

漳卫南运河流域水文气象要素长期变化趋势分析

蔡锡填 徐宗学 李占玲

(北京师范大学水科学研究院,水沙科学教育部重点实验室,北京 100875)

摘要 漳卫南运河流域是一个对气候变化十分敏感、人类活动又非常活跃的地区。本研究采用非参数 Mann-Kendall 检验方法和 R/S 方法对漳卫南运河流域 50 年来的水文气象要素进行分析,并从气候变化和人类活动两方面分析其变化的原因。结果表明:受气候变化影响,50 年来本流域气温上升了 1.08°C ,降水减少了 83.2mm ,而且这种趋势在未来仍可能持续一段时间。相对湿度的变化,在西部山区主要受气候变化影响呈下降趋势,在东部平原区受农业灌溉所产生的局部小气候影响呈上升趋势,但未来可能向相反趋势发展;径流量受人工调节,一致呈下降趋势,并且未来仍将持续一段时间。在气候变化和人类活动共同影响下,漳卫南运河流域有可能进一步朝暖干化方向发展。从更大范围的水循环来看,从本流域蒸发的水量可能随着季风在其它区域形成降水。进一步的研究可以分析包括土壤湿度、蒸散发、水汽传输和季风在内的区域水循环,以及气候变化和人类活动影响下的产汇流机理,从而找出区域干旱化的根本原因。

关键词 漳卫南运河流域;Mann-Kendall;Hurst 指数;气候变化;人类活动;农业灌溉

1 引言

气候变化是当今自然科学研究的一个热点,受到各国政府的关注。不仅如此,随着科学技术的进步,人类活动对自然界的影响进一步加剧。在我国,伴随着人口增长和改革开放以来社会经济的高速发展,自然条件已经发生了极大变化。尤其是华北很多地区,由于许多河流断流干涸,二、三十年前人们可以在河里游泳、钓鱼、戏水……,而如今已经成为了历史。本研究重点在于分析和预测气候变化和人类活动如何改变漳卫南运河流域径流、降水等水文气象过程。

2007 年政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告认为:观测到的 20 世纪中叶以来大部分全球平均温度的升高,很可能(最低可信度 90%)是由于观测到的人为温室气体浓度增加所引起,从而使人们以更高的可信度确信人类活动是造成近 50 年全球气候变化的主因^[1]。2006 年底中国科技部等六部委联合发布《气候变化国家评估报告》^[2]指出,中国气候变化的主要特征是:近 100 年来中国年地表平均气温明显增加,升温幅度约为 0.5°C ~

0.8°C ,比同期全球增幅平均值(0.6 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 略强;近 100 年和近 50 年中国年降水量变化趋势不显著,但年代际波动较大,我国华北、西北东部、东北南部等地区年降水量出现下降趋势,近 50 年中国的日照时间、水面蒸发量、近地面平均风速、总云量均呈显著减少趋势,华北和东北地区干旱趋重,长江中下游流域和东南地区洪涝加重。IPCC 第四次评估报告和我国《气候变化国家评估报告》为研究气候变化和人类活动建立了一个框架,而如何针对区域地理、气候和人类活动等具体情况具体分析和研究其中的机理,仍需要众多学者做更多的工作。而在现有的科技水平下,还不能对观测到的气候变化中自然因素和人类活动因素的贡献予以明确的辨识^[3]。

本研究是在“对气候变化十分敏感,人类活动又非常活跃的海河流域”^[4]的漳卫南运河子流域,采用 Mann-Kendall 方法分析流域及邻近 8 个气象站 1957 年~2006 年实测气温、相对湿度和降水序列及 3 个水文站 1956 年~2005 年的实测径流序列 50 年来的变化趋势,并从气候变化和人类活动两方面分析其变化的原因。在此基础上进一步采用 R/S 分析法,计算相应序列的 Hurst 指数,预测未来气象要素和

