

利用树轮资料重建河流径流量研究进展

杨银科^{1,2}, 黄 强¹, 刘 禹³, 王文科², 王义民¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;
3. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘要: 利用树轮资料重建河流径流量是树木年轮学研究的一个重要方向。在理解树轮水文学科学概念的基础上, 介绍了利用树轮资料重建河流径流量的研究方法, 综述了国际上利用树轮资料重建径流量的研究进展。从研究区域、思路与方法、应用领域等 3 个方面详细综述了中国利用树轮资料重建河流径流量的研究进展, 概述了研究存在的问题及未来的展望。结论表明, 利用树轮资料重建长尺度的径流序列, 能更好地满足江河流域水资源统一管理和规划的需要, 能为水资源管理提供丰富的基础资料。

关键词: 树轮水文学; 树轮资料; 径流量重建; 水资源; 研究进展

中图分类号: P343; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)03-0430-05

河流径流的开发利用, 要求有较长系列的水文变化和相关的气候变化信息, 才能揭示径流的长期演变规律, 然而全球大多数地区降水、径流等器测记录较短, 器测记录历史最长的美国也不超过 150 年^[1]。因此寻找更长的河流变化历史记录体显得更为重要。20 世纪 30 年代中期, 美国学者首次在美国内华达州 Truckee 河利用树木年轮资料延长河流年径流量, 由此形成了树轮水文学^[1]。树轮水文学是一门根据树木年轮指标研究过去长期水文现象的科学, 注重理解树木对水文变量影响的生物响应。树轮水文学以树轮资料分辨率高、样本地域分布广泛易获得、定年精确、连续性强的优势, 在重建水文信息的研究中取得了很大的进展^[2]。

1 利用树轮资料重建河流径流量

1.1 树轮年表与河流实测径流量的相关关系

大气降水对树木生长和河流径流均有显著的影响, 径流变化代表了降水的平均状况, 树轮年表和河流径流量之间的相关关系就可以得到合理的解释^[3]。不同气候区域, 树木生长期不同, 树木生长对不同季节的降水响应程度不同。相同气候区域内, 河流径流对降水的响应, 和树木对降水的响应在时间上存在滞后性。这些因素使得树轮年表与河流实测径流量的相关分析异常复杂, 同时也至关重要。树轮年表与径流量相关分析的目的, 就是在符合树木生理实际意义条件下, 找出树轮资料与径流量之间不同组合中的最佳相关关系。

1.2 河流径流量的重建

利用树轮资料重建河流径流量是在相关分析基础之上, 建立重建方程, 将树轮参数 (宽度、密度、同位素等) 定量地转化成径流量的历史变化, 进行径流量变化的趋势分析, 其中最关键的是建立可靠的重建方程, 并进行稳定性检验。一般认为, 由于土壤、岩隙对坡面降水汇流入河所形成的阻碍作用, 降在山区的水分, 到 3 年, 有时甚至 5 年以后, 还能影响到河流中的径流量^[3]。干旱半干旱地区的树木生长不仅与当年的自然条件有关, 还和前几年气候条件造成的自身营养状况有关, 重建方程的设计不仅要考虑当年的影响, 还要考虑前几年的影响因素。重建的径流量要具有说服力, 一是重建方程应有较大的解释方差, 二是要利用独立资料或校准期内的资料, 对重建的径流量进行独立检验或交叉检验, 并取得较好的检验结果。一般采用

收稿日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50679070); 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目 (2008ZX07012-002-003-003); 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLLQG0607)

作者简介: 杨银科 (1977 -), 男, 陕西扶风人, 讲师, 博士研究生, 主要从事水文水资源学、树木年轮学方面研究。

E-mail: yyk610113@163.com

的检验统计量主要有: 相关系数、符号检验、一阶差符号检验、乘积平均值, 误差缩减值、以及有效系数等, 进行这种检验的目的是保证重建方程的稳定性及重建结果的可靠性^[4-5]。

