

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180006

陈曦, 陈喜, 程勤波, 等. 改进的新安江模型多目标参数优化——以临涣集流域为例[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 35-41, 56. CHEN X, CHEN X, CHENG Q B, et al. Multi objective optimization of an improved Xin'anjiang model: A case study in Linhuanji catchment[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 35-41, 56. (in Chinese)

# 改进的新安江模型多目标参数优化

——以临涣集流域为例

陈曦<sup>1,2</sup>, 陈喜<sup>1,2</sup>, 程勤波<sup>1,2</sup>, 张志才<sup>1,2</sup>, 黄日超<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:** 平原灌区水文过程受人类开采灌溉影响较大, 地表水与地下水物质能量交换频繁, 单目标率定方法难以同时有效模拟该区流量和地下水埋深过程。对此, 在新安江模型基础上加入地下水蓄水库, 构建地表-地下水耦合模型, 建立包含流量与地下水埋深信息的多目标函数。采用 MCAT 分析流量和埋深单目标以及多目标下的参数敏感性, 用 SCE-UA 算法率定遴选出的敏感参数, 比较单目标和多目标率定结果。结果表明, 该多目标参数优化方法显著提高了工作效率, 解决了单目标率定中无法同时达到流量与地下水埋深过程模拟高精度的问题。模型在临涣集流域的耦合模拟中取得较好效果, 为平原灌区地表水与地下水动态模拟和水资源评价提供参考。

**关键词:** 地表-地下水耦合模型; 地下水蓄水库; 临涣集流域; 敏感性分析; 多目标参数率定

**中图分类号:** TV 121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0035-07

## Multi-objective optimization of an improved Xin'anjiang model: A case study in Linhuanji catchment

CHEN Xi<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>1,2</sup>, CHENG Qinbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhicai<sup>1,2</sup>, HUANG Richao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In plain irrigation areas, human exploitation and irrigation have a great impact on local hydrological processes, and material and energy exchange frequently between surface flow and groundwater. In these areas, single objective calibration methods cannot effectively simulate river discharge and groundwater depth at the same time. Therefore, we established a surface groundwater coupling model based on Xin'anjiang model combined with a groundwater reservoir, and we built a multi objective function containing discharge and groundwater data. Then we used SCE-UA to calibrate the sensitive parameters selected by MCAT and we compared the results of single objective and multi objective calibration. Results showed that the multi objective calibration method used in this study worked more efficiently than many former ones. It can effectively and accurately simulate discharge and water level simultaneously. The coupling model does well in simulating the hydrological processes in Linhuanji catchment. It can provide reference for surface groundwater dynamic simulation and water resources assessment in plain irrigation areas.

**Key words:** surface groundwater coupling model; groundwater reservoir; Linhuanji catchment; sensitivity analysis; multi objective calibration

平原区河川径流-地下水交换频繁, 流量与地下水埋深过程模拟是该区的研究重难点。传统研究倾

向于将近地面水文过程与流域地下水数值模型分开建模, 这种方式简化了包气带与饱水带水量能量交

收稿日期: 2017-04-13 修回日期: 2017-10-11 网络出版时间: 2018-01-17  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180115.1645.008.html>  
基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51190091)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(51190091)

**作者简介:** 陈曦(1992), 女, 江苏南京人, 主要从事地下水及水文数值模拟研究。E-mail: 18251825259@163.com

**通讯作者:** 陈喜(1964), 男, 江苏淮安人, 教授, 博士, 主要从事地下水及水文数值模拟研究。E-mail: xichen@hhu.edu.cn

换过程,难以兼顾流量和地下水双目标。结合流量与地下水埋深两种观测信息构建的耦合模型,能够从原理上描述包气带与饱水带的相互作用,为多目标参数优化提供模型平台。近年来国内外学者建立了一系列地表-地下水耦合模型并成功应用于流域水文过程动态模拟预测以及水资源评价,如 MIKESHE、MODCYCLE 等<sup>[14]</sup>。新安江模型<sup>[5]</sup>被广泛应用于我国湿润、半湿润区,在近地面水文过程的模拟预报中取得良好效果,但其弱化了对地下水蓄水库及相关潜水蒸发、入渗补给、基流过程的组建,在开发地下水模块与耦合模拟方面该模型仍具有开发潜力。

随着模型功能的增强,参数优化过程中的“异参同效性”以及模拟结果的不确定性问题日益凸显,基于流量等传统单目标观测资料率定的参数往往不能反映水文过程的多方面特征<sup>[67]</sup>。因此,需要研究综合利用遥感反演、水化学等观测资料的模型多目标参数优化率定方法。相比单目标优化,多目标优化追求对各个目标的同步寻优,可以在兼顾各个目标较高模拟精度的同时有效降低模型不确定性。目前就多目标参数率定问题已有一系列初步探讨,Vrugt 等<sup>[8]</sup>提出了多目标遗传单纯形(MOCEM-UA)算法并应用于三种水文模型中,通过对比模拟结果证明其有效性;郭俊等<sup>[9]</sup>将 NSGA-0 算法用于宜昌站的短期预报中,证明了多目标优化率定的优越性。通过敏感性分析遴选出待率定的敏感参数组是参数优化的先决条件。敏感性分析中的全局敏感性分析方法,如 Morris-OAT 方法<sup>[10]</sup>、Extend FAST<sup>[11]</sup>等,能充分考虑参数之间的相互联系对模拟结果的影响。其中, MATLAB 中的蒙特卡洛分析工具箱(MCAT)<sup>[12]</sup>兼具敏感性分析、参数率定、不确定性分析等功能,被广泛应用于降雨径流模型<sup>[13]</sup>、流体溶质运移<sup>[14]</sup>、水质模型<sup>[15]</sup>等。

