

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.002

GR 模型与新安江模型及两参数月水量平衡模型 在赣江流域的降雨径流模拟比较

邓鹏鑫,胡庆芳,王银堂,崔婷婷

(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)

摘要: 针对赣江全流域及 18 个子流域,在日和月时间尺度上分别进行 GR 模型与三水源新安江模型、两参数月水量平衡模型的比较。结果表明:在所选择的研究流域,GR 模型在率定期和检验期的确定性系数达到 0.85 以上,径流总量相对误差在±10% 以内;GR 日模型的精度略高于新安江模型,具有更强的稳定性,且结构简易,参数不确定性较低;GR 月模型的精度及模型复杂性与两参数月水量平衡模型相当。

关键词: GR 模型;新安江模型;两参数月水量平衡模型;赣江流域

中图分类号: P33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)05-0382-06

Comparison of GR model, Xin' anjiang model, and WBM-DP model in rainfall-runoff simulation in Gangjiang River Basin

DENG Pengxin, HU Qingfang, WANG Yintang, CUI Tingting

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: A comparative study was conducted on the Mode'le du ge'nie rural (GR) model, the Xin' anjiang (XAJ) model, and a water balance model with double parameters (WBM-DP) at daily and monthly time-scales in the Ganjiang River Basin and 18 sub-catchments. The results show that, in the study areas, the coefficient of determination of the GR model exceeded 0.85 and the relative error of the total runoff volume was within ±10% during the calibration and validation periods. At the daily time-scale, the GR model had slightly higher accuracy than the XAJ model, and it had greater stability, a simpler structure, and less uncertainty with regard to parameters. At the monthly time-scale, the accuracy and complexity of the GR model were consistent with those of the WBM-DP model.

Key words: GR model; Xin' anjiang model; water balance model with double parameters; Ganjiang River Basin

GR 模型(mode'le du ge'nie rural)是由法国学者自 20 世纪 70 年代以来创建的概念性水文模型,目前仍处于发展和改进中。与同类模型相比,该模型在原理上具有一定特色,且结构简易。同时,GR 模型还是一个适用于不同时间尺度的系列模型,包括日模型(GR4J 模型)^[1]、月模型(GR2M 模型)^[2]和年模型(GR1A 模型)^[3]。GR 模型的适用性已在法国、科特迪瓦、伊朗、澳大利亚、美国等不同气候条件的流域下得到广泛验证^[1-6]。

然而,目前 GR 模型在中国相关流域的研究,特别是与同类模型的比较研究还较少见。开展该模型与其他模型的对比分析,有助于丰富我国流域水文模拟与预报的技术方法。本文的目的是以赣江全流域及 18 个不同集水面积的子流域为研究对象,在日和月时间尺度上分别针对 GR 模型与三水源新安江模型(XAJ 模型)^[7-8]、两参数月水量平衡模型(WBM-DP 模型)^[9]进行降雨径流模拟比较,以阐明 GR 模型在水文模拟中

收稿日期: 2013-08-21
基金项目: 国家自然科学基金(51109136);水利部公益性行业科研专项(201001002);水利部 948 项目(201302)
作者简介: 邓鹏鑫(1988—),男,福建建瓯人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: pxdeng@nhri.cn
通信作者: 胡庆芳,工程师。E-mail: hqf_work@163.com

的适用性和优点。

1 GR 模型的基本原理

1.1 GR4J 模型

GR4J 模型是 GR 模型的日模型。该模型基于“产流水箱”和“汇流水箱”进行产汇流计算,基本结构如图 1 所示。

在产流演算阶段,GR4J 模型首先根据流域降水量和蒸发能力(分别以 P 、 E 表示),确定有效降水量 P_n 和剩余蒸发能力 E_n 。然后,根据 P_n 、 E_n 、产流水箱时段水量 S 以及产流水箱蓄水容量 x_1 计算补充产流水箱的降水量 P_s 、直接产流的降水量(P_n-P_s)、产流水箱蒸散发 E_s 和产流水箱出流量 P_{erc} 。流域总产流量 P_r 为(P_n-P_s)与 P_{erc} 之和。

