



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

孙毓^{①②}, 王丽丽^{①*}, 陈津^③, 段建平^④

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044;

④ 中国科学院植物研究所, 北京 100093

* 联系人, E-mail: lilywang15@yahoo.ca

2011-06-23 收稿, 2012-01-19 接受

国家自然科学基金(40871058)、科技部公益性行业(气象)科研专项(YHY200806011)和科技基础性工作专项(2007FY220200)资助

摘要 对大兴安岭北部 3 个样点的兴安落叶松(*Larix gmelinii*)树轮样本进行树轮密度的分析, 相关分析结果显示, 树轮最大晚材密度年表与夏季气温变化有显著正相关关系, 利用其中两个样点的树轮最大晚材密度对研究区 1855 年以来 5~8 月的平均最高气温变化进行了重建, 重建值的解释方差量为 39.5%. 在大兴安岭北部过去的 154 年里, 存在 4 个冷期: 1874~1893, 1927~1948, 1951~1960 和 1992~2002 年; 以及 4 个暖期: 1855~1873, 1894~1916, 1961~1991 和 2003~2008 年. 该地区 20 世纪末冬季气温的变暖现象比夏季更为明显. 重建结果与研究区周围的气温序列均有较好的一致性, 可以指示较大区域的气候特征.

关键词

兴安落叶松
树木年轮
最大晚材密度
夏季气温重建

20 世纪以来全球增温等气候事件对人类活动产生的巨大影响, 使全球和区域尺度上气温变化规律成为 PAGES 重点的研究方向之一^[1,2]. 东北地区位于我国纬度最高的地区, 也是气候变化的敏感区^[3,4]. 树木年轮作为重要的代用资料之一, 可以记录过去百年、甚至千年尺度的气温变化^[5~7]. 在东北地区, 树木年轮也被大量用于历史气候的相关研究^[8~12], 并对过去气温变化进行了重建^[13~16]. 但目前的研究大多基于对树轮宽度的分析, 用来指示冬春季气温变化, 利用树轮资料重建该地区夏季气温变化的研究尚未见报道. 此外, 有研究指出我国 20 世纪 80 年代以来的冬季气温变暖较为突出, 而夏季增温则不明显^[17,18]. 因此有必要对我国东北地区的夏季气温进行研究.

作为树轮气候学研究中的重要指标, 树轮密度在冷湿地区有较高的敏感性, 特别是最大晚材密度

对生长季温度有很好的响应^[19~21]. 多种针叶树晚材细胞壁的加厚过程, 受夏季气温变化的影响^[22,23]. 有研究指出, 生长于漠河县的兴安落叶松树轮最大晚材密度对夏季后期的气温变化具有很高的敏感性^[24]. 因此, 利用兴安落叶松进行树轮密度对该地区夏季气温变化进行研究是可行的.

本文通过对大兴安岭北部兴安落叶松树轮密度的研究, 重建了该地区过去 154 年来 5~8 月平均最高气温的变化. 重建结果填补了该区夏季气温序列的空白, 也可为探讨我国东北地区夏季气候特征提供一定依据.

1 资料与方法

(i) 树轮资料. 大兴安岭位于我国东北地区, 黑龙江省、内蒙古自治区北部, 内蒙古高原与松辽平原之间. 北起黑龙江畔, 南至西拉木伦河上游谷地.

英文版见: Sun Y, Wang L L, Chen J, et al. Reconstructing mean maximum temperatures of May–August from tree-ring maximum density in North Da Hinggan Mountains, China. Chin Sci Bull, 2012, 57: 2007–2014, doi: 10.1007/s11434-012-5055-9

山脉呈东北至西南走向, 全长 1200 多千米, 宽 200~300 km, 海拔 1100~1400 m, 主峰索岳尔济山. 大兴安岭原始森林茂密, 是我国重要的林业基地之一, 主要树种有兴安落叶松、樟子松、白桦等.

树轮样本采集于 2008 年 9 月, 3 个采样点分别位于内蒙古呼伦贝尔盟满归县的格林林场(GL), 白马林场(BM)以及乌玛县乌玛管护站(WM), 其中 GL 和 WM 接近森林的上限, BM 位于森林下部的平地(见图 1). 样本均为直径 12 mm 的树芯, 每棵树采集 2 个树芯, 树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), 采样点的基本情况见表 1.

(ii) 气象资料. 本文使用采样点附近的漠河站器测资料进行分析, 代表该地区的气候变化特征. 资料长度为 1957~2008 年, 包括月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水 4 个指标. 经计算该地区年均温为 -4.3°C , 年均降水量为 430.3 mm, 6~9 月的降水量占全年降水量的 70%以上(图 2).

