

Analysis of Runoff Evolution Law of Tarim River Basin*

Chaoji Da, Qiang Huang, Yimin Wang

Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an
Email: dachaoji@126.com

Received: Aug. 12th, 2012; revised: Aug. 27th, 2012; accepted: Sep. 11th, 2012

Abstract: The uncertainty of runoff rules of Tarim River's headwaters leads to the great change of composition of Tarim River's main stream. To analyze the runoff rules of Tarim River's headwaters and trunk stream, and provide the basis for sustainable development of water resources, this study selects modulus coefficient K_p method, Morlet wavelet analysis method and Kendall rank test model to analyze the abundance, cycle and trends annual runoff rules of headwaters and Alar hydrological station (1958-2007) at main stream of Tarim River. The results show that, the frequency synchronization of abundance of headwaters and main stream is 26%. The existing cycles is 17-year cycle, the runoff trend of headwaters are increasing or decreasing, while decreasing at main stream.

Keywords: Runoff Rules; Cycle; Trend; Variation; Tarim River

塔里木河流域径流演变规律分析*

达朝吉, 黄 强, 王义民

西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安
Email: dachaoji@126.com

收稿日期: 2012年8月12日; 修回日期: 2012年8月27日; 录用日期: 2012年9月11日

摘 要: 塔里木河各源流的径流规律不完全一致, 导致了塔里木河干流水源组成变化比较大。为了认识塔里木河流域的源流和干流径流规律的特点, 为流域的水资源可持续发展提供依据, 采用模比系数 K_p 值法、Morlet 小波分析法、坎德尔(Kendall)秩次检验法分别对塔里木河源流和干流阿拉尔站(1958~2007)年径流的丰枯变化、周期性、趋势性展开分析, 经计算分析, 塔里木河源流和干流丰枯同步频率为 26%; 周期尺度表现相对一致, 存在 17 年的周期成分, 径流趋势呈现不同, 源流有增有减, 干流则递减。

关键词: 径流规律; 周期; 趋势; 变异; 塔里木河

1. 引言

塔里木河是我国最长的内陆河, 目前的塔里木河流域, 仅包括阿克苏河、和田河、叶尔羌河及塔里木

河干流, 在人为调节下, 孔雀河有部分水量下泄汇入塔里木河^[1]。干流阿拉尔断面水量由和田河, 阿克苏河, 叶尔羌河组成。近年来, 人类活动不断加剧, 直接干预了塔里木河原有的生态环境, 特别是对源流向干流的水量补给产生了严重的影响。

本文对塔里木河的两源流叶尔羌河与和田河(由于资料限制, 未分析阿克苏河), 以及干流的阿拉尔断

*基金项目: 公益性行业科研专项经费项目(201101049, 201101043); 陕西省重点实验项目(08JZ54, 11JS077); 陕西省教育厅科技项目(2010JK705)。

作者简介: 达朝吉(1985-), 男, 籍贯甘肃, 西安理工大学硕士研究生, 从事水资源系统工程研究。

面径流规律展开分析, 旨在研究其源流和干流水文规律联系与区别, 以便为后续基于生态保证条件下的塔里木河水资源合理配置及利用奠定基础。

2. 丰枯变化

根据源流和干流(1958~2007)年径流资料计算出模比系数 K_p 值^[2], 在表 1 中给出的区间内查找出当年来水量的丰、平、枯程度, 丰枯同步状况见图 1。

图 1 显示, 塔里木河源干流(1958~2007)丰枯同步状况, 其中叶尔羌河与塔里木河阿拉尔站丰枯同步频率为 32%, 和田河与阿拉尔站丰枯同步频率为 44%; 叶尔羌, 和田、阿拉尔丰枯同步频率为 26%。

3. 周期性分析

水文现象在时间变化上具有周期性和随机性的特征, 其中天然径流量的周期性一直是水文学研究的主要内容^[3-5]。

3.1. 小波分析原理

小波分析的理论最初是由 Morlet 提出的^[6]。小波分析的巨大优势在于借助时频局部化功能剖析时间

序列内部精细结构。这里采用 Morlet 小波作为小波母函数进行小波变换, Morlet 小波的基本形式为式(1), 对于给定的小波函数 $\psi(t)$, 水文时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换系数为式(2), 小波方差为式(3)。

$$\psi(t) = e^{ict} \left(e^{-\frac{t^2}{2}} - \sqrt{2}e^{-\frac{c^2}{4}}e^{-t^2} \right) \quad (1)$$

