

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.02.004

丹江口水库天然入库径流演变规律研究

李响, 邹宁, 吕孙云

(长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

摘要: 丹江口水库是南水北调中线工程水源地, 分析研究其天然入库径流量演变特征具有重要意义。通过对比分析丹江口水库天然入库径流量的长系列(1956年-2012年)和短系列(1956年-1998年)数据, 发现长系列多年平均年径流量较短系列偏少1.34%, 3月-5月的偏差在6%~10%, 1月-2月、6月-12月的偏差均在4%以内, 丹江口水库后期规模设计采用的短系列代表性仍较好。多种统计检验方法结果表明, 4月-5月径流量存在显著的减少趋势, 其他月份和年径流量没有明显变化; 小波分析和滑动平均过程分析结果显示, 年径流量具有23 a(主周期)、9 a尺度的周期性变化特征; 20世纪90年代初至2002年入库径流量持续偏少反映的只是其丰枯周期性变化过程中的枯水期。

关键词: 丹江口水库; 天然入库径流; 演变特征

中图分类号: TV121 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)02-0206-05

Variation of natural inflow runoff in the Danjiangkou Reservoir

LI Xiang, ZOU Ning, LYU Sunyun

(Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Danjiangkou Reservoir (DKJR) is the water source area of the Middle Route of South to North Water Diversion Project, and it is very important to investigate the variation trend of natural inflow runoff of DKJR. Compared to the natural inflow runoff series between 1956 and 1998 (short series), the average annual inflow runoff between 1956 and 2012 (long series) decreased by 1.34%, and the deviation of average inflow was between 6%~8% in March, April, and May and below 4% for other months, which indicated that the short inflow runoff series adopted by the design of DKJR is good and representative. The different statistical analyses showed that inflow runoff has significant decreasing trend in April and May, but no apparent trend in other months. The wavelet transformation and moving average analysis results indicated that the annual inflow runoff has the 23 year and 9 year periodic variation regularities. Moreover, the continuous decreasing of inflow runoff from 1990s to 2002 reflected the dry period in the variation between the wet and dry periods.

Key words: Danjiangkou Reservoir; natural inflow runoff; variation trend

20世纪90年代以后, 汉江流域上游来水持续偏枯, 引起社会各界的重视。若这种连续性枯水是趋势性的, 将对流域水资源开发利用和南水北调中线工程产生极大的不利影响。南水北调中线一期工程于2014年12月12日顺利通水, 丹江口水库作为南水北调中线工程水源地, 进一步分析研究其天然入库径流量演变规律十分必要, 亦具有现实意义。

郭海晋^[1]等认为丹江口上游水资源丰富, 入库水量不会因上游工农业发展产生明显衰减。李桃英等^[2]采用1950年-2007年汉江上游安康水文站的实测径流资料, 认为20世纪90年代以前, 汉江上游径流呈现增加的趋势, 但到了1990年后径流量锐减, 进入21世纪后径流量也在减少, 但减少趋势

有所缓解, 主要是降水量减少、气温增高、下垫面变化、耗水增加和水资源开发利用等方面因素综合影响的结果。张洪刚等^[4]研究认为汉江上游降水和丹江口水库天然入库径流的长期变化趋势均不显著。李明新等^[5]采用1933年-2000年丹江口天然入库径流, 认为20世纪90年代以来, 水源区连续枯水年并非表示汉江上游径流量呈减小趋势, 而是处于周期变化中的枯水期。

陈华等^[6]分析发现, 汉江流域年径流量从20世纪80年代的丰水期进入90年代的枯水期, 春季和冬季汉江流域许多子流域径流量呈下降趋势; 丹江口水库上游降水从20世纪80年代多雨期进入90年代少雨期; 上游气温同北半球

收稿日期: 2013-08-19 修回日期: 2014-08-27 网络出版时间: 2014-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150318.1411.003.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目“长江中游通江湖泊江湖关系演变过程与机制”(2012CB417001); 水利部公益性行业专项经费项目“长江流域水资源演变规律及变化趋势分析”(201101003)

作者简介: 李响(1983-), 男, 安徽颍上人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源设计与研究。E-mail: lix@cjh.com.cn

