DOI: 10.5846/stxb201410202060

姜盛夏,袁玉江,陈峰,尚华明,张同文,喻树龙,秦莉,张瑞波.树轮宽度记录的额尔齐斯河上游地区过去 291 年的降水变化.生态学报,2016,36 (10): - .

Jiang S X, Yuan Y J, Chen F, Shang H M, Zhang T W, Yu S L, Qin L, Zhang R B.A 291-Year Precipitation Reconstruction in the Upper Irtysh River Basin Based on Tree-ring Width. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

树轮宽度记录的额尔齐斯河上游地区过去 291 年的降 水变化

姜盛夏1,2,袁玉江1,*,陈峰1,尚华明1,张同文1,喻树龙1,秦 莉1,张瑞波1

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室,新疆树木年轮生态实验室,乌鲁木齐 830002 2 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046

摘要:利用采自额尔齐斯河上游6个采点的西伯利亚云杉(*Picea obovata* Ledeb)树轮样本建立了区域树轮宽度年表。与气候要素的相关分析表明,该地区树木径向生长主要受降水制约,区域树轮宽度年表与富蕴气象站上年7月至当年6月的降水总量相关显著。在此基础上建立了转换方程,重建了额尔齐斯河上游地区 1722—2012 年上年7月至当年6月的降水总量,方差解释量高达 55.1%(调整自由度后为 54.2%)。重建结果显示,该地区过去 291 年间存在9个降水偏多的时期和8个降水偏少的时期。降水重建序列还存在2.1a和 3.2a的显著周期及 2.3a、1.6a和 24.3a的较显著周期,并且在 1876—1877 年及 1983 年前后发生了降水突变。空间相关分析表明,本文重建的上年7月至当年6月降水量对额尔齐斯河上游阿勒泰地区的降水量具有很好的空间代表性。此外,本文重建结果还与周边地区其他基于树轮资料重建的降水序列的干湿变化有较好的一致性。 关键词:额尔齐斯河上游;西伯利亚云杉;树轮宽度;降水重建

A 291-Year Precipitation Reconstruction in the Upper Irtysh River Basin Based on Tree-ring Width

JIANG Shengxia^{1,2}, YUAN Yujiang^{1,*}, CHEN Feng¹, SHANG Huaming¹, ZHANG Tongwen¹, YU Shulong¹, QIN Li¹, ZHANG Ruibo¹

1 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Xinjiang Laboratory of Tree Ring Ecology, Urumqi 830002, China

2 College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Dendroclimatology is one of the most important methods for reconstructing past climate change. Owing to the characteristics of precise dating, annual resolution, and comparability with meteorological observational data, tree-ring data have been widely used as important archival material in paleoclimatic research. We selected Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb) trees with little or no apparent evidence of human or other disturbances for sampling. Tree-ring chronologies at six individual sites were developed for Siberian spruce from the Upper Irtysh River, and then a regional tree-ring chronology (RTC) was established based on all of the detrended data obtained from individual tree cores of the six sites. We analyzed the correlations between the RTC chronology and the meteorological data of the Fuyun weather station. The results showed that precipitation was the main factor limiting the radial growth of spruce trees in this region. The RTC chronology showed the highest correlation with precipitation from the previous July to June of the current year. Based on the results of

基金项目:国家自然科学基金(41275120);科技部气象行业专项(GYHY201206014);国家自然科学基金(40975056);科技支撑项目 (2012BAC23B01);自治区重点实验室开放课题基金项目(XJDX0909—2012—04)

