Journal of Water Resources Research 水资源研究, 2016, 5(5), 478-487
Published Online October 2016 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/jwrr
http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.55055

Rules of Runoff Variation in Lancang River Basin

Zhenkui Hu[1], Pengyan Zhao[2,3*], Liping Zhang[2,3], Xianren Ai[1], Chao Wei[1], Jiang Li[1]

[1]Centralized Control Center of Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming Yunnan
[2]Water Security Research Institute, Wuhan University, Wuhan Hubei
[3]Water Resources Security Collaborative Innovation Center in Hubei Province, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: *zhaopengyan2014@163.com

Received: Oct. 5th, 2016; accepted: Oct. 23rd, 2016; published: Oct. 26th, 2016

Abstract

According to the annual average runoff data at Xiaowan and Nuozhadu stations in the Lancang River basin from 1953 to 2014, the characteristics of distribution were analyzed with the adjustable parameters and distribution concentrations, and the long-term trend of runoff was analyzed using accumulated variance analysis methods and the non-parametric Kendall test. Mann-Kendall test method was used to analyze mutation points of the runoff; and wavelet analysis method was used to identify cycle of runoff. Then rules of runoff variation in Lancang River basin can be analyzed. The results showed that 1) the runoff showed obvious seasonal change and the yearly uneven degree of runoff distribution from 1953 to 2014 in Lancang River basin changed little over years; 2) the overall trend of runoff at the two stations was not obvious, with an increasing or decreasing tendency during some years; 3) the runoff mutation point may be in the 1981; 4) 19-year variation cycle existed in Lancang River basin.

Keywords

Runoff, Trend Analysis, Mann-Kendall Test Method, Wavelet Analysis Method, Lancang River

澜沧江流域径流演变规律研究

胡振奎[1]，赵鹏雁[2,3*]，张利平[2,3]，艾显仁[1]，魏　超[1]，李　江[1]

[1]华能澜沧江水电股份有限公司集控中心，云南　昆明
[2]武汉大学水利水电学院，湖北　武汉
[3]武汉大学水资源安全保障湖北省协同创新中心，湖北　武汉

作者简介：胡振奎(1984-)，湖北黄冈人，工程师，主要从事梯级流域水电站水库优化调度工作。
*通讯作者。

文章引用: 胡振奎, 赵鹏雁, 张利平, 艾显仁, 魏超, 李江. 澜沧江流域径流演变规律研究[J]. 水资源研究, 2016, 5(5): 478-487.
http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.55055

Email: *zhaopengyan2014@163.com

收稿日期：2016年10月5日；录用日期：2016年10月23日；发布日期：2016年10月26日

摘　要

根据澜沧江小湾水库和糯扎渡水库1953~2014年的年均径流量资料，采用年内分配完全调节系数、年内集中度进行年内分配特征分析，运用累积距平法、Kendall非参数秩次相关检验法分析了澜沧江流域年均径流的趋势性变化；运用Mann-Kendall法进行了澜沧江流域年均径流的突变性分析；最后采用小波分析方法分析了年均径流的周期性变化，最终得出了澜沧江流域径流演变规律。结果表明：1) 澜沧江流域1953年~2014年小湾站和糯扎渡站的年均径流存在着较明显的丰枯季变化，年内分配不均匀程度多年来变化不大；2) 澜沧江流域多年来年均流量整体变化趋势不明显，局部存在着一些上升或下降的波动；3) 1981年为小湾站和糯扎渡站年均径流的可能突变开始点；4) 小湾站和糯扎渡站的年均径流主要存在19a显著变化周期。

关键词

径流，趋势分析，Mann-Kendall法，小波分析法，澜沧江

1. 引言

河川径流量作为水循环的重要环节，是水资源综合开发利用、科学管理、优化调度最重要的依据[1]。径流量受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的影响，其演变过程既表现出确定性的规律，同时也有强烈的随机性。径流特征的变化必然影响水资源的开发利用，并进而影响社会经济的发展[2]。分析河川径流的演化过程，认识演化的规律和动因，不仅有助于深入了解水资源的特性，为水资源的合理开发利用提供依据，同时也有利于开发过程的控制和调整[3]。邓育仁，丁晶等[4]以中国 100 多条主要河流年径流资料为基础，采用近代随机水文学方法，并结合年径流的成因分析，探讨了中国主要河流年径流序列的趋势性、近似周期性、相依性和持续性特点。徐东霞等[5]分析了嫩江径流年内、年际变化特征及其影响因素，并对嫩江流域的多时间尺度特征进行了研究。