(iii) 数据分析. 将树芯进行树轮密度实验的实验室预处理^[25,26], 依照 DendroScope 测量的纤维角度, 用 DendroCut 将样本切成 1 mm 厚的薄片, 再用 80°C 的热水进行萃取 48 h 进行脱糖脱脂. 在 X 光下投射成像, 使用 Dendro2003(WALESCH ELECTRONIC)密度测量仪将 X 光片上的光学信号转化成相应的树轮密度信号, 获得树轮的早、晚材宽度, 年轮宽度, 早、晚材平均密度, 早材最小密度和晚材最大密度 7 个参数的数据. 利用树轮宽度指标进行交叉定年后, 使用 Cofecha 程序^[27]进行交叉定年的检验, 通过 ARSTAN^[28]建立年表, 选择步长为样本长度 2/3 的样条函数去除生长趋势. 3 个样点的树轮最大晚材密度年表统计特征及共同区间分析结果见表 2.

将 3 个样点的树轮最大晚材密度年表与气象资料做 Pearson 相关分析, 来检验树轮年表对气候要素的响应. GL 样点最大晚材密度年表(GLMXD)与 WM 样点最大晚材密度年表(WMMXD)显著正相关($r =$

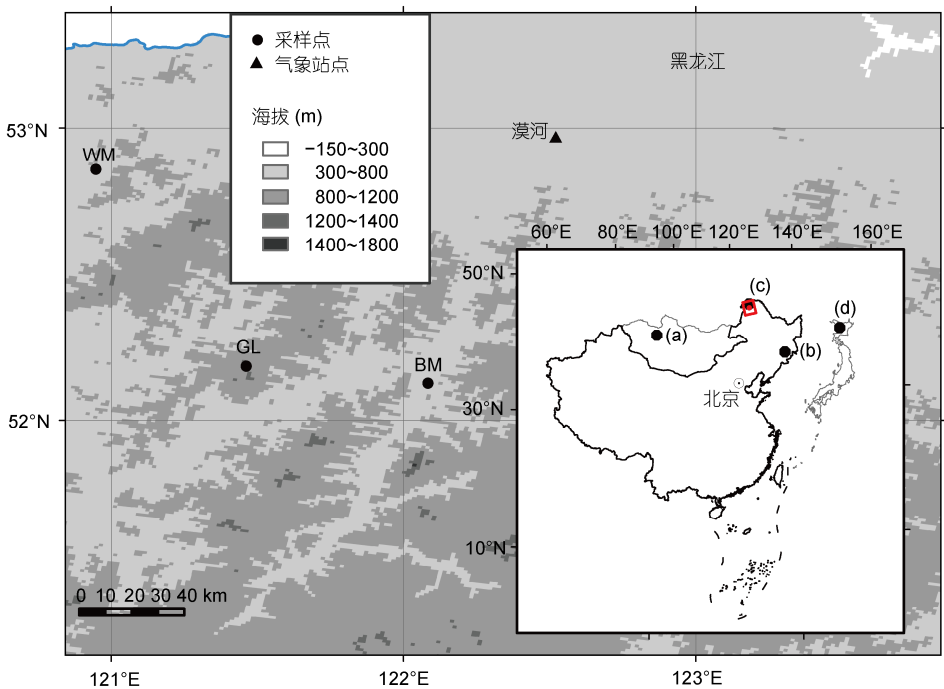


图 1 采样点、气象站点及周边序列的位置

表 1 采样点基本情况

树种	地点	代码	纬度	经度	海拔(m)	样树(样芯)
兴安落叶松	呼伦贝尔盟满归林业格林林场	GL	52.19°N	121.46°E	1260	24(48)
兴安落叶松	呼伦贝尔盟满归白马林场干线 10 km	BM	52.13°N	122.08°E	713	21(42)
兴安落叶松	呼伦贝尔盟乌玛林场乌玛管护站	WM	52.86°N	120.95°E	655	25(50)

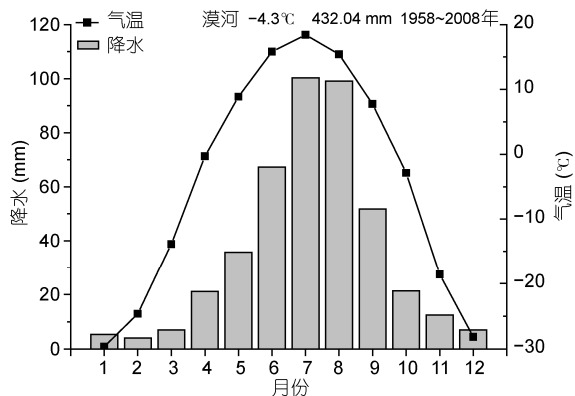


图 2 漠河气象站多年月平均气温和月降水

0.360, $n=115$ 年, $P<0.01$), 且变化具有一致性(图 3), 将样点 GL 和 WM 的样芯全部进入 ARSTAN 合成区域标准年表 RC(图 3). 因为与气象资料相关不显著, 没有将样点 BM 合并到区域年表(图 4), 这可能和样点 BM 位于森林下部的平地, 对气候因子不敏感有关. 使用相关分析和偏相关分析来检验区域年表与气象资料之间的关系. 利用区域最大晚材密度年表重建了过去 154 年 5~8 月平均最高气温变化. 因为气象资料较短, 采用逐一剔除法对重建结果进行检验, 并将重建结果与研究区周围的气温序列进行了对比和验证.