收稿日期:2007-09-02;修订日期:2007-11-15

基金项目:北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费。

作者简介:蔡锡填,男,广东普宁人,硕士生,研究方向为水文过程及其模拟。

E-mail:xtcai@mail.bnu.edu.cn

通讯作者:徐宗学, E-mail:zxxu@bnu.edu.cn

径流的变化趋势。本研究成果可望为研究漳卫南运河流域气候变化和径流减少提供一些帮助,为华北地区自然生态环境的恢复提供参考依据。

2 方法和资料

2.1 研究区概况

漳卫南运河是海河流域五大水系之一,由漳河、卫河、卫运河、漳卫新河和南运河组成,流经山西、河南、河北、山东4省及天津市入渤海,流域面积37700km²,范围位于东经112°~118°,北纬35°~39°之间。流域内地势西南高东北低,上游地处太行山区,大多在海拔1000m以上,山区、丘陵面积占68%,平原面积占32%。西部山区与东部平原直接相接,山前丘陵过渡区很短。流域地处温带半干旱、半湿润季风气候区。多年平均气温在14℃左右,多年平均降水量608.4mm。冬季是全年降水最少的季节,降水量仅占全年的2%左右。全年降水量主要集中在夏季,7、8两月降水量占全年的一半以上。春季降水量为全年的8%~16%,加上降水变率大,常出现春旱。秋季降水次于夏季,降水量为全年的13%~23%。漳卫南运河流域水系和土地利用分别见图1和图2。

2.2 数据处理

研究选取漳卫南运河流域及其邻近的榆社、长治等8个气象站的气温、降水和相对湿度数据(包括年和月平均,该数据来自国家气象局气象中心,已经过初步质量控制)以及流域内3个水文站的流量数据(数据来自漳卫南运河管理局)。各站点见图1。

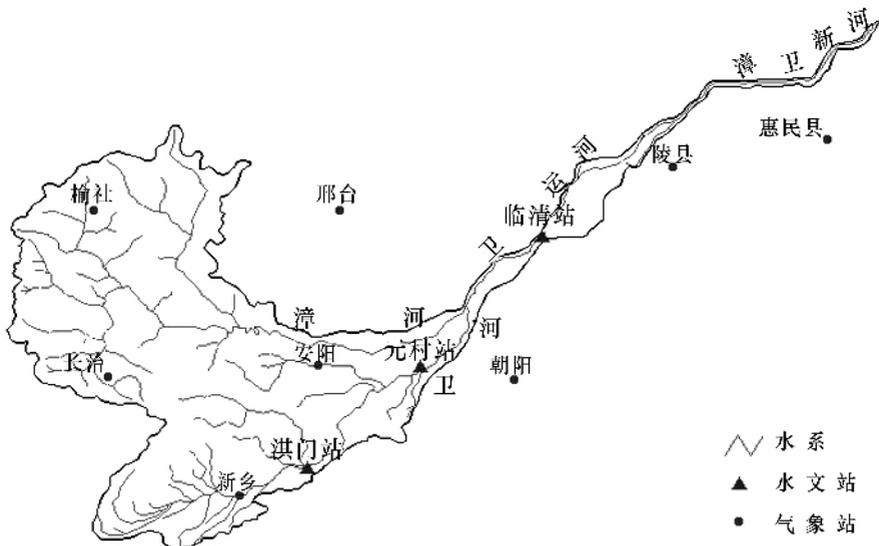


图1 漳卫南运河流域河流水系和选取的水文站、气象站分布

Fig. 1 Map of distribution of hydrological and meteorological stations in Zhangweinan River basin

为了各站点时间序列的可对比性,气象站资料取1957年~2006年,流量资料取1956年~2005年。对于个别缺测年份,采用邻近站相关分析进行插补。

2.3 Mann-Kendall 方法

基于秩的 Mann-Kendall 非参数统计检验方法^[5,6]广泛用于水文气象时间序列的趋势分析^[7-10]。

对于长度为 n 的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n ,

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

$$\text{式中: } \text{sgn} = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Mann-Kendall 方法有两个重要的趋势检验参数,一是显著性水平 α ,表示趋势的强弱;二是倾斜度 β ,表示趋势的方向和大小,当 $\beta > 0$ 时表示上升趋势,当 $\beta < 0$ 时表示下降趋势,计算公式为^[11]:

$$\beta = \text{Median} \left[\left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \right], \forall i < j \quad (1 < i < j < n) \quad (3)$$

2.4 Hurst 指数方法

Hurst 现象最早由 Hurst^[12]于1951年在总结尼罗河多年径流资料序列时发现的,经过 Mandelbrot、Wallis 和 Feder 等人的发展,Hurst 指数成为对时间序列的未来趋势具有很强预测能力的方法。这里简要介绍 Hurst 指数的 R/S 分析法,更详细的介绍可以见黄登仕等^[13]。极差 (R) 为时间序列累积离差的最大值和最小值之差,时间序列的标准差由 S 表

