

# 永定河流域径流变化特征及影响因素分析

丁爱中<sup>1</sup>, 赵银军<sup>1</sup>, 郝 弟<sup>1</sup>, 张淑荣<sup>1</sup>, 乔光建<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875;

2. 河北省邢台水文水资源勘测局, 河北 邢台 054000)

**摘要:** 根据永定河流域石匣里站、响水堡站和官厅水库站 1956 年– 2003 年的年径流资料, 应用 Mann-kendall 检验法、Pettitt 检验法、滑动 T 检验和小波分析法等方法分析了永定河流域年径流量的趋势性、周期性及突变特征, 并从气候变化及人类活动两方面分析其影响因素。结果表明永定河流域年径流量一直处于显著下降趋势中, 存在 27 (28) 年的第一主周期和 20 (21) 年的第二主周期; 1982 年– 1983 年径流量发生突变, 突变前后变化较大。径流量变化的主要影响因素是人类活动, 如土地利用、闸坝工程建设以及地下水过度开采等; 气候变化对径流量也有一定的影响。

**关键词:** 永定河; 年径流量; 趋势变化; 周期变化; 突变点; 影响因素

**中图分类号:** P343   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0017-06

## Analysis of Variation Characteristics of Runoff and Their Influencing Factors in the Yongding River Basin

DING Ai-zhong, ZHAO Yin-jun, HAO Di, ZHANG Shu-rong

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Engineering Research Center of

Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China;

2. Xingtai Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hebei Province, Xingtai 054000, China)

**Abstract:** The Mann-kendall test, Pettitt test, Moving-T test, and Wavelet analysis were applied to analyze the trend, periodicity, and mutation of annual runoff in the Yongding River Basin according to the annual runoff data at the Shixiali, Xiangshuibao, and Guanting reservoir stations from 1956 to 2003, and the influencing factors were also discussed from the aspects of climate change and human activities. The results showed that (1) the annual runoff in the Yongding River Basin decreases significantly from 1956 to 2003, and 27(28) is the first major period while 20(21) is the second major period; and (2) the annual runoff varies abruptly in 1982–1983. The variation of runoff was mainly caused by human activities, such as land utilization, gate dam construction, and groundwater overexploitation. Meanwhile, climate change has also effects on the variation of runoff to some extent.

**Key words:** Yongding River; annual runoff; trend change; periodic variation; breakpoint; influencing factors

河流径流的变化往往反映了气候等自然因素和人类活动影响的结果。近年来全球气候变化和人类活动对水资源产生了显著影响, 导致水资源总量上的变化和时空分布上的重分配, 进而对河流流量以及社会经济的可持续发展产生了影响。张建云等<sup>[1]</sup>的研究表明近 50 年来中国六大江河的实测年径流量均呈现下降趋势, 特别是北方河流。2007 年 IPCC 第四次报告预测在 21 世纪中叶中纬度干旱地区年径流量将减少 10%~30%。由于水资源减少会引起一系列水安全和生态安全问题, 所以对流域径流量的变化特征分析, 分析气候变化和人类活动对径流的影响对水资源的合理利用和可持续管理具有重要意义。

径流量变化特征主要包括趋势性、周期性和突变点检验, 目前主要有统计方法和模型模拟法。如沈楠等<sup>[2]</sup>利用滑动平均和 Kendall 趋势检验分析了黄河流域近 500 年的径流量变化趋势, 并利用 Hurst 指数法和 Pettitt 法检验突变性; 徐东霞等<sup>[3]</sup>利用数理统计 Mann-Kendall 秩相关法及小波分析法等多种方法分析了嫩江流域年内、年际变化特征及其影响因素; 张小侠<sup>[4]</sup>利用小波分析法和 Mann-Kendall 检验法对雅鲁藏布江流域 1956 年–2000 年径流量的年内、年际变化特征及周期性、突变特征进行了分析; 李洋<sup>[5]</sup>对石羊河流域水循环要素利用 Kendall 秩次相关法分析其时程变化趋势, 用 EOF 经验正交分解法分析其空间变化特征; 杨新<sup>[6]</sup>利

收稿日期: 2012-12-03   修回日期: 2013-01-11   网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1132.030.html>

基金项目: 北京师范大学自主科研基金(2009SD-27); 北部湾环境演变与资源利用省部共建教育部重点实验室(BBG1109); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 丁爱中(1969), 男, 安徽怀宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制、水生态和环境修复研究。E-mail: ading@bnu.edu.cn

