# GR4J 模型在赣江流域日径流模拟中的应用

邓鹏鑫,王银堂,胡庆芳,刘 勇

(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:GR4J 是一个简单实用的概念性水文模型,在模型原理和结构上具有鲜明特色,目前在国内应用 还较少。本文将该模型应用于贛江流域19个集水区域2003~2009年日径流模拟中。结果显示,在各集水 区域,GR4J 在检验期和率定期的确定性系数均达到0.85以上,径流总量相对误差在10%以内。因此, GR4J 模型在贛江流域的日径流模拟中具有较高精度,具有较好的推广应用前景。

关键词:GR4J;日径流模拟;赣江流域

中图分类号:P334.92 文献标识码:

文章编号:1000-0852(2014)02-0060-06

引言

水文模型是对自然界复杂水循环过程的近似描述,通常可分为集总式水文模型和分布式水文模型。 一般而言,分布式水文模型对水文过程的考虑比较详细、物理机制相对完备,但集总式水文模型具有结构 简单、对基础资料的要求相对较低等优点,且一些常 用的集总式水文模型对径流模拟的精度实际上不低 于分布式水文模型。新安江模型、水箱模型、HBV 模型 和斯坦福模型等集总式模型已广泛地应用于流域水 文过程模拟<sup>III</sup>。

GR4J (mode'le du Ge'nie Rural a' 4 parame'tres Journalier)是一个概念性降雨径流模型。该模型由法国 人提出,经过 Nascimento、Edijatno、Perrin、Nicolas Le Moine 等<sup>[2-5]</sup>人的完善和发展,已在法国、澳大利亚等 400 多个不同气候条件的区域得到验证,广泛应用于 洪水预报、水资源规划等方面<sup>[4-7]</sup>。GR4J 模型仅含有 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,但目前该模型在国内的研究及应用还比 较少见。因此,本文选取赣江流域 19 个不同大小和 位置的集水区域为研究对象,采用 GR4J 进行日降雨 径流模拟,以分析该模型应用于赣江流域水文模拟 的可行性,进一步丰富我国概念性流域水文模拟和 预报方法。

## 1 GR4J 模型原理

GR4J 模型采用两个非线性水库进行产汇流计算, 其中第1个水库称之为产流水库,第2个水库称为汇 流水库。图1给出了 GR4J 的主要计算流程<sup>[4]</sup>。根据该 图,模型的基本原理概述如下。

(1)产流阶段

产流计算首先根据流域降水、蒸发能力(分别以  $P_{x}E$ 表示),确定有效降水 $P_{n}$ 和剩余蒸发能力 $E_{n}$ 。若  $P>E,则P_{n}=P-E,E_{n}=0;反之,E_{n}=E-P,P_{n}=0$ 。然后,通过  $P_{n}$ 和 $E_{n}$ 计算补充产流水库的降水量 $P_{s}$ 和产流水库蒸 散发量 $E_{s}$ :

① 若 *P<sub>n</sub>*>0,*P<sub>n</sub>*中的一部分直接进入汇流水库,另 一部分将补充产流水库:

$$P_{s} = \frac{x_{1}(1 - (\frac{S}{x_{1}})^{2}) \tanh(\frac{P_{n}}{x_{1}})}{1 + \frac{S}{x_{1}} \tanh(\frac{P_{n}}{x_{1}})}$$
(1)

式中:*P*<sub>s</sub>为补充产流水库的降水量;*S*为产流水库蓄水量,*x*<sub>1</sub>为产流水库蓄水容量。

② 若 P<sub>n</sub>=0,则 E<sub>s</sub>>0,E<sub>s</sub> 由下式计算:

$$E_{s} = \frac{S(2 - \frac{S}{x_{1}}) \tanh(\frac{E_{n}}{x_{1}})}{1 + (1 - \frac{S}{x_{1}}) \tanh(\frac{E_{n}}{x_{1}})}$$
(2)