在新安江模型基础上建立平原灌区的地表-地下水耦合模型,利用淮北平原临涣集流域的流量与地下水埋深资料构建单目标和多目标函数,分别进行参数敏感性分析和参数优化率定,对比分析单目标和多目标参数率定和模拟的优缺点和适用性,为平原区地表水和地下水动态模拟和预测以及多目标参数率定方法的研究提供参考依据。

## 1 模型和方法

### 1.1 新安江模型改进方法

新安江模型包含蒸发、产流、水源划分、汇流四个模块。使用三层蒸散发模式,产流深计算采用蓄

满产流模式,将径流深划分为地表、壤中、地下三水源,其中地表径流和壤中流汇流演算采用线性水库。传统新安江模型土壤层水量平衡计算:

$$W(t+1) = W(t) + P(t) - E(t) - R(t) \quad (1)$$

式中:  $W(t)$  为  $t$  时刻土壤蓄量(m);  $P(t)$  为降水量(m);  $E(t)$  为土壤蒸发量(m);  $R(t)$  为产流量(m)。改进的耦合模型将潜水蒸发量作为土壤蓄量的补给项加入式(1),改写为:

$$W(t+1) = W(t) + P(t) - E(t) - R(t) + E_g(t) \quad (2)$$

式中,  $E_g(t)$  为潜水蒸发量(m)。传统三水源新安江模型不能显式表示包气带对地下水、地下水开采对河流流量的动态影响。引入地下水蓄水库建立耦合模型(模型结构见图 1)。含水层水量平衡计算:

$$SG(t+1) = SG(t) + Pr(t) - Wg(t) - Qg(t) - E_g(t) \quad (3)$$

式中:  $SG(t)$  为流域平均地下水蓄量(m);  $Wg(t)$  为开采量(m);  $Qg(t)$  为基流量(m)。各项计算如下:

(1) 入渗补给量  $Pr(t)$ 。将水源划分得到的地下水径流量  $RG(t)$  作为地下水蓄水库入渗补给量  $Pr(t)$ 。

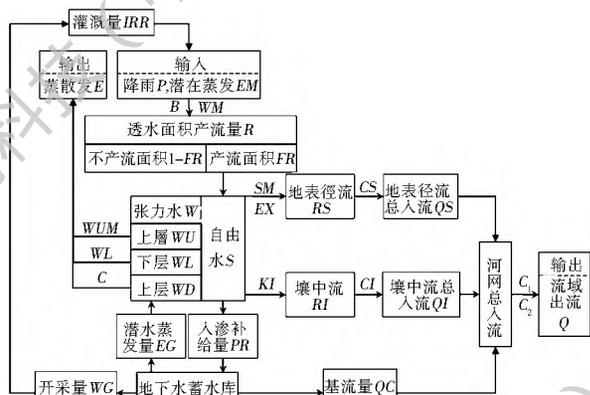


图 1 模型结构

Fig. 1 Model structure

(2) 地下水开采量  $Wg(t)$ 。基于估算的灌溉需水量推算实际灌溉量,假设地下水开采量中的部分水用于农业灌溉,则反推地下水开采量  $Wg(t)$ <sup>[16]</sup>:

$$Wg(t) = 1/k_1 \cdot IRW(t) = 1/k_1 \cdot (K_{ir} \cdot IRR(t)) \quad (4)$$

式中:  $k_1$  为开采折算系数;  $IRW(t)$  为实际灌溉量(m);  $K_{ir}$  为灌溉折算系数;  $IRR(t)$  为灌溉需水量(m)。

(3) 地下水流(基流)  $Qg(t)$ 。当地下水水位高于河道水位时产生基流,假设地下水埋深空间分布服从 Gamma 分布<sup>[17]</sup>,基流计算公式为:

$$Qg(t) = \int_0^{D_{riv}} f_D(D(t)) \cdot K \cdot Sy(D_{riv} - D(t)) dD \approx \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\alpha \cdot \frac{D_m}{D}}{\Gamma(\alpha)} \left( \frac{D_{riv} \cdot i}{m} \right)^{\alpha-1} e^{-\alpha \cdot \frac{D_m}{D} \left( \frac{D_{riv} \cdot i}{m} \right)} \cdot K \cdot Sy \cdot \left( D_{riv} - \frac{D_{riv} \cdot i}{m} \right) \cdot \frac{D_{riv}}{m} \right] \quad (5)$$

式中： $m$  是埋深序列长度 ( $d$ )； $D_{riv}$  是河流切割深度 ( $m$ )； $D(t)$  是  $t$  时刻地下水埋深 ( $m$ )； $f_D(D(t))$  是 Gamma 分布； $K$  是基流出流常数 ( $d$ )； $S_y$  是给水度， $D$  是平均地下水埋深 ( $m$ )； $D_m$  是最大平均地下水埋深 ( $m$ )； $\Gamma(\gamma)$  是 Gamma 函数， $\gamma, \alpha$  分别是  $\Gamma(\gamma)$  的形状参数、尺度参数。

