

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005
管晓祥, 金君良, 黄爱明, 等. 黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟[J]. 水利水运工程学报, 2019(5): 36-43.
(GUAN Xiaoxiang, JIN Junliang, HUANG Aiming, et al. Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 36-43. (in Chinese))

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

管晓祥^{1,2}, 金君良^{2,3,4}, 黄爱明¹, 詹慧婕¹, 王国庆^{2,3}, 刘翠善^{2,3}

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029;
3. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 典型流域水文气象分析及水文过程模拟是合理评价黄河流域水资源变化的重要基础。利用 Mann-Kendall 秩次相关检验法和均值差异 T 检验法分析了黄河流域 7 个典型流域的年降水量、年径流量和年均气温序列的变化特征, 并采用 VIC 模型、新安江模型、WBM 模型和 GR4J 模型模拟站点的径流过程。结果表明: 各典型流域年均气温显著升高; 年降水量变化趋势和突变情况均不明显; 而年径流量呈显著下降趋势, 且突变多发生在 1980s。模型模拟结果表明 4 种水文模型在黄河流域应用效果较好。就 Nash 效率系数而言, VIC 和新安江模型因为考虑产汇流过程较为详细, 模拟径流过程与实测过程更贴近; 就径流相对误差而言, WBM 模型在水量模拟计算中表现较优, 其结构简单, 适用于流域水资源的模拟与评价。

关键词: 黄河流域; 水文变化; VIC 模型; 新安江模型; WBM 模型; GR4J 模型

中图分类号: TV11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)05-0036-08

黄河是我国西北、华北地区的重要水源, 以其占全国 2% 的径流量承担全国 15% 的耕地和 12% 的人口供水任务, 同时还承担着向流域外部分地区远距离调水的任务。黄河流域人均河川径流量 473 m^3 , 不足全国平均的 $1/4$, 是我国水资源极其短缺的地区之一^[1]。由于流域水资源情势发生了重大变化: 水资源量持续减少、时空分布变异, 用水特征和结构变化显著, 黄河流域未来将面临经济发展和水资源短缺的严峻挑战。分析黄河流域水文气象、水资源与径流的历史变化, 对明晰变化环境下流域水资源演变规律具有重要作用。侯钦磊等^[2]分析了渭河干流径流演变, 发现 1980s 后期人类活动导致径流突变减少; 王国庆等^[3]提出水文模拟径流还原法, 定量分析了人类活动和气候变化对黄河中游三川河流域径流减少的贡献。此外建立黄河流域水文模型, 模拟流域水资源历史过程, 是研究未来不同时期水资源演变趋势和集成变化环境下流域水资源演变与需水精细预测技术的基础。刘昌明等^[1]综述了分布式水文模型在黄河流域的应用前景。郭飞等^[5]探讨了概念性 SIMHYD 模型在黄河流域的适用性问题。但由于黄河流域空间跨度大, 受人类活动影响严重, 流域内各区域的降水径流规律较为复杂, 所以选择合适的水文模型并分析其在黄河流域不同典型区域的适应性和有效性显得尤为重要。本文选取黄河流域不同典型站点, 采用 Mann-Kendall 秩次相关检验法和均值差异 T 检验法分析其年降水量和年径流量序列的变化, 应用 VIC 模型、新安江模型、WBM 模型和 GR4J 模型模拟站点的径流过程, 对比分析不同水文模型的模拟结果, 以 Nash 效率系数和径流相对误差作为目标函数具体评价水文模型的特性, 为合理评价黄河流域水资源变化提供理论基础。

收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC0404403); 国家自然科学基金资助项目 (51779144, 51679144, 51879164, 41401024); 中央级公益性科研院所基本业务费资助项目 (Y519010, Y519016)

作者简介: 管晓祥 (1995—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源模拟方面的研究。E-mail: xxguan@hhu.edu.cn
通信作者: 金君良 (E-mail: jljin@nhri.cn)

