

新疆伊犁乌孙山北坡树轮灰度年表的建立及气候意义

张瑞波^{1,2}, 喻树龙^{1,2}, 袁玉江^{1,2}, 魏文寿^{1,2}

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002;
2. 中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用2006年采自新疆伊犁乌孙山北坡3个采点的树轮样本, 建立了树轮宽度年表, 采用树轮图像分析法进一步建立了3种宽度年表和5种灰度年表。宽度年表对比发现, 树木年轮对气候响应南疆强于北疆, 北疆其它地方强于伊犁地区, 而乌孙山北坡与伊犁其它地区比较, 树轮宽度对气候的响应较敏感。树轮图像分析法建立的8种年表特征进行对比发现, 恰依恰孜宽度年表对气候的响应最为强烈; 而阿乌里亚乔克标准化灰度年表对气候的响应较好。相关分析表明, 全轮灰度、早材灰度和最大灰度与4、5月气温相关较好。4月降水和实测宽度、全轮宽度以及早材宽度相关较好, 而6月降水与全轮灰度和早材灰度相关较好。早材宽度对气候的响应强于晚材宽度; 全轮灰度和早材灰度对气候的响应较好。利用树轮图像分析所得到的8个树轮参数年表可增加气候重建代用指标, 提高气候重建的精度。

关键词: 乌孙山北坡; 灰度年表; 树木年轮; 气候变化

中图分类号: P467

文献标识码: B

文章编号: 1002-0799(2009)01-0014-06

Development of the Tree-ring Grey Chronology and Climate Significance in Northern Slope of Wusun Mountains

ZHANG Rui-bo^{1,2}, YU Shu-long^{1,2}, YUAN Yu-jiang^{1,2}, WEI Wen-shou^{1,2}

(1. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China;

2. Key Laboratory of Tree-ring Physical Chem Research of CMA, Urumqi 830002, China)

Abstract: Tree-ring samples collected from three sites in northern slope of Wusun Mountains in 2006 were used to develop tree-ring width chronologies using standard dendrochronological methods. Further using image analysis of tree-ring, three kinds of width chronologies and five kinds of gray chronologies were developed. Contrasting the measured width chronologies, it's found that the tree-ring response to climate is stronger in southern Xinjiang than in the northern, in other parts of northern Xinjiang than in Yili area, in northern slope of Wusun Mountains than in the other parts of Yili area, and it's more sensitive in northern slope of Wusun Mountains. Analyses of the three width chronologies and the five gray chronologies developed by tree-ring image technology indicate

收稿日期: 2008-09-09

基金项目: 科技基础性工作专项(2007FY220200)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY20080611, GYHY200706008)和科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB6J113)共同资助。

作者简介: 张瑞波(1983-), 男, 助理研究员, 主要从事气候变化与环境演变、树木年轮气候学研究。E-mail: river0511@163.com

that the Qiayiqiazi width chronology and the Awuliyaciaoke gray chronology are the strongest and stronger on the climate response respectively. Correlation analysis between chronologies and climate shows that whole gray chronology, early wood gray chronology and maximum gray chronology are closely related to April–May temperature. Precipitation in April correlates better with measured width chronology, whole ring width chronology and early wood width chronology, and precipitation in June correlates better with whole ring gray chronology and early wood gray chronology. Early wood width chronology is stronger than late wood width chronology on tree–ring response to climate, whole ring gray chronology and early wood gray chronology are better response to climate than late wood gray chronology and minimum gray chronology. Eight tree–ring parameters obtained by image analysis of tree–ring can increase the climatic proxies for reconstruction and improve the accuracy of climate reconstruction.

Key words: northern slope of Wusun Mountains; grey chronology; tree–ring; climate change

气候变化问题的复杂性在于它包含着自然变化和人为影响两部分,二者的区分和定量评估仍是当今未解的难题。古气候记录主要反映气候的自然变化,可以提供在没有人类活动影响下的气候实况,揭示过去数百年、数千年甚至万年以上时段的自然气候变化的规律和特征。尽管当前十分强调人类活动对气候的可能影响,但是也应看到,即使在人类活动影响并不显著的历史时期,重大的气候灾异仍多有发生,其严重程度甚至超过现代的记录。因此,在预估未来的气候情景,如未来的干旱和水资源匮乏问题时,应当充分考虑古气候记录的研究结果。

