

河北4座水库降雨径流一致性分析

吴宗婧¹, 朱晓春², 谭桂秋², 高学平¹, 张晨¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. 水利部海河水利委员会科技咨询中心, 天津 300170)

摘要: 降雨径流关系是否发生变化,即不同时期降雨径流关系有无显著差异是水文演算中迫切需要解决的问题。以河北省海河流域四座水库的降雨径流系列为基础,通过降雨径流双累积曲线的特性分析、年径流系数的变化过程分析、秩和检验、回归方程的差异分析等,对四座水库的1980-2008年入库径流水文系列一致性进行研究。结果表明:AGZ水库、GN水库、HBZ水库1980-2008年的入库径流资料具有一致性,虽年径流深、年径流系数有差异,但降雨径流关系并无显著差异。而WK水库1980-2008年的入库径流资料则不具有有一致性,降雨径流机制发生变化,分析了下垫面变化的影响,并对其天然径流资料进行修正。

关键词: 降雨径流; 一致性分析; 差异分析; 下垫面

中图分类号:TV12; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0188-05

Consistency analysis of rainfall runoff in four reservoirs in Hebei Province

WU Zongjing¹, ZHU Xiaochun², TAN Guiqiu², GAO Xueping¹, ZHANG Chen¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Security, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Haihe River Water Resources Commission for Scientific and Technological Advice Centre, Tianjin 300170, China)

Abstract: Whether the rainfall runoff mechanism has significant difference in different stages is an urgent problem to be solved in practice. In this paper, the consistency of rainfall-runoff series is analysed concerning the hydrologic data of four reservoirs in Hebei Province, Haihe river basin as the foundation. Through the double mass curve of rainfall-runoff relation, the change process of annual runoff coefficient and the rank sum test method, the paper selected incoming runoff hydrological series consistency of the four reservoirs from 1980 to 2008 to research. The results show that incoming runoff hydrological series of AGZ, GN, HBZ reservoir from 1980 to 2008 has consistency, though the annual runoff, runoff coefficient were different, but the relation of rainfall and runoff has no significant differences. WK reservoir incoming runoff hydrological series are inconsistent, Rainfall runoff mechanism has changed. It is necessary to analyze the underlying surface change and modify natural runoff data.

Key words: rainfall runoff; consistency analysis; analysis of difference; underlying surface

1 研究背景

降水变化和人类活动是影响径流的主要因素。全球变暖加快了区域的水循环,使降水的频率和强度发生变化,进而影响径流过程^[1]。近年来,随着我国经济建设的飞速发展,人类活动也愈加频繁和剧烈,如在河流上修建水库、堰闸、拦河坝等水利工程,改变了流域的下垫面条件,导致天然径流的形成规律发生变化,使蒸发-入渗-径流的水平衡系统循环机制也发生变化^[2]。在进行水资源评价及水文计算设计年径流的工作中,采用的年径流资料系列要求必须具有同一成因条件的统计系列,即资料的一致性。

目前,国内外许多学者对水文资料的一致性和水文系列分界点进行了研究。Lee和Heghinian^[3]提出的基于贝叶斯理论的里海哈林方法,由后检验条件概率密度函数得出最可能的分界点;Pettitt^[4]针对序列数据概率分布形式未知和分界点问题提出的基于Mann-Whitney非参数检验的方法,该方法分析序列的趋势变化,找出曲线的交点,交点的对应时刻即为分界点的起始时刻。在我国,郝爱卿^[5]以子洪水库为例,进行了降雨径流特性分析,包括水文分界点的确定和分界点前后的一致性检验。丁晶^[6]在对洪水序列分界点研究中提出的有序聚类分析法;谢平等^[7]提出了一种水文时间变异综合诊断方法。陈广才等^[8]

收稿日期:2012-07-06; 修回日期:2012-09-17

作者简介:吴宗婧(1986-),女,天津人,硕士研究生,水利工程仿真与安全国家重点实验室。

在传统 F 检验法的基础上提出滑动 F 识别与检验法,找出满足 F 计算值大于临界值的所有可能分界点。在土地利用方面,韩瑞光等^[9]利用天然径流系列一致性修正法和分布式水文模型法较好的验证下垫面变化对径流量的影响。付军^[10]基于土地利用变化的产汇流模型就土地变化对洪水的影响进行评估,得出不同土地利用类型对洪水的的影响不一样。