1 数据与方法

1.1 典型站点与资料

选取的典型流域为黄河上游地区第二大支流的洮河流域,黄河中游地区的三川河、偏关河和窟野河流域,黄河下游区的大汶河流域,对应的水文站点分别为红旗站、后大成站、偏关站、温家川站和戴村坝站。此外选取的站点还包括黄河流域两个至关重要的水文站点——唐乃亥和花园口站。其中唐乃亥站以上地区受人类活动影响少,该站记录了黄河流域源头天然径流量变化情况;花园口站的流域控制面积占到整个黄河流域的 97% 以上,反映了黄河流域主河道上径流的变化。典型水文站点在黄河流域内的分布情况如图 1 所示。典型流域面积最小的偏关河流域面积 0.19 万 km²,最大的花园口站以上流域面积 73 万 km²。降水、蒸发和气温资料由中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)提供,各站逐日流量资料由水文年鉴获取摘录,将资料进行整编和处理,作为不同水文模型的输入。构建 VIC 模型所需的 DEM 数据为全球公开的 ASTER GDEM 数据,分辨率约为 30 m,用来提取流向数据;土壤质地分类是根据美国 NOAA 水文办公室提供的全球 5 min 的土壤数据;土地利用数据由 Maryland 大学开发的全球 1 km 分辨率的土地覆盖数据确定。最高气温和最低气温数据来自国家基本气象站的日观测数据。典型站点主要水文气象统计信息见表 1。



图 1 黄河流域水系及典型水文站点位置
Fig.1 Yellow River basin water system and its typical hydrological stations

典型流域面积最小的偏关河流域面积 0.19 万 km²,最大的花园口站以上流域面积 73 万 km²。降水、蒸发和气温资料由中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)提供,各站逐日流量资料由水文年鉴获取摘录,将资料进行整编和处理,作为不同水文模型的输入。构建 VIC 模型所需的 DEM 数据为全球公开的 ASTER GDEM 数据,分辨率约为 30 m,用来提取流向数据;土壤质地分类是根据美国 NOAA 水文办公室提供的全球 5 min 的土壤数据;土地利用数据由 Maryland 大学开发的全球 1 km 分辨率的土地覆盖数据确定。最高气温和最低气温数据来自国家基本气象站的日观测数据。典型站点主要水文气象统计信息见表 1。

表 1 典型流域水文站点主要信息

Tab.1 Main information of typical hydrological stations

流域	水文站点	面积/km ²	资料年限	年平均降水量/mm	年平均径流深/mm	年平均气温/℃	径流系数
大汶河	戴村坝	8 264	1977—2000	870.9	73.9	13.9	0.085
洮河	红旗	24 973	1951—2001	547.2	180.6	0.2	0.330
三川河	后大成	4 105	1957—2002	487.1	51.1	7.0	0.105
黄河	花园口	730 036	1951—1997	437.8	56.7	5.1	0.130
黄河	唐乃亥	121 973	1956—1997	507.9	166.9	-4.9	0.329
偏关河	偏关	1 896	1957—2013	425.3	14.7	4.3	0.035
窟野河	温家川	8 515	1953—2010	404.0	64.7	8.0	0.160

1.2 Mann-Kendall 秩次相关检验法

Mann-Kendall 方法(以下简称 M-K 法)是一种基于非参数统计的趋势诊断方法^[6-7],其优点是无需对数据系列进行特定的分布检验,能有效区分某一时间系列是处于自然波动还是存在确定的变化趋势。M-K 法是用来评估气候要素时间序列趋势的常用检验方法之一,以适用范围广、定量化程度高而著称,其统计量 τ 、方差 σ^2 、标准化变量 M 的计算式为:

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \tag{1}$$

$$\sigma^2 = \frac{2(2N+9)}{9N(N-1)} \tag{2}$$

$$M = \tau/\sigma$$

(3)

式中: P 为系列所有对偶观测值($x_i, x_j, i < j$)中 $x_i < x_j$ 出现的次数, N 为系列长度。取 $\alpha = 0.05$ 显著水平, 如果序列存在明显趋势, 则 $|M| > M_{\alpha/2} = 1.96$; M 为正值, 说明序列具有上升(增加)趋势, 为负值则具有下降(减少)趋势。

1.3 均值差异 T 检验法

均值差异 T 检验法是常用的时间序列突变检验的统计学方法之一。计算时, 选定基准年, 将时间序列划分为前后两段, 假定其方差一致, 定义 T 统计量为:

$$T = \frac{X_{1P} - X_{2P}}{S_p (1/M_1 + 1/M_2)^{1/2}}$$

(4)

$$S_p = \frac{(M_1 - 1)S_1^2 + (M_2 - 1)S_2^2}{M_2 + M_1 - 2}$$

(5)

