

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.009

张利茹, 贺永会, 唐跃平, 等. 海河流域径流变化趋势及其归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 59-66. (ZHANG Liru, HE Yonghui, TANG Yueping, et al. Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 59-66. (in Chinese))

海河流域径流变化趋势及其归因分析

张利茹¹, 贺永会², 唐跃平¹, 王国庆²

(1. 南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 在气候变化和人类活动共同影响下,流域径流发生了很大变化。尤其是海河流域,水资源匮乏的现象更为严重,分析水资源变化趋势对实现水资源的可持续开发利用具有重要意义。根据海河流域实际地形地貌特征及水文站分布情况,选取观台、响水堡、张家坟、下会和桃林口等5个水文站所在的区域,采用Mann-Kendall秩次相关检验法及线性回归方法,分析检验各典型区域年径流量的历史变化趋势。基于半分布式流域水文模型——TOPMODEL,采用水文模拟的途径,定量评估了典型区域气候变化和人类活动对径流变化的影响。归因结果表明:除桃林口外的其他4个水文站的年径流量均呈显著减小趋势,海河典型区域年径流减小主要跟人类活动有关,其占比都在65%以上。人类活动对观台、张家坟和响水堡站径流量减小的影响占比为65%~70%,对桃林口站径流量减小的影响占比为75.4%,对下会站径流量减小的影响占比高达81.7%,主要原因是海河流域自20世纪60年代中后期以来进行大规模水利建设所产生的水文效应。

关键词: 气候变化; 人类活动; Mann-Kendall 检验; 归因分析

中图分类号: TV12

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)04-0059-08

气候变化是目前最重要的全球性环境问题之一,气候变化对水文水资源的影响研究受到越来越多的关注^[1]。气候变化不仅会影响水资源在时空上的分配,而且可能增加洪涝、干旱灾害的发生频率,以至于影响到区域生态乃至人类社会的生存环境^[2]。径流要素的变化主导着整个水文水资源的变化,且变化规律错综复杂,具有非线性、突变性和随机性等复杂特性。在气候变化和人类活动的综合影响下,这一问题显得尤为突出^[3]。就中国主要江河而言,流域降水、水面蒸发及实测径流量均发生了不同程度的变化,总体上,黄河、海河、辽河等北方河流的实测径流量减小较为明显^[4]。以往的研究多侧重于历史实测资料的历史演变规律,而很少有对径流变化给出定量的判断。如刘春蓁等^[5]对近50年海河流域山区20个子流域的径流及降水变化趋势进行了显著性检验,对该流域径流的变化趋势提出了一个半定量分析的研究思路和方法。张建云等^[6]的研究结果表明,近50年来中国六大江河的实测径流量均呈下降趋势。其中海河、黄河、辽河、松花江实测径流量下降明显,严重影响了我国社会经济的发展。王金星等^[7]的研究结果表明南方流域各站冬春季(12月至翌年3月)的径流均呈增大趋势,5月份呈减小趋势,7月份呈增大趋势;北方流域各站冬春季(1—5月)径流呈减小趋势,以海河流域各站、松辽的铁岭、黄河利津站和淮河的吴家渡站减小趋势最为严重。张建云等^[8-10]的研究表明黄河中游径流量的减小是由区域内气候变化和流域内大规模的人类活动等因素造成,其中,人类活动是20世纪70年代以来黄河中游径流量减小的主要原因,气候变化的影响量仅占总减小量的38.2%,但不同流域气候变化的影响程度存在差别。因此,研究海河流域气候变化和人类活动条

收稿日期: 2016-08-05

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2015ZD070501);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(YJZS1515005, Y917006)

作者简介: 张利茹(1981—),女,河南漯河人,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。

E-mail: zhangliru12@163.com

件下的河川径流变化并进行归因分析就显得尤为迫切。

1 流域概况

海河流域东临渤海,西依太行,南界黄河,北接蒙古高原,流域总面积 31.82 万 km^2 。海河流域有海河和滦河两大水系,其中海河水系是主要水系,由蓟运河、潮白河、北运河、永定河、大清河、子牙河和漳卫河组成,还包括徒骇、马颊河等单独入海的平原河流;滦河水系包括滦河及冀东沿海诸河。流域年平均气温在 $1.5 \sim 14\text{ }^\circ\text{C}$,年平均相对湿度为 $50\% \sim 70\%$;多年平均降水量为 539 mm,属半湿润半干旱地带;年平均陆面蒸发量为 470 mm,水面蒸发量 1 100 mm;年平均气温和年降水量从东南沿海向西北内陆依次递减,但在流域西部和东北部山区迎风坡有两个年降水量极值中心。海河流域人口密集,大中城市众多,在我国占有重要的政治经济地位。