澜沧江流域作为著名的国际河流，是中国最长的南北向河流，也是水电重点开发河流，水能资源丰富，目前对澜沧江流域的研究多集中在土壤植被及土地利用方面，少有学者对该流域的径流变化及其演变特征进行研究，基于此，本文对澜沧江流域年径流量的年内分配特征、变化趋势、突变特征、周期演变规律进行系统的研究，从而了解澜沧江流域径流量的演变规律，以期对澜沧江流域水资源合理开发和高效利用提供一定的理论依据。

2. 资料与方法

2.1. 流域概况

澜沧江发源于中国青藏高原唐古拉山北麓，地处 94˚~102˚E，21˚~34˚N，全长 2139 km，流经青海、西藏和云南，流域面积 16.4 万 km^2，是国内最长的南北流向的河流[6]，流域径流以降水为主，地下水和融雪补给为辅。上游区地处青藏高原，气候寒冷，降水少，春季冰雪融水较多，上游河段河川径流以地下水补给为主，约占年径流量的 50%以上，其次是雨水和冰雪融水补给。中下游河段两岸高山，支流短小，山巅有终年积雪，但冰雪融水占年径流量比重较小，中游区随着降水量的增加，融雪补给减少，河川径流补给为降水和地下水混合补给[7]。下游河段处于亚热带和热带气候区，受季风影响，降水丰沛，河川径流降水补给为主，降水占年径流量的

60%以上，其次是地下水补给。流域年径流深为 450.2 mm，其中，青海区年径流深为 304.4 mm，西藏区 283.3 mm，云南区 583.8 mm [8]。其流域概况图及各站点分布见图 1。

本文研究采用的资料为小湾水库和糯扎渡水库 1953~2014 年 62 年的逐月入库径流资料。

2.2. 研究方法

2.2.1. 年内分配分析

径流年内分配分析采用年内分配百分比、年内分配完全调节系数、年内集中度指标从不同角度来衡量流域径流年内分配特性。其中，年内分配完全调节系数(C_r)可以衡量径流年内分配不均匀性[9]，其计算公式如下：

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^{12}\phi_i\left(R_i - R\right)}{\sum_{i=1}^{12}R_i}, \quad \phi_i = \begin{cases} 0, R_i < R \\ 1, R_i \geq R \end{cases} \tag{1}$$

Figure 1. The sketch map of Lancang River Basin
图 1. 澜沧江流域概况图

式中：R_i 为年内月径流量，R 为年内月平均径流量。C_r 值越大，月径流量序列时间的差异越大，径流年内分配不均匀程度越高，即表示年内分配越集中。

径流集中度指各月径流量按月以向量方式累加，其各分量之和的合成量占年径流量的百分数，其意义是反映径流在年内的集中程度。计算公式如下：

$$RCD_{year} = \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{R_{year}}, \quad R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin\theta_i, \quad R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos\theta_i \tag{2}$$

式中：R_{year} 为年径流量；R_x、R_y 分别为 12 个月的分量之和所构成的水平、垂直分量；r_i 为第 i 月的径流量；θ_i 为第 i 月径流的矢量角度；i 为月序($i = 1, 2, 3, \cdots, 12$)。

2.2.2. 年径流趋势性分析

采用线性倾向估计[10] [11]判别年径流量的总体变化趋势，累积距平法[10]能够反映径流量在不同时间段的变化，累积距平曲线比较直观，通过曲线的起伏变化可以分析流域年径流量演变的阶段性特征。为进一步分析年径流变化趋势，对年径流序列进行Kendall非参数秩次相关检验[12]，具体方法是：对序列$\{x_i\}(i = 1, 2, \cdots, n)$，$p$表示序列中所有对偶值($x_i, x_j, j > i$)($i = 1, 2, \cdots, n-1$；$j = i+l, i+2, \cdots, n$)中 $x_i < x_j$ 的出现个数。构造检验统计量 U：

$$U = \frac{\tau}{\sqrt{Var(\tau)}} \tag{3}$$

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1, \quad Var(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \tag{4}$$

