

1970—2016 年气候变化对渭河源头清源河流域降水和地表径流的影响

牛最荣¹, 张芮¹, 陈学林², 蔺宝军¹

(1. 甘肃农业大学 水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省水文水资源局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 探究 1970—2016 年渭河源头清源河气温、降水、径流变化特征及相互关系, 为明确该区域气候变化对降水和径流的影响及模拟研究径流演变过程提供依据。[方法] 在分析气候要素变化和径流等年际变化规律和相互关系的基础上, 采用 3 种气温修正气候水文模型与流域基本水文模型相比较的方法研究气候变化对径流的影响。[结果] 1994—1995 年是清源河流域主要气象水文要素变化的分界线, 1970—1994 年, 流域年平均气温、年降水量、径流量变化不大; 1995 年之后, 气温持续升高, 而降水、径流则出现了整体降低趋势, 2010—2016 年平均温度比 1970—1974 年升高 0.9 °C, 升幅 15.79%; 年降水量、径流量分别减少 13.48%, 31.82%。3 个气候水文模型 MQPT₁₋₁, MQPT₂₋₁ 和 MQPT₃₋₁ 对年降水—径流过程模拟精度均比一般水文模型高, 尤其是气温扰动法修正模型 MQPT₂₋₁ 平均模拟误差仅为 3.03%, 比不考虑气候变化的流域水文模型精度提高 11.62%。[结论] 渭河源头清源河小流域近 50 a 气温变化对径流影响非常明显, 尤其是 1995 年之后; 在径流模拟分析中必须考虑气温等主要气象因子的影响。

关键词: 清源河流域; 气候变化; 径流; 降水; 气候水文模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0009-06

中图分类号: P343

文献参数: 牛最荣, 张芮, 陈学林, 等. 1970—2016 年气候变化对渭河源头清源河流域降水和地表径流的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 9-14. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.002. Niu Zuirong, Zhang Rui, Chen Xuelin, et al. Impacts of climatic change on precipitation and surface runoff from 1970 to 2016 in Qingyuan River basin, source region of Weihe River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 9-14.

Impacts of Climatic Change on Precipitation and Surface Runoff from 1970 to 2016 in Qingyuan River Basin, Source Region of Weihe River

NIU Zuirong¹, ZHANG Rui¹, CHEN Xuelin², LIN Baojun¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Gansu Hydrology and Water Resources Bureau, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the variations and relationships of temperature, precipitation and runoff during 1970—2016, in order to explore the impacts of climate change on precipitation and runoff and simulate the evolution of runoff in Qingyuan River, the source region of the Weihe River. [Methods] The inter-annual variations and the relationships between climatic elements and runoff were analyzed. Three temperature modified climate-hydrological models and general hydrological models were compared to explore the impacts of climate change on runoff. [Results] The period from 1994 to 1995 was the dividing line of the main meteorological and hydrological elements in Qingyuan River basin. During 1970—1994, there was no significant variation in the annual average temperature, precipitation and runoff. However, temperature showed an increasing trend while precipitation and runoff showed a decreasing trend after 1995. Compared to the period of 1970—1974, the annual average temperature increased by 0.9 °C in 2010—2016 (with a rate of 15.79%), while

收稿日期: 2018-01-31

修回日期: 2018-04-17

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划“黑河流域中游地区生态—水文过程演变规律及其耦合研究”(91125015); 水利部公益性科研专项(201301083); 甘肃省重点研发计划(18YF1FA081)

第一作者: 牛最荣(1964—), 男(汉族), 甘肃省通渭县人, 博士, 教授级高工, 硕士生导师, 从事水文与水资源循环研究。E-mail: niuzr@gsau.edu.cn.

the annual precipitation and runoff decreased by 13.48% and 31.82%, respectively. The three climate-hydrological models, MQPT₁₋₁, MQPT₂₋₁ and MQPT₃₋₁, showed higher accuracies than the general hydrological model by simulating the annual precipitation and runoff processes. Especially, the mean simulated error of MQPT₂₋₁ (modified model based on air temperature disturbance) was only 3.03%, which was 11.62% higher than the general hydrological model (without considering climate change). [Conclusion] Temperature variation had significant impacts on runoff in the last 50 years in the Qingyuan River basin, especially after 1995. In addition, the impacts of temperature and other major meteorological factors should be involved in runoff simulation analysis.