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

$$W_f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (3)$$

由标准化的水文序列 $f(t)$ 计算小波变换系数 $W_f(a, b)$, 绘制以年份 b 为横坐标, 不同时间尺度 a 为纵坐标的小波系数等值线图及小波系数变化曲线; 根据小波变换系数计算小波方差 $W_f(a)$, 并绘制方差图。

3.2. 小波分析结果

使用 Morlet 小波分析方法, 对塔里木河源流、干流(1958~2007)年径流量序列施行小波分解, 进行多时间尺度分析。

Table 1. The critical table of modulus coefficient K_p
表 1. 模比系数 K_p 判别表

丰枯程度	丰水年		平水年	枯水年	
	特丰	偏丰		偏枯	特枯
相应的 K_p 值	$K_p \geq 1.20$	$1.10 \leq K_p < 1.20$	$0.90 \leq K_p < 1.10$	$0.80 \leq K_p < 0.90$	$K_p < 0.80$

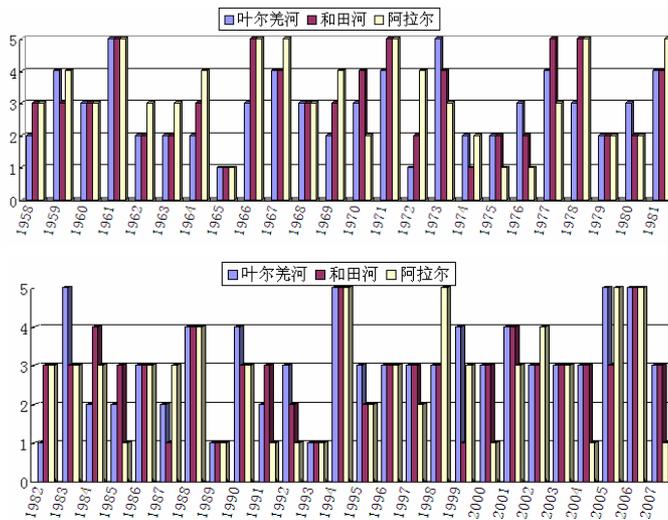


Figure 1. Yarkand River, Hotan River and the Alar section runoff synchronization status map
图 1. 叶尔羌河、和田河及阿拉尔断面径流丰枯同步状况图

小波方差图反映了能量随尺度的分布, 可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度, 对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度, 用以反映时间序列的主要周期。

图2显示了叶尔羌河, 和田河, 塔里木河干流阿拉尔断面年径流小波方差变化曲线图, 由于阿克苏河为入境河流, 资料获取难度大, 在此未做分析, 经查阅相关资料, 阿克苏河主要存在18年和22年的周期尺度^[7]。由图2分析知, 叶尔羌河、和田河周期时间尺度基本一致, 存在28年和17年周期成分。阿拉尔站分别为准28年、准17年和准8年的周期成分。三站第一峰值对应时间尺度均为准28年, 结合序列长度, 28年尺度周期无法验证, 故定义17年为塔里木河流域年径流量最强准振荡周期, 为径流量变化的第一主周期。

不同时间尺度下的小波系数, 可以反映系统在该时间尺度的变化特征: 正的小波系数对应于偏多期, 负的小波系数对应于偏少期, 小波系数为零对应着突变点; 小波系数绝对值越大, 表明该时间尺度变化越显著。从小波系数等值线图中也可以看出不同尺度下的丰枯位相结构, 据此可判断降水变异点出现的年份。

图3为年径流量在主周期尺度下的小波系数变化曲线, 对图分析结果列于表2。

在17年尺度周期上则分别经历了三次波峰、两次波谷和四次突变, 阿拉尔年径流在8年尺度周期上分别经历了六次波峰、五次波谷和十次突变。塔里木河源干流年径流序列存在基本一致的时间尺度变化特征, 不同的时间尺度对应有不同的丰枯相位的变化, 周期尺度越短, 径流的被扰动性约大, 变化越敏感。