式中：n 为序列长度；当 n 增加时，U 很快收敛于标准化正态分布。在显著水平 a 下，当$|U| < U_{\alpha/2}$时，认为趋势不显著，可以不予考虑；否则，认为趋势显著。$U > 0$ 表示序列有增加的趋势，$U < 0$ 表示序列有减少的趋势。若取显著性水平为 0.05，则$|U| < U_{\alpha/2} = 1.96$，可以认为时间序列趋势性不明显。

2.2.3. 年径流变化的突变分析

本文采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法[13]来确定澜沧江流域年径流量的突变点。其具体计算如下：时间序列为 $x_1, x_2, \cdots, x_j, x_i, \cdots, x_N$，$m_i$ 表示第 i 个样本 x_i 大于 x_j ($1 \le j \le i$)的累积数，计算统计量：

$$d_k = \sum_{i=1}^{k} m_i \quad (2 \le k \le N) \tag{5}$$

将 d_k 标准化：

$$u(d_k) = \left(d_k - E(d_k)\right) \Big/ \sqrt{\operatorname{var}(d_k)} \tag{6}$$

式中：$E(d_k)$，$\operatorname{var}(d_k)$ 分别为 d_k 的数学期望值和方差。

设定时间序列是随机独立的平稳序列，ud_k 遵从标准正态分布，其概率 $p(u)$ 小于信度 1.96(即 $\alpha_0 = 0.95$)时，表示序列具有较强的增长或减小趋势，采用反序法，得到其反序列为

$$u'(d_i) = -u(d_i') \quad i' = N+1-i \quad (i, i' = 1, 2, \cdots, N) \tag{7}$$

当 $u(d_i)$ 与 $u'(d_i)$ 两条曲线相交于正负信度线之间，此相交点表示突变的开始。利用 M-K 检测法对序列突变点的检测客观，并对序列的各阶段变化趋势有较好的反应。

2.2.4. 年径流的周期分析

本文采用 Molet 小波[14]作为基小波，运用连续小波变换分析分析澜沧江流域径流序列的多时间尺度特性，对于信号 $f(t)$ 的连续小波变换定义为：

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中：$\bar{\varphi}(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的复共轭函数；$W_f(a,b)$ 为 $f(t)$ 对应于尺度 a、平移 b 的小波系数。
Molet 小波的定义为：

$$\varphi(t)=\mathrm{e}^{ict}\mathrm{e}^{-t^2/2} \tag{9}$$

式中：c 为小波中心频率。

通过小波变换得到的是一个尺度—时间函数(尺度—时间图)。该图只是确定了几个周期所在的时间范围，不能准确判定主周期，因此要通过小波方差[15]进行小波分析检验来确定显著周期，其计算公式为：

$$Var(a)=\int_{-\infty}^{+\infty}\left|W_f(a,b)\right|^2\mathrm{d}b \tag{10}$$

式中：a 为时间尺度。

3. 径流演变规律分析

3.1. 径流分配特征变化

3.1.1. 年内分配特征

给出了小湾和糯扎渡水库径流年内分配柱形图。可以看出，小湾水库和糯扎渡水库多年平均的径流年内分配十分相似，具有明显的丰枯季节变化，6~10 月为丰水期，小湾站和糯扎渡站径流量在丰水期分别占到了全年的 71.5%和 71.7%。

3.1.2. 年内分配完全调节系数

利用式(1)，计算得到小湾水库和糯扎渡水库 62a 以来径流年内分配完全调节系数 C_r 的平均值分别为 0.52 和 0.53。

图 2 表示了 62a 来小湾水库和糯扎渡水库年内分配完全调节系数的变化。从图中可以看出，小湾水库和糯扎渡水库年内分配完全调节系数变化平稳，说明 62a 内小湾水库和糯扎渡水库年内分配不均匀程度变化不大。