1.3 重建径流量序列的分析

重建径流量序列的分析方法很多, 最基本的是确定重建区间的河流丰水期与枯水期时段。对重建的径流量序列做滑动平均处理, 以河流多年平均流量值为标准, 可以确定河流丰水期与枯水期^[2]; 按照模比系数可以划分丰水、平水和枯水年^[6]; 计算多年平均径流量, 通过最大、最小径流量值确定径流量重建序列的变差系数, 说明径流量的变幅大小^[6]。另外, 与历史文献资料记载的河流水文信息对比, 以验证重建径流序列的可靠性, 也是非常有效的分析方法^[2,6]。通过对重建径流序列的周期分析, 有助于认识径流变化的规律性。周期分析的常规方法有最大熵谱分析, 功率谱分析^[2,3]。由于水文变化是多时间尺度系统, 用常规方法可以判断出径流量变化主要周期, 但不能揭示其层次结构, 利用小波分析方法可以对不同时段和不同时间尺度的径流量周期进行分析^[3]。

2 国内外研究进展

2.1 国际研究进展

自 20 世纪初期, 美国天文学家 Douglass 创立树木年轮学之后, 科学家就开始探讨树轮与河流径流之间的关系, 经过几十年的发展, 国际上利用树轮资料重建河流径流的研究工作取得了丰硕成果。特别是在美国, 树轮年表已被广泛用于延长水文记录, 重建河流径流, 使其成为全球研究最早, 成果最多的国家^[1]。20 世纪 70 年代, 美国学者 Stockton 出版了第一部树轮水文学研究专著《用树木年轮系列延长径流量记载年代》, 成为当时该领域最有建树的研究者^[7]。到 20 世纪末, 全球除南极大陆外, 北美洲、南美洲、欧洲、大洋洲和亚洲等地区都相继开展了这方面的研究工作^[1]。

进入 21 世纪, 随着全球变化与水资源紧缺问题的日益突出, 人们越来越重视树木年轮在恢复过去水文变化信息方面的作用。美国 Colorado 河流域开展的研究工作最为集中: Woodhouse 等学者先后重建 Middle Boulder 1703 年以来的年径流量^[8]; 分析流域径流量重建资料, 探讨大范围干旱的时空变化规律^[9]; 探讨树轮资料、流域干旱和水资源管理之间的关系, 揭示重建资料在水资源管理方面的巨大潜力^[8]; 评价该流域过去 480 年来的区域性干旱状况, 并和帕尔默水文干旱指数做比较^[10]。2008 年 Jain 等将该流域径流资料延伸至公元 762 年^[11]。美国的其它流域也有大量研究工作相继开展: 在 Yellowstone 河上游^[12]、Columbia 河^[13]; 南 Platte 河^[8]以及怀俄明州中部 Wind 河流域, 均重建了长尺度的河流径流序列^[14]。在 Sacramento 河利用重建的径流资料, 分析干旱的时空变化^[9]。在加拿大, Canadian Prairie 河流域 3 个重建径流序列中, 最长达到 1113 年^[15]; Bonin 等还将重建的径流资料应用到 Athabasca 河流域的干旱评价中^[16]。在墨西哥, Castillo 等重建了加利福尼亚湾大陆分水岭中部 1840 年和南部地区 1712 年以来的冬季径流量^[17]。在智利, Lara 等探讨了在 Valdivian 热带雨林生态区利用树轮资料重建过去 500 ~ 780 年河流径流量的潜力^[18]。

2.2 国内研究进展

(1) 研究区域 中国树轮水文学研究始于 20 世纪 80 年代, 研究工作主要集中在新疆的乌伦古河、塔里木河和故乡河等流域^[7]。除进行径流量的重建、分析、预测外, 还利用重建序列探讨了径流量与湖泊水位间的关系和原因, 为研究湖泊水位变化开辟了新的途径。20 世纪 90 年代以后, 树轮水文学的研究区域迅速扩大。在新疆, 袁玉江等先后在伊犁河、额尔齐斯河、乌鲁木齐河、玛纳斯河、奎屯河等地开展了大量的研究工作^[3,5,19-20]。在黑河流域, 黑河的出山口, 黑河上游、下游以及额济纳等区域, 既有不同时段、不同季节河流径流量的重建, 也有地下水水位变化历史的探讨^[6,21-23]。黄河一级支流湟水河, 黄河上游、中游等地区, 在重建径流量的基础上, 综合树轮指数、旱涝等级和降水量资料, 延长河流径流序列^[2,24-27]。长江源区的通天河^[4]和东北的松花江^[28]也有基于树轮资料重建河流径流研究工作的开展。

