

文章编号: 1007-7588(2011)08-1438-08

# 白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因子分析

刘茂峰<sup>1,2</sup>, 高彦春<sup>1</sup>, 甘国靖<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 本文以白洋淀流域为研究对象, 首先应用 Mann-Kendall 非参数检验法分析流域内 8 个典型水文站点近 50 年的年径流变化趋势。在此基础上采用 Hurst 指数法分析年径流变化趋势在未来的可持续性。利用 Pettitt 突变检测法分析各水文站点年径流发生突变的年份, 比较突变前和突变后年平均径流量的变化情况。选取流域内和附近 6 个气象站点 1957 年-2006 年近 50 年间的年平均气温和年降水量资料, 对比其在突变年份前后的变化情况, 分析气象要素对流域径流量的可能影响。研究结果表明: 白洋淀流域各站点年径流量呈下降趋势且具有较强的持续性, 且流域上游年径流下降趋势更为显著, 而流域下游年径流下降值  $\beta$  高于上游; 1979 年是白洋淀流域年径流发生突变的年份, 且突变后时段内平均年径流量显著低于突变前时段; 对突变前后时期径流变化率的分析表明, 沙河水系年径流变化可能主要受气候变化影响, 而拒马河水系径流变化可能受人类活动影响主导; 流域在突变年份以后气温整体升高约  $1^{\circ}\text{C}$ , 降水量约降低 56.6mm, 气象因子可能是径流不断减少的重要原因。

**关键词:** 径流量; Mann-Kendall 非参数检验法; Hurst 指数法; Pettitt 突变点检测法

## 1 引言

白洋淀流域隶属海河流域的大清河水系, 流域内淀区是华北平原最大的淡水湖泊, 素有“华北之肾”之称。白洋淀具有缓滞洪水、蓄水灌溉、调节气候、补充地下水、维持生物多样性和生态平衡等重要作用。自 20 世纪 80 年代以来, 受自然因素和人类活动的影响, 白洋淀入淀水量逐年减少, 淀区连续出现干淀现象, 严重破坏了白洋淀流域的生态系统平衡。流域水文气象特征也逐渐发生变化, 表现为气温升高、降水减少、水位降低等。为避免干淀情况发生, 河北省和保定市不得不多次组织从白洋淀水库向淀区补水<sup>[1]</sup>。

目前许多学者针对白洋淀流域的气候、环境、生态等方面做了不少研究。如张芸等<sup>[2]</sup>研究了白洋淀的污染机制及防治措施, 李英华等<sup>[3]</sup>分析了白洋淀的水文特征及其对湿地生态环境的影响, 王洁等<sup>[4]</sup>采用 Mann-Kendall 方法分析了白洋淀流域气温和降水量的长期变化趋势, 高彦春等<sup>[5]</sup>分析了白洋淀流域的水文条件变化以及流域面临的生态环境问题。

因此研究白洋淀流域干旱问题具有重要意义。本文以数理统计方法作为手段分析白洋淀流域年径流量的变化趋势并预测其持续性; 找出径流量发生突变的年份, 以此为基础分析气象因子对年径流量的影响。

## 2 研究区概况

白洋淀位于东经  $113^{\circ}39'$ - $116^{\circ}12'$ , 北纬  $38^{\circ}3'$ - $40^{\circ}4'$  之间, 跨河北省、山西省和北京市。流域面积约  $3\ 1205\text{km}^2$ , 地势西北高、东南低, 海拔跨度约  $0\sim 2500\text{m}$ 。流域西北部主要为山区, 中部属平原地区, 东部低洼区即为白洋淀淀区。白洋淀流域属于暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候。四季分明, 春季干旱少雨, 夏季炎热多雨, 秋季晴朗, 寒暖适中, 冬季寒冷少雨。年平均气温  $6.8\sim 12.7^{\circ}\text{C}$ 。

本文选取分布于白洋淀流域(水系分布见图 1) 内 8 个典型水文站点的多年径流量序列进行分析, 各水文站点分别位于沙河水系、唐河水系、拒马河水系, 所选站点分布于上、中、下游, 基本能反映整个研究区的径流变化趋势, 各站点具体信息见表 1, 注意水库位置的水文站点均位于水库下游。年径

收稿日期: 2011-04-25; 修订日期: 2011-06-02

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项: “水利工程的生态效应与生态调度准则研究”(编号: 200909057)。