用 Kendall 秩次相关法分析陕甘宁地区河流径流量的变化趋势,利用小波分析法分析径流量的周期变化特征。

通过比较分析,本文选取永定河流域石匣里、响水堡和官厅水库坝下 3 个水文站 1956 年-2003 年的年径流量监测数据,利用 Mann-Kendall 检验法、Petitt 检验法、滑动 T 检验法及小波分析法进行趋势、周期及突变分析,揭示永定河流域径流量的时空演变特征,了解目前水资源状态。

## 1 流域概况

永定河地跨山西、内蒙古、河北、北京、天津等省、自治区、直辖市,流域面积约 4.7 万 km<sup>2</sup>,永定河上游有桑干河、洋河两大支流,在河北省怀来县朱官屯回流后称永定河。由河源至永定新河于天津市汉沽区北塘入海口,河流全长 747 km,见水系图 1。永定河流域地势自西北向东南倾斜。西北部为山区,海拔高程一般为 500~1000 m,山区内山峦起伏,地形复杂,河流坡陡流急,且水土流失严重。官厅水库至三家店,平均海拔在 100~500 m,从三家店入京津平原,海拔在 25~100 m 之间,水流相对平缓,泥沙大量沉积。永定河流域地处温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区,四季分明,寒暑悬殊。流域多年平均降雨量约 420 mm,但年际变化很大,造成区域内枯水期河水断流,汛期又洪水成灾,或连年干旱或连年洪涝的现象。但是近年来流域径流量不断减少,永定河北京段甚至出现断流现象。

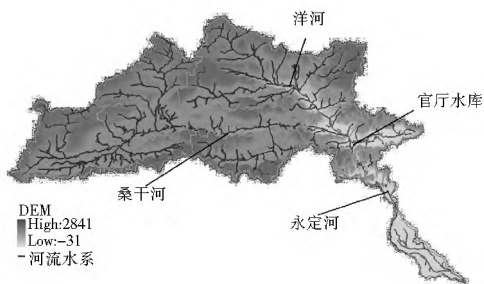


图 1 永定河流域水系及高程

Fig. 1 The river system and digital elevation map (DEM) of the Yongding River Basin

## 2 径流变化特征

### 2.1 趋势分析

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐的非参数检验方法,并已广泛应用于分析降水、径流和气温等要素时间序列的变化情况。该检验不需要样本服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适合水文、气象等非正态分布的数据。

Mann-Kendall 检验统计值可定义如下:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{Var(S_k)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中:  $S_k = \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^{k-1} a_{ij}$ ,  $a = 2, 3, \dots, n$ ,  $a_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases}$ ,  $1 \leq j \leq i$ ;

$$E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4}; Var(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72. n$$

代表系列的长度,当  $|Z_n| \leq |Z_{1-\alpha/2}|$  时,接受零假设  $H_0$ ,即数据不存在明显的变化趋势。

表 1 为 3 个水文站径流量的变化趋势的检验结果,由表可以看出永定河流域径流量呈现极显著下降的趋势,统计检验值均远大于  $\pm 1.96$  (显著水平  $\alpha = 0.05$ ),分别以 0.108、0.187 和 0.322 亿 m<sup>3</sup>/a 的速度下降。

表 1 永定河流域径流变化趋势检验

Table 1 The runoff trend test in the Yongding River Basin

站点	检验统计量 Z	趋势	显著性	变化率 R/(亿 m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> )
响水堡	-7.06	下降	极显著	-0.108
石匣里	-7.87	下降	极显著	-0.187
官厅水库	-7.84	下降	极显著	-0.322

### 2.2 周期分析

小波分析能够清晰的揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期,充分反映系统在不同时间尺度中的变化趋势,并能对系统未来发展趋势进行定性估计<sup>[7]</sup>。在气象、水资源等相关领域,最常用的小波函数为 Morlet 小波<sup>[8-9]</sup> 和 Marr 小波<sup>[10-11]</sup>。因为 Morlet 小波的实部和虚部之间有  $\sqrt{2}$  的位相差,它的模可以消除小波本身的震荡<sup>[12]</sup>,而且从其小波变换系数中可以分离出模和位相,不但能给出能量密度,而且还可以发现信号的奇异性 and 瞬时频率,与 Marr 小波相比,这是 Morlet 小波的一大优点<sup>[13]</sup>。Morlet 小波函数表达式为:

$$\phi(t) = e^{iw_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

式中:  $w_0$  为常数,  $i$  - 虚数。小波变换系数可以分析时间序列的时频变化特征。小波方差能反映信号波动的能量随尺度  $a$  的分布,所以小波方差可用来确定信号中不同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度,即主周期。小波方差的计算公式为:

