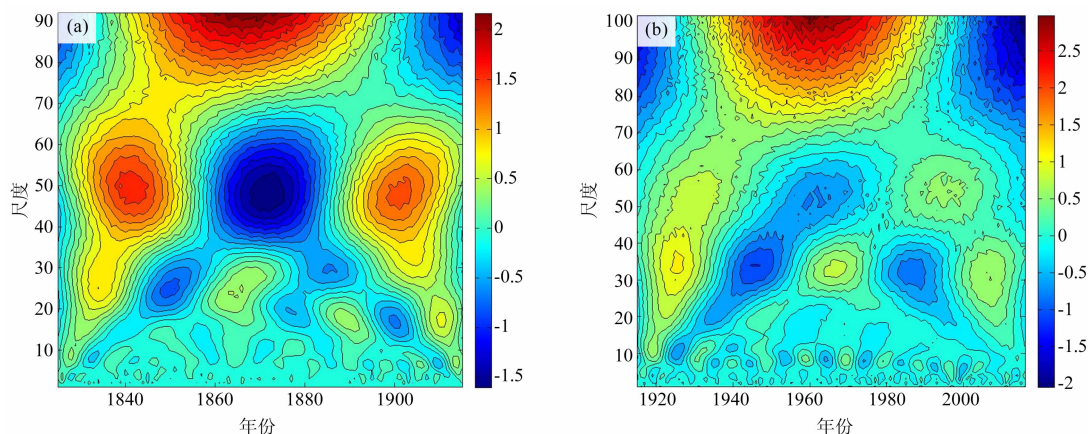


图 8 年平均最低气温重建序列小波周期时频分布图:(a) 1825—1915 年;(b) 1915—2016 年

Fig. 8 Time-frequency distribution of annual mean minimum temperature reconstruction sequence wavelet;

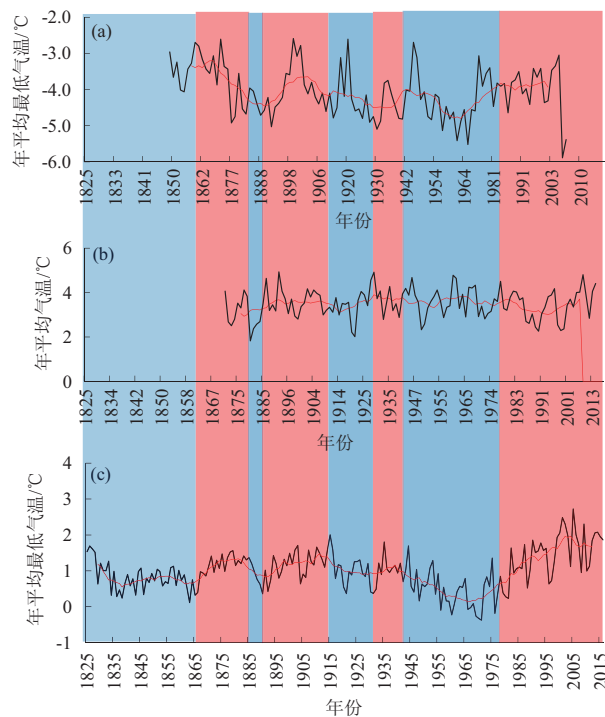
(a) 1825 – 1915; (b) 1915 – 2016

1829—1870 年、1887—1894 年、1918—1934 年、1945—1981 年 4 个偏冷阶段。其中 3 个偏暖期 (1870—1887 年、1894—1918 年、1934—1945 年) 与《中国气象灾害大典:内蒙古卷》中记录的发生旱灾时间较为一致<sup>[53]</sup>。