自树木年代学创建以来,树木年轮宽度资料对历史时期气候和环境的指示作用一直占主导地位,利用其重建过去气候变化一直是国内外树木年轮气候学的研究重点。近年来,随着科技的进步,众多新的研究方法逐渐受到树木年代学家的重视,其中利用图像分析法对树木年轮的反射亮度(灰度)研究尚处于探索阶段。利用图像分析法可以大大减轻研究过程中的劳动量,降低试验成本;研究表明图像分析与密度分析结果间的相关系数可达-0.80,在质量和精度上,图像分析技术可以满足树木年代学的研究^[1]。但对于干旱区来说,由于气候环境恶劣,年轮细胞伸长缓慢、分裂较少,异常年多,缺轮率高,树轮图像分析法研究存在很大的困难。对温湿区来说,由于气候条件适宜,树轮宽度受环境影响较小,制约了温湿区树木年代学的研究,而图像分析法可能是温湿区树木年代学研究的一个重要手段。

新疆伊犁地区被誉为“塞外江南”,其气候条件相对较好,是干旱半干旱地区内的相对湿润区。新疆树轮工作者于1982和1990年曾在伊犁地区进行过

树轮采样,研制树轮宽度年表,并做了大量有关年轮气候和年轮水文方面的研究工作^[2-9]。本文基于前期宽度的研究,以乌孙山北坡为靶区,利用2006年采自该地区的3个采样点的雪岭云杉样本,建立了树轮宽度年表,采用树轮图像分析法进一步建立了全轮宽度、早材宽度、晚材宽度、全轮灰度、早材灰度、晚材灰度、最大灰度和最小灰度等8种参数年表,将8个参数的年表特征、宽度年表特征和前两次建立的宽度年表特征进行对比分析,研究树轮图像法建立年表的可靠性,并与气候资料对比,找出与气候资料相关较好的参数,分析其气候意义。

1 资料和方法

1.1 树轮资料

采样点位于天山北坡西部伊犁谷地,乌孙山北坡,隶属于独特的干旱内陆中的半干旱区,年降水量248mm,自西向东随高程递增,地势东高西低,谷地北面有高山屏障,寒流不易侵入,西侧敞开,暖湿气流可长驱直入。本次树木年轮研究的树种是原始喜阴湿的雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey),主要分布在海拔1500~2800m之间,采样点(图1,表1)均选择在森林上线,林内坡度比较大,树木大部分长于岩石风化物或石崖之上,土壤贫瘠,是比较典型的树轮取样环境。

1.2 气象资料及分析

乌孙山北坡临近树轮采点的气象站有伊宁、察布查尔和巩留3站,考虑到伊宁气象站距采点相对较远,且与察布查尔气象站位置近似,处于河谷,而且与树轮年表的相关不如察布查尔气象站和巩留气象站好,因此本文采用察布查尔(43°50'N, 81°09'E,

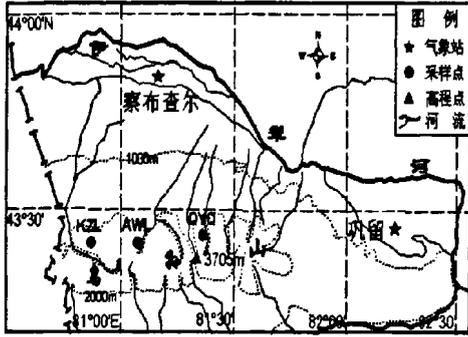


图1 树轮采样点和气象站分布示意图

表1 乌孙山北坡树轮采点概况

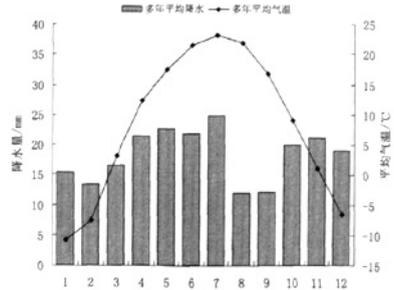
采点名称	阿乌里亚乔克山	克孜勒萨依	恰依恰孜
采点代号	AWL	KZL	QYQ
东经	81°04'35.7"	80°52'09.2"	81°27'40.0"
北纬	43°24'54.6"	43°25'18"	43°27'04.5"
树(棵)/芯(个)	24/50	20/40	25/50
平均海拔(m)	2689.88	2456.7	2284.64
坡向	NW-N-E	NE-E-NW	N-NE
坡度	20°~45°	5°~65°	5°~70°
平均郁密度	0.116	0.175	0.464