(2) 新的研究思路与方法 为了获得更多的水文信息, 新的思路与方法不断被引入到研究中。新疆伊犁地区利用树轮资料重建历史径流深度场和年径流量场工作具有首创性, 它从径流量序列跃至径流深度和水

资源重建,为径流深度的重建和水资源恢复提供了新方法,并有促于年轮水文学的理论发展^[7]。径流量重建时综合考虑流域旱涝等级和降水资料,提高重建序列的准确性^[26-27]。利用流域内多个树轮年表建立年轮场,尝试基于年轮场重建地表水资源变化序列。利用树轮资料重建地下水水位变化历史,进一步扩展树轮水文学研究的领域^[23]。引入小波分析方法,探讨重建径流序列的不同时段、不同时间尺度的周期变化和突变变化^[5]。

(3) 应用领域 中国学者利用树轮资料重建径流量工作,不仅在基础研究方面成果卓著,而且在生产应用领域不断拓宽研究视野。李江风等在塔里木河的研究成果为当时中苏国际河流谈判提供依据^[7]。利用重建的径流场资料,绘制了径流丰枯阶段径流深度等值线图,计算了地表水资源量,为相关部门制定经济远景规划提供了重要的参考。袁玉江等基于重建径流资料的分析,提出维持乌伦古湖渔业生产的建议^[7]。秦宁生等为长江源区生态环境保护和长江流域经济发展提供 518 年径流基础资料^[4]。康玲玲等重建了黄河花园口站近 523 年天然径流量序列,对于黄河规划、治理和水资源调度、利用都具有十分重要的现实意义^[26]。

3 国内研究存在的问题

利用树轮资料重建河流径流量的研究区域主要集中在我国西北地区,新疆最为集中。黄河中上游已经开展研究工作的区域,在整个黄河流域占的比例较小,黄河流域日益严峻的水资源问题使得该流域更具有开展此研究的迫切需要。黑河、通天河、松花江开展的此类研究工作仍需加强,国内其它河流流域到目前为止还没有开展这方面的研究。树木年轮研究中可利用的树轮指标很多,包括年轮宽度、密度、同位素、细胞结构、灰度等。利用树轮资料重建径流的研究,除松花江采用树轮稳定碳同位素外,其它均采用单一的树轮宽度指标。树轮气候学研究表明,树轮密度、同位素等指标包含着更为丰富的信息,从更多的树轮指标中寻找水文变化信息将会成为树轮水文学研究的趋势之一。利用树轮资料重建河流径流的研究思路与分析方法主要源于树轮气候学,随着树轮水文学的深入发展,新的研究思路与方法急需引入,大量新兴的统计水文学研究方法,比如灰色理论、模糊数学、神经网络、混沌和分形理论等需在以后的研究中得到重视。我国学者在新疆、内蒙等地的研究表明:在利用胡杨进行径流量重建时,应认真选择树轮采样点,以避免干旱区内陆河河流频繁改道所造成的胡杨生境不均一问题。在有些地区,胡杨开始长在河边,水分满足,树轮生长主要受温度影响,但是当河流发生摆动,树木远离现代河床,水分则成为主要的限制因子。此外,在利用胡杨重建地下水水位时,很小的样本量($n < 15$),也是导致流量重建结果不可信的原因之一^[19,23]。

随着对全球变化尤其是气候变化认识的不断深入,水文水资源对全球气候变化响应问题已引起广泛的关注^[29]。加强区域水文学和大气环流之间联系的研究,更好地认识大尺度气候变化的机制和气候变化对水文变量的影响将是水文水资源研究的新思路。利用树轮资料获得的长尺度水文变化与气候变化序列在这方面具有无与伦比的优势和巨大的潜力。

4 结论与展望

利用树木年轮资料重建河流径流量既是树木年轮学研究的一个重要方向,也是水文水资源研究获得长尺度水文信息的新途径。对树轮年表与实测径流量进行相关分析,建立回归方程重建长尺度径流量,深入分析重建径流量序列变化特征,研究方法已经基本形成。国外利用树轮资料重建径流量的研究,先于中国,成果丰富。我国的研究工作主要集中在新疆的内陆河流域,在黄河、黑河、长江、松花江等流域的研究工作逐步展开。新的思路与方法不断被引入到研究中,对径流量长尺度复杂性演变特征的合理描述逐步深入。

