

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.010

基于雪岭云杉树轮的阿克苏河干流冬季径流重建

李紫群¹, 孙慧兰¹, 周洪华², 周玲¹

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:基于阿克苏河上游高山区采集的雪岭云杉树轮样芯构建了雪岭云杉树轮宽度年表,结合阿克苏河干流径流数据解析了雪岭云杉长期生长与阿克苏河干流径流关系,并重建了阿克苏河干流1813—2015年冬季径流序列。结果表明:利用雪岭云杉树轮宽度年表重建的阿克苏河干流1813—2015年冬季径流序列模拟值与实测值吻合度较高,重建径流序列稳定可靠;1813—2015年阿克苏河干流冬季多年平均流量为 $82.19 \text{ m}^3/\text{s}$,共出现5次持续丰水期和3次持续枯水期,最长的枯水段持续17年(1943—1959年);阿克苏河干流冬季径流变化存在51 a、29 a、16 a周期,第一主周期为51 a。

关键词:阿克苏河;树轮宽度年表;雪岭云杉;径流重建;周期变化

中图分类号:TV121⁺.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)05-0065-06

Reconstruction of Aksu River main stream winter runoff based on tree ring chronology of *Picea schrenkiana* // LI Ziqun¹, SUN Huilan¹, ZHOU Honghua², ZHOU Ling¹ (1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Tree ring width chronology of *Picea schrenkiana* is constructed based on the cores collected from alpine forest in Aksu River upper reaches. Combined with the data of Aksu River main stream runoff, the relationship between the long-term growth of *Picea schrenkiana* and Aksu River main stream runoff is analyzed and the winter runoff of Aksu River in 1813-2015 is reconstructed. The results show that: the simulated data of reconstructed Aksu River main stream winter runoff in 1813-2015 using tree ring chronology of *Picea schrenkiana* is rather consistent with the predicted data. The reconstructed sequence is stable and reliable; During 1813-2015, the average winter runoff of the Aksu River main stream was $82.19 \text{ m}^3/\text{s}$. There were five high flow periods and three low flow periods, in which the longest low flow period lasted 17 a(1943-1959); Aksu River main stream winter runoff has a periodic variation of 51 a, 29 a and 16 a. The 51 a is the first main cycle of the runoff.

Key words: Aksu River; tree ring width chronology; *Picea schrenkiana*; runoff reconstruction; periodic variation

树轮水文学(dendrohydrology)是一门根据树木年轮生长指标重建过去长期水文现象的科学,它注重理解树木生长过程中对水文变量(降水、径流、地下水等)的响应^[1]。近年来,随着日益严峻的气候变化带来的水资源不确定性问题,利用树轮资料重建历史水文信息、评估未来水资源安全得到越来越多人的重视。最早利用树轮宽度重建径流的是美国Woodhouse等^[2],他们在1936年利用树轮宽度对美国内华达州Truckee河流进行了水文重建,延长了当地的水文记录;Bonin等^[3]还将重建的径流资料

用于流域的干旱评价;Lara等^[4]则探讨了热带雨林树轮资料重建历史径流的潜力。我国学者利用树轮宽度对新疆伊犁河^[5]、额尔齐斯河^[6]、乌鲁木齐河^[7]、玛纳斯河^[8]等河流的不同时段、不同季节径流进行了重建,并对地下水水位变化历史、径流量与湖泊水位关系进行了探讨^[9]。

阿克苏河由托什干河和库玛拉克河组成,是中亚地区典型的国际河流,同时也是维系阿克苏流域社会经济发展的重要母亲河,它还承担着常年给塔里木河供水、确保塔里木河流域生态安全的重要任

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2017D01A79)

作者简介:李紫群(1995—),女,助理工程师,主要从事水资源过程研究。E-mail: 2977900286@qq.com

通信作者:周洪华,副研究员。E-mail: zhouhh@ms.xjb.ac.cn

务。然而,阿克苏河径流连续的监测资料历史较短,仅能追溯到1958年。长期历史数据的缺失对于阿克苏河水资源评价和流域水资源评估与管理造成了很大的困难。为此,本文在解析阿克苏河源流区雪岭云杉的长期生长过程与阿克苏河干流径流关系的基础上,利用树轮宽度年表重建了阿克苏河干流1813—2015年冬季径流序列,并对重建的阿克苏河干流冬季径流进行了周期性变化分析,以期为阿克苏河流域水资源安全评估与未来变化预估提供数据基础。