GR4J 模型采用时段单位线进行汇流演算。模型将总产流量分为 2 部分,其中的 90% 采用单位线 1(UH1)演算,10% 用于单位线 2(UH2)演算。前者需经过汇流水箱的再次调节,后者则直接汇集到流域出口断面。为计算时段单位线,引入一个时间参数 x_4 。UH1、UH2 的演算时间分别为 x_4 和 $2x_4$ (x_4 一般大于 0.5 d)。

UH1 演算流量为 Q_9 , UH2 演算流量为 Q_1 。 Q_9 进入汇流水箱,补充汇流水箱时段水量 R ,并产生出流量 Q_r 。同时,在该环节还考虑了河流与地下水之间的水量交换 F :

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{\frac{7}{2}}$$

(1)

式中: x_2 ——地下水交换系数, x_2 为正则表示地下水补给河川径流,反之表示河川径流补给地下水; x_3 ——汇流水箱蓄水容量。

流域出口断面的总流量 Q 为直接汇水流量 Q_d 与汇流水箱出流量 Q_r 两者之和。

根据以上叙述,GR4J 模型共有 4 个参数,分别是 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。Perrin 等^[3]基于大量分析,总结出 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 的中值分别为 350 mm、0 mm、90 mm、1.7 d,80% 概率置信区间分别为 100 ~ 1 200 mm、-5 ~ 3 mm、20 ~ 300 mm、1.1 ~ 2.9 d。

1.2 GR2M 模型

GR2M 模型是 GR 模型的月模型,其结构与 GR4J 模型相似,但与 GR4J 模型相比有较大程度的简化(具体公式见文献[2])。GR2M 模型结构如图 2 所示(P_1 、 P_2 、 P_3 分别表示降水量、直接产流量及流域总产流量)。

在产流演算阶段,与 GR4J 模型相比,GR2M 模型省略了有效降水量和剩余蒸发能力的计算,直接计算补充产流水箱的水量、补充汇流水箱的水量以及产流水箱蒸发量。

因 GR2M 模型的计算步长为月,故在汇流环节省略了单位线汇流计算,仅进行汇流水箱调节计算。GR2M 模型在汇流计算时也考虑地下水的交换,交换量为

$$F = R(x_2 - 1)$$

(2)

模型假设汇流水箱深度为 60 mm。月流量计算公式如下所示:

$$Q = \frac{R^2}{R + 60}$$

(3)

据上述分析,GR2M 模型有 2 个参数,分别为 x_1 、 x_2 。

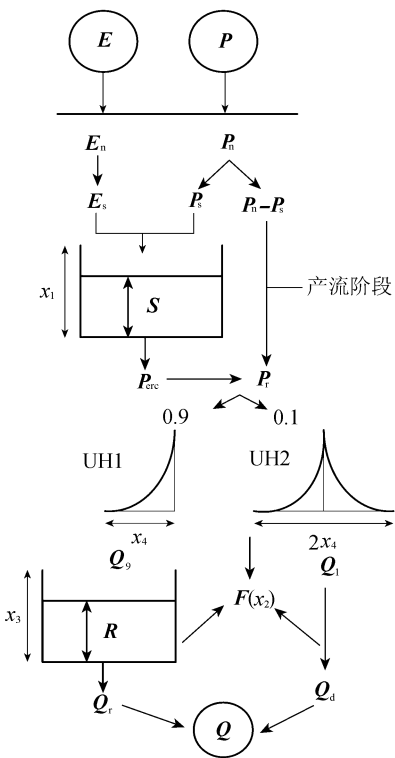


图 1 GR4J 模型结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of structure of GR4J model

