

1970—2015 年秦岭北麓径流重建及变化

张召鹏, 段克勤

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710100)

摘 要:渭河流域能否高质量发展的一个关键就是水资源的问题,而秦岭北麓是渭河的重要产水区。为探究秦岭北麓近年水资源的变化特征,采用 VIC(Variable Infiltration Capacity)模型,基于水文相似性原理,运用典型流域参证法,重建了 1970—2015 年秦岭北麓径流变化。结果表明:VIC 模型在观测流域有着较高的适用性,在月径流模拟中,纳什系数(N_s)大于 0.76,相关系数(R^2)大于 0.91,相对误差(RE)小于 $\pm 15\%$;通过水文参数移植法模型可以真实还原无观测流域径流变化,在验证期 N_s 、 R^2 、RE 分别为 0.81、0.94、4.6。近 46 a 来北麓径流总量在 (16.01~65.4) 亿 m^3/a 波动,1983 年径流量最高达到 65.4 亿 m^3 ,而 1977 年最小值仅为 16 亿 m^3 ,丰水年份是枯水年份的 4 倍,径流年际变化明显,过去 46 a 秦岭北麓多年平均径流值为 35.2 亿 m^3/a 。降水是径流变化的主导因素,并且也是水文模拟中最重要的影响要素。

关键词:秦岭; VIC 模型; 径流; 降水

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0206-06

Change and Retrieval of Runoff in the Northern Foothills of Qinling Mountains from 1970 to 2015

ZHANG Zhaopeng, DUAN Kegin

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710100, China)

Abstract: The key point whether Weihe River Basin can develop in a high quality depends on the water resources. However, the northern foothills of Qinling Mountains is the important area of water production in Weihe River Basin. In order to explore the change characteristics of the water resources in the northern foothills of Qinling Mountains in recent years, we adopted VIC (Variable Infiltration Capacity) model which based on the principle of hydrological similarity and applied typical watershed reference method to retrieve the changes of runoff in the northern foothills of Qinling Mountains. The results show that VIC model has a high applicability in the observed watershed; in monthly runoff simulation, Nash coefficient (N_s) is greater than 0.76, correlation coefficient (R^2) is greater than 0.91, and relative error (RE) is less than $\pm 15\%$; the hydrological parameter transplantation model can be used to restore the runoff change in unobserved watershed; in the validation period, N_s , R^2 and RE were 0.81, 0.94 and 4.6, respectively; the runoff volume of the northern foothills had fluctuated between 1.601 billion m^3 and 6.54 billion m^3 per year in the past 46 years; the maximum runoff reached 6.54 billion m^3 in 1983 and the minimum runoff was only 1.6 billion m^3 per year in 1977; the runoff in high flow year was four times higher than that in low flow year, which showed the obvious interannual variation of runoff; the average annual runoff in the northern foothills of Qinling Mountains was 3.52 billion m^3 per year in many years over the last 46 years. Precipitation is the leading factor of runoff variation and the most important influencing factor in hydrological simulation.

Keywords: Qinling Mountains; VIC model; runoff; precipitation

秦岭北麓作为黄河第一大支流渭河的主要产水区,也是关中平原最主要的水源地。渭河流域能否高质量发展的一个关键问题就是水资源的问题,而径流

是影响水资源的关键要素,估算渭河流域陕西段径流的 51%来自于秦岭北麓^[1]。近年关中地区人口增长迅速,人均水资源量急剧下降,有限的供给与不断增

收稿日期:2021-01-07

修回日期:2021-03-15

资助项目:国家自然科学基金“秦岭高海拔山地降水变化及其对水资源影响”(41771030)

第一作者:张召鹏(1992—),男,吉林白山人,博士研究生,研究方向为气候变化与自然灾害。E-mail:zzpeng@snnu.edu.cn

通信作者:段克勤(1970—),男,甘肃平凉人,博士,教授,主要从事全球变化研究。E-mail:kqduan@snnu.edu.cn

长的需求之间的矛盾是关中水资源突出问题。

据陕西水利厅预测,2020年关中地区年需水量将超过83亿 m^3 ,而可供水总量仅为58亿 m^3 。水资源不足已成为制约关中地区和渭河流域可持续发展的关键因素^[2-5]。