收稿日期:2014-10-20; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yuanyuj5502@ sina.com

http://www.ecologica.cn

correlation analysis, we reconstructed annual precipitation patterns (July-June) of the Upper Irtysh River basin from 1722 to 2012. The precipitation reconstruction explained 55.1% of the instrumental precipitation variance during the period of 1963—2012. During the past 291 years, there were nine wet periods and eight dry periods. The wettest period occurred from 1984 to 2008, and the driest period occurred from 1877 to 1891. The period 1829—1876 was the most extended wet period, while the period 1807—1828 was the most prolonged dry period. Power spectrum analysis indicated the existence of some decadal (21.6- and 24.3-year) and interannual (2.1-, 2.3- and 3.2-year) cycles. A moving t-test indicated that an abrupt change of precipitation occurred in 1876—1877 and 1983 in this region. The results of spatial correlation analysis indicated that our precipitation reconstruction correlated well (r>0.6) with the July—June precipitation gridded data over a large area of the Altay region, with the highest correlations occurring in the Southern Altay Mountains. When compared with other tree ring based precipitation reconstructions from the surrounding area, our results showed a similar trend in the variation of drought and precipitation.

Key Words: Upper Irtysh River; Picea obovata Ledeb; tree-ring width; precipitation reconstruction

在中国西北地区,大部分气象站的记录均不超过 70 年,这对研究降水的变化特征而言太短,因此利用树 木年轮作为代用资料来延长气象记录已被广泛应用。自 20 世纪 80 年代起,一些学者就在中国境内额尔齐斯 河周边地区开展了树轮研究工作。李江风、袁玉江等人对新疆阿尔泰山南坡温度、降水及额尔齐斯河径流量 进行了重建^[1-3]。张同文等人利用树轮宽度重建了阿勒泰西部的降水、温度及积雪深度^[4-6]。陈峰等人利用 阿尔泰山西伯利亚落叶松的树轮宽度和最大晚材密度来揭示了气候变暖的趋势并进行了降水重建^[7-8]。张 瑞波和徐国保等人分别利用树轮中的δ¹³C 和δ¹⁸O 同位素重建了阿勒泰地区的夏季气温和相对湿度^[9-10]。尚 华明等人对位于哈萨克斯坦境内的阿尔泰山进行了树轮研究,重建了当地的 310 年来的初夏温度^[11-12]。此 外,也有一些俄罗斯学者对阿尔泰山进行了树轮气候学研究^[13-15]。

前人对该地区的树轮研究几乎都是采用西伯利亚落叶松(Larix sibirica Ledeb)进行的,而本文利用采自阿尔泰山南坡额尔齐斯河上游的西伯利亚云杉(Picea obovata Ledeb),分析其树木年轮径向生长对区域气候的响应,进而重建了当地1722—2012年上年7月至当年6月的降水量,并分析其变化特点。本文有助于加深对额尔齐斯河上游地区历史气候的认识,帮助我们了解该地区对全球气候变化的响应,还对完善阿尔泰山的树轮资料和气候预测有重要意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

额尔齐斯河发源于阿尔泰山东段南麓即富蕴县东北部,在我国自东南向西北流淌,于哈巴河县北湾地区 流出国界,流经哈萨克斯坦和俄罗斯,最终注入北冰洋。在我国境内干流总长 593 公里,干流流域面积 5 万平 方公里^[16]。额尔齐斯河上游的阿尔泰山区受来自大西洋的西风气流的影响,并因为山地的阻挡抬升作用,降 水充足,山区森林资源丰富。西伯利亚云杉主要分布在海拔 1200—1800m,其耐阴、耐寒,多生长于沟谷和多 石头的地方。

1.2 样本采集及年表的建立

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于 2010 年 7 月下旬及 2013 年 8 月上旬,在额尔齐斯河上游的福海 和富蕴林场选取了 6 个采样点进行树芯样本采集(图1),共采集了 179 棵西伯利亚云杉,318 个样芯。表 1 为 额尔齐斯河上游树轮采样点概况。这些采样点都位于森林中下部,海拔较低,其中大部分采点石头多,土 层薄。







XSK:夏什克 Xiashike;TLD:塔里德萨依 Talidesayi;XTK:协特克阔依汗 Xietekekuoyihan;KYS:喀依尔特站南 Kayierte south staton;DEN:大桥 东北 Northeastern Daqiao;KKT 可可托海北 Northern Koktokay

