

# 一个三参数的降雨径流模型及其在我国的应用

陈会丽, 杨小柳

(北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:** GR3 降雨径流模型属概念性集总式水文模型, 具有结构简单、参数少的特点。为研究 GR3 降雨径流模型在我国的适用性, 在长江、黄河、淮河和松花江水系, 选择了 7 个不同尺度、不同气候条件的代表流域试用, 以四种误差函数评定模拟效果。结果显示, GR3 降雨径流模型在整体过程和水量平衡方面均取得较高的精度; 在连续模拟中能够保持令人满意的次洪精度; 比较接近的验证期与率定期精度体现了其较好的稳定性; 该模型在湿润地区的表现优于半湿润地区。可以说, GR3 降雨径流模型在我国有很好的应用前景。

**关键词:** 三参数; GR3 模型; 降雨径流

中图分类号: P338

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2015)02-0017-05

## 1 引言

简单性一直是科学研究尊崇的逻辑标准和美学标准。从奥卡姆剃刀定律, 到牛顿的《自然哲学的数学原理》, 再到爱因斯坦的相对论, 无不追求简单性原则。GR3 降雨-径流模型(以下简称 GR3 模型)的研发深受其影响, “简单”成为其唯一的原则和标准。GR3 的研究者们认为, 只有简单的模型才可靠、可操作、可检验, 才会具有广泛的适用性。

GR3 模型的发展, 始终坚持结构的“宁简勿繁”, 和参数的“宁少勿多”, 从一个参数的 GR1(Michel, 1983<sup>[1]</sup>)开始, 经过两个参数的过渡模型 GR2(Michel, 1989<sup>[2]</sup>), 最后形成较稳定的三参数的 GR3 模型(Edijatno, 1991<sup>[3]</sup>), 一共花了将近 10 年的时间, 真是做到了“惜参数如金”。在随后的 20 余年, 以 GR3 为基础, 为满足不同的应用目的, 又衍生出不同的 GR 模型, 如: 为研究半城市化的 GR4J(Nascimento, 1995<sup>[4]</sup>), 为研究地表水与地下水交换的 GR5J(Le Moine, 2008<sup>[5]</sup>), 为更好地模拟枯水期径流的 GR5J(Pushpalatha, 2011<sup>[6]</sup>), 简化汇流部分的月尺度模型 GR2M(Mouelhi et al. 2006<sup>[7]</sup>), 以及年尺度模型 GR1A(Mouelhi, 2003<sup>[8]</sup>)等。

详细介绍了 GR3 模型, 并探讨其在我国的适用性。

## 2 GR3 模型

### 2.1 结构

GR3 模型是概念性降雨-径流模型, 以土壤水分的贮存、渗透、运移和蒸散发特性为基础, 以经验或半经验性的数学表达式描述径流形成的过程, 围绕产流水箱(Production store)和汇流水箱(Routing store), 设计了降雨量和蒸发量计算、产流、汇流三个计算部分, 参见图 1。

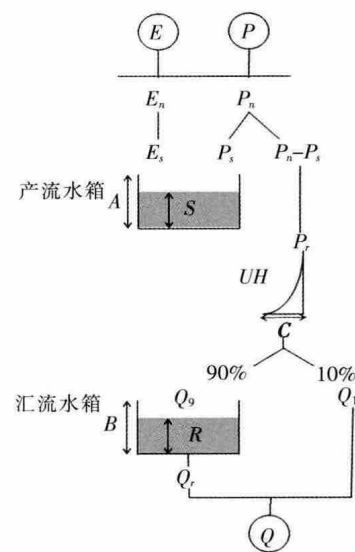


图 1 GR3 模型结构框图

Fig.1 The framework of GR3 model

收稿日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(41171405)

作者简介: 陈会丽 (1989-), 女, 河南新乡人, 博士研究生, 研究方向为土地利用变化水文效应研究。E-mail: ch10305030@126.com

通讯作者: 杨小柳 (1958-), 男, 北京人, 教授, 博士, 主要从事流域综合管理研究。E-mail: xlyang@urban.pku.edu.cn

### 2.1.1 降雨量和蒸发量计算

通过比较降水量与潜在蒸散发量,按下式计算扣除蒸发后的降雨量:

$$\text{当 } P \geq E \text{ 时, } \begin{cases} P_n = P - E \\ E_n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{当 } P < E \text{ 时, } \begin{cases} P_n = 0 \\ E_n = E - P \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P$ 为降水量,mm; $E$ 为潜在蒸散发量,mm; $P_n$ 为扣除蒸发后的降雨量,mm; $E_n$ 为扣除降雨量的蒸发量,mm。