1 研究区概况

阿克苏河流域位于天山中段南麓西部地区、塔里木盆地西北边缘($40^{\circ}17'N \sim 42^{\circ}27'N$ 、 $75^{\circ}35'E \sim 80^{\circ}59'E$),北起天山山脉,中部为低山,再往南为山前倾斜平原、冲积平原直至沙漠,流域面积约5.0万 km^2 ^[10-11]。阿克苏河流域北部处于天山山脉,南部为广阔的平原,流域总体地势从北向南、从西向东逐渐降低,地貌分带较为明显^[11-12]。托什干河与库玛拉克河两大支流在喀拉都维汇合后称阿克苏河,全长530 km,其尾端在肖夹克与叶尔羌河和田河汇合后汇入塔里木河^[13]。

阿克苏河流域属暖温带大陆性荒漠气候,夏季炎热,冬季寒冷,昼夜温差大,降水稀少且主要集中在东部和山区,蒸发强烈,河流的补给主要为高山融冰、融雪和中山区降水等。多年平均气温 10.6°C ,多年平均降水量63 mm,降水主要集中在5—9月,多年平均蒸发量1632 mm^[13-14]。植被主要以耐旱、耐碱的荒漠类植物为主,种类较单一。主要天然植物为雪岭云杉、红柳、芦苇、芨芨草、骆驼刺、胡杨和梭梭等^[12]。

2 研究方法

2.1 雪岭云杉样品采集

雪岭云杉是阿克苏河流域中山带森林的典型建群种。为确保树轮样本中保存的水文气候信息不被外界干扰,在采样时充分考虑了影响树木生长的各种限制因子,基于限制因子定律,将采样区确定在受人类活动干扰少、森林郁闭度较小以及对气候变化反应敏感的阿克苏河源流区海拔1500~2800 m的中高山雪岭云杉林。采样于2018年4月在塔格拉克($41^{\circ}41'N \sim 41^{\circ}43'N$ 、 $80^{\circ}21'E \sim 80^{\circ}23'E$)和博孜墩($41^{\circ}48'N \sim 41^{\circ}49'N$ 、 $80^{\circ}37'E \sim 80^{\circ}38'E$)两处进行,共布设8个采样点,采样时选择在离树干基部1~1.5 m处钻取树芯,每棵树一般钻取2个树芯,避开树结、分叉及虫蛀点。共采集了59棵树、合计118个树芯样本。

2.2 雪岭云杉树轮宽度年表构建

将钻取的树芯带回实验室进行干燥、固定、打磨处理,直至树芯表面光滑、树轮清晰。采用骨架法对树芯进行交叉定年,并用树木年轮测定仪(Lintab TM6,德国)测定轮宽。为确保定年准确,用Cofecha交叉定年质量控制程序对定年结果进行验证。用Arstan软件完成年表构建,为保留更多的环境信息,采用负指数函数消除树木的生长趋势,对负指数函数处理后还不太理想的树芯再次采用Hugershoff生长曲线进行二次去生长趋势分析。

2.3 径流数据及处理

阿克苏河径流资料从阿克苏水文局和阿克苏河流域水资源管理局获取,包括托什干河和库玛拉克河以及汇流后的阿克苏河干流1958—2015年的月径流量,其中阿克苏河干流径流数据取自西大桥水文站。基于月径流,分别计算了干流1958—2015年历年年均(1—12月)径流和历年春季(2—4月)、夏季(5—7月)、秋季(8—10月)、冬季(11月至次年1月)径流。采用Pearson相关分析和回归分析解析树轮宽度年表与径流关系,周期分析采用Matlab软件。

3 结果与分析

3.1 雪岭云杉树轮宽度年表特征分析

平均敏感度是判断树轮宽度年表质量的指标之一,反映气候信息的敏感程度,其值越大,表明树木生长受气候影响越大,一般年表的平均敏感度介于0.15~0.80之间^[15-16];阿克苏河源流区雪岭云杉树轮宽度年表的平均敏感度为0.167,表明年表具有一定的气候信息。根据树木年轮学定理,树轮宽度年表标准差与气候信息量的多少成正比^[17],阿克苏河源流区雪岭云杉树轮宽度年表标准差为0.275,信噪比为20.42。年表的自相关系数可反映气候条件对树木生长的持续性作用,一阶自相关系数则反映上一年的气候对次年树木生长的持续性影响^[16-18],阿克苏河源区雪岭云杉树轮宽度年表的一阶自相关系数为0.807,表明雪岭云杉的生长可能受气候环境的滞后影响。以上统计特征表明,本文构建的树轮宽度年表所包含的环境信息较为丰富。