气温同步上升,而上游降水变化受北半球气温升高的影响不断减少,丹江口水库上游地区自20世纪90年代以来连续干旱同全球气候变暖有一定关系。张利平等^[8]研究认为,1961年-2000年南水北调中线工程水源区降水量无显著变化趋势,气温呈缓慢上升趋势,径流量呈缓慢减少趋势,未来气候变化对南水北调中线工程水源区径流变化影响不大,总体有利于南水北调中线工程的调水。赵红莉等^[9]指出,20世纪90年代至今丹江口入库径流量的持续走低,并不说明流域水资源衰减趋势具有显著性,而是径流周期性变化的表现,上游降水变化是丹江口入库径流变化最主要、最直接的影响因素。

可以看出,以上针对汉江上游南水北调中线工程水源地的径流、降水、气温等要素的研究结果,总体认为汉江上游径流不存在趋势性变化规律,而1991年是汉江上游径流的突变点,20世纪90年代的连续枯水年只是处于周期变化的枯水期。但是,上述研究采用的资料起始时间却并不相同,截止于2008年或更早。为更好地为丹江口水库后期规模蓄水和南水北调中线一期工程调水提供技术支持,本文采用丹江口水库1956年-2012年天然入库径流量系列,对比丹江口水利枢纽加高设计采用的1956年-1998年系列,全面分析丹江口水库天然入库径流量的年内年际变化特征、长历时变化趋势和多时间尺度特征。

1 丹江口水库天然入库径流

丹江口以上为汉江流域上游。丹江口水利枢纽控制流域面积95 200 km²,约占汉江全流域的60%。丹江口水库天然入库径流量是根据丹江口水库出库控制站黄家港水文站实测资料、水库蓄变量,并考虑上游水库调蓄、取用水等影响进行推算(图1)。丹江口水库天然入库径流量1956年-2012年系列(以下简称“长系列”)、1956年-1998年系列(以下简称“短系列”)的多年平均年径流量分别为382.6亿m³、387.8亿m³,长短系列相差1.34%,其中最大年入库径流量为1964年的795.1亿m³,最小年入库径流为1997年的169.6亿m³,极值比为4.9。

丹江口水库天然入库径流以汛期为主,长、短系列的5月-10月来水量分别占年来水总量的78.2%、77.4%,且年来水有5月、7月和9月三个明显的峰值,对应汉江上游

的春汛、夏汛和秋汛,来水分别占年内的9.1%、17.6%、11.6%和9.6%、17.4%、11.3%。长系列与短系列天然入库径流量相比,1月、2月、6月、11月偏少2%~4%,3月、4月、5月、7月分别偏少6.1%、9.4%、6.4%、0.2%,8月、9月、10月、12月分别偏多3.2%、0.6%、1.0%、2.8%;各月偏差均在10%以内,除3月-5月之外的其他月份偏差均在4%以内。此外,长、短系列年内分配差异不大,详见图2、表1。

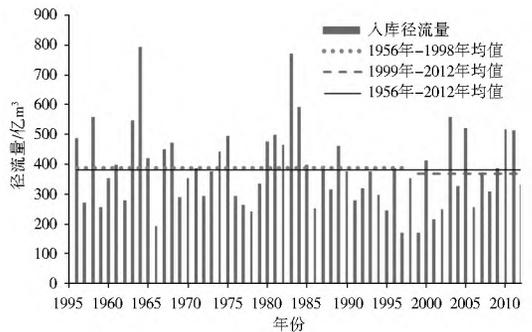


图1 丹江口水库天然入库年径流量

Fig. 1 Annual natural inflow runoff of DJKR

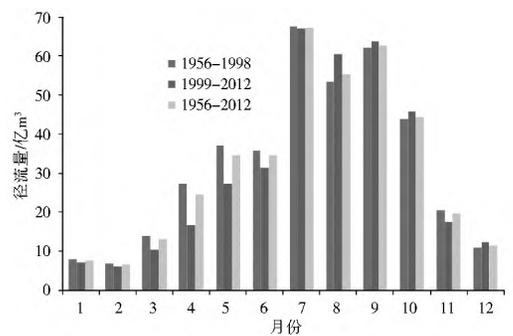


图2 丹江口水库长短系列天然入库月径流量

Fig. 2 Monthly natural inflow runoff (long and short series) of DJKR

从长系列来看,1960年、1980年为丰水期,1970年、1990年和2000年为枯水期,但经历过1990年和2000年初的持续枯水年后,2003年-2012年来水偏丰;相对于多年平均径流量,除1960年的6月-8月和1980年的12月之外的其余各月均偏多,而除1970年的2月、6月、10月和1990年的6月和2000年的8月之外的其余各月均偏少,2003年-2012年1月、7月-10月、12月偏多,其余月份偏少。

