

城西试验流域水文特性及水文过程模拟

刘悦^{1,2}, 舒心怡³, 管晓祥^{1,2}, 杨勤丽⁵, 刘翠善^{2,4}, 王国庆^{2,4}

(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. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 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; 5. 电子科技大学 资源与环境学院, 四川 成都 611731)

摘要: 水文试验是认识水文规律的重要基础工作。根据我国东部低山丘陵区城西试验流域的实测资料, 分析不同尺度降雨径流之间的响应关系, 再利用新安江流域水文模型进行径流模拟, 进一步探讨该模型在我国东部低山丘陵区的适用性。结果表明: 在试验流域空间尺度(几十平方公里)的暴雨洪水过程中, 洪水峰现时间一般滞后雨峰3~4 h; 场次和月尺度上的降雨径流具有较好的正相关关系; 在日尺度上, 降雨径流关系散乱, 以10和70 mm降雨量为阈值呈U型分布; 3种时间尺度上, 径流均受到前期退水过程的影响, 其中, 时间尺度越短, 受前期退水过程的影响越显著; 新安江流域水文模型在我国东部低山丘陵区具有较好的水文模拟能力, 且月尺度水文过程的模拟效果优于日尺度, 对天然流域的模拟效果优于人类活动扰动的流域。

关键词: 降雨; 径流; 水文特性; 水文过程; 试验流域; 新安江模型; 径流模拟

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0032-07

Hydrological characteristics and process simulation of Chengxi experimental watershed

LIU Yue^{1,2}, SHU Xinyi³, GUAN Xiaoxiang^{1,2}, YANG Qinli⁵, LIU Cuishan^{2,4}, WANG Guoqing^{2,4}

(1. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030; 4. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Hydrology experiment is of importance to understand hydrological laws. According to the observed data of Chengxi experimental watershed located in the eastern low hilly area of China, responses of runoff to rainfall variation at different scales were analyzed. The feasibility of the Xin'anjiang model to low hilly area of China was verified using the hydrological simulation approach. The results showed that: At experimental watershed scale (tens of square kilometers), discharge peak time usually lags 3 - 4 hours from storm peak time. Runoff highly correlated to rainfall at both event-and month-scale whereas the weak correlation was found at daily-scale, the scatter points of daily runoff to rainfall presented a U-type distribution with rainfall thresholds of approximately 10 mm and 70 mm. Runoff was extensively influenced by antecedent hydrological recession at three time scales, with higher influence at shorter scale. The Xin'anjiang model can generally reproduce hydrological process of the eastern low hilly area with a better performance at monthly scale, and the simulation of natural watershed is better than that of human disturbed watershed.

Key words: precipitation; runoff; hydrological characteristics; hydrological process; experimental wa-

收稿日期: 2019-01-06; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFA0605002、2016YFA0601501); 国家自然科学基金项目(41830863、41330854、51879162、41601025); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2017490211)

作者简介: 刘悦(1996-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 从事水文水资源模拟方面的研究。

通讯作者: 王国庆(1971-), 男, 山东成武人, 博士, 教授, 从事气候变化和水资源评价等方面的研究。

tershed; Xin'anjiang model; runoff simulation

1 研究背景

水文科学试验是认识区域水文规律、研究环境变化影响、构建流域水文模型的重要基础工作^[1-2],不同区域由于气候、下垫面条件的不同,水文特性也存在很大的差异^[3]。1965年提出的国际水文计划(International Hydrological Programme,简称“IHP”)将试验流域研究作为其核心内容之一,促进了各国水文试验相关工作的开展^[4]。我国在20世纪50、60年代相继开展建设了大批水文科学试验站,积累了宝贵的试验资料,基于水文观测试验的降水量径流关系变化特征的研究,为更加深入地揭示水文现象和探讨水文规律提供了科学依据,对于流域水资源管理开发、水循环机理研究等方面均有着重要的理论意义和实际价值^[5]。刘悦等^[6]利用城西水文试验站20世纪60年代的科学试验资料,系统分析了土壤蒸发对不同驱动要素之间的响应关系,认为表层土壤含水量和前期土壤含水量对裸地土壤蒸发的影响最为明显。郝振纯等^[7]基于五道沟水文实验站的观测资料,分析了实际蒸发变化趋势及其气候驱动机制,试验流域对促进我国水文科学的发展起到了至关重要的作用。

