天山南坡清水河 1639—2015 年径流量重建与变化特征

尚华明[1]，张瑞波[1]，魏文寿[1]，毛炜峄[1]，范煜婷[1]，陈 峰[1]，张 凯[2]

(1. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所 新疆树木年轮生态实验室 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054)

摘 要：[目的] 揭示树轮宽度对气候水文的响应特征，重建 1639—2015 年天山南坡清水河径流量变化历史，分析其长期变化特征，并给出水文特征值，为流域水资源规划管理提供科学依据。[方法] 采用 Pearson 相关法分析树轮宽度与气候水文要素的关系，基于树轮宽度与径流量之间的指数转换方程重建清水河径流量长期变化。[结果] 建立了清水河流域山区雪岭云杉树轮宽度年表(1436—2005 年)，树轮宽度与巴仑台气象站上年 7 月到当年 5 月的降水量相关系数为 0.579，与克尔古提水文站上年 8 月至当年 7 月径流量相关系数为 0.641。基于树轮宽度标准年表与径流量之间的指数转换方程，重建了清水河 1639—2015 年径流量序列。[结论] 树轮宽度对极端丰水年的捕捉能力有限。重建径流量序列的低频变化记录了 4 个持续枯水期和 4 个丰水期。从近 400 a 的径流量记录来看，近百年来(特别是 1950 年代以来)极端干旱出现的频率明显较高。

关键词：天山南坡；清水河；树木年轮；雪岭云杉；径流量

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)04-0027-07 **中图分类号**：P337

文献参数：尚华明，张瑞波，魏文寿，等. 天山南坡清水河 1639—2015 年径流量重建与变化特征[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：27-33. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.005. Shang Huaming, Zhang Ruibo, Wei Wenshou, et al. Streamflow reconstruction and its variation of Qingshui River from southern slope of Tianshan mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 27-33.

Streamflow Reconstruction and Its variation of Qingshui River from Southern Slope of Tianshan Mountains

SHANG Huaming[1], ZHANG Ruibo[1], WEI Wenshou[1],
MAO Weiyi[1], FAN Yuting[1], CHEN Feng[1], ZHANG Kai[2]

(1. *Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Xinjiang Laboratory of Tree Ring Ecology; Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi, Xinjiang* 830002, *China*; 2. *College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang* 830054, *China*)

Abstract: [Objective] To reveal the response of tree-ring width to hydroclimate factors, reconstruct long-term streamflow change by tree-ring width data in order to analyze its long-term change characteristics and finally provide scientific basis for water resource planning and management in Qingshui Basin at the southern slope of Tianshan mountains. [Methods] Pearson correlation analysis was used to reveal the correlation relationship between tree-ring width index and hydroclimate factors. The exponential transfer function was set up to reconstruct the runoff history of Qingshui River. [Results] In the common period, the positive correlation coefficients between tree-ring width index and precipitation from previous July to May of Baluntai meteorological station, and streamflow from previous August to July of Keerguti hydrological station were 0.579 and 0.641, respectively. Based on the exponential transfer function between tree-ring width index and streamflow, the annual streamflow from August in previous year to July of Keerguti station during 1639—2015

收稿日期：2017-11-30 **修回日期**：2018-04-09

资助项目：新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题“基于树木年轮的叶尔羌河流域径流量重建及其在水资源管理中的应用”(2014D04018)

第一作者：尚华明(1979—)，男(汉族)，湖北省广水市人，硕士，副研究员，主要从事树轮年代学与气候变化研究。E-mail：shang8632@163.com。

was reconstructed. [Conclusion] Tree-ring width showed its insufficiency to capture the extreme flood year. The low frequency characteristics revealed that there existed four drought periods and four flood periods in the past four hundred years. In the recent one hundred years, especially since 1950s, the frequency of extreme drought year was higher. The extreme drought years in this study showed good consistency with the drought events in the precipitation and hydrology series recorded by tree ring in the Tianshan Mountains area.