3.1.3. 年内集中度

利用式(2)，计算得到小湾水库和糯扎渡水库 62a 以来径流集中度 $\mathrm{RCD_{year}}$ 的值，图 3 表示了 62a 来小湾水库和糯扎渡水库年内集中度的变化。从图 3 中可以看出，两个站的最低的集中度均出现在 1992 年，说明这两个站在这一年中径流量的年内分配过程较为均匀。两个站集中度变化的过程基本保持一致，并未呈现出明显的差异，这两个站的径流集中度在过去的 62a 中变化不大。

3.2. 趋势性变化

采用线性回归方法对小湾水库和糯扎渡水库年均径流进行分析，分析了这两个站的径流变化曲线和 62a 以来径流变化的倾向率(图 4)。从中可以看出，整体平均水平上看，62a 以来小湾水库和糯扎渡水库的年均径流变化趋势不明显，几乎保持平稳状态。其中，小湾水库径流的最大值出现在 1991 年，达 1653.83 m^3/s，最小值出现在 2006 年，为 905.67 $m^3 \cdot s^{-1}$ 极值比为 1.83；小湾水库径流的最大值出现在 1991 年，达 2134.83 m^3/s，最小值出现在 2006 年，为 1168.75 m^3/s，极值比为 1.83，因此小湾站和糯扎渡站年径流的丰枯震荡并不剧烈。

使用累积距平法对小湾水库和糯扎渡水库开展了趋势性分析，计算结果见图 5。

由图 5 可知，小湾水库入库径流 1961~1966 年年均流量累积距平呈上升趋势，年径流量偏丰；1966~1989 年年均流量累积距平呈减小趋势，年径流量偏枯；1989~2005 年年均流量累积距平呈上升趋势，年径流量偏丰；2006 年至今年均流量累积距平呈下降趋势，年径流量偏枯。糯扎渡水库入库径流 1961~1966 年年均流量累积距

平呈上升趋势，年径流量偏丰；1966~1989 年年均流量累积距平呈减小趋势，年径流量偏枯；1989~2005 年年均流量累积距平呈上升趋势，年径流量偏丰；2006 年至今年均流量累积距平呈下降趋势，年径流量偏枯。

利用式(3)计算小湾水库和糯扎渡水库年径流量的非参数秩次相关检验统计量，结果见表 1。分析可知：1953~2014 年小湾水库年径流序列呈现不显著的减小趋势，糯扎渡水库年径流序列也呈不显著的减小趋势，显著性更不明显。

3.3. 突变性分析

本文采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法分析了小湾水库和糯扎渡水库的年径流序列的突变情况，计算结