选择阴山最近两个区域的气温序列<sup>[54–55]</sup>进行对比分析(如图 9),得出阴山地区平均最低气温与内蒙古多伦、秦岭地区等气温序列在 20 世纪 10 年代后期至 30 年代均呈下降趋势,在冷暖期记录方面有较好的一致性,但同时也存在一定的差异,如多伦、秦岭地区的暖、冷期持续时间较阴山地区更短,且多伦平均最低气温变化剧烈程度( $CV = 5.27\%$ )最为剧烈,这可能是由于所处位置不同、重建时间尺度差异、不同物种间对气候响应机制的差异以及采用不同的去趋势方法所造成的<sup>[61]</sup>。阴山地区近 192 a 年平均最低气温存在 2 a、11 a 周期,亦可能受 ENSO 事件<sup>[50]</sup>、太阳黑子活动<sup>[50]</sup>等影响。可见阴山地区气温受到全球范围内多种因素综合的影响<sup>[60]</sup>。本研究通过树木年轮重建当地历史气候序列,不仅可以丰富树轮年表库,还可以为该地区长期气候变化研究提供依据。

## 4 结论

(1) 阴山地区杜松树轮年表长达 192 a,标准年表的敏感度为 0.559。三类气温对杜松生长影响均很显著,其中最低气温尤为显著,两者之间呈显著负相关关系,其次是相对湿度,而降水对杜松径向生长



注:黑色线表示温度重建值;红色线表示 11 a 滑动平均值;红色区域表示本次重建结果所显示出的暖期;蓝色区域表示本次重建结果所显示出的冷期。

图 9 本研究平均最低气温重建序列结果与其他地区对比图:

(a) 内蒙古多伦县;(b) 秦岭地区;(c) 内蒙古阴山地区(本研究)

Fig. 9 Comparison of reconstructed mean minimum temperature

sequence results in this study with those in other regions: (a) Duolun

county, Inner Mongolia; (b) the Qinling mountains area;

(c) the Yinshan mountains area, Inner Mongolia (this study)

的作用相对较弱。

(2) 阴山地区平均最低气温 192 a 来出现了三

次突变和两次气温停滞,经历了 1825—1829 年、1870—1887 年、1894—1918 年、1934—1945 年、1981—2016 年 5 个偏暖阶段以及 1829—1870 年、1887—1894 年、1918—1934 年、1945—1981 年 4 个偏冷阶段。

(3) 阴山地区平均最低气温存在 2 a、11 a 和 30 a 变化周期,可能与 ENSO 事件、太阳黑子活动等周期较为接近,表明阴山地区气温受影响的因素是多方面的。