(4) 潜水蒸发量  $Eg(t)$ 。基于阿维里扬诺夫公式<sup>[18]</sup>，考虑 Gamma 分布，得潜水蒸发计算公式：

$$Eg(t) \approx \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\alpha \cdot \frac{D_m}{D}}{\Gamma(\gamma)} \left( \frac{D_{max} \cdot i}{m} \right)^{\gamma-1} e^{-\alpha \cdot \frac{D_m}{D} \left( \frac{D_{max} \cdot i}{m} \right)} \right] \cdot KC \cdot Ep(t) \cdot \left[ 1 - \frac{D_{max} \cdot i}{m \cdot D_{max}} \right]^N \cdot \frac{D_{max}}{m} \quad (6)$$

式中： $KC$  是蒸散发折算系数； $Ep(t)$  是流域实测蒸散发 ( $m$ )； $D_{max}$  是潜水蒸发极限埋深 ( $m$ )； $N$  是潜水蒸发经验常数。其他项同式 (5)。

## 1.2 参数敏感性分析及参数优化率定

### 1.2.1 单目标和多目标函数构建

模型参数优化实质上是寻求使某目标函数  $y$  的模拟与实测值之间误差最小的一组参数  $\theta$ 。假定  $y$  的模拟与实测值之间的误差  $e_{i,y}$  独立同分布，根据高斯分布构造其概率密度函数<sup>[19]</sup>：

$$p(e_{i,y} | \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{e_{i,y}^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

式中： $\sigma$  为标准差； $\theta$  为参数组； $e_{i,y}$  为模拟与实测值之间误差。

将  $y$  的似然函数表示为：

$$l_y(\theta | obs_y) = \ln\left(\prod_{i=1}^n p(e_{i,y} | \theta)\right) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\sigma_y^2) - \sum_{i=1}^n \frac{e_{i,y}^2}{2\sigma_y^2} \quad (8)$$

式中： $i$  为时间步长； $n$  为资料时序长度； $obs_y$  为观测值。

$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n e_{i,y}^2 / n$  是  $\sigma_y^2$  的无偏估计，当  $l_y(\theta | obs_y)$  最大时：

$$\max(l_y(\theta | obs_y)) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\sigma_y^2) - \frac{n}{2} = -\frac{n}{2} \ln(2\pi\epsilon) - \frac{n}{2} \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^n e_{i,y}^2}{n}\right) \quad (9)$$

式中： $\epsilon$  为自然对数， $\epsilon \approx 2.718$ 。

采用的单目标函数分别为流量纳什效率系数 ( $NES_Q$ ) 和埋深纳什效率系数 ( $NSE_D$ )。某目标纳什效率系数  $NSE_y$  计算如下：

$$NSE_y = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (sim_{i,y} - obs_{i,y})^2}{\sum_{i=1}^n (obs_{i,y} - \overline{obs_y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_{i,y}^2}{\sum_{i=1}^n (obs_{i,y} - \overline{obs_y})^2} \quad (10)$$

式中： $sim_{i,y}$  为模拟值； $\overline{obs_y}$  为观测平均值。 $NSE_y$  取值区间为  $(-\infty, 1]$ 。由式 (10) 得：

$$\sum_{i=1}^n \frac{e_{i,y}^2}{n} = \frac{n-1}{n} (1 - NSE_y) \sigma_y^2 \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (9)，式 (9) 转化为：

$$\max\left(l_y(\theta | obs_y)\right) = -\frac{n}{2} \ln\left[2\pi\epsilon \frac{n-1}{n} \sigma_y^2\right] - \frac{n}{2} \ln(1 - NSE_y) \quad (12)$$

假设流量误差  $e_{i,Q}$  和埋深误差  $e_{i,D}$  相互独立，代入  $NES_Q$  和  $NSE_D$  可以构造如下多目标函数  $l(\theta | obs)$ ：

$$l(\theta | obs) = l_Q(\theta | obs_Q) + l_D(\theta | obs_D) \quad (13)$$

分别令流量与埋深似然函数取最大值，将式 (12) 代入式 (13)，则多目标函数改写为：

$$l(\theta | obs) = -\frac{n}{2} \ln\left[2\pi\epsilon \frac{n-1}{n} \sigma_{obs,Q}^2\right] - \frac{n}{2} \ln(1 - NES_Q) - \frac{m}{2} \ln\left[2\pi\epsilon \frac{m-1}{m} \sigma_{obs,D}^2\right] - \frac{m}{2} \ln(1 - NSE_D) \quad (14)$$

式中： $\sigma_{obs,Q}$ 、 $\sigma_{obs,D}$  分别为流量、埋深的标准差 ( $m$ )。

### 1.2.2 参数敏感性分析和优化率定

MCAT 基于普适似然不确定性估计 (GLUE) 方法，对物理或概念性范围内有效的参数组分别进行重复随机取样并模拟，能够高效计算并直观反映结果，被广泛运用于水文径流模型。使用 MCAT 中的区域敏感性分析 (RSA) 模块读取参数组和相应目标函数组，分别进行单目标和多目标敏感性研究。RSA 使用 Freer 等人在 1996 年提出的参数处理方法，根据选择的目标将参数序列划分为 10 组，每组似然函数值做归一化处理并计算和绘制累积频率分布<sup>[20]</sup>。

对筛选出的敏感参数采用 SCE-UA 算法<sup>[21]</sup> 进行全局优化。SCE-UA 基于 Nelder 算法、遗传算法和最速下降算法，结合种群杂交思想，具有参数较少、运算高效等优势。该算法在解决复杂的高维模型参数优化问题，尤其是分布式模型的优化问题时表现突出，是目前公认的流域水文模型单目标参数率定中最高效的方法。SCE-UA 算法通过不断重洗“复合形”直到满足用户设定的收敛准则来完成全部参数优选<sup>[22-23]</sup>。