(iv) 小波分析. 小波分析是近年来气候学研究

表 2 GL, BM, WM, RC 标准年表的统计特征及共同区间分析结果

	GL	BM	WM	RC
样本量(株/芯)	21/43	20/40	25/50	46/93
平均敏感度	0.045	0.033	0.031	0.038
指数均值	1.003	1.002	1.001	1.003
标准差	0.184	0.163	0.160	0.182
共同区间分析样本量(株/芯)	19/36	34/20	16/12	31/52
树芯相关系数	0.258	0.249	0.148	0.171
树间相关系数	0.251	0.242	0.142	0.166
树内相关系数	0.509	0.540	0.328	0.466
信噪比	12.528	11.298	2.777	10.729
第一主成分解释方差量(%)	30.8	29.1	21.4	22.3
样本总体代表性	0.926	0.919	0.735	0.915

中广泛使用的一种数学手段, 目的是揭示时间序列的周期演化的特性^[29,30], 它不仅可以揭示序列在各种时间尺度上的周期变化特征, 而且还能显示出所关注周期信号的振幅随时间的变化情况^[31,32]. 在中国, 小波分析的方法在降水变化分析^[33~35]和气温变化分析^[36]的研究中得到了成功的应用.

本文使用小波分析的交互程序(<http://paos.colorado.edu/research/wavelets>)对重建气温序列在时间上的震

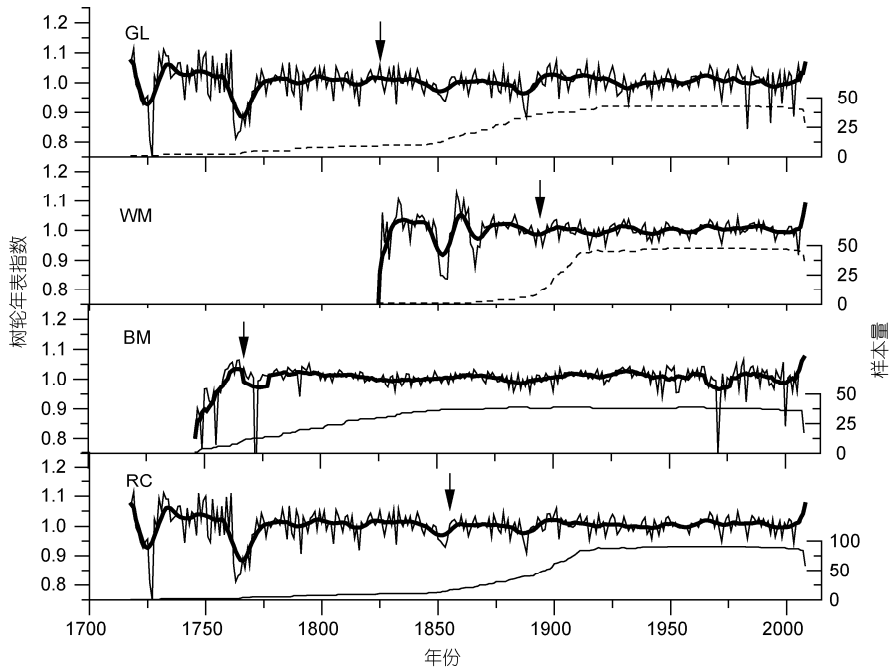


图 3 三样点及合成的区域 MXD 标准年表
粗线为 11 a 滑动平均, 箭头指示各年表 SSS>0.85 的起始年份

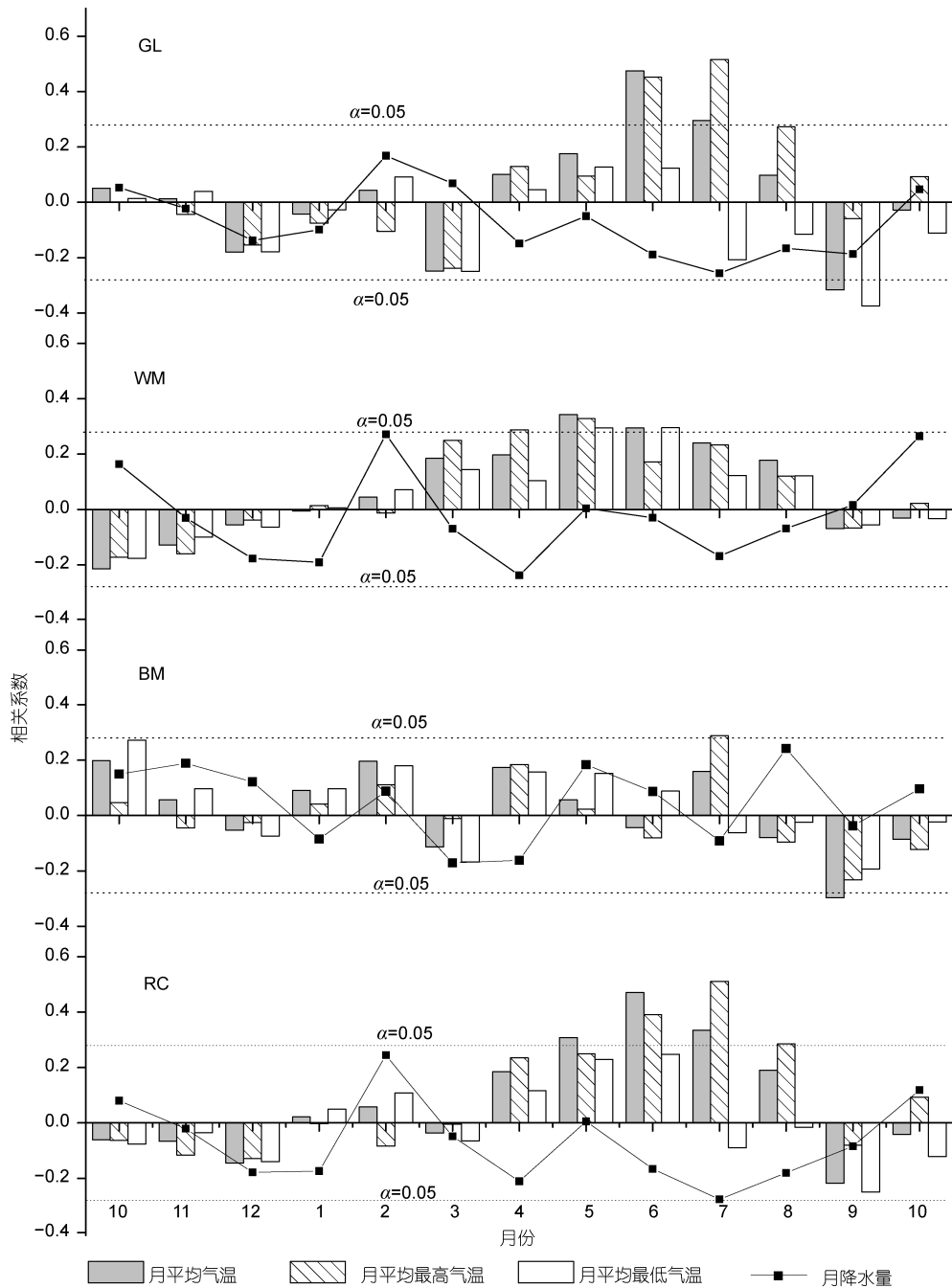


图4 MXD序列与漠河气象站气象资料的 Pearson 相关分析

荡周期进行了分析。

2 结果