Table 1 Gel	leral information of the s	sample sites in the	upper stream section	on of the fitysh K	IVEI
采样点 Sampling sites	代码 Code	纬度/N Latitude	经度/E Longitude	海拔/m Altitude	样本量/(株/芯) Sample size
夏什克 Xiashike	XSK	47°42′07″	88°59'06″	1216	26/47
塔里德萨依 Talidesayi	TLD	47°48'38″	88°59′47″	1272	31/58
协特克阔依汗 Xietekekuoyihan	ХТК	47°40′52″	89°06′10″	1681	29/52
喀依尔特站南 Kayierte south station	KYS	47°30′51″	89°38′47″	1625	27/53
大桥东北 Northeastern Daqiao	DEN	47°25′17″	89°38'49″	1445	34/62
可可托海北 Northern Koktokay	ККТ	47°16′49″	89°47′39″	1663	32/46

表1 额尔齐斯河上游树轮采样点概况

the comple sites in the upper streem section

将样芯带回实验室后,按照树木年轮学的基本原理和研究步骤^[17],对其进行固定、打磨、在显微镜下目测 定年,用精度为0.001mm的 MeasureJ2X 树轮宽度测量系统测量树轮宽度,采用折线图对比法进行交叉定年, 并用 COFECHA^[18]程序进行交叉定年质量控制。采用 ARSTAN 年表研制程序建立年表,在建立年表的过程 中,为了在树轮宽度年表中尽可能多的保留低频方差,使用负指数曲线或无正向坡度的直线对树轮宽度序列 进行拟合,以去除树木自身的生长趋势,此外还使用 2/3 序列长度的样条函数进一步稳定年表的方差,最后得 到标准化年表、差值年表和自回归年表共 3 种类型的树轮宽度年表。本文选用标准化年表进行分析,因为其 既包含了气候变化的高频信息又包含了气候变化的低频信息,是目前树轮气候研究中应用最广的一种年表。

通过计算发现,本文6个树轮宽度标准化年表在公共区间(1799—2010年)内的互相关系数均很高(表2),且平均互相关系数达到了0.643,因此有必要建立研究区的区域年表(代码 RTC)。将6个采点的树轮样本序列放在一起重新交叉定年,用与上文相同的去趋势方法去除与树龄有关的生长趋势(负指数曲线或无正向坡度的直线对树轮宽度序列进行拟合,使用2/3序列长度的样条函数进一步稳定年表的方差),建立低海拔西伯利亚云杉的区域年表(RTC),期间剔除了4个与主序列相关差的序列,最后进入年表的有314个序列。

		表 2	标准化年表间的相关	关系数		
	Table 2	Correlation coefficien	ts between the tree-	ring standardized	l chronologies	
年表 Chronology	XSK	TLD	XTK	KYS	DEN	ККТ
XSK	1					
TLD	0.652 **	1				
XTK	0.660 **	0.668 **	1			
KYS	0.715 **	0.621 **	0.739 **	1		

0.675 **

0.564 **

0.794 **

0.599 **

1

0.590 **

生 态 学

报

**表示相关系数超过 0.01 的显著性水平

0.728 **

0.521 **

0.604 **

0.522 **

表3列出了区域标准化树轮宽度年表的统计特征,可以看出,区域树轮序列具有较高的平均敏感度和标 准差,表明该地区西伯利亚云杉树轮宽度生长受气候因子的限制作用较强。较高的样本总体代表性,说明不 同树木之间的树轮宽度变化具有较好的一致性。若以子样本信号强度 0.85 为标准,该序列从 1722 年起可用 于气候重建。

表 3 额尔齐斯河上游西伯利亚云杉区域树轮宽度标准化年表(RTC)的统计特征

Table 3 Statistical features of regional tree-ring width standardized chronologies of *Picea obovata* Ledeb in the upper stream section of the Irtysh River