作者简介: 刘茂峰, 男, 安徽池州人, 硕士生, 研究方向为水文遥感。

通讯作者: 高彦春, E-mail: gaoyanc@igsnrr.ac.cn

2011年8月

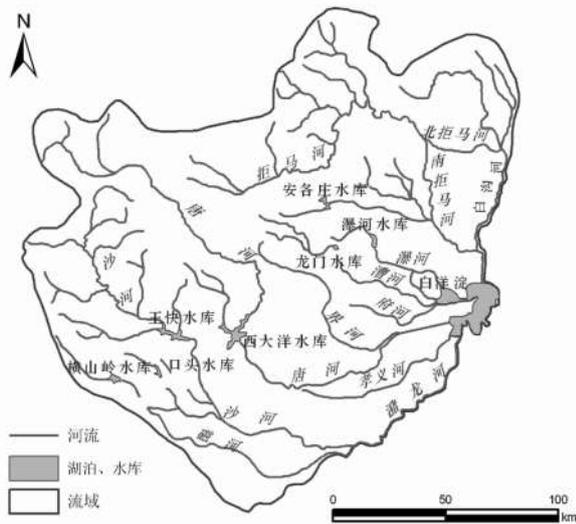


图1 白洋淀流域水系  
Fig.1 Baiyangdian watershed

表1 白洋淀流域水文站点信息

Table 1 Introducing information of Hydrological stations in Baiyangdian watershed

河名	水文站	集水面积 (km <sup>2</sup> )	资料时间 (年份)	年平均径流量 (×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
沙河	阜平	2210	1958-2002	2.85
沙河	王快水库	3770	1961-2002	5.38
唐河	倒马关	2770	1957-2002	2.44
唐河	中唐梅	3480	1959-2002	3.17
唐河	西大洋水库	4220	1960-2009	3.28
拒马河	紫荆关	1760	1950-2002	2.81
南拒马河	北河店	-	1951-2002	4.66
白沟引河	新盖房	1 0000	1970-2002	3.85

流数据来源于水文年鉴,并经过可靠性、一致性、代表性的检验,质量良好。气象数据受条件所限,选取白洋淀流域内及附近保定、北京、石家庄、饶阳、廊坊以及蔚县6个气象站点1957年-2006年50年的年降水、年平均气温资料作为气象因子,分析其对径流变化趋势的影响。数据来源于中国气象科学数据共享服务网,计算前检验数据的一致性、完整性和极值筛选以确保质量良好。

### 3 研究方法

#### 3.1 Mann-Kendall非参数检验方法

Mann-Kendall方法是一种广泛应用于降水、径流、气温等水文气象参数趋势分析的非参数检验方

法<sup>[6-8]</sup>。该方法的优势是不必事先假定数据的分布特征。给定 $n$ 个样本量的时间序列 $x_i, i=1, 2, \dots, n$ ,定义统计量 $S$ :

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

式中 $x_j, x_k$ 分别为 $j, k$ 年的样本值,且 $j > k$ :

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

得到正态分布统计量 $Z$ :

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

Mann-Kendall方法采用双边趋势检验。在给定显著性水平 $\alpha$ 下,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ ,拒绝原假设 $H_0$ ,表示样本系列趋势显著,其中 $Z$ 为正值时表示系列增长趋势显著,负值时表示系列降低趋势显著。当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时,接受原假设,表示样本系列趋势不显著,其中 $\alpha$ 是置信水平。

当样本趋势显著时,通常采用倾斜度 $\beta$ 表示系列的长期单调变化趋势,计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right], \quad \forall j < i \quad (5)$$

当 $\beta > 0$ 时,表明系列有上升趋势; $\beta = 0$ 时,表明系列无趋势; $\beta < 0$ 时,表明系列有下降趋势。

#### 3.2 Hurst指数法

Hurst指数法由Hurst1951年最早提出用于定量描述时间序列的持续性。Hurst指数法属于非参数分析方法,不必事先假定数据的分布特征,一般采用R/S分析法计算Hurst指数<sup>[4,9,10]</sup>,基本原理如下:

给定 $n$ 个样本量的时间序列 $x_\tau, \tau=1, 2, 3, \dots, n$ ,定义均值序列:

$$\bar{x}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x_t, \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

计算累积离差 $X(t, \tau)$ :

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}_\tau), \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (7)$$

定义极差 $R$ 序列和标准差序列分别如下:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$S(\tau) = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x_t - \bar{x}_{\tau})^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