区域年表与气象资料的相关结果显示(图4), RC与夏季各月份(主要为5~8月)的气温大多呈显著正相关关系。经与不同月份组合的气象要素进行相关分析发现, RC与夏季气温,尤其是平均最高气温和平

均气温有显著正相关关系。其中, RC与当年5~8月平均最高气温的相关系数最高(大于0.01的显著水平),明显大于其他月份的组合。RC与降水都呈负相关关系,并且在大多数月份呈显著负相关,但与降水的偏相关系数都不显著。这说明RC与降水的显著负相关可能是由于夏季气温和降水之间存在相关关系导致的,夏季降水不是兴安落叶松树轮最大密度的直接

限制因子,而5~8月平均最高气温则显示出对兴安落叶松树轮最大密度的直接影响。

利用线性回归模型重建历史气候(5~8月平均最高气温),使用逐一剔除法对转换方程进行的交叉检验。结果显示,转换方程对器测时段(1957~2008年)5~8月平均最高气温的方差解释量为39.5%,调整自由度后为38.3%。交叉检验的相关系数为0.586($n=52$, $P<0.001$),比重建值的相关系数(0.622)低0.036,说明重建值在高频的表现上可能有损失。误差缩减值为0.3423,一阶差符号检验及原始值符号检验都达到了0.01显著水平,以上检验结果说明重建方程是可靠的^[37]。观察5~8月平均最高气温在校准时段(1957~2008年)的器测值和重建值的对比(图5),二者表现出较好的一致性。

以气温重建的平均值为基准,进行步长为11a的滑动平均后,重建序列显示出4个冷期(见图6),具体为:1874~1893年、1927~1948年、1951~1960年、1992~2002年;以及4个暖期:1855~1873年、1894~1916年、1961~1991年、2003~2008年。其中最长的冷期为1874~1893年,出现了20年的夏季低温;最长的暖期为1961~1991年,显示出31年的夏季高温。总体来说19世纪中后期至20世纪前期出现了较为显著的冷暖期交替变化;进入20世纪中期,出现了50年代较为寒冷的10年,随后20世纪60~80年代进入30年的暖期,20世纪最后10年出现为期10年的寒冷时段;进入21世纪后,气温开始加速上升。

