

Analysis of the Change Trend and Cycle Statistics of Runoff in the Upstream of Hanjiang River

Honggang Zhang¹, Pan Liu², Xiang Li³, Jie Zhou⁴, Hua Chen²

¹Bureau of International Cooperation, Science & Technology of The Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan

²Wuhan University, Wuhan

³Bureau of Hydrology of Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan

⁴University of California, Los Angeles, USA

Email: zhg213@163.com

Received: Sep. 15th, 2014; revised: Sep. 29th, 2014; accepted: Oct. 13th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Continuous dry of the Hanjiang basin during 1990s has aroused concerns about security of the middle route project of south to north water diversion project. As a result, it is very important to analyze the change trend and cycle statistics of runoff series in the upstream of Hanjiang. Mann-Kendall, Spearman and Linear regression analyses were used to analyze the change trend of runoff series. It is shown that on the level of significance of 0.05, the runoff and precipitation trends were not significant. Wavelet analysis was used to analyze the cycle statistics. The result shows that runoff series has 7 to 10, and 20 to 25 years of the time scale of the cyclical change rule. Research shows that the generation of continuous dry years in the Hanjiang basin is mainly due to a decrease of precipitation, and that runoff is in periodic variation during low water period.

Keywords

Upstream of Hanjiang Basin, Danjiangkou Reservoir, Runoff Series, Trend, Cycle Period

汉江上游径流量变化趋势与周期统计分析

张洪刚¹, 刘攀², 李响³, 周捷⁴, 陈华²

作者简介: 张洪刚(1978-), 男, 山东淄博人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

¹长江水利委员会国际合作与科技局, 武汉

²武汉大学, 武汉

³长江水利委员会水文局, 武汉

⁴加州大学洛杉矶分校, 洛杉矶, 美国

Email: zhg213@163.com

收稿日期: 2014年9月15日; 修回日期: 2014年9月29日; 录用日期: 2014年10月13日

摘要

汉江流域20世纪90年代连续枯水年引起了社会各界关于南水北调中线工程调水安全的担忧, 因此对汉江上游流域的降水和径流变化趋势和周期特性进行统计分析十分必要。利用Mann-Kendall检验、Spearman检验、线性回归分析等方法分析了汉江上游流域降水、径流变化趋势, 结果表明在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 上, 汉江上游径流和降水量变化趋势均不显著。利用小波分析研究得到汉江上游径流量系列存在7~10年和20~25年两种时间尺度的周期性变化规律。研究表明20世纪90年代连续枯水年主要是由于降水减少所致, 是处于径流丰枯周期性变化过程中的枯水期。

关键词

汉江上游, 丹江口水库, 入库径流, 趋势, 周期

1. 引言

南水北调中线工程是解决北方缺水问题的重大战略工程, 工程以解决沿线 100 多个城市生活和工业用水为主要供水对象, 兼顾农业及其它用水, 建成以后经济效益和社会效益巨大。汉江上游丹江口水库作为中线工程的水源地, 其径流量的变化趋势关系到中线工程调水安全。汉江流域 20 世纪 90 年代发生连续枯水年, 引起社会各界的关注。目前已有的研究主要针对汉江上游径流、降水、气温等要素, 总体认为汉江上游径流不存在趋势性变化规律, 1991 年是汉江上游径流的突变点, 20 世纪 90 年代的连续枯水年是处于周期变化的枯水期[1]-[4]。但这些研究采用的资料起始时间多不同且系列较短, 为更好地为丹江口水库后期规模蓄水和南水北调中线工程调水提供基础支持, 本文采用丹江口水库 1956~2010 年入库径流量系列, 利用 Mann-Kendall 非参数检验、Spearman 检验、线性回归分析、小波分析等方法对汉江上游径流演变趋势及周期变化特性进行分析, 在此基础上, 探讨汉江流域 20 世纪 90 年代连续性枯水的成因, 为南水北调中线调水安全提供科学依据。