建立无量纲比率R/S:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (10)$$

式中 $c$ 为常数; $H$ 为Hurst指数,取值范围[0,1],根据最小二乘法拟合求取。当 $H > 0.5$ ,表明数据系列具有持续性,即未来变化情况与过去趋势相同, $H$ 越大,持续性越强; $H < 0.5$ 表明系列具有反持续性,即未来变化情况与过去趋势相反, $H$ 越小表示反持续性越强; $H = 0.5$ 表明系列为标准高斯分布,不具有持续性,即对过去趋势没有依赖性。

### 3.3 Pettitt 突变点检测法

Pettitt方法是目前广泛应用的水文序列突变点检测的非参数检验法<sup>[11-13]</sup>,计算简便。给定 $n$ 个样本的时间序列 $x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,定义统计变量 $U_i$ :

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + V_{t,n} \quad (11)$$

其中 $V_{t,n} = \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_t - x_j)$ ,具体表达式与公式

(2)类似。Pettitt定义统计量 $K_t$ 获取最显著的可能突变点年份:

$$K_t = \max_{1 \leq t \leq n} |U_t| \quad (12)$$

利用统计量 $P$ 判定突变点是否满足给定显著性水平:

$$P = 2 \exp\left[ \frac{-6K_t^2}{n^3 + n^2} \right] \quad (13)$$

当 $P < \text{显著水平}\alpha$ 时,表示存在统计显著的突变点。

## 4 结果与讨论

### 4.1 年径流长期变化趋势分析

本文首先分析白洋淀流域内各水文站年径流变化趋势。图2表示阜平、倒马关、紫荆关三个典型水文站径流年际变化曲线和5年滑动平均值。可以看出三个站点年径流量逐渐趋于减少,进入20世纪80年代后枯水年份增多,年径流量锐减;除1988年、1996年处于丰水年年径流量较大外,其余年份年径流量均小于 $2.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 。三个水文站点分别位于白洋淀流域南支的沙河、唐河、北支的拒马河上游,不经过灌区且不受大型水库调度控制,相比中

下游流域,此三个水文站点径流量受气候变化等自然因素影响较大,因此近几十年气候等自然因素的变化趋势不利于增加白洋淀流域径流量。

利用Mann-Kendall非参数法检验白洋淀流域典型水文站点的年径流长期变化趋势。表2中流域内各站点趋势分析统计量 $Z$ 均为负值,表明年径流量总体呈下降趋势。除新盖房接受原假设外,其他站点均通过不同程度的显著性水平检验。其中,位于唐河水系的倒马关、西大洋水库水文站点均满足 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平,表明年径流量具有强烈的减少趋势,平均年径流量降低值 $\beta$ 分别为 $0.06 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $0.08 \times 10^8 \text{m}^3$ ,倒马关水文站位于水系上游,受人为因素干扰相对较小,其减少趋势可能主要体现为气候变化因素的影响。西大洋水库水文站位于水库下游而受水库调节如枯季蓄水等人类活动因素影响较大。中唐梅水文站达到 $\alpha = 0.01$ 的显著性