海拔 603.6m)和巩留气象站(43°28'N,82°14'E,海拔 776.5m)1960—2005年的历年逐月气象资料与乌孙山北坡树轮年表进行分析。

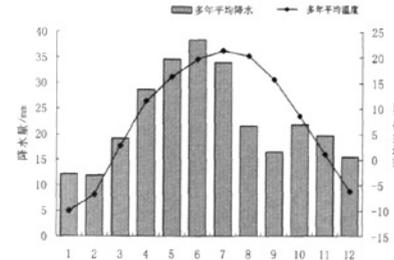
分析有气象记录以来乌孙山北坡气候特征发现,乌孙山北坡月降水呈现双峰型,4—7月最多,10—12月次之,8—9月和1—2月降水最少,乌孙山西部降水多于东部(图2);月平均气温为单峰型,夏季最高,东西部气温基本一致。乌孙山北坡年平均降水248mm,年平均气温8.16℃,46a来二者均有所增加,年平均气温增加更快,说明乌孙山北坡气候有暖湿化趋势。

1.3 图像分析方法原理

从图像学角度看,细胞可以分为深色的细胞壁和浅色的细胞腔,它们决定树轮灰度变化。由于细胞尺度通常小于图像分辨率,扫描树轮图像表现为混合像元,其灰度取决于混合像元中细胞腔与细胞壁之间面积的比例,灰度与细胞壁厚度成正比,与细胞大小成反比。考虑到密度与细胞壁厚成正相关,因此可以用灰度替代细胞密度来进行树轮分析^[9]。其物质基础是树轮细胞大小和细胞壁厚度受环境因子影响而显示的差异。由于细胞大小和细胞壁厚度会直接影响树轮灰度,从而可以从树轮灰度变化中提取气候变化信息^[1]。将正方形的树轮图像看作由像元



(a) 察布查尔气象站46a平均月降水和月平均温度



(b) 巩留气象站46a平均月降水和月平均温度

图2 乌孙山北坡月平均温度与降水

组成的图像,每个像元的反射光强度取值范围为0(黑色)~255(白色),称为灰度。由于树轮早晚材细胞大小和细胞壁厚度有明显的不同,使反射光强弱发生变化产生不同的灰度值。早材一般在春夏季形成,树木体内营养相对充足,细胞分裂和伸长都较旺盛,形成的细胞大,细胞壁薄,颜色浅,相应的灰度值大。而夏末、秋初是晚材的形成时期,细胞分裂和伸长相对春夏季较缓慢,从而形成较小的细胞,细胞壁厚,颜色深,相应的灰度值就小。而早材部分由于细胞大,单位面积所包括的细胞数量相对于晚材部分就少,即早材密度小,晚材密度大。由此可知,早材平均灰度值大,密度就小,晚材平均灰度值小,密度就大。灰度值与树轮密度近似成负相关关系。

2 树轮年表的建立和特征分析

2.1 宽度年表的建立

按照树木年代学的基本原理和研究步骤^[10],对样芯样本进行干燥、固定、磨平、打光、交叉定年,并用精度为0.001mm的轮宽测量仪和MeasureJ2X程序进行轮宽测量,利用COFECHA程序做交叉定年与量测的检验^[11],确保结果准确无误。在交叉定年过程中,由于样芯的质量和年轮测量中的误差导致部分样芯难以交叉定年,必须将其剔除;另外,舍弃同一棵树的2个序列和整体的相关性不好的序列。经交叉定年后,进入年表的序列数为136个,共剔

除4个序列。采用程序 ARSTAN 建立树轮宽度指数序列^[9],完成年表的建立。

2.2 灰度年表的建立

对树轮样本先采用 Epson 扫描仪将样芯数字化,用 WINDENDRO™2004a 图像分析系统进行分析,将数据转换输出,最终得到5种灰度参数(包括早材平均灰度值,晚材平均灰度值,最大灰度值,最小灰度值和全轮平均灰度值)和3种宽度参数(包括早材宽度,晚材宽度和全轮宽度)。同时,用 COFECHA 程序进行交叉定年的检验,并对照宽度(宽度测量后所得到的已经过交叉定年检验的树轮宽度指数)年表,根据一个灰度值应该对应一个宽度值,对树轮灰度指数进行交叉定年。