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

式中:  $W_f(a, b)$  为小波系数。以小波方差为纵坐标,以时间为横坐标制作小波方差图,确定径流演化过程中存在的主周期。图 2 为永定河 3 个水文站天然径流量的小波方差图,由图可知石匣里站径流量存在 4 个明显的峰值,分别对应着 27 年、20 年、6 年和 10 年,其中 27 年的周期震荡最强,为石匣里站径流变化的第一主周期,20 年时间尺度对应着第二个峰值,为径流变化的第二主周期。响水堡站在 32 年的时间尺度之内分别存在 27 年、21 年、6 年和 14 年的主周期,27 年为第一主周期,21 年为第二主周期。官厅水库站存在 28 年、21 年、4 年和 7 年时间尺度的周期变化,28 年为第一主周期,21 年为第二主周期。

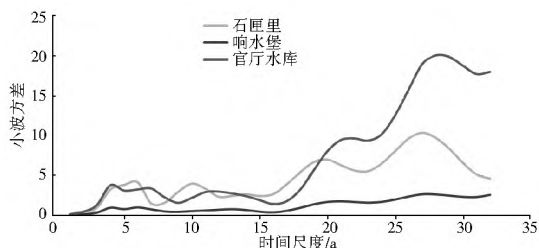


图 2 永定河流域水文站小波方差

Fig. 2 The variograms of wavelet analysis at 3 hydrological stations in the Yongding River Basin

根据小波方差检验的结果,绘制控制流域径流演变的第一主周期 27 年、28 年和第二主周期 20 年、21 年的小波系数

图,见图3,由图可以看出在27年、28年特征时间尺度上,流域径流变化的平均周期为18年左右,大约经历了2个丰-枯变化;而在20年、21年特征时间尺度上,流域径流变化的平均周期为13年左右,在1956年-2003年期间经历了3个丰水期和3个枯水期,见表2。

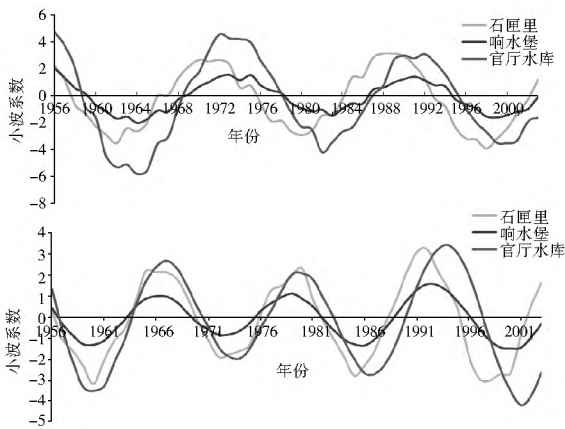


图3 永定河流域水文站第一主周期(27或28)和第二主周期(20或21)小波系数

Fig.3 The wavelet coefficients of the first and the second major periods at 3 hydrological stations in the Yongding River Basin

表2 永定河流域水文站丰枯变化时间

Table 2 The variation time periods of high and low flow at 3 hydrological stations of the Yongding River Basin

站点	丰水期	枯水期
石匣里	1964- 1970, 1977- 1982, 1989- 1995	1956- 1963, 1971- 1976, 1983- 1988, 1995- 2002
响水堡	1964- 1969, 1977- 1982, 1990- 1996	1957- 1963, 1970- 1976, 1983- 1989, 1997-
官厅水库	1965- 1971, 1978- 1983, 1991- 1997	1957- 1964, 1972- 1977, 1984- 1990, 1998-

## 2.3 突变特征

### 2.3.1 Pettitt 法

Pettitt 变点检验方法由 Pettitt 提出,是一种非参数检验方法,前提是序列存在趋势性变化,核心是通过检验时间序列要素均值变化的时间来确定序列跃变时间。检验使用 Mann-Whitney 的统计量  $U_{i,N}$  来检验同一个总体  $x(t)$  的两个样本,统计量  $U_{i,N}$  的公式:

$$U_{i,N} = U_{i-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_i - x_j), t = 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