式中: X_{1P} 和 S_1 为基准年前 M_1 年的平均值和标准差; X_{2P} 和 S_2 为后 M_2 年的平均值和标准差, S_p 为联合样本方差。计算时采用连续移动基准年的方法, 得到突变指数的时间序列。

该 T 统计量服从自由度为 $M_1 + M_2 - 2$ 的 t 分布, 当给出一定的显著水平 $\alpha = 0.01$, 如 $T > t_\alpha$, 或者计算得到的 P 值小于 α , 则在 α 的显著水平上, 基准年两侧 M_1 年及 M_2 年的均值有明显的差异, 即在基准年发生了突变。

1.4 模型简介

可变下渗容量模型是华盛顿大学和普林斯顿大学共同研发的一个大尺度水文模型^[8]。它基于网格的半分布式水文模型, 描述了陆-气之间主要的水文气象过程, 模型中蒸发计算考虑了植被冠层截留蒸发、植被蒸腾和裸地蒸发 3 种蒸发形式, 计算径流量由地表径流和基流两种成分组成。

新安江(XAJ)模型最初为两水源, 即地表径流和地下径流, 可用于湿润地区与半湿润地区。20 世纪 80 年代初, 模型研制者将萨克拉门托模型与水箱模型中的用线性水库函数划分水源的概念引入新安江模型, 提出了三水源新安江模型^[9]——地表径流、壤中流、地下径流。

考虑融雪径流的 WBM 模型是水利部应对气候变化研究中心团队研发的一个大尺度水文模型, 其中考虑了地面径流、地下径流和融雪径流 3 种水源, 主要用于变化环境下区域性水资源评价及径流变化归因识别研究^[10-12]。

GR4J 是一个概念性降雨径流模型, 由法国人提出, 已经在法国、澳大利亚等 400 多个不同气候条件的流域得到验证^[13]。值得指出的是 GR4J 考虑到了流域不闭合所导致的地下水交换问题, 引入了时段水量交换量的概念。GR4J 模型具有 4 个参数, 且在模型原理和结构方面较同类模型具有一定特色^[14]。

用 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{ns})和相对误差(e_r)用来反映模型模拟结果的好坏, E_{ns} 越接近 1, 说明模拟的径流过程越接近于实测径流过程, e_r 越接近 0, 说明模拟径流过程的水量平衡得到更好的体现, 计算式为:

$$E_{ns} = 1 - \sum_{i=1}^n (q_{ri} - q_{ci})^2 / \sum_{i=1}^n (q_{ri} - \bar{q}_{ri})^2$$

(6)

$$e_r = \sum_{i=1}^n (q_{ri} - q_{ci}) / \sum_{i=1}^n q_{ri}$$

(7)

式中: $q_{ri}, q_{ci}, \bar{q}_{ri}$ 分别是实测径流、模拟径流和模拟期实测径流量的平均值; n 为系列长度。

2 典型流域水文特性分析

从表 1 中可以看出, 黄河流域的 7 个典型流域年均降水量的均值约为 470 mm, 大汶河流域相对较多, 而

窟野河流域相对较少。比较各水文站年径流深和径流系数发现,除了红旗站和唐乃亥站的年均径流深大于 100 mm 外,其他站点的年均径流深都较小,这是因为黄河上游开发程度较轻,中下游人类活动剧烈,对流域水资源开发和利用程度较大,从而导致河道内径流较少甚至出现断流。

2.1 水文要素年均值变化趋势

用 M-K 趋势检验法分析各站的年降水量和年径流深序列趋势,结果见表 2。典型流域年平均气温都呈现明显上升趋势($M > 3.5$);各流域面平均年降水量呈增加或减少的趋势都存在,但序列趋势都不显著,没有通过 0.05 水平下的置信检验。对比各水文站年径流量序列趋势,发现除戴村坝站年径流呈不明显增加趋势外,其他站点的年径流深呈现减少趋势,其中唐乃亥站年径流量下降趋势不明显,而后大成站、偏关站和温家川站的减少趋势尤为明显($M < -5$),三站都集中在山西、陕西两省境内。综上分析可知,变化环境下黄河流域温升明显,年降水量变化不明显,而多数站点检测到年径流量呈明显下降趋势,人类活动对流域水循环的影响是主要原因^[15],而径流量的持续减少使得流域内水资源管理利用与可持续发展面临严峻考验。