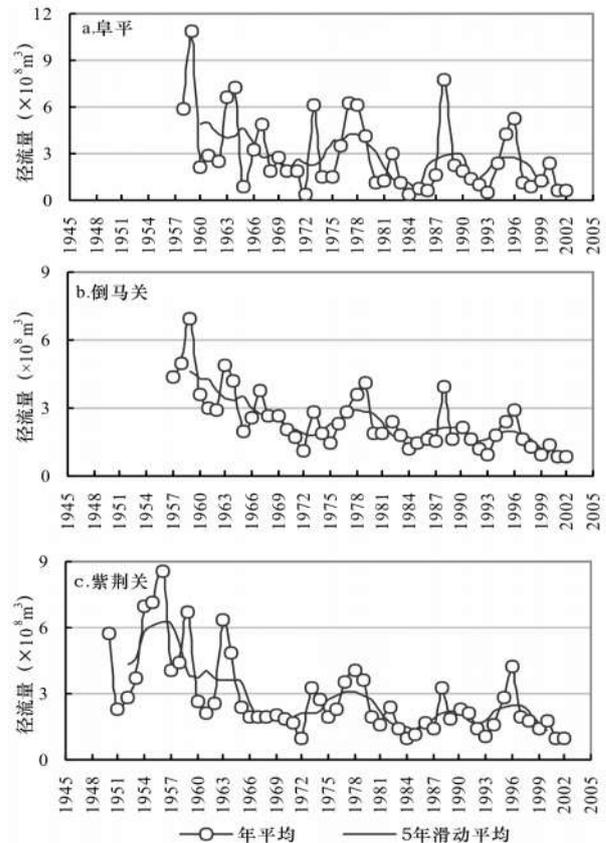
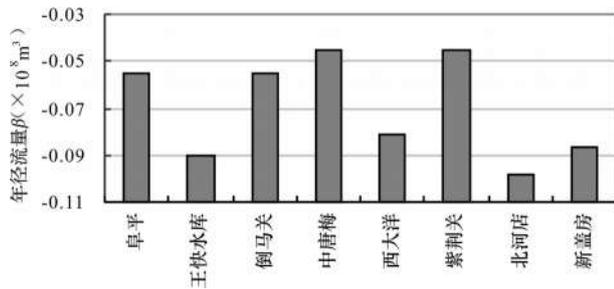
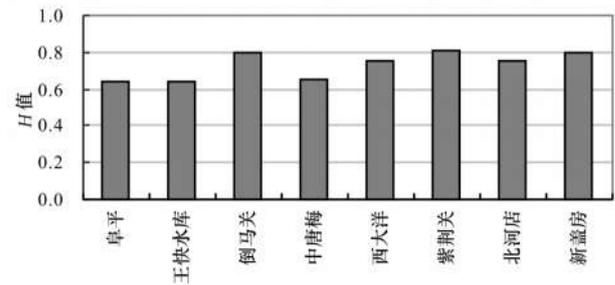


图2 白洋淀流域典型水文站平均年径流量及5年滑动平均值

Fig.2 Average annual runoff and moving average runoff of five year of typical hydrological stations in Baiyangdian watershed

2011年8月

图3 白洋淀流域水文站年径流系列 $\beta$ 值Fig.3  $\beta$  values of annual runoff of hydrological stations in Baiyangdian watershed图4 白洋淀流域水文站年径流系列 $H$ 值Fig.4  $H$  values of annual runoffs of hydrological stations in Baiyangdian watershed

水平,相比倒马关和西大洋水库水文站年径流递减趋势相对较缓,年均径流降低值 $\beta$ 为 $0.05 \times 10^8 \text{m}^3$ ,亦低于倒马关和西大洋水文站(图3)。实地考察唐河流域发现唐河中下游已经断流并被耕地覆被类型代替,因此唐河水系年径流整体上呈现急剧降低的趋势且中下游部分处于断流状态。南支的沙河水系阜平、王快水库水文站分别满足 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,相比唐河水系径流减少趋势较缓,且位于上游的阜平水文站显著性水平(置信度水平)低于(高于)高于位于中游的王快水库水文站,下降趋势更为显著。拒马河水系紫荆关、北河店水文站均满足 $\alpha=0.001$ 的显著性水平,且位于上游的紫荆关水文站下降趋势更为明显,但是北河店平均年径流量降低值 $\beta$ 显著高于紫荆关,原因可能是北河店站位于中游,年径流量高于紫荆关站,因此尽管减少趋势相对较小,整体减少量仍然高于紫荆关站。新盖房水文站点位于拒马河水系下游段的白沟引河上,相比其他水文站集水面积最大,因此受人为因素影响最大。尽管年径流量不满足置信度检验, $\beta$ 值仍高达 $0.09 \times 10^8 \text{m}^3$ ,仅次于北河店。根据对3个水系流域的分析结果可以看出,流域上游水文站点满足更高的置信度因而年径流量减少趋势更为显著;中下游水文站点相比上游尽管递减趋势较缓,但由于整体径流量更大,径流降低值 $\beta$ 一般亦高于上游水文站点(图3)。

#### 4.2 年径流变化趋势持续性分析

根据Hurst指数法分析白洋淀年径流变化趋势的持续性。图4显示各站点的 $H$ 值均大于0.6,表明年径流变化趋势均具有较强的持续性。Mann-Kendall分析结果已经表明流域年径流量逐

渐降低,因此,未来一段时间内各站点年径流变化和过去保持一致呈减少趋势。流域不同位置的年径流量递减趋势持续性强度亦不同,其中位于流域上游的倒马关、紫荆关水文站 $H$ 值均达到0.8,具有很强的趋势持续性。位于中游的西大洋水库、北河店水文站Hurst指数均为0.75,亦有较强的持续性,但小于流域上游。阜平、王快水库水文站均为沙河水系站点,Hurst指数最低,为0.64,因此沙河水系相比唐河水系、拒马河水系径流量变化趋势的持续性相对较弱。