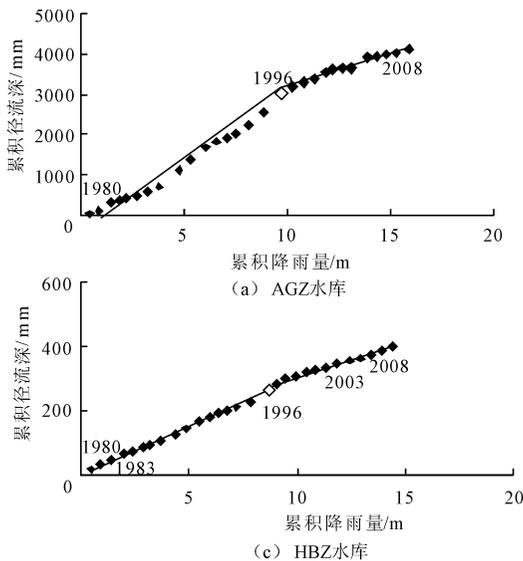
2 研究区域

本文所研究的区域为河北省境内海河流域4座水库,分别为AGZ水库、GN水库、HBG水库以及WK水库。其中AGZ水库位于河北省保定市易县AGZ村西,是控制流域面积为476 km²的大II型水库,设计总库容3.09亿 m³。GN水库位于海河流域子牙河系滹沱河中游平山县境内,是控制流域面积为15 900 km²的大I型水库;HBG水库位于河北省鹿泉市HBG镇附近的滹沱河干流上,是控制流域面积为23 400 km²,总库容12.10亿 m³的大I型水利枢纽工程。WK水库位于河北省曲阳县郑家庄村西大清河南支沙河上,控制流域面积为3 770 km²。

以4座水库1980-2008年共29年的入库径流水文系列为基础,对降雨径流其一致性进行研究。

3 水文分界点

人类活动对流域下垫面的影响,是一个极其复杂的渐变过程,人类活动形式不同,影响程度也不



同,降雨和径流关系发生变化的转折年份亦不同^[11]。因此,判定某座水库上游降雨及天然径流之间的关系在29年长系列的前期和后期有无差异,首先应分析降雨和径流关系的变化趋势,找出降雨、径流机制发生差异的分界点。

3.1 降雨径流双累积曲线的特性分析

双累积曲线(简称DMC)方法是目前用于水文气象要素一致性或长期演变趋势分析中最简单、最直观、最广泛的方法。它最早由美国学者C. F. Merriam^[12]在1937年用于美国Susquehanna流域降雨资料的一致性。Searcy等^[13]系统介绍了双累积曲线基本理论基础及其在降雨、径流、泥沙量序列长期变化过程分析的应用。双累积曲线是检验两个参数间关系一致性及其变化的常用方法^[14]。

为了准确地描述降雨和径流关系的变化趋势,建立降雨径流关系的累积降雨和累积单位面积上的径流量的双累积曲线。

$$Sri = \sum_{i=1}^i ri, Spi = \sum_{i=1}^i pi$$

式中: Sri 为前*i*年的单位面积上的累积径流深,mm; Spi 为前*i*年的累积降雨量,m; ri 为流域在第*i*年中单位面积上的径流深,mm; pi 为第*i*年的年降雨量,m。