2. 方法简介

2.1. Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法, 许多学者不断应用 Mann-Kendall 方法来分析降水、径流、气温和水质等要素时间序列的趋势变化。Mann-Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 适用水文、气象等非正态分布的数据的统计分析。

在 Mann-Kendall 检验中, 原假设 H_0 : 时间序列数据 (x_1, \dots, x_n) 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本; 备择假设 H_1 是双边检验: 对于所有的 $k, j \leq n$, 且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布是不相同的, 检验的统计变量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_k)$$

其中

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： S 服从正态分布，方差 $\operatorname{Var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)]/18$ ，均值为0。这里 t 为任意给定结点的范围， \sum_t 是所有结点的和，当 n 大于10时，标准的正态统计变量 z 通过下式计算。

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

这样，在双边的趋势检验中，在给定的 α 置信水平上，如果 $|z| \geq z_{\alpha/2}$ ，则原假设是不可接受的，即在 α 置信水平上，时间序列数据存在明显的上升或者下降趋势。对于统计变量 z 大于0时，是向上趋势，小于0时，则是下降趋势。

2.2. Spearman 秩次相关检验

分析序列 x_t 与时序 t 的相关关系，在运算时， x_t 用其秩次 R_t (即把 x_t 从大到小排列时， x_t 所对应的序号) 代表， t 仍为时序 ($t=1, 2, \dots, n$)，秩次相关系数：

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^n (R_t - t)^2}{n^3 - n} \quad (3)$$

式中： n 为序列长度。

相关系数 r 是否异于零，可采用 t 检验法。统计量 $T = r \left(\frac{n-4}{1-r^2} \right)^{1/2}$ 服从自由度为 $(n-2)$ 的 t 分布。原假设无趋势，检验时，先计算得出 T ，再选择显著水平，在 t 分布表中查出临界 $t_{\alpha/2}$ ，当 $|T| > t_{\alpha/2}$ 时，拒绝原假设，说明序列随时间有相依关系，即序列趋势显著；相反，接受原假设，趋势不显著。

2.3. 线性回归分析方法

随机变量 X_i 随自变量 t 变化，满足简单的线性回归方程：

$$X_i = a + bt_i \quad (4)$$

式中： a 、 b 为回归系数，可按回归方法求出参数 a 和 b 的估计 \hat{a} 和 \hat{b} 以及 \hat{b} 的方差 S_b^2 。

通过判别回归系数 b 的正负，线性回归分析方法能被用来检测水文序列的上升或者下降的趋势。 T 检验被用来检验序列是否有显著变化趋势，定义统计变量

$$T = \frac{\hat{b}}{S_b} \quad (5)$$

给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，如果 $|T| > t_{\alpha/2}(n-2)$ ，说明该序列在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下，有显著的变

化趋势。

2.4. 小波分析方法简介

1980年,法国工程师 Morlet 在继承和发展短时傅立叶变换的基础上提出了小波分析方法,小波分析涉及小波函数和小波变换。

2.4.1. 小波函数

小波函数指的是具有震荡特性、能够迅速衰减到零的一类函数,也称基小波,其伸缩和平移构成一簇函数系:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

式中: $\psi(t)$ 为基小波,其伸缩和平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (7)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为分析小波或连续小波; a 为尺度因子,反映了小波的周期长度; b 为时间因子,反映了在时间上的平移。基本小波函数有 Mexican hat 小波、Wave 小波和 Morlet 小波等,本研究采用 Morlet 小波。

2.4.2. 小波变换

令 $L_2(\mathbb{R})$ 表示定义在实轴上、可测的平方可积函数空间,则对于信号 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其连续小波变换为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (8)$$

式中: $\overline{\psi(t)}$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭函数; $W_f(a,b)$ 称为小波系数。实际工作中,信号常常是离散的,如 $f(k\Delta t)$ ($k=1,2,\dots,N$; Δt 为取样时间间隔),则式(3)的离散形式表达为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \overline{\psi\left(\frac{k\Delta t-b}{a}\right)} \quad (9)$$