## 2 研究区概况

选取临涣集流域为研究区，该流域位于淮河流域北部商丘地区，流域内有浍河支流流经，上游属于废黄河南部黄泛区，下游属于淮北平原，地势北高南低。总面积为 2 560 km<sup>2</sup>，属于半湿润、半干旱地区，降雨总体呈现南多北少趋势。流域内地下水动态主要为降雨入渗蒸发的天然垂向运动型。研究区内主要种植小麦、玉米、高粱等，土地利用类型主要为平地水田和旱田 (图 2(a))，开采地下水灌溉作物，

且该区地下水开采量全部用于农业灌溉(即可将式(4)中的  $k_1$  赋值为 1), 采用灌溉需水量模型<sup>[24]</sup> (CROPWAT 模型) 估算得到灌溉需水量。流域内共有 18 个雨量观测站, 1 个蒸发观测站, 1 个流量观测站, 25 个地下水位观测站点和若干地下水开采

井(图 2(b))<sup>[25]</sup>。使用临涣集流域 1986-1995 年日平均降雨量、潜在蒸发量、流量以及五日地下水埋深观测资料, 其中, 利用 25 个地下水位观测站点的地下水埋深数据空间插值得到具有代表性的流域平均五日地下水埋深过程<sup>[26]</sup>。

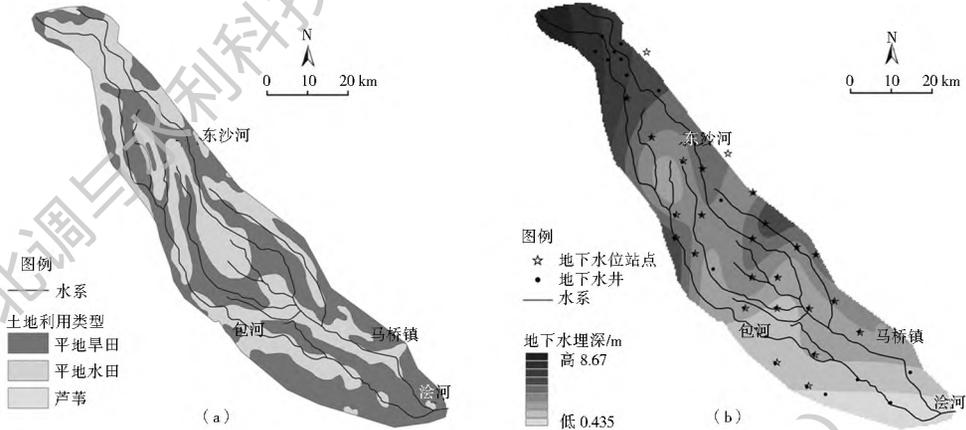


图 2 临涣集流域的 (a) 土地利用类型分布 (b) 地下水位观测站点

Fig. 2 The spatial data of Linhuanji catchment: (a) land use types (b) groundwater observation stations

### 3 结果及分析

#### 3.1 参数敏感性结果

模型总计 17 个参数(表 1), 在参数有效范围内模拟 100 000 组参数相应的流量、地下水埋深过程, 分别

计算各目标对应的  $NSE_Q$ 、 $NSE_D$  和  $l(\theta_{obs})$  及该目标下每组参数的似然函数值, 对似然函数做归一化处理并计算累积频率分布, 绘制敏感性分布图。以多目标敏感性分布图为例, 当模拟结果对某参数敏感时, 体现为频率分布图上的曲线组分布离散, 反之分布集中(见图 3)。

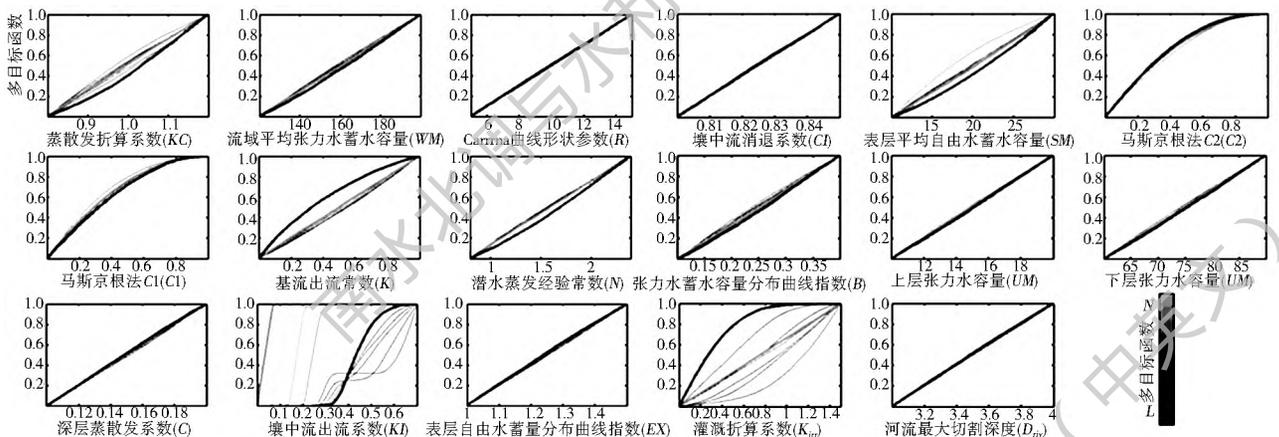


图 3 基于多目标函数的参数敏感性分布图

Fig. 3 Multi-objective sensitivity of model parameters

采用以下敏感性指数  $\beta_a$  进一步量化衡量参数敏感性程度, 计算示例见图 4。

$$\beta_a = \frac{A_{shadow}}{A_{total}}, A_{total} = 1 \times 1.5 = 1.5 \quad (13)$$