Keywords: south slope of Tianshan Mountains; Qingshuihe River; tree-ring; *Picea schrenkiana*; streamflow

横贯中亚区域的天山山脉,是干旱区的湿岛,山区相对丰富的降水和冰雪融水形成了河川径流,为下游绿洲和荒漠区提供工农业、生活和生态用水,是干旱内陆区的"生命线"[1-2]。近年来,在全球和区域气候变化背景下,极端气候和水文事件发生的频率增加[3],而流域中下游的水资源供需矛盾日益突出。由于新疆地区河流水文观测资料较短,严重限制了对该区域水文变化规律和机制的认识,急需寻找替代资料,延长水文记录,为流域水资源合理利用和科学评估提供基础支撑。树木年轮水文学为水文资料的恢复提供了科学可信的途径。特别是在干旱半干旱区,树木的径向生长与径流量变化受到共同环境因素的影响,树轮宽度成为径流量的重要代用指标[4-5]。大量的工作基于树轮宽度重建了长时间、高分辨率的径流量资料,并为流域水资源管理决策提供了重要支撑。美国西部干旱区是开展树轮水文研究最早,成果最为丰富的区域,其中以 Colorado 河流域的研究工作最为集中,基于树轮资料延长的径流量序列为流域水资源管理决策提供了重要的支撑[6-11]。除了美国西部干旱区以外,近年在南美洲、非洲、欧洲、大洋洲以及中国西北地区均有大量的研究利用树轮宽度恢复水文变化历史[12-17],展现了全球范围内树木年轮在延长水文记录方面的巨大潜力。在地处中亚干旱内陆区的天山山区,基于树轮宽度开展了 Kurshab 河[18]、伊犁河[19]、伊塞克湖[20]、精河[21]、玛纳斯河[22]、乌鲁木齐河[23]、奎屯河[4]、故乡河[25]、阿克苏河[26]等河流的树轮水文研究。其中,天山南麓的树轮水文研究相对来说较为薄弱,20 世纪 80 年代利用的胡杨开展了塔里木河年径流量序列的重建研究[5]。在清水河相邻的开都河和黄水沟流域,树轮学者利用雪岭云杉的树轮宽度开展了降水和温度等气象要素的响应与重建研究[27-28],但并未开展树轮水文学相关的研究工作。关于清水河水文特征及其对气候的响应研究,均是基于器测时期的水文资料[29-31]。位于天山南坡中部的清水河,以降水和季节性融雪补给为主[30],气候干旱,流域山区生长的长龄雪岭云杉,为开展树轮水文学研究提供了载体。本文利用该流域山区的雪岭云杉树轮宽度资料,分析其径向生长对水文气候要素的响应特征,评估其用于水文重建的潜力。在此基础上,建立树轮宽度指数与径流量之间的转换方程,重建 1639—2015 年清水河径流量变化历史,分析其长期变化特征,并给出其水文特征值,为流域水资源规划管理提供科学基础。

1 研究资料

1.1 研究区概况

地处新疆境内天山南坡中段的清水河流域,南邻塔里木盆地,位于新疆和静县东端,东邻曲惠沟流域,西面与黄水沟流域毗邻,地理位置介于 86°35′—87°10′E和 42°10′—42°50′N。流域内最高海拔 4 505 m,平均海拔为 3 110 m,降水集中于海拔 2 500～3 800 m的中山带。河流发源于南天山支脉阿拉沟山,从河源至出山口长 60.2 km,河道平均坡度 3.7%。流域内发育有 22 条冰川,总冰川面积 5.64 km^2。冰川储量1.42×10^7 m^3,冰川融水量 1.60×10^7 m^3,占河川径流量的 13%[30]。

1.2 树木年轮资料

采样点位于清水河流域内山区海拔 2 650～2 810 m的阴坡(表 1),共采集了 29 株树木的 56 个树芯样本。采样点土层较薄,平均坡度 40°。待树芯样本自然晾干,进行固定、打磨处理,初步查年后用 Lintab 宽度分析仪测量树轮宽度,结合 Cofecha[32]和 TSAP 程序完成交叉定年及质量控制。删除 3 个生长异常的树芯标本后,采用 WinArstan 年表研制程序建立树轮宽度年表,去趋势方法选择负指数函数。以 30 和 25 a 分别作为窗口期和滑动重叠期,计算样本对总体的解释信号(EPS)和样芯间相关系数(Rbar)。树轮宽度序列的时间跨度为 1436—2015 年,可信年表开始于 1639 年(EPS 大于 0.85),当年包括 5 株树的 9 个样芯。树轮序列的缺轮率为 0.794%,标准年表的敏感度为 0.221,一阶自相关系数为 0.485。公共区间(1700—2015 年)分析得到 EPS 和 Rbar 平均值分别为 0.927,0.386。以上年表参数指示树轮宽度具有较高的敏感度和一致性。

表 1　采样点、水文站和气象站信息

序号	站 点	代号	资料时段	经度	纬度	海拔高度/m	坡向	坡度	样本量(株/芯)
1	清水河 B	QSB	1436—2015 年	86°40′E	42°33′N	2 714	N	40°	29/56
2	克尔古提水文站	KEG	1957—2013 年	86°54′E	42°22′N	1 515			
3	巴仑台气象站	BLT	1956—2014 年	86°18′E	42°44′N	1 739			