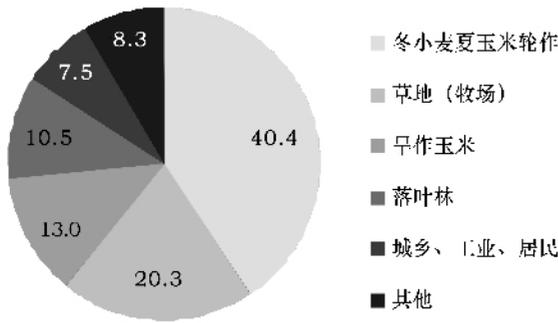


图 2 漳卫南运河流域 2000 年土地利用 (%)

Fig.2 Land use map of Zhangweinan River basin in 2000

示, 则重标极差 (R/S) 可以由下面经验关系定义:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (\alpha\tau)^H \quad (4)$$

式中: α 为常数; τ 为计算中考虑的时间间隔; H 为 Hurst 指数。当 $H = 0.5$, 表示时间序列是独立随机过程, 现在不会影响未来; 当 $H > 0.5$, 表示时间序列具有持续性, 意味着未来的变化趋势与过去一致, H 值越接近 1, 持续性越强; $0 \leq H < 0.5$ 时, 表示时间序列具有反持续性, 意味着未来的变化趋势与过去相反, H 值越接近 0, 反持续性越强。

2.5 研究方法

本文使用 Mann-Kendall 方法计算漳卫南运河流域及其邻近 8 个气象站的平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、最低相对湿度和降水 1957 年 ~ 2006 年的年平均和月平均序列, 及流域内 3 个水文站 1956 年 ~ 2005 年的年平均和月平均流量序列, 在

95% 置信水平上进行趋势检验(如果在 95% 置信水平上通过检验, 则说明该时间序列存在统计上有意义的变化趋势)。据此分析气候变化和人类活动对漳卫南运河流域水文气象要素变化趋势的影响。同时, 计算相应的 Hurst 指数, 预测未来流域水文气象要素的变化趋势。

3 结果分析

3.1 气象要素序列 Mann-Kendall 检验结果

采用 Man-Kendall 方法对选取的 8 个气象站的平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、最低相对湿度和降水量 1957 年 ~ 2006 年序列进行检验, 年平均序列结果如表 1。表 2 表示各个月份各气象要素发生变化的站点数, 可以看出 3 月 ~ 5 月份是具有变化趋势最多的月份。因此, 在表 3 中列出最具代表性的 4 月份检验结果。

表 1 中年平均气温平均升幅为 $0.022^\circ\text{C}/\text{年}$, 50 年来上升了 1.08°C , 8 个站点中有 6 个通过了趋势检验, 最大升幅为邢台站 $0.045^\circ\text{C}/\text{年}$, 最小升幅为榆社站 $0.006^\circ\text{C}/\text{年}$, 最大气温 50 年来上升了 0.40°C , 只有榆社站通过趋势检验, 最低气温 50 年来上升了 1.77°C , 6 个站点通过了趋势检验, 且一致呈上升趋势, 相对湿度平均下降幅度为 $0.005\%/\text{年}$, 虽然平均变幅比较小(上升和下降互相抵消), 但是对每个站点则上升或下降幅度比较大, 其中东边站点呈上升趋势, 上升坡度最快为朝阳站 $0.105\%/\text{年}$, 50 年来上升了 5.3% , 西边站点呈下降趋势, 下降坡度最快

表 1 各气象要素年值序列 Mann-Kendall 检验结果

Table 1 Mann-Kendall test results of annual meteorological variables

	$T(\text{ }^\circ\text{C})$		$T_{\max}(\text{ }^\circ\text{C})$		$T_{\min}(\text{ }^\circ\text{C})$		$H_{\text{hmi}}(\%)$		$H_{\text{mi}}(\%)$		$P(\text{mm})$	
	趋势	β	趋势	β	趋势	β	趋势	β	趋势	β	趋势	β
榆社	—	0.006	↑	0.026	—	-0.003	—	0	—	0	—	-1.933
邢台	↑	0.045	—	0.004	↑	0.084	↓	-0.116	↓	-0.063	—	-1.226
长治	↑	0.029	—	0.012	↑	0.050	↓	-0.108	—	-0.027	—	-1.664
安阳	↑	0.020	—	0.005	↑	0.040	—	0	—	-0.021	—	-1.934
新乡	↑	0.019	—	0.003	↑	0.029	—	0	↓	-0.070	—	-0.409
陵县	↑	0.020	—	0.005	↑	0.029	↑	0.077	↑	0.118	—	-2.406
惠民县	↑	0.027	—	0.009	↑	0.044	—	0	↑	0.133	—	-0.998
朝阳	—	0.007	—	0	—	0.011	↑	0.105	↑	0.160	—	-2.736
$\sum(\beta)$	6/6	0.022	1/1	0.008	6/6	0.035	2/4	-0.005	3/5	0.0286	0/0	-1.663