### 2.1.2 产流计算

产流过程以产流水箱模拟,或从 $P_n$ 推算出土壤需水量 $P_s$ (mm)及产流量 $P_r$ (mm),或从 $E_n$ 计算出土壤蒸发量 $E_s$ (mm),参见图1。

当 $P_n$ 不为0时, $P_s$ 和 $P_r$ 的计算公式分别如下:

$$P_s = \frac{A \left[ 1 - \left( \frac{S}{A} \right)^2 \right] \tanh \left( \frac{P_n}{A} \right)}{1 + \frac{S}{A} \tanh \left( \frac{P_n}{A} \right)} \quad (3)$$

$$P_r = P_n - P_s \quad (4)$$

式中: $A$ 和 $S$ 分别为产流水箱的最大深度和实际水深,mm; $\tanh(\ )$ 是双曲正切函数。

当 $E_n$ 不为0时,土壤蒸发量 $E_s$ 的计算公式为:

$$E_s = \frac{E_n S \left( 2 - \frac{S}{A} \right)}{A + E_n \left( 2 - \frac{S}{A} \right)} \quad (5)$$

产流水箱中实际水深 $S$ 变为:

$$S = S + P_s - E_s \quad (6)$$

等式两边的 $S$ 分别为下一时间步长、当前时间步长产流水箱的实际水深。

### 2.1.3 汇流计算

汇流计算由单位线和汇流水箱两部分构成。单位线的计算如下:

$$UH(j) = \left( \frac{j}{C} \right)^{\frac{5}{2}} - \left( \frac{j-1}{C} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (1 \leq j \leq \text{int}(C)+1) \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{\text{int}(C)+1} UH(j) = 1 \quad (8)$$

式中: $UH$ 为离散单位线函数; $C$ 为单位线参数; $j$ 为正整数; $\text{int}(\ )$ 是取整函数。

经单位线汇流后,10%(即图1中的 $Q_1$ )成为直接径流,90%(即图1中的 $Q_0$ )进入汇流水箱进行汇流计算。以 $B$ 和 $R$ 分别代表汇流水箱的最大水深(mm)和

实际水深(mm),汇流水箱的出流 $Q_r$ (mm)以下式计算:

$$Q_r = \frac{R^2}{R+B} \quad (9)$$

汇流水箱中实际水深 $R$ 变为:

$$R = R + Q_0 - Q_r \quad (10)$$

等式两边的 $R$ 分别为下一时间步长、当前时间步长汇流水箱的实际水深。

总径流量 $Q$ (mm)的计算公式为:

$$Q = Q_1 + Q_r \quad (11)$$

## 2.2 参数

GR3模型有三个待优选参数,即 $A$ 、 $B$ 和 $C$ ,详见表1。表中的中位数及80%置信区间,是在法国、美国、澳大利亚、科特迪瓦、巴西等地实验得到的统计结果<sup>[9]</sup>。GR3模型还有6个固定参数,它们分别是公式(3)和(9)中的指数2、公式(5)中的常数2、公式(7)中的指数 $\frac{5}{2}$ ,以及直接径流和间接径流的划分比例10%和90%(参见图1),这些值是在经过大样本检验之后固定下来的<sup>[9]</sup>。

表1 GR3模型参数表

Table1 GR3 model parameters needed to be calibrated

参数	单位	含义	中位数	80%置信区间
$A$	mm	产流水箱最大水深	350	[100, 1200]
$B$	mm	汇流水箱最大水深	90	[20, 300]
$C$	模型的计算时段长	单位线时段数(任意实数)	1.7	[1.1, 2.9]

## 3 应用实例

### 3.1 代表流域

为分析GR3模型对不同水文、气候和下垫面条件的适应性,从长江、淮河、黄河、松花江水系,选择了7个代表流域。选择遵从如下三个原则:①流域内人类活动较少,基本没有大型水利拦蓄设施;②降雨和径流资料系列较长;③地形、地貌及水文气象条件具有一定的代表性。表2给出代表流域的基本信息。

