



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

陈津^{①②③}, 王丽丽^{①④⑤}, 朱海峰^①, 吴普^①

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 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

⑤ 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

E-mail: chenjin2001@gmail.com

2008-04-27 收稿, 2008-12-04 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB421307)、中国沙漠气象科学研究基金(编号: SQJ2006013)和国家自然科学基金(批准号: 30270227 和 J0630965)资助项目

摘要 为了研究新疆伊犁地区过去温度变化, 利用该区雪岭云杉 6 个样点的年轮最大密度年表(MXD)和年轮宽度年表(TRW), 分析了其年表特征和气候响应特点. 结果表明, 该地区不同样点的雪岭云杉树轮最大密度年表对气候变化有较为一致的响应, 与 4~8 月平均温度和平均最高温度均具有很好的正相关关系. 利用逐步回归分析方法筛选出的 3 个样点的树轮最大密度序列重建了该地区 1848~2000 年春季平均最高温度距平, 重建方程方差解释量达到 56.2%, 且方程稳定. 重建结果揭示, 在伊犁地区, 20 世纪 50 年代初到 70 年代初存在近 153 a 春夏季最显著的冷期, 并且在重建的时段内, 4~8 月平均最高温度距平并没有表现出明显的上升趋势.

关键词

雪岭云杉

树木年轮

最大密度

伊犁

4~8 月最高温

随着全球变化研究的进一步开展, 树木年代学在其中发挥着越来越重要的作用, 不仅可以用树木年轮与气候变化之间的关系重建长时间、大空间尺度的过去气候变化历史^[1~3], 而且也可以用来研究在全球变暖条件下树木生长对气候的反应^[4], 对全球变化研究起到了重要的推动作用.

天山山脉是我国最早开展树木年代学研究的地区之一, 伊犁地区较之干旱的天山东端而言, 气候湿润多雨, 树轮工作者从 1993 年起就开始在该区进行树轮宽度年表的分析, 探讨树轮生长对气候变化的响应, 并重建了过去三百多年的降水序列^[5~7]. 在天山科古泰山北麓的精河和博尔塔拉河流域, 研究者利用天山云杉的树轮宽度重建了夏季温度的过去变化^[8,9], 在吉尔吉斯斯坦境内西天山的阿莱山脉重建

了上千年的温度序列^[10,11], 在东天山的巴里坤境内、吉木萨尔县以及天山中段乌鲁木齐河源也进行了过去温度序列的重建^[12~14]. 这些研究证明温度是影响天山山区树木生长的限制因子之一. 伊犁地区目前为止尚未见到用树轮密度重建温度变化的研究工作, 利用树轮密度进一步研究伊犁地区过去温度变化情况将对研究天山山区的气候变化具有重要的意义.

用 X 射线进行树轮密度研究的方法由 Polge 所创立, 并逐渐发展为树木年代学研究的一种基础方法^[15]. 年轮密度分析的方法可以提取早材宽度、晚材宽度、早材平均密度、晚材平均密度、年轮最大密度和年轮最小密度 6 个指标, 其中年轮最大密度, 被证明能很好地反应树木生长季内的温度^[16~18], 已用来在高纬度、高海拔地区恢复过去气候变化尤其是温度变

引用格式: 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(9): 1295~1302

Chen J, Wang L L, Zhu H F, et al. Reconstructing mean maximum temperature of growing season from the maximum density of the Schrenk Spruce in Yili, Xinjiang, China. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0051-4

化的历史^[19,20],并且可以与树轮宽度、同位素等指标合成复合代用指标,成为研究大空间、长时间尺度过去气候变化的重要手段之一^[1,21,22].

本研究利用树轮密度的方法,探讨伊犁地区雪岭云杉树轮宽度和密度对气候变化的响应情况,并重建该地区过去温度变化的历史.此研究将探讨树轮密度研究方法在气候变化研究中的应用,为伊犁地区气候变化的研究提供基础信息,弥补该地区过去气候变化研究方面的空白.

1 资料和方法

1.1 研究区概况

研究区伊犁地区,地处新疆北天山的科古秦山、博洛霍罗山与中天山的乌孙山、那拉提山等之间,为向西开口的喇叭型盆地.这种三面环山向西敞开的特殊地形,使西风气流可以长驱直入并沿山坡形成降水,而将来自塔里木盆地、准噶尔盆地的干热气流和西伯利亚的寒潮阻挡在外.该地区 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温为 $2500\sim 3500^{\circ}\text{C}$,无霜期日数 $135\sim 165\text{ d}$,年降水量 $250\sim 600\text{ mm}$,降水比较丰沛,以冬春两季为多,冬季比较温暖,最冷月气温在 -10°C 上下^[23].本研究采样点位于谷地东侧南北天山交接地带的新源县,谷地西侧开口、南天山北坡的昭苏县和北天山南坡的尼勒克县(图1).在尼勒克(NLK)和新源(XY)中,“2”和“1”分别表示位于森林上限和下限的采样点,而在昭苏

(ZS), ZS1 为森林下限采样点, ZS2 比 ZS1 海拔高,郁闭度小.雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是伊犁地区的优势树种,本研究在已有树轮宽度研究的基础上^[24]进一步进行树轮密度研究.