表1 丹江口水库天然入库径流量不同年代均值及偏差变化

Tab. 1 Mean value and deviation of annual natural inflow runoff of DJKR in different decades

年代	类别	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
1956-1960	径流量/亿m ³	7.3	6.5	14.2	28.0	32.4	39.6	91.1	64.8	49.1	23.1	18.3	11.2	385.5
	偏差(%)	-6.4	-3.8	8.6	13.2	-6.7	14.0	35.1	17.3	-21.5	-47.9	-7.8	-2.3	0.8
1961-1970	径流量/亿m ³	8.5	6.8	14.8	37.2	49.1	27.9	59.5	41.0	77.3	58.5	25.0	13.9	419.5
	偏差(%)	8.8	1.9	13.5	50.3	41.4	-19.6	-11.7	-25.7	23.5	31.6	26.2	21.5	9.6
1971-1980	径流量/亿m ³	7.7	7.2	12.2	22.5	33.8	37.2	61.1	44.0	55.7	49.0	19.4	10.3	360.1
	偏差(%)	-0.7	6.7	-6.8	-9.0	-2.5	7.2	-9.4	-20.2	-11.0	10.2	-2.0	-9.7	-5.9
1981-1990	径流量/亿m ³	8.7	7.9	14.9	26.5	39.0	38.6	83.2	68.8	82.1	51.0	19.9	11.2	451.9
	偏差(%)	12.5	17.5	14.3	7.2	12.5	11.1	23.3	24.6	31.2	14.8	0.8	-1.8	18.1
1991-2000	径流量/亿m ³	6.4	5.3	11.8	19.2	24.2	38.6	55.4	51.7	31.0	31.0	18.2	8.9	301.8
	偏差(%)	-17.4	-20.9	-9.6	-22.3	-30.3	11.1	-17.9	-6.4	-50.4	-30.2	-8.0	-22.3	-21.1
2001-2010	径流量/亿m ³	7.1	6.3	11.4	19.5	30.4	30.4	66.4	63.4	61.6	46.5	15.9	11.5	370.3
	偏差(%)	-8.4	-6.7	-13.0	-21.2	-12.5	-12.6	-1.5	14.7	-1.5	4.7	-19.7	0.2	-3.2
2003-2012	径流量/亿m ³	8.0	6.5	12.0	18.3	28.2	26.5	75.0	71.7	80.7	48.3	19.5	13.9	408.5
	偏差(%)	2.4	-3.6	-8.5	-26.0	-18.8	-23.6	11.2	29.9	28.9	8.7	-1.4	21.6	6.8
1956-2012	径流量/亿m ³	7.8	6.7	13.1	24.7	34.7	34.7	67.4	55.2	62.6	44.4	19.8	11.4	382.6

2 丹江口水库天然入库径流量变化趋势

本次采用 Mann Kendall 非参数检验(以下简称“M-K 检验”)和随机水文学中传统的数理统计检验如 Kendall 秩次相关检验(以下简称“Kendall 检验”)、Spearman 秩次相关检验(以下简称“Spearman 检验”)、线性回归趋势检验(以下简称“LRT 检验”)等方法,检验分析丹江水库长系列天然年、月入库径流量长期变化趋势,检验结果见表 2。其中, M-K 检验和 Kendall 检验统计量符合标准正态分布, Spearman 检验和 LRT 检验符合 t 分布; M-K 检验、Kendall 检验、LRT 检验统计量为正时具有上升趋势,为负时具有下降趋势, Spearman 检验统计量为正时具有下降趋势,为负时具有上升趋势;当检验统计量绝对值大于 $U_{\alpha/2}$ 或 $t_{\alpha/2}$ 时,序列具有显著变化趋势。在显著性

水平 $\alpha=0.05$ 下, $U_{\alpha/2}=1.96$, $t_{\alpha/2}(57-2)=2.004$ 。

由表 2 可以看出,不同检验方法统计量值的大小主要是由于不同计算原理和方法导致,但统计检验结果基本一致。年径流量和 1 月-5 月、10 月-12 月径流量均表现出减少趋势,但在 95% 置信水平下,只有 4 月和 5 月径流量的减少趋势显著。丹江口水库长系列天然入库年径流量无显著变化趋势,但局部时段仍可以看出其上升、下降过程:系列从 1956 年-1962 年、1980 年-1985 年、2003 年-2012 年等时段虽含有一些小波动,但整体处于上升段;至 1963 年-1979 年、1986 年-2002 年等时段整体处于下降段(图 3)。从年入库径流量模比差积曲线图 4 中可以看出,长系列基本包含了 1956 年-1979 年、1979 年-2002 年两个丰枯循环期,2003 年-2012 年处于丰枯循环期的上升段。