 统计量 Statistic	RTC
 平均敏感度 Mean sensitivity	0.34
标准差 Standard deviation	0.39
一阶自相关 First-order autocorrelation	0.50
树间平均相关系数 Mean correlation between trees	0.34
第一主成分方差解释量%Variance in first eigenvector	36.9
信噪比 Signal-to-noise ratio	15.8
样本总体代表性 Expressed population signal	0.94
SSS>0.85 的起始年 First year of SSS >0.85	1722

1.3 气象资料

本文所用的气象资料来自研究区附近的富蕴气象 站(89°31′E,46°59′N,海拔810.5m,1962—2012年),气 象要素包括月平均气温、月平均最高气温、月平均最低 气温和月降水量,资料时段为1962—2012年。从该站 多年月平均气温和降水分布图(图2)可以看出,降水呈 双峰型,主要集中在7月和11月,其中7月最多;高温 期为6—8月,其中7月气温最高。

2 结果与分析

2.1 树轮径向生长与气候要素的关系

本文采用相关函数的方法,分析额尔齐斯河上游西 伯利亚云杉径向生长对气候因子的响应(图3)。经计





算发现,研究区内树木径向生长对降水量的响应较强,树轮宽度与上年7、8、12月及当年5、6月的降水量的相关系数超过了0.05的显著性水平。上年7、8月即上年生长季中后期降水充沛,有利于树木积累较多的营养物质及土壤保持较高的湿度,为来年树木生长提供良好的条件^[19]。上年12月较多的降雪,在来年春季融化时会使地表径流增加,有利于春材的生长,形成偏宽年轮^[20]。5和6月是春材形成的关键时期,年轮生长较

1

DEN

KKT

5

快,会形成大约一半年轮^[21],该时期降水丰富时,能促进植物光合作用,加快形成层细胞分裂,形成较宽年轮^[19]。从图3还可以看出,树木轮宽生长对上年7月至当年9月的单月温度响应较弱,只与当年8月平均温度达到了0.05的显著性水平。

将区域年表与富蕴气象站上年1月至当年12月所有顺序组合的气象资料做单相关普查,发现 RTC 与当年5—6月降水总量(P₅₆)及上年7月至当年6月的降水总量(P₇₆)比单月的相关要好,其相关系数分别为0. 616和0.742,都超过了0.001的显著性水平。尽管上年9月至当年4月的单月降水量与树轮径向生长的相关 性大都不显著,但在阿勒泰地区,由于纬度较高,从10月起就会出现积雪,到来年5月才能融化,这期间的固 态降水,树木不能吸收,与单月相关性的生理意义不大,其累积降雪量融化后对来年春材生长影响较大,因此 上年7月至当年6月降水量与树轮宽度生长的高相关是合理的。这也与美国树轮学家 Schulman 的"干旱和 半干旱区针叶树年轮宽度与生长季以前的春季、冬季、秋季和夏季的气候状况有密切关系"^[22]这一观点相符。 上年7月至当年6月的降水总量与树轮宽度生长的相关性要好于当年5—6月的降水总量与树轮宽度生长的 相关性,因此,本文选择对上年7月至当年6月的降水量进行重建,以恢复该地区过去291年的降水变化。





2.2 重建方程的建立和检验

根据上文的相关分析,我们以 RTC 年表为自变量,以上年 7 月至当年 6 月的降水总量为因变量,利用一 元线性回归模型建立了转换方程: 350-

P76 = 63.111 + 125.162RTCt 式中,P₇₆为额尔齐斯河上游地区富蕴气象站上年7月 至当年6月的降水总量的重建值,RTC,为区域树轮宽度 标准化年表当年的树轮宽度指数。该转换方程的相关 系数 r=0.742,方差解释量为55.1%(调整自由度后方 差解释量为54.2%),F_{1,48}=58.91,超过了0.001的显著 性水平,表明该方程有很高的可信度。图4显示,上年 7月至当年6月降水量的重建值与实测值的变化趋势 和幅度有较好的一致性,可用该方程重建额尔齐斯河上 游富蕴气象站1722—2012年上年7月至当年6月的降 水量。