1.2 树轮密度资料

在进行密度分析之前,先用常规的树轮气候学方法测量树轮的宽度,并用 COFECHA 程序进行交叉定年的检验.然后对样本进行脱糖脱脂,将样芯依树轮木质细胞横切面的角度切成约 1 mm 左右的薄片,用 X 射线透射成像,将树轮的密度转化成光学强度.用 Dendro2003 密度测量仪在胶片上量测,得到 6 个参数:最大密度、最小密度、早材平均密度、晚材平均密度、早材宽度、晚材宽度.将早材宽度与晚材宽度合并得到年轮宽度.之后,利用密度分析之前得到的树轮宽度数据作为基础,将密度得到的数据进行交叉定年.最大密度年表和宽度年表由 ARSTAN 程序制成,根据样本长度和多次的尝试,采用 80 a 样条函数去除年轮的生长趋势.所得到的最大密度和树轮宽度年表概况如表 1 所示.

由表 1 可以看出,如在相同的时段内做共同区间分析,树轮宽度年表的信噪比、第一主分解释释方差和样本总体代表性均比密度年表要高.这可能是因为宽度数据标准差要比密度数据大,序列间有更明显的变化趋势.

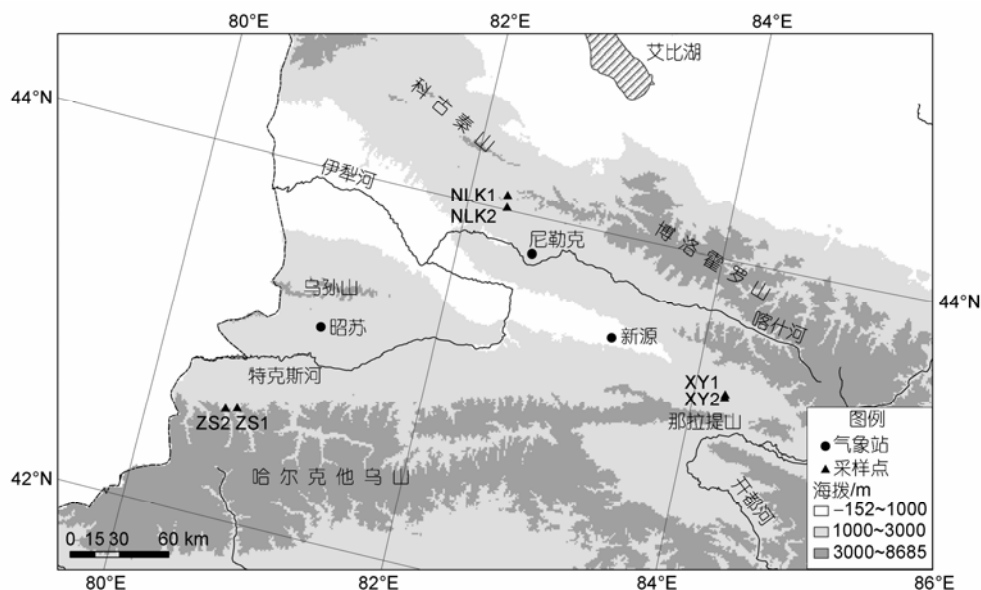


图 1 树轮采样点、气象站点分布图

表 1 树轮采样点概况、标准年表统计值及共同区间分析结果^{a)}

	mxd/trw					
	XY1	XY2	NLK1	NLK2	ZS1	ZS2
经/纬度	84°14'E/43°17'N	84°14'E/43°16'N	82°17'E/44°05'N	82°18'E/44°01'N	80°40'E/42°37'N	80°35'E/42°36'N
海拔/m	1649	2550	2110	2650	2220	2260
样本量/树(芯)	21(42)	25(47)	16(16)	26(42)	18(38)	11(22)
时段	1729~2001	1835~2001	1728~2000	1681~2001	1800~2001	1736~2001
时间长度/a	273	167	273	321	202	266
指数平均值	1.001/0.989	1.002/0.987	1.002/0.986	1.000/0.984	1.003/0.992	1.001/0.995
标准差	0.054/0.267	0.043/0.159	0.036/0.199	0.053/0.142	0.039/0.161	0.040/0.150
偏度	-1.555/0.753	0.122/-0.131	-0.147/0.300	-0.236/0.323	-0.118/-0.340	-0.349/-0.287
峰度	9.581/7.998	4.798/3.175	3.485/3.993	6.134/3.205	3.421/3.323	5.250/3.859
平均敏感度	0.039/0.158	0.041/0.121	0.037/0.150	0.048/0.118	0.038/0.120	0.037/0.133
共同区间分析时段	1890~1990	1890~1990	1890~1990	1890~1990	1890~1990	1890~1990
序列平均相关系数	0.278/0.412	0.245/0.394	0.202/0.431	0.161/0.335	0.285/0.449	0.128/0.375
共同区间分析样本量	17(26)	14(17)	17(17)	17(25)	9(14)	9(15)