根据4座水库1980-2008年的降雨、径流资料,分别绘制4座水库1980~2008年的降雨径流双累积曲线,如图1(a)、(b)、(c)、(d)所示。

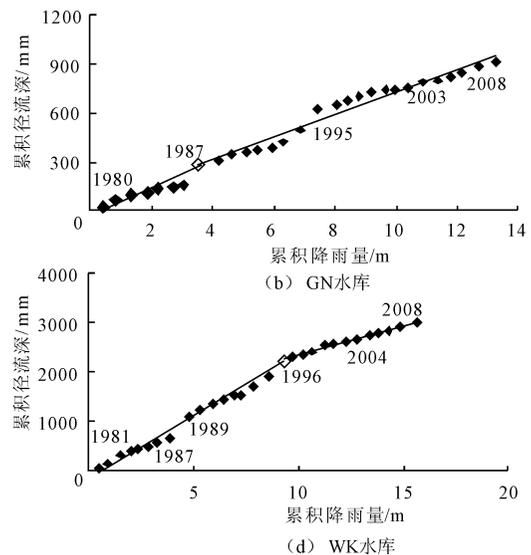


图1 河北4座水库降雨径流双累积曲线

由图1可看出,曲线的坡度均在空菱形标记点的年份附近出现转折。累积曲线的平均坡度出现变化,空菱形标记之前累积曲线的平均坡度较陡,标记点之后累积

曲线的平均坡度较缓。这一累积曲线的平均坡度实际上为径流系数,由此可见,以空菱形标记的年份为分界点,在此前后的平均径流系数有一定程度的变化。

3.2 年径流系数变化过程的分析

根据4座水库1980-2008年的降雨、径流资料,由年径流系数等于年径流深与年降雨量之比,分

别计算得出4座水库1980-2008年径流系数。分别绘制流域内年径流系数变化过程曲线,如图2(a)、(b)、(c)、(d)所示。

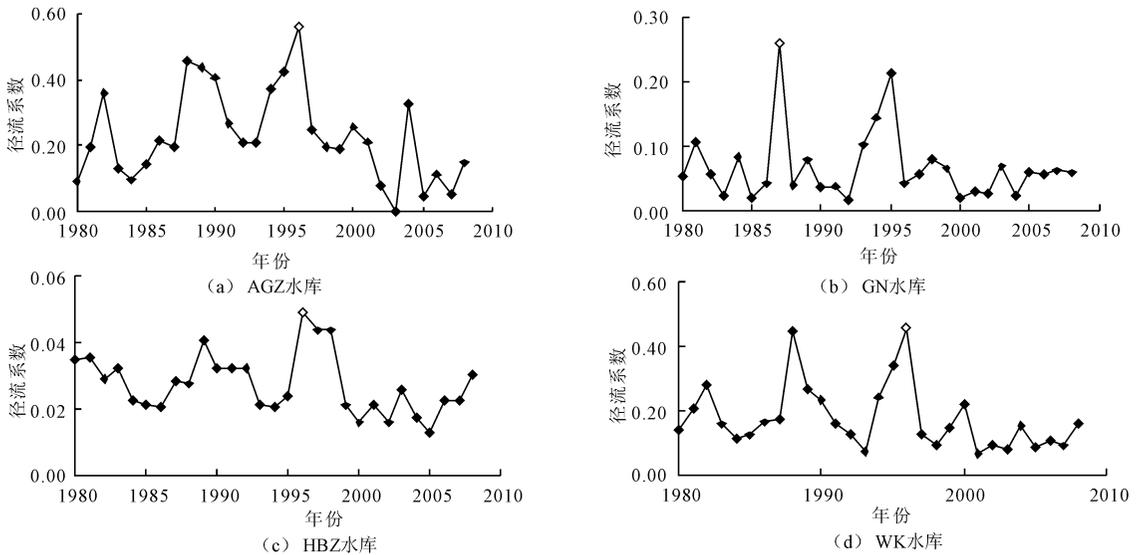


图2 河北4座水库年径流系数变化过程

由年径流系数的计算,可以得出分界点前后的平均径流系数,经过计算,4座水库分界点之前的径流系数均值较分界点以后的径流系数大,分界点后径流系数呈递减趋势,故分界点即是降雨径流机制发生改变的转折点。且图2中的极值为降雨径流双累积曲线中的分界点,分析结果与用降雨径流双累积曲线的分析结果一致。

4 分界点前后降雨径流关系的一致性分析

根据前述有关降雨径流双累积曲线、年径流系数的变化过程的分析,对4座水库1980-2008年29年的降雨径流系列以空菱形符号标记的年份为界,划分为两个分样本,在对其一致性进行检验。