2.3 年表特征分析

新疆宽度年表的平均敏感度和标准差比较来看(表2),南疆明显高于北疆,天山西部伊犁地区的平均敏感度最低,这是因为整个北疆相对于南疆其气候、土壤、植被条件表现为较好,而整个伊犁地区气温、降水、土壤、植被条件相对新疆其他地域最好,导致树木对气候因子的响应最差。

表2 新疆树轮年表的平均敏感度和标准差

南疆地区	哈密	尉犁	轮台	沙雅	巴仑台	阿克苏
平均敏感度	0.180	0.363	0.378	0.349	0.26	0.243
标准差	0.347	0.292	0.267	0.321	0.297	0.286
年表数	10	16	8	9	2	6
采样时间/年	1979	1983	1983	1983	2004	2005
北疆地区	昌吉	阿勒泰	乌鲁木齐河	呼图壁河	精河	博尔塔拉河
平均敏感度	0.179	0.193	0.212	0.155	0.183	0.209
标准差	0.302	0.236	0.234	0.186	0.199	0.235
年表数	6	22	15	6	3	11
采样时间/年	1977	1981/2005	1993/2003	2003	2004	2004
伊犁地区	伊犁	霍城	乌孙山北坡			
平均敏感度	0.139	0.141	0.170			
标准差	0.189	0.178	0.220			
年表数	22	5	3			
采样时间/年	1982/1991	2006	2006			

由刘洪滨,邵雪梅在20世纪90年代关于树轮图像分析方法的应用研究可知,采用树轮图像分析方法得到的年轮参数是可信的^[10]。3个采点的标准化灰度和宽度比较来看,恰依恰孜的实测宽度、全轮宽度、早材宽度和晚材宽度的平均敏感度和标准差均表现为最大,克孜勒萨依年表最小,说明恰依恰孜年表对气候的响应最为敏感,而3个采点(图1)的位置自西向东正好是恰依恰孜—阿乌利亚乔克—克孜勒萨依,乌孙山北坡降水为东多西少,而干旱半

干旱地区降水是树木生长的重要限制因子,这可能是其平均敏感度和标准差存在差异的原因;而阿乌利亚乔克的全轮灰度、早材灰度、晚材灰度、最大灰度和最小灰度的平均敏感度和标准差均表现为最大,说明阿乌利亚乔克标准化灰度年表对气候的响应较为敏感。

在标准化宽度年表中,早材宽度年表的平均敏感度和标准差均大于晚材宽度和全轮宽度,说明在宽度标准化年表参数中,早材宽度对气候的响应最为强烈。在标准化灰度年表中,最小灰度年表的平均敏感度和标准差均最大。但根据刘禹、杨银科等人有关树轮密度的研究表明^[11-12],在一般情况下,同一个采点的树轮密度年表在各项年表特征参数都会较其宽度年表低一个数量级。而因为树轮灰度是树轮密度的一种代用资料,所以灰度年表的年表特征参数必然会带有密度年表的特点。从乌孙山北坡树轮灰度年表特征来看(表3),其最小灰度年表的平均敏感度和标准差平均值分别为0.114和0.137,表现较为异常,考虑到在样本前期预处理过程产生的划痕和扫描过程中的误差对最小灰度和晚材灰度影响最大,因此虽然最小灰度年表平均敏感度和标准差最大,但不能说明其对气候的响应较为强烈,要想证明其对气候响应程度,还应进行密度分析。全轮平均灰度、早材平均灰度和最大平均灰度表现出较好的一致性。说明这3个灰度年表对气候的响应具有较高的可信度。