1.3　气象和水文资料

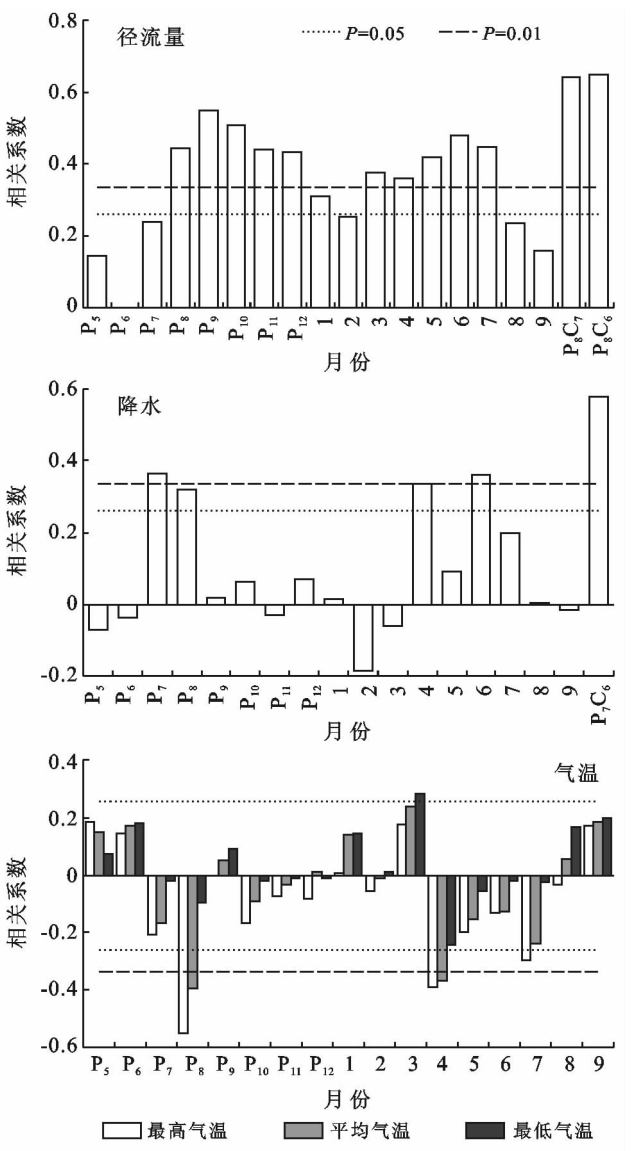
气象资料为巴仑台气象站月降水量、月平均最高气温、月平均气温和月平均最低气温,来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn/),时段 1957 年 11 月至 2013 年 12 月。该站自建站以来未曾迁站,与克尔古提水文站直线距离约 50 km。水文资料采用克尔古提水文站月径流量资料,该站位于清水河出山口处,未受到引水灌溉等人为影响,可以代表径流的自然变化特征。资料时段为 1956 年 5 月至 2013 年 11 月,由于部分年份枯水期径流量缺测,采用文献[33]中的相关法,进行插补。水文站以上流域集水面积为 1 016 km^2。

研究区地处欧亚大陆腹地,大陆性气候特征明显。巴仑台气象站年平均气温 6.6 ℃,7 月气温最高,1 月最低。年平均降水量 208.4 mm,呈明显的单峰分布型,峰值也出现在 7 月(57.5 mm),5—9 月降水量占全年的 93.2%。克尔古提水文站多年平均径流量 1.239×10^8 m^3,年平均流量 3.93 m^3/s,峰值出现在 2002 年(9.42 m^3/s),最低值出现在 1985 年(1.72 m^3/s),变差系数 C_v 值为 0.337,高于天山南坡主要河流。径流量的年内分布极不均匀,每年 6—9 月为洪水期,12 月至次年 5 月为枯水期,最小流量多出现在 4,5 月,径流年内不均匀系数为 0.317,6—10 月径流量占全年的 72.9%。月径流量与月降水量峰值出现的时间一致。