对重建的5~8月气温序列进行Morlet 6.0小波转换,图7显示出,结果中没有明显的低频周期出现。高频周期方面,重建序列中以2~8a短周期为主。

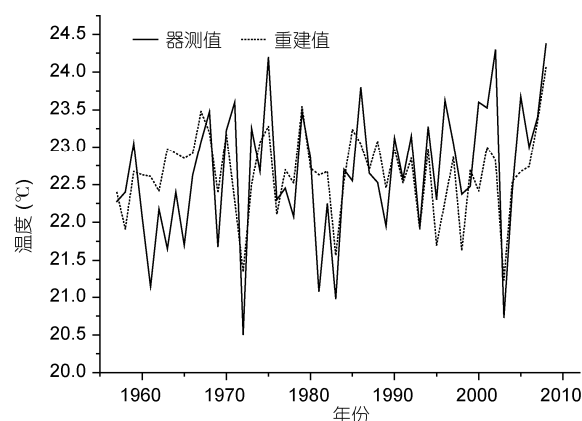


图5 5~8月平均最高气温的重建值和器测值对比

3 讨论

生长在高纬度、高海拔地区森林上限的树木,其树轮最大晚材密度与生长季的气温多呈正相关关系^[38~40,36],在本研究中,位于森林上限的兴安落叶松树轮最大晚材密度对5~8月平均最高温有强烈的正响应,这与天山地区雪岭云杉的研究结果十分相近^[20]。究其生理学原因,在生长季前期,树木早材细胞迅速伸长,年轮生长主要体现在轮宽的增加,前一年冬季的气温和当年春季气温对落叶松树轮宽度的形成有较明显的影响^[13,15,41]。树木在生长季后期,年轮细胞壁加厚,细胞内物质积累,树轮密度在此时有显著的增加。本文研究结果显示,树轮最大晚材密度与生长季气温表现出强烈的正相关关系,与前人研究成果是一致的^[24,20,21]。样点BM的最大晚材密度年表与气象资料的相关结果并未表现出明显的规律,这可能是由于采样点位于森林下部,气候敏感性不