## 参考文献 (References)

- [1] KERHOULAS L P, KANE J M. Sensitivity of ring growth and carbon allocation to climatic variation vary within ponderosa pine trees [J]. *Tree Physiology*, 2012, **32** (1): 14 – 23. DOI: 10.1093/treephys/tpr112
- [2] DIAZ H F, TRIGO R, HUGHES M K, et al. Spatial and temporal characteristics of climate in medieval times revisited [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2011, **92** (11): 1487 – 1500. DOI: 10.1175/BAMS-D-10-05003.1
- [3] LI B, CHEN Y, SHI X, et al. Temperature and precipitation changes in different environments in the arid region of northwest China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, **112** (3 – 4): 589 – 596. DOI: 10.1007/s00704-012-0753-4
- [4] 王婷, 于丹, 李江风, 等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2003, **27** (1): 23 – 33. [WANG Ting, YU Dan, LI Jiangfeng, et al. Advances in research on the relationship between climate change and tree-ring width [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27** (1): 23 – 33] DOI: 10.17521/cjpe.2003.0004
- [5] PEARLJ K, ANCHUKAITIS K J, DONNELLY J P, et al. A late Holocene subfossil Atlantic white cedar tree-ring chronology from the northeastern United States [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, **228**: 106104. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.106104
- [6] PERONE A, LOMBARDI F, MARCHETTI M, et al. Evidence of solar activity and El Niño signals in tree rings of *Araucaria araucana* and *A. angustifolia* in South America [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, **145**: 1 – 10. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.08.004
- [7] MUIGG B, SEIM A, TEGEL W, et al. Tree rings reveal dry conditions during Charlemagne's Fossa Carolina construction in 793 CE [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, **227**: 106040. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.106040
- [8] BUNTGEN U, ESPER J, FRANK D C, et al. A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures [J]. *Climate Dynamics*, 2005, **25** (2 – 3): 141 – 153. DOI: 10.1007/s00382-005-0028-1
- [9] WILES G C, SOLOMINA O, D'ARRIGO R, et al. Reconstructed summer temperatures over the last 400 years based on larch ring widths: Sakhalin Island, Russian Far East [J]. *Climate Dynamics*, 2014, **45** (1 – 2): 397 – 405. DOI: 10.1007/s00382-014-2209-2
- [10] LEAL S, EAMUS D, GRABNER M, et al. Tree rings of *Pinus nigra* from the Vienna basin region (Austria) show evidence of change in climatic sensitivity in the late 20th century [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, **38** (4): 744 – 759. DOI: 10.1139/X07-189
- [11] BARBER V A, JUADY G P, FINNEY B P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress [J]. *Nature*, 2000, **405** (6787): 668 – 673.
- [12] KULLMAN L. 20th century climate warming and tree-limit rise in the southern Scandes of Sweden [J]. *A Journal of the Human Environment*, 2001, **30** (2): 72 – 80. DOI: 10.1579/0044-7447-30.2.72
- [13] SANCHEZ-SALGUREO R, NAVARRO-CERRILLO R M, CAMARERO J J, et al. Selective drought-induced decline of pine species in southeastern Spain [J]. *Climatic Change*, 2012, **113** (3 – 4): 767 – 785. DOI: 10.1007/s10584-011-0372-6
- [14] VITALI V, BUNTGEN U, BAUHUS J. Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in southwestern Germany [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23** (12): 5108 – 5119. DOI: 10.1111/gcb.13774
- [15] LARA A, VILLALBA R, URRUTIA R. A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer-fall streamflow in the valdivian rainforest eco-region, Chile [J]. *Climatic Change*, 2008, **86** (3 – 4): 331 – 356. DOI: 10.1007/s10584-007-9287-7
- [16] HUGHES M K, SCHWEINGRUBER F H, CARTWRIGHT D, et al. July-August temperature at Edinburgh between 1721 and 1975 from tree-ring density and width data [J]. *Nature*, 1984, **308** (5957): 341 – 344. DOI: 10.1038/308341a0
- [17] ZHANG Y, WILMKING M. Divergent growth responses and increasing temperature limitation of Qinghai spruce growth along an elevation gradient at the northeast Tibet Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, **260** (6): 1076 – 1082. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.06.034
- [18] D'AUBETERRE G, FAVILLIER A, MAINIERI R, et al. Tree-ring reconstruction of snow avalanche activity: Does avalanche path selection matter? [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **684** (20): 496 – 508. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.194
- [19] BUCKLEY B M, UMMENHOFER C C, D'ARRIGO R D, et al. Correction to: Interdecadal Pacific Oscillation reconstructed from trans-Pacific tree rings: 1350—2004 CE [J]. *Climate Dynamics*, 2019, **53**: 5137. DOI: 10.1007/s00382-019-04928-5
- [20] SONTI N F, HALLETT R A, GRIFFIN K L, et al. White oak and red maple tree ring analysis reveals enhanced productivity in urban forest patches [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **453**:

117626. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117626
- [21] 秦莉,袁玉江,喻树龙,等. 新疆赛里木湖流域过去 373 年降水变化的树轮记录[J]. 生态学报,2017,37(4):1084–1092. [QIN Li, YUAN Yujiang, YU Shulong. et al. Tree-ring-based precipitation variability over the past 373 years in the Sayram Lake Basin, Tianshan Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):1084–1092] DOI: 10.5846/stxb201604270801
- [22] 陈峰,魏文寿,袁玉江,等. 基于多点树轮序列的 1768—2006 年甘肃降水量变化[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1520–1526. [CHEN Feng, WEI Wenshou, YUAN Yujiang, et al. Variation of annual precipitation during 1768—2006 in Gansu inferred from multi-site tree-ring chronologies [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1520–1526] DOI:10.7522/j.issn.1000–694X.2013.00218
- [23] YIN H, LIU H, HUANG L, et al. Reconstruction of October mean temperature since 1796 in Wuying based on tree ring data [J]. Advances in Climate Change Research, 2010,1(2):100–106. DOI: 10.3724/SP.J.1248.2010.00100
- [24] 刘洪滨,邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度[J]. 气象学报,2000,58(2):223–233. [LIU Hongbin, SHAO Xuemei. Reconstruction of early-spring temperature at Zhenan from 1755 using tree ring chronology [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000,58(2):223–233] DOI: 10.11676/qxb2000.023
- [25] 马龙,刘廷玺,寇志强,等. 科尔沁沙地榆树生长与水文气象因子的关系及气候重建[J]. 冰川冻土,2007,29(5):802–807. [MA Long, LIU Tingxi, KOU Zhiqiang. et al. Relationship of elm growth and hydrometeorological factors of Horqin sandy land and climatic series reconstruction [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007,29(5):802–807] DOI: 10.3969/j.issn.1000–0240.2007.05.019
- [26] 段媛. 不同海拔太白红杉年轮对气候响应差异及气温重建[D]. 西安:西北大学,2016:33. [DUAN Yuan. The difference response to climate of Larix chinensis at difference altitudes and temperature reconstruction [D]. Xi'an: Northwest University, 2016:33]
- [27] 赵学鹏,白学平,李俊霞,等. 气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2019,38(3):637–647. [ZHAO Xuepeng, BAI Xueping, LI Junxia, et al. Response of Larix olgensis at different elevations to climate change in the context of climate warming [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 637–647] DOI: 10.13292/j.1000–4890.201903.021
- [28] LI J, GOU X, COOK E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in northwest China [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33:L07715. DOI: 10.1029/2006GL025803
- [29] 桑卫国,王云霞,苏宏新,等. 天山云杉树轮宽度对梯度水分因子的响应[J]. 科学通报,2007,52(19):2292–2298. [SANG Weiguo, WANG Yunxia, SU Hongxin, et al. Response of spruce ring width to gradient water factor in Tianshan Mountain [J]. Chinese Science Bulletin, 2007,52(19):2292–2298] DOI: 10.3321/j.issn:0023–074x.2007.19.014
- [30] 高娜,李书恒,白红英,等. 秦岭牛背梁自然保护区巴山冷杉(Abies fargesii)树轮宽度对气候变化响应的分离效应[J]. 生态学杂志,2016,35(8):2056–2065. [GAO Na, LI Shuheng, BAI Hongying, et al. Response divergence of Abies fargesii tree-ring widths to climate variation in the Niubeiliang Nature Reserve of the Qinling Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8):2056–2065] DOI: 10.13292/j.1000–4890.201608.025
- [31] 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[J]. 中国沙漠,2006,26(3):399–402. [LU Ruijie, XIA Hong. Response of contemporary tree ring width of pinus tabulaeformis to climate change at south margin of Tengger Desert, China [J]. Journal of Desert Research, 2006,26(3):399–402] DOI: 10.3321/j.issn:1000–694X.2006.03.015
- [32] 王梦麦,戴君虎,白洁,等. 利用树木年轮重建六盘山地区 1900 年以来的干湿变化[J]. 古地理学报,2009,11(3):355–360. [WANG Mengmai, DAI Junhu, BAI Jie, et al. Reconstruction of humidity changes from tree rings in Liupan Mountains area since 1900 [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3):355–360]
- [33] 朱娜. 秦岭南坡油松年轮  $\delta^{13}\text{C}$  变化及与气候因子的关系研究[D]. 西安:西北农林科技大学,2019:88–90. [ZHU Na. Research on the change of  $\delta^{13}\text{C}$  of Pinus tabulaeformis on the southern of Qinling Mountains and its relationship with climatic factors [D]. Xi'an: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019:88–90]
- [34] 孙军艳,刘禹,蔡秋芳,等. 额济纳 233 年来胡杨树轮年表的建立及其所记录的气象、水文变化[J]. 第四纪研究,2006,26(5):799–807. [SUN Junyan, LIU Yu, CAI Qiufang, et al. Climatic and hydrological changes of Ejina, Inner Mongolia, China during the past 233 years recorded in tree-rings of populus euphratica [J]. Quaternary Sciences, 2006,26(5):799–807] DOI: 10.3321/j.issn:1001–7410.2006.05.015
- [35] YANG B, QIN C, WANG J, et al. A 3500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan plateau [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(8):2903–2908. DOI: 10.1073/pnas.1319238111
- [36] 褚胜利,李登武,李景侠. 陕西府谷杜松自然保护区杜松种群结构与生命表分析[J]. 四川大学学报(自然科学版),2008,45(1):176–180. [CHU Shengli, LI Dengwu, LI Jingxia. Study on the population structure and life table of the endangered population of juniperus rigida in Fugu Natural Reserve in Shaanxi province [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008,45(1):176–180] DOI: 10.3969/j.issn.0490–6756.2008.01.034
- [37] SHIN W S, HA J. Analyses of lipid and volatile components in