式中:  $A_{shadow}$  为图 4 中阴影面积;  $A_{total}$  为总面积。敏感性分布图(图 3、图 4)横坐标单位为参数单位, 纵坐标无因次(取值范围 0~1)。界定  $\beta_a > 0.1$  的参数为敏感参数;  $\beta_a < 0.04$  的参数为不敏感参数<sup>[9]</sup>。筛选出相应敏感和不敏感参数, 对敏感参数进行率定(表 1)。

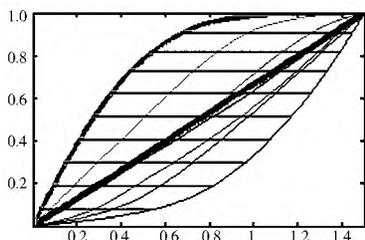


图 4 参数敏感性指数计算示例

Fig. 4 Demonstration of parameter sensitivity index calculation

对比分别以流量或埋深为单目标的参数敏感性结果(表 1), 对流域水量平衡影响显著的蒸散发扩

表 1 模型参数  
Tab. 1 Model parameters

模块	参数符号	参数名	取值范围	流量为目标	埋深为目标	多目标
蒸散发计算	$K_{irr}$	灌溉折算系数	0~ 1	1.000 ☆	0.362 ★	0.237 ★
	$KC$	蒸散发折算系数	一般 0.8~ 1.2	1.2 ★	0.8 ★	1.2 ★
	$UM$	上层张力水容量/mm	10~ 20	20 ★	17	15
	$LM$	下层张力水容量/mm	60~ 90	79 ★	90	75
	$C$	深层蒸散发系数	0.1~ 0.2	0.177 ☆	0.100	0.15 ☆
产流计算	$WM$	流域平均张力水蓄水容量/mm	120~ 200	166	160	168
	$B$	张力水蓄水容量分布曲线指数	0.1~ 0.4	0.18	0.10	0.15
水源划分	$SM$	自由水蓄水容量/mm		23 ★	20	29 ★
	$EX$	自由水蓄量分布曲线指数/mm		1.25 ☆	1.25 ☆	1.25 ☆
	$KI$	壤中流出流系数	$KI+ KG= 0.7$	0.58 ★	0.61 ★	0.40 ★
汇流计算	$CI$	壤中流消退系数	0~ 1	0.825 ☆	0.825 ☆	0.825 ☆
	$C_1$	马斯京根法 $C_1$	0~ 1, $C_1+ C_2 < 1$	0.208	0.074 ☆	0.074
	$C_2$	马斯京根法 $C_2$		0.100	0.852 ☆	0.852
	$\gamma$	Gamma 曲线形状参数		10 ☆	10 ☆	10 ☆
地下水蓄水库	$K$	基流出流常数/( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	0~ 1	0.064	0.004 ★	0.010 ★
	$N$	潜水蒸发经验常数		1.60 ☆	4.16 ★	3.23
	$D_{riv}$	河流切割深度/m		3.5 ☆	3.5 ☆	3.5 ☆
参数组相应目标函数值	$NSE_Q$		率定期	0.74	- 1.76	0.64
			验证期	0.73	- 1.33	0.71
	$NSE_D$ (年平均绝对误差 $MAE_D/m$ )		率定期	- 104.63(3.7)	0.85(0.11)	0.47(0.24)
			验证期	- 208.23(8.6)	0.79(0.23)	0.75(0.19)

注: ★表示该参数敏感, ☆表示该参数不敏感。

散系数( $KC$ )及对水源划分影响显著的壤中流出流系数( $KI$ )同为敏感参数; Gamma 曲线形状参数( $\gamma$ )、壤中流消退系数( $CI$ )、表层自由水蓄量分布曲线指数( $EX$ )、河流最大切割深度( $D_{riv}$ )同为不敏感参数。对地表径流影响显著的表层自由水蓄水容量( $SM$ )和上、下层张力水容量( $UM$ 、 $LM$ )以流量为目标时敏感,以埋深为目标时不敏感;影响地下水蓄量变化的灌溉折算系数( $K_{irr}$ )、基流出流常数( $K$ )以埋深为目标时敏感,以流量为目标时不敏感。

对比单目标和多目标参数敏感性成果,三者的共同敏感性参数是对流域水量平衡影响较大(如蒸散发扩散系数( $KC$ ))以及对水源划分影响较大(如

壤中流出流系数( $KI$ ))的参数,当分别以流量和埋深为单目标时都敏感的参数,对多目标也敏感;对两个单目标都不敏感的参数,对多目标也不敏感,如壤中流消退系数( $CI$ )、表层自由水蓄量分布曲线指数( $EX$ )、Gamma 曲线形状参数( $\gamma$ )、河流最大切割深度( $D_{riv}$ )。而仅对其中一个单目标敏感或不敏感的参数,其对于多目标的敏感性并不确定。

### 3.2 参数率定结果

对以流量和埋深为单目标的敏感性参数以及多目标敏感性参数进行优选,并对模型进行验证。将 1986- 1990 年作为率定期,1991- 1995 年作为验证期。优选的最优参数及模拟结果见图 5- 图 7 和表 1。