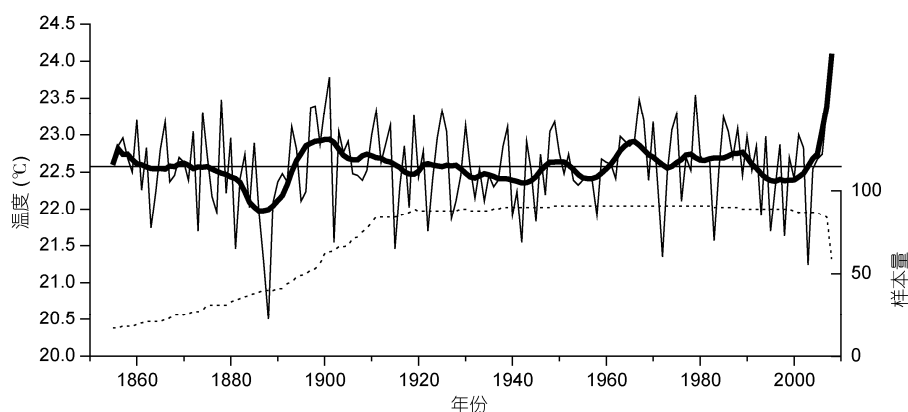


图6 重建大兴安岭北部5~8月平均最高气温变化及样本量
粗线为11 a滑动平均值,水平线为均值

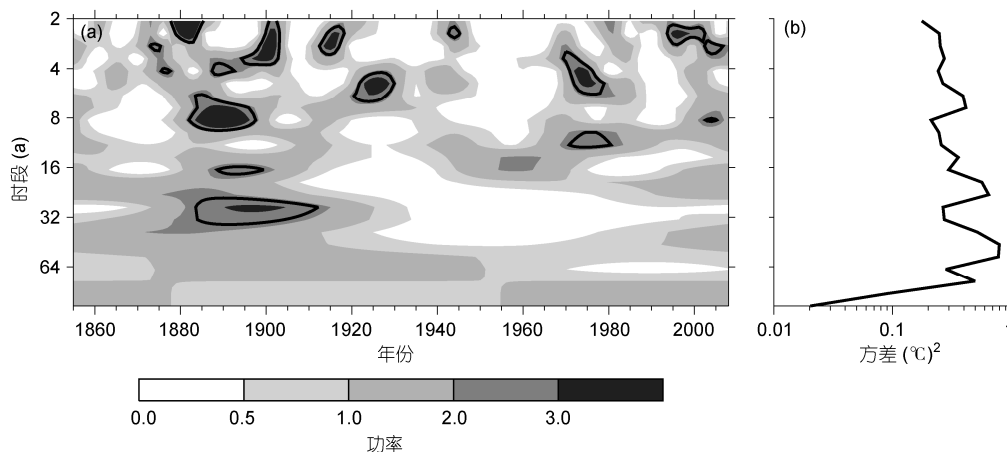


图 7 小波功率谱(a)和全局小波功率谱(b)
(a) 黑色轮廓为 10% 的显著水平, 背景为小波全谱

高造成的。

从小波分析的结果来看, 重建序列没有表现出 10 年以上的低频周期, 这与青藏高原东部 8~9 月份的气温序列有所不同^[36], 后者在 1800~1860 年间表现出了强烈的 20 年周期. 这可能和本文重建序列起始年仅 1855 年, 时段较短有关. 此外, 尽管藏东高海拔地区和大兴安岭北部高纬度地区在夏季气候特征上具有一定的相似性^[42], 但两地相隔较远, 藏东地区远离太平洋, 多受南亚季风和南海热带季风的影响; 而东北地区地处欧亚大陆东段, 更多受东亚大陆副热带季风活动影响^[43,44]. 两地夏季气温变化周期的特点和异同性是否与季风活动规律有关, 仍有待于进一步的研究。

为了验证重建的结果, 并探究该区域的气候变化特征, 将本文重建大兴安岭北部 5~8 月平均最高气温序列(XA)与研究区周边其他气温序列进行对比(地理位置见图 1). 分别为: 利用库页云杉树轮最大密度重建的日本北海道 4~9 月平均气温^[45]; 利用红松树轮宽度重建的长白山区 2~4 月平均气温^[15]; 利用西伯利亚落叶松和西伯利亚红松建立的蒙古地区树轮宽度序列^[46]. 将 4 条序列经过 11 a 滑动平均, 并将近百年中国东北地区年均温距平序列^[4]进行数字化后, 一起进行比较(图 8).

本文重建的 5~8 月平均最高气温重建序列(图 8(c) 与(d))的相关系数最高($r=0.303$). 比较两者的研究区, 纬度与地理位置较为接近, 代用资料都为树轮最大晚材密度, 且记录的都是春夏季的气温变化, 因此在低频变化上的一致性最好. 两条序列都显示出 19 世

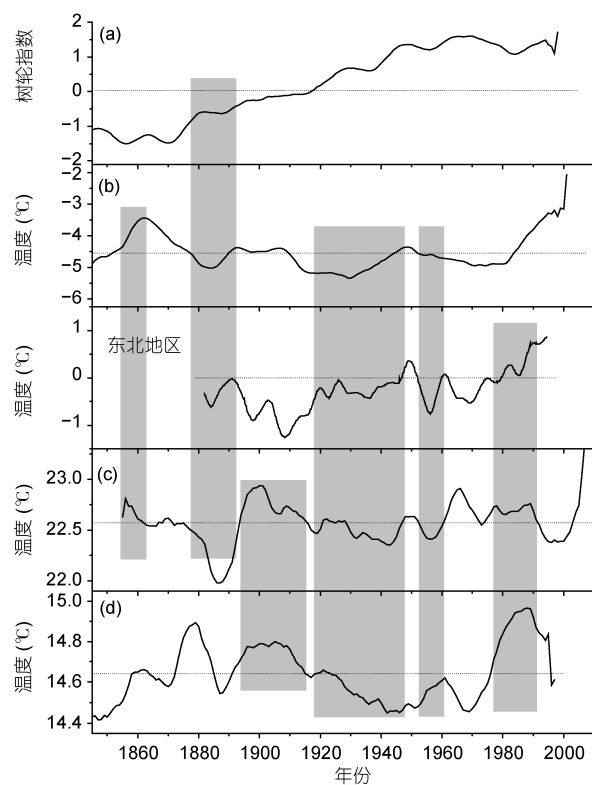


图 8 本文重建 5~8 月平均最高气温与其他树轮序列对比
(a) 蒙古地区树轮宽度序列^[46]; (b) 长白山区 2~4 月平均气温^[15]; (c) 本文重建大兴安岭北部 5~8 月平均最高气温; (d) 日本北海道 4~9 月平均气温^[45]. (a)~(d)均经过 11 a 滑动平均. “东北地区”为王绍武建立的近百年中国东北地区年均气温序列^[4]. 实线为 11 a 滑动平均值, 虚线为均值, 阴影覆盖的部分为冷暖期一致的时段

纪 80 年代的冷期以及 19 世纪末至 20 世纪 20 年代初的暖期, 20 世纪 20 年代后期至 40 年代的冷期在两条序列中也得到体现, 并记录了随后 30 年左右的震荡,

70年代末至90年代为夏季气温的暖期。

图8(b)使用树轮宽度重建了长白山区冬季气温变化,其研究区位于我国东北,距本文研究区的地理位置最为接近(图1),气候变化的特征也具有较好的一致性。两条序列都记录了19世纪50年代的暖期,70年代中期至90年代的冷期,20世纪20年代左右的冷期,以及21世纪开始的气温加速上升阶段。两条序列的末端都有明显的抬升趋势,但图8(b)的抬升却早于图8(c),这说明东北地区冬季升温可能要早于夏季。图8(c)与(b)的相关系数($r = 0.199$)低于图8(c)和(d)的相关系数,原因除了图8(b)序列记录的季节不同、且树种有差异之外,还可能与图8(b)所用的资料为树轮宽度有关。