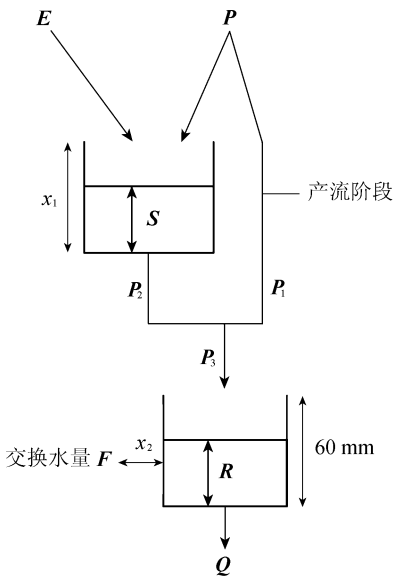


图 2 GR2M 模型结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of structure of GR2M model

1.3 GR1A 模型

GR1A 模型是 GR 模型的年模型,该模型仅含一个方程^[1]:

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{xE_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

(4)

式中: Q_k ——第 k 年年径流量模拟值; P_k 、 P_{k-1} ——第 k 年和第 $k-1$ 年的年降水量; E_k ——第 k 年蒸发能力; x ——待定系数,是模型唯一需要率定的参数。

GR1A 模型通过 P_{k-1} 间接反映流域初始蓄水量对产流的影响。对于参数 x 而言,其 90% 的概率置信区间为 $[0.15, 0.35]$ ^[1]。

GR4J 模型、GR2M 模型和 GR1A 模型中,GR4J 模型在结构和原理上比其他模型复杂,其中 GR4J 模型和 GR2M 模型以产流水箱和汇流水箱划分产流和汇流阶段,而 GR1A 模型无产汇流阶段划分,仅一个经验公式构建模型。据 Mouelhi 等^[1-2]、Perrin 等^[3] 研究,GR 模型的应用范围广泛,可适用于干旱、半干旱及湿润等各类区域,且低速水流下精度较高。表 1 给出了 3 种模型比较情况。

表 1 GR 模型系列的比较情况
Table 1 Comparison of GR models

模型	原理思路	主要特点	适用时间尺度
GR4J	采用产流水箱计算产流,划分不同径流成分后,运用单位线和汇流水箱确定出口断面流量	考虑水量交换,产汇流过程较完整,但计算过程相对复杂	日尺度
GR2M	采用产流水箱计算产流,汇流计算时不划分径流成分,直接由产流水箱确定出总流量	结构相对简单,考虑了水量交换,但汇流计算的完整性不如 GR4J 模型	月尺度
GR1A	结合前期和当前降雨、蒸发构建经验方程,建立模型	结构简单,需率定参数仅 1 个,但产汇流过程描述不明确	年尺度

2 研究区域与资料

2.1 研究区域

赣江流域是长江中游鄱阳湖水系最大的子流域。该流域位于东经 113°30′~116°40′、北纬 24°29′~29°11′,外洲站以上集水面积为 83 374 km²,约占江西省总面积的 50%。赣江流域地势南高北低,三面环山、地形复杂;气候湿润,多年平均降水量约为 1580 mm。5—9 月降水量一般占全年降水量的 50% 左右^[10]。

图 3 给出了赣江流域 19 个水文站的分布,其对应的集水区域为本文开展 GR 模型与其他水文模型比较研究的区域。其中,赣江流域干流上有 7 个站(包括上游的汾坑、峡山,中下游的栋背、吉安、峡江、樟树和外洲),各支流有 12 个水文控制站,见图 3(图中数字为水文站编号)。各水文站集水面积介于 659 ~ 83 374 km²。

2.2 研究资料

共搜集了 2003—2011 年赣江流域及其邻近区域的流量、降水和常规气象资料。其中 19 个水文站的流量数据来自于水利部水文局印制的水文年鉴^[11]。325 个雨量站的降水数据也主要来自于水文年鉴^[11],另有小部分来自于中国气象数据共享服务网^[12]。16 个气象站的常规气象资料(包括气温、风速、相对湿度、日照时数等)从中国气象数据共享服务网^[12] 下载。在此基础上采用 Penman-Montieth 公式计算单站参照腾发量 ET_0 ^[13]。