2 资料与方法

2.1 数据来源

为了对比海河流域各子区域河川径流量的变化趋势,又兼顾流域均匀布置等原则,选取受气候变化和人类活动影响较大的观台、响水堡、张家坟、下会和桃林口

5 个重点控制水文站所在区域为典型流域(见图 1),其基本信息见表 1。搜集各典型区域近 60 年(1950—2010 年)的实测径流、降水及蒸发资料。径流和降水数据来自国家水文年鉴整编的 1950—2010 年逐日和逐月资料,对于部分年份缺失的情况,降水数据来自国家气象局整编的 1950—2010 年逐日和逐月降水资料并对其进行修正,蒸发数据来自国家水文年鉴整编的 1950—2010 年逐日和逐月蒸发量。基于美国联邦地质调查局 1 km 空间分辨率的数字高程资料,提取各子流域边界。

表 1 各典型区域水文站基本信息

Tab. 1 Basic information of hydrological gauging stations in Haihe River basin (HRB)

编号	测站	所属水系	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	控制面积/ km^2	水文站个数	气象站个数
36255	观台	漳卫南运河	114.083 3	36.333 3	17 800	23	1
33600	响水堡	永定河	115.183 3	40.516 7	14 507	25	1
32506	张家坟	潮白河	116.783 3	40.616 7	8 506	11	1
32513	下会	潮白河	117.166 7	40.616 7	5 340	10	1
31663	桃林口	滦河	119.050 0	40.130 0	5 060	9	1

2.2 径流变化趋势分析与突变诊断方法

采用斯皮尔曼(Spearman)秩次相关检验和肯德尔(Kendall)秩次相关检验进行区域水文变化趋势显著性检验。Spearman 和 Kendall 法的优点在于能直观给出时间序列具有递增或递减趋势的显著性,而 Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数统计检验法,与参数统计检验法相比,该方法不需要样本遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰及计算简单高效等优点,是目前比较常用的趋势诊断方法^[6-12]。

Mann-Kendall 法是 1945 年由曼(H. B. Mann)和肯德尔(M. G. Kendall)提出并发展的一种非参数统计

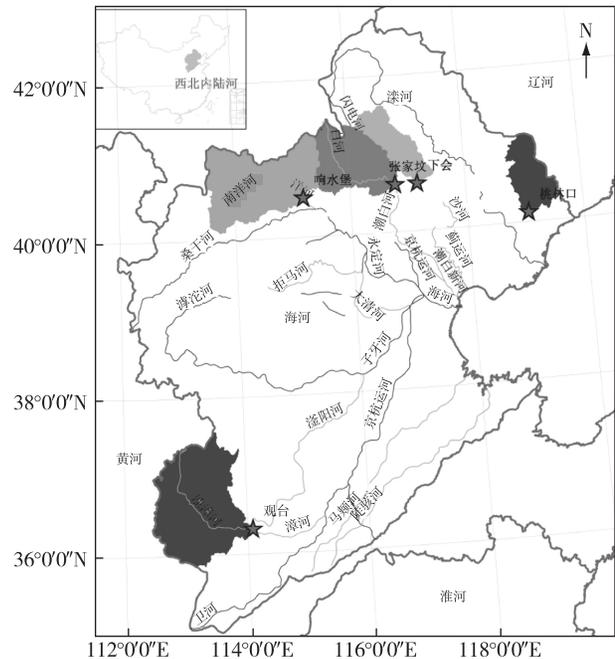


图 1 海河流域典型控制站分布

Fig. 1 Distribution of typical basin control stations in HRB

检验法,但当时这一方法仅用于检测序列的变化趋势。后来经其他学者进一步改进,而得以完善,其优点不仅在于计算简便,而且可以明确突变开始的时刻,并指出突变区域^[13]。Mann-Kendall 法是世界气象组织推荐的非参数检验法,其计算前提是序列相互独立且有相同连续分布时,计算步骤如下:

对于水文序列 x , 构造一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

可见,秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下,构建统计量:

$$UF_k = [S_k - E(S_k)] / \sqrt{\text{var}(S_k)} \quad (3)$$

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$, $\text{var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且有相同分布时,

$$E(S_k) = k(k+1)/4 \quad (4)$$

$$\text{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (5)$$

UF_i 为标准正态分布,给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。

2.3 归因分析方法

采用流域水文模拟途径进行流域径流归因分析,就是将气候变化和人类活动看作是影响径流变化的两个独立因素,建立流域水文模型,通过实测降水、蒸发、径流等资料进行模型参数率定。王国庆等提出了基于水文模型的气候变化和人类活动影响的划分方法,并将其应用于 SIMHYD 水文模型^[14]。其划分原理是:假定还原后的径流量与基准期实测径流量的差值 (ΔW_C) 由气候变化引起,而人类活动影响时期的实测径流量与基准期天然径流量之间的差值 (ΔW_T) 主要包括两部分,其一为人类活动影响部分 (ΔW_H);其二为气候变化影响部分 (ΔW_C),式(6)~(10)给出了人类活动和气候变化对径流影响的分割分析方法。

$$\Delta W_T = W_{HR} - W_B \quad (6)$$

$$\Delta W_H = W_{HR} - W_{HN} \quad (7)$$

$$\Delta W_C = W_{HN} - W_B \quad (8)$$

$$\eta_H = \Delta W_H / \Delta W_T \times 100\% \quad (9)$$

$$\eta_C = \Delta W_C / \Delta W_T \times 100\% \quad (10)$$

式中: ΔW_T 为径流变化总量; ΔW_H 为人类活动对径流的影响量; ΔW_C 为气候变化对径流的影响量; W_B 为天然时期的径流量; W_{HR} 为人类活动影响时期的实测径流量; W_{HN} 为人类活动影响时期的天然径流量,由水文模型计算得出; η_H 与 η_C 分别为人类活动和气候变化对径流影响的百分比。

3 海河典型流域径流变化趋势及归因分析

3.1 径流变化趋势

海河流域典型控制站观台、响水堡、张家坟、下会和桃林口的多年平均径流量分别为 29.16, 10.80, 16.32, 8.17 和 21.02 m^3/s ,图2给出 1951—2010 年期间各控制站年径流量及其 5 年滑动平均过程。可以看出,海河流域典型控制站径流流量变化趋势基本一致,总体呈现递减趋势,但递减程度不一,观台站径流递减速度最快。

受降水等因素空间分布不均匀的影响,各控制站年径流年代际变化也千差万别,不同年代际径流的变化可以采用不同年代的平均值和距平百分率来分析研究,表2给出海河流域各控制站各年代实测径流量的统计结果。