秦岭北麓河流众多,河流河道短而陡,在大部分河流出口处的峪口缺乏水文观测资料,对秦岭北麓径流及水资源的研究主要集中在几个有观测资料的小流域,缺乏对秦岭北麓总径流变化的全面认识。研究表明秦岭北麓典型流域的年径流变化趋势基本一致,20世纪90年代后递减趋势明显,且秦岭北麓河流域径流年内分配极不均匀^[6]。秦岭北麓径流变化原因复杂,如灞河流域径流量下降主要是人类活动所导致,降水变化是次要原因^[7],而Hu等^[8]的研究认为灞河流域径流变化的控制性因素是降水。另有研究也表明陕西省渭河南岸秦岭山区径流减少主要原因是降水^[9],20世纪90年代末的径流突变主要是气候变化引起的,人类活动对其影响有限^[10-11]。

秦岭北麓众多河流最终都汇入渭河,1970—2015年渭河陕西段径流量为(17.3~130.7)亿 m^3/a ,年际变化明显,平均年径流量为56.5亿 m^3/a ,推算秦岭北麓总径流为(31.51~40)亿 m^3/a ^[12-13],可见秦岭北麓是渭河的主要水源地,直接关系到渭河流域的水资源的总量。此外,秦岭北麓总径流量能不能支撑关中城市群的可持续发展,也需要对秦岭北麓总径流进行研究。但到目前为止,仅有部分研究简单推算得出秦岭北麓整体径流量的变化^[5,14-15]。在气候变化背景下,秦岭北麓总径流如何变化?相关研究还比较欠缺,比如秦岭北麓总径流的变率有多大?枯水年径流是多少?丰水年又是多少?过去几十年,总径流是增加了还是减少了?这些基础性数据的缺乏,严重限制了对秦岭北麓水资源变化认识。

合理利用有限的水资源,前提是必须对当地水资源在流域水循环中形成、运移、转化和消耗有一个科学的认识。在当前及可预见的未来,秦岭北麓水资源已成为稀缺资源,然而对秦岭北麓的水资源状况却并不十分了解。基于此,本文的目的是利用VIC模型,基于水文相似性原理,运用典型流域参证法,重建1970—2015年秦岭北麓径流的变化序列,在此基础上,定量分析区域径流的变化规律,为合理利用和规划有限水资源提供科学基础。

1 研究区概况

秦岭北麓指秦岭(陕西段)山脊线及其以北的山麓地区,位于陕西省南部($32^{\circ}40'—34^{\circ}50' \text{N}$, 105°

$30'—110^{\circ}3' \text{E}$),呈东西走向(图1),全长约800 km,南北平均宽度30 km,年降水量为550~737 mm^[16],海拔为444~3 748 m,平均海拔高度在1 600 m左右,秦岭北麓地形陡峻,植被以林地为主。本文主要关注秦岭北麓山区的径流变化,研究区域限定在秦岭主山脊线以北至流域出口。

秦岭北麓共有流域模型分辨率峪口39个(图1),表1列出了各子流域的面积,其中4个流域有多年的连续的径流观测数据,分别为:黑河流域(黑峪口水文站以上)、涝河流域(涝峪口水文站以上)、辋峪河流域(马渡王水文站控制出口以上)以及沔河流域(秦渡镇水文站控制出口以上)。