根据式(1)、式(2),针对特定的 $E_n$ 或 $P_n$ 与 $x_1$ 的比

收稿日期:2013-06-20

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(201301075);水利部 948 项目(编号 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方面的研究。E-mail: pxdeng@nhri.cn



图 1 GR4J 模型原理和流程 Fig.1 Flowchart of GR4J

值下,绘制出 $E_s P_s P_n S_x x_1$ 之间的函数关系,如图2 所示。



Fig.2 Function relationship between  $S/x_1$  versus  $Es/x_1$ , and  $S/x_1$  versus  $P_s/P_n$ 

在计算 $E_s$ 和 $P_s$ 的基础上,产流水库蓄水量S更新为:

$$S=S-E_s+P_s \tag{3}$$

从而产流水库的产流量 Perc 由式(4)计算得到:

$$Perc = S \{ 1 - [1 + (\frac{4S}{9x_1})^4]^{-1/4} \}$$
(4)

S=S-Perc (5)

则总的产流量 P, 为

$$P_r = Perc + P_n - P_s \tag{6}$$





## (2)汇流阶段

GR4J采用时段单位线进行汇流演算。鉴于不同径 流成分的汇流时间存在差异,因此模型将  $P_r$ 分为两部 分,90%采用单位线 UH1 演算,10%用于单位线 UH2 演 算。前者需要经过汇流水库的再次调节,后者直接汇集 到流域出口断面。为计算时段单位线,引入一个时间参 数 $x_{40}$ 单位线 UH1 演算时间是 $x_4$  天( $x_4$  一般大于 0.5),而 单位线 UH2 演算时间为  $2x_4$  天,两条单位线均由 S 曲 线(SH1、SH2)推算,计算方法如式(7)、(8)所示:

$$\begin{cases} t \le 0, SH1(t) = 0 \\ 0 < t < x_4, SH1(t) = (\frac{t}{x_4})^{5/2} \\ t \ge x_4, SH1(t) = 1 \\ UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \end{cases}$$
(7)  
$$\begin{cases} 0 < t < x_4, SH2(t) = \frac{1}{2} (\frac{t}{x_4})^{5/2} \\ x_4 < t < 2x_4, SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} (2 - \frac{t}{x_4})^{5/2} \\ t \ge 2x_4, SH2(t) = 1 \end{cases}$$
(8)

UH2(j)=SH2(j)-SH2(j-1)

式中:j 为整数,表示第j 天。由两条单位线(UH1、 UH2)演算得到的水量分别为:

$$Q_9 = UH1 \times 0.9 \times P_r \tag{9}$$

$$Q_1 = UH2 \times 0.1 \times P_r \tag{10}$$

式中:*Q*,指进入汇流水库的水量;*Q*,指直接汇集到流 域出口断面的水量。

值得指出的是 GR4J 考虑到了流域不闭合所导致 的地下水的交换问题,引入了时段水量交换量 *F*,计算 方法如式(11)所示:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_2}\right)^{7/2} \tag{11}$$

式中:R为汇流水库水量; $x_3$ 为汇流水库容量; $x_2$ 为地 下水交换系数。当 $x_2$ 为正时,表示地下水补给径流, $x_2$ 为负时,表示径流补给地下水,为0时,表示没有水量 交换。

对于汇流水库,汇入单位线 UH1 对应的水量以及 地下水库交换量后,相应的蓄水量为:

 $R = \max(0, Q_9 + F + R)$  (12) 则汇流水库的出流量  $Q_r$  为:

$$Q_{r}=R\left\{1-\left[1+\left(\frac{R}{x_{3}}\right)^{4}\right]^{-1/4}\right\}$$
(13)