$W_f(a,b)$ 是时间序列 $f(t)$ 或 $f(k\Delta t)$ 通过单位脉冲响应的滤波器的输出,能同时反映时域参数 b 和频域参数 a 的特性。

Morlet 小波变换在水文时间序列多时间尺度分析中的应用, Morlet 小波为复数小波,其函数表达式为:

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (10)$$

式中: ω_0 为常数,且当 $\omega_0 \geq 5$ 时, Morlet 小波能满足允许性条件。复数小波较实型小波更真实反映径流的各尺度周期性的大小及这些周期在时域中的分布。复数小波变换系数的模和实部是两个重要的变量。模的大小表示特征时间尺度信号的强弱,实部可表示不同特征时间尺度信号在不同时间的强弱和位相两方面的信息。

3. 汉江上游径流量长期变化趋势

汉江上游流域为丹江口坝址以上流域,流域面积 95,200 km²,汉江上游径流量即为丹江口水库入库径流量,系根据丹江口水库出库控制站黄家港水文站实测流量、水库蓄变量,并考虑上游水库调蓄、取

用水等影响进行还原推算得到。丹江口入库径流不同年代的偏差变化计算结果如表 1 所示。从表中可以看出丹江口水库入库径流 20 世纪 80 年代是丰水期,80 年代平均径流量比多年平均径流量多 79.0 亿 m^3 ; 90 年代是枯水期, 径流量比多年平均少 71.0 亿 m^3 ; 进入 2000 年以后径流量有较大增加, 2001~2010 年丹江口平均入库径流量 370 亿 m^3 , 与 1956~2010 年多年平均径流量基本相当。

分别采用 Mann-Kendall 非参数检验、Spearman 秩次相关检验和线性回归趋势检验分析丹江水库入库径流量和汉江上游降水量长期变化趋势, 检验结果见表 2。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 查标准正态分布表得 $U_{\alpha/2} = 1.96$, t 分布表得 $t_{\alpha/2}(55-2) = 2.006$, $t_{\alpha/2}(78-2) = 1.99$ 。从表 2 可以看出, 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 各方法的检验结果基本一致, 丹江口水库入库水量和汉江上游降水量序列无明显趋势变化。

虽然丹江口水库入库径流量系列不存在显著的变化趋势, 但局部时段仍可以看出其上升、下降过程; 1956~1962 年、1980~1985 年、2003~2010 年三个时段虽含有一些小波动, 整体处于上升段; 1963~1979 年、1986~2002 年二个时段整体处于下降段(见图 1)。从年入库径流量模比差积曲线图 2 中可以看出, 长系列基本包含了 1956~1979 年、1979~2002 年两个丰枯循环期, 2003~2010 年应处于丰枯循环期的上升段。

4. 汉江上游径流量序列周期特性分析

4.1. 小波变换系数的实部

小波变换系数的实部包含给定时间和尺度下, 相对于其它时间和尺度, 信号的强度和位相两方面的

Table 1. Inflow variation of Danjiangkou Reservoir
表 1. 丹江口水库不同年代入库径流及偏差变化

年代	类别	1 季度	2 季度	3 季度	4 季度	年
1956~1960	径流量(亿 m^3)	28.0	100	205	52.6	386
	偏差(%)	4.1	9.8	11.4	-25.8	3.5
1961~1970	径流量(亿 m^3)	30.1	114	178	97.4	420
	偏差(%)	11.9	25.1	-3.3	37.4	12.6
1971~1980	径流量(亿 m^3)	27.1	93.5	161	78.7	360
	偏差(%)	0.7	2.6	-12.5	11.0	-3.5
1981~1990	径流量(亿 m^3)	31.5	104	234	82.1	452
	偏差(%)	17.1	14.2	27.2	15.8	21.2
1991~2000	径流量(亿 m^3)	23.5	82	138	58.1	302
	偏差(%)	-12.6	-10.0	-25.0	-18.1	-19.0
2001~2010	径流量(亿 m^3)	24.8	80.3	191	73.9	370
	偏差(%)	-7.8	-11.9	3.8	4.2	-0.8
1956~2010	径流量(亿 m^3)	26.9	91.1	184	70.9	373