3.2 雪岭云杉树轮宽度年表对径流的响应

Pearson相关分析显示,雪岭云杉树轮宽度年表(1959—2015年)与阿克苏河干流春季、夏季径流的相关性并不显著($r = -0.143$ 、 -0.182 , $P > 0.05$),但与秋季径流相关性达到了显著水平($r = -0.327$, $P < 0.05$),与冬季径流相关性达极显著水平($r =$

0.580, $P < 0.01$), 这表明前一年的冬季径流对次年雪岭云杉的生长有着重要作用。近年来,我国西部绝大部分地区温度都呈上升趋势,其中冬季增温速度最快,新疆干旱区冬季降水量也趋于增加^[19-20],因此河流冬季径流也发生着相应变化。4—8月是雪岭云杉主要生长季,冬季为次年生长的准备时期。雪岭云杉树轮宽度年表与冬季径流正相关,表明如果前一年冬季降水比较丰富,气温较为温和,有利于植物次年储存营养物质,因而有助于次年雪岭云杉的生长,这与 Schulman^[21]对美国干旱区针叶树的研究结果相同。

3.3 基于雪岭云杉树轮宽度年表的阿克苏河干流冬季径流重建

因阿克苏河干流冬季径流与雪岭云杉树轮宽度年表相关性最为显著,为此采用 SPSS 软件进一步分析了雪岭云杉树轮宽度年表与冬季径流的线性回归关系,并据此构建了雪岭云杉树轮宽度年表与阿克苏河干流 1959—2015 年冬季径流的回归模型:

$$Q = 49.991 + 31.899t \quad (1)$$

式中: Q 为冬季径流模拟值; t 为雪岭云杉树轮宽度年表值。模型的统计分析特征结果显示,重建模型的相关系数为 0.58 ($P < 0.01$), 方差解释量为 63.7%, 调整方差解释量为 62.5%, F 值为 27.94, 且模型的模拟值与实测值吻合度较高(图 1), 具有统计学意义。为进一步检验该模型的稳定性、可靠性和精确性,采用交叉相关系数、误差缩减值对模型进行了检验,结果显示:交叉相关系数为 0.661, 通过了 99% 的极显著检验;误差缩减值为 0.66, 表明模拟值和实测值差异不大,可见重建模型具有较高的可信度。因此,利用该模型重建了阿克苏河干流 1813—2015 年冬季径流序列如图 2 所示。