式中:若  $x_i - x_j > 0$ , 则  $\text{sgn}(x_i - x_j) = 1$ ; 若  $x_i - x_j < 0$ , 则  $\text{sgn}(x_i - x_j) = 0$ ; 若  $x_i - x_j < 0$ , 则  $\text{sgn}(x_i - x_j) = -1$ 。Pettitt 检验的零假设为序列无变点,其统计量  $K_N$  和相关概率的显著性检验公式如下:

$$K_{i,N} = \max_l |U_{i,N}|, (1 \leq i \leq N) \quad (5)$$

$$p \approx 2 \exp(-6K_{i,N}/N^3 + N^2)$$

式中:若  $p \leq 0.05$  则认为  $t$  点为显著变点,由此检验出序列的变点。

### 2.3.2 滑动 T 检验

滑动 T 检验考察两个样本平均值的差异是否显著来检

验突变点,假设时间序列  $x = x(i) (i = 1, 2, \dots, n)$  从总体中分别抽取样本容量  $n_1$  和  $n_2$ , 定义统计量为:

$$t = \frac{x_1 - x_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{t_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (7)$$

式中:  $x_1, x_2$  为两个样本的均值,  $S_1^2, S_2^2$  为方差,  $t$  服从  $v = n_1 + n_2 - 2$  的  $t$  分布,选择显著性水平  $\alpha$ , 查  $t$  分布表得到临界值  $t_{\alpha/2}$ , 当  $|t| > t_{\alpha/2}$  时拒绝原假设,说明存在显著性差异,反之,则接受原假设,即不存在显著性差异。滑动 T 检验是利用传统的  $t$  检验法对序列逐点进行检验,对于满足  $|t| > t_{\alpha/2}$  所有可能的点选择使  $t$  检验统计量达到极大值的那一点作为所求的最可能变点。魏凤英等的研究表明分析中国、北半球和全球的气温突变时平均时段取 10 年的突变指数比较可靠<sup>[14]</sup>, 因此本文的滑动 T 检验  $n$  取 10 年的水文要素序列。

### 2.3.3 小波分析法

小波函数在周期变化分析方法已有具体介绍,本节只介绍在突变分析中小波的原理。小波转换函数是在时间上的二阶导数,二阶导数的过零点在数学中是拐点,而在气候、水文上可以作为可能的突变点<sup>[6]</sup>。本文中采用 Pettitt 检验法、滑动 T 检验法和小波分析法三种方法对 3 个水文站年径流量的突变点进行检验。

表 3 为 3 个水文站利用不同方法对年径流序列的突变检验结果,可以看出不同的检验方法结果不太一致,但是综合各结果,石匣里、响水堡和官厅水库站分别在 1983 年、1982 年、1983 年发生突变,且突变前后各水文站的年平均流量变化较大,分别为  $15.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $9.95 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $26.70 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表3 不同方法得到的径流序列可能突变点

Table 3 The possible breakpoints of runoff series obtained from different methods

站点	检验方法		突变点	径流量变化/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )		
	滑动 T	小波分析		突变前	突变后	变化量
石匣里	1983	1961, 1972, 1983, 1994	1982 1983	20.97	4.99	15.98
响水堡	1982	1961, 1972, 1983, 1994	1982 1982	15.87	5.93	9.95
官厅水库	1983	1961, 1972, 1984, 1996	1983 1983	37.11	10.41	26.70

## 3 径流变化的原因探讨

引起河川径流量变化的原因归结起来大概有两方面的因素,一是自然因素,主要是降水的影响;二是人类活动因素,随着社会经济的快速发展,人类活动加剧,引起流域下垫面条件的改变。在影响河流径流量的气候因子中,降水是河流径流的主要补给来源。本文从降水量的变化和人类活动两个方面分析径流变化的原因。

### 3.1 降水影响

利用流域内的 33 个雨量站点,通过泰森多边形法求得

上述 3 个水文站点以上区域的面降水量,并用 Mann Kendall 法进行趋势检验(表 4)。结果表明,3 个站点降水量的检验值  $Z$  均小于零,但是并未通过 0.05 的显著检验水平,说明在 1956 年-2003 年间永定河流域的降水量呈下降趋势,但趋势不明显。所以降雨的减少虽然对径流产生了一定的影响,但是影响程度不大。

表 4 永定河流域 3 个站点降水量趋势检验

Table 4 The trend test of precipitation at 3 hydrological stations of the Yongding River Basin