今后应进一步加强树轮水文学在江河流域水资源统一管理和规划方面的应用研究,利用新兴的统计水文学研究方法,寻找深入分析基于树轮资料重建的河流径流序列的新方法、新模型,为合理开发利用水资源,保护和建设生态环境提供科学依据。

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. (LU Pu-xing, GOU Xiao-

- hua, ZHANG Qi-bin, et al. Advances in dendrohydrology around the world[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26 (6): 720-728. (in Chinese))
- [2] 刘禹, 杨银科, 蔡秋芳, 等. 以树木年轮宽度资料重建湟水河过去 248 年来 6~7 月份河流径流量[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 69-73. (LIU Yu, YANG Yin-ke, CAI Qiu-fang, et al. June to July runoff reconstruction for Huangshui River from tree ring width for the last 248 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 69-73. (in Chinese))
- [3] 袁玉江, 喻树龙, 穆桂金, 等. 天山北坡玛纳斯河 355a 来年径流量的重建与分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 411-417. (YUAN Yu-jiang, YU Shu-long, MU Gui-jin, et al. Reconstruction and analysis of the 355a 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))
- [4] 秦宁生, 靳立亚, 时兴合, 等. 利用树轮资料重建通天河流域 518 年径流量[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 550-556. (QIN Ning-sheng, JIN Li-ya, SHI Xing-he, et al. A 518-year runoff reconstruction of Tongtian River basin using tree-ring width chronologies[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 550-556. (in Chinese))
- [5] 喻树龙, 袁玉江, 龚原, 等. 奎屯河近 379a 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. (YU Shu-long, YUAN Yu-jiang, GONG Yuan, et al. Runoff reconstruction of Kuitun River basin in recent 379 years using tree-ring width chronologies[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(7): 115-119. (in Chinese))
- [6] 康兴成, 程国栋, 康尔泗, 等. 利用树轮资料重建黑河近千年来出山口径流量[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(8): 675-685. (KANG Xing-cheng, CHEN Guo-dong, KANG Er-si, et al. Based tree rings data reconstruction over 1000-year streamflow of mountain pass in Heihe River[J]. Science in China: Series D, 2002, 32(8): 675-685. (in Chinese))
- [7] 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: 252. (LI Jiang-feng, YUAN Yu-jiang, YOU Xi-yao. Dendrohydrology research and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2000: 252. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 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: 196-213.
- [10] TMLSENA J, PIECHOTA T C. Regionalization and reconstruction of snow water equivalent in the upper Colorado River basin[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 94-106.
- [11] JAN S, EISCHEID J K. What a difference a century makes: Understanding the changing hydrologic regime and storage requirements in the upper Colorado River basin[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(16): L16401.
- [12] GRAUMLICH L J, PISARIC M J, WAGGONER L A, et al. Upper Yellowstone River flow and teleconnections with Pacific basin climate variability during the past three centuries[J]. Climatic Change, 2003, 59(1/2): 245-262.
- [13] GEDALOF Z, PETERSON D L, MANTUA N J. Columbia River flow and drought since 1750[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(6): 1579-1592.
- [14] WATSON T A, ANTHONY B F, GRAY S T, et al. Reconstructed streamflows for the headwaters of the Wind River, Wyoming, United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(1): 224-236.
- [15] CASE R A, MACDONALD G M. Tree ring reconstructions of streamflow for three Canadian Prairie Rivers[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(3): 703-716.
- [16] BONN 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.
- [17] CASTILLO L B, CASTRO S D, ZAVALA C A, et al. Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed[J]. Journal of Hydrology, 2003, 278: 39-50.
- [18] 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: 155-161.
- [19] YUAN Y J, SHAO X M, WEI W S, et al. The potential to reconstruct Manasi River streamflow in the Northern Tien Shan mountains, NW CHINA[J]. Tree-ring Research, 2007, 63(2): 81-93.
- [20] 李江风, 袁玉江, 由希尧. 乌鲁木齐河山区流域 360 年径流量的重建[J]. 第四纪研究, 1997(2): 131-138. (LI Jiang-feng, YUAN Yu-jiang, YOU Xi-yao. 360 years runoff reconstruction in the Urumqi River basin using tree rings[J]. Quaternary sciences, 1997(2): 131-138. (in Chinese))