Keywords: Qingyuan River basin; climate change; runoff; precipitation; climate-hydrological model

以全球气候变暖为主要特征的气候变化已成为 21 世纪全球最关注的问题。水资源变化与气候条件紧密相联^[1-3], 气候变化对流域径流量等水文参数具有重要影响^[4-6]。许多研究已表明流域趋于暖干化是导致径流量减少的重要因素^[7-9], 同时也有学者表明气温升高导致冰雪融化加快而增大流域径流量^[10]。由于各个流域特殊的地理位置、气候条件, 导致径流—气候响应关系十分复杂, 需针对特定流域深入研究。

渭河是黄河流域的最大支流, 地处中国西北黄土高原东南部干旱、半干旱地区, 生态环境脆弱, 对气候变化响应非常敏感, 且流域局部的气候变化有着它的独特性和区域性。因此, 选择渭河源头典型的小流域进行气候变化对降水和径流影响规律深入分析, 建立小流域的适宜的流域气候水文模型, 对于掌握和了解整个流域降水—径流未来的发展方向有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次研究选取渭河流域上游地区具有代表性的小流域——清源河流域, 该典型小流域地处渭河流域西北角, 位于东经 104°, 北纬 35°08', 最高海拔 3 400 m, 最低海拔 2 200 m。清源河发源于渭河与洮河分水岭的骆驼顶, 入渭河口河长 19.1 km, 河道比降 6.28%, 流域面积 114 km², 多年平均降水量 650 mm, 多年平均蒸发量 1 067 mm, 多年平均径流量 2.11×10⁷ m³, 多年平均气温 6.05 ℃。

1.2 研究数据

清源河小流域气温、降水、径流等气象水文数据采用甘肃省水文水资源局 1970—2016 年的 47 a 的实测资料。

1.3 研究方法

(1) 距平差累积曲线法。在流域气温、降水、径

流随时间变化规律研究中, 采用距平差累积曲线法, 即以 $\sum_{i=1}^n (P_i - P_0)$ 为纵坐标 (式中 P_i 为任意时段实测平均值, 如年平均气温、降水量等, P_0 为某一研究时段相应的平均统计值, $i=1, 2, 3, \dots, n$), 以研究年度 (时序) 为横坐标, 点绘形成的曲线称之为距平差累积曲线。

(2) 相关分析法。利用 EXCEL 软件的散点图添加趋势线功能, 选择相关系数最高的趋势线及回归方程, 分析流域气象水文数据之间的关系。

(3) 流域水文模型法^[11-13], 先假定流域近 50 a 气候过程不存在趋势性变化或气候变化对降水径流关系影响不大, 建立流域年降水径流 2 个基本水文模型, 用 MQP₁ 和 MQP₂ 表示; 在此基础上将蒸发量纳入计算, 建立考虑蒸发影响的降水径流模型, 用 MQP₃ 表示。

$$R_i = a \times (A \times P_i)^b + m \quad (1)$$

$$R_i = a \times (A \times P_i)^b \quad (2)$$

$$R_i = a \times (A \times P_i)^b + c \times (\bar{E} - E_i) \times A \quad (3)$$

式中: R_i ——模拟的 i 年径流量 (10⁸ m³); a, b, c, m ——模型参数; A ——流域面积 (km²); P_i —— i 年流域平均降水量 (mm); \bar{E}, E_i ——流域多年平均蒸发量和 i 年蒸发量 (mm)。

(4) 流域气候水文模型。在流域降水径流基本水文模型模拟研究的基础上, 将气候主要要素气温变化引起的径流损失量也计入水文模型, 即采用气温干预法^[14]对 MQP₁ 和 MQP₃ 进行修正, 依次建立 2 个考虑气温变化影响的流域气候水文模型, 用 MQPT₁ 和 MQPT₃ 表示。