2　结果和讨论

2.1　树轮宽度的气候水文响应

为评估树轮宽度所含的气候水文信息及其用于气候水文要素重建的潜力,计算公共期内标准年表与月气象、水文要素的单相关系数,气象水文要素的时段为上年 5 月至当年 9 月。并根据单月相关分析的结果,将不同月份气候水文要素进行组合后计算其与宽度年表的相关系数。相关分析结果表明(图 1),年表与上年 7—8 月以及当年 4—7 月降水量为正相关,其中上年 7 月、8 月和当年 4 月、6 月的正相关达到了 0.05 的显著性水平;多月降水量组合中,上年 7 月至当年 6 月的降水量与宽度年表的正相关最高,为 0.579。宽度年表与上年 8 月和当年 4—7 月的平均气温均为负相关,其中上年 8 月和当年 4 月最高气温的负相关达到了 0.01 的显著性水平。树轮宽度指数与上年生长季晚期和当年生长季早期降水量的显著正相关以及气温的显著负相关表明,研究区树木径向生长的限制因子为水分状况。这与天山南坡相邻的开都河流域[28]和阿克苏河流域[34]雪岭云杉树轮宽度气候响应分析的结果基本是一致的,表明在天山南坡,由于极端干旱的气候背景,雪岭云杉的径向生长对水分状况敏感。



注:P_{5-12} 为上年 5—12 月,1—9 为当年 1—9 月,点线和虚线分别代表 0.05,0.01 的显著性水平线。

图 1　树轮宽度标准年表与月水文、气象要素的相关系数

从径流量单月相关分析结果来看，上年 7 月至当年 9 月各月的径流量均与宽度年表正相关，其中上年 8—12 月和当年 3—7 月各月的正相关均达到了 0.01 的显著性水平。多月径流量组合后与宽度年表的相关分析发现上年 8 月至当年 6 月径流量与宽度年表的相关系数最高($n=57$，$r=0.649$，$p<0.001$)，上年 8 月至当年 7 月径流量的相关系数次之，为 0.641。清水河是以降雨和季节性积雪融水补给为主的河流[30]，克尔古提水文站位于海拔 1 515 m 的出山口，无水利工程和灌溉等人为因素的影响，水文站的径流量记录能够反映整个流域山区降水和蒸发共同作用下流域水资源的变化特征。巴仑台气象站位于相邻的黄水沟流域，其对清水河流域山区降水的代表性有限，同时气象站的降水记录不能反映山区蒸发作用导致的水分状况变化。因此宽度年表与径流量的正相关系数明显高于其与降水量的相关系数，也表明清水河是开展树轮水文学研究的理想区域。

图 2 为树轮宽度年表与降水量(上年 7 月至当年 6 月)、径流量(上年 8 月到当年 7 月)之间的散点图，并分别采用线性和指数函数对二者关系进行拟合。两种拟合结果对比发现指数函数比线性函数的效果更好，拟合方程的方差解释量从 0.411 提高到 0.468，表明树木的径向生长对径流量的响应并非是简单的线性关系。在径流量高的年份，山区降水量较为丰富，强降水过程发生的概率大。由于坡度大和土层薄等原因，山区土壤蓄水能力有限，强降水过程或融雪性洪水引起径流量明显增加，但并不能对树木的生长形成相应的正贡献[35]。此外，环境要素对树木径向生长的影响还存在一定的滞后效应，造成树木年轮宽度记录极端丰水年份的能力有限。

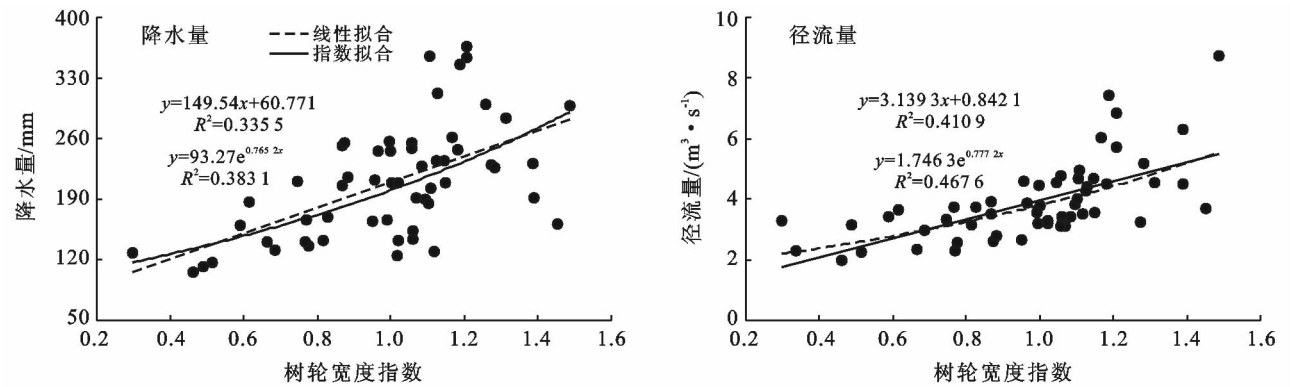


图 2 树轮宽度标准年表与降水量和径流量的散点拟合情况

2.2 径流量重建与检验

结合上文宽度年表对气候水文要素相关分析的结果，以一个完整水文年(上年 8 月到当年 7 月)径流量为重建目标，建立校准期内(1957—2013 年)树轮宽度标准年表(自变量 X)与清水河径流量(应变量 Y)之间的回归方程：