说明: T 为平均气温; T_{\max} 为最高气温; T_{\min} 为最低气温; H_{hmi} 为相对湿度; H_{mi} 最低相对湿度; P 为降水量。趋势检验用“↑ (上升)”和“↓”

(下降)表示, 没有趋势则用“—”表示。最后一行中, \sum 表示通过趋势检验的总站点数及其中具有上升趋势的站点数, 如 2/3 表示总共有 3 个站点通过趋势检验, 其中 2 个具有上升趋势, β 表示各个站点平均的倾斜率。(下同)

为邢台站 0.116%/年,50 年来下降了 5.7%,降水量都没有通过趋势检验,但 β 值都小于 0,平均降幅为 -1.663mm/年,50 年平均减少了 83.2mm。表 3 中 4 月份平均气温、最高气温和最低气温的平均增幅比年平均的增幅大;4 月份平均相对湿度和平均最低相对湿度的平均变化幅度比年平均小,但是每个站的变化幅度比年平均大。

由此表明:①气温的上升趋势最为明显,平均气温的上升主要来自最低气温升高的贡献,而最高气温上升趋势相对较小。Thomas 等^[14]1993 年对全球陆地表面 1951 年~1990 年的月平均最高和最低气温变化研究表明,最低温度升高是最高温度升高的 2.78 倍。说明漳卫南运河流域最高和最低气温的变化趋势与全球气温变化基本一致,也与我国北方地区 50 年来最高和最低气温变化相同^[15];②3 月~5 月份等灌溉季节,平均相对湿度和最小相对湿度的变化趋势基本为增加,其它季节的变化趋势以减少为主。最小相对湿度的变化趋势比平均相对湿度

明显;③降水是几个要素中变化趋势最不明显的,所有站点的年平均值都没有通过检验,但各站的值皆为负,说明总体上过去 50 年漳卫南运河流域的降水量是呈减小变化的。月平均值中只有 5 月份两个站点通过检验具有趋势,且 5 月、6 月份的倾斜度 β 基本为正值,其它月份的倾斜度 β 基本为负值。

3.2 径流序列 Mann-Kendall 检验结果

采用 Mann-Kendall 方法检验淇门、元村和临清 3 个流量站的年平均和各月平均序列的趋势,年平均和各月平均序列都通过检验,且一致呈下降趋势,下降倾斜度 β 见图 3。从中可以看出:7 月~10 月份下降幅度最大,3 月~5 月份下降幅度最小。

3.3 Hurst 指数计算结果

采用 R/S 方法预测各水文气象要素未来的变化趋势,结果列于表 4 和图 4。从表 4 可以看出:①年平均值序列中平均气温、最低气温、最小相对湿度和降水都表现出比较强的持续性,即未来趋势与过去的一致。而相对湿度表现出最强的反持续性;②除

表 2 各气象要素月平均值序列 Mann-Kendall 检验结果(统计)

Table 2 Mann-Kendall test results of monthly meteorological variables

	1月		2月		3月		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月		Σ总
	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	总	↑	
T	7	7	8	8	4	4	6	6	2	0	0	0	0	0	1	1	4	4	4	4	2	2	2	2	40
T _{max}	1	1	1	1	0	0	2	2	4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	9
T _{min}	7	7	7	7	7	7	6	6	5	5	5	5	1	1	2	1	5	5	5	5	3	2	5	5	58
H _{hmd}	0	0	0	0	3	0	3	2	4	4	3	3	1	0	2	1	2	1	2	0	2	0	1	0	23
H _{min}	2	2	0	0	4	2	6	3	3	3	2	2	2	0	2	1	0	0	3	0	2	0	0	0	26
P	0	0	0	0	1	0	1	0	2	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	6