信噪比	10.002/18.182	5.526/11.042	4.313/12.869	7.790/12.577	5.572/11.389	2.195/9.012
第一主分解释释方差(%)	32.5/44.1	30.2/44.8	26.1/48.4	21.1/37.0	35.0/49.5	20.3/43.9
样本总体代表性	0.909/0.948	0.847/0.917	0.812/0.928	0.827/0.926	0.848/0.919	0.687/0.900

a) mxd 为年轮最大密度年表的缩写; trw 为年轮宽度年表的缩写

1.3 气候资料

气候资料选取各采样点临近的新源、尼勒克和昭苏县气象站的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温和月总降水量。表 2 为 3 个气象站点气候资料的统计概况。可以看出,新源和尼勒克 1 和 7 月平均温度比昭苏高,年降水量则以新源和昭苏为高。伊犁河谷内地势东高西低,新源、尼勒克县位于巩乃斯河谷丘陵区,气候条件较为一致,而昭苏地处盆地,冬季严寒,气候较为温凉湿润^[25]。根据本研究的需要,3 个站点气候资料在均一性检验中,某些站点的资料存在非均一性,如 4~8 及 7~8 月的月平均最高温度。为了去除资料不均一产生的影响,在合成区域资料时采用距平平均^[26]。即对每个站点的 4~8 月平均最高温度取距平,再将 3 个站点的距平资料做平均,得到区域 4~8 月平均最高温度距平序列,所选用气候资料年代时段为 1959~2000 年。

表 2 新源、尼勒克和昭苏县气象站气候资料概况

站点名称	新源	尼勒克	昭苏
经/纬度	83°18'E/43°27'N	82°34'E/43°48'N	81°08'E/43°09'N
海拔高度/m	929.2	1106.1	1854.6
时段	1956~2000	1959~2000	1955~2000
1 月平均气温/°C	-7.04	-10.54	-11.56
7 月平均气温/°C	21.05	19.05	14.82
多年平均气温/°C	8.49	6.01	3.07
年降水量/mm	493.9	371.0	498.4

2 结果

2.1 年轮生长对气候变化的响应

利用SPSS对各个样点的最大密度年表、宽度年表与前一年 10 月到当年 10 月的月平均温度、月平均最高温度、月平均最低温和月降水分别作Pearson相关分析。从图 2 可以看出,树轮最大密度年表与月平均温度、月平均最高温度多呈正相关,并且在 7,8 月份呈显著正相关,在 4~8 月期间相关均较高;与降水多呈负相关。树轮宽度情况比较复杂,在新源地区与月平均最低温成正相关,在尼勒克地区与降水成正相关,在昭苏地区与 4 月份降水呈显著正相关。宽度年表相关情况与朱海峰等人^[24]的研究结果基本一致。

为了进一步探讨年轮生长与气候要素之间的响应关系,排除气候要素之间的影响,对 6 个样点分别进行了响应函数的分析,气候因子选取上年 10 月到当年 10 月的月平均温度和月降水。结果如表 3。可以看出,最大密度年表对平均温度在各个样点均有显著的响应,而且大多与 8 月平均温度的正响应显著;除了 ZS 两处样点,其他样点处降水对最大密度也有显著的影响。宽度年表与气候要素之间的响应情况比较复杂,各个样点之间差异较大。

