

GR4J 模型采用两个非线性水库进行产汇流计算^[1]，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。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 、 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， $P_n = 0, E_n = E - P$ 。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 $P_n > 0$ ， P_n 中的一部分直接进入汇流水库，另一部分将补充产流水库：

$$P_s = \frac{x_1(1 - (\frac{S}{x_1})^2) \tanh(\frac{P_n}{x_1})}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh(\frac{P_n}{x_1})} \quad (1)$$

式中： P_s 为补充产流水库的降水量； S 为产流水库蓄水量， x_1 为产流水库蓄水容量。

② 若 $P_n = 0$ ，则 $E > 0$ ， E_s 由下式计算：

$$E_s = \frac{S(2 - \frac{S}{x_1}) \tanh(\frac{E_n}{x_1})}{1 + (1 - \frac{S}{x_1}) \tanh(\frac{E_n}{x_1})} \quad (2)$$

在计算 E_s 和 P_s 的基础上，产流水库蓄水量 S 更新为：

$$S = S - E_s + P_s \quad (3)$$

从而产流水库的产流量 $Perc$ 由下式计算得到：

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

由上式可知， $Perc$ 必小于 S 。扣除 $Perc$ 后的产流水库蓄水量为：

$$S = S - Perc \quad (5)$$

则总的产流量 P_r 为：

$$P_r = Perc + P_n - P_s \quad (6)$$

(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_4 。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 $2 x_4$ 天, 两条单位线均由 S 曲线($SH1$ 、 $SH2$)推算, 计算方法如式所示:

$$\begin{cases} t \leq 0, SH1(t) = 0 \\ 0 < t < x_4, SH1(t) = (\frac{t}{x_4})^{5/2} \\ t \geq x_4, SH1(t) = 1 \\ UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 < t < x_4, SH2(t) = \frac{1}{2}(\frac{t}{x_4})^{5/2} \\ x_4 < t < 2x_4, SH2(t) = 1 - \frac{1}{2}(2 - \frac{t}{x_4})^{5/2} \\ t \geq 2x_4, SH2(t) = 1 \\ UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \end{cases} \quad (8)$$

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:

$$Q_9 = UH1 \times 0.9 \times P_r \quad (9)$$

$$Q_1 = UH2 \times 0.1 \times P_r \quad (10)$$

式中: Q_9 指进入汇流水库的水量; Q_1 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 , 计算方法如式所示:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{7/2} \quad (11)$$

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:

$$R = \max(0, Q_9 + F + R) \quad (12)$$

则汇流水库的出流量 Q_r 为:

$$Q_r = R \left(1 - \left(1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right)^{-1/4} \right) \quad (13)$$

式中, Q_r 必定要小于 R 。出流后, 汇流水库蓄水量更新为:

$$R = R - Q_r \quad (14)$$

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_d 为:

$$Q_d = \max(0, Q_1 + F) \quad (15)$$

从而流域出口断面总流量 Q 为:

$$Q = Q_d + Q_r \quad (16)$$

据以上介绍，GR4J 模型包括 x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 共 4 个参数，根据有关分析，均是模型的敏感性参数^[2]。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。

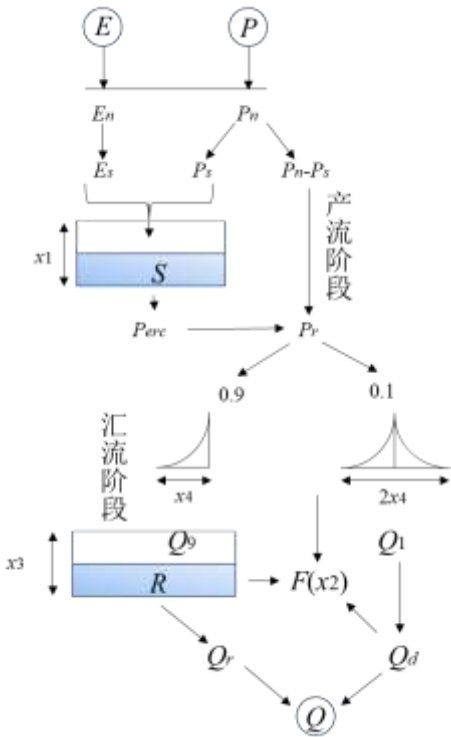


图 1GR4J 模型原理与流程图

表 1GR4J 模型参数的 80%置信区间

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

[1] Perrin C, Michel C, Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1-4): 275-289.

[2] Payan J L, Perrin C, Andréassian V, et al. How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model?[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): 380-384.