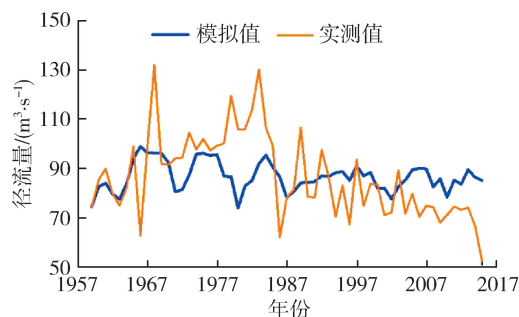


图 1 阿克苏河干流冬季径流模拟值与实测值

Fig.1 Simulated and measured data of winter runoff of Aksu River

3.4 阿克苏河干流冬季径流变化特征分析

3.4.1 径流丰枯年份分析

阿克苏河干流 1813—2015 年冬季多年平均流量

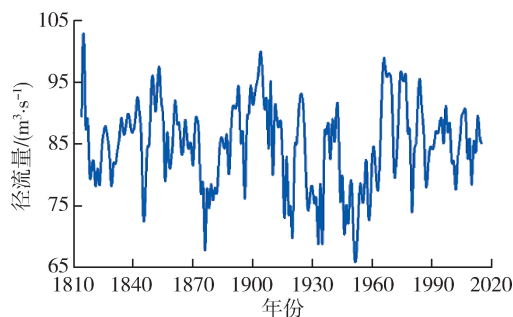


图 2 阿克苏干流 1813—2015 年冬季径流重建序列

Fig.2 Reconstructed winter runoff of Aksu River from 1813 to 2015

为 $82.19 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大为 $105.46 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小为 $60.10 \text{ m}^3/\text{s}$, 变幅很大。变差系数的大小可判别河流的主要补给方式^[22], 阿克苏河干流冬季径流的变差系数为 0.126, 表明其以冰川融水和地下水补给为主。丰水、平水和枯水年的划分通常按照模比系数(某一年的年径流量与多年平均径流量的比值)来划分^[23]。根据阿克苏河干流 1813—2015 年冬季径流模比系数, 1813—2015 年冬季径流平水年出现的年份最多, 共出现了 80 年, 占总年数的 39.41%; 丰水年共出现了 59 年, 占总年数的 29.06%, 其中特丰水年出现的年份最少, 出现了 15 年, 仅占总年数的 7.39%; 枯水年共出现了 64 年, 占总年数的 31.53%, 其中特枯水年出现了 20 年, 占总年数的 9.85%。偏丰水年与偏枯水年出现的年份相同, 各出现了 44 年, 分别占总年数的 21.67%。进一步以 5 年或 5 年以上连续出现偏丰水年(或者偏枯水年)为标准, 计算丰水、枯水年出现的频次, 结果显示, 阿克苏河干流 1813—2015 年冬季径流出现了 3 次持续枯水期(1815—1822 年、1926—1935 年、1943—1959 年), 共计 35 年, 最长的枯水期持续 17 年(1943—1959 年); 出现了 5 次持续丰水期(1833—1839 年、1848—1854 年、1896—1906 年、1972—1978 年、1981—1985 年), 共计 37 年, 最长丰水期持续 11 年(1896—1906 年)。

3.4.2 径流周期变化规律分析

径流受自然因素与人为因素的双重影响, 其变化规律和变化趋势因时间尺度的差异具有很大的不确定性, 因此, 用一般的数理统计方法分析径流周期变化规律有一定的难度^[24]。小波分析具有多时间尺度特性, 能客观地反映径流在不同时间尺度的变化规律, 较为准确地判断径流时间序列变化周期及其强弱^[24]。因此, 本文利用小波分析探寻阿克苏河干流 1813—2015 年冬季径流的周期性及其变化规律。

小波变换系数实部等值线图能够表现径流不同时间尺度的周期变化^[25-26]。由图 3 可见, 1813—

2015 年冬季径流存在 40 ~ 60 a、21 ~ 37 a、5 ~ 20 a 这 3 种时间尺度周期变化。其中,40 ~ 60 a 尺度在整个分析时段分布比较稳定,丰枯段分布比较均匀;21 ~ 37 a 尺度的周期在 1950 年之前变化比较活跃,在 1950 年之后径流变化比较稳定,周期特征表现不明;5 ~ 21 a 尺度在整个时间段均有分布,突变点较多。如对 21 ~ 37 a 尺度而言,冬季径流出现丰枯交替 5 次振荡,表现出明显突变特征:1822 年以前偏枯,1822—1834 年偏丰,1835—1849 年偏枯,1850—1872 年偏丰,1873—1893 年偏枯,1894—1912 年偏丰,1913—1922 年偏枯,1923—1947 年偏丰,1948—1962 年偏枯,1963—1976 年偏丰,1977—1997 年偏枯,1998—2015 年偏丰,但从 2015 年后进入偏枯阶段,等值线仍未闭合,表明 2015 年以后一段时间还将处于偏枯期。

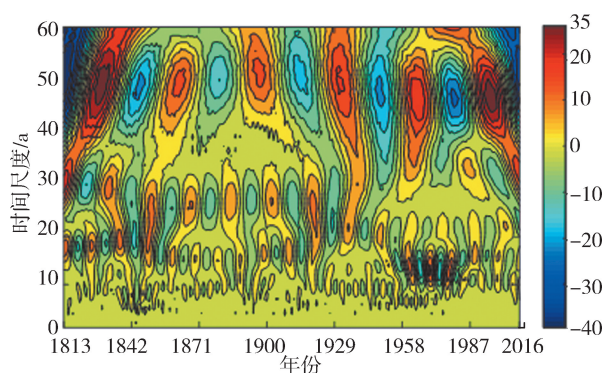


图3 阿克苏河干流冬季径流小波变换系数实部等值线
Fig.3 Isoline of wavelet coefficients of winter runoff of the Aksu River