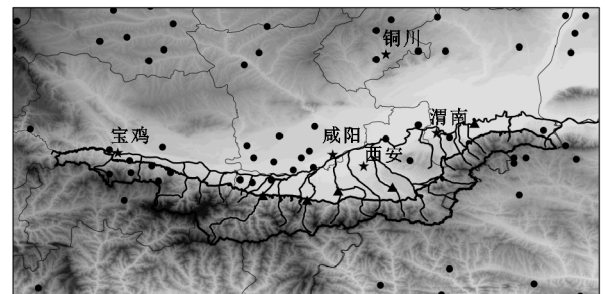


图1 秦岭北麓范围(黑线所包围的范围)、地形及气象水文站点的位置

2 研究方法和数据

2.1 研究方法

2.1.1 VIC水文模型简介 本文使用的水文模型由Wood等^[17]首次提出,是一种具有物理机制的分布式水文模型,目前已发展到VIC-3L模型,模型以网格为单位独立计算产流,根据单位线运用圣维南方程进行汇流计算。VIC模型能很好地表达亚网格地表植被、土壤储湿能力、下层土壤水非线性衰退的异质性,并且考虑了地形降水和温度递减的差异性,使得模型模拟的山区水文过程更加合理。利用VIC模型对渭河和汉江流域径流的模拟方面已有所研究,取得了较好的模拟结果^[18-19]。

模型的产流计算分为直接径流与基流计算,直接径流计算公式如下:

$$Q_d = \begin{cases} P + W_o - W_o^{\max} & I_o + P \geq I_m \\ P + W_o - W_o^{\max} \left[1 - \left(1 - \frac{I_o + P}{I_m} \right)^{1+b} \right] & I_o + P \leq I_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_d 为土壤上层直接径流; P 为降水量; W_o 为土壤初始含水量; W_o^{\max} 为上层土壤最大含水量; I_o 为土壤初始下渗率; I_m 为土壤最大下渗容量。

表 1 秦岭北麓各流域面积、平均径流、占总净流量比值、线性变化趋势及水文相似流域评价结果

流域	面积/ km ²	平均年径流量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	占总径流量 的比值/%	线性变化趋势/ (万 m ³ · 10 a ⁻¹)	水文相似 流域	流域	面积/ km ²	平均年径流量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	占总径流量 的比值/%	线性变化趋势/ (万 m ³ · 10 a ⁻¹)	水文相似 流域
晁峪河	473	1.64	4.67	37.84 *	2	甘河	77	0.20	0.57	37.82	2
清姜河	79	0.25	0.72	22.07 *	2	涝河	303	0.92	2.61	122.99	2
清水河	254	0.98	2.77	-104.06	2	太平峪河	431	1.42	4.04	151.37	3
马尾河	14	0.27	0.76	-50.45	2	高冠峪河	69	0.22	0.62	22.07	2
礞溪河	77	0.29	0.82	-50.46	2	泮河	203	0.72	2.05	56.76	2
伐鱼河	71	0.25	0.71	-50.45	2	漓河	69	0.23	0.65	18.92	2
麦李河	127	0.51	1.45	-75.68	2	大峪河	152	0.50	1.42	31.53	2
石头河	66	0.26	0.74	-28.38	2	库峪河	273	1.02	2.90	34.68	2
霸王河	63	0.25	0.71	15.76 *	2	浐河	572	2.21	6.29	78.84	1
西沙河	720	2.80	7.96	9.46 *	3	辋峪河	1105	4.97	14.14	-864.08	3
汤峪河	79	0.25	0.70	6.30 *	2	零河	128	0.62	1.77	-148.21	2
东沙河	205	0.76	2.16	28.38 *	2	沈河	127	0.55	1.56	-91.45 *	2
泥峪河	148	0.49	1.40	15.76 *	2	赤水河	77	0.24	0.68	-22.75 *	2
竹峪河	65	0.24	0.68	3.15 *	2	石提河	61	0.22	0.64	-3.15 *	2
车峪河	60	0.23	0.65	6.30 *	2	罗纹河	469	1.65	4.70	-12.61	1
沙河	60	0.26	0.73	9.46 *	2	方山峪河	63	0.21	0.59	6.31	2
黑河	1570	5.96	16.93	589.72 *	1	罗敷河	57	0.20	0.56	9.46	2
就峪河	65	0.21	0.60	25.22 *	2	长涧河	84	0.20	0.56	12.61	2
田峪河	203	0.68	1.93	97.76 *	2	潼河	91	0.21	0.59	15.76	2
耿峪河	617	2.10	5.98	309.05 *	1	总计	9448	35.18	100	99.41	—