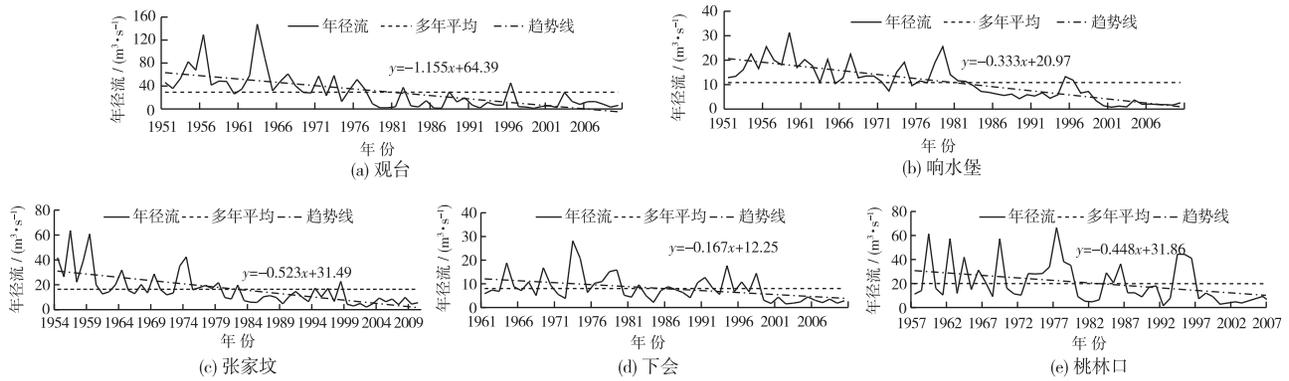


图2 海河流域代表站多年径流变化

Fig. 2 Annual runoff changes given by 5 hydrological stations in HRB

表2 各控制站不同年代际径流变化统计

Tab. 2 Decadal variation statistics for runoff for five key control stations

站名	20世纪50年代		20世纪60年代		20世纪70年代		20世纪80年代		20世纪90年代		21世纪00年代	
	均值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	距平/ %										
观台	61.3	110.2	56.5	93.7	30.9	6.0	11.2	-61.6	10.6	-63.7	9.6	-67.1
响水堡	19.3	78.6	15.4	42.5	14.3	32.4	7.4	-31.5	6.5	-39.8	1.8	-83.3
张家坟	39.1	139.0	18.5	16.4	20.5	22.6	9.4	-44.9	11.2	-32.6	6.0	-63.2
下会	-	-	9.7	22.4	12.2	46.9	6.5	-14.3	8.8	10.2	2.8	-63.3
桃林口	28.9	37.5	27.1	28.9	29.6	40.8	14.4	-31.5	20.2	-3.9	5	-76.2

由表2知:海河流域片的张家坟代表站的年代径流递减最明显,50年代的年代距平百分率为138.97%,到21世纪00年代,年代距平百分率减小到-63.24%。观台代表站的年代径流递减也很明显,50年代的年代距平百分率为110.19%,到21世纪00年代,年代距平百分率减小到-67.08%。

为了更进一步分析海河流域径流量的变化规律,采用斯皮尔曼秩次相关检验法和肯德尔法分别对5个典型控制站的实测径流量进行了趋势诊断和显著性检验,表3给出了检验结果。可见,海河流域各典型流域控制站径流量的Spearman统计量|T|和Kendall统计量|U|均明显大于置信水平0.05的临界值,说明海河流域5个典型控制站径流量的减小趋势均比较显著,响水堡站尤其明显。

表3 海河流域各控制站径流量变化趋势检验

Tab. 3 Trend testing values given by 5 hydrological stations in HRB

流域	站名	Spearman 统计量 T	临界值 $\alpha=0.05$	Kendall 统计量 U	临界值 $\alpha=0.05$	年径流量变化率 ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$)	趋势性
海河	观台	7.66	2.01	5.66	1.96	-1.16	显著
	响水堡	11.83	2.01	7.39	1.96	-0.34	显著
	张家坟	8.40	2.01	6.04	1.96	-0.52	显著
	下会	4.23	2.01	3.62	1.96	-0.17	显著
	桃林口	3.23	2.01	2.91	1.96	-0.40	显著

为了更直观地分析径流的变化特征,采用Mann-Kendall非参数检验方法检验了5个控制水文站的径流变化趋势,图3给出分析结果。

海河流域各水文站年均径流的MK趋势分析表明:5个水文站的河川径流减小趋势明显,都达到了1%

的显著水平,说明对于整个海河流域,径流呈现出较明显的减小趋势。从图3可以看出:①响水堡从1963年开始出现径流减小趋势,1983年后减小尤为明显,其MK值达到-7.39;观台站从1964年就呈现出减小趋势,1978年后径流减小明显,其MK值达到-5.66;张家坟站从1960年开始出现径流减小趋势,1981年后减小尤为明显,其MK值为-6.04;下会站和桃林口站径流减小出现的时间比较晚,起点出现在1979年,2003年后径流减小趋势比较明显。②观台站、响水堡站和张家坟站MK值的50%的分位点都小于-2.58,即达到了1%的显著性水平。