基于区域水循环规律,流域水文模型以产汇流过程为核心用于径流和洪水过程的模拟与预报^[8]。新安江流域水文模型(简称新安江模型)是我国学者提出的一种基于蓄满产流的集总式水文模型,目前已广泛应用于世界各国不同气候区^[9-12]。张兰影等^[13]、黄国如等^[14]研究表明,与其他一些具有国际可比性的流域水文模型(如VIC模型等)相比,新安江模型不仅能够较好地模拟洪水过程,而且可以较好地模拟中低流量和枯水过程。然而,由于不同区域水文、气象条件的特殊性,水文模型的区域适应性研究是模型在水文预报及径流模拟应用中的重要研究内容。

我国东部低山丘陵区经济高度发达,受东亚季风气候影响显著,突发洪水是制约社会经济高速发展的重要因素。针对这一区域水文特性,开展水文模拟是提高洪水预报精度的重要基础工作。在20世纪70年代中后期,由于改制、经费等系列原因,很多试验流域相继停测,但目前已获得的水文试验资料有很多都没有得到足够的重视和应用^[15]。以位于中国长江中下游低山丘陵区的滁州城西试验流域为研究对象,本文充分利用1962-1966年详细的科

学试验资料,系统分析了不同时空尺度的降雨径流响应关系,同时利用新安江流域水文模型进行径流模拟的适应性研究,以期为长江下游的区域洪水预报及防洪减灾提供科学支撑。

2 资料与研究方法

2.1 流域概况

城西水文试验站(东经118°13',北纬32°18')设立于1962年,试验站位于长江下游滁河水系清流河的上游,控制流域面积82.1 km²,流域四周浅山环绕(琅琊山、花山等),水系由东源、中源和西源组成,呈伞状分布(图1),流域内以耕地、林地为主,其中,灌溉农业主要集中在西源流域,灌溉用水主要以西源径流为主^[16]。东源流域总体上基本保持天然状态,而西源流域则在一定程度上反映了灌溉农业发展下的水文情势。试验流域多年平均降雨量为900 mm,年均气温约15℃,属于典型的东部季风气候。城西试验流域多年平均径流深约250 mm,该试验流域的设立旨在分析不同面积、不同地形及下垫面条件的水量平衡关系,为研究浅山丘陵区径流的形成规律积累资料与经验^[17]。

城西试验流域于1962年6月起至1966年12月对降雨量、径流量和气象进行了系统的观测,共计9个雨量站点和4个水文站点,积累了短暂但宝贵的水文气象观测资料。由于该流域内没有新建的水利工程,流域地貌及植被覆盖等没有发生显著的变化,试验监测的水文资料仍然能够反映流域目前的水文特性^[18]。

图1给出了该试验流域以及各水文、雨量站点的具体分布。由于实测数据资料长度的限制,仅选取东源流域、西源流域和全流域进行分析。

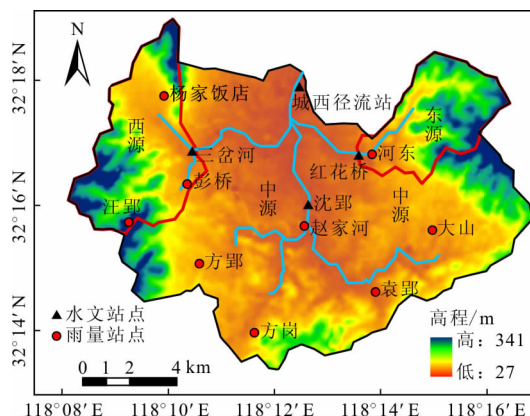


图1 城西试验流域水系及各站点分布图

2.2 研究方法

(1)新安江模型。20 世纪 70 年代,河海大学赵人俊教授领导的课题研究组汇集了当时产汇流理论等方面的成果,提出了国内第一个完整的基于蓄满产流理论的集总式水文模型——新安江流域水文模型^[19-20],以下简称新安江模型。此后,新安江模型由最初的二水源结构升级为三水源结构,主要由蒸散发计算、产流计算、水源划分计算和汇流计算 4 个层次组成,共 17 个参数,根据参数对模型计算结果的影响程度可分为敏感参数和不敏感参数。目前新安江模型被广泛应用于水文预报、环境变化影响评估等诸多领域,该模型具有结构简单、参数明确、模拟效果好等优点。新安江模型主要敏感参数及其物理意义如下:

蒸散发能力折算系数(KC):KC 作为影响产流量计算最为重要和敏感的参数,受气象因素、土壤特性和植被状况等影响,主要用来控制水量的平衡,反映流域蒸散发能力与实测水面蒸发值之间的关系,即平均高程与蒸发站高程之间以及地面蒸散发与蒸发皿蒸散发之间的差别,一般情况下 $KC < 1$ 。

自由水蓄水容量(SM):反映表层土壤的蓄水能力,土层较薄时 SM 值较小,土深林茂的情况下 SM 值较大.SM 决定了地面径流和地下径流的比重,水源划分不但取决于表土的蓄水能力,而且还与蓄水的层次深浅有关,因此 SM 是一个十分重要的敏感性参数。

自由水蓄水库对地下水和壤中流的日出流系数(KG 和 KI):KG 和 KI 分别表示深层和表层土壤的渗透性,KG + KI 表示流域出流的快慢,消退系数 $1 - (KG + KI)$ 决定了直接径流的退水速度。

壤中流消退系数(CI):CI 值越大则壤中流越丰富,通常依据地面径流终止点和壤中流终止点之间的退水段流量过程来分析确定 CI 值,但确定这两个拐点的难度较高,且这样得出的流量还会包括地下径流的成分,不确定性较大。

地下水消退系数(CG):依据枯季地下径流的退水规律来推算,该值在不同地区不同流域的差别也较大。

地面径流消退系数(CS):依据洪峰流量和地面径流终止点之间的流量过程来分析确定,但这样得出的流量往往因包含壤中流成分而不够准确,也具有一定的不确定性。

(2) 目标函数。在参数自动率定过程中用 Nash 效率系数 E_{ns} 和相对误差 RE 作为目标函数来反映模

拟流量与实测流量的吻合程度,如果 Nash 效率系数 E_{ns} 越接近 1 同时相对误差 RE 越接近 0,则说明模拟效果越好。目标函数的计算公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs})^2} \quad (1)$$

$$RE = \frac{\left| \sum_{i=1}^N Q_i^{obs} - \sum_{i=1}^N Q_i^{sim} \right|}{\sum_{i=1}^N Q_i^{obs}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_i^{obs} 为实测径流量, m^3/s ; Q_i^{sim} 为模拟径流量, m^3/s ; Q_{avg}^{obs} 为实测平均流量, m^3/s , N 为径流序列长度, d; i 为序列号。

3 结果与讨论

3.1 场次降雨径流关系

降雨为径流的主要来源,一场降雨对径流的影响可能延续时间较长。现以 1962 年 6 月至 1966 年 12 月为统计时段,东源流域选定 12 场暴雨洪水、西源流域选定 10 场暴雨洪水、全流域选定 16 场暴雨洪水在场次尺度上对降雨径流的关系进行分析。场次尺度上降雨量和径流深的散点关系和相关系数如图 2 所示,将所选的 3 个流域相同场次降雨的径流系数整理成表 1,同时在每个流域各选取典型的场次绘制暴雨洪水的降雨径流过程图,如图 3 所示。

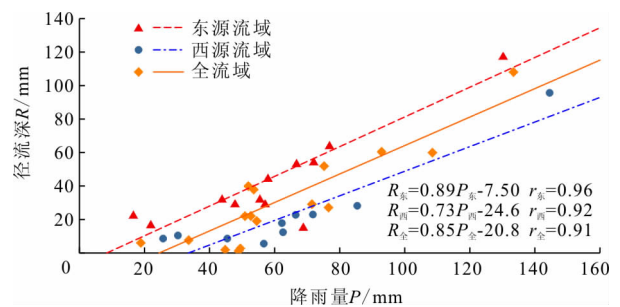


图 2 各流域场次尺度降雨量和径流深散点关系图

表 1 各流域相同场次降雨径流系数

场次编号	东源	西源	全流域
19630529	0.51	0.29	0.35
19640726	0.75	0.32	0.41
19640405	0.90	0.66	0.81
19650803	0.57	0.19	0.42