图4是1958~2007年塔里木河源干流年径流距平Morlet小波变换系数的实部, 可以看出, 年径流变化存在着明显的时间尺度的周期性变化。在17年时间尺度上周期震荡也较显著, 年径流量也经历了多-少-多-少-多5个循环交替; 具体表现为: 1958~1968年偏丰, 但其震荡核心不明显; 1969~1975年偏枯, 震荡核心为1974年; 1976~1987偏丰, 震荡核心为1982年; 1988~1997年偏枯, 震荡核心为1992年; 1993~2007偏丰, 震荡核心不明显, 直到2007年等值线仍未闭合, 2007年以后一段时间仍将处于偏丰期。

在8年的时间尺度上周期震荡不显著。在整个分析时段中, 17年尺度的周期变化表现的非常稳定, 具有全域性。

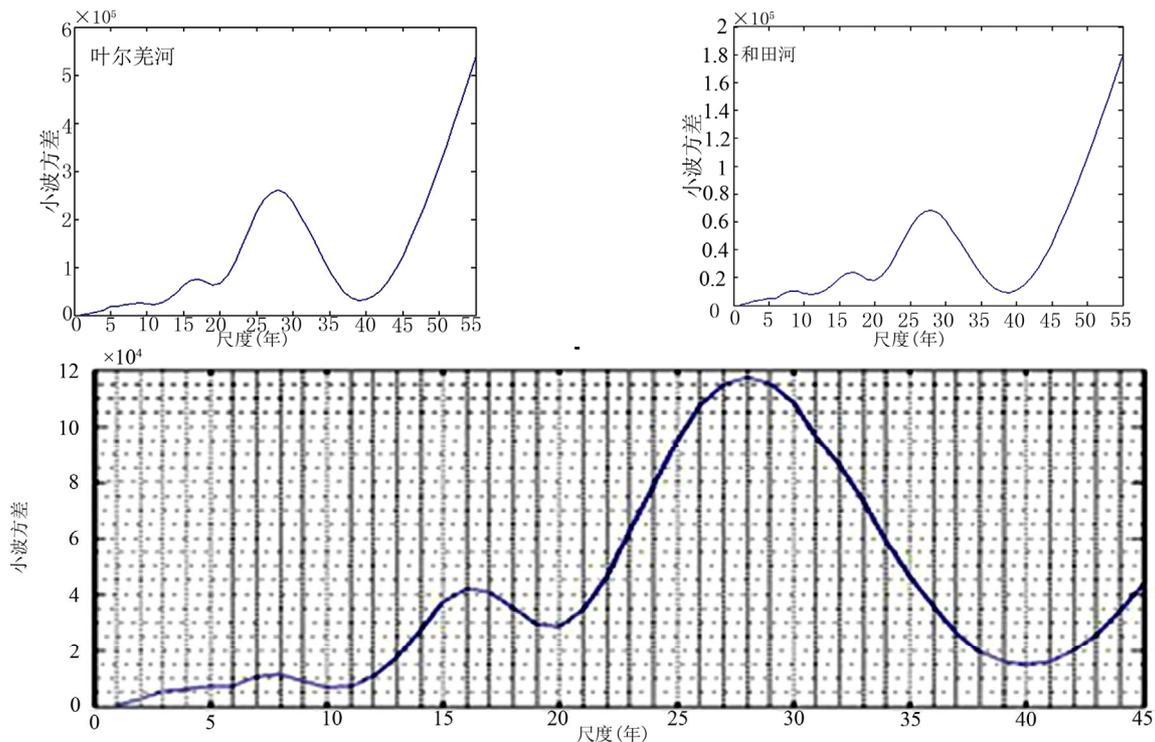


Figure 2. Wavelet variance change curve
图2. 小波方差变化曲线图

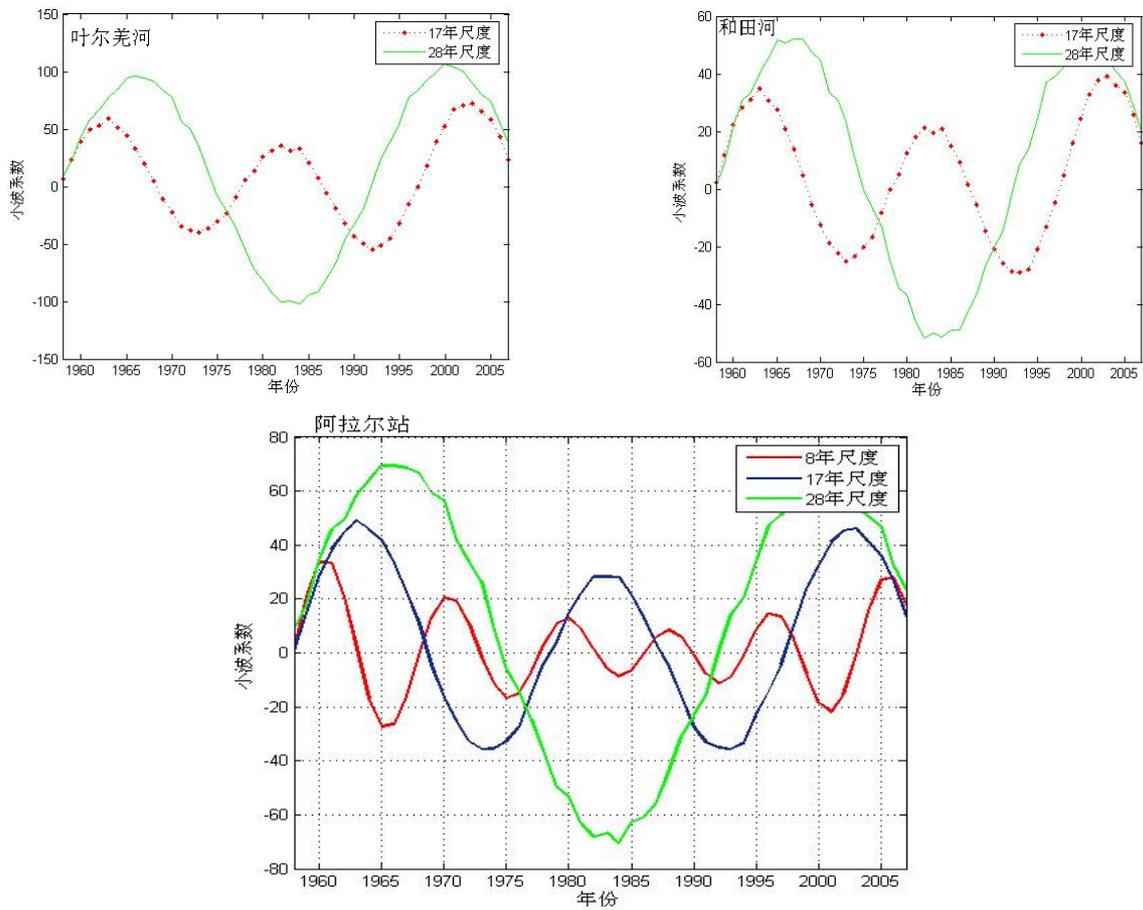


Figure 3. Wavelet coefficient curves
图 3. 小波系数变化曲线

Table 2. Wavelet coefficients curve analysis table
表 2. 小波系数变化曲线分析表

河流	主周期时间尺度	突变年份	丰枯相位结构