$$Y=1.746e^{0.777\,2X} \quad (R^2=0.468,\ F=48.31,\ p<0.001) \qquad (1)$$

从图 3 可以看出校准期内径流量的重建值和实测值变化趋势一致，但实测序列的变幅(特别是峰值)明显大于重建序列。校准期内实测和重建径流量一阶差序列的相关系数为 0.627($n=56$，$p<0.001$)，表明二者在高频变化上的一致性。实测期内两个序列的统计参数比较结果(表 2)表明，二者均值接近，但实测值的标准差、极差和变率系数明显高于重建值。二者相差最大的 3 个年份为 1999，2000，2002 年，这 3 a也正是实测期内径流量排名前三的年份，重建值分别偏少 2.38，3.04，3.20 m^3/s。校准期内实测值和重建值的对比也表明了转换方程对丰水年份的捕捉能力是不足的。

表 2 径流量实测值和重建值统计参数比较 m^3/s

时 段	平均值	极大值	极小值	变差系数 C_v	偏态系数 C_s	不同保证率径流量			
						$p=20\%$	$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$
实测值(1957—2013 年)	3.92	8.74	1.98	0.34	1.52	3.13	3.57	4.52	6.41
重建值(1957—2013 年)	3.81	5.54	2.20	0.20	−0.04	3.18	3.86	4.20	5.14
重建值(1639—2015 年)	3.75	5.67	1.83	0.18	0.29	3.20	3.73	4.15	4.89
重建枯水期(1666—1791 年)	3.54	5.00	2.32	0.13	0.30	3.20	3.49	3.83	4.30
重建丰水期(1792—1858 年)	4.03	5.48	2.92	0.16	0.22	3.50	3.95	4.54	5.09

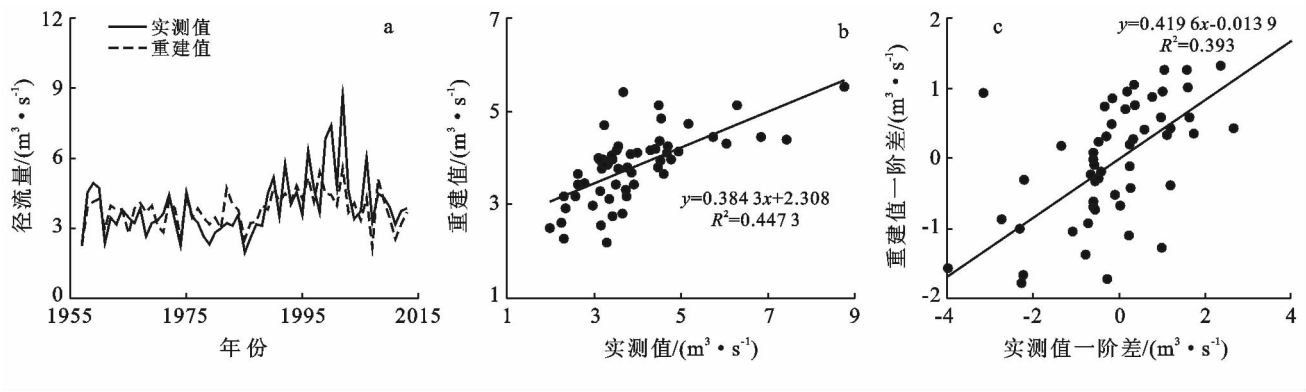


图 3　校准期内清水河径流量实测和重建值的对比图(a)、散点图(b)及其一阶差系列的散点图(c)