#### 4.3 年径流突变年份分析

利用Pettitt方法分析白洋淀流域年径流序列的突变年份。图5直观表达了各站点分别相对于显著性水平 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 的可能突变年份。如表2

表2 白洋淀流域各站年径流量趋势分析和突变点检测统计结果

Table 2 Results of trend test and change-point analysis of runoffs in Baiyangdian watershed

水文站	Mann-Kendall 趋势统计		Pettitt 突变点检测	
	Z	显著性水平	年份	显著性水平
阜平	-2.93	***	1979	<0.05
王快水库	-2.50	**	1980	<0.05
倒马关	-5.22	****	1979	<0.01
中唐梅	-2.61	***	1979	>0.05
西大洋水库	-5.51	****	1988	<0.01
紫荆关	-4.86	****	1965	<0.01
北河店	-4.02	****	1979	<0.01
新盖房	-1.64	R	1979	>0.05

注:\*\*、\*\*\*、\*\*\*\*分别代表 $\alpha=0.05, 0.01, 0.001$ 的显著性水平, R代表拒绝原假设。

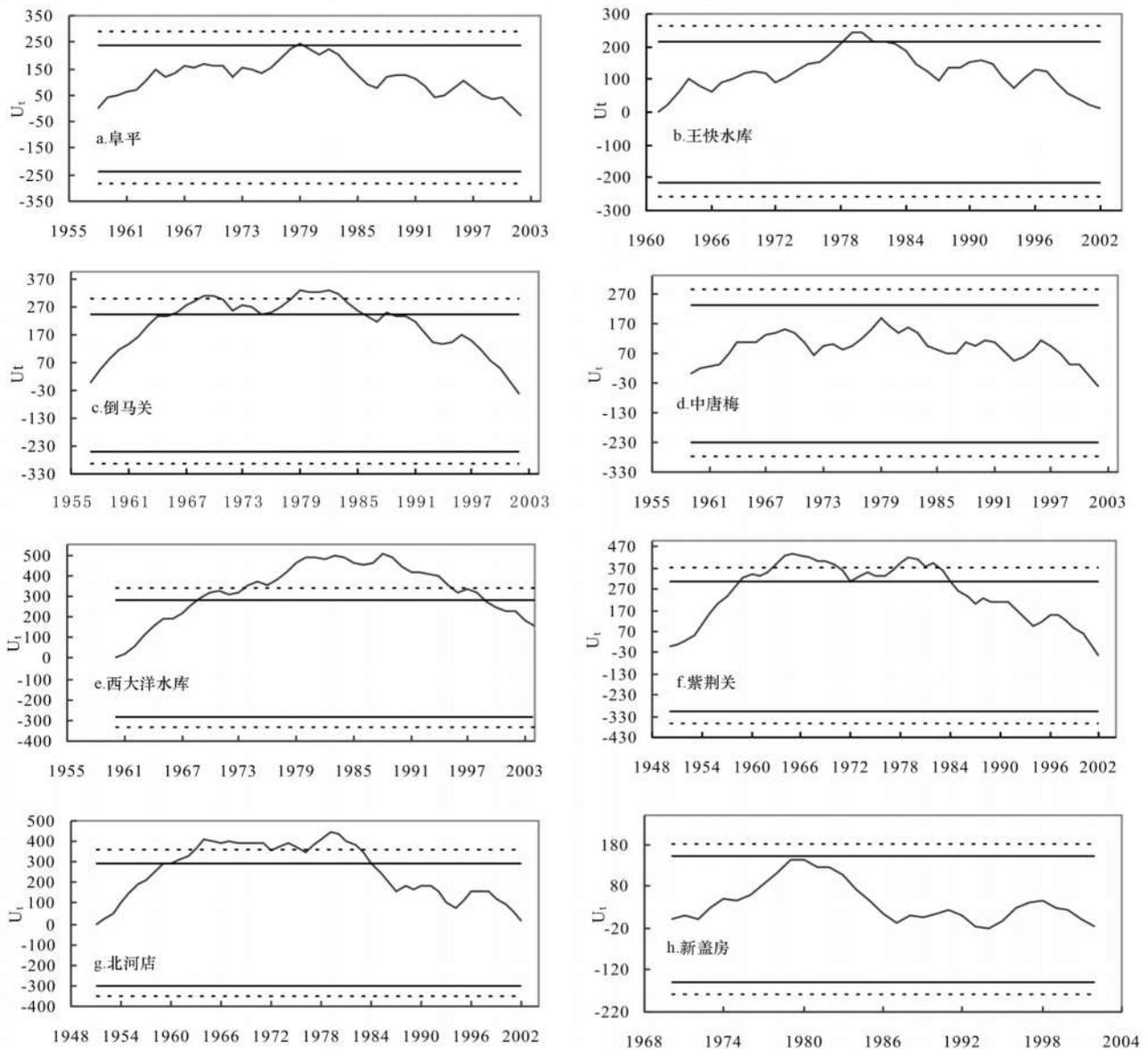


图5 白洋淀流域水文站年径流 Pettitt 突变检测结果

Fig.5 Results of Pettitt change-point analysis of annual runoffs of hydrological stations in Baiyangdian watershed

所示,沙河水系阜平、王快水库水文站突变年份分别为1979年和1980年,年份非常接近且均满足 $\alpha=0.05$ 的显著性水平。唐河水系倒马关、中唐梅水文站突变年份均在1979年且倒马关满足 $\alpha=0.01$ 显著水平要求,唐河中下游西大洋水库站点突变年份与上游两站不同,可能由站点位于西大洋水库下游而受水库调节影响较大的原因所致。拒马河水系上游紫荆关水文站突变年份为1965年,中下游北河店和新盖房两站均为1979年,但新盖房未满足显著性水平检验。分别研究各站点突变年份前后时期