随着全球气候变暖和干旱区暖湿化加剧,阿克苏河年径流自 20 世纪 50 年代以来有明显的增加趋势。但本文研究表明 20 世纪 80 年代中期开始,阿克苏河干流冬季径流整体上呈减少趋势,并在 1988 年达到最低值,这可能是由于阿克苏河流域灌溉面积增加导致库玛拉克河入干流流量减少造成的。库玛拉克河是阿克苏河主要水源河,它分东支(分配水量 30%)和西支(分配水量 70%),西大桥水文站只测量托什干河和库玛拉克河西支汇合口的水量。由于西支流经区域的灌溉面积逐年增加,沿线的灌溉用水量逐年增大,造成西支河道径流量锐减,平水期、枯水期及冬季西支河道经常出现断流,造成西大桥电站引水流量不足,从而导致阿克苏河干流冬季径流逐渐较少^[27]。

采用小波方差图可以确定径流序列的主周期变化,由图 4 可以看出,1813—2015 年存在 3 个较为明显的峰值,依次为 51 a、29 a 和 16 a,表明冬季径流变化存在着 51 a、29 a 和 16 a 的振荡周期。其中,51 a 尺度的小波方差值远高于 29 a 和 16 a 尺度所对

应的峰值,表明 51 a 的时间尺度所对应的周期变化最强烈,是阿克苏河干流冬季径流变化的第一主周期;29 a 时间尺度对应的第二峰值为冬季径流变化的第二主周期;16 a 时间尺度对应的第三峰值为冬季径流变化的第三主周期。从小波方差峰值大小来看,控制阿克苏河干流冬季径流时间域内变化特征的周期主要是 51 a,这与张瑞波等^[14,28]对阿克苏河径流变化周期和阿克苏河流域降雨量变化周期的分析结果一致。这也证实本文重建的径流序列是可信的。

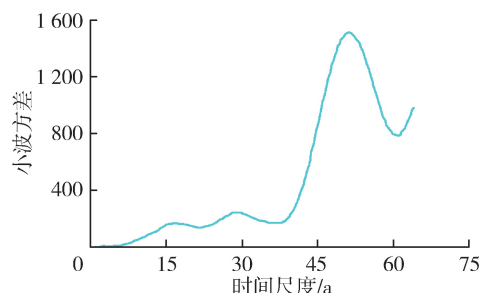


图4 阿克苏河干流 1813—2015 年冬季径流小波方差
Fig.4 Wavelet variance of winter runoff of the Aksu River from 1813 to 2015

4 结 论

a. 阿克苏河源流区的雪岭云杉树轮宽度年表与阿克苏河干流冬季径流极显著正相关,采用雪岭云杉树轮宽度年表重建了阿克苏河干流 1813—2015 年冬季径流序列。经统计学分析验证,重建模型方差解释量为 63.7%,调整方差解释量为 62.5%, F 值为 27.94,且模型模拟值与实测值吻合度较高,重建径流序列稳定可靠。

b. 1813—2015 年阿克苏河干流冬季多年平均流量为 $82.19 \text{ m}^3/\text{s}$,最大为 $105.46 \text{ m}^3/\text{s}$,最小为 $60.10 \text{ m}^3/\text{s}$;共出现了 5 次持续丰水期(1833—1839 年、1848—1854 年、1896—1906 年、1972—1978 年、1981—1985 年),3 次持续枯水期(1815—1822 年、1926—1935 年、1943—1959 年),最长枯水期持续 17 年。

c. 1813—2015 年阿克苏河干流冬季径流存在 40 ~ 60 a、21 ~ 37 a、5 ~ 20 a 3 种时间尺度的变化规律,振荡周期分别为 51 a、29 a 和 16 a,其中冬季径流变化的第一主周期为 51 a。

参考文献:

- [1] 刘普幸,勾晓华,张齐兵,等. 国际树轮水文学研究进展[J]. 冰川冻土,2004,26(6):720-728. (LIU Puxing, GOU Xiaohua, ZHANG Qibing, et al. Advances in dendrohydrology around the world [J]. Journal of