Table 2. Trend test for inflow of Danjiangkou Reservoir
表 2. 丹江口水库天然入库径流长期变化趋势检验表

检验方法	径流量检验值	降水量检验值
Mann-Kendall 非参数检验	-1.02	-0.50
Spearman 秩次相关检验	1.00	0.52
线性回归趋势检验	-1.21	-0.59

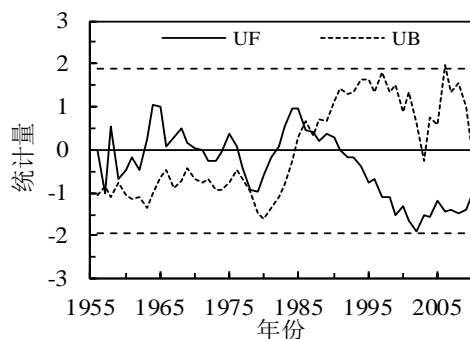


Figure 1. M-K test of annual inflow
图 1. 年径流量 M-K 检验统计变化图

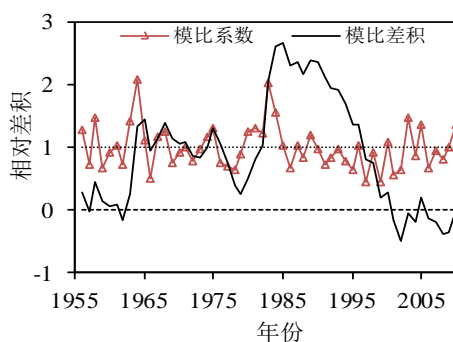


Figure 2. Difference product curves of annual inflow
图 2. 年径流量模比差积曲线

信息。小波变换系数的实部为正时，表示径流量偏多；为负时表示径流量偏少；为零时对应着突变点。图 3 为丹江口入库径流的 Morlet 小波变换系数的实部时频分布图。从图中可以分析出序列存在明显的年际和年代际变化，存在 7~10 年、20~25 年两种时间尺度的周期性变化规律。

4.2. 小波变换系数的模平方

小波变换系数的模平方相当于小波能量谱，可从中分析出不同周期的振荡能量。模平方越大，其对应时段和尺度的周期性越显著。图 4 为汉江丹江口入库径流量的 Morlet 小波变换系数的模平方时频分布图。从图中可以看出它们的年际尺度(小于 10 年)和年代际尺度(大于 10 年)特征十分明显。其中 5~11 年时间尺度变化较强，主要发生在 1964~1992，振荡中心在 1980 年；20~25 年时间尺度变化较强，主要发生在 1958~2010 年，振荡中心在 1987 年左右。

4.3. 年径流量的小波方差分析

从小波变化方差图(图 5)可以看出，丹江口水库长系列天然入库年径流量具有 9 年、23 年时间尺度的周期变化特征，其中 23 年为其第一周期(主周期)。而丹江口水库入库年径流量 23 年、9 年尺度的滑动平均周期性特征(图 6)也较明显。

5. 丹江口水库 20 世纪 90 年代径流偏枯成因分析

汉江流域 20 世纪 90 年代为连续枯水期，90 年代径流量较多年平均径流量偏枯 71.0 亿 m^3 ，引起社会各界对于中线工程运行后无水可调的担忧，为此，在上述趋势分析和周期分析的基础上，初步探讨连