注：* 表示通过 0.05 置信水平的显著性检验；1、2、3 分别代表黑河、涝河与辋峪河。

基流计算采用 Arno 模型计算,公式如下:

$$Q_b = \begin{cases} d_1 W_2 & W_2 \leq W_s W_2^{\max} \\ d_1 W + d_2 (W_2 - W_s W_2^{\max}) & W_2 > W_s W_2^{\max} \end{cases}$$

(2)

式中: Q_b 为基流; d_1 为下层土壤含水量出流系数; d_2 为基流消退系数; W_2 为下层土壤含水量; W_s 为下层土壤实际含水量; W_2^{\max} 为下层土壤最大含水量。

2.1.2 基于 VIC 的水文相似性分析 秦岭北麓流域出口众多,但水文观测资料十分有限。本文从水文要素角度出发,构建基于外部驱动力与流域内部结构的水文相似性评价指标体系,选取各子流域与黑峪、涝峪、泮峪 3 个流域的水文相似性最大值代表的水文参数,来模拟无观测子流域径流。指标体系分为气象、地势、地貌、土壤 4 大类,共有年均降雨量、平均海拔、地形指数、土地类型、土壤类别 5 个指标^[20-21],不同指标权重结合实际情况利用层次分析法与熵值法计算。流域水文相似利用水文相似度 S 来判别,计算流域的水文相似元 c ,流域 A 中水文要素 a_i 与流域 B 中对应水文要素 b_i ,用 $c_i(a_i, b_i)$ 表示第 i 项水文相似元,设流域 A 中对应水文指标值为 y_a ,流域 B 中对应水文指标值为 y_b ,则水文相似元的值计算方法为:

$$q(c_i) = 1 - \frac{|y_a - y_b|}{y_a}$$

(3)

设流域 A 与流域 B 水文对应相似元的影响权重为 δ ,则水文相似度 S 为:

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i q(c_i)$$

(4)

2.2 数据来源

本文所用气象数据来自中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)提供的气象站日值数据,包括日平均降水量、最高气温、最低气温、风速等,为了避免数据缺失导致的误差,研究剔除了缺失记录超过 3 个月的站点(图 1)。水文资料来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),包括黑峪口、涝峪口、秦渡镇、马渡王水文站实测径流月值数据。

模型所需高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 SRTMDEMUTM 数字高程数据集。土壤数据来源于中科院寒区旱区数据中心(<http://data.casnw.net/portal/>)提供的世界土壤数据库(HWSD),主要包含土壤质地、类型、深度、理化性质等。土地利用数据来自马里兰大学数据中心(<http://glcf.umd.edu/data/>)。

3 结果与分析

3.1 流域参数率定

为提高模型模拟精度,需要对模型土壤参数进行率定,由于区域水文资料欠缺,仅有 4 个水文站。选

取黑峪口和涝峪口出水口的水文观测资料进行参数率定。秦岭北麓地区人类社会活动最活跃时期在20世纪80年代^[22],为减少人类活动对径流模拟的影响,采用黑峪口、涝峪口水文站1975—1978年实测月径流资料作为模型率定数据,1982—1985年月径流数据作为模型验证数据。

运用均匀设计法对土层厚度、最大基流流速、蓄水量曲线指数、非线性基流土壤含水量进行率定,采用Nash效率系数(N_s)、确定性系数 R^2 与相对误差RE对径流模拟结果进行流量过程吻合度、模拟与实测相关度、径流总量精度评价。结果见图2,对两流域模拟