在赣江流域单站降水量、参照腾发量的基础上,采用 IDW(inverse distance weighting)^[14] 进行空间插值,获得 19 个流域相应的面平均值,可作为 GR 模型等水文模型的输入数据。

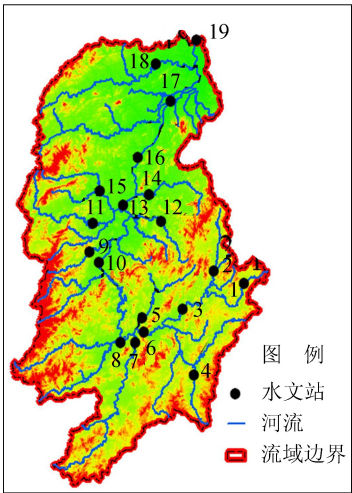


图 3 赣江流域水文站分布
Fig. 3 Distribution of hydrological stations in Ganjiang River Basin

3 结果分析与讨论

由于年资料序列长度的限制,本文暂不开展 GR1A 模型的研究。针对赣江全流域及 18 个子流域,在日时间尺度上分别建立了 GR4J 模型、XAJ 模型;在月时间尺度上,分别建立了 GR2M 模型、WBM-DP 模型。其中 WBM-DP 模型是一个建立在流域水热耦合平衡方程和蓄泄方程基础上的月水量平衡模型,文献[9]详细介绍了该模型的原理。

对于上述 4 个模型,本文以 2003—2008 年为率定期,2009—2011 年为检验期,采用 SCE-UA 算法^[15]自动优选模型参数。参数优选的目标函数是径流总量相对误差 δ 的绝对值与确定性系数 C 之差,即

$$\min f = |\delta| - C$$

(5)

其中

$$C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{st} - Q_{ot})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{ot} - \overline{Q}_{ot})^2} \qquad \delta = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{st}}{\sum_{i=1}^N Q_{ot}} - 1$$

式中: Q_{ot} 、 Q_{st} ——第 t 时段流量观测值和模型模拟值; $\overline{Q}_{ot}$ ——第 t 时段流量观测值的平均值; N ——时段数。表 2 给出了不同模型对应的精度指标。