本文采用逐一剔除法,通过符号检验、误差缩减值



图 4 额尔齐斯河上游地区上年 7 月至当年 6 月降水量实测值与 重建值对比

Fig.4 Observed (fixed line) and reconstructed (dashed line) precipitation in the upper stream section of the Irtysh River from previous July to current June

(RE)、乘积平均数(t)等检验统计量对重建方程的质量进行检验。表4列出了额尔齐斯河上游地区上年7月 至当年6月降水量重建的一些检验统计量。其中,S₁为原始值符号检验,其超过了0.01的显著性水平,S₂为一 阶差符号检验,其达到了0.05的显著性水平,说明降水重建序列与实测序列在高低频变化上均有较好的一致 性,特别是低频变化上的一致性更好一些。RE为误差缩减值,取值范围为-∞-1.0,其值越大越好,本文中 RE为0.515。t表示乘积平均数,本文t为5.29,超过了0.01的显著性水平。这些检验统计量均表明利用上述 重建方程重建的降水量具有较高的可信性。

表 4 上年 7 月至当年 6 月降水量重建值的检验统计量

Table 4	Statistical characteristics of ve	rification of reconstructed p	precipitation from previous July t	o current June
时段 Time	S_1	S_2	RE	t
1963—2012	37(33*,35**)	32(32*,34**)	0.515	5.29

* 表示超过 0.05 的显著性水平, * * 表示超过 0.01 的显著性水平

2.3 降水重建序列的变化特征

根据转换方程,我们重建了 1722—2012 年额尔齐斯河上游地区富蕴气象站上年 7 月至当年 6 月降水量 长序列(图 5),这条曲线反映了该地区 291 年来的干湿波动情况。本文选用新疆气象局划分年降水量的距平 标准^[23]:降水距平百分率>30%为湿润年,<-30%为干旱年。故在过去 291 年干旱年份共有 37 年,湿润年份 39 年。





有研究表明,在干旱、半干旱地区,树轮重建在10年际尺度上比年际间更为可靠^[24]。为了更直观地观察 干湿区间,我们对降水重建序列进行了11年的滑动平均。从图5可以看出,1722—2012年的降水重建序列 经历了9个湿润期和8个干旱期,其中最湿润的时期出现在1984—2008年,其降水最大距平百分率为23. 5%;最干旱的时期出现在1877—1891年,其降水最大距平百分率也为-29.9%;最长的湿润期为1829—1876 年,持续了48年;最长的干旱期出现在1807—1828年,持续了22年(见表5)。

功率谱分析表明,本文重建的额尔齐斯河上游地区过去 291 年降水序列中包含多个周期。显著的(p<0. 05)高频变化周期有 2.1a 和 3.2a 的周期,此外,还有 2.3a、21.6a 和 24.3a 的周期超过了 0.10 的显著性水平。 其中,2a 左右的周期反映了与海气间相互耦合振荡有关的"准两年脉动"^[25],3.2a 周期可能与 ENSO 的 2.5— 7a 周期有关^[26-27],21.6a 的周期可能与太阳黑子的活动有关^[28]。

本文利用滑动 T 检验法^[29]对降水重建序列进行突变检验。取滑动步长 M=10,15,20,25,30a,将突变点

出现次数≥4次的年份作为突变年份,以显著性水平 0.01 来判别突变,其检验结果见表 6。由表可知,额尔齐斯河上游地区上年7月至当年6月的降水量在1876—1877年发生了由多向少的突变,在1983年前后发生了由少向多的突变。