图8(c)与(a)都记录了19世纪80~90年代的冷期,与本文重建结果不同的是,随后图8(a)进入了为期一个多世纪的气温上升阶段,两条序列之间的相关系数最低($r=0.181$)。图8(a)为树轮宽度年表的主成分序列,与北半球气温重建结果^[47]有很高的一致性,但图8(a)所指示气候信息与本文结果差异较大的原因尚不清楚。

本文重建结果并未表现出20世纪最后10年明显的变暖现象^[4],这可能与气温序列记录的季节不同和研究空间尺度的差异有关。丁一汇等人^[3]认为,我国20世纪80年代以来有变暖趋势,尤其以冬季气温变暖最为明显,对年均温的提高贡献最大,而夏季增温则相对不明显。在某些地区,如辽东半岛、漠河地区夏季气温甚至有下降趋势^[17,48]。这与本文的对比结果很相似,图8中(c)和(d)记录的都是东北亚地区夏

季气温,进入90年代后都出现下降的趋势,而(b)记录的冬季气温则表现出更强烈的变暖现象。另一方面,本研究重建结果与近百年中国东北地区年均温变化曲线^[4]在19世纪80~90年代、20世纪20~40年代末、50~60年代的冷期,70年代后期至90年代初的暖期都有相近的体现(图8)。由此可见,尽管指示的气温季节并不相同,两者在多个时段内仍具有一致性。这一结果显示,不同的资料有可能指示共同的气候变化趋势,在谨慎比较各种资料差异的基础上,可利用多种资料对全年各季的气温变化进行更为细致的探讨,并有望对更大尺度的气候变化特征进行研究。

4 结论

(1) 生长于大兴安岭北部森林上限的兴安落叶松,其树轮最大晚材密度对当年5~8月平均最高气温有显著的正响应。

(2) 利用兴安落叶松最大晚材密度年表重建大兴安岭北部5~8月平均最高气温,解释方差量为39.5%。小波分析结果显示重建序列中没有发现10年以上的低频周期,以2~8 a短周期为主。

(3) 重建结果稳定,与研究区周边的气温序列均有较好的一致性,可以代表较大区域的气候特征。在过去的154年中,大兴安岭北部存在4个冷期(1874~1893, 1927~1948, 1951~1960, 1992~2002年)和4个暖期(1855~1873, 1894~1916, 1961~1991, 2003~2008年)。20世纪末该地区的气温变暖现象以冬季为主,夏季则不明显。

致谢 本研究气象资料由国家气象信息中心气象资料室提供,树轮密度试验在中国气象局气候研究开放实验室树木年轮实验室完成,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 2005, 433: 613-617
- 2 Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 2002, 295: 2250-2253
- 3 丁一汇,戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. *气象*, 1994, 12: 19-26
- 4 王绍武,叶瑾琳,龚道溢,等. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 1998, 9: 392-401
- 5 勾晓华,杨梅学,彭剑峰. 树轮记录的阿尼玛卿山区过去830年夏半年最高温变化. *第四纪研究*, 2006, 26: 991-998
- 6 朱海峰,郑永宏,邵雪梅,等. 树木年轮记录的青海乌兰地区近千年温度变化. *科学通报*, 2008, 53: 1835-1841
- 7 刘禹,安芷生, Linderholm H W, 等. 青藏高原中东部过去2485年以来温度变化的树轮记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 166-176