式中,Q, 必定要小于 R, 两者之间的关系如图 3。出流后, 汇流水库蓄水量更新为:

$$R = R - Q_r \tag{14}$$

单位线 UH2 推算的水量与地下水交换量汇合后, 汇集到流域出口断面,出流量 Q<sub>a</sub>为:

$$Q_d = \max(0, Q_1 + F)$$
 (15)  
从而流域出口断面总流量  $Q$  为:

$$Q = Q_d + Q_r \tag{16}$$

据以上介绍,GR4J 模型包括  $x_1, x_2, x_3, x_4$  共 4 个参数。根据有关分析, $x_1, x_2, x_3, x_4$  均是模型的敏感性参数<sup>[8]</sup>。 据 Perrin 多年实测资料验证,GR4J 参数 80%的概率置 信区间如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 GR4J 参数的 80%置信区间

Table 1 The 80% confidence interval range for parameters of GR4J

	参数	含义	中间值	范围区间(达到80%置信区间)
	$x_1 / mm$	产流水库容量	350	100~1200
	$x_2 / \mathrm{mm}$	地下水交换系数	0	-5~3
	$x_3 / \text{mm}$	汇流水库容量	90	20~300
	$x_4$ / d	单位线汇流时间	1.7	1.1~2.9

同时,在进行产汇流计算时,还必须考虑土壤含水 量 *S* 和汇流水库水量 *R* 的初值对径流模拟精度的影 响。为避免初值选取不当,导致参数优化不合理,可将 *S*<sub>0</sub> /*x*<sub>1</sub> 和 *R*<sub>0</sub> /*x*<sub>3</sub> 与参数一并进行率定。也可选取 1~2 年 资料进行模型预热,以适当确定 *S*<sub>0</sub> 和 *R*<sub>0</sub>。

## 2 实例应用

### 2.1 研究区域

赣江位于东经 113°30'~116°40',北纬 24°29'~29° 11',是长江的主要支流之一。流域发源于赣闽交界的 石族蛛,干流自南向北纵贯江西全省,在永修县吴城镇 注入鄱阳湖。赣江干流长 766km,外洲站以上集水面积 为 83 374km<sup>2</sup>,约占江西全省面积的 50%。流域地势南 高北低,四面环山、地形复杂多变<sup>[9]</sup>。

赣江流域地处中亚热带季风气候区。该流域是中 国大陆降水最多的区域之一,多年平均降水量约为 1581mm<sup>[9]</sup>。降水季节性特征明显,4~6月梅雨季降水最 为集中;7~9月易产生台风型暴雨。受地形影响,降水 空间分布不均。

针对流域地表特征和降水时空分布不均的特点, 选取赣江流域的 19 个不同的集水区域为研究对象,开 展 GR4J 的应用。各研究区域集水面积介于 659km<sup>2</sup>~ 83 374km<sup>2</sup>,对应的控制站位置如图 4(a)(b)所示。其 中,赣江流域干流上有 7 个水文控制站,分别是上游的 汾坑、峡山和中下游的栋背、吉安、峡江、樟树和外洲; 各主要支流有 12 个水文站。

2.2 数据资料

本文采用 GR4J 进行水文模拟的数据资料及处理 方法如下:

(1)降水资料:由水文年鉴获取了 2003~2009 年 赣江流域内 320 个雨量站逐日降水数据资料。通过 采用距离平方倒数IDW (Inverse distance weighting)<sup>[10]</sup> 的方法进行空间插值,求得 19 个流域的逐日面平均降 水量。

(2)气象蒸发能力资料:由中国气象数据共享服务 网(网址:http://cdc.cma.gov.cn/home.do)获取了赣江流 域及周边地区 16 个气象站的常规地面气象数据。采用 Penman-Montieth<sup>[11-12]</sup>公式计算单站参照腾发量(Reference evapotranspiration, ET<sub>0</sub>)。同样 IDW 插值,得到各 子流域对应的逐日平均蒸发能力。

(3)流量资料:由水文年鉴获取了 19 个水文站点 2003~2009 年实测流量资料,并对资料的一致性、代表 性和有效性进行了检查和处理。

## 3 研究结果分析与讨论

根据相关数据资料,在19个集水区域建立GR4J 模型。其中,2003~2006年为模型率定期,2007~2009



#### 图 4 赣江流域雨量站、气象站及水文站分布

Fig.4 Distribution of rainfall stations, meteorology stations and hydrometry stations in the Ganjiang River basin