3.2 径流变化突变点诊断分析

采用 Mann-Kendall 突变诊断法对各典型流域径流进行突变诊断分析,结果如图4。

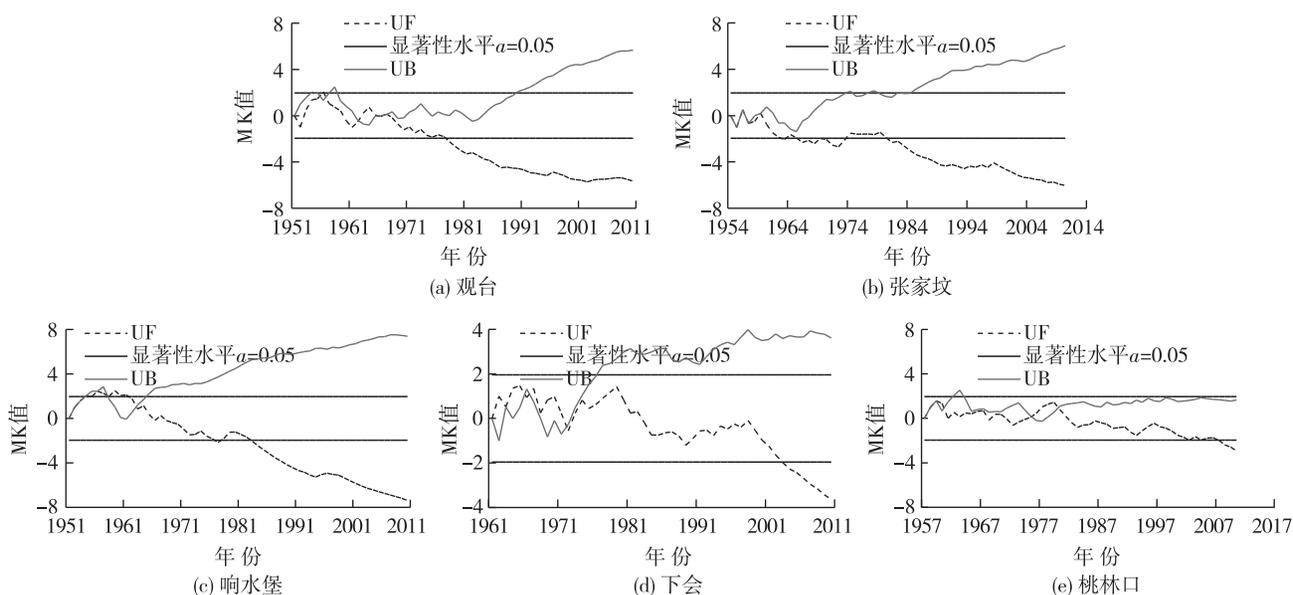


图3 海河流域5个水文站径流历史演变规律

Fig. 3 Trends of runoff given by 5 hydrological stations in HRB

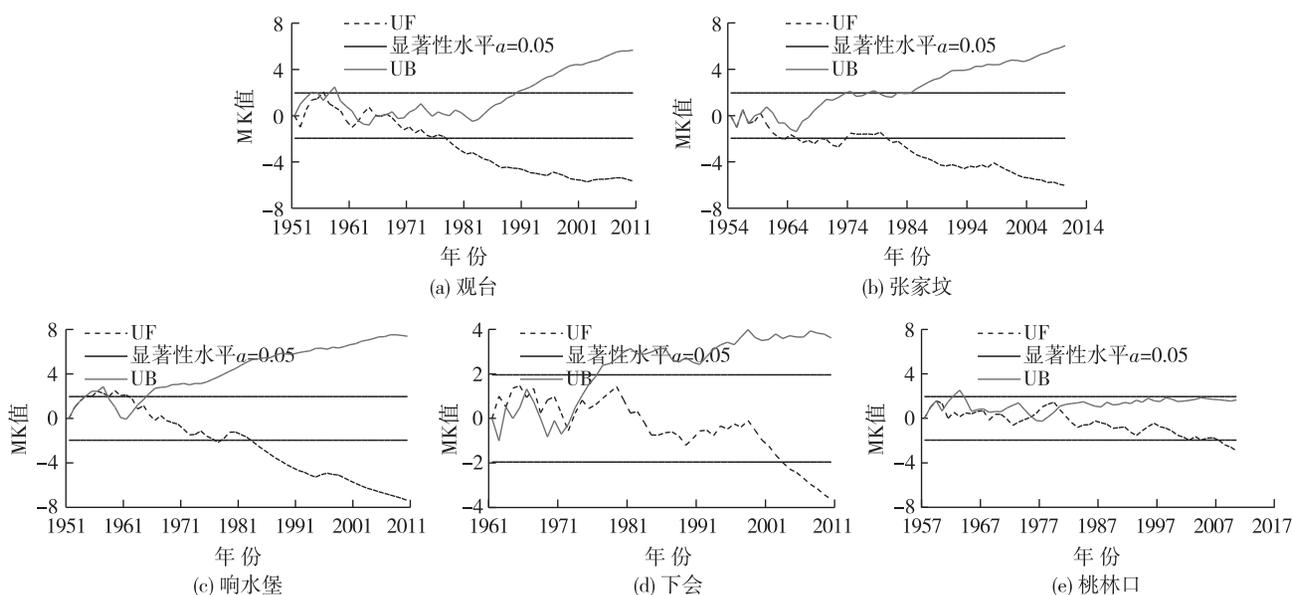


图4 海河流域各控制站年径流突变点诊断(Mann-Kendall法)

Fig. 4 Detecting curves of mutation of annual runoff in 5 hydrological stations in HRB by Mann-Kendall tests

由图4(a)可知,观台站径流量自1967年以来呈明显递减趋势,1977年后递减趋势均大大超过显著性水平0.05的临界线,说明观台站径流量递减趋势十分显著。同样,由图4张家坟站和响水堡站UFk曲线可知,张家坟站和响水堡站径流量分别从1959年和1963年以来明显递减,这种递减趋势大大超过显著性水平 $\alpha=0.05$ 临界线的时间分别始于1965年和1977年,说明这两个站径流量递减趋势也很显著。由图4还可以看出,下会站1963年以来也有明显的递减趋势,但递减趋势在2004年前不是很明显,始终处于显著性水平 $\alpha=0.05$ 的范围内,2004年后呈显著递减趋势。桃林口站在1979年以后也表现出了递减趋势,但不是特别显著。观台站、张家坟站、响水堡站、下会站和桃林口站的UF和UB曲线分别在1967年、1959年、1963年、1972年和1979年出现交点,且交点在临界线之间,则认为1967年、1959年、1963年、1972年和1979年分别是这4个代表性流域水文序列发生突变开始的时刻。