- juniper seed (*Juniperus rigida* Sieb. et Zucc.) [J]. Journal of the Korean Society of Food Science & Nutrition, 2003, **32**(6): 795.
- [38] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, **40**(2): 678 – 691. [LIU Jing, WEN Zhongming, GANG Chengcheng. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(2): 678 – 691] DOI: 10.5846/stxb201901090082
- [39] LIU Y, ZHANG X, SONG H, et al. Tree-ring-width-based PDSI reconstruction for central Inner Mongolia, China over the past 333 years [J]. Climate Dynamics, 2017, **48**(3 – 4): 867 – 879. DOI: 10.1007/s00382-016-3115-6
- [40] 赵利清, 杨勤. 准格尔黄土丘陵沟壑区杜松疏林特征分析[J]. 西北植物学报, 2011, **31**(3): 595 – 601. [ZHAO Liqing, YANG Jie. Characteristics of *Juniperus rigida* open forest in Junger Loess hill-gully region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, **31**(3): 595 – 601]
- [41] 曹红芳, 秦伟, 胡永宁, 等. 榆树年轮记录的浑善达克沙地春季平均最高气温[J]. 中国沙漠, 2018, **38**(6): 1313 – 1320. [CAO Hongfang, QIN Wei, HU Yongning, et al. Elm tree-ring records of Spring mean maximum temperature in the Otindag Sandy Land, China [J]. Journal of Desert Research, 2018, **38**(6): 1313 – 1320] DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2018.00056
- [42] 刘欣华, 张春霞, 万芳. 内蒙古西部地区生态环境建设的成就与问题[J]. 内蒙古林业调查设计, 2002, **25**(3): 19 – 20 + 45. [LIU Xinhua, ZHANG Chunxia, WAN Fang. Achievements and problems of ecological environment construction in western Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2002, **25**(3): 19 – 20 + 45] DOI: 10.3969/j.issn.1006-6993.2002.03.008
- [43] 郭金海. 乌拉山植被及植物区系组成特征[J]. 内蒙古林业调查设计, 2006, **29**(3): 27 – 30. [GUO Jinhai. Vegetation and floristic composition characteristics of Wula Mountain [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2006, **29**(3): 27 – 30] DOI: 10.3969/j.issn.1006-6993.2006.03.010
- [44] 李荣. 有杜松(*Juniperus rigida* Sieb. et Zucc.)参加群落的群落特征、生长速率及其与生境关系的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013: 55 – 56. [LI Rong. Study of community characteristics, growth rate and relationship with different habitats of community participated with *Juniperus* [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2013: 55 – 56]
- [45] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 等. 利用树木年轮宽度资料重建川西米亚罗地区过去 200 年夏季温度的变化[J]. 第四纪研究, 2011, **31**(3): 522 – 534. [LI Zongshan, LIU Guohua, FU Bojie, et al. Reconstruction of summer temperature changes in the past 200 years using tree-ring width data in the Miyaluo region, western Sichuan [J]. Quaternary Sciences, 2011, **31**(3): 522 – 534]
- [46] 孙柏林, 马龙, 冯起, 等. 内蒙古气温变暖停滞对其影响因子变化的响应[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2131 – 2142. [SUN Bolin, MA Long, FENG Qi, et al. Response of the warming hiatus to changing influences over the Inner Mongolia Autonomous Region [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2131 – 2142] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0255
- [47] FANG O, ZHANG Q B, VITASSE Y, et al. The frequency and severity of past droughts shape the drought sensitivity of juniper trees on the Tibetan plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2021, **486**: 118968. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.118968
- [48] COOK E R, BRIFFA K R, JONES P D, et al. Spatial regression methods in dendroclimatology: A review and comparison of two techniques [J]. International Journal of Climatology, 1994, **14**: 379 – 402. DOI: 10.1002/joc.3370140404
- [49] 何吉成, 邵雪梅. 德令哈地区树轮宽度指数与草地植被指数的关系[J]. 科学通报, 2006, **51**(9): 1083 – 1090. [HE Jicheng, SHAO Xuemei. Relationship between tree-ring width index and grassland vegetation index in Delingha region [J]. Science Bulletin, 2006, **51**(9): 1083 – 1090] DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2006.09.014
- [50] 李宗善, 刘国华, 张齐兵, 等. 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[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(6): 628 – 641. [LI Zongshan, LIU Guohua, ZHANG Qibing, et al. Tree ring reconstruction of summer temperature variations over the past 159 years in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(6): 628 – 641] DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.06.002
- [51] 杜恒文, 叶茂. 塔里木河下游胡杨年轮径向生长对极端低温的响应研究[J]. 生物学杂志, 2020, **37**(4): 50 – 53 + 84. [DU Hengwen, YE Mao. Response of radial growth of *Populus euphratica* Oliv. to extreme low temperature in the lower reaches of Tarim River [J]. Journal of Biology, 2020, **37**(4): 50 – 53 + 84] DOI: 10.3969/j.issn.2095-1736.2020.04.050
- [52] 尚华明, 洪建昌, 张瑞波, 等. 树轮记录的西藏东北部过去 552 a 上年 10 月至当年 5 月降水量变化[J]. 山地学报, 2018, **36**(6): 821 – 832. [SHANG Huaming, HONG Jianchang, ZHANG Ruibo, et al. Tree-ring recorded 522-year precipitation from previous October to May in northeast Tibet, China [J]. Mountain Research, 2018, **36**(6): 821 – 832] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000378
- [53] 陈峰, 袁玉江, 喻树龙. 闽中北柳杉树轮指示的气候信号与季风区不同地域干湿变化关系[J]. 山地学报, 2015, **33**(6): 690 – 695. [CHEN Feng, YUAN Yujiang, YU Shulong. Drought signals in the tree-ring width record of cedar (*cryptomeria fortunei*) trees from north central Fujian: Linkages to the monsoonal regions [J]. Mountain Research, 2015, **33**(6): 690 – 695] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000083
- [54] 杨丽萍. 内蒙古多伦县近 60 年气候变化及基于榆树轮宽年表的气候相关[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013: 66 – 75.