4.1 径流系数差异的秩和检验

建立统计假设 H_0 ,即两个样本的年径流系数 α_i 没有显著差异,两个样本来自同一总体。从物理意义上说,若统计假设成立,则两个样本在降雨径流转化规律上不存在明显差异。即可将两个分样本的降雨

径流系列合为一个样本,长系列29年的资料进行水库的调节计算,而不必考虑对这一长系列中的某一部分资料进行修正。秩和检验的方法如下:

(1) 由水库的降雨径流双累积曲线和水库年径流系数变化过程图确定降雨径流分界点的年份,该分界点将长系列29年分为两个样本,分别计算其年径流系数 α_i ,再将两个年径流系数 α_i 的样本数据合并成年径流系数混合总样本,并将这混合总样本的年径流系数 α_i 按数值由小到大的次序排列起来,这个次序号码称之为“秩数”。

(2) 计算个体数较少的样本的秩和数 T 、平均数 U_T 以及标准差 α_T 。应用 U -检验计算秩和检验的下限 $T_{1\alpha}$ 、上限 $T_{2\alpha}$ 。若 $T_{1\alpha} < T < T_{2\alpha}$,则显著性水平 α 下,接受假设 H_0 ,即两个样本来自同一总体。依照秩和检验的过程,可以得到4座水库的检验结果,列于表1。

4.2 WK 水库流域土地利用变化分析

通过降雨径流一致性分析,可以认为WK水库1980-1995年的径流系数系列与1996-2008年的

表1 4座水库的秩和检验结果

水库名称	秩和数	平均数	标准差	上限	下限	$T, T_{1\alpha}, T_{2\alpha}$ 三者关系	是否具有 一致性
	T	UT	αT	$T_{1\alpha}$	$T_{2\alpha}$		
AGZ 水库	157	195	22.8	150.31	239.69	$T_{1\alpha} < T < T_{2\alpha}$	是
GN 水库	96	105	19.6	66.58	143.42	$T_{1\alpha} < T < T_{2\alpha}$	是
HBZ 水库	169	195	22.8	150.31	239.69	$T_{1\alpha} < T < T_{2\alpha}$	是
WK 水库	142	195	22.8	150.31	239.69	$T < T_{1\alpha} < T_{2\alpha}$	否

径流系数系列不具有-致性,降雨径流关系上存在明显的差异,下垫面发生变化。

下垫面特征对降雨径流产生机制、降雨的再分配起着至关重要的作用,而土地利用是导致下垫面变化的主要因素,所以土地利用的变化将直接改变流域的产汇流过程^[15]。

土地利用变化幅度是用来表征土地利用变化的重要指标。土地利用变化幅度用来表示土地利用变化的大小。土地利用变化幅度的计算公式为:

$$P_i = \frac{LU_{i_1} - LU_{i_0}}{LU_{i_0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P_i 表示研究区域内第*i*种土地利用类型的变化幅度; LU_{i_0} 表示研究区域内第*i*种土地利用类型研究初期的面积; LU_{i_1} 表示研究区域内第*i*种土地利用类型研究时间*t*末的面积。

表2 WK 水库流域三期土地利用变化统计表 km², %

土地利用 类型	1980年		1996年		2008年	
	面积	比重	面积	比重	面积	比重
耕地	214.08	5.68	167.19	4.43	176.75	4.69
林地	1070.64	28.40	1032.11	27.38	1039.15	27.56
草地	2445.71	64.87	2495.4	66.19	2485.85	65.94
水域	26.06	0.69	26.96	0.72	26.55	0.70
建筑用地	2.01	0.05	1.98	0.05	2.20	0.06
未利用土地	11.5	0.31	46.35	1.23	39.40	1.05
总计	3770	100	3770	100	3770	100

从表2可以看出,在WK水库流域三期的土地利用中,水域、建设用地和未利用土地所占比重均比较小,三种土地利用类型所占比重在三个时期均没有超过2%,草地、林地和耕地所占比重比较大,1980、1996和2008年草地、林地和耕地三种土地利用类型所占比重之和分别为98.95%、98%、98.19%。在WK水库流域,草地、林地和耕地占了绝大比重,水域、建设用地和未利用土地所占比重很小,因此草地、林地和耕地的变化就代表了WK水库流域的土地利用变化情况。三期土地变化对比图,如图3所示。土地利用变化幅度,列于表3。