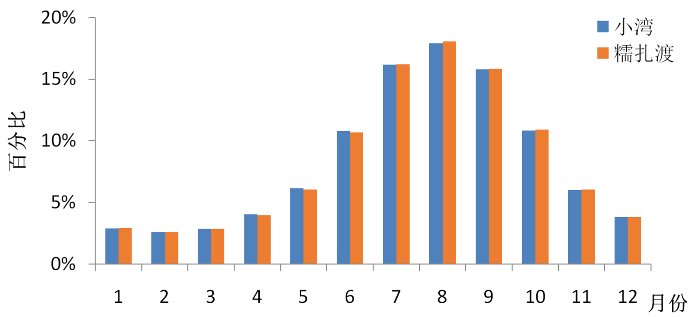

Figure 2. The intra-annual distribution percentage
图 2. 年内分配百分比

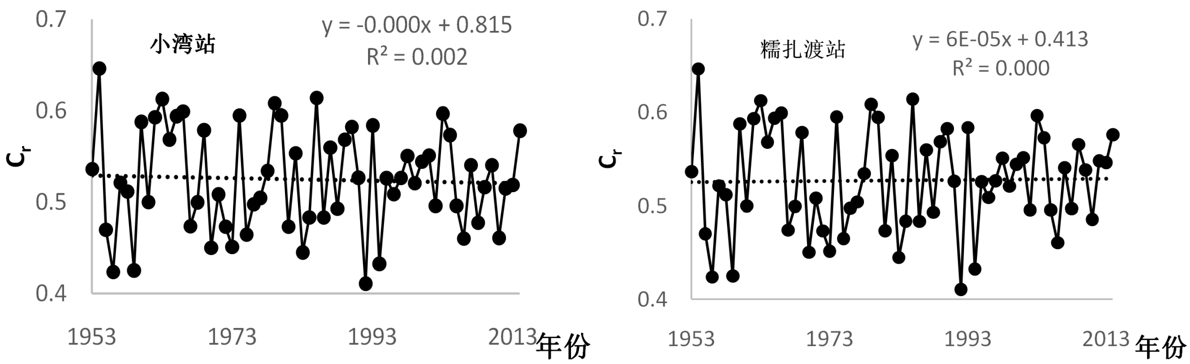

Figure 3. The variation of adjustable distribution parameters
图 3. 年内分配完全调节系数变化

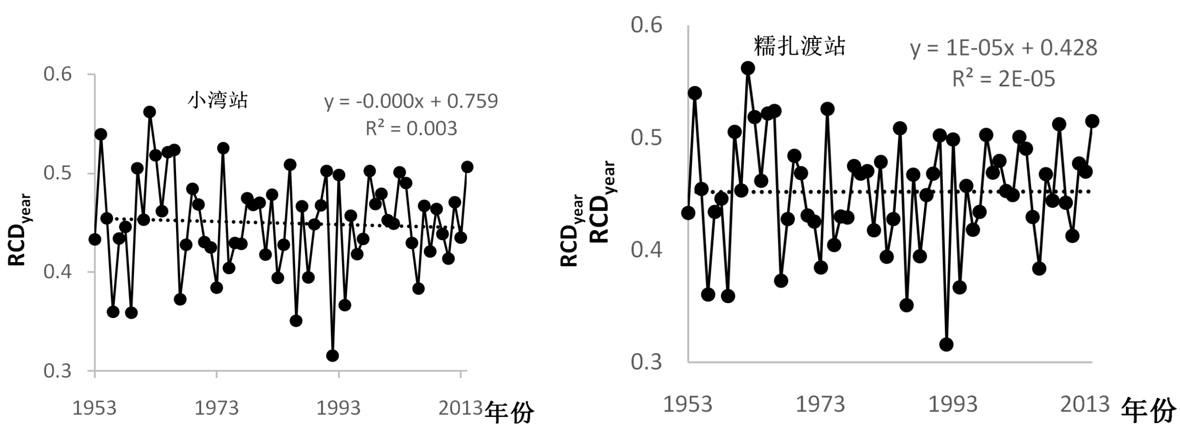

Figure 4. The variation of distribution concentrations of average annual runoff
图 4. 年均径流集中度的变化

果见图 6。由图 6 可知，在给定的显著性水平 $\alpha = 0.05$，临界值 $= \pm 1.96$ 的条件下，小湾站和糯扎渡站 62a 以来 u(di)统计变量基本都小于零，说明径流变化有下降趋势，且 1953~2009 年小湾站和糯扎渡站 u(di)统计曲线落在临界值之内，说明径流变化不显著，呈平缓下降趋势；2009~2014 年小湾站和糯扎渡站 u(di)统计曲线超过了临界值，表明径流变化有明显的下降趋势。图 7 中，小湾站和糯扎渡站 u(di)与 u'(di)曲线在两条临界线之间的部分均相交于 1981 年，因此认为 1981 年为小湾站和糯扎渡站可能的突变开始点。究其原因，可能是人类活动引起下垫面条件的变化，从而导致径流的突变，2009~2014 年径流的显著下降可能是由于人类建造水库等水利工程导致的。

3.4. 周期分析

采用 Molet 小波分析程序对 1953 年~2014 年间小湾水库和糯扎渡水库的年均径流量的周期性进行分析，得到小波变换等值线图及小波方差图(图 8 和图 9)。从中可以看出，小湾站和糯扎渡站存在 2 个较为明显的峰值，

Table 1. The results of non-parametric Kendall test
表 1. Kendall 秩次相关检验结果分析

站点	统计年限/a	ι	U	临界值 $U_{1-0.05/2}$	变化趋势	显著性水平
小湾	62	−0.038	−0．44	1.96	减少	不显著
糯扎渡	62	0.00053	0.0061	1.96	减少	不显著