2.3　重建径流量序列的统计特征

基于树木年轮宽度资料重建了 1639—2015 年清水河上年 8 月至当年 7 月径流量的变化(图 4),延长了克尔古提水文站的器测水文记录,为掌握该河流长时间尺度的径流量变化事实和规律,认识驱动机制,并进一步为流域水资源规划和管理提供参考。重建径流量序列的均值为 3.75 m^3/s,略低于实测期(3.92 m^3/s)。将重建的径流量序列进行 31 a 快速傅里叶变换(FFT)计算,得到其低频的变化趋势,发现了 4 个枯水期(1639—1646 年,1666—1791 年,1857—1888 年,1948—1984 年)和 4 个丰水期(1647—1665 年,1792—1858 年,1889—1947 年,1985—2015 年)。将重建径流量序列中径流量最少的 5 个年份确定为极端枯水年,分别为 1643,1918,1951,1957 和 2007 年,其中的 4 a 出现在近百年时间内,3 a 出现在观测期内。表明在过去近 400 a 间,近百年来的极端干旱年份出现的频率明显较高。重建水文序列中 1950 年以前的 2 个极端枯水年(1643,1918 年)与研究区相邻的巴仑台降水重建序列记录中的干旱年是对应的[28],位于天山北坡的精河、乌鲁木齐河径流量记录中也存在 1643 和 1918 年 2 个极端枯水年份[21,24]。表明本文重建水文序列中的极端枯水年与天山山区大范围出现的干旱年份是一致的。

基于实测和重建的径流量资料,计算了校准期内(1957—2013 年)实测和重建水文数据、整个重建时期(1665—2013 年)以及重建序列中持续时间最长的枯水期(1666—1791 年)和丰水期(1792—1858 年)重建值的水文统计特征值,包括均值、极值、变差系数 C_v、偏态系数 C_s 以及不同保证率的径流量(表 2)。从结果来看:整个重建时期重建径流量的均值与校准期实测径流量的均值接近,极小值、极大值、变差系数和变化幅度均低于校准期实测径流量;重建水文序列中最长丰水期(1792—1858 年)的径流量均值高于观测时期的均值;整个重建期内重建径流量的均值与校准期实测径流量不同保证率径流量差异较为明显,特别是 p=75%和 p=95%对应的流量低于校准期实测径流量。

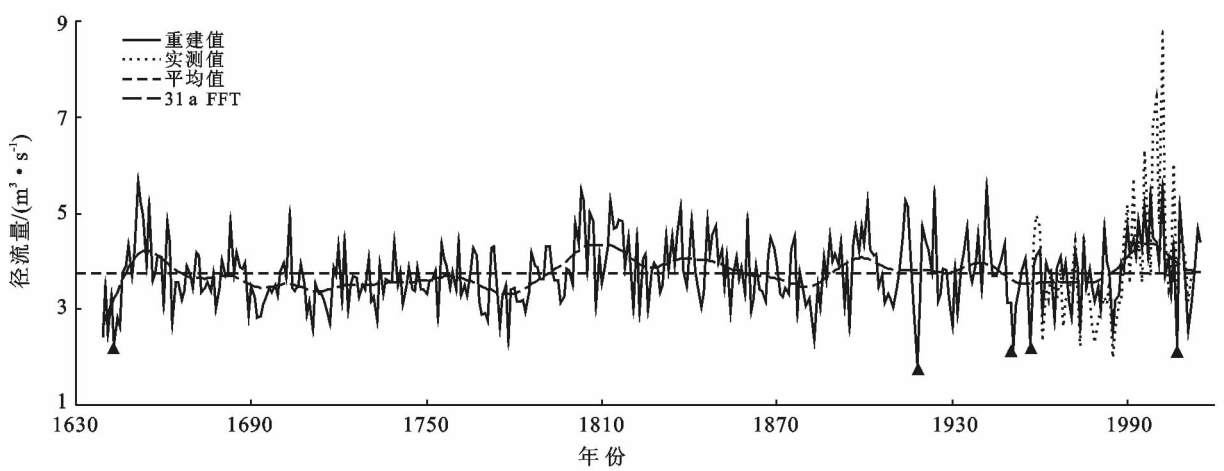


图 4　清水河重建年径流量序列及其低频变化特征

2.4　重建径流量的误差分析

清水河流域出山口以上汇水面积为 1 016 km^2,但本文仅采用了 1 个点的树木年轮宽度资料,虽然包括了较多的复本量(29 棵树的 56 个样芯),其海拔高度和空间代表性还存在不足。进一步的研究应根据流域水文特征和森林分布状况,结合流域内不同海拔

高度和位置树木径向生长对气象和水文要素响应的特征，尽量在流域不同支流和海拔高度选择符合气候水文限制因子的采样点[5]进行采样。树轮宽度年表的一阶自相关系数为 0.485，表明树木的生长对气候水文的响应存在一定的滞后效应。同时，由于采样点土层薄以及坡度大等原因，夏季的短时强降水过程以及快速升温引起的融雪性洪水会导致径流量增加，但这些水分不能在土壤中长期储存并为树木光合作用利用，导致树木的径向生长对径流量的增加并不呈现简单的线性响应关系。以上原因导致了用树轮宽度重建水文要素能较好地保留低频信息，而高频信息（尤其是丰水年）记录不足。