流域	石匣里以上区域	响水堡以上区域	官厅水库以上区域
统计检验值 $Z$	-1.51	-1.65	-1.65

### 3.2 人类活动对径流的影响

通过对流域降雨量的分析得知,降雨量的变化并不明显,说明引起流域径流量变化的主要因素是人类活动。而人类活动的影响主要包括两个方面:一是直接的影响,包括人口增长和社会经济发展导致的河道外引水量的增加;二是间接影响,包括土地利用的改变、基础设施的建设、水土保持措

施等改变下垫面条件,引起地表径流的变化。

#### 3.2.1 土地利用变化对径流的影响

土地利用/覆盖变化是对经济发展和政府激励的响应,这些变化是为了满足人口的不断增加。它会对不同时间和空间尺度的水文循环会产生一定的影响,引起流域产汇流条件的变化,进而导致水资源总量的改变。作为径流影响的重要因素之一,分析其主要变化特征是十分必要的。

本文收集了永定河流域三期的土地利用数据(数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心)分析其土地利用变化。根据国家土地分类标准,主要有 6 大类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用土地,利用 GIS 的空间分析功能得出永定河流域 1980 年、1995 年和 2000 年三期各类土地面积及其变化量(表 5)。

由表 5 可知 3 个区域主要土地类型为耕地,土地面积百分比分别约占 54%、47% 和 50%,其次是草地和林地,三种地类面积占总面积的 97%,水域、建设用地和未利用土地面积比例均很小。

表 5 不同年代 3 个区域各地类面积及变化量

Table 5 The areas and their variations for all land use types of three regions in different years

土地类型	区域	面积/km <sup>2</sup>			面积百分比(%)			变化量/km <sup>2</sup>		
		1980 年	1995 年	2000 年	1980 年	1995 年	2000 年	1980-1995 年	1995-2000 年	1980-2000 年
耕地	桑干河	14 094	13 521	14 059	54.8	52.6	54.7	-573	538	-35
	洋河	7 543	6 804	7 549	48.6	43.9	48.7	-739	745	6
	官厅以上	22 997	21 571	22 896	50.7	47.6	50.5	-1 426	1 325	-101
林地	桑干河	4 121	4 348	4 101	16.0	16.9	16.0	227	-247	-20
	洋河	2 220	3 514	2 194	14.3	22.7	14.1	1 294	-1 320	-26
	官厅以上	8 532	10 181	8 542	18.8	22.4	18.8	1 649	-1 639	10
草地	桑干河	6 947	7 168	6 945	27.0	27.9	27.0	221	-223	-2
	洋河	5 459	4 501	5 462	35.2	29.0	35.2	-958	961	3
	官厅以上	12 884	12 094	12 873	28.4	26.7	28.4	-790	779	-11
水域	桑干河	140	200	142	0.5	0.8	0.6	60	-58	2
	洋河	79	82	77	0.5	0.5	0.5	3	-5	-2
	官厅以上	318	408	324	0.7	0.9	0.7	90	-84	6
建设用地	桑干河	293	289	352	1.1	1.1	1.4	-4	63	59
	洋河	153	181	172	1.0	1.2	1.1	28	-9	19
	官厅以上	459	502	559	1.0	1.1	1.2	43	57	100
未利用土地	桑干河	116	185	112	0.5	0.7	0.4	69	-73	-4
	洋河	56	428	56	0.4	2.8	0.4	372	-372	0
	官厅以上	174	608	170	0.4	1.3	0.4	434	-438	-4

从时间角度看,不同时期不同地类的面积变化较大。1980 年-1995 年期间林地、水域、建设用地和未利用土地面积都有所增加,耕地和草地面积减少。林地面积增加最多,在 3 个区域分别增加 227 km<sup>2</sup>、1 294 km<sup>2</sup>、1 649 km<sup>2</sup>;耕地面积减少最多,分别减少 573 km<sup>2</sup>、739 km<sup>2</sup>、1 426 km<sup>2</sup>。这种变化特征与当时国家推行农村土地家庭联产承包制度和加大力度实施水土保持措施有关。永定河山区属海河流域水土流失严重区,1983 年永定河上游被列为国家八片水土保持重点治理地区之一,从 1983 年-1992 年累计治理面积 1 926.3 km<sup>2</sup>,1993 年-1997 年累计完成治理面积 3 663.37 km<sup>2</sup>。而根据研究表明林地通过枝叶的截留作用以及利用枯枝落叶