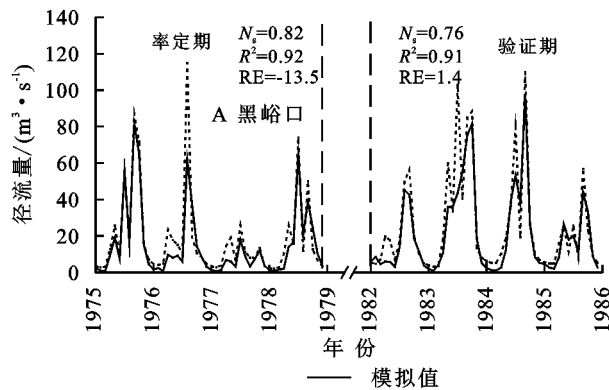


图2 黑峪口与涝峪口率定期与验证期月径流实测与模拟对比

3.2 水文相似性分析

研究区共计有流域模型分辨率出口39个,而只有在黑河(黑峪口水文站以上)、涝河(涝峪口水文站以上)、辋峪河(马渡王水文站控制流域出口以上)和沔河(秦渡镇水文站控制出口以上)有观测数据。因此本文以黑河、涝河和辋峪河为流域水文相似性参证标准,根据研究区自然环境特征借鉴以往山区水文研究经验,确立气象与下垫面条件为判定标准的水文参数化体系^[23-24]。评价体系中降雨量相似性元值计算利用流域内平均多年降雨量,海拔元值计算运用流域平均海拔高度,地形指数元值计算运用地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ ^[25],其中 α 为等高线长度进入网格单元的集水面积, $\tan\beta$ 为单位网格坡度。土地类型元值计算利用不同土地利用类型在流域内的分布面积百分比通过公式(3)得出。然后利用层次分析法与熵值法综合加权,求得水文相似单元权重 δ ,流域之间水文相似度为0~1,选取最大值进行流域水文参数移植,最后结合水文相似元值与权重综合得出秦岭北麓各子流域水文相似性元值,结果见表1。

为验证参数移植后的模拟结果,利用沔河秦渡镇水文站实测月径流数据对参数移植后的模拟径流进行检验,选择与参数率定和验证相同的时期(图3)。利用 N_s 、 R^2 、RE对径流模拟效果进行评价,结果显示在秦渡镇水文站率定期与验证期月径流模拟的 N_s 、 R^2 、RE分

结果 N_s 系数在0.76以上, R^2 在0.91以上,RE控制在±15%以内,但1976年与1983年模拟值与实测之间出现较大偏差,这是影响 N_s 系数的主要因素,原因有两点,一是在1976年、1983年期间降水类型多为短时间强降水,气象台站在两流域的站点较少,可能没有精准捕捉到山区强降水信号,二是研究区为地形较为陡峻的山区,由于观测资料的缺乏,降水在这一区域的梯度变化存在一定的不确定性,造成对高海拔地区降水的空间插值出现偏差。除去这两个模拟异常点,VIC模在秦岭北麓流域中 N_s 、 R^2 、RE都有着较高的相似度与可信度,模拟值效果较好,可以适用于流域的径流模拟研究。

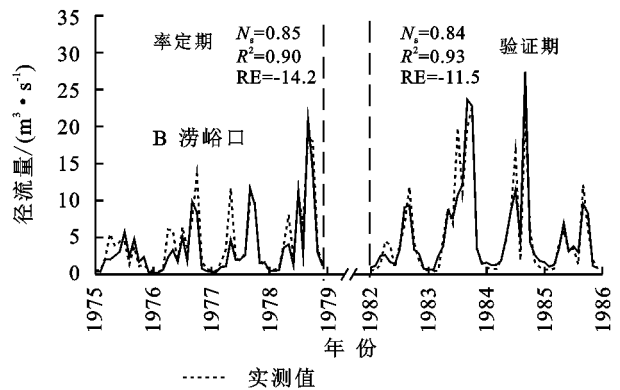


图3 秦渡镇率定期与验证期月径流实测与模拟对比

3.3 基于VIC模型的水文不确定性分析

模型驱动数据与水文参数是影响VIC模型模拟精度的主要因素,驱动数据包括植被、高程、气象等数据,通过改变初始场、产流与汇流过程影响模拟结果;VIC模型水文参数包括饱和容量曲线形状参数 B 、最大基流速度 D_m 、非线性基流增长时占 D_m 的比例系数 D_s 、非线性基流发生时底层土壤含水量与最大含水量的比值 W_s 、第二层土壤厚度 d_2 、第三层土壤厚度 d_3 共6个参数,水文参数影响着径流的产生、运移与转化的过程,是水文不确定性研究的核心内容^[26]。