表3 乌孙山北坡树轮宽度和灰度标准化年表平均敏感度和标准差比较

	年表	RW	EW	LW	RD	ED	LD	MAD	MID
平均敏感度	AWL	0.165	0.188	0.172	0.042	0.043	0.085	0.045	0.124
	KZL	0.147	0.170	0.178	0.034	0.029	0.072	0.025	0.121
	QYQ	0.196	0.214	0.178	0.042	0.036	0.062	0.035	0.097
	平均	0.169	0.191	0.176	0.039	0.036	0.073	0.035	0.114
标准差	AWL	0.171	0.190	0.161	0.056	0.047	0.094	0.048	0.164
	KZL	0.159	0.176	0.181	0.040	0.035	0.074	0.032	0.141
	QYQ	0.227	0.265	0.187	0.048	0.045	0.068	0.042	0.105
	平均	0.186	0.210	0.176	0.048	0.042	0.079	0.041	0.137

注:RW、EW、LW、RD、ED、LD、MAD、MID分别代表全轮宽度、早材宽度、晚材宽度、全轮灰度、早材灰度、晚材灰度、最大灰度和最小灰度,以下同。

乌孙山北坡灰度年表与宽度年表的平均敏感度、标准差、一阶自相关、信噪比、样本对整体的代表性和第一特征向量百分比均有一定差距,但是与潘娅婷^[13]对博尔塔拉河流域研究相比较,差距较小,说明乌孙山北坡树轮灰度对气候的响应较强。

考虑到年表的可靠性,本文分析的序列起始年代取所有年表子样本信号强度 $SSS > 0.85^{[20-21]}$,从乌孙山北坡3个采点的标准化树轮年表中可以发现(图3),年轮指数的变化趋势具有较好的一致性,1828—1831年,1911年,1917—1919年,1984年左右均出现高度一致的窄轮,而阿乌里亚乔克和克孜勒萨依年表在1767—1780年长达14a的窄轮高度吻合,出现窄轮的年份对应气候恶劣年份,说明在这些年份中会出现干旱、生长季前期低温或生长季内高温等气候灾害。窄轮的高度吻合也证明了本次采样是成功的,利用该年表重建历史时期气候变化具有较好的可信度。

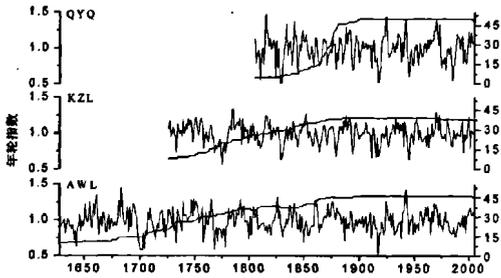


图3 标准化年轮指数与样本量

3 年表对气候的响应

在利用树木年轮进行历史气候研究的过程中,当年轮年表确定以后,年表与气候要素间的相关性分析是衡量该年表能否包含气候信息的关键^[2]。考虑到气候变化对树木径向生长的滞后效应,取察布查尔和巩留气象站1961—2005年上年10月到当年9月逐月的平均气温和降水的平均值与3个标准化年表的9个参数年表进行相关分析(表4、表5)。结果表明:

(1)早材灰度年表与4月平均气温呈负相关且相关最好,达到-0.429,显著性水平超过0.003;全轮灰度、早材灰度和最大灰度与4、5月气温相关较好,表明温度是乌孙山北坡树木年轮径向生长的限制性因子,4、5月的平均气温对树木年轮径向生长响应强烈。从树木生长生理学的角度来看,每年树木生长的起始时间,即早材生长的起始时间,主要受其生长前期及后期的气温控制^[2]。分析发现,察布查尔和巩留气象站1960—2005年4—5月平均气温分别为:14.91℃和13.86℃,乌孙山北坡3个采点的平均海拔高度与两气象站的海拔高度相差1500~2100m,按照干绝热直减率换算,采点位置4—5月平均气温在0~5℃。说明4—5月仍然处于雪岭云杉的