表 2	各集水区域	GR4J	模型参数优值	化结果及精度指标

	Table 2 The results of GR4.	optimized	parameters and	runoff	simulation	accurac
--	-----------------------------	-----------	----------------	--------	------------	---------

流域	控制	面积	率定期(20	03~2006年)	检验期(20	金期(2007~2009年) 参数率定值			状态变量初始值			
编号	站名	/ km <sup>2</sup>	$DC_1$	$RE_1$	$DC_2$	$RE_2$	$x_1 / mm$	$x_2 / \text{mm}$	<i>x</i> <sub>3</sub> / mm	<i>x</i> <sub>4</sub> / d	$S_0 / x_1$	$R_0 / x_3$
1	石城	659	0.89	4.6%	0.81	-8.3%	1 630.0	-4.7	58.0	1.6	0.76	0.36
2	宁都	2 374	0.94	1.3%	0.92	-2.0%	917.0	-3.9	85.6	2.2	0.72	0.61
3	麻州	1 769	0.92	1.4%	0.90	-2.0%	657.0	-2.8	101.3	2.0	0.84	0.52
4	翰林桥	2 666	0.89	1.3%	0.93	-1.8%	707.8	-6.0	95.4	2.2	0.80	0.60
5	居龙滩	7 737	0.90	-0.4%	0.88	0.5%	685.2	-6.0	97.7	2.8	0.82	0.59
6	坝上	7 661	0.72	2.1%	0.80	-2.9%	1 807.9	-6.0	62.1	2.5	0.68	0.61
7	林坑	991	0.91	0.9%	0.82	-1.6%	159.2	-5.9	125.8	2.0	0.96	0.48
8	上沙兰	5 289	0.88	0.4%	0.83	-0.7%	455.8	-6.0	99.6	2.4	0.85	0.57
9	赛塘	2 998	0.90	4.8%	0.86	-8.9%	322.8	-7.8	115.1	2.3	0.90	0.56
10	白沙	1 648	0.89	3.4%	0.89	-5.2%	486.2	-6.0	57.5	2.1	0.85	0.14
11	新田	3 548	0.92	3.8%	0.90	-4.8%	264.9	-7.0	107.7	2.3	0.90	0.60
12	高安	6 098	0.91	4.0%	0.89	-7.6%	627.5	-6.0	82.5	2.5	0.83	0.61
13	汾坑	6 360	0.92	1.0%	0.93	-1.6%	746.6	-5.0	88.6	2.5	0.85	0.60
14	峡山	15 913	0.94	0.0%	0.93	0.0%	545.0	-5.3	101.2	2.8	0.87	0.59
15	栋背	40 259	0.87	0.4%	0.87	-0.6%	510.6	-6.8	172.2	3.2	0.89	0.53
16	吉安	56 208	0.89	-0.4%	0.89	0.5%	391.3	-7.5	198.9	3.2	0.90	0.53
17	峡江	62 740	0.90	2.3%	0.89	-3.6%	364.8	-7.9	210.4	3.5	0.90	0.51
18	樟树	71 051	0.92	1.4%	0.89	-2.2%	340.1	-10.1	239.1	3.8	0.90	0.52
19	外洲	83 374	0.91	1.5%	0.90	-2.4%	310.3	-8.7	237.7	4.5	0.89	0.52

年为模型检验期。各流域模型参数采用采用 SCE-UA 自动优选,参数优化的目标函数是径流总量相对误差 (RE,relative error)绝对值与确定性系数(DC,deterministic coefficient)之差最小:

$$Minf = |RE| - DC \tag{17}$$

其中:

$$DC = 1 - \sum_{i=1}^{i=N} (Q_i^s - Q_i^o)^2 / \sum_{i=1}^{i=N} (Q_i^o - \overline{Q}_i^o)^2 \qquad (18)$$

$$RE=(\sum_{i=1}^{i=N} Q_i^s - \sum_{i=1}^{i=N} Q_i^o) / \sum_{i=1}^{i=N} Q_i^o \times 100\%$$
(19)