用气温干预法修正时, 假定气温变幅与流域的植物和土壤的综合损耗水量成正向线型关系, 则气温引起的损耗径流量为:

$$\Delta R_i = d \times A \times (T_i - T_{\min}) \quad (4)$$

式中: ΔR_i —— i 年气温变化径流损耗量 (10⁸ m³); T_i, T_{\min} —— i 年气温和系列年最小气温 (℃); A ——

流域面积(km²); d ——系数。按照这种气温干预机制补偿修正后的气候水文模型为:

$$R_i = a \times (A \times P_i)^b + m - d \times A \times (T_i - T_{\min}) \quad (5)$$

$$R_i = a \times (A \times P_i)^b + c \times (\bar{E} - E_i) \times$$

$$A - d \times A \times (T_i - T_{\min}) \quad (6)$$

同时,采用气温扰动法对降水径流系数进行修正,即认为降水径流系数不仅与降水量大小有关,同时还随着气候的变化而变化,据此利用降水径流系数 r 与气温 T 的数学关系 $r = f(T)$ 对径流系数进行修正,建立基于气温对径流系数扰动修正后的流域气候水文模型,用 MQPT₂ 表示。

$$R_i = P_i \times r_i = P_i \times f(T) \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 清源河小流域气候要素及径流量变化

2.1.1 气温变化 清源河流域气温呈现出波动性上升的周期性变化的规律(见图1)。以1970—1979年平均温度为基准平均值(5.68℃),计算并绘制了该流域实测径流系列1970—2016年的47 a距70年代平均温度的差量累积温度曲线(图1a),从图1中可以看出,1994年之前,气温有降有升,变化不大;1995年之后,气温整体出现了上升的趋势。

以5 a为一个基本统计单元,表1统计出了年平均气温的逐单元变化规律,从表中可以看出,90年代后期升温幅度最高,比70年代初增高了11.23%,比90年代初升高8.56%,升温幅度达0.2℃/a,21世纪后该流域升温幅度逐渐减缓,2010—2016年平均升温幅度达到最小。整体而言,2010—2016年与70年代初相比,平均温度升高0.9℃,升高15.79%。