表3 WK 水库流域土地利用变化幅度 %

时期	草地	林地	耕地
1980-1996	2.03	-3.60	-21.90
1996-2008	-0.38	0.68	5.72

由图3可以看出,在WK水库流域,草地、林地和耕地所占比重在1980到1996年均有明显变化。而从1996年到2008年,三种土地利用类型变化均

不明显。在两个时期,草地所占比重均最大,耕地所占比重均较小。由表3可知,草地从1980到1996年的变化幅度为2.03%,林地从1980到1996年的变化幅度为-3.60%,1980年到1996年耕地的变化幅度为-21.90%。尽管耕地的变化幅度比较大,但由于其在流域总面积中所占的比重较小,因此,1980到1996年间,在WK水库流域,土地利用变化主要表现为草地覆被面积的增加和林地覆被面积的减少。即林地像草地转移。总体看来,WK水库流域在1980到2008年间土地利用变化特点是林地和耕地持续减少,林地和耕地像草地转移,草地增加。下垫面变化明显。

4.3 修正WK水库的天然径流资料系列

点绘WK水库以上面平均年降雨量与天然径流深相关图。通过点群中心分别绘制1980-1995和1996-2008年两个年段的年降雨-径流深关系曲线,如图4所示。可见1980-1995年的所形成的曲线在右边,1996-2008年形成的曲线在左边,即近10年年径流量呈衰减趋势。两条曲线之间的横坐标距离即为年径流衰减值。

选定一个年降水量值,从图4中2条曲线上可查出2个年径流深值,用公式(2)、(3)计算年径流衰减率和修正系数:

$$\alpha = (R_1 - R_2) / R_1 \times 100\% \quad (2)$$

$$\beta = R_2 / R_1 \quad (3)$$

式中: α 为年径流衰减率; β 为年径流修正系数; R_1 为1980-1995年下垫面条件的产流深; R_2 为1996-2008年下垫面条件的产流深。

查算不同年降水量的 α 、 β 值,结果列于表4。绘制 $P-\beta$ 关系曲线,如图5所示,由需要修正的1980-1995年的降水量,从 $P-\beta$ 关系曲线上可查得修正系数,与同年修正前的天然径流量相乘得到修正后的天然径流量,WK水库修正后的年径流量结果列于表5。

表4 不同年降雨量的 α 、 β 值 %

<i>P</i>	300	400	500	600	700	800
α	50	43	38	31	23	19
β	0.50	0.57	0.63	0.69	0.77	0.81

对WK水库1980-1995年的径流系列的修正计算,修正后的年径流量由 $10923.33 \times 10^6 \text{ m}^3$ 减少为 $9298.68 \times 10^6 \text{ m}^3$,减少了19%。改善了1980-2008年径流资料的一致性,并且可以真实反映近期内下垫面条件下的年径流量。