- [21] 王亚军, 陈发虎, 勾晓华. 黑河 230a 以来 3~6 月经流的变化 [J]. 冰川冻土, 2004, 26 (2): 202-206. (WANG Ya-jun, CHEN Fa-hu, GOU Xiao-hua. March to June runoff of Heihe River since 1770 reconstructed from tree-ring data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 202-206. (in Chinese))
- [22] 刘义花, 汪青春, 马占良, 等. 利用多条树轮重建黑河上游地区 540 年径流量 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23 (3): 93-97. (LU Yi-hua, WANG Qing-chun, MA Zhan-liang, et al. 540-year runoff reconstruction of Upper Heihe River using tree-ring chronology[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23 (3): 93-97. (in Chinese))
- [23] 孙军艳, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 额济纳 233 年来胡杨树轮年表的建立及其所记录的气象、水文变化 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (5): 799-807. (SUN Jun-yan, LU Yu, CAI Qiu-fang, et al. Climatic and hydrological changes of Ejin, Inner Mongolia, China during the past 233 years recorded in tree-rings of *Populus euphratica*[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26 (5): 799-807. (in Chinese))
- [24] 王琦, 秦金虎, 关红兵, 等. 黄河上游近 522 年径流量序列重建及其变化趋势分析 [J]. 水利水电技术, 2008, 39 (2): 4-7. (WANG Qi, QIN Jin-hu, GUAN Hong-bing, et al. Reconstruction of recent 522-year runoff series on upper Yellow River and analysis on its variation trend[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39 (2): 4-7. (in Chinese))
- [25] GOU X H, CHEN F H, COOK E W, et al. Streamflow variations of the Yellow River over the past 593 years in Western China reconstructed from tree rings[J]. Water Resources Research, 2007, 43 (6): W06434.
- [26] 康玲玲, 王云璋, 马燕, 等. 黄河花园口站近 523 年天然径流量序列重建 [J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19 (6): 10-13. (KANG Ling-ling, WANG Yun-zhang, Ma Yan, et al. Reconstruction of the natural runoff series in recent 523 years at Huayankou station in Yellow River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19 (6): 10-13. (in Chinese))
- [27] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应 [J]. 水科学进展, 2009, 20 (2): 153-158. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing, HE Rui-min, et al. Variation trends of runoffs in the middle Yellow River basin and its response to climate change[J]. Advances in Water Science, 2009, 20 (2): 153-158. (in Chinese))
- [28] 刘广深, 戚长谋, 林学钰. 树轮——流域径流变化的记录 [J]. 长春地质学院学报, 1997, 27 (3): 333-336. (LU Guang-shen, QI Chang-mou, LIN Xue-yu. Reflection of surface runoff variation by tree-ring in its drainage area[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1997, 27 (3): 333-336. (in Chinese))
- [29] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究 [J]. 水科学进展, 2004, 15 (5): 608-614. (LU Chang-ming. Study of some problems in water cycle changes of the Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2004, 15 (5): 608-614. (in Chinese))

Advances in streamflow reconstruction using tree-ring data*

YANG Yin-ke^{1,2}, HUANG Qiang¹, LIU Yu³, WANG Wen-ke², WANG Yim¹

(1. School of Water and Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. The Environmental Science and Engineering Collage, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, The Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: Streamflow reconstruction based on tree-ring data is an important direction in dendrochronology. In this study, tree-ring reconstructions of streamflow are described on the basis of the principle of dendrohydrology. The methodologies for reconstructing streamflow using tree-ring are introduced, and major advances in the subject are reviewed over the world. We will then focus on the review of national progresses of tree-ring studies emphasizing on aspects of studying regions, approaches and methodologies, and applications. Inadequate aspects in tree-ring researches and prospects of dendrohydrology studies are also proposed. It is clear that the tree-ring reconstructed long term streamflow series contains valuable information for better management of water resources and planning in river basins.

Key words: dendrohydrology; tree-ring; streamflow reconstruction; water resources; research advances

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50679070) and the National Water Pollution Control and Remediation Key Endowment (2008ZX07012-002-003-003).