叶尔羌河	17	1968	丰 - 枯
		1977	枯 - 丰
		1986	丰 - 枯
		1998	枯 - 丰
		1967	丰 - 枯
和田河	17	1976	枯 - 丰
		1987	丰 - 枯
		1997	枯 - 丰
阿克苏河		资料所限, 未作分析	
塔里木河阿拉尔断面	17	1968	丰 - 枯
		1977	枯 - 丰
		1988	丰 - 枯
		1998	枯 - 丰
	8		振荡不明显

对图2小波方差图、图3小波等直线图、图4小波系数变化曲线的分析可知, 其分析结果一致: 塔里木河年径流量存在准17年和准8年的震荡周期, 其中17年第一主周期和8年第二主周期表现强烈。

4. 趋势性分析

采用坎德尔(Kendall)秩次检验法^[8]分析塔里木河阿拉尔站的年径流序列的变化趋势。对年径流序列 X_1, X_2, \dots, X_n , 先确定所有对偶值 $(X_i, X_j, i > j)$ 中的 $X_i < X_j$ 出现次数 d_i 。用下式计算其检验统计量:

$$U = \frac{\tau}{[Var(\tau)]^{1/2}} \quad \tau = \frac{4 \sum d_i}{n(n-1)} - 1 \quad Var = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (4)$$