- [YANG Liping. Correlation study on climate based on ring width chronology of *Ulmus pumila* and climate change in Inner Mongolia Duolun County in past 60 years [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013: 66 – 75]
- [55] 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度[J]. 气象学报, 2000, **58**(2): 223 – 233. [LIU Hongbin, SHAO Xuemei. Reconstruction of early-spring temperature at Zhen An from 1755 using tree ring chronology [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000, **58**(2): 223 – 233]
- [56] 沈建国. 中国气象灾害大典: 内蒙古卷[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 190 – 200. [SHEN Jianguo. China meteorological disaster canon: Inner Mongolia volume [M]. Beijing: Meteorological Press, 2008: 190 – 200]
- [57] 靳立亚, 秦宁生, 勾晓华, 等. 青海南部高原近 450 年来春季最高气温序列及其时变特征[J]. 第四纪研究, 2005, **25**(2): 193 – 201. [JIN Liya, QIN Ningsheng, GOU Xiaohua, et al. Series of Spring maximum temperature in southern Qinghai plateau and analysis of its variations during the last 450 years [J]. Quaternary Sciences, 2005, **25**(2): 193 – 201]
- [58] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 西藏东部过去 400 年秋、冬季平均最低气温的树木年轮分析[J]. 高原气象, 2010, **29**(2): 359 – 365. [ZHANG RuiBo, YUAN Yujiang, WEI Wenshou, et al. Analysis on mean minimum temperature in the east Tibet from Autumn to Winter in tree ring of the past 400 years [J]. Plateau Meteorology, 2010, **29**(2): 359 – 365]
- [59] XU D, YAN H. A study of the impacts of climate change on the geographic distribution of *Pinus koraiensis* in China [J]. Environment International, 2001, **27**(2 – 3): 201 – 205. DOI: 10.1016/S0160 – 4120(01)00083 – 6
- [60] 刘禹, 蔡秋芳, 马利民, 等. 树轮降水记录及东亚夏季风强弱变化——以内蒙古包头地区为例[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2001, **8**(1): 91 – 97. [LIU Yu, CAI Qiufang, MA Limin, et al. Tree ring precipitation records from Baotou and the east Summer monsoon variations for the last 254 years [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2001, **8**(1): 91 – 97] DOI: 10.3321/j.issn:1005 – 2321.2001.01.012
- [61] SHAH S K, PANDEY U, MEHROTRA N, et al. A Winter temperature reconstruction for the Lidder Valley, Kashmir, Northwest Himalaya based on tree-rings of *Pinus wallichiana* [J]. Climate Dynamics, 2019 (53): 4059 – 4075. DOI: 10.1007/s00382 – 019 – 04773 – 6
- [62] KAUFMANN R K, KAUPPI H, MANN M L, et al. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature since 1998 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, **108**(29): 11790 – 11793.
- [63] 段建平, 王丽丽, 李论, 等. 树轮最大密度记录的贡嘎山区公元 1837 年以来的温度变化[J]. 科学通报, 2010, **55**(11): 1036 – 1042. [DUAN Jianping, WANG Lili, LI Lun, et al. Temperature variability since A. D. 1837 inferred from tree-ring maximum density of *Abies fabric* in Gongga Mountains, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55**(11): 1036 – 1042] DOI: 10.3969/j.issn.1002 – 0799.2014.04.001