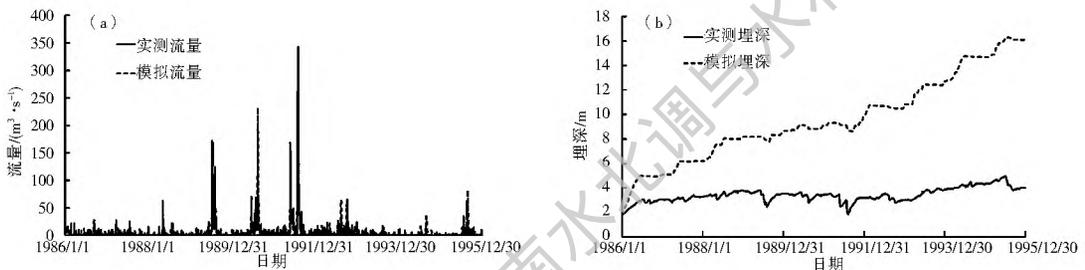


图 5 以流量为目标的 (a) 模拟与实测流量过程线 (b) 模拟与实测埋深过程线

Fig. 5 Comparison between the observed and simulated processes with discharge as the objective: (a) river discharges (b) groundwater

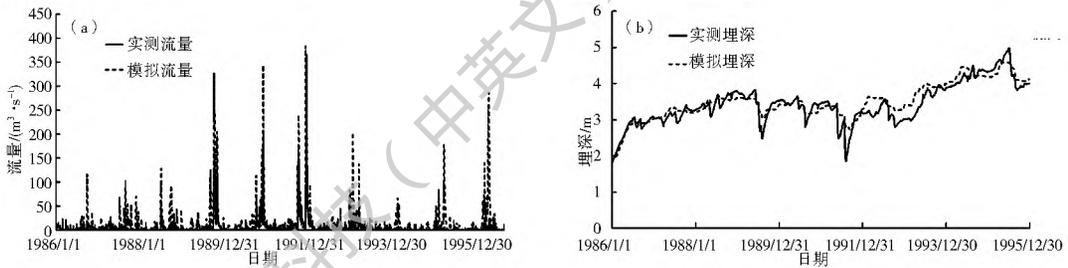


图 6 以埋深为目标的(a)模拟与实测流量过程线 (b)模拟与实测埋深过程线

Fig. 6 Comparison between the observed and simulated processes with groundwater depth as the objective: (a) river discharges (b) groundwater depths

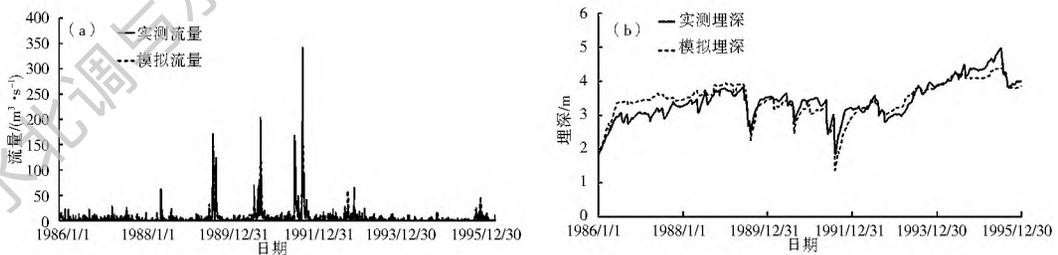


图 7 多目标率定的(a)模拟与实测流量过程线 (b)模拟与实测埋深过程线

Fig. 7 Comparison between the observed and simulated processes under multi objective calibration: (a) river discharges (b) groundwater depths

从参数优化结果来看,对流量或(和)地下水埋深单目标敏感的参数,在不同目标函数下的最优值存在较大差异,如表层自由水蓄水容量  $SM$ 。从流量和地下水埋深模拟效果来看(图 5、图 6),以流量为单目标,模拟与实测流量拟合较好,率定期和验证期纳什效率系数  $NSEQ$  分别为 0.74、0.73(表 1),但地下水埋深模拟过程显著偏离实测过程,随时间偏离程度呈增大趋势;以地下水埋深为单目标,模拟与实测地下水埋深拟合较好,率定期和验证期效率系数  $NSE_Q$  分别为 0.85、0.79,地下水埋深年均绝对误差为 0.11 m、0.23 m(表 1),但流量模拟过程偏差显著,特别是洪峰过大。

多目标敏感参数的最优值与上述两个单目标最优参数值有较大差异。多目标下率定期所得  $NSEQ$  为 0.64、 $NSE_D$  为 0.71,验证期所得  $NSEQ$  为 0.47、 $NSE_D$  为 0.75(表 1)。考虑到该流域在一定程度上受人类活动影响,因此可以认为模型对流量和埋深目标的模拟均达到较高精度。但多目标  $NSEQ$  低于以流量为单目标的  $NSEQ$  值,同样多目标  $NSE_D$  值低于以地下水埋深为单目标的  $NSE_D$  值(表 1)。多目标模拟流量和埋深过程线见图 7,具体分析如下。

(1) 模型对 1986 到 1990 年这一枯水年组的径流模拟总体偏小,流量过程线变化小。目标函数  $NSE$  对大流量的偏向性使枯季预报的精度较低。对 1990 到 1992 年这一丰水年组内的几场大洪水模拟可以捕捉到洪峰并可基本拟合峰型与预报峰值,且预报值偏大,符合安全要求。