说明:每个月份第一列为具有趋势的站点数,第二列为其中具有上升趋势的站点数

表 3 各气象要素 4 月份月平均值序列 Mann-Kendall 检验计算结果

Table 3 Mann-Kendall test results of meteorological variables in April

	T(°C)		T _{max} (°C)		T _{min} (°C)		H _{hmd} (%)		H _{min} (%)		P(mm)	
	趋势	β	趋势	β	趋势	β	趋势	β	趋势	β	趋势	β
榆社	↑	0.029	↑	0.050	—	0.000	—	-0.155	—	-0.042	—	-0.136
长治	↑	0.047	↑	0.040	↑	0.067	↓	-0.231	↓	-0.111	—	-0.075
安阳	↑	0.025	—	0.007	↑	0.041	—	0.077	—	-0.083	—	-0.199
新乡	↑	0.040	—	0.026	↑	0.041	—	-0.082	↓	-0.158	—	-0.293
陵县	—	0.021	—	-0.003	↑	0.040	↑	0.224	↑	0.191	—	-0.273
邢台	↑	0.046	—	0.004	↑	0.083	—	-0.063	↓	-0.125	—	-0.130
朝阳	—	0.014	—	-0.007	—	0.011	↑	0.182	↑	0.203	—	-0.146
惠民县	↑	0.035	—	0.009	↑	0.058	—	0.073	↑	0.151	↓	-0.400
Σ(β)	6/6	0.032	2/2	0.016	6/6	0.043	2/3	0.003	3/6	0.003	0/1	-0.207

表 4 各气象要素年平均和 4 月份平均序列 Hurst 指数计算结果

Table 4 Hurst components of the meteorological variables

	T		T_{max}		T_{min}		H_{humid}		H_{min}		P	
	年均	4 月	年均	4 月	年均	4 月	年均	4 月	年均	4 月	年均	4 月
榆社	0.619	0.465	0.269	0.531	0.829	0.593	0.466	0.677	0.694	0.645	0.624	0.631
长治	0.764	0.625	0.372	0.495	0.838	0.735	0.430	0.683	0.553	0.609	0.831	0.723
安阳	0.708	0.359	0.499	0.480	0.837	0.702	0.473	0.508	0.500	0.579	0.738	0.509
新乡	0.745	0.482	0.552	0.567	0.855	0.515	0.369	0.569	0.402	0.863	0.679	0.522
陵县	0.697	0.398	0.554	0.332	0.715	0.574	0.353	0.474	0.530	0.404	0.325	0.557
邢台	0.753	0.359	0.480	0.315	0.703	0.482	0.522	0.672	0.747	0.779	0.571	0.676
朝阳	0.701	0.183	0.544	0.435	0.838	0.375	0.361	0.399	0.515	0.283	0.694	0.095
惠民县	0.816	0.320	0.706	0.069	0.762	0.454	0.241	0.244	0.553	0.461	0.250	0.366
$\sum(X > 0.5)$	8	1	4	2	8	5	1	5	7	5	6	6

说明： $\sum(X > 0.5)$ 表示各个要素的 H 值大于 0.5 的站点数。

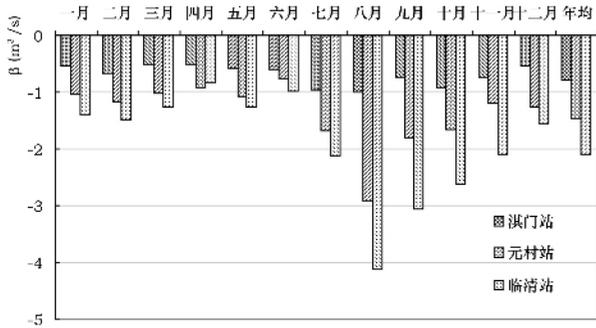


图 3 各水文站年平均及各月平均流量序列 Mann-Kendall 检验结果

Fig.3 Mann-Kendall test results of annual and monthly flux

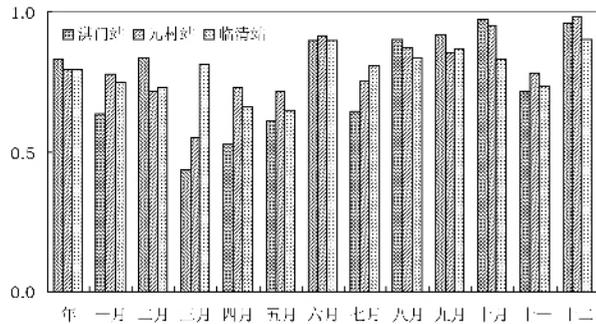


图 4 流量站序列年平均和各月平均序列 Hurst 指数

Fig.4 Hurst index of annual and monthly flux

相对湿度外 4 月份序列比年平均值序列表现出更强的反持续性,即 4 月份序列可能更多地向过去不同的趋势变化。而相对湿度则是 4 月份序列比年平均序列表现出更强的持续性。