3 结 论

（1）清水河雪岭云杉树轮年表的长达 579 a，标准年表的敏感度为 0.221，树轮宽度具有较高的敏感度和一致性。由于研究区极端干旱的气候背景，树轮宽度指数与上年生长季晚期和当年生长季早期的降水显著正相关，与气温显著负相关，树木径向生长的限制因子为水分状况。

（2）树轮宽度年表清水河与上年 8 月至当年 6 月径流量的相关系数最高（$n=57$，$r=0.649$，$p<0.001$），与上年 8 月至当年 7 月径流量的相关系数次之，为 0.641。与巴仑台气象站上年 7 月至当年 6 月的降水量与宽度年表的正相关为 0.579。清水河是以降雨和季节性积雪补给为主的河流，雪岭云杉宽度年表与径流量的正相关系数明显高于其与降水量的相关系数，是开展树轮水文学研究的理想区域。

（3）基于树轮宽度资料，采用指数函数重建了 1639—2015 年清水河上年 8 月至当年 7 月径流量的变化，重建径流量序列中存在 4 个枯水期（1639—1646 年，1666—1791 年，1857—1888 年，1948—1984 年）和 4 个丰水期（1647—1665 年，1792—1858 年，1889—1947 年，1985—2015 年）。重建径流量序列中径流量最少的 5 个年份中，其中 4 次出现在近 100 a 时间内，其中 3 次出现在观测期内，表明近百年来（特别是 1950 年代以来）的极端干旱出现的频率明显较高。重建水文序列中的极端枯水年与天山南北坡的树轮降水记录和水文记录中的极端干旱年是对应的。

（4）由于采样点的海拔和空间代表性的不足，树木生长对环境响应的滞后效应以及树木径向生长对径流量增加的非稳定线性响应关系，导致基于树轮宽度重建径流量过程中存在一定的不足，特别是树木年轮宽度对极端丰水年份捕捉的能力有限。

[参 考 文 献]

[1] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京：中国环境科学出版社，2004.

[2] 陈亚宁，李稚，方功焕，等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报，2017，72(1)：18-26.

[3] 毛炜峄，樊静，沈永平，等. 近 50 年来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土，2012，34(5)：1037-1046.

[4] Stockton C W, Fritts H C. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabaska by analysis of tree rings[J]. Water Resources Bulletin, 1973, 9(5): 1006-1027.

[5] 李江风，袁玉江，由希尧. 树轮水文学的研究及其应用[M]. 北京：科学出版社，2000.

[6] Woodhouse C A, Lukas J J. Drought, tree rings and water resource management in Colorado [J]. Canadian Water Resources Journal, 2006, 31(4): 297-310.

[7] Woodhouse C A, Lukas J J. Multi-century tree-ring reconstructions of Colorado streamflow for water resource planning[J]. Climatic Change, 2006, 78(2): 293-315.

[8] Woodhouse C A, Gray S T, Meko D M. Updated streamflow reconstructions for the Upper Colorado River basin[J]. Water Resources Research, 2006, 42(42): 648-648.

[9] Rice J L, Woodhouse C A, Lukas J J. Science and decision making: water management and tree-ring data in the western United States [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(5): 1248-1259.

[10] Woodhouse C A, Lukas J J. Drought, tree rings and water resource management in Colorado[J]. Canadian Water Resources Journal, 2006, 31(4): 297-310.

[11] Meko D M, Woodhouse C A. Tree ring footprint of joint hydrologic drought in Sacramento and upper Colorado River basins, Western USA [J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1/4): 196-213.

[12] Derose R J, Bekker M F, Wang S Y, et al. A millennium-length reconstruction of Bear River stream flow, Utah[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 524-534.

[13] Ferrero M E, Villalba R, Membiela M D, et al. Tree-ring based reconstruction of Río Bermejo streamflow in subtropical South America[J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 572-584.

[14] Agafonov L I, Meko D M, Panyushkina I P. Reconstruction of Ob River, Russia, discharge from ring widths of floodplain trees[J]. Journal of Hydrology, 2016, 543, 198-207.

[15] Brookhouse M, Lindesay J, Brack C. The Potential of Tree Rings in Eucalyptus pauciflora, for Climatological and Hydrological Reconstruction[J]. Geographical Research, 2008, 46(4): 421-434.

[16] Yang Bao, Qin Chun, Shi Feng, et al. Tree ring-based annual streamflow reconstruction for the Heihe River in arid northwestern China from AD575 and its implications for water resource management[J]. Holocene, 2012,22(7):773-784.