表 2 4 个模型在赣江流域的流量模拟结果

Table 2 Discharge simulation results of four models for Ganjiang River Basin																		
编号	水文站	集水 面积/ km ²	XAJ 模型				GR4J 模型				WBM-DP 模型				GR2M 模型			
			率定期		检验期		率定期		检验期		率定期		检验期		率定期		检验期	
			<i>C</i>	$\delta/\%$	<i>C</i>	$\delta/\%$	<i>C</i>	$\delta/\%$	<i>C</i>	$\delta/\%$	<i>C</i>	$\delta/\%$	<i>C</i>	$\delta/\%$	<i>C</i>	$\delta/\%$	<i>C</i>	$\delta/\%$
1	石 城	656	0.81	0.00	0.82	-1.92	0.88	0.00	0.87	2.02	0.88	0.00	0.90	-1.06	0.98	2.66	0.90	1.97
2	宁 都	2372	0.94	-0.10	0.94	7.06	0.93	0.00	0.93	-6.31	0.96	0.01	0.96	-1.51	0.98	-2.33	0.94	-2.19
3	汾 坑	6366	0.89	0.70	0.91	-1.40	0.91	0.00	0.87	-1.57	0.96	0.00	0.93	0.81	0.92	0.86	0.90	4.42
4	麻 州	1758	0.89	-4.60	0.85	11.7	0.91	0.00	0.90	-11.7	0.91	0.05	0.89	-7.36	0.94	-4.80	0.88	-5.15
5	翰林桥	2689	0.91	0.00	0.85	9.29	0.88	0.00	0.85	-1.74	0.95	0.00	0.93	0.11	0.93	0.16	0.91	-0.27
6	居龙滩	7751	0.88	0.10	0.86	9.32	0.90	0.00	0.86	-8.81	0.93	0.05	0.90	-0.64	0.94	-1.00	0.89	0.40
7	峡 山	15975	0.89	0.00	0.92	6.80	0.86	0.00	0.86	-1.60	0.95	0.00	0.91	-0.55	0.97	-0.68	0.89	0.83
8	坝 上	7657	0.87	8.05	0.84	9.50	0.87	0.00	0.88	-7.24	0.87	0.00	0.84	2.86	0.85	1.84	0.85	4.35
9	栋 背	40231	0.86	0.00	0.87	8.00	0.86	0.00	0.86	-1.30	0.93	0.40	0.90	0.00	0.89	-0.40	0.92	0.13
10	林 坑	994	0.91	0.00	0.88	-8.68	0.90	0.00	0.91	-1.03	0.96	0.00	0.92	-1.58	0.89	-0.86	0.92	0.13
11	上沙兰	5257	0.87	0.10	0.90	-2.96	0.90	0.00	0.92	-1.11	0.95	0.00	0.94	1.40	0.93	0.02	0.94	1.66
12	白 沙	1573	0.91	0.00	0.91	12.1	0.90	0.00	0.91	-9.78	0.97	0.01	0.96	-4.95	0.97	-3.20	0.94	-4.14
13	吉 安	56223	0.90	0.00	0.92	4.73	0.91	0.00	0.92	-5.72	0.94	0.0	0.92	0.36	0.88	-0.65	0.88	2.94
14	新 田	4888	0.91	0.10	0.90	1.62	0.89	0.00	0.90	-2.22	0.88	-9.12	0.86	-14.5	0.95	-0.65	0.93	0.52
15	赛 塘	3004	0.88	-5.50	0.85	13.3	0.88	-0.33	0.90	-1.03	0.90	-0.20	0.92	-9.25	0.94	-6.10	0.91	-11.4
16	峡 江	62724	0.90	0.00	0.91	9.75	0.92	0.00	0.92	-2.80	0.94	0.00	0.93	-2.10	0.96	-1.38	0.91	-1.02
17	樟 树	71324	0.91	-0.10	0.91	3.89	0.94	0.00	0.94	-6.04	0.95	0.00	0.93	1.24	0.96	0.72	0.92	1.62
18	高 安	6215	0.86	0.00	0.88	6.92	0.89	0.00	0.91	-7.46	0.93	0.00	0.93	-3.44	0.96	-2.36	0.94	-5.18
19	外 洲	83774	0.90	-0.10	0.91	7.19	0.90	0.00	0.91	-5.20	0.94	0.00	0.88	6.91	0.91	2.03	0.91	6.35

3.1 日模型

由表 2 可知,GR4J 模型在检验期和率定期的 C 值均不低于 0.85, δ 均在 $\pm 12\%$ 以内。因此,总体上该模型对日径流的模拟效果比较理想,在各流域平均意义上与 XAJ 模型的精度相当。经统计,在率定期,GR4J 模型的 C 均值及 δ 均值分别为 0.90、-0.19%,而 XAJ 模型的 C 均值及 δ 均值分别为 0.89、-0.10%;在检验期,GR4J 模型的 C 均值及 δ 均值分别为 0.89、-4.24%,XAJ 模型的 C 均值及 δ 均值分别为 0.88、5.59%。图 4 给出樟树站 2009 年 5—7 月的 2 场洪水模拟过程线。

据表 2,GR4J 模型在率定期的 C 、 δ 分布区间小于 XAJ 模型,前者具有更强的稳定性。在率定期,除在宁都、翰林桥、林坑、白沙、峡山、新田外,GR4J 模型的 C 、 δ 均优于 XAJ 模型。在检验期,除宁都、汾坑、峡山、栋背外,GR4J 模型的 C 值均高于 XAJ 模型。除汾坑、高安、新田、吉安、樟树外,GR4J 模型在其他水文站对应的 δ 绝对值均低于 XAJ 模型。