从图 4 可以看出,年平均和月平均流量序列以后变化趋势基本都与过去的变化趋势保持一致,表现出较强的持续性。8 月~10 月份持续性最强,3

月~5 月份持续性最弱,与 Mann-Kendall 计算结果的特性相一致,说明径流量在未来一段时间内仍将持续减少。

4 讨论

4.1 气候变化的影响

水文气象要素对气候变化的影响最敏感的是气温,从计算结果中可以看出气温是所有气象要素中趋势最为明显的,且与全球气温变化趋势一致,说明漳卫南运河流域气温变化的主导因子是气候变化。降水虽然没有通过趋势检验,但是所有 8 个站点年降水量都下降,50 年平均下降达到 83.2mm,与《气候变化国家评估报告》^[2]和王英等^[1]指出的华北地区降水量下降趋势相同。由图 5 可以看出,1978 年是气温升高和降水减少的转折点,说明气温和降水都受大的气候系统控制。表 4 中反映的气温和降水的强持续性,意味着研究区未来可能继续向暖干化方向发展。而气候系统变化中既包含了自然因素,也包含了人类活动的影响。自然因素中除了太阳活动、气候系统内部的相互作用等因素外,还与中国夏季风的减弱从而导致南方地区降水增加、华北地区降水减少有关^[17]。

4.2 人类活动的影响

漳卫南运河流域是一个人类活动特别剧烈的地区,由图 2 可以看出:冬小麦和玉米种植面积占流域面积的 53.4%,居民区面积占到 7.5%,草地有不同程度的放牧。漳卫南运河流域建有大、中、小型水库共 246 座,总库容 $38.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,控制流域面积超过了 95%。流域内有大型灌区 36 座,设计引水能力

501 m³/s,设计灌溉面积 49 × 10⁴ hm²,流域径流基本受人工调节。

人类活动对水文气象要素的影响突出表现在径流量的减少上。由于人口迅速增长和工农业用水迅速增加,河流量急剧减少,致使有的月份出现了断流。由图5可以看出1956年~2005年间径流量显著减少,1965年以后径流量由原来的高位突降到低位,1978年以后径流量维持在更低水平,所以1965年和1978年是流域平原区径流减少的两个转折点。

漳卫南运河流域农业种植面积占比较大,3月~5月份是农作物最需要用水的时期,而此时雨季还没有到来,需要大量的灌溉用水。由于灌溉水只有少量退水,大量消耗于蒸散发,使得该时期农业灌溉区的相对湿度有所上升(表3),而非农业区的相对湿度下降。年平均相对湿度计算结果中,东边站点呈上升趋势,西边站点呈下降趋势,而西边主要是山区,较东边平原地区的农业活动强度弱,可以认为相对湿度对人类活动的影响比较敏感,在自然条件下随着气温升高相对湿度应该呈下降趋势,而东边站点平均相对湿度上升主要是由于农业灌溉引起的。灌溉季节相对湿度的增加使得流域降水有所增加,5月份有两个站点通过了趋势检验,具有上升趋势,而其它所有月序列和年序列都没有通过趋势检验,可以说明此问题。值得指出的是,Mann-Kendall计算五月份最低相对湿度的结果中,只有陵县(德州)朝阳和惠民县3个站点通过了趋势检验,其倾

斜度β都大于0,而其它5个没有通过趋势检验的站点,倾斜度β都小于或等于0。这也充分说明农业灌溉改变了局部小气候,也是本研究分析相对湿度趋势的原因。

4.3 区域干旱化

从前面分析可知,漳卫南运河流域暖干化的趋势明显,径流急剧减少甚至断流,其中的原因是什么?由前面计算分析可知,50年来降水量减少了83.2mm,但没有达到通过Mann-Kendall检验,降水减少只是其中的原因之一。更主要的原因是河流水被大量取用,尤其是农业用水占到用水量的77%(2004年,海河流域水资源公报),而农业用水属于“强耗水型”用水,其用水后大量耗散于蒸散发,虽然有微弱的降水正反馈效应,但绝大部分的水分逸散于大气中[18],使得当地灌溉季节相对湿度有所增加。但这种增加是暂时性的,因为当水气进入大气后即进入到更大尺度的大气循环中,随着季风进入内陆在遥远的西北部形成降水。未来的研究可以进一步分析包括土壤湿度、蒸散发、水气交换和季风在内的区域水循环,以及气候变化和人类活动影响下的产汇流机理,从而找出区域干旱化的原因。