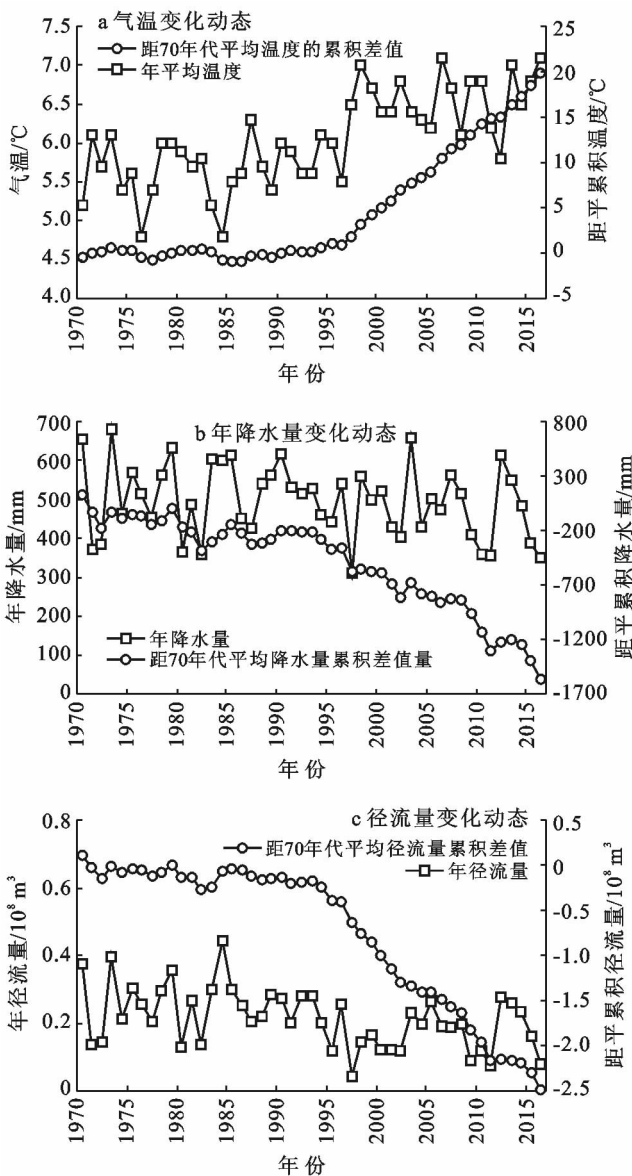


图1 清源河小流域气候要素及径流变化动态

表1 清源河小流域不同时段气温变化率分析

项目	1970— 1974年	1975— 1979年	1980— 1984年	1985— 1989年	1990— 1994年	1995— 1999年	2000— 2004年	2005— 2009年	2010— 2016年
平均温度/℃	5.70	5.56	5.48	5.70	5.84	6.34	6.46	6.58	6.60
逐时段相比/%	—	-2.46	-1.44	4.01	2.46	8.56	1.89	1.86	0.30
与70~74 a相比/%	—	-2.46	-3.86	0.00	2.46	11.23	13.33	15.44	15.79

2.1.2 降水量变化 清源河小流域1970—2016年的年降水系列总体上存在逐年减小的趋势。以1970—1979年的年平均降水量(529.7 mm)为基准平均值,计算并绘制了该流域距70年代平均年降水量的差量累积曲线(图1b)。从图1b中可以看出,1970—1994年之前,年降水量呈缓慢减少趋势;1995年之后,年降水量急剧减少,2010—2016年平均年降水

量比70年代初期减少69.01 mm,减少比例达到13.48%(表2)。

2.1.3 径流量变化 清源河小流域1970—2016年的年径流量也同样存在逐年波动减小的趋势。以1971—1979年的年平均径流量($2.68 \times 10^7 \text{ m}^3$)为基准平均值,计算并绘制了距70年代平均年径流量的差量累积曲线(图1c),从图1c中可以看出,1970—1994年,年径

流量有增有减,呈缓慢减少趋势;1995 年之后,年径流量急剧减少。以 5 a 为一个基本统计单元,表 3 统计出了年平均径流量的逐单元变化规律,从表中可以看

出,1995—1999 年是平均年径流量减少最剧烈的年份,比 1970—1974 年减少 42.13%,2010—2016 年平均径流量比 70 年代初期也减少了 31.82%(表 3)。

表 2 清源河小流域不同时段降水量变化分析

项目	1970— 1974 年	1975— 1979 年	1980— 1984 年	1985— 1989 年	1990— 1994 年	1994— 1999 年	2000— 2004 年	2005— 2009 年	2010— 2016 年
平均降水量/mm	512.00	547.40	483.02	519.38	530.28	470.72	488.90	493.56	442.99
逐时段相比/%	—	6.91	-11.76	7.53	2.10	-11.23	3.86	0.95	-10.25
与 1970—1974 年之比/%	—	6.91	-5.66	1.44	3.57	-8.06	-4.51	-3.60	-13.48

表 3 清源河小流域年径流量变化情况

项目	1970— 1974 年	1975— 1979 年	1980— 1984 年	1985— 1989 年	1990— 1994 年	1995— 1999 年	2000— 2004 年	2005— 2009 年	2010— 2016 年
年径流量/ 10^8 m^3	0.253	0.283	0.255	0.252	0.248	0.146	0.158	0.186	0.172
逐时段相比/%	—	11.76	-10.03	-0.94	-1.64	-41.02	7.92	17.95	-7.45
与 1970—1974 年相比/%	—	11.94	0.71	-0.24	-1.87	-42.13	-37.54	-26.33	-31.82