Table 5	Table 5 The wet-dry periods of precipitation over the past 291 years in the upper stream section of the Irtysh River						
湿润期 Wet period	年数/a Number of year	最大距平百分率/% Maximum anomaly percentage	干旱期 Dry period	年数/a Number of year	最大距平百分率/% Maximum anomaly percentage		
1727—1731	5	11.9	1732—1741	10	-21.3		
1742—1750	9	13.1	1751—1768	18	-21.6		
1769—1787	19	22.6	1788—1798	11	-15.4		
1799—1806	8	17.4	1807—1828	22	-27.7		
1829—1876	48	23.4	1877—1891	15	-29.9		
1892—1895	4	11.2	1896—1909	14	-15.7		
1910—1942	33	14.7	1943—1955	13	-21.4		
1956—1964	9	10.5	1965—1983	19	-18.1		
1984—2008	25	23.5					

表 5 额尔齐斯河上游地区过去 291 年降水量的干湿变化阶段

表 6 额尔齐斯河上游地区上年 7 月至当年 6 月降水量重建序列中的突变年份

Table 6 The abrupt years of the reconstructed precipitation series in the upper stream section of the Irtysh River from previous July to current June

滑动步长 Slide step	10a	15a	20a	25a	30a	突变方向 Abrupt change direction
突变年份	1876—1877	1876—1877	1876—1877	1876—1877	1876—1877	由多向少
Abrupt change years	1983	1983	1983	1983	1983	由少向多

3 讨论

3.1 空间代表性分析

为探索本文重建结果对较大范围降水变化的区域代表性,我们利用 Climate Research Unite(CRU TS3.22, 0.5°×0.5°)格点数据中 1963—2012 年 P7C6 降水量数据与同时期富蕴气象站观测资料以及重建结果分别进行了空间相关分析。结果表明,器测降水(图 6(a))和重建降水(图 6(b))与 CRU 数据空间相关场的分布比较一致,相关最好的区域(*r* >0.6)主要集中在我国阿勒泰地区,此外,天山山区的相关系数也超过了 0.3。这一结果说明本文重建的富蕴站上年 7 月至当年 6 月的降水量对整个阿勒泰地区的降水变化具有很好的代表性也较好。

3.2 与其它记录对比

为验证降水重建序列的可靠性,我们将北疆地区利用树轮进行降水重建的结果与本文的降水重建序列进行了对比分析,所有序列均为经过11a 滑动平均计算后的低频变化序列(图7)。与本文重建结果(图7(b))进行对比的3条降水重建序列分别是陈峰等人^[8]利用树轮宽度重建的中国阿尔泰山南坡上年7月至当年6月的降水序列(图7(a));魏文寿^[30]等人利用树轮宽度重建的天山山区上年7月至当年5月的降水序列(图7(c));高卫东^[31]等人利用树轮宽度重建的天山北坡中部上年8月至当年7月的降水序列(图7(d))。对比结果显示,本文重建的降水量与其它3条降水序列的干湿阶段具有较好的一致性,尤其是本文重建与陈峰^[8]等人重建序列的一致性非常好。在重建结果中,4条序列均体现了20世纪90年代以来的显著变湿趋势、20世纪70—80年代的干旱时期、20世纪50年代的湿润期、20世纪40年代的干旱期、20世纪20—30年代的湿



图 6 器测降水(a)与重建降水序列(b)与 CRU 格点 P7C6 降水数据(1963—2012 年)空间相关分析结果

Fig.6 Spatial correlations from previous July to current June for instrumental precipitation(a), reconstructed precipitation(b) and CRU precipitation data(1963-2012)





润期和 19 世纪 30 年代的湿润期。其中 3 条序列(包含本文的重建序列)表现出了 20 世纪初的干旱期、19 世纪 70 年代的湿润期、18 世纪末的干旱期和 18 世纪 80 年代的湿润期。同时,4 条重建序列之间还存在一些干湿阶段差异,这可能是由于重建时段、重建所用年表不同或采样点小生境差异产生的区域性气候特征造成的