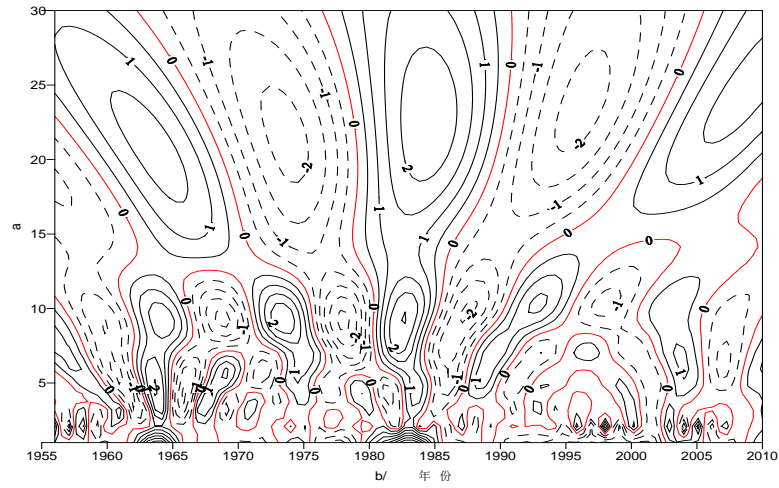


Figure 3. Real part of wavelet transformation
图 3. 年径流量小波变化实部时频

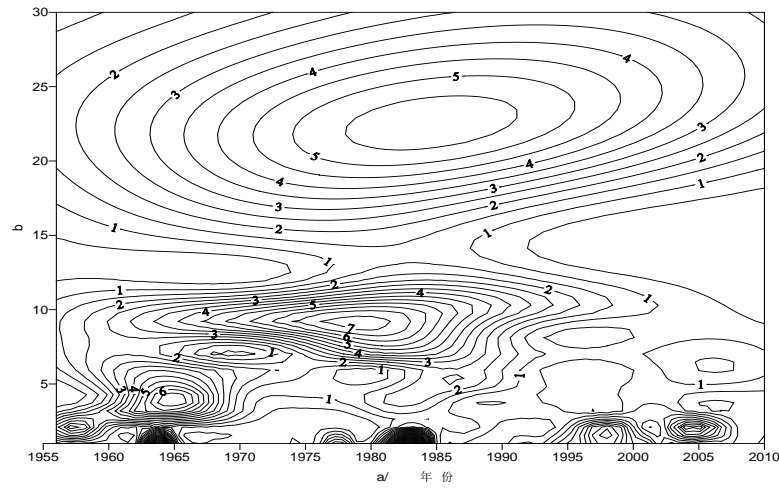


Figure 4. Virtue part of wave-let transformation
图 4. 年径流量小波变化模平方时频

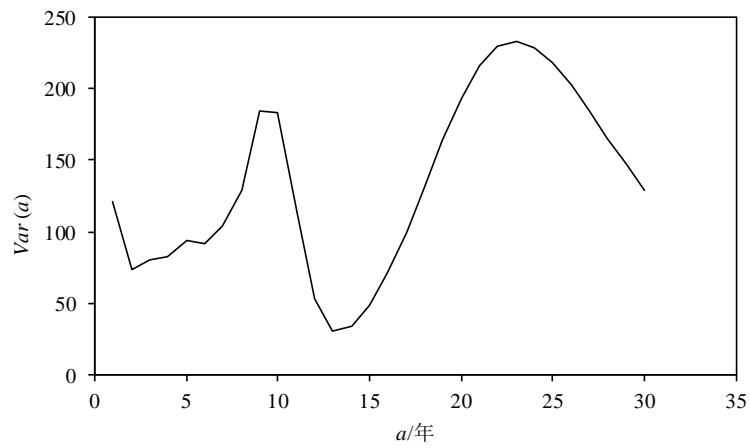


Figure 5. Variance of wavelet annual inflow
图 5. 年径流量小波方差图

续枯水年的成因。

一般来说，水资源的问题是由于自然和人类社会活动共同作用的结果。对于年径流来说，主要有两个影响因素：一是人类活动改变了流域下垫面条件，对天然水资源的干扰越来越大；二是人类生活、生产增加了大气中温室气体的数量，引起全球气候变化并反映为气温、降水、蒸发的变化，并最终影响径流。

5.1. 丹江口水库下垫面变化分析

5.1.1. 降水、径流关系分析

根据 1956~2010 年汉江上游降水和丹江口水库入库径流资料，对降水、径流关系进行分析，点绘降水量、径流深关系图，见图 7。图中，20 世纪 90 年代和 2001~2010 年代降水径流关系点据在其他年份之间，并无系统变化。