表4 乌孙山北坡平均标准化年表与平均气温相关系数

	MW	RW	EW	LW	RD	ED	LD	MAD	MID
TL10	0.139	0.102	0.137	-0.024	-0.019	-0.070	0.156	0.005	0.057
TL11	0.151	0.133	0.103	0.178	-0.188	-0.187	0.075	-0.202	-0.074
TL12	0.315*	0.267	0.302*	0.173	-0.027	-0.043	-0.053	0.094	-0.138
T1	-0.024	-0.019	-0.023	-0.051	-0.185	-0.183	0.131	-0.211	-0.012
T2	-0.023	-0.055	-0.052	-0.044	0.013	-0.031	0.193	-0.060	0.107
T3	0.046	0.053	0.060	-0.040	-0.114	-0.113	-0.012	-0.148	-0.124
T4	-0.215	-0.255	-0.252	-0.130	-0.429**	-0.437**	-0.209	-0.368*	-0.116
T5	0.030	-0.035	-0.003	-0.208	-0.338*	-0.386**	-0.100	-0.320*	-0.180
T6	-0.067	-0.038	-0.012	-0.184	-0.186	-0.245	0.245	-0.257	0.016
T7	-0.217	-0.188	-0.192	-0.092	-0.366*	-0.289	-0.308*	-0.275	-0.254
T8	-0.108	-0.107	-0.089	-0.148	0.034	0.025	0.119	0.034	0.063
T9	-0.243	-0.244	-0.222	-0.299*	-0.228	-0.278	0.237	-0.310*	0.089

表5 乌孙山北坡平均标准化年表与降水相关系数

	MW	RW	EW	LW	RD	ED	LD	MAD	MID
PL10	0.011	0.029	0.036	-0.040	0.056	0.080	0.150	0.124	0.046
PL11	-0.080	-0.016	-0.043	0.040	-0.308*	-0.245	-0.143	-0.333*	-0.200
PL12	-0.182	-0.174	-0.131	-0.277	0.041	-0.108	0.330*	-0.139	0.271
P1	0.324*	0.292	0.288	0.220	-0.207	-0.168	-0.168	0.025	-0.242
P2	-0.075	-0.021	-0.068	0.063	-0.119	-0.062	0.115	-0.131	0.000
P3	-0.065	-0.019	0.021	-0.027	0.113	0.066	0.093	0.047	0.129
P4	0.356*	0.354*	0.330*	0.303*	0.124	0.195	0.033	0.249	-0.102
P5	0.123	0.140	0.152	0.152	0.197	0.238	-0.014	0.230	-0.032
P6	-0.082	-0.031	-0.023	-0.079	0.341*	0.329*	0.104	0.268	0.165
P7	0.048	0.037	0.013	0.094	0.093	0.050	0.382**	-0.058	0.278
P8	0.047	0.017	0.039	-0.045	-0.030	-0.111	0.189	-0.110	0.131
P9	0.002	0.006	-0.016	0.045	0.146	0.165	0.039	0.139	0.077

注:MW代表实测宽度,*代表超过0.05置信度水平,**代表超过0.01置信度水平。

生长季前期,而4—5月的降水占全年20%以上,这一时段平均温度偏低,有利于积雪的累积,使生长季内有足够的积雪融化,以补给树木生长所需的水分,导致形成较宽的、密度较小、平均灰度较大的年轮,如果此时段最低气温偏高,不但4—5月的降水以径流的形式流失,而且冬季部分降雪融化,导致整个生长季缺水,雪岭云杉形成年轮偏窄、密度偏大、灰度偏小。因此4—5月时段的平均气温与全轮平均灰度年表和早材平均灰度年表呈负相关是具有树木生理学意义的。

(2)4月的降水和实测宽度、全轮宽度以及早材宽度相关较好,超过0.05显著性水平,这与崔宇等研究发现的雪岭云杉与4—5月降水相关较好一致^[9];而6月降水与全轮灰度和早材灰度相关较好。从树木生理学角度看,生长期内的降水量对树木的作用最大。许多资料证明,生长期内的降水量与树

木的径向生长常呈正相关,6月份处于乌孙山北坡树木早材径向生长的关键时期,降水量多,树木早材细胞分裂快,因此形成的年轮宽、密度小、灰度大。同时降水对年轮宽窄的影响也具有明显的滞后效应。若生长季前期降水条件好,大量降水以积雪的形式储存,使生长季开始时有足够的水分补给,有利于早材细胞分裂,所以易形成偏宽的年轮。

(3)宽度方面,早材宽度对气候的响应强于晚材宽度;灰度方面,全轮灰度和早材灰度对气候的响应较为强烈,最小灰度表现最差。利用树轮图像分析所得到的8个树轮参数年表可以增加气候重建代用指标,提高气候重建的精度。