表 2 丹江水库天然入库年月径流量长期变化趋势检验统计量值

Tab. 2 Statistics of long term trend of annual and monthly natural inflow runoff of DJKR

检验方案	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年
Mann Kendall 非参数检验	-0.82	-1.14	-0.98	-3.37	-2.13	0.03	-0.08	1.44	0.03	-0.73	-1.47	-1.15	-0.82
Kendall 秩次相关检验	-0.84	-1.18	-0.99	-3.41	-2.18	0	-0.11	1.42	0.03	-0.76	-1.47	-1.2	-0.83
Spearman 秩次相关检验	0.19	2.48	1.3	3.27	2.17	-0.61	0.56	-1.23	0.31	1.33	1.77	1.35	0.82
线性回归趋势检验	-0.75	-0.73	-1.3	-3.74	-2.06	-0.34	-0.4	1.05	-0.27	-0.72	-1.18	-0.51	-1.02

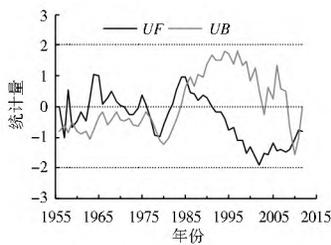


图 3 年径流量 M-K 检验统计变化

Fig. 3 M-K test results of annual inflow runoff

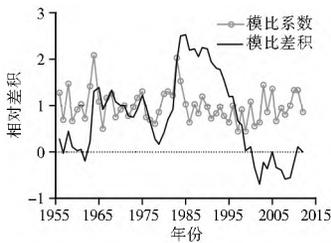


图 4 年径流量模比差积曲线

Fig. 4 Modulus difference product curves of annual inflow

从图 5 和图 6 可以看出,丹江口水库 4 月、5 月天然入库径流量系列均在 1991 年发生突变,4 月份入库径流量系列至 1995 年以后,一直处于下降趋势,至 1998 年后下降趋势显著;5 月份天然入库径流量系列至 1990 年以后,基本一直处于下降趋势,至 2000 年-2001 年和 2004 年以后下降趋势显著。

从图 7 和图 8 的模比差积曲线图中,也可以得到类似于 M-K 检验结果显示的规律,4 月份入库径流量系列至 1992 年-2012 年基本一直处于下降趋势,5 月入库径流量至 1991 年-2008 年基本一直处于下降趋势。4 月份和 5 月份入库径流

量的线性趋势直线斜率分别为 -0.325 、 -0.317 ,下降趋势很显著(见图 9、图 10)。综合分析,丹江口水库 4 月、5 月天然入库径流量系列存在显著的下降趋势。

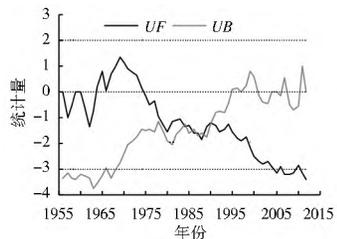


图 5 4 月份径流量 M-K 检验统计变化

Fig. 5 M-K test results of inflow runoff in April

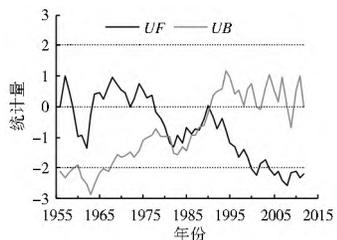


图 6 5 月份径流量 M-K 检验统计变化

Fig. 6 M-K test results of inflow runoff in May

3 丹江口水库天然入库径流量多时间尺度特征

连续小波变换能够识别序列的一般周期结构,阐明其多时间尺度特征。丹江口水库长系列天然入库年径流量的小波变换系数实部时频变化图见图 11,可以分析出序列存在明显的年际和年代际变化,存在 7~10 a、20~25 a、38~43 a 三