(2) 地下水埋深在丰水年组内模拟过程线较接近实测值,可基本反映该流域地下水资源变化情况并作为地下水资源评价的依据。但率定期模拟效果不如验证期,一方面与纳什效率系数特性有关;另一方面对于枯水年组和丰水年组,其敏感参数最优值可能存在差异,需进一步做分析验证。

多目标与不同水文观测要素单目标参数优化结果和模拟效果表明,根据不同应用需求选择的单目标函数,其率定得出的模型参数组不能同时有效地模拟地表径流和地下水水位变化。单目标  $NSEQ$  主要反映大流量过程模拟效果,对地下水埋深影响较小,可作为雨洪过程模拟的目标函数;以  $NSE_D$  作为单目标,能较好地模拟地下水埋深变化过程,但不能有效地模拟地表雨洪过程,可用于当地地下水资源评价。结合流量和埋深信息的多目标参数优化,虽然无法达到单个目标的极高精度,但同时模拟流量与埋深变化的效果较好。

#### 4 结语

在新安江模型基础上改进地下水模块,构建平原灌区地表-地下水耦合模型。针对单目标参数优化的局限性,建立包含流量与埋深要素的多目标函数,引入多目标敏感性分析和使用 SCE-UA 算法的参数优化率定方法。相较于构建复杂的多目标算法,该率定方法藉由改造多目标函数的方式,使单目标 SCE-UA 算法可以实现多目标率定功能,显著提高工作效率。研究结果表明,单目标率定不能有效地同时模拟流量和地下水埋深动态过程;多目标参

数优化对特定目标函数的模拟效果不如单目标优化,但能在流量与地下水埋深过程的同时模拟中达到双目标较高精度。研究证明了模型在我国平原灌区地表-地下水模拟中的适用性,多目标参数优化率定成果对该区水文过程动态模拟和地下水资源评价具有一定参考价值。然而在多目标率定中,埋深过程模拟不能准确把握实测变化趋势,效果不够理想,模型多目标模拟对丰水年组的预报效果显著优于枯水年组。在今后的研究中应探讨该多目标率定方法对降低模型不确定性的意义,研究枯水年与丰水年相应率定参数值的差异,根据地下水分布特征将流域分区并向半分布式方向改进模型,以期合理预报地下水空间分布差异较大流域的地下水过程并适用于其他地区的水文预报中。

#### 参考文献(References):

- [1] VANDERKWAAK J E. Numerical simulation of flow and chemical transport in integrated surface subsurface hydrologic systems[D]. Waterloo: University of Waterloo, 1999.
- [2] QING L. A physically based hydrologic model of the Duffins Creek watershed, Ontario, Canada[M]. Toronto: University of Waterloo, 2006: 35-68.
- [3] ROSS M, GEURINK J, ALY A, et al. Integrated hydrologic model (IHM) Volume I: theory manual[R]. Florida: Tampa Bay Water and Southwest Florida Water Management District, 2004.
- [4] 陆垂裕,王浩,王建华,等.面向对象模块化的水文模拟模型:MODCYCLE设计与应用[M].北京:科学出版社,2016.(LUC Y, WANG H, WANG J H, et al. Object oriented modular hydrological simulation model: design and application of MODCYCLE[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [5] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.(ZHAO R J. Simulation of regional hydrology[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1984. (in Chinese))
- [6] 郭俊,周建中,王浩,等.系统理论水文模型结构与参数多目标优化[J].水力发电学报,2014,33(2):1-7.(GUO J, ZHOU J Z, WANG H, et al. Structure optimization and parameter calibration of empirical hydrological model under multi objective framework[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 1-7. (in Chinese))
- [7] DUAN Q, GUPTA H V, SOROOSHIAN S, et al. Global optimization for watershed model calibration[J]. Calibration of watershed models American Geophysical Union: Washington, DC, 2003: 89-104. DOI: 10.1029/ws006p0089.
- [8] VRUGT J A, GUPTA H V, BASTIDAS L A, et al. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models[J]. Water Resources Research, 2003, 39(8): 1214-1214. DOI: 10.1029/2002WR001746.
- [9] 郭俊,周建中,邹强,等.新安江模型参数多目标优化研究[J].水文,2013,33(01):F7.(GUO J, ZHOU J Z, ZHOU Q, et al. Study on multi objective parameter optimization of Xinanjiang model[J]. Journal of Hydrology, 2013, 33(01): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2013.01.001 (in Chinese))
- [10] CAMPOLONGO F, CARIBONI J, SALTELLI A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(10): 1509-1518. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.10.004.
- [11] XU C, GERTNER G. Extending a global sensitivity analysis technique to models with correlated parameters[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2007, 51(12): 5579-5590. DOI: 10.1016/j.csda.2007.04.003.
- [12] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction[J]. Hydrological Processes, 6(3): 279-298. DOI: 10.1002/hyp.3360060305.
- [13] WAGENER T, BOYLE D P, LEES M J, et al. A framework for development and application of hydrological models[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2001, 5(1): 13-26. DOI: 10.5194/hess-5-13-2001.
- [14] WAGENER T, LEES M J, WHEATER H S, et al. A toolkit for the development and application of parsimonious hydrological models[J]. Mathematical Models of Large Watershed Hydrology, 2002, 2.
- [15] SINCOCK A M, WHEATER H S, WHITEHEAD P G. Calibration and sensitivity analysis of a river water quality model under unsteady flow conditions[J]. Journal of Hydrology, 2003, 277(3-4): 214-229. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00127-6.
- [16] 杨柳,陈喜,章树安,等.基于地表-地下水文过程模拟的农业灌溉开采量估算[J].2016,14(1):54-58.(YANG L, CHEN X, ZHANG S A, et al. Estimation of groundwater withdrawal for agricultural irrigation based on surface groundwater hydrological simulation[J]. 2016, 14(1): 54-58. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.01.009 (in Chinese))
- [17] BELDRING S, GOTTSCHALK L, SEIBERT J, et al. Distribution of soil moisture and groundwater levels at patch and catchment scales[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 98-99(74): 305-324. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00103-3.
- [18] 阿维里扬诺夫.防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M].北京:中国工业出版社,1963.(AWELIYONGRUFU. The level drainage facilities to control the irrigation salinization[M]. Beijing: China Industry Press, 1963. (in Chinese))
- [19] CHENG Q, CHEN X, XU C, et al. Improvement and comparison of likelihood functions for model calibration and parameter uncertainty analysis within a Markov Chain Monte Carlo scheme[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2202-2214. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.008.
- [20] MUÑOZ E, RIVERA D, VERGARA F, et al. Identifiability analysis: towards constrained equifinality and reduced uncertainty in a conceptual model[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(9): 1690-1703. DOI: 10.1080/02626667.2014.892205.