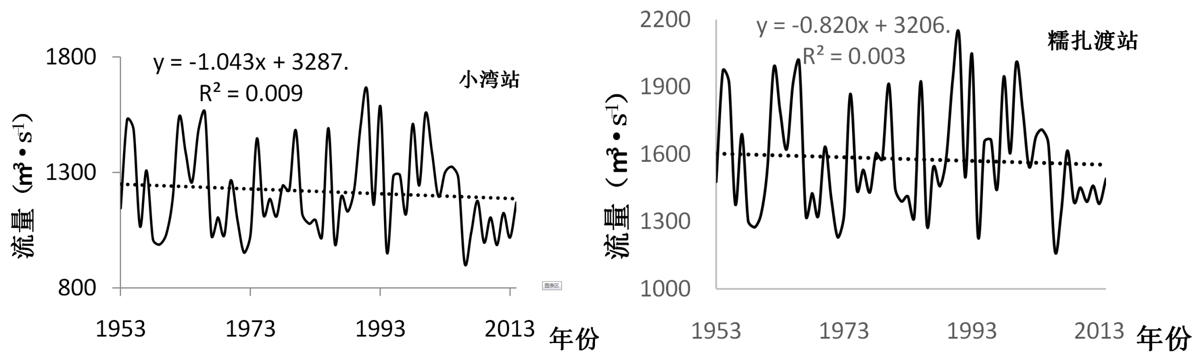

Figure 5. The variation of average annual runoff
图 5. 年均径流变化趋势

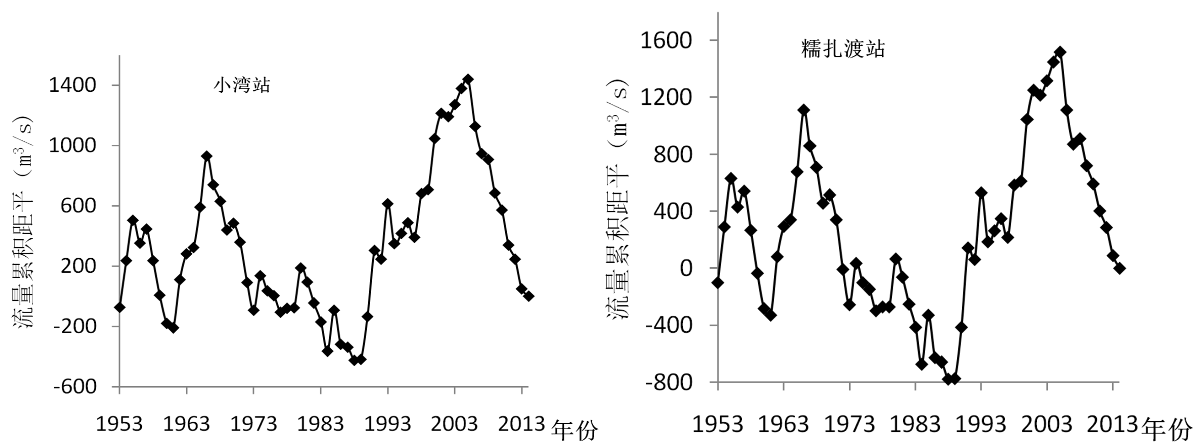

Figure 6. The cumulative departure curve of runoff
图 6. 年径流累积距平

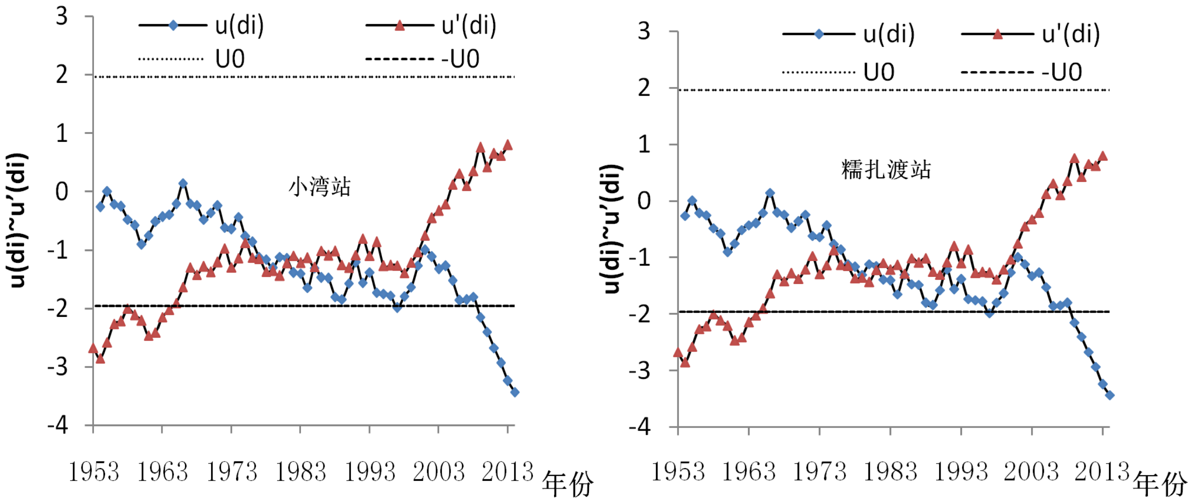

Figure 7. The M-K curves of runoff
图 7. 年径流 M-K 法突变检测

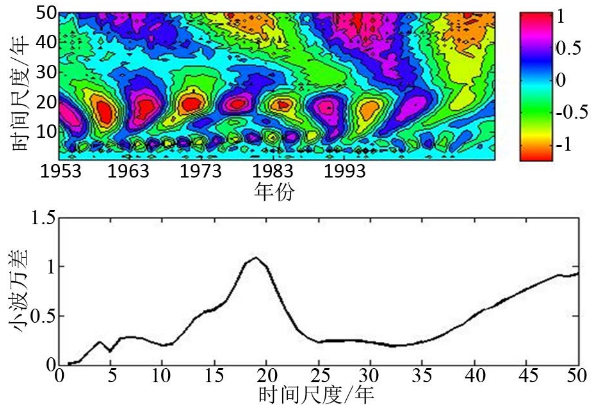

Figure 8. The wavelet analysis at Xiaowan Station
图 8. 小湾水库年尺度小波分析图