平均年径流量,如表3所示。阜平、倒马关、紫荆关三个上游水文站突变点前后平均年径流量平均降低 $2.32 \times 10^8 \text{m}^3$ ,其余中下游站点平均年径流量减少 $2.73 \times 10^8 \text{m}^3$ ,高于上游站点。但Mann-Kendall分析结果表明,部分流域上游水文站点径流降低趋势相比下游站点更为显著,中下游站点相比上游径流量更大的特点可能是其突变前后时期径流量下降值更大的主要原因。为避免这种情况,采用突变前后时期变化率作为指标反映突变前后的径流变化的剧烈程度。南支沙河水系上游的阜平水文站尽管

2011年8月

表3 白洋淀流域各水文站突变点前后平均年径流量

Table 3 Results of average runoffs of periods before and after change-point in Baiyangdian watershed ( $\times 10^8 \text{m}^3, \%$ )

水文站	突变点	突变点	突变前后年 径流变化	突变前后年* 径流变化率
	前期	后期		
阜平	3.86	1.89	-1.97	51.04
王快水库	6.89	4.01	-2.88	41.80
倒马关	3.16	1.71	-1.45	45.89
中唐梅	3.96	2.44	-1.52	38.38
西大洋水库	4.46	1.64	-2.82	63.23
紫荆关	4.58	2.04	-2.54	55.46
北河店	6.45	2.39	-4.06	62.95
新盖房	7.42	2.31	-5.11	68.87

注:\*为|突变后期-突变点前期|/突变点前期。

突变前后径流量变化值(绝对值)低于中游王快水库,但相应的变化率明显高于王快水库水文站,因此阜平站突变年份前后径流变化更为剧烈。唐河水系倒马关站与阜平站类似,径流量降低值低于而变化率高于中唐梅站,西大洋水库径流变化值和变化率均大于以上两站点,可能受水库调控等因素影响较大。流域北支的拒马河水系突变前后径流变化(绝对值)和变化率均是新盖房>北河店>紫荆关,即从上游向下逐渐增加。一般情况下,上游受人为因素影响相对较小,中下游水文站点受水库调控、灌溉、耕种等更多的人类活动因素干扰可能更多。结合以上各水系分析结果,不难看出,沙河水系上游在突变前后径流变化相比下游更为剧烈,气候变化产生的径流变化相比人类活动等因素更为显著;除大西洋水库下游水文站点受水库调节影响外,唐河水系也呈现出与沙河水系类似的特点;北支的拒马河水系则与前两个南支水系相反,流域下游于突变前后的径流变化更为显著,因此受人类活动如灌溉、耕种等因素对径流的影响更大,气候变化产生的径流变化相对较小。