偏差^[32]。

(a)—(d)为各序列经 11 年滑动平均后的低频变化序列。(a)陈峰^[8]等人重建的中国阿尔泰山南坡 P7C6 降水变化;(b)本文重建的额尔齐斯河上游地区 P7C6 降水变化;(c)魏文寿^[30]等人重建的天山山区 P7C5 降水变化;(d)高卫东^[31]等人重建的天山北坡中部 P8C7 降水变化

4 结论

(1)额尔齐斯河上游地区西伯利亚云杉树轮宽度生长与富蕴气象站上年7月至当年6月的降水量呈正 相关,且相关显著,利用采自额尔齐斯河上游的西伯利亚云杉树轮宽度区域年表,重建了富蕴气象站1722— 2012年共291年的上年7月至当年6月的降水历史变化。

(2)重建的过去 291 年的降水序列经历了 9 个湿润期和 8 个干旱期,其中降水最多的时期出现在 1984—2008 年,降水最少的时期出现在 1877—1891 年;最长的湿润期出现在 1829—1876 年,持续了 48 年;最长的干旱期出现在 1807—1828 年,持续了 22 年。

(3)额尔齐斯河上游地区的降水重建序列存在 2.1a 和 3.2a 的显著周期及 2.3a、21.6a 和 24.3a 的较显著 周期,并且在 1876—1877 年及 1983 年前后降水发生过突变。

(4) 空间相关分析表明富蕴气象站 1722—2012 年上年 7 月至当年 6 月的降水量重建值对额尔齐斯河上 游整个阿勒泰地区降水量具有很好的代表性。本文重建序列的干湿阶段与周边其他几条降水记录的结果较 为一致,表明了重建结果的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 李江风,张治家,袁玉江.阿勒泰地区降水重建 // 李江风.新疆年轮气候年轮水文研究.北京:气象出版社, 1989: 66-72.
- [2] 张治家,袁玉江. 阿勒泰地区 200 年春末夏初的冷暖变化 // 李江风. 新疆年轮气候年轮水文研究. 北京: 气象出版社, 1989: 98-103.
- [3] 李江风, 袁玉江, 由希尧. 树木年轮水文学研究与应用. 北京: 科学出版社, 2000: 51-158, 193-206.
- [4] 张同文,袁玉江,喻树龙,魏文寿,杨青,尚华明.树木年轮重建阿勒泰西部 1481-2004 年 6-9 月降水量序列.冰川冻土,2008,30(4): 659-667.
- [5] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 魏文寿, 杨青, 尚华明. 用树木年轮重建阿勒泰西部 5-9 月 365 年来的月平均气温序列. 干旱区研究, 2008, 25(2): 288-294.
- [6] 张同文,袁玉江,魏文寿,喻树龙,尚华明,陈峰,张瑞波,范子昂,张冰江.使用树轮资料重建阿勒泰西部年积雪深度≥0cm 日数的长期变化.沙漠与绿洲气象,2010,4(3):6-11.
- [7] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Fan Z A, Zhang T W, Shang H M, Zhang R B, Yu S L, Ji C R, Qin L. Climatic response of ring width and maximum latewood density of *Larix sibirica* in the Altay Mountains, reveals recent warming trends. Annals of Forest Science, 2012, 69(6): 723-733.
- [8] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Zhang T W, Shang H M, Zhang R B. Precipitation reconstruction for the southern Altay Mountains (China) from tree rings of Siberian spruce, reveals recent wetting trend. Dendrochronologia, 2014, 32(3): 266-272.
- [9] 张瑞波,尚华明,魏文寿,袁玉江,喻树龙,张同文,范子昂,陈峰,秦莉.树轮δ¹³C记录的阿勒泰地区近160a 夏季气温变化.沙漠与绿 洲气象,2014,8(2):34-40.
- [10] Xu G B, Liu X H, Qin D H, Chen T, Wang W Z, Wu G J, Sun W Z, An W L, Zeng X M. Relative humidity reconstruction for northwestern China's Altay Mountains using tree-ring δ¹⁸O. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(2): 190-200.
- [11] 尚华明,魏文寿,袁玉江,喻树龙,张同文,瓦合提・艾则买,李新建.阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应. 生态学报, 2010, 30
 (9): 2246-2253.
- [12] 尚华明,魏文寿,袁玉江,喻树龙,张同文,张瑞波.哈萨克斯坦东北部 310 年来初夏温度变化的树轮记录.山地学报,2011,29(4): 402-408.
- [13] Sidorova O V, Saurer M, Myglan V S, Eichler A, Schwikowski M, Kirdyanov A V, Bryukhanova M V, Gerasimova O V, Kalugin I A, Daryin A V, Siegwolf R T W. A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai. Climate Dynamics, 2012, 38 (1/2): 175-188.
- [14] Myglana V S, Oidupaab O C, Kirdyanove A V, Vaganov E A. 1929-year tree-ring chronology for the Altai-Sayan Region (Western Tuva).

Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia, 2008, 36(4): 25-31.

- [15] Schwikowski M, Eichler A, Kalugin I, Ovtchinnikov D, Papina T. Past climate variability in the Altai. PAGES News, 2009, 17(1): 44-45.
- [16] 阿勒泰地区志编委会. 阿勒泰地区志. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2004: 111-112.
- [17] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating. Tucson: University of Arizona Press, 1996: 1-173.
- [18] Homes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.
- [19] 桑卫国,王云霞,苏宏新,陆兆华.天山云杉树轮宽度对梯度水分因子的响应.科学通报,2007,52(19);2292-2298.
- [20] 张同文,魏文寿,袁玉江,喻树龙,杨青,尚华明. 阿勒泰西部树轮年表特征分析. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1040-1047.
- [21] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990: 14-19.
- [22] Schulman E. Dendro Climatic Changes in Semiarid America. Tucson: University of Arizona Press, 1956: 1-195.
- [23] 袁玉江,李江风,胡汝骥,刘潮海,焦克勤,李忠勤.用树木年轮重建天山中部近 350a 来的降水量.冰川冻土, 2001, 23(1): 34-40.
- [24] 刘禹,安芷生,马海州,蔡秋芳,刘征宇,Kutzbach JK,史江峰,宋惠明,孙军艳,易亮,李强,杨银科,王雷.青海都兰地区公元850年 以来树轮记录的降水变化及其与北半球气温的联系.中国科学:D辑地球科学,2006,36(5):461-471.
- [25] 钱维宏,朱亚芬,叶谦.赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率.科学通报,1998,43(10):1098-1102.
- [26] 陈峰,魏文寿,袁玉江,喻树龙,尚华明,张同文,张瑞波,王慧琴,秦莉.基于多点树轮序列的 1768-2006 年甘肃降水量变化.中国沙漠,2013,33(5):1520-1526.
- [27] Huber M, Caballero R. Eocene El Niño: evidence for robust tropical dynamics in the "Hothouse". Science, 2003, 299(5608): 877-881.
- [28] 袁玉江,邵雪梅,李江风,李新建,唐凤兰.夏干萨特树轮年表中降水信息的探讨与 326 年降水重建. 生态学报, 2002, 22(12): 2048-2053.
- [29] 魏凤英,曹鸿兴.中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究.大气科学,1995,19(2):140-147.
- [30] 魏文寿,袁玉江,喻树龙,张瑞波.中国天山山区 235a 气候变化及降水趋势预测.中国沙漠,2008,28(5):803-808.
- [31] 高卫东, 袁玉江, 张瑞波, 刘志辉. 树木年轮记录的天山北坡中部过去 338a 降水变化. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1535-1540.
- [32] 李金建, 邵雪梅, 李媛媛, 秦宁生. 树轮宽度记录的松潘地区年平均气温变化. 科学通报, 2014, 59(15): 1446-1458.