从图 2、3 和表 1 中可以看出:(1)对于子流域和全流域,场次尺度上降雨量和径流深的散点都呈

现出较好的正相关关系,相关系数均达到了 0.9;在场次降雨编号相同的情况下,径流系数从大到小依次为东源流域、全流域和西源流域,这与各流域的降雨情况、下垫面条件和植被覆盖等因素有关。(2)各流域所选取场次洪水的历时虽长短不一,但大部分均在 24 h 左右,因此在场次尺度上每个流域各选取 1 场历时约为 24 h 的暴雨洪水过程绘制降雨径流过程图(图 3),从图 3 中可以看出,东源流域和全流域的洪水峰现时间滞后雨峰约 3 h,而西源流域的洪水峰现滞时约为 4 h,主要是因为相较于东源流域的荒草地,西源流域以林场和旱田为主,植被生长茂盛,截留作用更加显著,从而洪水的峰现滞时较长。(3)表 1 中,3 个流域 19640405 场降雨的径流系数明显大于其他场次,经分析是因为试验流域在 1964 年 4 月 5 日经历了大暴雨,各流域日降雨量均超过 118.0 mm,西源流域更是高达 131.4 mm,前期的降

雨使土壤包气带处于湿润甚至饱和状态,在经历高强度降雨后,径流对降雨的敏感性会显著增加,因此径流系数普遍增大;西源流域 19650803 场降雨的径流系数相较于同一场次的其他两个流域明显偏小,经分析,东源流域、西源流域和全流域在该场次的降雨总量分别为 55.5、45.5 和 52.7 mm,降雨总量相差不大,西源流域相对较少的同时,又逢干旱年,西源流域的林场和旱田主要依赖人工灌溉,从而在该场次降雨中西源流域的径流系数明显小于其他两个流域。

3.2 不同尺度降雨径流关系

为分析城西试验流域在不同时间和空间尺度上降雨径流的相关关系,将东源流域、西源流域和全流域逐日、逐月的降雨量和径流深数据绘制成散点图,如图 4 所示,因数据系列长度限制,在年尺度上仅对各流域的年径流系数进行整理,如表 2 所示。