2.2 气候要素与径流要素相关分析

从图 2a 可以看出,清源河小流域年径流量与年

降水量呈显著的正相关线性关系。降水量、径流量都与年平均气温呈负相关线性关系(图 2b,2c)。

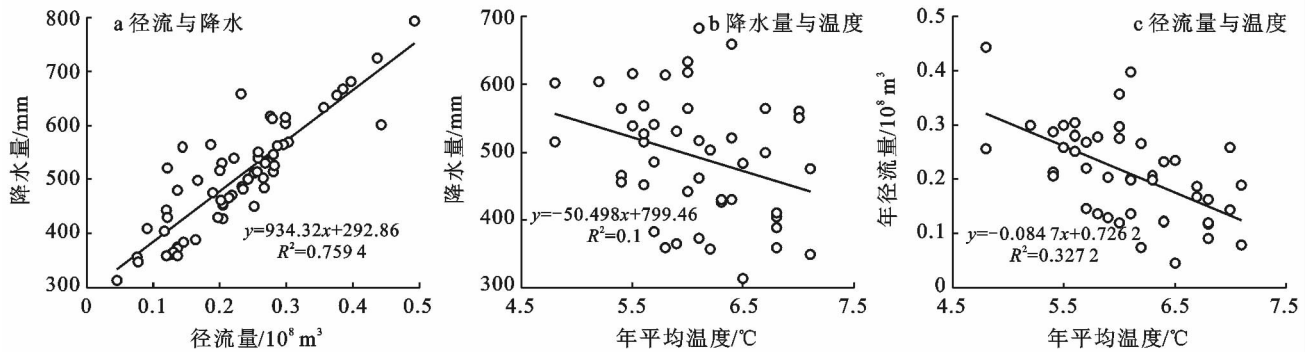


图 2 清源河小流域气候要素及径流要素相关分析

2.3 清源河气候要素变化对径流量的影响

2.3.1 不考虑气候变化的径流模拟 应用逐年实测降水蒸发资料分别代入上述 MQP_1, MQP_2, MQP_3 这 3 个基本流域水文模型构架中,计算出模拟径流量与实测径流量相关,采用最小二乘法数学优化技术,以误差平方最小化寻找数据的最佳模拟函数匹配,求出模型中 a, b, c, m 相应的数值,得出清源河流域相应的 3 个基本水文模型,依次用 $MQP_{1-1}, MQP_{2-1}, MQP_{3-1}$ 表示:

$$R_i = 2.1 \times 10^{-10} \times A \times P_i^{2.4916} \quad (8)$$

$$R_i = 0.4129(A \times 10^{-5} \times P_i)^{1.8459} \quad (9)$$

$$R_i = 0.9 \times 2.1 \times 10^{-10} \times A \times P_i^{2.4916} + 0.1 \times 2.1 \times 10^{-10} \times A \times P_{i-1}^{2.4916} + 0.12(\bar{E} - E_i) \times A \times 10^{-5} \quad (10)$$

应用上述清源河流域 3 个基本水文模型分别模拟降水产生的径流过程,并与实测过程进行对比分析(图 3),拟合最好的是 MQP_{3-1} 模型,最差的是 MQP_{2-1} 模型。

表 4 是按照 10 a 的阶段划分进行比较分析的结果, MQP_{1-1}, MQP_{2-1} 和 MQP_{3-1} 这 3 个模型对 1981—1990 年这一阶段的拟合差均为最小,分别是 3.42%, 1.30% 和 6.21%。到了 1990 年之后,3 个模型的模拟相对误差不断地增大,2010—2016 年这一阶段的拟合差最大,3 个模型分别高达 45.38%, 45.26% 和 36.50%(表 4),这与 90 年代开始流域温度升高存在着在很大关系,需要对模型进行修正。