3.3 径流变化归因分析

由以上分析得知,海河各典型流域天然水文序列的转折年份各异,但大都集中在20世纪60年代末至

70年代初,桃林口站水文序列的转折年份甚至出现在70年代末。查阅相关文献得知:海河流域自60年代中后期以来进行大规模的水利建设,尤其是在“63.8”大洪水后,开展了以植树、种草、封山育林、修建水利工程、大量开采地下水等大规模的人类活动^[5,15-16];所有这些均与人类活动有关,就不难解释为什么变异诊断出的突变点大都集中在60年代至70年代。

为了方便海河流域各典型流域间的对比研究,对各典型流域Mann-Kendall突变诊断法得出的突变转折年份进行折中取值,即统一选择1969年作为各典型流域发生突变的年份,分别对各典型流域转折点前的水文序列进行分析计算。将转折点以前年份的水文序列近似认为天然序列,应用半分布式流域水文模型TOPMODEL来进行参数率定和检验。模拟结果表明:5个控制站的计算年径流与实测年径流值非常接近,其中,观台站月确定性系数为0.78,平均相对误差2.7%;张家坟站日确定性系数为0.61,月确定性系数为0.75,平均相对误差11.9%;响水堡站日确定性系数为0.67,月确定性系数为0.68,平均相对误差14.7%;下会站月确定性系数为0.79,平均相对误差3.1%;桃林口站月确定性系数为0.86,平均相对误差9.1%。各站各年份的相对误差都在20%允许范围内。因此,可应用该模型进行人类活动影响期间天然径流的还原计算。限于篇幅,图5仅给出观台站率定期和检验期径流量的拟合过程。