表 2 水文站点资料序列 Mann-Kendall 趋势检验结果(显著性水平为 0.05)
Tab. 2 Mann-Kendall trend testing results (significance level is 0.05)

流域	水文站	年降水量			年径流量			年均气温		
		M 值	趋势	是否显著	M 值	趋势	是否显著	M 值	趋势	是否显著
大汶河	戴村坝	-0.59	↓	否	0.29	↑	否	4.35	↑	是
洮河	红旗	0.15	↑	否	-2.93	↓	是	3.79	↑	是
三川河	后大成	-0.37	↓	否	-5.63	↓	是	4.73	↑	是
黄河	花园口	-0.71	↓	否	-3.77	↓	是	4.93	↑	是
黄河	唐乃亥	1.84	↑	否	-0.18	↓	否	3.67	↑	是
偏关河	偏关	-0.04	↓	否	-7.38	↓	是	3.96	↑	是
窟野河	温家川	-0.13	↓	否	-5.87	↓	是	6.33	↑	是

2.2 水文要素年序列突变

水文资料的可靠性、代表性和一致性是水文模型应用以及工程水文设计的基础。然而自近年来,由于人类活动以及气候变化的影响,地表水文过程规律受到深层次的影响与改变^[16-17]。不少研究学者在全国选取不同的代表流域探究水文现象变化特点与原因。流域降水量、径流量以及气温等关键要素发生明显改变,降水径流关系发生变化^[18-20]。所以在建立水文模型之前有必要检验水文要素序列的一致性,识别出天然情况下降水径流序列,用以建立水文模型,并比较模型精度与适应性。

应用均值差异 T 检验法检验水文要素序列的突变情况。选择显著性水平 α 为 0.01,先将除首末两年之外的年份作为分段点,对前后序列进行均值 T 检验,得到计算的 P 值序列。选取其中最小值与临界值 α 相比较,如果 $P_{\min} < P_{\alpha}$,则将 $P_{\min}$ 对应分段点前后的序列分别进行 T 检验,重复上述步骤以确定可能不止一个显著突变点的年份。典型流域面均年降水量和径流量序列突变检验结果如表 3 所示。在显著性水平 α 为 0.01 时,7 个典型流域的面均年降水量序列都没有显著突变。除了戴村坝站年径流量序列没有发生显著突变外,其他站点的年径流量序列都检测出显著的突变点,且突变年份都集中在 1980s 及以后。造成降水径流关系不一致的原因需要结合流域具体情况作归因与识别。从均值差异 T 检验的结果可以确定年序列资料的变化概况。基于序列一致性检验结果,并结合资料年限优选出各个典型流域用于模型率定和验证的资料年限区间。

表 3 水文站点序列均值差异 T 检验结果(显著性水平为 0.01)
Tab.3 T -test results of mean difference of hydrologic stations (significance level is 0.01)

水文站点	水文要素	T 统计量	P 值	突变年份	是否显著
戴村坝	P	1.630	1.19×10^{-1}	1984	否
	Q	-1.307	2.06×10^{-1}	1989	否
红旗	P	-2.937	1.20×10^{-2}	1957	否
	Q	5.473	3.69×10^{-6}	1994	是
	Q	2.824	8.87×10^{-3}	1987	是
后大成	P	2.828	1.11×10^{-2}	1991	否
	Q	4.357	9.83×10^{-5}	1980	是
	Q	7.989	1.39×10^{-10}	1997	是
花园口	P	-2.899	3.03×10^{-2}	1991	否
	Q	5.567	3.59×10^{-6}	1986	是
唐乃亥	P	-2.517	4.77×10^{-2}	1960	否
	Q	-3.630	4.49×10^{-3}	1960	是
	Q	6.322	4.29×10^{-3}	1995	是
偏关	P	1.842	7.27×10^{-1}	1979	否
	Q	6.293	7.67×10^{-8}	2000	是
	Q	7.946	1.67×10^{-10}	2007	是
温家川	P	-1.314	2.38×10^{-1}	1955	否
	Q	4.011	2.43×10^{-4}	1980	是
	Q	11.442	6.29×10^{-16}	1999	是
	Q	3.393	7.59×10^{-3}	2004	是