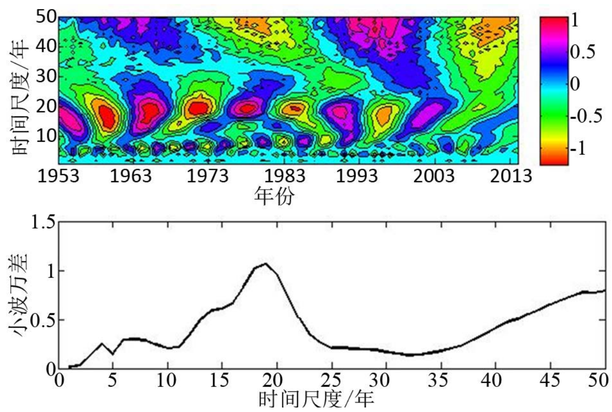

Figure 9. The wavelet analysis at Nuozhadu Station
图 9.糯扎渡水库年尺度小波分析图

它们依次对应着 4a 和 19a 的时间尺度，其中，最大峰值对应着 19a 的时间尺度，说明 19a 左右的周期震荡最强，为小湾站和糯扎渡站年均流量变化的第一主周期；4a 时间尺度对应着第二峰值，为流量变化的第二主周期。上

述这两个周期的波动控制着流量在整个时间域的变化特征。

4. 结论与展望

通过对澜沧江流域 1953 年~2014 年间年均流量进行年内分配特征、趋势性、突变性和周期性分析，从分析结果中可以看到，澜沧江流域 1953 年~2014 年小湾站和糯扎渡站的年均径流存在着较明显的丰枯季变化，年内分配不均匀程度多年来变化不大；年均径流在 1981 年可能发生突变；主要存在 19a 显著变化周期。