表2 代表流域基本信息表

Table2 The basic information of the representative basins

水系	河流	代表流域	流域面积/km <sup>2</sup>	年均降雨量/mm
长江	昌江	渡峰坑	5013	1763
淮河	淮河	息县	10190	1060
淮河	淮河	大坡岭	1649	1050
黄河	伊河	东湾	2623	790
黄河	洛河	卢氏	4623	720
松花江	金沙河	民立	1037	741
松花江	三统河	孤山子	981	741

3.2 水文资料

表3给出水文数据的基本情况。降雨系列取流域面平均,潜在蒸散发量取多年平均,流量系列采用控

制站实测数据。将降雨和流量系列前后分为率定期和验证期,前者用于率定参数,后者用于验证模拟的稳定性。

表3 水文资料概况表  
Table3 The hydrological data of the study areas

代表流域	雨量站数	计算时段长	降雨径流资料年限 (年份~年份)	率定期年限 (年份~年份)	验证期年限 (年份~年份)
渡峰坑	3	1d	9a (2004~2012)	5a (2005~2009)	3a (2010~2012)
息县	17	1d	22a (1976~1997)	11a (1977~1987)	10a (1988~1997)
大坡岭	5	1d	9a (2002~2010)	5a (2003~2007)	3a (2008~2010)
东湾	9	2h	11a (2002~2012)	7a (2003~2009)	3a (2010~2012)
卢氏	18	2h	9a (2003~2011)	5a (2004~2008)	3a (2009~2011)
民立	4	6h	8a (2006~2013)	4a (2007~2010)	3a (2011~2013)
孤山子	4	6h	8a (2006~2013)	4a (2007~2010)	3a (2011~2013)

3.3 模型评价函数

为比较客观地评价模型精度,本文采用四个误差函数,从连续径流过程和单次洪水两方面,评价模型的模拟结果。四个误差函数分别是:确定性系数(NS)、开方确定性系数(NS\_SQ)、水量平衡误差(BE)、相对误差(RE),详见表4。

表4 误差函数  
Table4 The error evaluation functions of GR3 model

误差函数	缩写	计算公式
确定性系数	NS	$1 - \frac{\sum(Q_o - Q_s)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2}$
开方确定性系数	NS_SQ	$1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_o} - \sqrt{Q_s})^2}{\sum(\sqrt{Q_o} - \sqrt{\bar{Q}_o})^2}$
水量平衡误差	BE	$\frac{\sum Q_s - \sum Q_o}{\sum Q_o}$
相对误差	RE	$1 - \frac{\sum Q_o - Q_s }{\sum Q_o}$

式中: $Q_o$ 为实测流量; $Q_s$ 为模拟流量; $\bar{Q}_o$ 为实测流量的平均值; $\sqrt{Q_o}$ 为开方后的观测流量的平均值。

3.3.1 连续模拟的误差评定

采用表4中的四个误差函数,整体评价模型的连续径流模拟过程。NS、NS\_SQ描述模拟过程与实测过程的拟合程度,前者对洪水部分更为敏感,后者综合考

虑洪水及枯水部分,拟合程度越好,其值越接近1。BE反应模拟水量与观测水量的差别,越接近0越好。RE表示各时段模拟水量与观测水量的差别,当各时段的模拟值与实测值均相等时,有RE=1。

3.3.2 次洪模拟的误差评定

为量化场次洪水的模拟精度,借用《水文情报预报规范》<sup>[10]</sup>对洪水预报精度的评定指标和方法:即洪峰流量、洪量和洪水过程。以BE评定洪峰流量和洪量误差,在[-20%,20%]之内者为合格;以NS判定洪水过程模拟精度的等级,NS>0.90为甲级,0.90≥NS≥0.70为乙级,0.70>NS≥0.50为丙级。