原假设该径流序列无趋势, 根据年径流序列统计 d_i 后计算出检验统计量 U , 给定显著性水平 α , 在正态分布表中查出临界值 $U_{\alpha/2}$, 当 U 的绝对值大于其临界值, 则趋势显著; 反之, 则不显著。如检验统计量 U 大于零, 说明序列存在递增趋势; 反之, 则为递减趋势。

年径流序列趋势分析结果如表3所示。计算得到

的叶尔羌河、和田河、阿克苏河的年径流序列的检验统计量 U 分别为 -1.765 、 -0.3095 、 4.593 、 -1.396 ; 给定显著水平 $\alpha = 0.05$, 由正态分布表中查得临界值 $U_{\alpha/2} = 1.96$, 因此, 径流序列分别呈现不显著递减、不显著递减、显著递增和不显著递减。据此可以得出, 除阿克苏外, 叶尔羌河、和田河与塔里木干流有着一致的趋势成分。

5. 讨论

1) 塔里木河干流不产流, 源流的补给维持了塔里木河的存在。自20世纪80年代中期以来, 我国西北地区气温呈上升趋势, 直接导致冰雪融水增加, 径流量增大^[9]。结合气温特性, 由坎德尔(Kendall)秩次检验法分析知, 1958~2007年的50年里, 源流径流成有增有减的过程, 但是干流阿拉尔断面径流则呈递减趋势, 50年减少了25%。

2) 叶尔羌河、和田河与阿拉尔站丰枯同步频率分别为32%, 44%; 叶尔羌, 和田、阿拉尔丰枯同步频率为26%。原因可能有两方面: 大区域气候同步, 小区域气候差异; 人类活动的增强, 已严重干预了水资源的分布与循环。

3) 相对来说, 塔里木河生态环境是一个相对独立

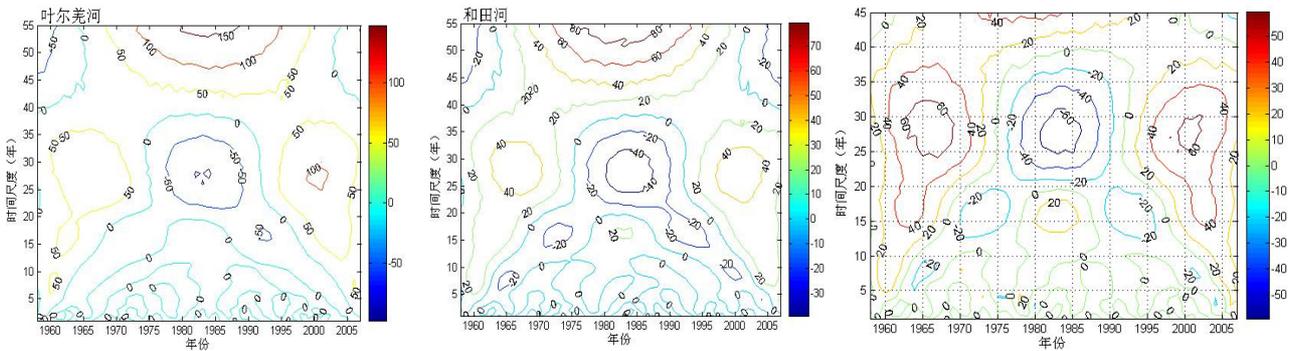


Figure 4. Contour map of wavelet transform coefficients
图4. 小波变换系数等值线图

Table 3. Trend analysis of annual runoff series
表3. 年径流序列趋势分析表

趋势分析	检验统计量 U	显著水平 α	临界值 $U_{\alpha/2}$	判别结果	趋势性
叶尔羌河	-1.7650	0.05	1.96	$ U < U_{\alpha/2}$	不显著递减
和田河	-0.3095	0.05	1.96	$ U < U_{\alpha/2}$	不显著递减
阿克苏河	4.593 ^[7]	0.05	1.96	$ U > U_{\alpha/2}$	显著递增
塔里木干流	-1.396	0.05	1.96	$ U < U_{\alpha/2}$	不显著递减