本文揭示出了澜沧江流域 62a 以来年径流演变规律。由于篇幅所限，在进行突变分析和周期分析时，仅采用了一种分析方法，并没有通过多种方法对其突变点和周期进行互相验证，尤其是突变点，得到的只是可能突变点，可以采用多种方法，从而确定其突变特性。本文并没有进一步研究影响径流变化的各种因素，特别是人为因素，这是在以后的工作中需要进一步开展的。

基金项目

国家十二五科技支撑计划项目：澜沧江流域水电开发安全与高效利用系统集成与示范(2013BAB06B04)。

参考文献 (References)

[1] 山成菊, 董增川, 付晓花, 方庆, 刘晨, 刘倩. 近 50 年来滦河流域径流演变规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 4: 5-8, 12.
SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, FANG Qing, LIU Chen and LIU Qian. Rules of runoff variation in Luanhe River Basin in recent 50 years. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 4: 5-8, 12. (in Chinese)

[2] 杨贵羽, 周祖昊, 秦大庸, 姜乃迁, 王国庆. 三川河降水径流演变规律及其动因分析[J]. 人民黄河, 2007, 2: 42-44.
YANG Guiyu, ZHOU Zuhao, QIN Dayong, JIANG Naiqian and WANG Guoqing. Evolution of rainfall-runoff and motive analysis in Sanchuan River. Yellow River, 2007, 2: 42-44. (in Chinese)

[3] 李丽娟, 郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. 地理学报, 2000, 3: 309-317.
LI Lijuan, ZHENG Hongxing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in north China—A case study in the Chaobaihe River. Acta Geographica Sinica, 2000, 3: 309-317. (in Chinese)

[4] 邓育仁, 丁晶, 杨荣富. 中国主要河流年径流序列随机变化基本规律的初步研究[J]. 水科学进展, 1990: 13-21.
DENG Yuren, DING Jing and YANG Rongfu. Stochastic variations of annual runoff data for the main rivers in China. Advances in Water Science, 1990: 13-21. (in Chinese)

[5] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 3: 416-421.
XU Dongxia, ZHANG Guangxin and YIN Xiongrui. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956-2006. Advances in Water Science, 2009, 3: 416-421. (in Chinese)

[6] 陈茜, 孔晓莎. 澜沧江–湄公河流域基础资料汇编[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2000.
CHEN Qian, KONG Xiaosha. Compilation of basic data in Lancang-Meigong River. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing Press, 2000. (in Chinese)

[7] 何大明, 冯彦, 胡金明, 等. 中国西南国际河流水资源利用与生态保护[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
HE Daming, FENG Yan, HU Jinming, *et al*. Water resources utilization and ecological protection of international rivers in southwest China. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

[8] 何大明. 澜沧江–湄公河水文特征分析[J]. 云南地理环境研究, 1995, 1: 58-74.
HE Daming. Analysis on the hydrological characteristics of Lancang-Meigong River. Yunnan Geographic Environment Research, 1995, 1: 58-74. (in Chinese)

[9] 宋晓林. 1950s 以来挠力河流域径流特征变化及其影响因素[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012.
SONG Xiaolin. Variation of hydrological regimes and its driving forces of Naolin River since 1950s. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences in the Full Acquirement for the Degree of Doctor of Philosophy, 2012. (in Chinese)

[10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)

[11] BURN, D. H., ELNUR, M. A. H. Detection of hydrologic trends and variability. Journal of Hydrology, 2002, 255(1): 107-122.

http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00514-5

[12] LIBISELLER, C., GRIMVALL, A. Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. Environmetrics, 2002, 13(1): 71-84. http://dx.doi.org/10.1002/env.507

[13] MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945: 245-259. http://dx.doi.org/10.2307/1907187

[14] 轩玮, 李翀, 赵慧颖, 廖文根. 额尔古纳河流域近 50 年水文气象要素变化分析[J]. 水文, 2011, 5: 80-87.
XUAN Wei, LI Chong, ZHAO Huiying and LIAO Wengen. Analysis of the meteorological and hydrological changes of Argun River Basin in recent 50 years. Journal of China Hydrology, 2011, 5: 80-87. (in Chinese)

[15] CAHILL, A. T. Determination of changes in streamflow variance by means of a wavelet-based test. Water Resources Research, 2002, 38(6). http://dx.doi.org/10.1029/2000WR000192