同时,GR4J 模型的结构复杂性和参数不确定性明显低于 XAJ 模型。GR4J 模型仅有 4 个参数,而 XAJ

模型参数多达 15 个。参数过多的后果是易导致过参数现象,增加“异参同效”的可能性。如文献[16]指出 XAJ 模型的 15 个参数中,不敏感性参数有 5 个,分别是上层张力水容量、下层张力水容量、深层张力水容量、表层土自由水蓄水容量曲线的方次、地下水消退系数。而文献[17-18]发现,GR4J 模型的 4 个参数均是敏感参数。因此,GR4J 模型的参数和结构的不确定性低于 XAJ 模型。

在模型原理上,与 XAJ 模型等多个概念性模型相比,GR4J 模型具有一定特色。GR4J 模型考虑到汇流时地下水量交换问题(流域不是严格闭合的、与外界之间可能存在水量交换关系),引入一个参数作为地下水交换系数来控制水量交换,以降低流域不完全闭合对产汇流的影响。

3.2 月模型

由表 2 可知,除赛塘、坝上外,GR2M 模型的模拟结果均是确定性系数超过 0.88、径流总量相对误差在 $\pm 6\%$ 以内,该模型对赣江流域各站月径流的模拟效果较理想,精度指标在各流域平均意义上与 WBM-DP 模型相当。经统计,在率定期,GR2M 模型的 C 均值及 δ 均值分别为 0.94、-0.86%,而 WBM-DP 模型 C 均值及 δ 均值分别为 0.93、-0.46%;在检验期,GR2M 模型的 C 均值及 δ 均值分别为 0.91、-0.21%,WBM-DP 模型的 C 均值及 δ 均值分别为 0.91、-1.75%。

在率定期,GR2M 模型的 C 、 δ 分布区间较 WBM-DP 模型略大。GR2M 模型仅在新田站 δ 绝对值明显高于 WBM-DP 模型,但除林坑、上沙兰、汾坑、吉安以及外洲外,GR2M 模型在其他各站的 C 值均优于 WBM-DP 模型。而在检验期,GR2M 模型与 WBM-DP 模型的 C 、 δ 分布区间基本相当。GR2M 模型在新田站的精度明显高于 WBM-DP 模型,而在其他各站两者无明显差异。因此,总体而言,GR2M 模型对月径流量模拟精度的稳定性与 WBM-DP 模型相当。

GR2M 模型与 WBM-DP 模型均只含 2 个参数,模型结构比较简单。WBM-DP 模型综合流域水热耦合平衡方程和蓄泄方程模拟月径流量,物理机制相对完善。但 GR2M 模型也具有一定特色,其考虑了河流与地下水之间的水量交换。

4 结 语

GR 模型是一个在原理和方法上具有特色且结构简易、适用于不同时间尺度的概念性水文模型系列。本文针对赣江全流域及 18 个子流域,在日和月时间尺度上分别进行 GR 模型与 XAJ 模型、WBM-DP 模型的降雨径流模拟比较。结果表明:(a) 在日、月尺度上,GR 模型均具有较高的模拟精度。GR 的日模型(GR4J 模型)和月模型(GR2M 模型)在率定期和检验期的确定性系数基本达到 0.85 以上,径流总量相对误差在 $\pm 10\%$ 以内;(b) 在日时间尺度上,与 XAJ 模型相比,GR4J 模型的模拟精度具有更强的稳定性,且模型结构更简单,参数个数明显减少,模型不确定性较低;(c) 在月时间尺度上,GR2M 模型的模拟精度与 WBM-DP 模型基本相当,模型参数个数以及模型结构复杂性与 WBM-DP 模型也基本相当,在模型原理上两者各有特色。

总体而言,GR 模型在赣江流域日、月降雨径流模拟中具有较强的适用性和明显的优点。笔者建议将该模型在我国其他流域进行推广应用,以更加全面地考察该模型的性能,并丰富我国流域水文预报和模拟的技术方法。

参考文献:

[1] MOUELHI S, MICHEL C, PERRIN C, et al. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the manabe bucket model revisited [J]. Journal of Hydrology, 2006, 318(1): 283-296.

[2] MOUELHI S, MICHEL C, PERRIN C, et al. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model [J]. Journal of Hydrology, 2006, 318(1): 200-214.