式中: $Q_t^{\circ}$ 为第 t 日径流量观测值; $Q_t^{\circ}$ 为日径流量模拟值;N为率定期或检验期的总天数。

各集水区域模型参数优化结果及精度指标如表 2 所示。其中 *DC*<sub>1</sub>、*DC*<sub>2</sub> 分别表示率定期、检验期的确定 性系数,*RE*<sub>1</sub>、*RE*<sub>2</sub> 分别表示模型率定期、检验期的径流 总量相对误差。

63



图 5 GR4J 模拟的宁都、峡山、樟树和外洲站日径流过程 Fig.5 The daily runoff processes simulated by GR4J for the stations of Ningdu, Xiashan, Zhangshu and Waizhou

由表 2 可知,除坝上站以外,各集水流域 GR4J 在 率定期内的确定性系数 *DC*<sub>1</sub> 均超过 0.87,*RE*<sub>1</sub> 均 在±5%以内。而在检验期,大部分流域的确定性系数 *DC*<sub>2</sub> 也都达到 0.85 以上,径流总量相对误差 *RE*<sub>2</sub> 基本 在±6%以内。其中,处于干流的峡江、樟树和栋背站, *DC*<sub>2</sub> 接近 0.89,支流的宁都、翰林桥等站,*DC*<sub>2</sub> 达到了 0.92。干流的汾坑、峡山、峡江、栋背、吉安、樟树和外洲 站,*RE*<sub>2</sub> 值在±5%左右,支流的石城、赛塘和高安站, *RE*<sub>2</sub> 略大,但也在可以接受的范围内。因此,GR4J 对赣 江流域日径流模拟精度较高,即使对于集水面积较小 的流域,也具有较好效果。

图 5 给出了宁都、峡山、樟树以及外洲站的日径流 模拟结果。由该图可知,GR4J 模拟的日径流过程与实 测径流过程具有很好的一致性,模型在枯水年、丰水年 都能够较好的再现日径流变化过程,同时,洪峰的量级 和出现时间基本一致,模拟效果令人满意。

表 3 给出了赣江流域各集水区域参数的变化范围 及平均值。赣江流域 19 个集水区域的参数值大部分处 于表 1 给定的 80%置信区间内。但坝上站的 *x*<sub>1</sub> 达到 1 807.9,不仅较其它区域偏大,而且明显超出了表 3 给 定的范围。其主要原因是坝上站上游建有上犹江水库 (建成于 1957 年,总库容 8.22×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,集水面积 2 750  $km^2$ )。由于该水库的存在,明显增加了水量调蓄空间, 使坝上站控制流域对应的  $x_1$  值偏大。表 3 中,各集水 区域地下水交换系数  $x_2$  均为负值,表明赣江流域的径 流与地下水之间存在水量交换。这说明,GR4J 模型引 入一个参数来计算地下水水量交换,以降低流域不完 全闭合对产汇流的影响是有必要的。汇流时间参数  $x_4$ 与流域的集水面积有关。从表 3 中可知,流域集水面积 的大小直接影响着径流汇流时间,随着集水面积的增 大, $x_4$  值也增大。其中,流域出口外洲站的  $x_4$  最大,达 到 4.5d,而面积最小的石城站的  $x_4$  最小,为 1.6d。

表 3 赣江流域 GR4J 模型参数范围

Table 3 Statistics of GR4J model parameter values for the Ganjiang River basin

参数	$x_1 / mm$	<i>x</i> <sub>2</sub> / mm	<i>x</i> <sub>3</sub> / mm	$x_1$ / d
平均	627.9	-6.3	123.0	2.7
最大	1807.9	-2.8	239.1	4.5
最小	159.2	-10.1	57.5	1.6