层和发达根系的涵蓄水量作用,可以减少产流。与林地相比,耕地在降雨截留和入渗方面较小,耕地面积的减少和林地面积的大幅增加会导致径流相对减少。

1995 年-2000 年期间,土地利用变化与 1980 年-1995 年的变化趋势相反。耕地、草地(除桑干河)和建设用地面积增加,林地、水域和未利用土地减少。其中耕地面积变化较大,分别增加 538 km<sup>2</sup>、745 km<sup>2</sup>、1 325 km<sup>2</sup>,林地面积分别减少 247 km<sup>2</sup>、1 320 km<sup>2</sup> 和 1 639 km<sup>2</sup>。这段时期土地利用变化的驱动因素是工农业和生活用水的增加导致的,其主要根源是为满足不断增加的人口数量。据海河流域水资源评价结果表明<sup>[19]</sup>,自 1980 年城镇生活用水由 5.0 亿 m<sup>3</sup> 增加

到 2005 年的 21.1 亿  $m^3$ , 增加了 322%。而农村生活用水也由 11 亿  $m^3$  增加到 16.1 亿  $m^3$ , 增加了 47%。国民经济快速发展, 工业用水量在 80 年代呈现增长趋势, 海水水资源评价中工业用水量由 1980 年的 45.7 亿  $m^3$  增加到 1992 年的 69.9 亿  $m^3$ , 之后由于产业结构的调整和节水措施的加强, 工业用水量大致维持在 70 亿  $m^3$  左右。综合以上分析可以看出土地利用变化对径流产生了一定的影响。

### 3.2.2 水利工程设施建设的影 响

虽然水利设施建设为对抗御水旱灾害, 保障工农业生产和人民生命财产安全, 维护社会稳定, 发挥了重要的作用, 但同时也认识到水利工程会改变河流径流的时空规律分布, 例如在枯水季节水利工程可使流量增大, 均化了径流在年内的分布, 使流量过程变得较为平缓。而就其水库本身而言, 水库蓄水使得水位抬升, 流速降低, 水体滞留时间增加, 这不仅会导致水面蒸发量和河道渗漏量增大, 而且会减少地下水对河道的补给。非汛期取水量的增加也会导致下游水量的减少。若加之不合理的管理, 可能会导致下游径流量的减少, 地区间产生用水矛盾。

以官厅水库为例, 通过分析 1925 年-2007 年(中间缺少部分年份数据) 月径流量在建库前后(官厅水库于 1954 年运行) 的流量变化分析官厅水库的调节对径流年内分配的影响, 见图 5, 由图可以看出在非汛期 4 月-6 月份建库后的流量明显高于建库前流量; 在汛期 7 月-10 月份两个水文站在建库后的流量明显低于建库前。

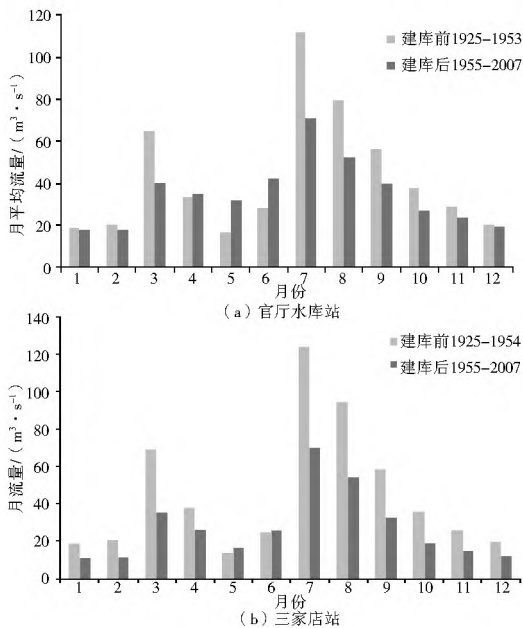


图 5 官厅水库和三家店站建库前后长期月径流量对比

Fig. 5 Comparison of long-time monthly runoff at the Guanting Reservoir and Sanjiadian stations before and after the dam construction  
(a) Guanting reservoir station; (b) Sanjiadian station)

### 3.2.3 地下水利用

据 1998 年和 1999 年水资源公报统计, 永定河山区地下水资源量大约是地表水资源量的 1.5 倍, 是永定河流域的主要供水来源。另外据统计从 20 世纪 70 年代开始流域开始大量开采地下水, 1980 年前后每年开采地下水约 7.9 亿  $m^3$ ,