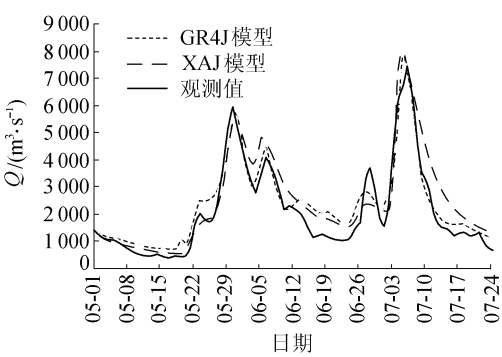


图4 2009年5—7月樟树站径流过程实测值与模拟值对比
Fig. 4 Comparison of observed and simulated runoff processes at Zhangshu Station from May to July, in 2009

- [3] PERRIN C, MICHEL C, ANDREASSIAN V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation [J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1): 275-289.
- [4] TRAORE V B, SAMBOU S, TAMBA S, et al. Calibrating the rainfall-runoff model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a tributary of the Gambia River[J]. American Journal of Environmental Protection, 2014, 3(1): 36-44. .
- [5] ZOLFAGHARI M, MAHAVI M, REZAEI A, et al. Evaluating GR2M model in some small watersheds of Iran (case study Gilan and Mazandaran Provinces) [J]. Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2013, 3(2): 463-472.
- [6] SERVAT E, DEZETTER A. Selection of calibration objective fonctions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area [J]. Hydrological Sciences Journal, 1991, 36(4): 307-330.
- [7] 包为民. 水文预报[M]. 4 版. 北京: 中国水利水电出版社,2009: 139-167.
- [8] 芮孝芳,凌哲,刘宁宁,等. 新安江模型的起源及对其进一步发展的建议[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4):1-5. (RUI Xiaofang, LING Zhe, LIU Ningning, et al. Origin of Xin'an jiang model and its further development [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources , 2012, 32 (4): 1-5. (in Chinese))
- [9] 胡庆芳. 基于多源信息的降水空间估计及其水文应用研究[D]. 北京: 清华大学,2013.
- [10] 叶许春, 刘健, 李相虎, 等. 气候和人类活动对赣江径流变化的作用分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 196-203. (YE Xuchun, LIU Jian, LI Xianghu, et al. Effects of climate variability and human activities on runoff variation of Ganjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2013,41(3): 196-203. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国水利部水文局. 长江流域水文资料第6 卷第17 册[M]. 北京: 中华人民共和国水利部水文局,2003-2012.
- [12] 中国气象局国家气象信息中心气象资料室. 中国地面气候资料日值数据集[EB/L]. [2012-05-12]. <http://cdc.cma.gov.cn/home.do>.
- [13] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Angstrom 公式参数对 ET_0 的影响及 FAO 建议值适用性评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 644-652. (HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. Effects of angstrom coefficients on ET_0 estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China[J]. Advances in Water Science, 2010,21(5): 644-652. (in Chinese))
- [14] ISAAKS E H, SRIYASTAYA R M. Applied geostatistics [M]. New York :Oxford University Press, 1989.
- [15] DUAN Q, SOROOSHIAN S, Gupta V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. Journal of Hydrology, 1994, 158(3): 265-284.
- [16] 黄国如, 解河海. 基于 GLUE 方法的流域水文模型的不确定性分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 25(3): 137-142. (HUANG Cuoru, XIE Hehai. Uncertainty analyses of watershed hydrological model based on GLUE method [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition,2007,25(3):137-142. (in Chinese))
- [17] TIAN Ye, XU Yuepin, ZHANG XuJie. Assessment of climate change impacts on river high flows through comparative use of GR4J, HBV and Xin'anjiang models[J]. Water Resources Management, 2013,27(8): 2871-2888.
- [18] PERRIN C, ANDREASSIAN V, SERNA C R, et al. Discrete parameterization of hydrological models: evaluating the use of parameter sets libraries over 900 catchments[J]. Water Resources Research,2008,44(8):1-15.