- Glaciology and Geocryology, 2004, 26 (6) : 720-728. (in Chinese))
- [2] WOODHOUSE C A, OVERPECK J T. 2000 years of drought variability in the central United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79 (12) : 2693-2714.
- [3] BONIN D V, BURN D H. Use of tree ring reconstructed streamflows to assess drought [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32 (6) : 1114-1123.
- [4] LARA A, URRUTIA R, VILLALBA R, et al. The potential use of tree-rings to reconstruct streamflow and estuarine salinity in the Valdivian rainforest eco-region, Chile [J]. Dendrochronologia, 2005, 22 (3) : 155-161.
- [5] 李江风, 袁玉江, 马慧明, 等. 用树木年轮重建伊犁地区的年径流量场 [J]. 水文, 1996, 26 (1) : 30-35. (LI Jiangfeng, YUAN Yujiang, MA Huiming, et al. Reconstruction of annual runoff field in Yili area with tree rings [J]. Journal of China Hydrology, 1996, 26 (1) : 30-35. (in Chinese))
- [6] 刘普幸, 陈发虎, 勾晓华, 等. 额济纳旗近 100 a 来胡杨年表的建立与响应分析 [J]. 中国沙漠, 2005, 25 (5) : 764-768. (LIU Puxing, CHEN Fahu, GOU Xiaohua, et al. Establishment of tree-ring chronology and response analysis in past 100 years for Ejina Banner, Inner Mongolia [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25 (5) : 764-768. (in Chinese))
- [7] 李江风, 袁玉江, 由希尧, 等. 乌鲁木齐河山区流域 360 年径流量的重建 [J]. 第四纪研究, 1997, 17 (2) : 36-43. (LI Jiangfeng, YUAN Yujiang, YOU Xiyao, et al. 360 years runoff reconstruction in the Urumqi River Basin using tree rings [J]. Quaternary Sciences, 1997, 17 (2) : 36-43. (in Chinese))
- [8] 袁玉江, 喻树龙, 穆桂金, 等. 天山北坡玛纳斯河 355 a 来年径流量的重建与分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27 (3) : 411-417. (YUAN Yujiang, YU Shulong, MU Guijin, et al. Reconstruction and analysis of the 355 a runoff of the Manas River on the north slopes of Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27 (3) : 411-417. (in Chinese))
- [9] 杨银科, 黄强, 刘禹, 等. 利用树轮资料重建河流径流量研究进展 [J]. 水科学进展, 2010, 21 (3) : 430-434. (YANG Yinke, HUANG Qiang, LIU Yu, et al. Advances in streamflow reconstruction using tree-ring data [J]. Advances in Water Science, 2010, 21 (3) : 430-434. (in Chinese))
- [10] 王红梅. 新疆阿克苏河流域自然生态变化与水环境的关系 [J]. 水资源保护, 2007, 23 (增刊 2) : 109-110. (WANG Hongmei. Relationship between natural ecological change and water environment in Aksu River Basin, Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (Sup2) : 109-110. (in Chinese))
- [11] 王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956—2006 年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响 [J]. 冰川冻土, 2008, 30 (4) : 562-568. (WANG Guoya, SHEN Yongping, SU Hongchao, et al. Runoff changes in Aksu River Basin during 1956-2006 and their impacts on water availability for Tarim River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30 (4) : 562-568. (in Chinese))
- [12] 汪亮亮, 叶茂, 张同刚, 等. 阿克苏河径流量变化对胡杨年轮生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37 (7) : 112-117. (WANG Liangliang, YE Mao, ZHANG Tonggang, et al. Effects of Aksu River runoff changes on tree-ring growth of *Populus euphratica* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37 (7) : 112-117. (in Chinese))
- [13] 陈德斌, 陈旭光, 邓萍. 阿克苏河流域生态环境现状、问题及治理措施 [J]. 新疆环境保护, 2001, 23 (4) : 21-25. (CHEN Debin, CHEN Xuguang, DENG Ping. Status quo, problem and improving measure of Aksu River Vally ecological environment [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2001, 23 (4) : 21-25. (in Chinese))
- [14] 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 等. 树轮记录的天山南坡阿克苏河过去 300 a 径流变化特征 [J]. 冰川冻土, 2011, 33 (4) : 744-751. (ZHANG Ruibo, WEI Wenshou, YUAN Yujiang, et al. Changes of runoff in Aksu River on southern slopes of Tianshan Mountains in past 300 years, recorded in tree-rings [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33 (4) : 744-751. (in Chinese))
- [15] 牛军强, 袁玉江, 张同文, 等. 阿尔泰山区两种树轮宽度年表气候响应特征 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10 (1) : 59-67. (NIU Junqiang, YUAN Yujiang, ZHANG Tongwen, et al. Characteristics of tree-ring width chronologies in Altay and their response to climate change [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10 (1) : 59-67. (in Chinese))
- [16] 李漠岩, 袁玉江, 魏文寿, 等. 阿勒泰西部树轮宽度年表特征及其气候响应 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5 (6) : 16-21. (LI Moyan, YUAN Yujiang, WEI Wenshou, et al. Characteristics of tree-ring width chronologies in western Altay and their response to climate change [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5 (6) : 16-21. (in Chinese))
- [17] 姜盛夏. 基于树轮宽度的新疆额尔齐斯河流域历史气候重建与分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- [18] 张录. 新疆西部伊犁地区北天山南坡树木年轮气候重建与分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010.
- [19] 刘永林. 中国西部气象干旱统计规律及对称性结构 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [20] 苏宏超, 高前兆, 王进, 等. 塔里木河流域第七次应急输水期间径流情势及其对河流生态的影响 [J]. 水资源保护, 2011, 27 (5) : 83-87. (SU Hongchao, GAO Qianzhao,