1988 年-1998 年平均每年开采 11.57 亿  $m^3$ 。地下水的长期开采一方面使得地下水位下降, 改变区域下垫面条件, 尤其是增大了包气带缺水量, 使得地表降雨产流减少, 河流径流量减少。另一方面地下水开采量的增加必然会影响到河川基流, 造成地下水补给河流的径流量减少。

从地下水补给方面说城镇人口和城市规模不断扩张, 人工改造的城市下垫面不透水面积大幅增加, 一方面改变了自然水循环过程, 使得一些河流水系数量逐渐减少, 另一方面城市化的进程导致城市气候相应变化, 气温逐渐升高, 改变区域的降雨强度, 进而引起降雨入渗量变化, 不仅对城市的排水系统造成很大的压力, 容易造成道路积水现象, 而且导致地下水的入渗量减少, 基流量减少, 干旱期河川径流量也会相应减少。

## 4 结论

通过对永定河流域 1956 年-2003 年的年径流量的趋势性、周期性和变点分析, 得到如下结论。

(1) 径流量一直呈现显著下降的趋势, 尤以永定河流域下游石匣里站、响水堡站和官厅水库站下降趋势最大, 分别以 0.59  $m^3/s$ 、1.02  $m^3/s$  和 0.34  $m^3/s$  的速度下降。

(2) 石匣里、响水堡和官厅水库站都存在 27 年或 28 年的第一主周期和 20 年或 21 年的第二主周期, 且通过第二主周期的小波系数图得知在 1956 年-2003 年径流量变化经历了 3 个枯水期和 3 个丰水期, 据数据预测目前永定河流域应该进入枯水期。

(3) 虽然通过 Pettit 检验法、滑动 T 检验法和小波分析法得到的突变点不完全一致, 但综合结果表明石匣里站、响水堡站和官厅水库站突变点分别为 1983 年、1982 年、1983 年, 且突变前后年径流量变化较大, 分别相对减少了 15.98  $m^3/s$ 、9.95  $m^3/s$ 、26.70  $m^3/s$ 。

(4) 影响径流量减少的原因: 一方面是由于降水量的减少; 另一方面是人类活动的影响。其中人类活动是导致河流径流量减少的主要驱动力, 土地利用变化、闸坝工程建设以及地下水利用等活动严重改变了流域下垫面条件, 对河川径流量减少产生了深远的影响。

### 参考文献(References):

- [1] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG Jiayun, WANG Guoqing. Climate Change Influencing on Hydrology Water Resources[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 沈楠, 李春晖. 黄河流域近 500 多年来径流量演变特征[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 37-40. (SHEN Nan, LI Chunhui. Evolution Characteristics of Runoff in Yellow River Basin During 500 Years[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(5): 37-40. (in Chinese))
- [3] 徐东霞, 章光新, 尹雄瑞. 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, 20(3): 416-421. (XU Dongxia, ZHANG Guangxin, YIN Xiongrui. Runoff Variation and Its Impacting Factor in Nenjiang River during 1956-2006[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 416-421. (in Chinese))
- [4] 张小侠. 雅鲁藏布江流域关键水文要素时空变化规律研究[D].