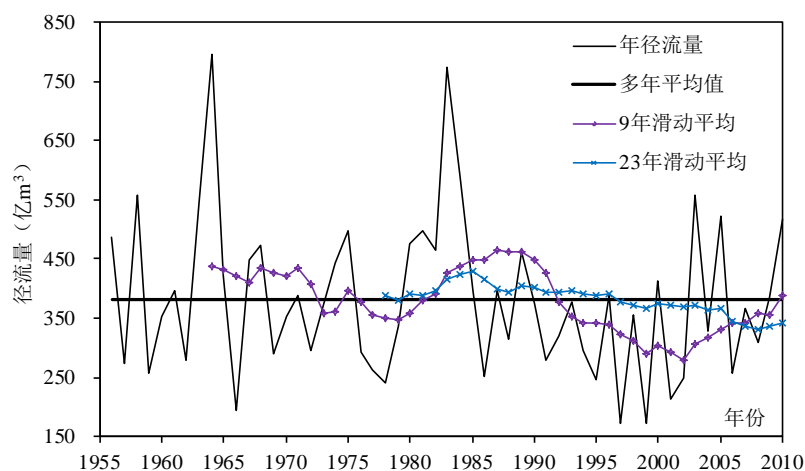


Figure 6. Moving averaging of wavelet annual inflow

图 6. 年径流量滑动平均图

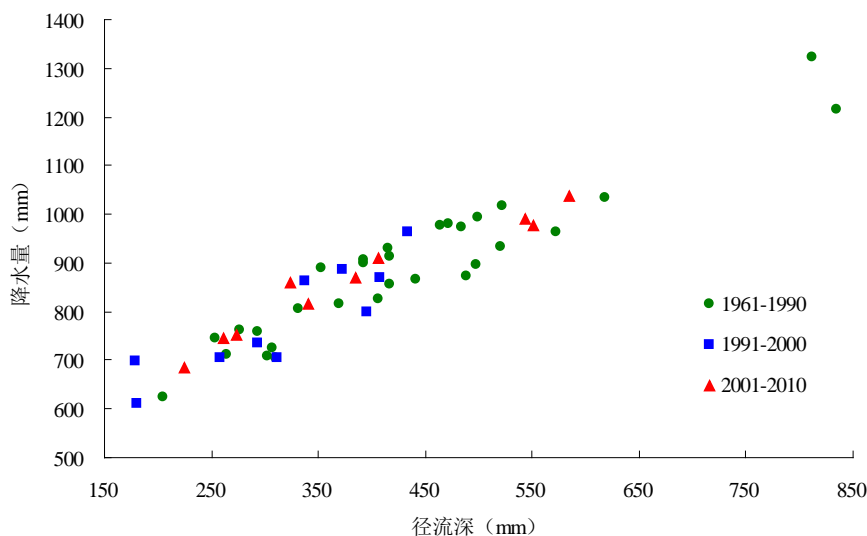


Figure 7. Relationship between rainfall and runoff

图 7. 丹江口水库降水径流深关系图

5.1.2. 降水、径流双累积曲线分析

为研究汉江上游降水量与丹江口水库入库水量之间相互影响的关系，绘制降水量、入库水量双累积关系曲线(见图 8)。从图中可以看出，降雨量与入库水量双累积曲线在总体平均线出现左右波动，在 20 世纪 90 年代，曲线斜率略有减小，但长系列整体趋势变化不明显。

5.2. 汉江上游降水变化趋势

从表 3 可以看出，汉江流域上游在 1981~1990 年期间是丰水期，80 年代平均降水量比上游多年平均降水高 80.1 mm。1991~2000 年期间是枯水期，90 年代平均降水比多年平均降水低了 78.2 mm。进入 2000 年以后降水量有较大增加，2001~2010 年汉江上游降水量 864.4 mm，与多年平均降水量基本相当，且变化规律与径流变化规律基本一致。