## 4 结论

本文以赣江流域内不同集水面积 19 个集水区域 为研究对象,采用 GR4J 模型进行了日径流模拟。结果 表明,GR4J 在各流域的检验期确定性系数达到 0.85 以上,径流总量相对误差控制在±10%以内。这表明采 用 GR4J 模型进行赣江流域的日径流模拟是适用的。 同时,本文还在各集水区域对应的模型参数进行了分 析,表明参数的分布具有一定的地区规律。

作为一种概念性水文模型,GR4J,结构简单,参数 少,且在模型原理和结构上具有特色,具有较好的推广 应用前景。因此,今后有必要在我国其它流域,特别是 非湿润地区进一步验证模型的适用性,以拓宽该模型 在我国的应用范围。

#### 参考文献:

- 余钟波, 潘峰, 梁川, 等. 水文模型系统在峨嵋河流域洪水模拟中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 645-652. (YU Zhongbo, PAN Feng, LIANG Chuan, et al. Application of hydrologic model system to the flood simulation in the Emei Stream Watershed [J]. Advances in Water Science, 2006,(5): 645-652. (in Chinese))
- [2] Michel C. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres[J]. La Houille Blanche, 1989 (2): 113–122.
- [3] Edijatno, DE OLIVEIRA NASCIMENTO N, YANG X, et al. GR3J: a daily watershed model with three free parameters[J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(2): 263–277.
- [4] Perrin C, Michel C, Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279 (1): 275-289.
- [5] Le Moine N, Andréassian V, Mathevet T. Confronting surface-and groundwater balances on the La Rochefoucauld-Touvre karstic system (Charente, France) [J]. Water Resources Research, 2008, 44(3):

W03403.

- [6] Harlan D, Wangsadipura M, Munajat C M. Rainfall-Runoff Modeling of Citarum Hulu River Basin by Using GR4J [J]. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2010,2184.
- [7] Simonneaux V, Hanich L, Boulet G, et al. Modelling runoff in the Rheraya Catchment (High Atlas, Morocco) using the simple daily model GR4J. Trends over the last decades [C]//13th IWRA World Water Congress, Montpellier, France. 2008.
- [8] Yan Xiaolin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, Bao Zhenxin, et al. Application of GR4J rainfall-runoff model to typical catchments in the Yellow River basin [A]. Proceeding of the 5th international Yellow River Forum in Zhengzhou, China [C]. 2012.
- [9] 龚向民,李昆,刘筱琴,等. 赣江流域水土流失现状与发展态势研究[J]. 人民长江, 2006, 37 (8): 48-50. (GONG Xiangmin, LI Kun, LIU Xiaoqin, et al. Research status and development trend of soil erosion in Ganjiang River [J]. Yangtze River, 2003,37 (8): 48-50.(in Chinese))
- [10] Isaaks E H, Srivastava R M. Applied Geostatistics [M]. Oxford University Press, 1989.
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration– Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [J]. FAO, Rome, 1998, 300: 6541.
- [12] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等. Angstrom 公式参数对 ETO 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 ETO estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China [J]. Advances in Water Science, 2010,21(5): 644-652.(in Chinese))

#### Application of GR4J in Daily Runoff Simulation for Ganjiang River Basin

## DENG Pengxin, WANG Yintang, HU Qingfang, LIU Yong

(State Key laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering & Science, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The GR4J model is a simple and practical conceptual hydrological model with remarkable characteristics in model principle and structure. At present, application of this model is rather infrequent in China. In this paper, this model was applied to the daily runoff simulation of 19 different catchments over the Ganjiang River Basin during the period from 2003 to 2009. Results show that the Nash–Sutcliffe efficiency coefficients for all the study areas exceeded 0.85 and the water volume relative error values were with  $\pm 10\%$  during the calibration and validation periods. Thus, GR4J performed well in simulating daily runoff in the Ganjiang River Basin and it is promising in further application in other regions in China.

Key words: GR4J; daily runoff simulation; Ganjiang River Basin