高程数据作为模型主要输入数据之一。从不同高程产品提取的河道面积、坡度等要素值略有差异,但对

模拟结果影响有限,并且高程数据分辨率的差异会由于模型模拟的复杂性在一定程度上淡化对模拟结果的影响^[27]。在秦岭北麓渭河流域,利用不同的高程数据分辨率(30~90 m),模拟得到的径流变化量仅为3.5%^[28]。因此本文结合杨亚慧^[21]对秦岭北麓模拟成果,采用分辨率为90 m的高程数据作为模型驱动数据。

土地利用数据的分辨率对于水文结果影响的不确定性研究较少,仅有李雪^[29]研究发现土地利用数据的空间精度主要影响水文响应单元,但数据集精度与模拟结果并不存在显著相关性,对模拟结果影响有限。为减小率定期与验证期由于土地利用类型变化导致的模拟误差,本文基于 Landsat 卫星 1980—2015 年土地利用类型遥感影像发现研究区土地覆被转换面积总体变化幅度较小,36 a 来各类土地利用类型面积平均变化量不足 1%,因此本文利用可以代表多年土地利用平均状态的 2010 年土地利用数据作为率定期与验证期模型驱动数据。

气象数据是影响水文不确定性的重要因素,尤其降水数据很大程度上影响着模型模拟结果。在秦岭高海拔山区缺乏降水观测资料,为确保有限的气象数据能够真实的描述研究区状况,研究使用薄盘样条插值方法,以经度、纬度和海拔为独立变量,基于台站数据利用 Anusplin 软件插值到秦岭山区的气象数据^[17]。

水文参数是分布式水文模型不确定性的主要来源,研究借鉴朱悦璐等^[30]在渭河流域试验得出的参数敏感区间,利用均匀设计法得出流域水文参数,受限于水文实测资料,模拟研究必须通过流域相似性方

法进行水文参数移植,李珂等^[20]、杨亚慧^[21]的研究证明了水文参数移植在秦岭北麓流域具有可行性。在观测流域,VIC 模型模拟结果保持着较高的模拟精度。在无观测流域,利用水文相似方法模拟流域径流,模拟结果略低于真实情况,但总体效果较好。本文基于 VIC 水文模型在秦岭山区,利用有限的观测资料,进行参数率定,并对无观测资料流域进行相似流域的水文参数移植,对比率定期和验证期观测和模拟径流,发现模拟值可以很好地再现真实的径流量,可见 VIC 模型适用于秦岭山区径流的模拟研究。

3.4 秦岭北麓径流重建及变化

通过对秦岭北麓流域水文相似性分析,移植水文参数进行流域径流定量化研究,得出秦岭北麓 39 个峪口多年平均径流量及其与总径流的占比(表 1)。子流域年平均径流为(0.19~5.95)亿 m^3/a ,多数集中在(0.2~0.25)亿 m^3/a ,秦岭北麓以中小流域产水为主。M-K 趋势分析显示有 17 个子流域径流量呈显著增加趋势(显著性水平 >0.05)。

1970—2015 年秦岭北麓总径流变化见图 4,过去 46 a 年径流量为(16~65.4)亿 m^3/a ,多年平均为 35.2 亿 m^3/a 。基于年平均径流深度等值线对无资料流域估算,得出秦岭北麓径流量多年平均值为(31.5~40)亿 m^3/a ^[5,15],与本文利用模型计算径流量相当。但本研究利用具有物理机制的模型模拟定量化描述秦岭北麓径流动态变化过程,充分考虑区域植被土壤与气候要素,相比统计估算结果更可靠,所重建的径流时间序列,可以从动态变化角度研究秦岭北麓径流量的变化,弥补了以往研究在时间尺度上的不足。