- 北京:北京林业大学,2011.(ZHANG Xiaoxia. Spatial-Temporal Evolutional Laws of the Key Hydrological Elements in Yarlung Zangbo River Basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese))
- [5] 李洋. 石羊河流域水循环要素变化特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.(LI Yang. Variety of Water Cycle Factors in Shiyang River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese))
- [6] 杨新. 陕甘宁地区河流径流量变化特征及人为驱动力分析[D]. 西安:陕西师范大学,2003.(YANG Xin. The Analysis on the Change Characteristic and Driving Forces of River Runoff in Shaanxi Gansu Ningxia Region[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2003. (in Chinese))
- [7] 王文圣,丁晶,向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展,2002,13(4):515-517.(WANG Wensheng, DING Jing, XIANG Honglian. Application and Prospect of Wavelet Analysis in Hydrology[J]. Advances in Water Science, 2002,13(4):515-517. (in Chinese))
- [8] 姚允龙,吕宪国,王蕾. 1956-2005年径流和径流演变特征及影响因素分析[J]. 资源科学,2009,31(4):648-655.(YAO Yunlong, LYU Xiangguo, WANG Lei. Tendency and Periodicity of Annual Runoff of Naoli River from 1956 to 2005[J]. Resources Science, 2009,31(4):648-655. (in Chinese))
- [9] 吕翠美,吴泽宁,刘文立,等. 伊河流域径流周期变化特征的小波分析[J]. 人民黄河,2007,29(5):26-28.(LYU Cuimei, WU Zening, LIU Wenzhi, et al. The Wavelet Analysis of Runoff Periodic Change Characteristics in Yili Watershed[J]. Yellow River, 2007,29(5):26-28. (in Chinese))
- [10] 谢庄,曹鸿兴,李慧,等. 近百余年北京气候变化的小波特征[J]. 气象学报,2000,58(3):362-369.(XIE Zhuang, CAO Hongxing, LI Hui, et al. Wavelet Characteristics of Climate Change in Beijing Since the 19th Century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000,58(3):362-369. (in Chinese))
- [11] 纪忠萍,谷德军,谢炯光. 广州近百年来气候变化的多时间尺度分析[J]. 热带气象学报,1999,15(1):48-55.(JI Zhongping, GU Dejun, XIE Jiongguang. Multiple Timescales Analysis of Climate Variation in Guangzhou During the Last 100 Years[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1999,15(1):48-55. (in Chinese))
- [12] 翟劲隼,张建云,刘九夫,等. 海河流域近50年降水变化多时间尺度分析[J]. 海河水利,2009,(1):1-3.(ZHAI Shaoyi, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Multiple Time Scale Analysis of Precipitation Variation in Haihe River Basin during Last 50 Years[J]. Haihe Water Resources, 2009,(1):1-3. (in Chinese))
- [13] Meyer S. D. An Introduction to Wavelet Analysis in Oceanography and Meteorology with Application to the Dispersion of Yunnan Waves[J]. Mon Wea Rev, 1993,(121):2858.
- [14] 魏凤英,曹洪兴. 中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究[J]. 大气科学,1995,19(2):140-148.(WEI Fengying, CAO Hongxing. Detection of Abrupt Changes and Trend Prediction of the Air Temperature in China, the Northern Hemisphere and the Globe[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1995,19(2):140-148. (in Chinese))
- [15] 任宪韶. 海河流域水资源评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.(REN Xianshao. Water Resource Evaluation in Haihe River Basin[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))

(上接第 11 页)

- [5] 冯绳武. 民勤绿洲的水系演变[J]. 地理学报,1963,(3):241-249.(FENG Shengwu. The Evolution of River Systems in Minqin Oasis[J]. Journal of Geographical Sciences, 1963,(3):241-249. (in Chinese))
- [6] 武威水利志编委会. 武威水利志[M]. 兰州:兰州大学出版社,1998.(The Editorial Committee of Wuwei Water Conservancy History. Wuwei Water Conservancy History[M]. Lanzhou: Lanzhou University Publish, 1998. (in Chinese))
- [7] 甘肃省水利厅,甘肃省发展和改革委员会. 石羊河流域重点治理规划[R]. 2007.(Department of Water Resources in Gansu Province, Gansu Province Development and Reform Commission. The Report of Integrated Water Resource Planning in Shiyang River Basin[R]. 2007. (in Chinese))
- [8] 张景平. 历史时期疏勒河水系变迁及相关问题研究[J]. 中国历史地理论丛,2010,(4):15-30.(ZHANG Jingping. The Historical Changes of River System in Shule River Basin and Relevant Issues[J]. Chinese Historical Geography, 2010,(4):15-30. (in Chinese))
- [9] 甘肃省发展和改革委员会,甘肃省水利厅,酒泉市人民政府. 敦煌地区水资源合理利用与生态保护综合规划[R]. 2011.(Gansu Province Development and Reform Commission, Department of Water Resources in Gansu Province, City Government of Jiuquan. The Report of Integrated Planning of Water Resource Conservation and Ecological Restoration in Dunhuang Region[R]. 2011. (in Chinese))
- [10] 清华大学,甘肃省水利厅,甘肃省水利厅,甘肃省水利厅. 论黄河传统分水制度与现代水资源管理模式相结合[R]. 2010.(Tsinghua University, Water Resource Bureau of Gansu Taolai River Basin. The Report on Approaches to Integrate the Traditional Water Allocation Regimes with Modern Basin Governance System[R]. 2010. (in Chinese))
- [11] 郑航,王忠静,刘强,等. 论黄河传统分水制度及其水量分析[J]. 水利水电技术,2011,42(7):1-5.(ZHENG Hang, WANG Zhongjing, LIU Qiang, et al. Study on the Time based Water Rights System and Its Reform in Taolai River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011,42(7):1-5. (in Chinese))