[17] 勾晓华,邓洋,陈发虎,等.黄河上游过去 1234 年流量的树轮重建与变化特征分析[J].科学通报,2010,55(33):3236-3243.

[18] Chen Feng, Yuan Yujiang, Yu Shulong. Tree-ring indicators of rainfall and streamflow for the Ili-Balkhash Basin, Central Asia since CE1560[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 482: 48-56.

[19] Chen Feng, He Qing, Bakytbek E, et al. Reconstruction of a long streamflow record using tree rings in the upper Kurshab River (Pamir-Alai Mountains) and its application to water resources management[J]. International Journal of Water Resources Development, 2016, 33(6):DOI:10.1080/07900627.2016.1238347.

[20] 尹仔锋,尚华明,魏文寿,等.基于树轮宽度的伊塞克湖入湖径流量重建与分析[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(4):8-14.

[21] 尚华明,尹仔锋,陈志军,等.天山北坡精河 1615—2007 年径流量变化的树轮记录[J].水科学进展,2014,25(6):779-788.

[22] 喻树龙,袁玉江,龚原,等.奎屯河近 379 年 9 月径流量的重建与特征分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(7):115-119.

[23] Yuan Yujiang, Shao Xuemei, Wei Wenshou, et al. The potential to reconstruct Manasi River streamflow in the Northern Tienshan Mountains, NW China [J]. Tree-ring Research, 2007,63(2):81-93.

[24] 袁玉江,魏文寿,陈峰,等.天山北坡乌鲁木齐河年径流总量的树轮重建[J].第四纪研究,2013,33(3):501-510.

[25] Chen Feng, Yuan Yujiang. Streamflow reconstruction for the Guxiang River, eastern Tien Shan (China): Linkages to the surrounding rivers of Central Asia[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(14):1089.

[26] Zhang Ruibo, Yuan Yujiang, Gou Xiaohua, et al. Streamflow variability for the Aksu River on the southern slopes of the Tienshan inferred from tree ring records[J]. Quaternary Research, 2016,85(3):371-379.

[27] Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Liu Yu, et al. A tree-ring based precipitation reconstruction for the Baluntai region on the southern slope of the central Tien Shan Mountains, China, since AD 1464[J]. Quaternary International, 2013,283(427):55-62.

[28] 张同文,袁玉江,魏文寿,等.开都河中游地区雪岭云杉林上下限树轮宽度对比及其气候响应分析[J].干旱区地理,2013,36(4):680-690.

[29] 周京武,高鹰,沈永平,等.天山南坡黄水沟与清水河寒区流域极端水文事件对气候变化的响应[J].冰川冻土,2014,36(4):1042-1048.

[30] 周京武,阿不力米提·阿不力克木,毛炜峄等.天山南坡清水河流域径流过程对气候变化的响应[J].冰川冻土,2014,36(3):685-690.

[31] 秦莉,达伟,王淑范.清水河水文特性分析[J].沙漠与绿洲气象,2007,1(5):48-50.

[32] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. Tree-ring bulletin, 1983,43(1):69-78.

[33] 朱建春.清水河径流量插补方法探讨[J].河南水利与南水北调,2012(21):44-45.

[34] 张瑞波,魏文寿,袁玉江,等.1396—2005 年天山南坡阿克苏河流域降水序列重建与分析[J].冰川冻土,2009,31(1):31-37.

[35] 尚华明,魏文寿,袁玉江,等.利用树轮宽度重建准噶尔盆地西南缘降水日数[J].高原气象,2015,34(2):494-502.

(上接第 26 页)

[14] 胡春宏,王延贵,张燕菁.河流泥沙模拟技术进展与展望[J].水文,2006,26(3):37-41.

[15] 窦国仁.黄河小浪底工程泥沙问题的研究[J].水利水运科学研究,1995(3):197-209.

[16] 胡春宏,方春明.三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究[J].中国科学:技术科学,2017,47(8):832-844.

[17] 李强,王义民,白涛.黄河水沙调控研究综述[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(12):227-234.

[18] 赵中华.基于 AnnAGNPS 模型的桃江流域农业非点源污染研究[D].江西 南昌:南昌大学,2012.

[19] 赵淑云,苗帅升,刘友存,等.赣江上游典型流域输沙过程及对降水与径流变化的响应:以贡水流域为例[J].江西理工大学学报,2018,39(1):37-43.

[20] Searcy J K, Hardison C H. Double-mass Curves[M]. U S: Bytes, 1960.

[21] 刘友存,刘志方,郝永红,等.基于交叉小波的天山乌鲁木齐河出山径流多尺度特征研究[J].冰川冻土,2013,35(6):1564-1572.