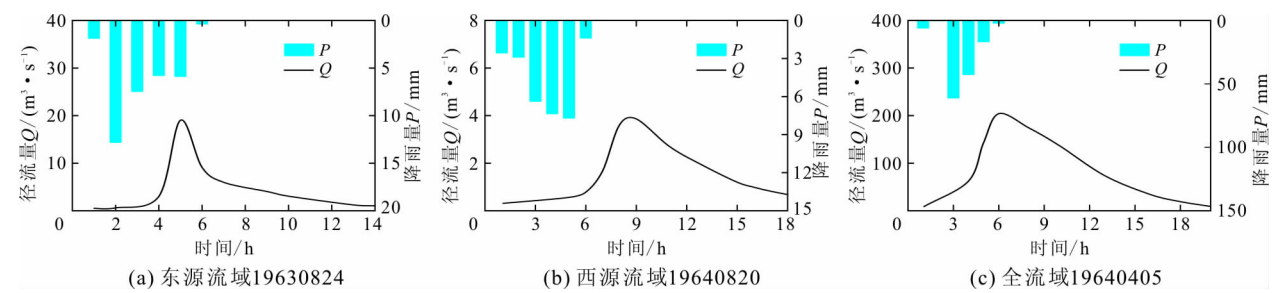


图 3 各流域典型场次暴雨洪水的降雨径流过程

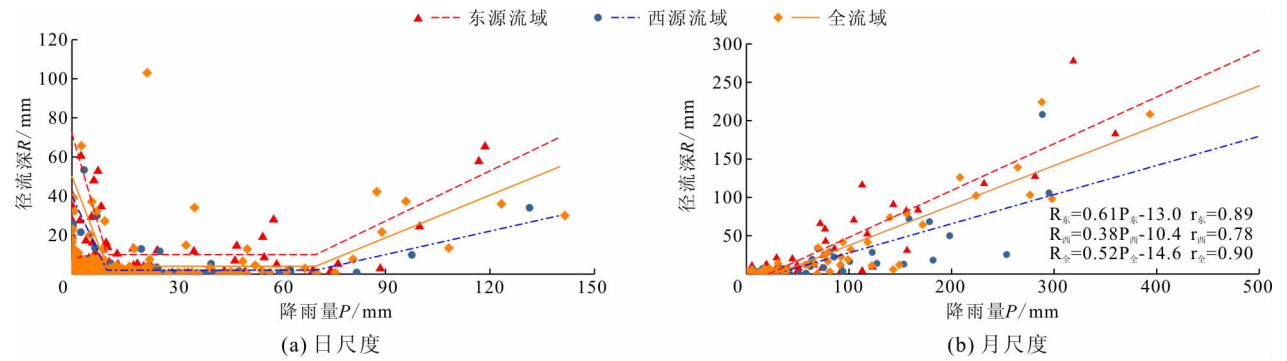


图 4 各流域日、月尺度降雨量与径流深散点关系图

表 2 各流域年径流系数

年份	东源	西源	全流域
1963	0.428	0.264	0.350
1964	0.486	0.349	0.379
1965	0.419	0.150	0.280
1966	0.456	0.118	0.241

从图 4(a)中可以看出:无论是子流域还是全流域,日尺度范围降雨量和径流深的散点都较为混乱,

没有明显的规律,大致以 10 和 70 mm 降雨为阈值呈 U 型分布。当降雨量小于 70 mm 时,各流域的降雨径流关系受前期退水过程的影响显著,降雨量和径流深的散点关系散乱。经分析,日尺度上的径流对于降雨存在滞后性,即前 1 d 的降雨量会对当天的径流深产生影响,若当天的降雨量较小,则这种影响更加显著,如东源 1963 年 7 月 26 日的降雨量只有 0.3 mm,但径流深却达到了 39.6 mm,这是因为 7 月 25 日的降雨量为 76.4 mm,前 1 d 降雨形成的径

流一直延续到了当天,因此在降雨量为 0 ~ 10 mm 的区域内会出现当天的径流深远大于降雨量的情形;径流深在降雨量为 10 ~ 70 mm 的区间随着降雨量的增大基本保持不变,主要是因为当径流受前期退水过程影响较小且日降雨量较少的时候,当天所降的雨量大部分会先被土壤包气带所吸收,然后再产生径流,因此径流对降雨的敏感性较低,径流深不会随着降雨量的增大而有明显的变化;当降雨量大于 70 mm 时,降雨量和径流深的散点关系呈现出明显的正相关性,分析认为当降雨量较大时,土壤包气带逐渐趋于饱和,所降的雨量基本都用来形成径流,因此各流域降雨径流的正相关性均较高。可以概括为降雨量越大,降雨径流的正相关性越好。

从图 4(b)中可以看出:相较于日尺度,月尺度上降雨径流的正相关性显著上升,各流域的相关系数均达到了 0.78,说明月尺度上降雨量和径流深散点的相关关系普遍较好。此外,从图中还可以看出,东源流域的点集位置高于全流域也高于西源流域,即东源流域径流深对降雨量的敏感性最高,全流域次之,西源流域最低。无论是全流域还是子流域,图 3(b)中均出现了降雨量与径流深的比值大于 1 的情形,经分析,由于一场降雨可能会一直延续到下一个月,尤其是在月末的时候,且月尺度在不划分径流成分的情况下,上个月的降雨会对当月的径流产生影响,如东源流域 1964 年 11 月份两者的比值为 1.91(大于 1),虽然东源该月的降雨量只有 5.5 mm,但 10 月份的月降雨量为 156.6 mm,且降雨都集中在后半个月,10 月份的降雨和径流一直延续到了下一个月,再加上 11 月份的降雨量本身很小,所以出现了径流深大于降雨量的特殊情形,相较而言,场次降雨受前期退水过程的影响很小,不会出现两者比值大于 1 的情况。

由于径流过程在场次尺度、日尺度和月尺度上对降雨过程均会出现不同程度的滞后,因此在年尺度上进一步分析降雨量和径流深的相关关系,从表 2 中可以看出:年径流系数从大到小依次为东源流域、全流域和西源流域,经分析,西源流域上游设有经营小规模竹、木采伐的林场以及部分旱田,而东源流域主要以荒草地为主,所以东源流域植被截留蒸腾、土壤蓄水保水作用没有西源流域显著,且荒草地自身对于雨水的需求量也较少,不需要额外的人工灌溉,因此东源流域的年径流系数最大,下垫面较为综合的全流域次之,西源流域最小,这与前面场次尺度的径流系数大小以及月尺度上径流深对降雨量敏