(下转第56页)

- 究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 769-775. (LI H Y, WANG J. The snowmelt runoff model applied in the upper Heihe River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 769-775. (in Chinese))
- [19] 李晶, 刘时银, 魏俊峰, 等. 塔里木河源区托什干河流域积雪动态及融雪径流模拟与预估[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1508-1516. (LI J, LIU S Y, WEI J F, et al. Snow cover dynamics and snowmelt runoff modeling in the Toxkan River basin, source region of the Tarim River, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1508-1516. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0181.
- [20] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. SRM 融雪径流模型在乌鲁木齐河源区的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 41-48. (HUAI B J, LI Z Q, SUN M P, et al. Snowmelt runoff model applied in the headwaters region of Urumqi River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 41-48. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.01.010.
- [21] 赵军, 黄永生, 宋闲庆, 等. SRM 融雪径流模型在疏勒河流域上游的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 72-80. (ZHAO J, HUANG Y S, SONG G Q, et al. Application of snowmelt runoff model in upper stream of Shule river basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(1): 72-80. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.01.014.
- [22] HE Z H, PARA JKA J, TIAN F Q. Estimating degree day factors from MODIS for snowmelt runoff modeling[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18: 4773-4789. DOI: 10.5194/hess-18-4773-2014.
- [23] 侯慧姝, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 252-256. (HOU H S, YANG H Y. A general introduction to MODIS snow products and its researching application[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 252-256. (in Chinese))
- [24] MARTINEC J, RANGO A, ROBERTS R. The snowmelt runoff model (SRM) user's manual (updated edition 1998, Version 4.0) [M]. Berne: University of Berne, 1998.
- [25] JONATHAN K, WOONSUP C, ANKE K. Snowmelt runoff modeling: Limitations and potential for mitigating water disputes[J]. Journal of Hydrology, 2012, 430-431: 179-181. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.043.
- [26] MOHSIN J B, MUHAMMAD B. Application of snowmelt runoff model for water resource management[J]. Hydrological Processes, 2011, 25: 3735-3747. DOI: 10.1002/hyp.8099.
- [27] 苑希民, 李鸿雁, 刘树坤, 等. 神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (YUAN X M, LI H Y, LIU S K, et al. Application of neural network and genetic algorithm in water science[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))

(上接第27页)

- [22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Food and Agriculture Organization Press, 1998: 23-27, 97-134.
- [23] 李子君, 李秀彬. 水利水保措施对潮河流域年径流量的影响——基于经验统计模型的评估[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 958-968. (LI Z J, LI X B. Impacts of engineering measures for water conservancy on annual runoff in the Chaohe River Basin based on an empirical statistical model[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(9): 958-968. (in Chinese))
- [24] 刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 7-12. (LIU C M, LI Y Z, LIU X M, et al. Impact of vegetation change on water transformation in the middle yellow river[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 7-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.002.

(上接第41页)

- [21] DU AN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology, 158(3-4): 265-284. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.
- [22] 陈喜, 张志才, 程勤波. 饱和非饱和水流数值模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 115-119. (CHEN X, ZHANG Z C, CHENG Q B. Numerical modeling saturated and unsaturated groundwater flow[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 115-119. (in Chinese))
- [23] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007(4): 649-655. (WANG Z G, XIA J, LIU C M, et al. Comments on sensitivity analysis and calibration of distributed hydrological model[J]. Journal of Natural Resources, 2007(4): 649-655. (in Chinese))
- [24] BABU R G, BABU G R, KUMAR H H. Estimation of crop water requirement, effective rainfall and irrigation water requirement for vegetable crops using CROPWAT[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2015, 8(1): 15-20. DOI: 10.15740/HAS/IJAE/8.1/15-20.
- [25] 凌敏华, 陈喜, 程勤波, 等. 地表水与地下水耦合模型研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 04: 79-84. (LING M H, CHEN X, CHENG Q B, et al. Advances in coupled surface water and groundwater models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 04: 79-84. DOI: 10.3880/j.issn.1006-9647.2010.04.019 (in Chinese))
- [26] 黄远洋. 平原区地下水动态变化对地表水文过程影响的模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. (HUANG Y Y. Research on modeling effects of groundwater dynamic on surface water processes[D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))