选取不同月份组合的温度和降水分别计算均值,再与树轮最大密度年表和宽度年表做 Pearson 相关分析,发现最大密度年表与 7~8 月、4~8 月、4~9 月的

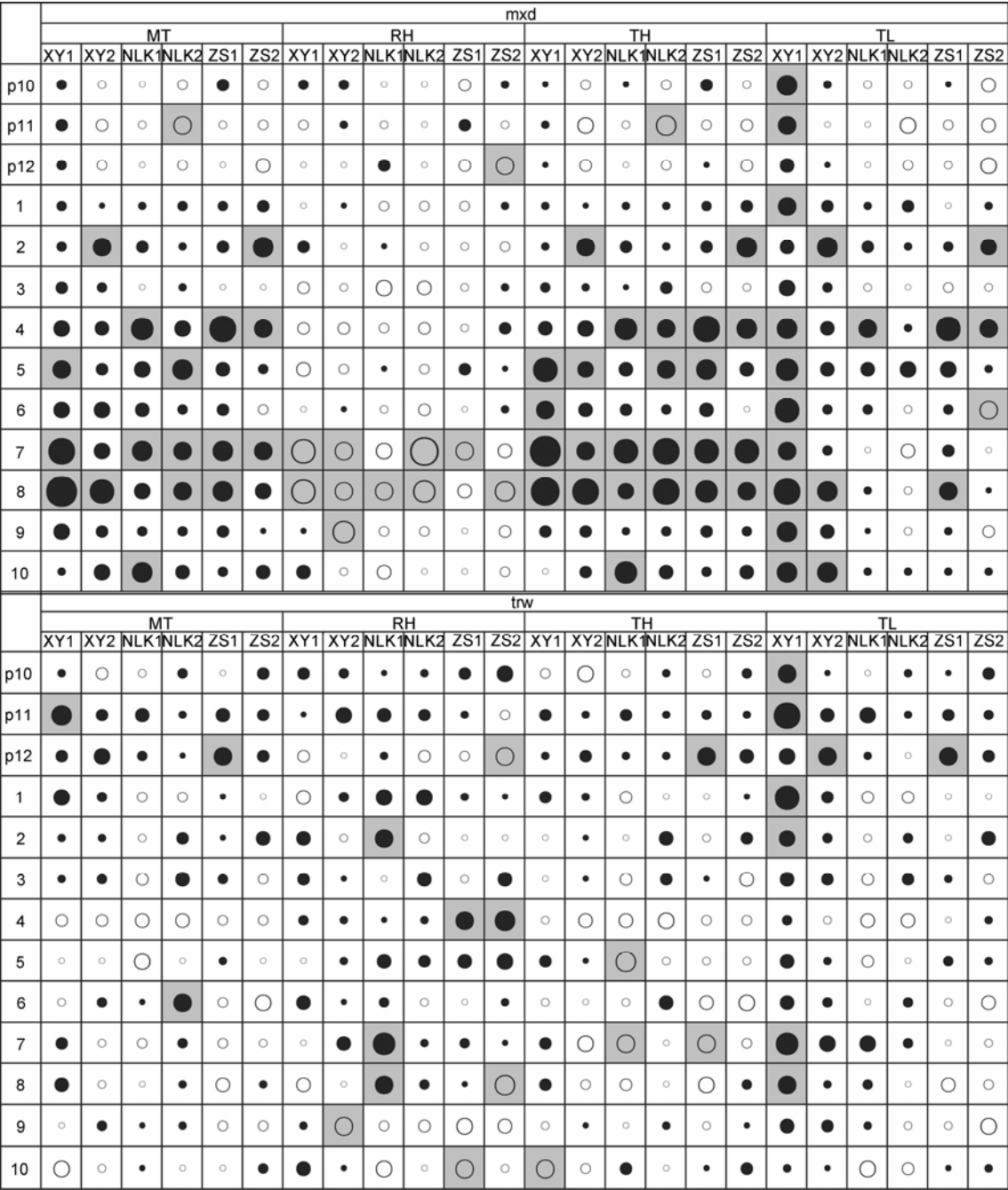


图 2 采样点树轮最大密度年表、宽度年表与气候要素的相关分析结果示意图
MT 表示月平均温度, RH 表示降水, TH 表示月平均最高温度, TL 表示月平均最低温度. ●表示正值, ○表示负值, 圆圈越大代表相关系数绝对值越大, 底色有阴影的方格表示显著相关(95%水平)

月平均温度和月平均最高温度均有显著的正相关, 相关系数见表 4. 经比较, 最大密度年表与 4~8 月月平均温度和月平均最高温度相关均大于 4~9 月, 多数样点最大密度年表与平均最高温度的相关大于其与平均温度的相关.