感性的结论均一致。此外,西源流域 1965 年和 1966 年的年径流系数相较于该流域其他的年份明显偏小,经分析,是因为这两年为该试验流域的干旱年份,在年降雨量本身较小的前提下,为满足西源流域植被作物的需水量,取水灌溉等人类活动频繁,从而导致径流系数减小。

3.3 水文过程模拟

基于新安江模型的研究,在不同时间尺度(日、月)和空间尺度(子流域、全流域)上对城西试验流域进行参数率定和径流模拟。其中,东源流域面积 8.6 km²,所选率定期为 1963.05.01 – 1965.12.31,验证期为 1966.01.01 – 1966.12.31;西源流域面积 17.5 km²,所选率定期为 1963.05.10 – 1965.12.31,验证期为 1966.01.01 – 1966.12.31;全流域面积 82.1 km²,所选率定期为 1962.06.01 – 1965.06.11,验证期为 1965.6.12 – 1966.6.11。各流域参数率定的结果如表 3 所示。

表 3 城西试验流域新安江模型参数率定结果

参数	东源流域	西源流域	全流域
<i>KC</i>	0.568	0.643	0.556
<i>UM</i>	35	40	38
<i>LM</i>	60	105	110
<i>C</i>	0.213	0.11	0.115
<i>WM</i>	128	200	195
<i>B</i>	0.371	0.368	0.399
<i>IM</i>	0.01	0.016	0.019
<i>SM</i>	45	85	58
<i>EX</i>	1.065	1.308	1.345
<i>KG</i>	0.21	0.20	0.55
<i>KI</i>	0.49	0.17	0.15
<i>CI</i>	0.252	0.368	0.432
<i>CG</i>	0.999	0.999	0.999
<i>CS</i>	0.268	0.01	0.102
<i>Lr</i>	0	0	0
<i>CR</i>	0.198	0.05	0.058

从表 3 可以看出,不同面积级和下垫面条件下新安江模型主要敏感参数对城西试验流域径流模拟的影响:西源流域的 *KC* 值明显大于其他两个流域,即西源流域的实际蒸散发与蒸散发能力最为接近,同时西源流域的 *SM* 值也是 3 个流域里最大的,即地下径流所占比重最大,经分析主要是因为西源流域植被茂盛,蒸发现象显著,且下垫面以林场和旱田

为主,土壤蓄水保水能力强,从而地下径流所占比重最大; $KG + KI$ 值除西源流域为 0.37 外,其他两个流域均为 0.70,即东源流域和全流域退水历时为 3 d,西源流域退水历时相对较长达 6 d,表明西源流域受深层壤中流的作用较大;各流域的壤中流消退系数 CI 值分别为 0.252、0.368 和 0.432,表明壤土中流随着试验完成面积的增大而更加丰富,但无法确定是否受到地下径流的影响,同时地面径流消退系数 CS 也具有不确定性,均需通过模型进一步验证;各流域的地下水消退系数 CG 值均达到了 0.999,即 3 个流域地下径流的消退历时一致,为 10 d 左右。
新安江模型在不同时间和空间尺度上的模拟结

果见表 4,同时绘制了该试验流域不同流域面积下日径流模拟和月径流模拟的过程线,如图 5 所示。

表 4 城西试验流域不同尺度径流过程模拟精度

流域	尺度	率定期		验证期	
		E_{ns}	$RE / \%$	E_{ns}	$RE / \%$
东源	日	0.67	0.02	0.60	0.17
	月	0.90	0.90	0.80	17.59
西源	日	0.60	16.38	0.11	166.40
	月	0.76	21.50	0.58	169.23
全流域	日	0.65	4.78	0.32	52.57
	月	0.84	1.27	0.86	14.22