注:表中 P 表示典型流域面均年降水量序列,Q 表示典型流域控制站年径流量序列。

3 典型水文站点径流过程模拟

依据典型水文站点年降水量和径流量序列突变分析结果,在不同典型流域,分别选择合适的资料年限,即一般选择人类活动对流域水文特性的影响不是非常显著的时期,用 4 种水文模型模拟站点的径流过程,计算实测与模拟的逐月径流之间的 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{ns})和相对误差(e_r)为模拟精度评价函数。各个典型流域站点的模拟精度如表 4 所示。

表 4 率定期 4 种水文模型模拟精度
Tab.4 Simulation accuracy by 4 hydrological models in calibration

水文站	率定年限	E_{ns}				$e_r/\%$			
		VIC	XAJ	WBM	GR4J	VIC	XAJ	WBM	GR4J
戴村坝	1977—1987	0.82	0.64	0.53	0.88	2.50	11.10	0.56	42.00
红旗	1965—1975	0.92	0.85	0.69	0.81	-0.03	-0.06	0.07	-5.90
后大成	1957—1966	0.90	0.80	0.67	0.76	1.40	-0.91	0.02	-4.22
温家川	1959—1967	0.69	0.71	0.73	0.82	1.10	2.42	0.07	-22.20
花园口	1969—1979	0.92	0.70	0.78	0.63	10.40	-5.88	0.02	1.31
偏关	1957—1966	0.74	0.84	0.77	0.76	-0.46	-10.90	-0.02	-14.80
唐乃亥	1960—1970	0.91	0.85	0.78	0.72	-4.10	0.10	0.38	2.56
均值		0.84	0.77	0.71	0.77	1.54	-0.59	0.16	-0.18

从表 4 中可以看出,率定期 4 种水文模型模拟 7 个站点的径流过程的 E_{ns} 均值分别为 0.84,0.77,0.71 和 0.77,且验证期 E_{ns} 均值都在 0.7 以上(见表 5)。其中 4 种水文模型模拟偏关站月径流过程如图 2 所示。

表 5 验证期 4 种水文模型模拟精度
Tab. 5 Simulation accuracy by 4 hydrological models in validation

水文站	验证年限	E_{ns}				$e_r/\%$			
		VIC	XAJ	WBM	GR4J	VIC	XAJ	WBM	GR4J
戴村坝	1988—1994	0.80	0.87	0.79	0.75	2.62	21.50	0.54	35.30
红旗	1976—1980	0.89	0.89	0.70	0.80	1.00	9.12	0.10	5.88
后大成	1967—1972	0.87	0.64	0.65	0.64	2.43	-13.00	0.01	-3.15
温家川	1968—1971	0.68	0.63	0.77	0.67	2.13	-9.53	0.05	-24.20
花园口	1980—1982	0.89	0.69	0.60	0.71	10.52	-15.00	0.18	-9.85
偏关	1967—1969	0.72	0.89	0.85	0.86	0.57	-1.67	0.06	-1.35
唐乃亥	1971—1980	0.88	0.82	0.71	0.75	-3.07	-4.43	-16.90	-13.20
均值		0.82	0.78	0.72	0.74	2.31	-1.87	-2.28	-1.52

可见,4 种水文模型都能较好地模拟黄河流域典型站点的径流过程,相比 WBM 和 GR4J 模型,VIC 模型和 XAJ 模型的产汇流参数都较多,具有较好的适应不同流域水文过程模拟的能力,且对流域产汇流过程考虑较为详细,模拟的 E_{ns} 值都较高。7 个典型流域验证期的 E_{ns} 均值分别为 0.82 和 0.78,明显高于 WBM 和 GR4J 模拟给出的 0.72 和 0.74。就径流量相对误差而言,WBM 模型模拟的径流相对误差最小。这是因为 WBM 模型结构最为简单,且在月尺度上计算融雪、地表和地下径流深,以水量平衡为参数优化主要原则,具有较好的水量模拟效果,这对流域水资源评价至关重要;VIC 和 XAJ 模型模拟结果次之,其模拟的径流相对误差都在 20% 以内;而 GR4J 模型对不同的典型流域站点模拟能力不同,相对误差波动较大。