2.2 重建历史气候

相关结果显示树轮密度数据在本地区与气候因子的响应比宽度数据稳定, 并且在 4 种气候资料里大部分与月平均最高温度的相关最高. 考虑到 4~8 月比 7~8 月更能表现树木在生长季内与气候变化的响应

表 3 标准年表和气候因子的响应函数分析^{a)}

年表	mxid						trw				
	XY1	XY2	NLK1	NLK2	ZS1	ZS2	XY1	XY2	NLK1	NLK2	ZS2
平均温度	8 月(+)	2 月(+) 8 月(+)	4 月(+)	8 月(+)	4 月(+) 8 月(+)	2 月(+) 4 月(+)	p9 月(-)		4 月(-)	4 月(-) 6 月(+)	2 月(+)
降水	2 月(+) 8 月(-)	9 月(-)	8 月(-)	7 月(-) 8 月(-)				p11 月(+)	1 月(+) 7 月(+)	1 月(+) 5 月(+)	4 月(+) 8 月(-) 9 月(-)

a) 表中只列出响应显著水平大于 95%的月份。(+)表示显著正响应, (-)表示显著负响应。计算所用程序为 PRECON5.1 <http://www.ltrr.arizona.edu/webhome/hal/precon.html>

表 4 最大密度年表与不同月份组合的简单相关

	均温/最高温					
	XY1mxid	XY2mxid	NLK1mxid	NLK2mxid	ZS1mxid	ZS2mxid
7~8 月	0.718/0.706	0.496/0.478	0.378/0.467	0.428/0.650	0.505/0.528	0.386/0.446
4~8 月	0.605/0.622	0.463/0.473	0.498/0.493	0.493/0.567	0.673/0.631	0.388/0.406
4~9 月	0.579/0.605	0.450/0.470	0.453/0.450	0.443/0.517	0.613/0.609	0.334/0.398

情况, 并且比 4~9 月与最大密度年表具有更高的相关, 因此选用最大密度年表重建过去 4~8 月平均最高温度。经检验, 3 个气象站点的 4~8 月平均最高温度均值有着极显著的相关关系, 可以用来合成区域 4~8 月平均最高温度距平序列, 因此可以将各样点最大密度标准年表作为自变量, 区域 4~8 月平均最高温度的距平(以下简称 TH)作为因变量, 进行逐步回归分析, 最后进入方程的为 XY1, NLK2 和 ZS1 三个样点的最大密度年表。这 3 个年表之间相关显著, 并且均与 4~8 月平均最高温度显著正相关, 因此选用这 3 个样点的样芯作为一个文件进入 ARSTAN 程序, 建立了区域树轮最大密度年表(以下简称 YL)。为了保留更多的低频信号, 年表建立时根据样本长度和总体趋势选用不同长度的样条函数及直线分别去趋势, 新建的树轮区域最大密度标准年表平均敏感度为 0.040, 样本总体代表性达到 85%时样本量为 30, 年代为 1848 年, 在 1890~1990 年进行共同区间分析, 进入样本量 64 根, 序列间平均相关系数为 0.156, 信噪比为 11.817, 第一主分解释释方差量为 19.3%。

利用 YL 作为自变量, 重建伊犁地区 1848~2000 年间的 4~8 月的平均最高温度距平(TH), 重建曲线见图 3。用逐年剔除法对重建方程进行了检验, 统计结果如表 4 所示。转换方程具体形式为

$$TH = -29.8205 + 0.029749 \times YL, \quad (1)$$

式中, TH 为 4~8 月平均最高温度距平, YL 为区域最大密度标准年表。

观察方程(1)的统计量(表 5), 交叉检验的相关系数为 0.716, 比重建值的相关系数 0.749 低 0.033, 说

明重建值在高频的表现上可能有些损失。误差缩减值达到了 0.511, 说明重建方程是稳定可靠的。符号检验的结果显示, 无论是一阶差符号检验还是原始值符号检验, 均达到了 0.01 的显著水平, 说明重建序列和实测序列在高频和低频变化上均能较好的吻合。经乘积平均值检验, t 值达到了 4.554, 达到了 0.0001 的显著水平, 也说明重建序列是可靠的。

2.3 重建序列中包含的信息

重建显示, 伊犁地区 1848~2000 年间, 4~8 月平均最高温度距平平均约为 -0.03°C , 这表明近 40 a 最高温平均值高于近 153 a 的平均水平。从图 4 的阶梯图可以清楚地看到重建序列温度变化的趋势, 并比较出每 10 年温度变化的幅度。1871~1880 年为温度最高的 10 a, 平均最高温度距平平均达到了 0.59°C , 1951~1960 年为温度最低的 10 a, 距平平均为 -0.63°C , 1951~1970 年为近百年里持续低温时间最长的 20 a。