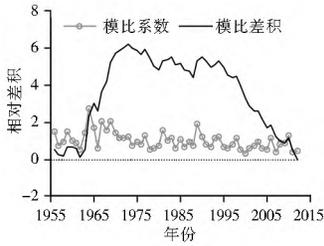


图7 4月份径流量模比差积曲线

Fig. 7 Modulus difference product curves of inflow runoff in April

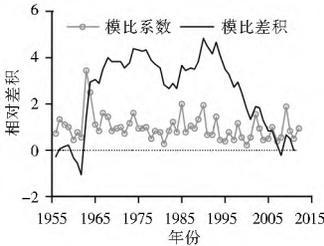


图8 5月份径流量模比差积曲线

Fig. 8 Modulus difference product curves of inflow runoff in May

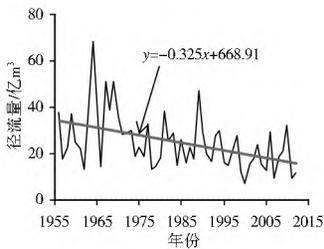


图9 4月份径流量线性变化趋势

Fig. 9 Linear variation trend of inflow runoff in April

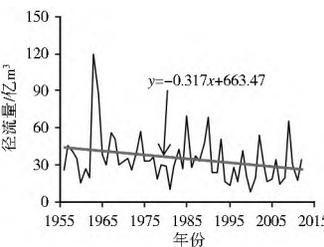


图10 5月份径流量线性变化趋势

Fig. 10 Linear variation trend of inflow runoff in May

类尺度的周期性变化规律;从小波变化方差图(图12)可以看出,丹江口水库长系列天然入库年径流量具有9 a、23 a、41 a时间尺度的周期变化特征,其中23 a为其第一周期(主周期)。

从长系列天然入库年径流量序列滑动平均图(图13)可以看出,23 a和9 a尺度滑动平均过程的周期性特征较显著;由于系列长度仅57 a,41 a滑动平均过程的周期性变化特征并不明显。综合分析小波分析和滑动平均过程结果,丹江口水库天然入库年径流量序列具有23 a和9 a尺度的周期性变化特征,41 a尺度的周期特征有待资料系列延长后进一步研究。

结合丹江口水库天然入库径流量的变化趋势和周期性变化特征,说明丹江口水库天然入库径流量20世纪90年代初至2002年的持续下降只是其丰枯周期性变化的枯水期。

4 结论

(1) 丹江口水库天然入库径流量长系列(1956年-2012

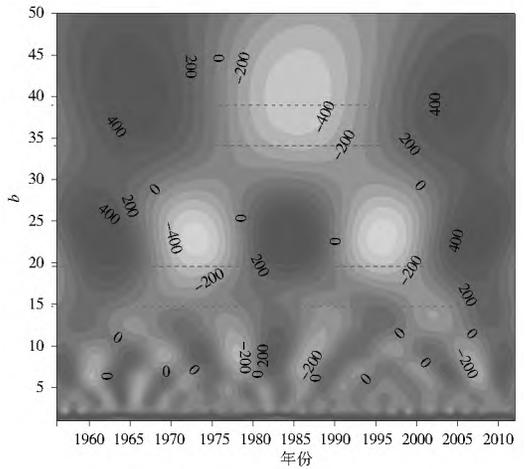


图11 年径流量小波变化实时频谱

Fig. 11 Real part frequency of continuous wavelet spectrum of annual inflow runoff

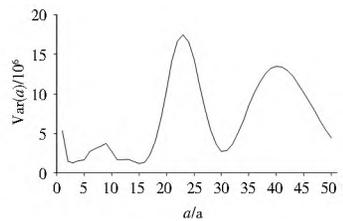


图12 年径流量小波方差图

Fig. 12 Wavelet variance diagram of annual inflow runoff

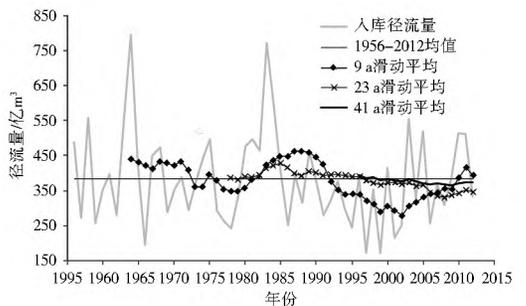


图13 年径流量滑动平均图

Fig. 13 Moving average diagram of annual inflow runoff

年)与短系列(1956年-1998年)相比,多年平均年入库径流量偏少1.34%,3月-5月的偏差在6%~10%,1月-2月、6月-12月的偏差均在4%以内,说明丹江口水利枢纽加高设计采用的短系列代表性仍较好,采用短系列进行的丹江口水库南水北调供水和汉江中下游干流供水供需平衡分析计算结果较可靠。