4 模拟结果分析

4.1 连续模拟分析

GR3模型在七个代表流域的连续模拟误差见表5。从率定期的NS看,除孤山子外,都在80%以上,以息县最好;表明GR3对洪水的模拟能力较好。从率定期的NS\_SQ看,以息县最好,民立最差,多在70%左右;表明GR3尚难同时兼顾洪水和枯水的精度。从率定期的BE看,以卢氏最好,大坡岭最差,均在±20%以内;表明GR3可基本保证水量平衡。从率定期的RE看,除息县和渡峰坑以外,余者均在0.6以下;表明

GR3 难以保证所有时间段的较高精度。综合率定期和验证期可以看出, 率定结果的  $NS$  均大于 75%,  $BE$  均在  $\pm 20\%$  以内; 验证结果  $NS$  均不低于 70%,  $BE$  均在  $\pm 20\%$  以内; 表明两时期的表现比较接近, 因此可以

说 GR3 具有不错的稳定性。总体而言, 渡峰坑、息县和大坡岭的模拟, 优于东湾、卢氏、民立和孤山子。如果注意到前三者均处湿润地区, 可断言 GR3 模型会在湿润地区有较好的应用前景。

表5 连续模拟误差统计  
Table5 The results of GR3 model continuous simulation for each basin

水系	流域	NS		NS_SQ		BE		RE	
		率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
长江	渡峰坑	0.90	0.95	0.83	0.90	-8%	-2%	0.67	0.71
淮河	息县	0.92	0.92	0.90	0.89	-2%	11%	0.74	0.70
淮河	大坡岭	0.85	0.78	0.70	0.65	-17%	-2%	0.57	0.46
黄河	卢氏	0.82	0.72	0.69	0.66	1%	15%	0.43	0.44
黄河	东湾	0.80	0.81	0.69	0.68	-12%	20%	0.55	0.48
松花江	民立	0.88	0.72	0.68	0.45	16%	-18%	0.45	0.45
松花江	孤山子	0.78	0.84	0.70	0.79	-6%	-14%	0.53	0.62

#### 4.2 次洪结果分析

为进一步考察 GR3 模型对洪水的模拟能力, 选取整体模拟结果较好的渡峰坑、息县和大坡岭, 单独分析其连续模拟中出现的 23 场洪水。表 6 显示: 23 场洪水的  $NS$  均在 0.70 以上, 渡峰坑、息县 17

场洪水的  $NS$  均大于 0.90; 23 场洪水的洪量  $BE$  均在  $\pm 20\%$  之内; 有 17 场洪水的洪峰  $BE$  在  $\pm 20\%$  以内。可见, 渡峰坑、息县的次洪模拟精度达到较高水平, 大坡岭除洪峰的模拟稍有逊色, 其它指标的精度均很高。

表6 长江、淮河代表流域场次洪水水文要素统计表  
Table6 The simulation results of the floods which were studied in the Yangtze river and the Huaihe river basin

流域	洪号	洪量/ $10^8\text{m}^3$			洪峰/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$			NS	
		实测	模拟	BE/%	实测	模拟	BE/%		
渡峰坑	20060427	9.95	9.97	0	3328	2976	-11	0.97	
	20080602	17.32	20.41	18	4458	4588	3	0.94	
	20100630	22.70	22.32	-2	5025	5093	1	0.99	
	20110603	20.26	22.70	12	4449	4094	-8	0.90	
	20120422	5.35	5.37	0	3232	3012	-7	0.97	
	20120804	10.75	11.78	10	5507	6767	23	0.91	
	19770716	13.12	13.16	0	2700	2816	4	0.95	
	19800616	13.93	13.57	-3	4310	4209	-2	0.98	
	19820717	48.17	46.62	-3	4070	4274	5	0.95	
	19830719	9.56	10.83	13	3620	3291	-9	0.97	
	19870815	22.22	22.79	3	4240	3621	-15	0.90	
	息县	19890527	12.32	11.80	-4	5000	3810	-24	0.93
		19890730	15.33	16.61	8	3360	3511	4	0.95
		19910611	11.66	11.77	1	3990	4166	4	0.99
		19910627	15.80	17.24	9	4020	3721	-7	0.92
		19961026	12.49	11.43	-8	3270	2638	-19	0.95
		19961026	12.49	11.43	-8	3270	2638	-19	0.95
20020619		3.06	3.35	9	1227	894	-27	0.83	
20030625		2.22	2.17	-2	684	697	2	0.93	
20050703		5.25	5.55	6	2023	1587	-22	0.86	
20070711		2.54	2.80	10	817	751	-8	0.73	
大坡岭	20080717	3.32	3.19	-4	1212	774	-36	0.72	
	20100715	2.50	2.87	15	966	842	-13	0.88	