的系统, 源干流径流量序列呈现出相对一致的周期尺度, 存在 17 年的周期成分。在整个分析时段中, 17 年尺度的周期变化表现的非常稳定, 具有全域性。径流形成和变化不仅与温度变化密不可分还与降水量有关, 塔里木流域降水介于 14~19 年的周期变化, 温度表现为 13 年的周期变化^[10]。降水与温度效应的相互影响, 加上人类活动的干扰使径流呈现出不同于降水的周期成分。

4) 结合源干流突变年份, 查阅相关资料, 在 1973 年、1974 年和 1975 年, 太阳黑子急剧增加^[11], 可能影响塔里木河流域径流量的急剧变化。

5) 由于资料缺乏, 阿克苏河还需要进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 李新, 周宏飞. 人类活动干预后的塔里木河水资源持续利用问题[J]. 地理研究, 1998, 17(2): 172-177.
LI Xin, ZHOU Hongfei. Sustainable utilization of water resources of Tarim River under the influence of human activities. Geographical Research, 1998, 17(2): 172-177. (in Chinese)
- [2] 蓝永超, 沈永平, 林纾, 等. 黄河上游径流丰枯变化特征及其环流背景[J]. 冰川冻土, 2006, 28(6): 950-955.
LAN Yongchao, SHEN Yongping, LIN Shu, et al. Changes in high and low flow cycles of the upper reaches of Yellow River and their circumfluence backdrop. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(6): 950-955. (in Chinese)
- [3] 陈仁升, 康尔泗, 张济世. 小波变换在河西地区水文和气候周期变化分析中的应用[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 339-345.
CHEN Rensheng, KANG Ersi and ZHANG Jishi. Application of wavelet transform on annual runoff, yearly average air temperature and annual precipitation periodic variations in Hexi region. Advances in Earth Science, 2001, 16(3): 339-345. (in Chinese)
- [4] 王栋, 朱元甡. 基于 MEM1 谱分析的水文时间序列隐含周期特性研究[J]. 水文, 2002, 22(2): 19-23.
WANG Dong, ZHU Yuanshen. Research on cryptic period of hydrologic time series based on MEM1 spectral analysis. Hydrology, 2002, 22(2): 19-23. (in Chinese)
- [5] 李栋梁, 张佳丽, 全建瑞, 等. 黄河上游径流量演变特征及成因研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 22-28.
LI Dongliang, ZHANG Jiali, QUAN Jianrui, et al. A study on the feature and cause of runoff in the upper reaches of Yellow River. Advances in Water Science, 1998, 9(1): 22-28. (in Chinese)
- [6] MORLET, J. Sampling theory and wave propagation. 51st Annual Proceedings, Meeting of the Society of Exploration Geophysics, Los Angeles, 1981.
- [7] 叶茂, 张鹏, 王炜, 等. 塔里木河流域上游三源流径流变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(5): 10-14.
YE Mao, ZHANG Peng, WANG Wei, et al. Trend analysis of runoff variation in upper reaches of Tarim River Basin. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(5): 10-14. (in Chinese)
- [8] 王文圣, 丁晶, 金菊亮. 随机水文学(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 34-35.
WANG Wensheng, DING Jing and JIN Juliang. Stochastic hydrology (the 2nd edition). Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008: 34-35. (in Chinese)
- [9] 段建军, 王彦国, 王晓风, 等. 1957-2006 年塔里木河流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 781-791.
DUAN Jianjun, WANG Yanguo, WANG Xiaofeng, et al. Impact of climate change and human activities on the water resources and ecological environments in the Tarim River Basin in 1957-2006. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5): 781-791. (in Chinese)
- [10] 陈亚宁, 郝兴明, 徐长春. 新疆塔里木河流域径流变化趋势分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(2): 205-210.
CHEN Yaning, HAO Xingming and XU Changchun. Trend analysis of runoff variation of Tarim River Basin. Progress in Natural Science, 2007, 17(2): 205-210. (in Chinese)
- [11] 李雷, 李华, 黄强, 等. 东江流域径流演变规律研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(6): 728-732.
LI Lei, LI Hua, HUANG Qiang, et al. Analysis on runoff evaluation law of Dongjiang Basin. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(6): 728-732. (in Chinese)