5 结论

本文借助Mann-Kendall方法和R/S方法对漳卫南运河流域50年来的水文气象要素进行了趋势分析,结果表明,漳卫南运河流域气温上升趋势明显,50年来气温上升了1.08℃,主要来自平均最低气温

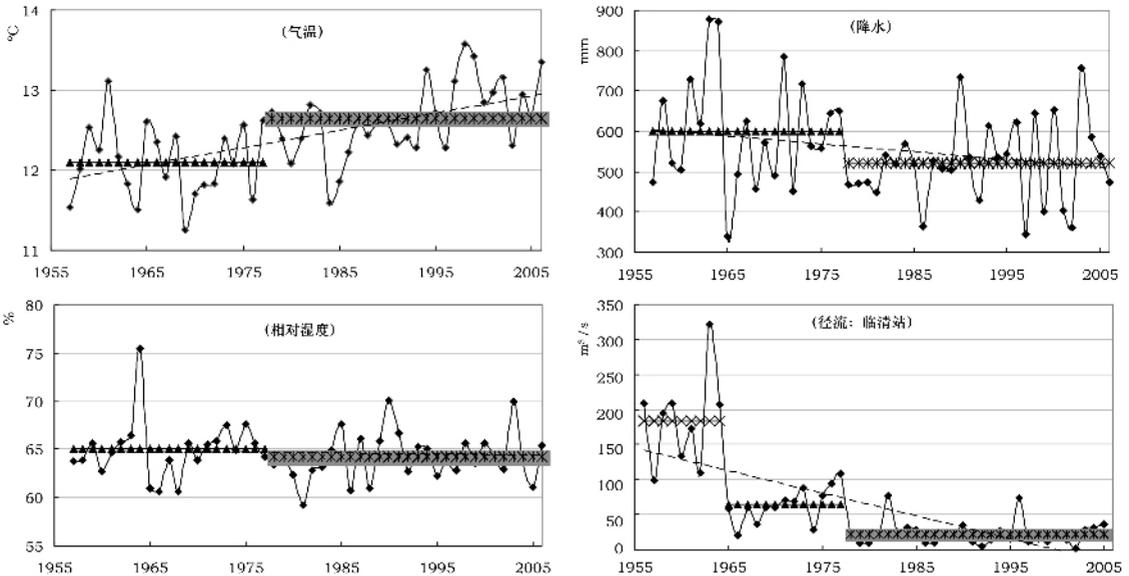


图5 气温、降水、相对湿度和径流量的年平均过程线

Fig.5 Change of temperature, precipitation, relative humidity and runoff

的贡献,未来仍将保持上升趋势,自然条件下随着气温升高相对湿度应该呈下降趋势,但是农业灌溉等活动引起区域相对湿度的局部上升,尤其是灌溉季节相对湿度上升最为明显,未来年平均相对湿度可能向相反趋势发展,降水量虽然没有通过趋势检验,但是50年来平均减少了83.2mm,未来这种趋势仍将会持续一段时间,径流量的趋势最为明显,所有站点都通过趋势检验,且都呈急剧下降趋势,有的月份甚至出现断流,未来一段时间内降水量很可能继续减少。

气候变化使得流域气温上升和降水量下降,与《气候变化国家评估报告》^[2]和王菱等^[15]的研究结果相同。而相对湿度在只有气候变化影响条件下应呈下降趋势,但由于大面积的农业灌溉活动,减缓了这种下降趋势或者相反出现上升趋势。由于大量农业用水造成径流被大量取走和消耗掉,使得径流锐减,并加剧区域气候干旱化。但是从更大范围的水循环来看,这部分蒸发掉的水量可能随着季风在其它区域形成降水。未来的研究可以进一步分析包括土壤湿度、蒸散发、水汽传输和季风在内的区域水循环,以及气候变化和人类活动影响下的产汇流机理,从而找出区域干旱化的原因。

参考文献 (References):