为了进一步了解 1848~2000 年间温度变化的低频趋势, 对原重建序列进行步长为 13 a 的低通滤波分析^[6,9](结果见图 3 粗曲线)。从图 3 可以看到明显的冷暖期分布, 其中最长的冷期为 1952~1971 年, 最长的暖期为 1972~1986 年, 出现了 15 a 的春夏季高温。从总体来说, 19 世纪末出现了较为显著的短期冷暖交替变化, 进入 20 世纪初期, 波动减弱, 而 20 世纪中后期则以连续 10 a 以上的冷暖期交替为主要特征, 温度主要呈上升趋势。

从距平重建的年际变化看, 其变化范围为 $-2.15 \sim 1.74^{\circ}\text{C}$, 将其按每 0.50°C 分类, 可以得到每半个世纪平均最高温度距平分布的频率(见表 6)。平均

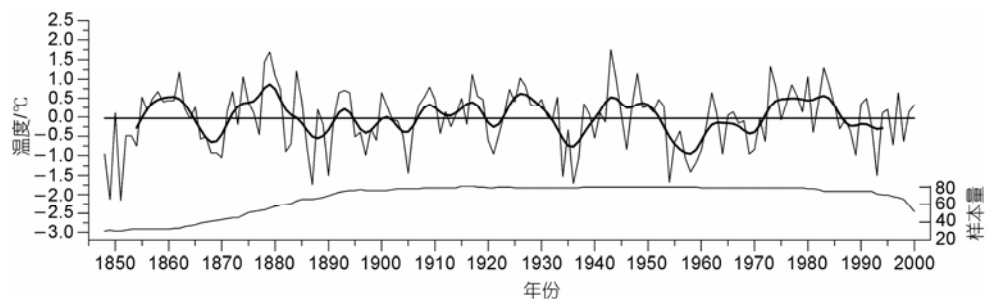


图 3 重建的伊犁地区 4~8 月平均最高温度距平逐年变化曲线(细折线)、其低通滤波曲线(粗曲线)、1848~2000 年平均温度(直线)及样本量图

表 5 转换方程的统计量和交叉检验的统计量

方程	自变量	方差解释量调整值(%)	F	一阶差符号检验	符号检验	乘积平均值 t	误差缩减值	相关系数
1	YL	56.2	51.25	30	33	4.554	0.511	0.716

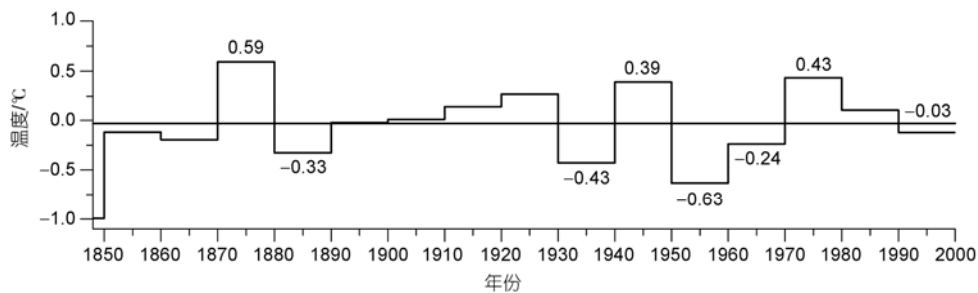


图 4 重建平均最高温度距平序列每 10 a 平均(4~8 月)
横线为平均最高温度距平重建序列(1848~2000 年)平均值

表 6 伊犁地区春夏季平均最高温度冷、暖发生频率及某些极端值对应年份

TH/°C	1848~1900 年	对应年份	1901~1950 年	对应年份	1951~2000	对应年份
≤-2.00	2	1849,1851	0		0	
-2.00~-1.50	1	1887	2	1934,1936	1	1954
-1.50~-1.00	2		2	1905,1937	4	
-1.00~-0.50	12		4		9	
-0.50~0.00	9		11		11	
0.00~0.50	13		20		16	
0.50~1.00	8		6		6	
1.00~1.50	5		4	1917,1926,1944,1948	3	1973,1980,1983
1.50~2.00	1	1879	1	1943	0	

最高温度距平的分布表现出几个明显的特点,一是距平大于 0 的年份多于距平小于 0 的年份,说明在这 153 年间,相对于观测序列而言,平均最高温度较高的年份多于平均最高温度较低的年份,但是前者最高温度平均值绝对值小于后者;二是在这 3 个时段内,距平变化在-1.5~-1℃的年份均少于距平变化在 1~

1.5℃的年份,距平变化在-0.5~0℃的年份均少于距平变化在 0~0.5℃的年份。
20 世纪前半叶平均最高温度距平最高的一年即 1943 年,重建距平值高达 1.74℃,据历史资料记载,当年昭苏、伊宁等地发生严重的干旱事件;1917 年,伊犁“久不雨”,1926 年,伊宁“春夏天旱,田苗枯死”,