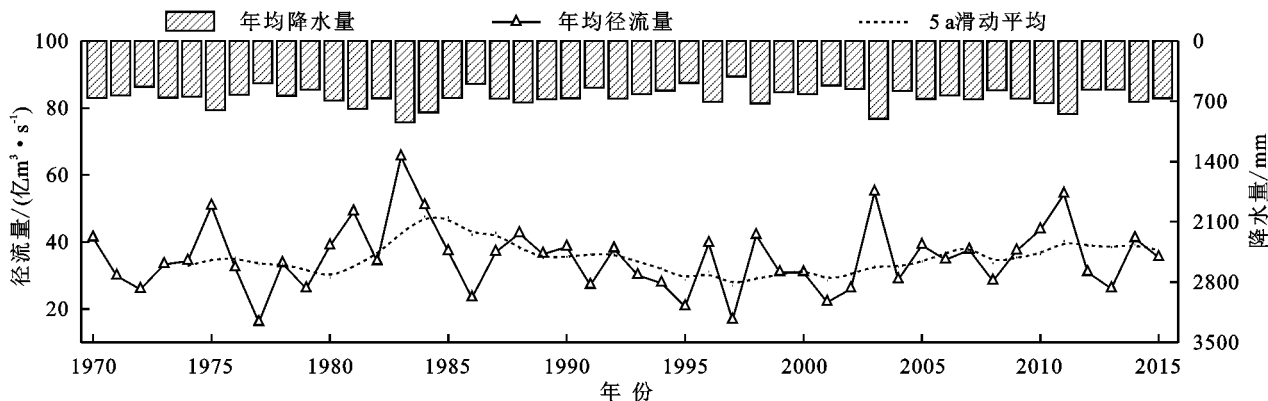


图4 秦岭北麓 1970—2015 年径流量曲线

1970—2015 年秦岭北麓总径流量呈现较大的波动,1983 年径流量最高达到 65.4 亿 m^3 ,而 1977 年最小值仅为 16 亿 m^3 。从 10 a 滑动平均曲线来看,秦岭北麓总径流经历了增加—减小—增加 3 个阶段:(1) 1977—1988 年,径流量波动增加,且由“负距平”转为“正距平”;(2) 1989—2004 年,径流量波动减

少;(3) 2005—2010 年,径流量呈波动增加趋势。

4 结论

(1) VIC 模型在秦岭北麓观测流域的模拟中,率定期和验证期 N_s 系数在 0.76 以上, R^2 在 0.91 以上,RE 控制在 $\pm 15\%$ 以内,模型的模拟精度较高,可以

反映观测流域的径流变化。

(2) 在北麓无观测流域,基于相似流域水文参数移植法的模拟结果显示,在率定期与验证期 N_s , R^2 , RE 分别为 0.75, 0.87, 3.9 和 0.81, 0.94, 4.6, 说明参数移植法适用于北麓无观测流域的模拟。

(3) 秦岭北麓以中小流域产水为主,流域面积在 1 500 km² 以上的流域径流量占比为 31%, 1970—2015 年径流总量为 (16~65.4) 亿 m³/a, 多年平均径流量为 35.2 亿 m³/a。秦岭北麓总径流经历了增加—减小—增加 3 个阶段,其变化主要与降水相关。模型模拟秦岭北麓总径流,相较于临近流域径流估算法,模型具有物理机制可以更加准确地模拟无观测流域径流变化,并充分考虑了流域异质性对径流变化的影响,减少了传统预估方法带来的不确定性,是未来无资料流域径流变化研究的重要工具。

参考文献:

- [1] 李瑞农.为什么说秦岭是我国的中央水塔[N].学习时报,2020-01-25(5).
- [2] 党辉,刘刚,马清瑞,等.陕西省关中地区水资源开发利用现状及节水潜力分析[J].陕西水利,2019(6):75-77.
- [3] 李绍文.浅析秦岭北麓生态系统保护与修复[J].陕西水利,2019(2):103-107.
- [4] 王超亚.关中城市群水安全研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [5] 董文旭.秦岭地区水资源及其开发利用研究[D].西安:西北大学,2015.
- [6] 马瑞婷,黄领梅,沈冰.秦岭北麓典型流域年径流序列的突变分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):76-85.
- [7] 马新萍,白红英,侯钦磊,等.1959—2010 年秦岭灞河流域径流量变化及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(7):1299-1304.
- [8] Hu Sheng, Qiu Haijun, Yang Dongdong, et al. Evaluation of the applicability of climate forecast system reanalysis weather data for hydrologic simulation: A case study in the Bahe River Basin of the Qinling Mountains, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(5): 546-564.
- [9] 葛芬莉.渭河水量减少原因及其南岸秦岭山区降水、径流变化分析[J].西北水力发电,2004,20(1):146-149.
- [10] 王战平.渭河流域水文特性分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(5):176-179.
- [11] 夏伟,周维博,李文溢,等.气候变化和人类活动对沔河流域径流量影响的定量评估[J].水资源与水工程学报,2018,29(6):47-51.
- [12] 蒋建军,冯普林.秦岭北麓水资源利用现状与生态景观维护[J].人民黄河,2010,32(7):68-70.
- [13] 王静,周庆华.西安段秦岭北麓旅游水资源承载力[J].西北大学学报:自然科学版,2015,45(6):996-1000.
- [14] 陈芳莉,晁智龙,邱玉茜.秦岭生态区水资源分析评价[J].陕西水利,2012(9):7-8.
- [15] 王静,周庆华.西安段秦岭北麓旅游水资源承载力[J].西北大学学报:自然科学版,2015,45(6):997-1000.
- [16] 孟清,白红英,郭少壮.基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化[J].水土保持研究,2020,27(2):206-211.
- [17] Wood E F, Lettenmaier D P, Zartarian V G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(3): 2717-2728.
- [18] 郑巍斐,杨肖丽,程雪蓉,等.基于 CMIP5 和 VIC 模型的长江上游主要水文过程变化趋势预测[J].水文,2018,38(6):48-53.
- [19] 朱悦璐,畅建霞.基于 VIC 模型构建的综合干旱指数在黄河流域的应用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2017,45(2):203-211.
- [20] 李珂,秦毅,李子文,等.秦岭北麓部分区域的水文相似性初步分区[J].水资源与水工程学报,2014,25(2):184-187.
- [21] 杨亚慧.基于 SWAT 模型的西安市秦岭北麓流域径流分析[D].西安:长安大学,2015.
- [22] 柯新月,汪妮.秦岭南北典型流域径流变化规律的对比研究[J].西安理工大学学报,2019,35(4):452-458.
- [23] 姚成,章玉霞,李致家,等.无资料地区水文模拟及相似性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2013,41(2):108-113.
- [24] Sharda V N, Prasher S O, Patel R M, et al. Performance of Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) in predicting runoff in mid-Himalayan micro-watersheds with limited data[J]. Hydrological Sciences Journal, 2008, 53(6): 1165-1175.
- [25] Ralf Loritz, Axel Kleidon, Conrad Jackisch, et al. A topographic index explaining hydrological similarity by accounting for the joint controls of runoff formation [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(4): 3807-3821.
- [26] 汪伟,方秀琴,杜晓彤,等.基于 VIC 模型的柳江流域分布式水文模拟与应用[J].水土保持研究,2020,27(3):329-334.
- [27] 林凯荣,郭生练,熊丽华,等. DEM 栅格分辨率对 TOPMODEL 模拟不确定性的影响研究[J].自然资源学报,2010,25(6):1023-1030.
- [28] 吴江,胡胜. DEM 分辨率对 SWAT 模型水文模拟的影响研究[J].灌溉排水学报,2016,35(11):18-22.
- [29] 李雪.土地利用数据集精度与 CFSR 降水数据订正对 SWAT 模型降雨径流模拟研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [30] 朱悦璐,畅建霞.基于均匀设计法的 VIC 模型参数率定[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(12):218-223.