## 5 结论

本文介绍了 GR3 模型,并在长江、淮河、黄河、松花江水系的 7 个代表流域,尝试使用了该模型,得到如下结论:

(1)采用 4 种误差函数,对 7 个代表流域的模拟结果的综合评价表明,GR3 模型具有较好的降雨-径流模拟能力,可在整体过程和水量平衡两方面取得较高的精度。

(2)GR3 模型在率定期和验证期的精度比较接近,表明 GR3 模型具有比较好的稳定性和可靠性。

(3)在长江的渡峰坑、淮河的息县和大坡岭流域,GR3 模型表现良好;在黄河卢氏和东湾、松花江的民立和孤山子的表现稍逊一筹。表明 GR3 模型在湿润地区的适用性要强于半湿润地区。

(4)对连续模拟中的次洪模拟精度进行的特别分析表明,GR3 模型对洪水部分的模拟可以达到很高的精度。

致谢:本研究得到国家防汛抗旱总指挥部办公室梁家志,水利部水文局孙春鹏、李岩、成建国、王金星、胡建伟,吉林省水文水资源局李志毅、佟立武、袁帅,水利部黄河水利委员会水文局李世明等的鼓励、支持和帮助,特致谢意!

### 参考文献:

- [1] Michel C. Que peut-on faire en hydrologie avec modèle conceptuel à un seul paramètre [J]. La Houille Blanche, 1983, 38 (1): 39-44. (Michel C. What can you do with conceptual hydrological model with one single parameter [J]. La Houille Blanche, 1983, 38 (1): 39-44. (in French))
- [2] Michel, C. Hydrologie Appliquée aux petits Bassins Versants Ruraux [M]. Antony: Cemagref, 1989. (Michel, C. Hydrology Applied to Small Rural Catchments [M]. Antony: Cemagref, 1989.

(in French))

- [3] Edijatno. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier [D]. Engref, 1991. (Edijatno. Development of a Basic Rainfall-runoff Model at a Daily Time [D]. Engref, 1991. (in French))
- [4] Nascimento, N.O. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant [D]. Cemagref, 1995. (Nascimento, N.O. Assessing the Effects of Human Activities on the Rainfall-runoff Relationship Using an Empirical Model [D]. Cemagref, 1995. (in French))
- [5] Le Moine N. Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit. [D], Université Pierre et Marie Curie, 2008. (Le Moine N. The Topographic Catchment Seen from the Groundwater Body: A Way to Improve the Performances and Realism of Rainfall-runoff Models [D]. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 2008. (in French))
- [6] Pushpalatha R, Perrin C, Le Moine N, et al. A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation [J]. Journal of Hydrology, 2011,411(1): 66-76.
- [7] 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.
- [8] Mouelhi S. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier [D]. Engref, 2003. (Mouelhi S. Towards a Coherent Chain of Lumped Conceptual Rainfall-runoff Models Running at Multi Annual, Monthly and Daily Time Steps [D]. Engref, 2003. (in French))
- [9] Perrin C, Michel C, Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation [J]. Journal of Hydrology, 2003,279 (1):275-289.
- [10] GB/T22482-2008, 水文情报预报规范 [S]. (GB/T 22482-2008, Standard for Hydrological Information and Hydrological Forecasting [S]. (in Chinese))

## A Three-parameter Hydrological Model and Its Application in China

CHEN Huili, YANG Xiaoliu

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** GR3 has a simple structure, a parsimonious number of parameters which are easy to be calibrated. It is a lumped and conceptual hydrological model for rainfall-runoff simulation. In order to test its applicability in China, seven representative basins were selected from the river systems of the Yangtze, Yellow, Huaihe and Songhuajiang. The simulation was assessed with 4 criteria. The study demonstrates that GR3 is satisfactory in long term continuous and event simulation and water balance, stable between the periods of simulation and validation, and has better performance in humid areas than semi-humid ones. It can be concluded that GR3 is applicable in China.

**Key words:** three-parameter; GR3 model; rainfall-runoff