## Changes of Minimum Temperature Recorded by *Juniperus*. Tree Ring Chronology during 192a in the Yinshan Mountains Area of China

ZHOU Ying, MA Long\*, LIU Tingxi, HUANG Xing, SUN Bolin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** By reconstructing long-term historical climate factors from tree rings, the temperature variation in the past can be revealed, which can make up for the lack of measured data in recent years. In this paper, *Juniperus rigida* S. et Z. were collected in the Yinshan mountains area of Inner Mongolia, and ARSTAN program was used to remove the growth trend, and the chronology was synthesized by Double Weight Average method. The tree-ring standardized chronology of *Juniperus*. in 192a was established. The relationship between the growth of *Juniperus*. and climate change was analyzed, and the series of annual mean minimum temperature was reconstructed. The results showed that: (1) Three kinds of air temperature had significant negative correlation on the growth of *Juniperus*. , and the lowest temperature was particularly significant; (2) Relative humidity and rainfall had relatively weaker influenced on the radial growth of *Juniperus*. ; (3) During 192a the mean minimum temperature of

this area appeared three mutations and two stagnations, had experienced five slant warm periods (1825 – 1829, 1870 – 1887, 1894 – 1918, 1934 – 1945, 1981 – 2016) and four partial cold periods (1829 – 1870, 1887 – 1894, 1918 – 1934, 1945 – 1981). There were periods of change for 2a, 11a and 30a, which were close to ENSO and sunspot activity. This study enriches the tree-ring chronology database, and provides a reference for the response to regional long-term climate change and ecological and environmental problems.

**Key words:** tree ring chronology; climate change; *Juniperus.* ; the Yinshan mountains area