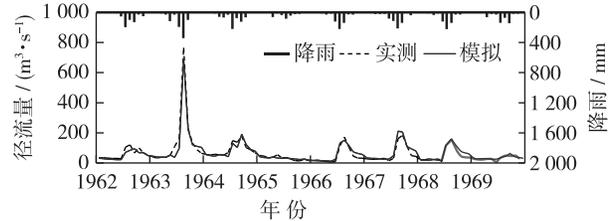


图5 率定期和检验期间逐月实测与模拟径流量过程
Fig. 5 Process of measured runoff and simulated runoff from the period of calibration to testing

根据各控制站率定出的参数分别对各控制站转折点之后年份的径流量进行还原计算,分析气候变化和人类活动对转折年份后的河川径流量的影响。根据模拟结果,得出观台站径流量减少的影响因素中,人类活动的占69.2%,气候变化占30.8%。其他站的模拟结果列于表4中。由表4可见,变化环境下海河流域各典型流域年径流量减少的因素以人类活动为主,都占到了65%以上,尤其是下会站所控制的研究流域,人类活动对径流量的影响占到了80%以上,这也印证了60年代中后期海河流域进行大规模植树、种草、封山育林、修建水利工程、大量开采地下水等人类活动影响所产生的水文效应。

表4 气候变化和人类活动对海河流域各典型流域年径流量的影响

Tab. 4 Impacts of climate change and human activities on runoff given by 5 hydrological stations in HRB

典型水文站	起止年份	年降水量/mm	实测值/mm	计算值/mm	总减少/mm	气候变化影响		人类活动影响	
						影响量/mm	占比/%	影响量/mm	占比/%
观台	天然时期	643.30	111.78	112.66					
	1970—2010	532.70	32.21	87.26	79.57	24.52	30.8	55.05	69.2
张家坟	天然时期	476.38	72.65	72.27					
	1970—2010	465.32	44.21	63.80	28.44	8.85	31.1	19.59	68.9
响水堡	天然时期	422.15	35.76	35.37					
	1970—2010	415.13	16.26	29.82	19.50	5.94	30.5	13.56	69.5
下会	天然时期	502.58	57.72	55.92					
	1970—2010	481.55	44.77	55.35	12.95	2.37	18.3	10.58	81.7
桃林口	天然时期	635.23	185.49	184.40					
	1970—2010	615.80	118.26	168.97	67.23	16.52	24.6	50.71	75.4

4 结 语

(1)海河流域所选择的观台、张家坟、响水堡、下会和桃林口5个水文站所控制的区域均处于上游地区,从对各水文站实测径流量的趋势分析表明,各水文站实测径流量都有不同程度的递减趋势,尤其是观台、张

家坟和响水堡站的实测径流量在1975年后递减趋势明显,不仅超过了显著性水平 $\alpha=0.05$ 的临界线,还超过了显著性水平 $\alpha=0.01$ 的临界线。

(2)从采用Mann-Kendall突变诊断法对各水文站实测径流量的诊断结果来看,除桃林口站以外,其他4个水文站的实测径流量都发生了显著变化,且径流量发生突变的年份均在1970年前后,海河流域正是在“63.8”大洪水后,开展了植树、种草、封山育林、修建水利工程、大量开采地下水等大规模人类活动。

(3)海河流域典型站径流变化归因分析结果表明,人类活动导致的下垫面变化是径流量减小的主要原因。

(4)基于流域水文模拟的途径进行径流量变化归因分析简单实用,但基于流域水文模拟途径中系列基准期的选择需要综合多种要素确定,其确定方法仍需在今后研究中进一步完善。

参 考 文 献:

- [1] 任国玉,姜彤,李维京,等.气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J].水科学进展,2008,19(6):772-779.(REN Guoyu,JIANG Tong,LI Weijing,et al.An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources[J].Advance in Water Science,2008,19(6):772-779.(in Chinese))
- [2] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):153-158.(ZHANG Jianyun,WANG Guoqing,HE Ruimin,et al.Variation trends of runoff in the Middle Yellow River basin and its response to climate change[J].Advance in Water Science,2009,20(2):153-158.(in Chinese))
- [3] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化和人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.(DONG Leihua,XIONG Lihua,YU Kunxia,et al.Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J].Advance in Water Science,2012,23(2):278-285.(in Chinese))
- [4] 张利茹.河川径流变化归因分析研究[D].南京:南京水利科学研究院,2012.(ZHANG Liru.Attribution analysis of river runoff change[D].Nanjing:Nanjing Hydraulic Research Institute,2012.(in Chinese))
- [5] 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 Chunzhen,LIU Zhiyu,XIE Zhenghui.A study of trends in runoff for the Haihe River basin in recent 50 years[J].Journal of Applied Meteorological Science,2004,15(4):385-393.(in Chinese))
- [6] 张建云,章四龙,王金星,等.近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.(ZHANG Jianyun,ZHANG Silong,WANG Jinxing,et al.Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J].Advance in Water Science,2007,18(2):230-234.(in Chinese))
- [7] 王金星,张建云,李岩,等.近50年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J].水科学进展,2008,19(5):656-661.(WANG Jinxing,ZHANG Jianyun,LI Yan,et al.Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years[J].Advance in Water Science,2008,19(5):656-661.(in Chinese))
- [8] 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 Jianyun,WANG Guoqing.Research on hydrology and water resources impacted by climate change[M].Beijing:Science Press,2007.(in Chinese))
- [9] 王国庆,张建云,贺瑞敏.环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J].水科学进展,2006,17(6):851-858.(WANG Guoqing,ZHANG Jianyun,HE Ruimin.Impact of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River[J].Advances in Water Science,2006,17(6):851-858.(in Chinese))
- [10] 仇亚琴,周祖昊,贾仰文,等.三川河流域水资源演变个例研究[J].水科学进展,2006,17(6):865-872.(QIU Yaqin,ZHOU Zuhao,JIA Yangwen,et al.Case study of water resources revolution in Sanchuanhe River basin[J].Advances in Water Science,2006,17(6):865-872.(in Chinese))
- [11] 丁晶.随机水文学[M].成都:成都科技大学出版社,1988.(DING Jing.Stochastic hydrology[M].Chengdu:Chengdu University of Science and Technology Press,1988.(in Chinese))
- [12] 曹建廷,秦大河,罗勇,等.长江源区1956—2000年径流量变化分析[J].水科学进展,2007,18(1):29-33.(CAO Jianting,QIN Dahe,LUO Yong,et al.Discharge changes of the Yangze River in source area during 1956-2000[J].Advances in Water Science,2007,18(1):29-33.(in Chinese))
- [13] SYNEYERS R.On the statistical analysis of series of observations[Z].Technical Note World Meteorological Organization,Geneva,Switzerland,1990:192.

- [14] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (WANG Guoqing. The key problems of the influence of climate change on the hydrology and water resources in the middle reaches of the Yellow River[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [15] 费宇红, 张兆吉, 陈京生. 人类活动与海河平原水资源关系研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(增刊1): 102-107. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, CHEN Jingsheng. Study on the relationship between human activities and the water resources in the Haihe plain[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(Suppl1): 102-107. (in Chinese))
- [16] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 等. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 567-571. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, ZHANG Feng'e, et al. An analysis of the influence of human activity and climate change on water resources of the north China plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 567-571. (in Chinese))

Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin

ZHANG Liru¹, HE Yonghui², TANG Yueping¹, WANG Guoqing²

(1. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Nanjing 210012, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Under the influences of climate change and human activities, great changes in the runoff of watershed have taken place. Especially in the Haihe River basin, a water resources shortage phenomenon is more serious, hence it is very important to analyze the trends of water resources for sustainable development of the water resources. According to the characteristics of actual landform and the distribution of hydrological stations in the Haihe River basin, the historical variation trends of the annual runoff in the five selected typical watersheds of the Haihe River basin are tested with the Mann-Kendall method and the linear regression method. Based on the semi-distributed hydrological model - TOPMODEL, the quantitative assessment of the impacts of the climate change and human activities on variation in runoff is made. And the analysis results indicate that there is a significant trend in the recorded runoff at each key hydrometric station with the exception of the Taolinkou station. The reduced runoff is mainly related to the human activities, and the influenced range is more than 65%. The responses of runoff to the human activities is between 65% ~70% for the Guantai station, Zhangjiafen station and Xiangshuibao station, and the response for other two is 81.7% and 75.4% respectively. The main cause is hydrological effects generated by large-scale water conservancy construction in the Haihe River basin since the 1960's.

Key words: climate change; human activity; Mann-Kendall testing; attribution analysis