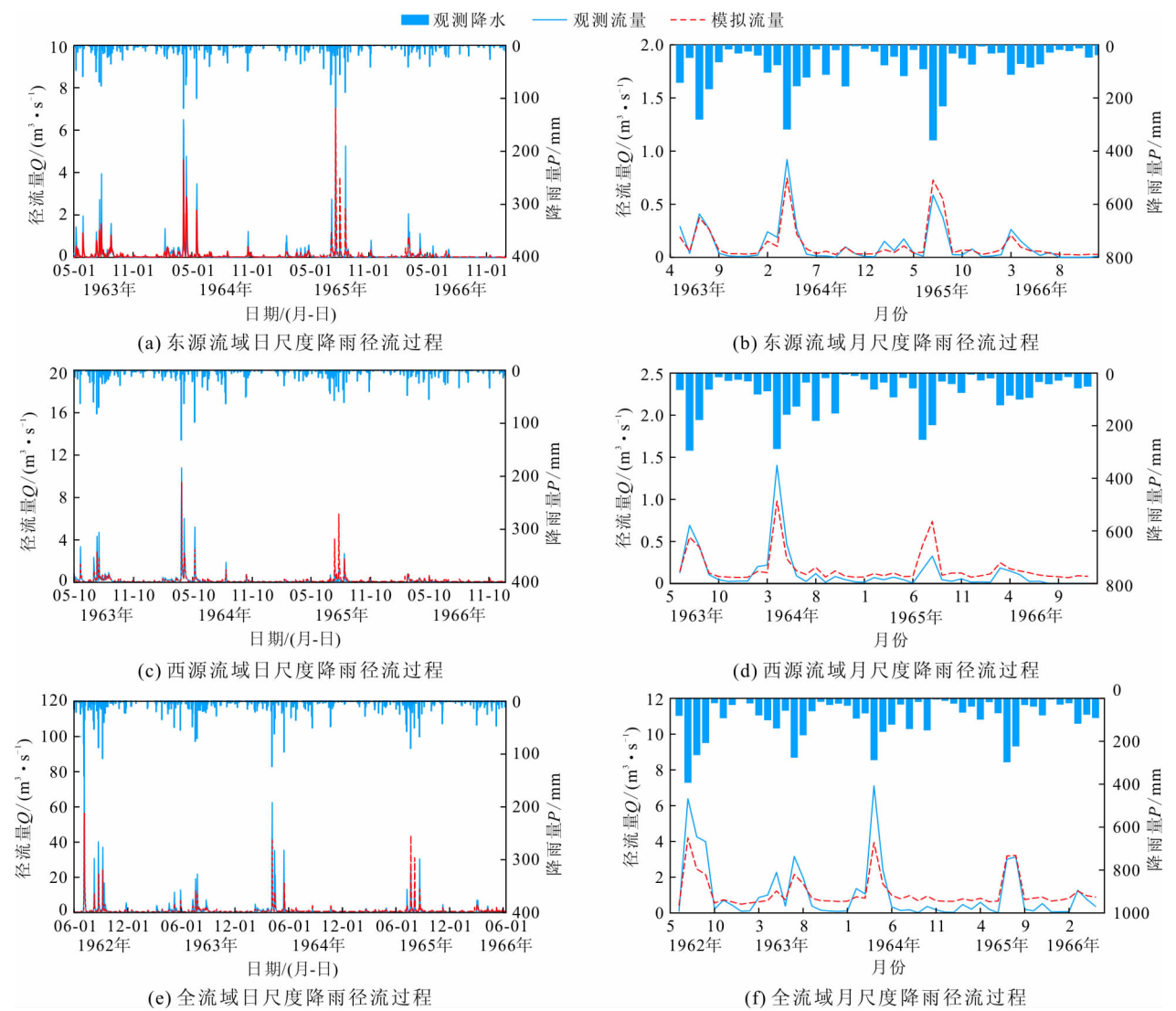


图 5 城西试验流域日、月径流模拟过程

从表 4 和图 5 中可以看出:(1)新安江模型总体可以较好地模拟出该试验流域不同尺度的水文过程,对率定期日尺度和月尺度径流过程模拟的效率

系数 E_{ns} 均超过 0.6;相对而言,模型对月尺度的水文模拟效果优于日尺度的水文模拟效果。(2)模型对处于天然状态的东源流域模拟效果较好,而对具

有一定人类活动影响的西源流域和整个流域模拟效果相对较差,特别是对枯季流量的模拟明显偏高;充分考虑人类活动对流域水文过程的影响机制是流域水文模型的发展方向。(3)限于资料,本研究仅选用 1966 年作为验证期,相对而言,尽管模型对验证期月尺度水文过程模拟较好,但对日尺度的模拟效果欠佳,尤其是对人类活动影响较为强烈的西源流域模拟误差较大。(4)新安江模型对各流域汛期洪峰的模拟大多偏小,而对非汛期基流的模拟普遍偏大,分析认为城西试验流域位于我国东部季风区,汛期降雨多而集中,并不是严格意义上的蓄满产流,而是蓄满产流和超渗产流的综合,利用新安江模型基于蓄满产流机制模拟水文过程会导致洪峰值偏小,同时,模型为满足量平衡关系,会造成基流模拟值偏大。