(2) 丹江口水库天然入库径流以汛期为主,5月-10月来水量占年内来水总量78%左右,有着明显的春汛(5月)、夏汛(7月)和秋汛(9月);1960年、1980年为丰水期,1970年、1990年和2000年为枯水期;在1990年和2000年初的持续枯水期后,2003年-2012年为丰水期。

(3) 在95%置信水平下,丹江口水库天然入库年径流量和1月-3月、10月-12月径流量均表现出微弱下降趋势,4月份和5月份径流量下降趋势显著,其中1991年为4月和5月径流量系列的突变点。

(4) 丹江口水库天然入库年径流量具有23 a(主周期)和9 a尺度的周期性变化特征。

(5) 丹江口水库天然入库径流量 20 世纪 90 年代初至 2002 年的持续下降只是其丰枯周期性变化过程中的枯水期。

参考文献(References):

- [1] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 丹江口水利枢纽大坝加高工程可行性研究报告[R]. 2003. (Changjiang Water Resources Commission Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. Feasibility study report of Danjiangkou hydroelectric project[R]. 2003. (in Chinese))
- [2] 郭海晋, 金蓉玲. 丹江口水库上游水资源现状及变化趋势分析[J]. 自然资源, 1997(1): 28-33. (GUO Haijin, JIN Rongling. Analysis of present state of water resources and its changing tendency for the upstream of Danjiangkou reservoir[J]. Natural Resources, 1997(1): 28-33. (in Chinese))
- [3] 李桃英, 殷峻暹, 张丽丽, 等. 汉江上游径流演变趋势及影响因素分析[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 19-22. (LI Taoying, YIN Junxian, ZHANG Lili, et al. Analysis on runoff evolution trend of upper Hanjiang River and its influential factors[J]. Yangtze River, 2011, 42(9): 19-22. (in Chinese))
- [4] 张洪刚, 王辉, 徐德龙, 等. 汉江上游降水与径流变化趋势研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 27-30. (ZHANG Honggang, WANG Hui, XU Delong, et al. Changing tendency of water resources for upper Hanjiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(5): 27-30. (in Chinese))
- [5] 李明新, 吕孙云, 徐德龙. 汉江上游水资源量变化趋势分析[J]. 人民长江, 2008, 39(17): 49-52. (LI Mingxin, LYU Sunyun, XU Delong. Trend of water resources for Hanjiang upstream[J]. Yangtze River, 2008, 39(17): 49-52. (in Chinese))
- [6] 陈华, 郭生练, 郭海晋, 等. 汉江流域 1951-2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(13): 340-345. (CHEN Hua, GUO Shenglian, GUO Haijin, et al. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(13): 340-345. (in Chinese))
- [7] CHEN Hua, GUO Shenglian, XU Chongyu, et al. Historical temporal trends of hydroclimatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin[J]. Journal of hydrology, 2007, 344: 171-184.
- [8] 张利平, 胡志芳, 秦琳琳, 等. 2050 年前南水北调中线工程水源区地表径流的变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 383-386. (ZHANG Liping, HU Zhifang, QIN Linyin, et al. Surface runoff changes in the water source area for the Middle Route Project of South to North Water Transfer before 2050[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(6): 383-386. (in Chinese))
- [9] 赵红莉, 陈宁, 蒋云钟, 等. 汉江上游水资源时空演变及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 90-93, 185. (ZHAO Hongli, CHEN Ning, JIANG Yunzhong, et al. Temporal spatial evolution of water resources in the upstream of the Hanjiang River basin and the cause analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 90-93, 185. (in Chinese))

(上接第 197 页)

- [11] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The Influence of Autocorrelation on the Ability to Detect Trend in Hydrological Series[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(9): 1807-1829.
- [12] Michaelides S, Pashiardis S. Monitoring Drought in Cyprus During the 2007-2008 Hydro Meteorological Year by Using the Standardized Precipitation Index (SPI)[J]. European Water, 2008, 23(24): 123-131.
- [13] 谭学志, 粟晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 224-226. (TAN Xue zhi, SU Xiao ling, SHAO Dong guo. Analysis of spatial and temporal characteristics to meteorological drought in Guanzhong Region of Shanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 224-226. (in Chinese))