4 结论

树木年轮对气候响应南疆强于北疆,北疆其它地方强于伊犁地区,而乌孙山北坡与伊犁其它地区比较,其对树轮宽度对气候的响应较敏感;恰依恰孜宽度年表对气候的响应最为强烈,而阿乌里亚乔克标准化灰度年表对气候的响应最为强烈。

年轮指数的变化趋势具有较好的一致性,1828—1931年,1911年,1917—1919年,1984年左右均出现高度一致的窄轮,而阿乌里亚乔克和克孜勒萨依年表在1767—1780年长达14a的窄轮高度吻合,在这些年份可能出现干旱、生长季前期低温或生长季内高温等气候灾害。

全轮灰度、早材灰度和最大灰度与4、5月气温相关较好,温度可能是乌孙山北坡树木年轮径向生长的限制性因子。4月降水和实测宽度、全轮宽度以及早材宽度相关较好;而6月降水与全轮灰度和早材灰度相关较好。

宽度方面,早材宽度对气候的响应强于晚材宽度;灰度方面,全轮灰度和早材灰度对气候的响应较好。利用树轮图像分析所得到的8个树轮参数年表可以增加气候重建代用指标,提高气候重建的精度。

参考文献:

[1] Sheppard P, Graumlich L, Conkey L. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate[J]. *Holocene*, 1996, 6: 62-68.

[2] 范敏杰,袁玉江,魏文寿,等.新疆伊犁地区夏季平均最高气温的重建和分析[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(1): 75-81.

[3] 袁玉江,叶玮,董光荣.天山西部伊犁地区314a降水的重建与分析[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 121-127.

[4] 袁玉江,李江风.天山西部树轮年表的响应函数[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(2): 170-177.

[5] 张瑞波,袁玉江,魏文寿,等.用树轮灰度重建乌孙山北坡

4—5月平均最低气温[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 848-854.

[6] 叶玮,袁玉江.新疆伊犁地区现代气候特征与300a来的干湿变化规律[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(2): 97-103.

[7] 李江风,袁玉江,马慧明,等.伊犁地区历史径流深度场的重建[J]. *自然资源学报*, 1994, 9(1): 67-76.

[8] 王承义,胡杨斌.新疆伊犁地区近250年冷暖变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 1996; 19(3): 37-44.

[9] 张瑞波,魏文寿,袁玉江,等.新疆霍城地区树轮年表的建立及气候意义[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(5): 716-722.

[10] 谢昆青,李志尧.树木年轮研究的扫描图像分析方法及其在环境演变中的应用[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(3): 259-269.

[11] Nicoletta Martinelli. Climate from dendrochronology: latest developments and results [J]. *Global and Planetary Change*. 2004, 40: 129-139.

[12] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of dendrochronology [M]. The Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990, 1-200.

[13] Holmes R L. Computer-assisted Quality Control in Tree-ring Dating and Measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-75.

[14] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization. Ph.D. Dissertation [D]. The University of Arizona, Tucson, 1985.

[15] 刘洪滨,吴祥定,邵雪梅.采用树轮图像分析方法研究历史时期气候变化的可行性[J]. *地理研究*. 1996, 15(2): 44-51.

[16] 崔宇,袁玉江,金海龙,等.乌鲁木齐河源467年春季降水的重建与分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(4): 496-500.

[17] 刘禹,吴祥定,邵雪梅,等.树轮密度、稳定C同位素对过去近100a陕西黄陵季节气温与降水的恢复[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(3): 271-277.

[18] 杨银科,刘禹,史山峰,等.树木年轮密度实验方法及其在内蒙古准格尔旗树轮研究中的应用[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 639-645.

[19] 潘娅婷,袁玉江,喻树龙,等.采用树轮图像分析法重建过去气候变化[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(2): 255-260.

[20] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with application in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23: 201-213.

[21] Hughes M K, Wu Xiangding, Shao Xuemei et al. A preliminary reconstruction of rainfall in North-central China since A.D. 1600 from tree-ring density and width. *Quaternary Research*, 1994, 42(1): 88-99.

[22] 勾晓华,邵雪梅,王亚军,等.祁连山东部地区树木年轮年表建立[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 364-367.

[23] 汪青春,周陆生,秦宁生,等.利用树木年轮重建托托河冬季气温序列[J]. *高原气象*, 2003, 22(5): 518-523.