总体来说,在黄河流域建立的 4 种水文模型在所选的 7 个典型流域内有相当好的模拟计算效果,VIC 和新安江模型相对 WBM 和 GR4J 模型参数较多,模拟流域水文过程较好;而 WBM 模型计算简单,在水量模拟计算中表现较优,适用于流域水资源的模拟与评价。

4 结 语

为合理评价黄河流域水资源变化,在黄河流域选取 7 个典型站点,分析了其水文要素变化特性,并应用新安江模型、WBM 模型和 GR4J 模型模拟了各水文站点的月尺度径流过程,得到如下结论:

(1) Mann- Kendall 秩次相关检验分析站点年降水量和年径流量变化趋势表明,黄河流域气候变暖显著,年降水量变化不明显,而除戴村坝水文站外,其余水文站点年径流量呈明显下降趋势,且年径流量序列多在 1980s 出现明显突变。

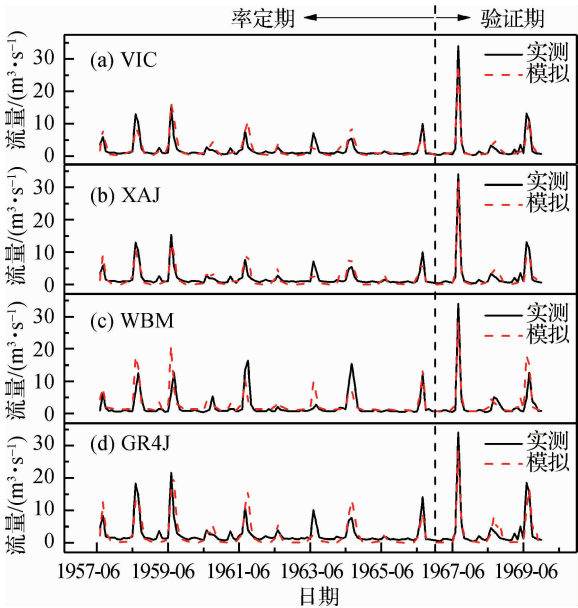


图 2 偏关站不同水文模型月径流模拟过程
Fig. 2 Monthly simulated runoff processes of different hydrological models in Pianguan station

(2) 4 种水文模型在黄河流域应用效果较好, VIC 和新安江模型的产汇流参数都较多, 对降水径流过程考虑较为周全详细, 具有较好的适应不同流域水文过程模拟的能力; 而 WBM 和 GR4J 模型结构较为简单, 参数较少, 易于率定; WBM 模型模拟的径流相对误差较小, GR4J 模型对不同典型流域站点模拟能力不同, 相对误差波动较大。

参 考 文 献:

- [1] 刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 495-500. (LIU Changming, XIA Jun, GUO Shenglian, et al. Advances in distributed hydrological modeling in the Yellow River basin[J]. Advance in Water Science, 2004, 15(4): 495-500. (in Chinese))
- [2] 侯钦磊, 白红英, 任园园, 等. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1505-1512. (HOU Qinlei, BAI Hongying, REN Yuanyuan, et al. Analysis of variation in runoff of the main stream of the Weihe River and related driving forces over the last 50 years[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1505-1512. (in Chinese))
- [3] 王国庆, 贺瑞敏, 李亚曼, 等. 基于流域水文模拟的径流变化原因研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 11-13, 79. (WANG Guoqing, HE Ruimin, LI Yaman, et al. Study on causes of runoff variation based on hydrological simulation-taking Sanchuanhe River basin as a case study[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 11-13, 79. (in Chinese))
- [4] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 黄河流域大尺度水文过程模拟研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(2): 5-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Study on large-scale hydrological processes simulation of Yellow River basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(2): 5-8. (in Chinese))
- [5] 郭飞, 马娟娟. SIMHYD 模型在黄河流域的适用性分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(6): 75-80. (GUO Fei, MA Juanjuan. An analysis of applying SIMHYD model in the Yellow River basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(6): 75-80. (in Chinese))
- [6] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. 4th ed. London: C. Griffin, 1975: 108-108.
- [7] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [8] LIANG X, XIE Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(9): 1173-1193.
- [9] 刘金涛, 宋慧卿, 张行南, 等. 新安江模型理论研究的进展与探讨[J]. 水文, 2014, 34(1): 1-6. (LIU Jintao, SONG Huiqing, ZHANG Xingnan, et al. A discussion on advances in theories of Xinanjiang Model[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(1): 1-6. (in Chinese))
- [10] WANG G, ZHANG J, PAGANO T C, et al. Simulating the hydrological responses to climate change of the Xiang River basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3/4): 769-779.
- [11] WANG G, ZHANG J, YANG Q. Attribution of runoff change for the Xishui River Catchment on the Loess Plateau of China in a changing environment[J]. Water, 2016, 8(6): 267.
- [12] WANG G Q, ZHANG J Y, JIN J L, et al. Regional calibration of a water balance model for estimating stream flow in ungauged areas of the Yellow River Basin[J]. Quaternary International, 2014, 336(12): 65-72.
- [13] 邓鹏鑫, 王银堂, 胡庆芳, 等. GR4J 模型在赣江流域日径流模拟中的应用[J]. 水文, 2014, 34(2): 60-65. (DENG Xinpeng, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Application of GR4J in daily runoff simulation for Ganjiang River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(2): 60-65. (in Chinese))
- [14] PERRIN C, MICHEL C, ANDRÉASSIAN V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1): 275-289.
- [15] 管晓祥, 刘悦, 金君良, 等. 中国不同气候区典型流域的水文变化特性[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 13-17. (GUAN Xiaoxiang, LIU Yue, JIN Junliang, et al. Characteristics of hydrological changes of typical catchments in different climatic regions of China[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 13-17. (in Chinese))
- [16] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban

- hydrology in a changing environment; II: Urban stormwater modeling and management[J]. *Advance in Water Science*, 2014, 25(5): 752-764. (in Chinese))
- [17] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))
- [18] 王国庆, 金君良, 林锦, 等. 山西省中西河流域降水径流演变特征及响应关系[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3): 1-4. (WANG Guoqing, JIN Junliang, LIN Jin, et al. Historical variation and response relationship of precipitation and runoff for the Zhongxi River catchment in Shanxi Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(3): 1-4. (in Chinese))
- [19] 王国庆, 唐雄朋, 刘佩瑶, 等. 山西省岚河流域水文气象要素演变及响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(4): 67-70. (WANG Guoqing, TANG Xiongpeng, LIU Peiyao, et al. Historical variation and response relationship of hydro-meteorological variables during 1955-2015 for the Lanhe River in Shanxi Province[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2017, 38(4): 67-70. (in Chinese))
- [20] 王国庆, 张建云, 李雪梅, 等. 黄土高原泾河流域径流变化及其对环境要素的响应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 192-196. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LI Xuemei, et al. Runoff variation of the Xinsuihe River catchment and its response to environmental change on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 192-196. (in Chinese))

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin

GUAN Xiaoxiang^{1,2}, JIN Junliang^{2,3,4}, HUANG Aiming¹, ZHAN Huijie¹, WANG Guoqing^{2,3}, LIU Cuishan^{2,3}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: The simulation of hydro-meteorological analysis and hydrological process in the representative watersheds is of great importance for water resources assessment in the Yellow River basin. In this study, the Mann-Kendall and *T*-testing methods are used to analyze the variation characteristics of annual precipitation, runoff and temperature series in seven typical watersheds of the Yellow River basin. The VIC model, Xin'anjiang model, WBM model and GR4J model are applied to simulate the runoff processes. The simulated results show that the mean annual temperature of all the typical watersheds significantly increases, while the variation trends of the annual precipitation are not significant. As a result of environmental changes, the annual runoff series indicate a decreasing trend with abrupt changes mostly occurring in 1980s. It is found from the model simulation results that the four hydrological models mentioned above are well applied in the runoff simulation in the Yellow River Basin. As far as Nash-Sutcliffe efficiency coefficient is concerned, the simulated runoff process given by the VIC and Xin'anjiang models is closer to the measured runoff process because they consider the runoff generation and concentration process in detail. So far as relative errors of runoff are concerned, the WBM model, with a simple structure, performs better in water quantity simulation calculation, and is more suitable for the simulation and evaluation of water resources in the large-scale river basins.

Key words: Yellow River basin; hydrological change; VIC model; Xin'anjiang model; WBM model; GR4J model