综上，丹江口以上下垫面的改变并不显著，并没有引起流域降水径流关系的系统性变化，下垫面变化不是 20 世纪 90 年代连续性枯水发生的原因，连续偏枯主要是由于降水的变化引起的，汉江从 80 年代的多雨期进入 90 年代的少雨期，致使径流量直接减少。

6. 结论

采用 Mann-Kendall 方法、Spearman 检验、线性回归趋势检验等方法对丹江口天然入库径流量和汉江上游降水量进行趋势分析，结果表明在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 上，1956~2010 年丹江口入库径流和汉江上游降水量系列无明显趋势变化。小波分析结论表明，汉江上游径流量系列变化存在多时间尺度的特征，具有 7~10 年、20~25 年两种时间尺度的周期性变化规律。综合趋势和周期性分析结论，汉江上游 20 世纪

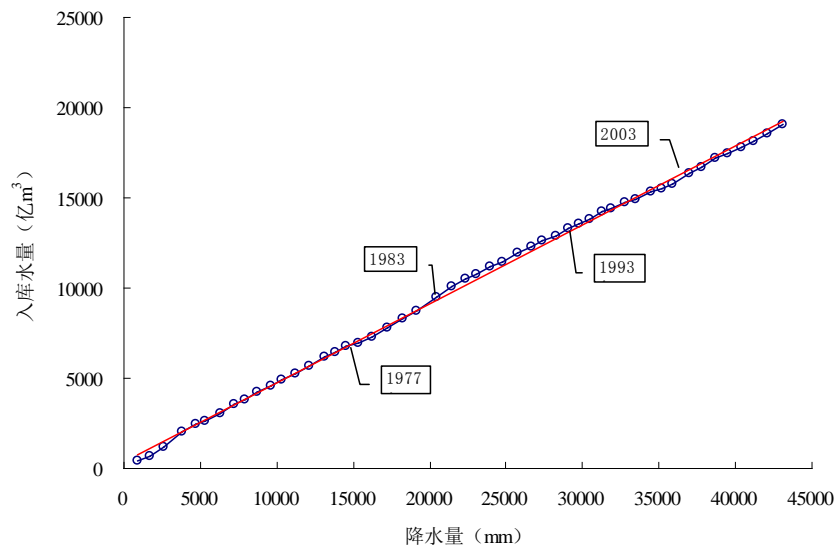


Figure 8. Cumulative curve of rainfall and runoff
图 8. 丹江口水库降水、径流双累积曲线

Table 3. Precipitation variation of Danjiangkou Reservoir catchment
表 3. 汉江上游流域不同年代降水量及偏差变化(降水量: mm)

季节	1961~1970		1971~1980		1981~1990		1991~2000		2001~2010	
	降水量	偏差	降水量	偏差	降水量	偏差	降水量	偏差	降水量	偏差
年	874.7	12.5	845.7	-16.6	942.3	80.1	784.0	-78.2	864.4	2.1

90年代径流持续偏枯只是其丰枯周期性变化的枯水期,而非趋势性减少,可以推断汉江上游径流在2003年以后的约12年间可能将处于丰枯周期性变化的上升段。

基金项目

长江流域水资源演变规律及变化趋势分析(水利部公益性行业专项经费项目201101003)。

参考文献 (References)

- [1] 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. Natural Resources, 1997, (1): 28-33. (in Chinese)
- [2] 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. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(13): 340-345. (in Chinese)
- [3] 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 Linlin, et al. Surface runoff changes in the water source area for the middle route project of south-to-north water transfer before 2050. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(6): 383-386. (in Chinese)
- [4] 刘勇, 王银堂, 陈元芳等. 丹江口水库入库径流演变特征研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 23-25, 43.
LIU Yong, WANG Yintang and CHEN Yuanfang. Study on runoff evolution characteristics of Danjiangkou Reservoir. Water Resources and Power, 2009, 27(2): 23-25, 43. (in Chinese)