相对应的重建平均最高温度距平都大于 1°C 。20 世纪后半叶平均最高温度距平最低的一年即 1954 年, 重建距平值为 -1.62°C , 与历史资料记载伊犁地区雨水过多, 发生洪灾相应; 而 1952~1971 年的冷期, 在历史记载中反应为部分地区的雹灾、霜害、寒潮、洪灾等¹⁾。这些历史资料与重建平均最高温度的吻合, 验证了重建值的可靠性。

3 讨论

Pearson 相关分析结果表明, 在温度方面, 雪岭云杉年轮最大密度与 4~8 月平均温度和平均最高温度均有很好的相关关系, 而与最低温的相关较差。这说明在树木年轮生长的过程中, 生长季的高温对年轮密度的积累有很重要的作用。尤其在生长季后期(7~8 月), 年轮最大密度与平均最高温度表现出很高的相关, 从生理学角度分析, 树木年轮细胞的生长在一个生长季内完成, 包括细胞的体积生长和物质积累, 后者贯穿于整个生长季的始终, 但生长季前期, 形成层分裂出的细胞主要进行快速的伸长生长, 此时年轮生长主要体现在年轮宽度的增加, 而生长季后期, 年轮生长主要体现在晚材木质细胞的加厚上^[27,28]。因此, 在生长季后期(7~8 月), 平均最高温度对年轮最大密度的影响更为显著。4~8 月为伊犁地区的春夏季节, 也是雪岭云杉的生长季节, 用最大密度重建 4~8 月平均最高温度符合树木年轮生长的生理学特征。

比较密度年表和宽度年表对气候的响应情况, 宽度年表对降水的反应较好, 在北方很多地区的研究中都有报告^[29~31]。但是在本研究中, 同样地密度年表对气温的反映较为一致, 而宽度年表对气候变化的响应根据样地不同而有差异。朱海峰等人^[24]在利用雪岭云杉的树轮宽度研究其对气候变化的响应时也指出, 地形条件对该地区树木生长与气候之间的关系影响较大。分析其原因, 伊犁河谷为全疆降水量最多的地区, 河谷内降水的空间分布差异较大, 是导致宽度年表在研究区对降水的反映不一致的重要

原因。

重建结果显示, 在 1952~1971 年间, 4~8 月有明显的冷期。这个结果与王承义等人^[32]对新疆伊犁地区近 250 a 冷暖变化所做的 20 世纪 50 年代后期到 70 年代初期在年平均温度上较低的重建趋势上基本上是一致的。徐国昌^[33]在研究近 40 年西北温度变化时认为, 北疆地区在 1954~1960 年及 1966~1976 年间存在冷期, 在短期尺度上与本研究结果吻合。本研究统计结果表明, 正是由于这段时间的持续低温, 导致了近 153 年 4~8 月平均最高温度并没有表现出明显的上升趋势。对于新疆地区增暖的趋势, 有研究者针对近 40 年的气象资料进行分析, 指出其主要体现于冬季温度的上升, 而夏季温度比冬季温度增温趋势要弱^[33], 本研究说明在近 153 年间, 伊犁地区春夏季高温也没有表现出明显上升趋势。

本文在重建气温时采用的树轮最大密度年表, 反应了树木生长季内温度变化的特点, 并获得了稳定可靠的重建结果。在今后的研究中, 有望利用更多的树轮参数, 如晚材平均密度、早材宽度等开展更深入的研究, 在数据处理方法方面寻找更适合树轮密度数据的去除生长趋势、年表合成等方法, 对本研究成果进行校准和补充, 并为在更大区域范围进行过去气候变化研究工作做准备。

4 结论

(i) 在伊犁地区, 雪岭云杉年轮宽度生长对气候变化的响应受地形影响而不同, 但是年轮最大密度对气候变化的响应较为一致。

(ii) 伊犁地区雪岭云杉年轮的最大密度对 4~8 月平均温度和平均最高温度有很好的响应, 用年轮最大密度年表来重建伊犁地区 1848~2000 年 4~8 月平均最高温度, 能够获得稳定的重建结果。

(iii) 重建结果显示, 在 1952~1971 年间, 伊犁地区春夏季平均最高温度表现出明显的冷期, 并且在重建的 1848~2000 年间, 春夏季平均最高温度并没有表现出明显的上升趋势。

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, 审稿专家对论文提出建设性修改意见, 在此表示衷心的感谢。