- 8 Aucour A M, Tao F X, Sheppard S M F, et al. Climatic and monsoon isotopic signals (δD , $\delta^{13}C$) of northeastern China tree rings. *J Geophys Res*, 2002, 107: 4074, doi: 10.1029/2001JD000464
- 9 徐海, 洪业汤, 朱咏焯, 等. 安图红松树轮稳定碳同位素记录的低云量信息. *地球化学*, 2002, 31: 309–314
- 10 徐海, 洪业汤, 朱咏焯, 等. 安图红松树轮稳定 $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ 序列记录的气候变化信息. *地质地球化学*, 2002, 30: 59–65
- 11 于大炮, 王顺忠, 唐立娜, 等. 长白山北坡落叶松年轮年表及其与气候变化的关系. *应用生态学报*, 2005, 16: 14–20
- 12 Chen Z J, He X Y, Chen W, et al. Solar activity, global surface air temperature anomaly and Pacific Decadal Oscillation signals observed in urban outskirts tree ring records from Shenyang, China. *Adv Space Res*, 2006, 38: 2272–2284
- 13 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化. *第四纪研究*, 1997, 1: 76–85
- 14 Liu Y, Bao G, Song H M, et al. Precipitation reconstruction from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD. *Palaeogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2009, 282: 81–87
- 15 Zhu H F, Fang X Q, Shao X M, et al. Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon. *Clim Past*, 2009, 5: 661–666
- 16 尹红, 郭品文, 刘洪滨, 等. 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: 18–23
- 17 任国玉, 周薇. 辽东半岛本世纪气温变化的初步研究. *气象学报*, 1994, 52: 493–498
- 18 沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 317–326
- 19 Wang L, Payette S, Begin Y. 1300-year tree-ring width and density series based on living, dead and subfossil black spruce at tree-line in Subarctic Quebec, Canada. *Holocene*, 2001, 11: 333–341
- 20 陈津, 王丽丽, 朱海峰, 等. 用天山雪岭云杉年轮最大密度重建新疆伊犁地区春夏季平均最高温度变化. *科学通报*, 2009, 54: 1295–1302
- 21 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. *科学通报*, 2010, 55: 1036–1042
- 22 Schweingruber F H. Measurement of densitometric properties of wood. In: Hughes M K, Kelly P M, Pilcher J R, et al, eds. *Climate from Tree Rings*. New York: Cambridge University Press, 1982. 8–11
- 23 Schweingruber F H, Briffa K R. Tree-ring Density Networks for Climate Reconstruction. In: Jones P D, Bradley R S, Jouzel J, eds. *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. NATO ASI Series, Series I: Global Environmental Change. Berlin: Springer, 1996. 43–66
- 24 王丽丽, 邵雪梅, 黄磊, 等. 黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应. *植物生态学报*, 2005, 29: 380–385
- 25 Lenz O, Schaer E, Schweingruber F H. Methodische Probleme bei der radiographisch-densitometrischen Bestimmung der Dichte und der Jahrringbreiten von Holz. *Holzforschung*, 1976, 30: 114–123
- 26 Schweingruber F H, Bartholin T, Schar E, et al. Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland). *Boreas*, 1988, 17: 559–566
- 27 Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull*, 1983, 43: 69–78
- 28 Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization. Dissertation for the Doctoral Degree. Tucson: University of Arizona, 1985
- 29 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 2000
- 30 Oh H S, Ammann C M, Naveau P, et al. Multi-resolution time series analysis applied to solar irradiance and climate reconstruction. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2003, 65: 191–201
- 31 Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Am Meteorol Soc*, 1998, 79: 61–78
- 32 Aydin N, Markus H S. Directional wavelet transform in the context of complex Quadrature Doppler signals. *IEEE Signal Proc Lett*, 2000, 7: 278–280
- 33 Zhang Q, Cheng G, Yao T, et al. A 2326-year treering record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1–4
- 34 Lu H, Zhang F, Liu X, et al. Periodicity of palaeoclimatic variations recorded by loess-paleosol sequences in China. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 1891–1900
- 35 Yu Z, Sun Z. Analysis of multi-scale features of tropical Pacific Ocean sea surface temperature. *J Nanjing Inst Meteorol*, 2004, 27: 193–199
- 36 Wang L, Duan J, Chen J, et al. Temperature reconstruction from tree-ring maximum density of Balfour spruce in eastern Tibet, China. *Int J Climatol*, 2010, 30: 972–979
- 37 Michaelsen J. Cross-validation in statistical climate forecast models. *J Clim Appl Meteorol*, 1987, 26: 1589–1600
- 38 Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H. Summer temperature patterns over Europe: A reconstruction from 1759 AD based on maximum latewood density indices of conifers. *Quat Res*, 1988, 30: 36–52

- 39 Schweingruber F H, Briffa K R, Jones P D. Yearly maps of summer temperatures in western Europe from AD 1750 to 1975 and western North America from 1600 to 1982: Results of a radiodensitometrical study on tree rings. *Vegetatio*, 1991, 92: 5–71
- 40 Luckman B H, Briffa K R, Jones P D, et al. Treering based reconstruction of summer temperatures at the Columbia Icefield, Alberta, Canada, AD 1073–1983. *Holocene*, 1997, 7: 375–389
- 41 孙毓, 王丽丽, 陈津, 等. 中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 645–653
- 42 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 2010, 65: 3–12
- 43 Ding Y H. Seasonal march of the East-Asian summer monsoon. In: Zhang C P, ed. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific, 2004. 3–53
- 44 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 1473–1486
- 45 Davi N, D'Arrigo R, Jacoby G C, et al. Warm-season annual to decadal temperature variability for Hokkaido, Japan, inferred from maximum latewood density (AD 1557–1990) and ring width data (AD 1532–1990). *Clim Change*, 2001, 52: 201–217
- 46 D'Arrigo R, Jacoby G, Pederson N, et al. Mongolian tree-rings, temperature sensitivity and reconstructions of Northern Hemisphere temperature. *Holocene*, 2000, 10: 669–672
- 47 Mann M, Bradley R, Hughes M. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 759
- 48 刘实, 王勇, 缪启龙, 等. 近 50 年东北地区热量资源变化特征. *应用气象学报*, 2010, 21: 266–278