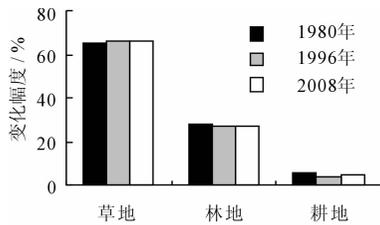


图3 WK 水库流域三期土地变化对比图

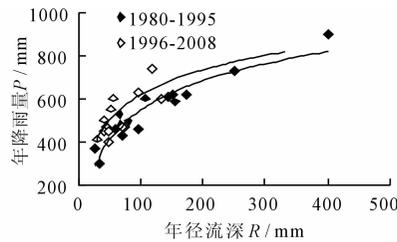


图4 WK 水库 P - R 相关图

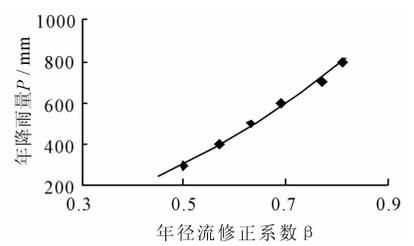


图5 P - β 关系曲线

表5 年径流量修正前后对比表 $10^6 m^3, mm$

年份	全年径流量	年径流深	年径流系数 β	修正后年径流量	修正前后差值
1980	253.52	67.25	0.625	158.45	95.07
1981	358.71	95.15	0.612	219.53	139.18
1982	649.03	172.16	0.710	460.81	188.22
1983	275.54	73.09	0.618	170.28	105.26
1984	122.36	32.46	0.495	60.57	61.79
1985	241.87	64.16	0.655	158.42	83.44
1986	262.57	69.65	0.590	154.92	107.65
1987	395.81	104.99	0.700	277.07	118.74
1988	1511.26	400.86	0.860	1299.68	211.58
1989	579.78	153.79	0.690	400.05	179.73
1990	534.68	141.83	0.705	376.95	157.73
1991	295.99	78.51	0.630	186.48	109.52
1992	218.31	57.91	0.612	133.60	84.70
1993	99.86	26.49	0.550	54.92	44.94
1994	562.91	149.31	0.708	398.54	164.37
1995	937.90	248.78	0.775	726.87	211.03

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007:45 - 50.

[2] 文康. 人类活动对水文的挑战[C]//. 中国水文科学与技术研究进展学术讨论会论文集. 南京: 河海大学出版社, 2004:38 - 41.

[3] Lee A F S, Heghinian S M. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variable; abayesian approach[J]. Technometrics, 1977, 19(4): 503 - 506.

[4] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126 - 135.

[5] 郝爱卿. 子洪水库降雨径流一致性分析[J]. 科学之友, 2006, (1): 22 - 24.

[6] 丁晶. 洪水时间序列干扰点的统计推估[J]. 武汉大学学报(工学版), 1986, 19(5): 36 - 41.

[7] 谢平, 陈广才, 李德, 等. 水文变异综合诊断方法及其应用研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(2): 11 - 14.

[8] 陈广才, 谢平. 水文变异的滑动 F 识别与检验方法[J]. 水文, 2006, 26(2): 57 - 60.

[9] 韩瑞光, 丁志宏, 冯平. 人类活动对海河流域地表径流量影响的研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(3): 4 - 7.

[10] 付军. 大清河流域土地利用变化对洪水影响的研究[D]. 天津大学, 2010.

[11] 陈民, 谢悦波, 冯宇鹏. 人类活动对海河流域径流系列一致性影响的分析[J]. 水文, 2007, 27(3): 57 - 59.

[12] Merriam C F. A Comprehensive study of rainfall on the susquehanna valley[J]. Trans. Amer. Geophys. Union, 1937, 18: 417 - 476.

[13] Searcy J K, Hardison C H. Double-mass Curves[M]. U. S. Geological Survey Water Supply Paper. 1541 - B, 1960.

[14] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累计曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47 - 51.

[15] 卢明龙. 海河流域土地利用变化特征及趋势分析[D]. 天津大学, 2010.

5 结 语

本文通过降雨径流双累积曲线的特性分析、年径流系数的变化过程分析、秩和检验等, 对河北省境内海河流域 4 座水库的 1980 - 2008 年共 29 年的入库径流水文系列进行了一致性分析。

根据降雨径流双累积曲线和年径流系数的变化过程的分析, 降雨径流双累积曲线坡度的变化, 找出可能出现降雨径流机制转折的分界点; 年径流系数也同样在分界点后显著递减, 将长系列分为两个子样本。

应用秩和检验得出 AGZ 水库、GN 水库和 HBZ 水库具有一致性, 而 WK 水库则出现了不一致的情况。分析表明, AGZ 水库、GN 水库和 HBZ 水库虽年径流深、年径流系数有差异, 但降雨径流关系并无显著差异, 具有一致性, 说明该水库流域下垫面无大的变化, 径流减少的原因是进入枯水周期, 降雨量减小引起的。对于不一致的情况, 分析其下垫面变化, 对其天然径流资料进行修正计算, 修正后改善了 WK 水库 29 年资料的一致性, 结果可以真实反映近期下垫面条件下的地表水资源量。