4 结 论

(1)东部低山丘陵区场次降雨径流具有较好的线性关系,二者的相关系数超过 0.9;月尺度降雨径流相关性次之,相关系数在 0.78 以上;日尺度降雨径流关系散乱,以 10 mm 和 70 mm 降雨为阈值呈 U 型分布。

(2)新安江模型能够较好地模拟出东部低山丘陵区不同尺度的水文过程,模拟与实测的丰枯流量较为匹配,月尺度水文过程的模拟效果优于日尺度,对天然流域的模拟效果优于人类活动扰动的流域。

(3)我国东部地区经济高度发达,人类活动较为强烈,大规模的人类活动复杂了流域的水文情势,充分考虑人类活动对水文过程的影响机制是未来流域水文模拟技术完善和发展的重要方向。

参考文献:

- [1] THOMPSON J R. Modelling the impacts of climate change on upland catchments in southwest Scotland using MIKE SHE and the UKCP09 probabilistic projections[J]. *Hydrology Research*, 2012, 43(4): 507–530.
- [2] XU Changchun, CHEN Yaning, CHEN Yapeng, et al. Responses of surface runoff to climate change and human activities in the arid region of central Asia: A Case Study in the Tarim River Basin, China[J]. *Environmental Management*, 2013, 51(4): 926–938.
- [3] 水利部水文司. 中国水文志[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997:278–281.
- [4] 顾慰祖,陆家驹,唐海行,等. 水文实验求是传统水文概念——纪念中国水文流域研究 50 年、滁州水文实验 20 年[J]. *水科学进展*, 2003, 14(3): 368–378.
- [5] 郭爱军,畅建霞,王义民,等. 近 50 年泾河流域降雨—径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 165–171.
- [6] 刘悦,鞠琴,舒心怡,等. 裸地土壤蒸发与不同驱动要素之间的响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(3): 50–54.
- [7] 郝振纯,欧阳灵犀,鞠琴,等. 五道沟地区实际蒸发变化趋势及影响因素分析[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(8): 18–21.
- [8] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [9] 朱求安,张万昌. 新安江模型在汉江江口流域的应用及适应性分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2004, 15(3): 19–23.
- [10] 罗志勇,杨炳良,管晓祥,等. 不同水文模型在金溪流域的模拟与适应性研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(3): 6–12.
- [11] RAHMAN M M, LU M. Model Spin-up behavior for wet and dry basins: A Case Study Using the Xinanjiang Model[J]. *Water*, 2015, 7(8): 4256–4273.
- [12] 谷一,王国庆,郝振纯,等. 基于新安江模型的曲江流域水文模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(2): 50–55.
- [13] 张兰影,庞博,徐宗学,等. VIC 模型与新安江模型径流模拟对比研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(Z1): 139–144.
- [14] 黄国如,陈永勤. 基于新安江水文模型的东江流域枯水径流模拟[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(11): 93–98.
- [15] 付丛生,陈建耀,曾松青,等. 国内外实验小流域水科学研究综述[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(3): 259–267.
- [16] 王建群,王洋,郭昆,等. 滁州花山水文实验流域径流与氮素耦合模拟研究[J]. *水文*, 2015, 35(1): 40–44+81.
- [17] 何进知,李舒宝,张永江,等. 森林植被对流域产汇流机制的影响效应分析[J]. *水文*, 2000, 20(2): 11–13.
- [18] 王振龙,赵晖. 淮河流域水文实验现状与新时期水资源研究重点[J]. *地下水*, 2009, 31(6): 65–67.
- [19] 李致家,孔祥光. 对新安江模型的改进[J]. *水文*, 1998, 18(4): 19–23.
- [20] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.