- [1] 秦大河,陈振林,罗勇,等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展,2007,3(2):63~73.[QIN Da-he, CHEN Zhen-lin, LUO Yong, et al. Updated understanding of climate change sciences[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(2):63~73.]
- [2] 中华人民共和国科学技术部.《气候变化国家评估报告》解读[J]. 环境保护,2007(11):20~26.[Ministry of Science and Technology of China. Interpretation of national assessment report of climate change[J]. *Environment Protection*, 2007(11):20~26.]
- [3] Barnett T P, Hasselmann K, Chelliah M, et al. Detection and attribution of recent climate change: A status report[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(2):631~2659.
- [4] 刘春葵,刘志雨,谢正辉. 近50年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报,2004,15(4):385~393.[LIU Chun-zhen, LIU Zhi-yu, XIE Zheng-hui. Study of trends in runoff for the Haihe River basin in recent 50 years[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 15(4):385~393.]
- [5] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3):245~259.
- [6] Kendall M G. Rank Correlation Method[M]. London: Charles Griffin Company, 1975.
- [7] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255:107~122.
- [8] Yue S, Pilon P, Phinney B. Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross correlation[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(1):51~63.
- [9] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 279(1~4):144~150.
- [10] Xu Z X., Chen Y N, Li J Y. Impact of climate change on water resources in the Tarim River basin[J]. *Water Resources Management*, 2004, 18:439~458.
- [11] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18:107~121.
- [12] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, 1951, 116:770~808.
- [13] 黄登仕,李后强. 分形几何学、R/S分析与分式布朗运动[J]. 自然杂志,1990,13(8):477~482.[HUANG Deng-shi, LI Hou-qiang. Fractal geometry, R/S analysis and fractional Brownian motion[J]. *Nature Magazine*, 1990, 13(8):477~482.]
- [14] Thomas R K, Richard W K, Kevin P C, et al. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(6):1007~1024.
- [15] 王菱,谢贤群,苏文,等. 中国北方地区50年来最高和最低气温变化及其影响[J]. 自然资源学报,2004,19(3):337~343.[WANG Ling, XIE Xian-qun, SU Wen, et al. Changes of maximum and minimum temperature and their impacts in northern China over the second half of the 20th century[J]. *Journal of Natural Resource*, 2004, 19(3):337~343.]
- [16] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究,2006,25(6):1031~1041.[WANG Ying, CAO Ming-kui, TAO Bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6):1031~1041.]
- [17] 王遵娅,丁一汇,何金海,等. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报,2004,62(2):228~236.[WANG Zun-ya, DING Yi-hui, HE Jin-hai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2):228~236.]
- [18] 刘昌明,郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析[J]. 自然资源学报,2003,(2):129~135.[LIU Chang-ming, ZHENG Hong-xing. Trend analysis of hydrological components in the Yellow river basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003,(2):129~135.]

Analyzing Long-Term Trend of Hydrological and Meteorological Changes in Zhangweinan River Basin

CAI Xi-tian , XU Zong-xue , LI Zhan-ling

(*Key Laboratory of Water and Sediment Sciences , Ministry of Education , College of Water Sciences , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China*)

Abstract :Zhangweinan River basin is heavily affected by human activities and sensitive to climate change. In this paper , Mann-Kendall test and R/S methods were used to estimate the long-term trend of hydrological and meteorological changes in Zhangweinan River basin during the past 50 years. The factors influencing hydrological and meteorological changes were analyzed. Such variables as annual and monthly mean air temperature , maximum air temperature , minimum air temperature , relative humidity , minimum relative humidity , precipitation and runoff were analyzed based on Mann-Kendall test and R/S methods. The results indicate that , in Zhangweinan River basin , the annual mean air temperature has increased by 1.08 oC , mainly due to the rise of mean minimum air temperature and the annual precipitation has decreased by 83.2 mm. These trends will sustain for some periods in the future. Relative humidity represents a downward trend in the western mountain area and an upward trend in the eastern plain. The trend may be reversed in the future. There is a strongly sustained downward trend for runoff. It is predicted that the climate in Zhangweinan River basin will become warmer and drier in the future. In view of larger hydrological cycle , the water lost in this area may move along with monsoon and become rainfall in other areas. Future studies should further focus on regional water cycle such as soil moisture , evapotranspiration , water vapor transfer and monsoon , and mechanism of runoff generation under the impacts of climate change and human activities.

Key words Zhangweinan River ; Mann-Kendall ; Hurst ; Climate change ; Human activity ; Irrigation