#### 4.4 年径流变化气候影响因子分析

本文研究表明,大多数水文站点径流量突变年份为1979年或者附近年份,与刘克岩等<sup>[14]</sup>的研究成果相符。并且有研究表明,1981年是气温升高和降水减少的转折点<sup>[15,16]</sup>,与本研所得到的年径流转折点1979年相近,因此气温和降水变化所体现的气候变化可能是年径流突变的主要原因之一。以

表4 白洋淀流域各站点突变年份前后气温及降水量

Table 4 Long-term average air temperature and annual precipitation before and after change-point in Baiyangdian watershed ( $^{\circ}\text{C}, \text{mm}$ )

水文站	突变前		突变后	
	(1957年-1979年)		(1980年-2006年)	
	平均气温	降水	平均气温	降水
北京	11.48	637.65	12.84	532.66
石家庄	12.91	547.38	13.78	508.34
保定	12.30	563.98	13.23	493.09
饶阳	12.19	540.28	12.71	504.84
廊坊	11.50	537.87	12.66	464.59
蔚县	6.29	414.41	7.51	398.26

1979年作为白洋淀流域年径流量的突变年份,突变年份前作为基准期(1957年-1979年),突变年份后作为变化期(1980年-2006年)。选取白洋淀流域内或周边气象站点以研究气象要素如气温、降水对流域径流量的影响。如表4所示,变化期平均气温高于基准期,其中北京站涨幅最大,为 $1.4^{\circ}\text{C}$ ,饶阳最小也达到 $0.5^{\circ}\text{C}$ ,平均涨幅为 $1.0^{\circ}\text{C}$ 左右。气温升高增加流域整体蒸发能力,长时期条件下可能增加流域的蒸散发量相比降水量的比重,从而减少年径流量。变化期平均年降水量相比基准期降低约 $56.6\text{mm}$ ,北京站降幅最大,达 $105.0\text{mm}$ 。降水地表径流的主要来源,降水的大幅度降低是流域径流不断减少的重要原因之一,也进一步加剧白洋淀流域的干旱形势。目前天然入淀区水量已经不能满足白洋淀生态环境需水要求<sup>[17]</sup>。

## 5 结论

本文采用Mann-Kendall非参数检验方法分析了位于白洋淀流域内3个水系的8个水文站点的年径流量变化趋势,并借助Hurst指数法进一步分析变化趋势在未来的持续性特征;利用Pettitt方法检测各站点年径流量突变年份,并比较突变前后时期平均年径流量的大小;最后分析影响白洋淀流域年径流量变化的可能因素。主要结论如下:

(1)白洋淀流域各站点年径流量均呈现下降趋势,除新盖房水文站点外,其余站点均至少满足 $\alpha=0.05$ 的显著性水平;上游站点递减趋势更为显著,但中下游站点相比上游本身径流量更大,因此

径流量降低值 $\beta$ 反而高于上游站点;沙河水系相比唐河、拒马河水系年径流降低趋势相对较缓;年径流量平均降幅达到 $0.7 \times 10^8 \text{m}^3$ 。Hurst指数分析结果显示大部分站点H指数在0.75以上,说明这种递减趋势总体上具有较强的持续性,因此未来白洋淀流域内径流可能进一步减少,淀区湖面萎缩、“干淀”等问题可能愈发严重;沙河水系相比另两个水系H指数较低因而持续性较弱。

(2)流域内大部分站点年径流量存在突变年份且均发生在1979年,因此1979年可以作为白洋淀流域径流量发生突变的年份。各水文站点在突变年份前的平均年径流量均显著低于突变年份后;对突变前后变化率的分析结果表明沙河水系年径流变化趋势可能受气候变化影响较大,而拒马河水系正好相反,年径流变化可能主要受人类活动的影响。

(3)流域内和邻近气象站点分析结果表明,相比基准期,白洋淀流域在变化期内年平均气温升高约 $1^\circ\text{C}$ ,年平均降水量约降低56.6mm。气温的升高导致蒸发能力的提高,降水量降低直接减少了产流量。因此气象要素是白洋淀年径流不断减少的重要原因之一。今后的研究应进一步分析人类活动因素对径流的影响。