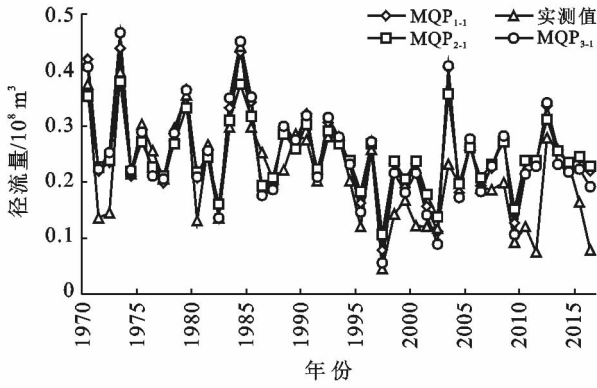


图 3 清源河小流域基本水文模型模拟年径流量效果

2.3.2 考虑气候变化对径流影响的模拟分析 为提高径流模拟分析精度,全面反映气候主要要素气温对径流的影响,按照气温干预机制计入气温变化引起的径流损失量,对 MQP₁₋₁ 和 MQP₃₋₁ 流域水文模型进行补偿修正,分别得出流域气候水文模型 MQPT₁₋₁ 和 MQPT₃₋₁ 两种模型。应用实测 47 a 降水径流资料获得降水径流系数 r_i 系列,与气温系列 T_i 回归分以得出两者的数学模型为 $r_i = f(T) = 13.265T_i^{-2.1594}$, 据此建立气候水文模型 MQPT₂₋₁。

$$R_i = 2.1 \times 10^{-10} \times A \times P_i^{2.4916} - 0.00016 \times A \times (T_i - T_{min}) \quad (11)$$

$$R_i = 0.9 \times 2.1 \times 10^{-10} \times A \times P_i^{2.4916} + 0.1 \times 2.1 \times 10^{-10} \times A \times P_{i-1}^{2.4916} + 0.12(\bar{E} - E_i) A \times 10^{-5} - 0.00016 \times A \times (T_i - T_{min}) \quad (12)$$

$$R_i = P_i \times 13.265T_i^{-2.1594} \quad (13)$$

应用 MQPT₁₋₁, MQPT₂₋₁ 和 MQPT₃₋₁ 流域气候水文模型对流域年降水径流过程分别进行模拟(如图 4 所示),总体吻合度很高。其中 1970—2016 年 MQPT₁₋₁ 平均模拟误差为 4.76%,比不考虑气温影响的 MQP₁₋₁ 模拟误差(15.57%)减小了 10.8%;MQPT₂₋₁ 模拟精度最高,其平均模拟误差仅为 3.03%,比不考虑气温影响的 MQP₂₋₁ 模拟误差(14.65%)减小了 11.62%;MQPT₃₋₁ 模拟误差相对较大,为 9.76%,比不考虑气温影响的 MQP₃₋₁ 模拟误差(14.60%)减小了 4.85% 同样按照 10 a 的阶段划分进行比较分析,MQPTR 模型在所有年度模拟误差都很小,尤其是 1970—1979,2001—2009 年误差依次仅为 -0.74% 和 0.69%。MQPT₁₋₁, MQPT₃₋₁ 两个模型模拟效果较为接近,即 1999 年之前模拟误差普遍较小,2000 年后模拟误差不断增加(表 5)。