1) 新疆维吾尔自治区气象局科研所. 新疆维吾尔自治区气候历史史料(内部使用). 1981. 15—188

参考文献

- 1 Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern Hemisphere temperature during the last millennium: Inferences, uncertainties and limitations. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 759—762[doi]
- 2 Timothy J O, Briffa K R. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years. *Science*, 2006, 311: 841—844[doi]
- 3 Fidel A R, Carlos Le-Q, José A B, et al. Climate variability 50000 years ago in mid-latitude Chile as reconstructed from tree rings. *Nature*, 2001, 410: 567—570[doi]
- 4 Barber V A, Juday G P, Finney B P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 2000, 405: 668—673[doi]
- 5 袁玉江, 李江风. 新疆伊犁地区树轮年表特征初探. *干旱区地理*, 1993, 16(3): 45—51
- 6 袁玉江, 叶玮, 董光荣. 天山西部伊犁地区 314 a 降水的重建与分析. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 121—127
- 7 叶玮, 袁玉江. 新疆伊犁地区现代气候特征与 300 a 来的干湿变化规律. *中国沙漠*, 1999, 19(2): 97—103
- 8 潘娅婷, 袁玉江, 喻树龙. 博尔塔拉河流域过去 461 a 夏季温度的重建和分析. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 159—164
- 9 喻树龙, 袁玉江, 何清, 等. 1468—2001 年新疆精河 5~8 月平均气温的重建. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 374—379
- 10 Esper J. A millennium-long temperature reconstruction from the Tien Shan Mountains, Kirghizia. In: Schleser G, Winiger M, Bräuning A, et al, eds. *Proceedings Dendrosymposium*, 2002 April 11—13. Bonn, 47
- 11 Esper J, Shiyatov S G, Mazepa V S, et al. Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Clim Dyn*, 2003, 8: 699—706[doi]
- 12 王承义, 李敏. 巴里坤近 500 年冷暖变化特征分析. *新疆气象*, 1990, 13(12): 19—22
- 13 张志华, 李骥, Graumlich J L, 等. 用树轮密度及宽度资料重建新疆吉木萨尔县的季节降水和最高温度. *气象学报*, 1998, 56(1): 77—86
- 14 袁玉江, 李江风. 天山乌鲁木齐河源 450 a 冬季温度序列的重建与分析. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 64—70
- 15 Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Science*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1990. 55—63
- 16 Wang L, Payette S, Bégin Y. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Can J Forest Res*, 2002, 32(3): 477—486[doi]
- 17 Schweingruber F H. Dendroecological zones in the coniferous forests of Europe. *Dendrochronologia*, 1985, 3: 67—75
- 18 Schweingruber F H, Bartholin T, Schär E, et al. Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland). *Boreas*, 1988, 17: 559—566
- 19 Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H, et al. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *J Geophys Res*, 2001, 106(D3): 2929—2941[doi]
- 20 Bräuning A, Mantwill B. Summer temperature and summer monsoon history on the Tibetan plateau during the last 400 years recorded by tree rings. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L24205, [doi]
- 21 Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H. Large-scale temperature inferences from tree rings: A review. *Glob Planet Change*, 2004, 40: 11—26[doi]
- 22 Gagen M, McCarrroll D, Edouard J L. Combining ring width, density and stable carbon isotope proxies to enhance the climate signal in tree-rings: An example from the southern French Alps. *Clim Change*, 2006, 78(2-4): 363—379[doi]
- 23 陈汉耀, 丘宝剑, 左大康, 等. 新疆气候及其和农业的关系. 北京: 科学出版社, 1963. 191—193
- 24 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 等. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应. *地理学报*, 2004, 59(6): 863—870
- 25 张军民. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究. *干旱气象*, 2006, 24(2): 1—4
- 26 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化. *第四纪研究*, 1999, (1): 81—89
- 27 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(3): 380—385
- 28 Creber G T, Chaloner W G. Influence of environmental factors on the wood structure of living and fossil trees. *Bot Rev*, 1984, 50(4): 361—370
- 29 刘禹, 史江峰, Shishov V, 等. 以树轮晚材宽度重建公元 1726 年以来贺兰山北部 5~7 月降水量. *科学通报*, 2004, 49(3): 265—269
- 30 邵雪梅, 梁尔源, 黄磊, 等. 柴达木盆地东北部过去 1437 a 的降水变化重建. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 122—126
- 31 喻树龙, 袁玉江, 金海龙, 等. 用树木年轮重建天山北坡中西部 7~8 月 379 a 的降水量. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 404—410
- 32 王承义, 胡杨斌. 新疆伊犁地区近 250 年冷暖变化特征分析. *干旱区地理*, 1996, 19(3): 37—44
- 33 徐国昌. 中国干旱半干旱区气候变化. 北京: 气象出版社, 1997. 45—47