#### 参考文献 (References):

- [1] 杨春霄. 白洋淀入淀水量变化及影响因素分析[J]. 地下水, 2010, 32(2): 110-112.
- [2] 张芸,王秀兰,李兵. 白洋淀污染机理及防治探讨[J]. 水资源保护, 1999, (4):29-32.
- [3] 李英华,崔保山,杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响[J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 62-68.
- [4] 王洁,徐宗学. 白洋淀流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J]. 自然资源学报, 2009, 31(9): 1498-1505.
- [5] 高彦春,王晗,龙笛. 白洋淀流域水文条件变化和面临的生态环境问题[J]. 自然资源学报, 2009, 31(9): 1506-1513.
- [6] Hirsch, R M., Slack, J R. Non-parametric trend test for seasonal data with serial dependence[J]. *Water Resource Research*, 1984, 20(6): 727-732.
- [7] Gan, T Y. Hydroclimatic trends and possible climatic warming in the Canadian Prairies[J]. *Water Resource Research*, 1998, 34(11): 3009-3015.
- [8] 蔺学东,张德铤,姚治君,等. 拉萨河流域近50年来径流变化趋势分析[J]. 地理科学进展, 2007, 26(3): 58-67.
- [9] 谢平,雷红富,陈广才,等. 基于Hurst系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文, 2008, 28(5): 6-10.
- [10] Wallis J R, Matalas N C. Small sample properties of H and K-Estimations of the Hurst coefficient[J]. *Water Resource Research*, 1970, 16(6): 1583-1594.
- [11] Pettitt AN. A non-parametric approach to the change point problem[J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [12] Qin, N.X., Chen, X., Fu, G.B., et al. Precipitation and temperature trends for the Southwest China: 1960-2007[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(25): 3733-3744.
- [13] Xu, Z.X., Liu, Z.F., Fu, G.B., et al. Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River basin during the past 50 years[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(2): 256-267.
- [14] 刘克岩,张槽,张光辉,等. 人类活动对华北白洋淀流域径流影响的识别研究[J]. 水文, 2007, 27(6): 6-10.
- [15] 肖嗣荣. 未来气候变化及其对海河流域环境影响[J]. 地理与地理信息科学, 1992, 8(1): 32-35.
- [16] 刘学锋,阮新,李元华. 河北省冷暖变化气候特征分析[J]. 气象科学, 2005, 25(6): 638-644.
- [17] 赵翔,崔保山,杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1033-1040.

# Long-Term Trends in Annual Runoff and the Impact of Meteorological Factors in the Baiyangdian Watershed

LIU Maofeng<sup>1,2</sup>, GAO Yanchun<sup>1</sup>, GAN Guojing<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The nonparametric Mann-Kendall method was used to detect long-term trends and determine the significant level of annual runoff observed at hydrologic stations in the Baiyangdian watershed. The Hurst exponent method was applied to analyze the sustainability of trends in annual runoff, which was then combined with the results of the Mann-Kendall test to examine characteristics of future trends in annual runoff. It was found that in general the upper reaches of the Baiyangdian watershed showed a more statistically significant decreasing trend in annual runoff than the lower reaches. The  $\beta$  value of annual runoff for the upper reaches was significantly smaller than that for the low reaches, which may be due to a larger magnitude of annual runoff in the lower reaches. The significant level and sustainability of the decreasing trend of the Shahe watershed located in the south of the Baiyangdian watershed were relatively less than those of the Tanghe and Jumahe watershed. This indicates that the annual runoff of the Shahe watershed exhibited a slower decreasing trend than the other two watersheds. The overall trend of annual runoff was decreasing and may maintain a consistently decreasing trend in the future, which can not only explain why watersheds and lakes across the Baiyangdian watershed are drying up but also be helpful for forecasting possible changes in runoff. These findings are beneficial in improving the understanding of the hydrological cycle and water resources management. The Pettitt change-point statistical method was used to determine hydrologic change points in annual runoff time series. The mean annual runoff before and after the change point were calculated, respectively. Comparison between them shows that the former was significantly larger than the later. An analysis focused on runoff change rates before and after the change year illustrates that the marked runoff change between the two periods may be influenced mainly by climate change in the Shahe watershed, while the essential factor dominating the annual runoff in the Jumahe watershed may be human activities. Subsequently, the authors compared air temperature and mean annual precipitation before and after the change point in the entire Baiyangdian watershed. Results indicate that the mean air temperature has increased about 1°C, which may play an important role in changing the evapotranspiration. Less precipitation may result in a reduction in the surface runoff, given a possible reduction in evapotranspiration. Mean annual precipitation decreased by about 56.6 mm when periods before the change year were compared with those after the change year. The decreased precipitation may be important to the significant reduction in surface runoff.

**Key words:** Runoff; Nonparametric Mann-Kendall Method; Hurst Exponent Method; Pettitt Change-point statistics