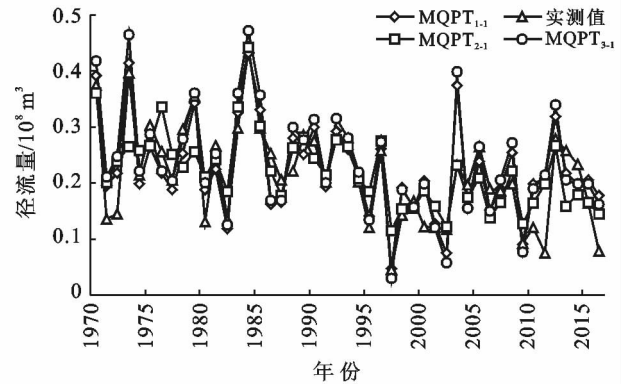


图 4 清源河小流域气候水文模型模拟年径流量效果

表 4 清源河小流域不考虑气温变化影响时不同水文模型模拟结果

年份	实测流量/ 10 ⁸ m ³	MQP ₁₋₁			MQP ₂₋₁			MQP ₃₋₁		
		计算流量/ 10 ⁸ m ³	平均差 值/10 ⁸ m ³	误差/ %	计算流量/ 10 ⁸ m ³	平均差 值/10 ⁸ m ³	误差/ %	计算流量/ 10 ⁸ m ³	平均差 值/10 ⁸ m ³	误差/ %
1970—1979	0.268	0.286	0.017	6.45	0.273	0.005	1.72	0.292	0.024	9.02
1980—1989	0.254	0.262	0.009	3.42	0.257	0.003	1.30	0.269	0.016	6.21
1990—1999	0.197	0.229	0.032	15.98	0.232	0.035	17.65	0.223	0.026	12.95
2000—2009	0.172	0.218	0.045	26.31	0.223	0.051	29.54	0.210	0.038	22.20
2010—2016	0.172	0.251	0.078	45.38	0.251	0.078	45.26	0.235	0.063	36.50
平均值	0.215	0.249	0.034	15.57	0.247	0.032	14.65	0.247	0.031	14.60

表 5 清源河小流域考虑气温变化影响时不同气候水文模型模拟结果

年份	实测流量/ 10 ⁸ m ³	MQPT ₁₋₁			MQPT ₂₋₁			MQPT ₃₋₁		
		计算流量/ 10 ⁸ m ³	平均差 值/10 ⁸ m ³	误差/ %	计算流量/ 10 ⁸ m ³	平均差 值/10 ⁸ m ³	误差/ %	计算流量/ 10 ⁸ m ³	平均差 值/10 ⁸ m ³	误差/ %
1970—1979	0.268	0.268	0.000	0.06	0.266	-0.002	-0.74	0.292	0.023	8.66
1980—1989	0.254	0.248	-0.006	-2.26	0.266	0.013	5.03	0.268	0.014	5.69
1990—1999	0.197	0.205	0.008	4.06	0.209	0.012	5.90	0.211	0.013	6.83
2000—2009	0.172	0.186	0.014	8.09	0.173	0.001	0.69	0.190	0.018	10.30
2010—2016	0.172	0.218	0.045	26.34	0.183	0.010	5.87	0.215	0.043	24.74
平均值	0.215	0.226	0.010	4.76	0.222	0.007	3.03	0.236	0.021	9.76

3 讨论与结论

(1) 1994—1995 年是渭河源头清源河小流域主要气象水文要素变化的分界线。1994 年之前,流域年平均气温、年降水量、径流量整体变化不大;1995 年之后,各要素产生了明显变化。以气温为例,1995—2016 年,流域年平均气温整体呈现出上升的态势,尤其是 90 年代后期升温幅度最高,与 90 年代初相比,升温幅度达 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$,21 世纪后该流域升温幅度逐渐减缓。整体而言,2010—2016 年与 70 年代初相比,平均温度升高 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;与 90 年代初相比,年平均温度升高 $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 清源河小流域年降水量在 1970—1994 年呈缓慢减少趋势;1995 年之后,年降水量急剧减少,2010—2016 年平均年降水量比 70 年代初期减少 69.01 mm ,减少比例达到 13.48% 。年径流量变化规律与降水量基本一致,1995 年之后,年径流量先迅速减小(1995—1999 年依次比 1970—1974 年减少 42.13%),之后有小幅回升,2010—2016 年平均年径流量比 70 年代初期减少了 31.82% 。

(3) 流域气候水文模型 MQPT_{1-1} , MQPT_{2-1} 和 MQPT_{3-1} (气温修正)对年降水径流过程模拟精度分别比一般流域水文模型 MQP_{1-1} , MQP_{2-1} 和 MQP_{3-1} 提高 10.8% , 11.62% 和 4.85% ,即可以认为清源河小流域近 50 a 气温升高可使得相同降水产生的径流量减少在 $4.85\%\sim 11.62\%$ 。同时, MQPT_{2-1} 模拟误差最小,平均模拟误差仅为 3.03% ,说明气温扰动法修正模型 MQPT_{2-1} 更加能够真实地反映流域气候变化对降水径流关系的影响和作用。