- WANG Jin, et al. Runoff regime and its effect on river in Tarim River Basin during seventh emergency water supply period[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5): 83-87. (in Chinese))
- [21] SCHULMAN E. Dendro climatic changes in semiarid America[M]. Tucson: University of Arizona Press, 1956.
- [22] 王宏江. 跨流域调水系统水资源综合管理研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [23] 刘普幸, 陈发虎, 靳立亚, 等. 基于胡杨年轮重建黑河下游近 100 年春季径流量[J]. 干旱区地理, 2007, 30(5): 696-700. (LIU Puxing, CHEN Fahu, JIN Liya, et al. About 100-year reconstruction of spring streamflow based on tree rings in the lower reaches of Heihe River[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(5): 696-700. (in Chinese))
- [24] 夏库热·塔依尔, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 等. 基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 142-146. (SHAKURE Tahir, HAMID Yimit, Mamattursun Eziz, et al. Research on period of annual runoff in Kaidu River based on wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 142-146. (in Chinese))
- [25] 冯夏清. 基于小波分析的浑河流域径流量周期分析[J]. 吉林水利, 2015(3): 39-41. (FENG Xiaqing. Periodic analysis of runoff in the Hun River Basin based on wavelet analysis[J]. Jilin Water Resources, 2015(3): 39-41. (in Chinese))
- [26] 刘笑彤, 蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析: 以通天河为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 549-556. (LIU Xiaotong, CAI Yunlong. Research of runoff's feature and impact factors in multiple dimensions based on wavelet analysis: a case study on Tongtian River[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(3): 549-556. (in Chinese))
- [27] 东斌. 浅谈西大桥电站渠首导流堤续建工程的必要性和工程效益[J]. 内蒙古水利, 2009(2): 128-129. (DONG Bin. Discussion on the necessity and benefit of the construction of the diversion dike at Xidaqiao Hydropower Station[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2009(2): 128-129. (in Chinese))
- [28] 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): 27-33. (ZHANG Ruibo, WEI Wenshou, YUAN Yujiang, et al. A precipitation series of A. D. 1396-2005 in Aksu River Basin on the southern slopes of Tianshan Mount [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 27-33. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-08-20 编辑: 熊水斌)

(上接第 49 页)

- [15] 宋耘, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [16] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水, 2009, 35(11): 213-217. (LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient [J]. Water & Wastewater, 2009, 35(11): 213-217. (in Chinese))
- [17] 朱勇年. 设计暴雨雨型的选用: 以杭州市为例[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 94-96. (ZHU Yongnian. Selection of design rainfall pattern: case of Hangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 94-96. (in Chinese))
- [18] 黄津辉, 王超, 范泽华. 天津市设计暴雨雨型的演变[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 38-43. (HUANG Jinhui, WANG Chao, FAN Zehua. Evolution of design rainfall pattern in Tianjin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 38-43. (in Chinese))
- [19] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5952-5961. (LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5952-5961. (in Chinese))
- [20] 张智贤, 王俊岭, 秦全城, 等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区 SS 的去除效果试验[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 76-79. (ZHANG Zhixian, WANG Junling, QIN Quancheng, et al. Experiment on removal effect of improved permeable pavement on SS in weak permeable soil area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 76-79. (in Chinese))
- [21] 袁溪, 李敏. 基于 SWMM 模型的下凹式绿地污染物削减效应分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(3): 49-55. (YUAN Xi, LI Min. Analysis on reduction effect of different pollutants by sunkengreen space based on SWMM [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 39(3): 49-55. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-11-18 编辑: 王芳)