(4) 受全球气候变暖影响,近百年中国年平均气温升高了 $0.5\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,尤其是近 50 a 北方地区增温最为明显^[15]。渭河上游实测资料表明,1975—2011 年气温持续上升,平均升温达 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;近 40 a 来,渭河上游径流总体也呈明显下降趋势,尤其是 90 年代后进入明显的枯水期^[16]。这与本文关于渭河源头清源河流域气温在 90 年代后期迅速上升、径流明显减少的演变规律一致。另外,黄晨璐等^[3] 研究也表明,渭河上游牛谷河流域 1993—2013 年的年平均气温呈上升趋势,降水、径流均呈减少趋势,其中径流相对减少幅度达 21.4% 。孙悦等^[16] 分析了气候增暖导致的潜在蒸散量增加对渭河上游径流的影响,表明温度升高而导致对径流减少的贡献分量可达 60% 以上,高于降水的贡献^[17],这也说明流域径流模拟预测中必须考虑气温变化的影响,即应对传统降雨径流模型修正,建立符合研究区域特点的流域气候水文模型。

(5) 近年来,除气候变化对径流有显著影响外,

人类活动也逐步成为影响整个流域径流变化的重要因素,且这种影响逐步由中下游地区延伸到上游乃至河源区域,这也是目前国内外水文学者们研究的热点问题之一。本文分析了气候变化对渭河源头小流域径流变化的影响,但未涉及人类活动对径流的影响。目前人类活动对渭河源头影响也开始逐步显现,故未来利用分布式水文模型和气候水文模型相结合的方式,分析气候变化和人类活动对径流的双重影响,并预测未来径流变化的趋势是本研究的重要方向。

[参 考 文 献]

- [1] 邵爱军,左丽琼,阮新,等. 河北省近 50 年气候变化对地表径流量的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(6):19-24.
- [2] 王海军,张勃,靳晓华,等. 黑河中游张掖地区近 48 a 气候变化及径流的响应[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(2):81-88.
- [3] 黄晨璐,杨勤科,黄维东,等. 渭河上游典型小流域水文特征差异性分析[J]. 冰川冻土,2015,37(5):1312-1322.
- [4] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(4):559-565.
- [5] 楚纯洁,李亚丽. 近 60 a 黄河干流水沙变化及其驱动因素[J]. 水土保持学报,2013,27(5):41-47,132.
- [6] 莫淑红,王学风,勾奎,等. 气候变化和人类活动对澜河流域径流情势的影响分析[J]. 水力发电学报,2016,35(9):7-17.
- [7] 牟夏,刘强,平凡,等. 1960—2007 年无定河流域径流情势变化及其归因分析[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2017,53(4):465-471.
- [8] 邓振镛,张强,李栋梁,等. 气候变化对渭河上游径流量和输沙量的影响[J]. 中国沙漠,2006,26(6):982-985.
- [9] 焦彩强,王飞,穆兴民,等. 渭河流域气候变化与区域分异特征[J]. 水土保持通报,2010,30(5):27-32.
- [10] 杨春利,蓝永超,王宁练,等. 1958—2015 年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. 地理科学,2017,37(12):1894-1899.
- [11] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment (part I): Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [12] Todini E. The ARNO rain-runoff model [J]. Journal of Hydrology, 1996,175(1/2/3/4):339-382.
- [13] Refsgaard J C, Knudsen J. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models [J]. Water Resource Research, 1996,32(7):2189-2202.
- [14] 牛最荣. 气候要素和土地利用对甘肃渭河流域径流量的影响研究[M]. 兰州:甘肃人民出版社,2013.
- [15] 邓振镛,张强,辛吉武,等. 干旱生态环境及水资源对全球气候变暖响应的研究进展[J]. 冰川冻土,2008,30(1):57-63.
- [16] 孙悦,李栋梁. 1975—2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J]. 冰川冻土,2014,36(2):413-423.