

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.04.001

流域分块对汇流参数的影响

李致家,李兰茹,黄鹏年,李巧玲

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要: 选择屯溪、东湾及王快流域为典型流域,挑选合适的目标函数,采用单纯形法率定参数,研究流域分块对新安江模型 S_M 、 C_S 、 C_I 及 C_G 等参数的影响。结果表明,随着流域分块数增加:降雨资料均化程度减小, S_M 呈增大趋势, C_S 呈减小趋势, C_I 及 C_G 基本保持不变;洪量、洪峰合格数及确定性系数均呈增大趋势,当子流域面积小于 $1\,000\text{ km}^2$ 时模拟精度大幅度改善。

关键词: 新安江模型;流域分块;汇流参数;单纯形法;目标函数

中图分类号: P33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)04-0283-06

Effect of watershed subdivision on confluence parameter

LI Zhijia, LI Lanru, HUANG Pengnian, LI Qiaoling

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, we took the Tunxi, Dongwan, and Wangkuai watersheds as typical watersheds and studied the effect of watershed subdivision on the Xin'anjiang model's parameters, including S_M , C_S , C_I , and C_G . We used the simplex algorithm with suitable objective functions to calibrate the parameters of the model. The results of the study show that, with the increase of the number of watershed subdivisions, the homogenization degree of rainfall data decreases, S_M has an increasing trend, C_S has a decreasing trend, and C_I and C_G remain invariant. The number of qualified flood volume and flood peaks and the deterministic coefficient show an increasing trend with the increase of the number of watershed subdivisions. When the area of the sub-watershed is less than $1\,000\text{ km}^2$, the simulation accuracy improves significantly.

Key words: Xin'anjiang model; watershed subdivision; confluence parameter; simplex algorithm; objective function

流域水文模型是流域水旱灾害防治及水资源开发管理的有力工具^[1],模型是否适用,取决于模型结构能否反映流域的水文规律以及模型参数能否反映流域的水文特征。流域水文现象十分复杂,现有的技术并不能将每一环节探测清楚,因此,水文模型只是对水文现象的抽象与概化,模型参数只能反映有关影响因素对流域径流形成过程的平均作用。

流域面上存在着降雨分布的不均匀性、下垫面性质的不均匀性及河网性质的不均匀性等特性。为了考虑这些不均匀性,常将计算流域划分为多块单元流域,在每块单元流域内分别进行降雨-径流计算。流域分块数目不同,对不均匀性的处理也就不同,有关影响因素对径流形成过程的平均作用也不同,模型参数也需相应做出改变。

对于流域水文要素空间分布不均匀的问题,国外习惯采用空间正交网格的处理方法,国内则习惯采用流域分块加以处理。因此,研究流域分块对模型模拟的影响,具有重大的现实意义及科研价值。

流域分块方法很早就被提出,但其对模型模拟的影响并没有被透彻了解。近几年有关研究有了新的进展。Zhang等^[2]利用HEC-HMS模型研究流域分块,认为在一定范围内流域分块数目对模型的模拟精度影响

有限,对河槽参数影响较大;Aouissi 等^[3]采用 SWAT 模型研究流域分块,认为雨量输入对水文模拟影响很大,流域分块若不改变雨量输入,则对模拟结果几乎没有影响;Tripathe 等^[4]从水量平衡的角度研究流域分块,采用 SWAT 模型,发现流域分块虽然对出口断面径流模拟影响不大,但对模型内部各个模块,如蒸发、下渗、侧漏等影响较大。此外,还有 Kumar 等^[5]、邱临静等^[6]、李曼曼等^[7]也对流域分块提出了自己的看法。

笔者采用新安江模型研究流域分块。为使流域分块研究具有客观性,减少手工调试主观因素的影响,采用单纯形算法,并讨论目标函数对参数优化的影响,选择了合适的目标函数。

本研究选择湿润地区的屯溪流域、半湿润半干旱地区的东湾及王快流域,研究流域分块对汇流参数的影响。

1 研究区域和资料

屯溪流域位于钱塘江干流源头区,流域面积 2670 km²。钱塘江流域临近中国东南沿海,位于亚热带季风气候区,年平均气温 17℃,冬季盛行西北风,天气晴冷干燥;夏季多东南风,气温高,光照强,空气湿润;春秋两季气旋活动频繁,冷暖变化大。春季及初夏多锋面雨,夏秋之际多台风,季风环流的方向与主要山脉走向基本正交,山脉起着阻滞北方寒流和台风的作用。年平均降水量 1 600 mm,其中 4—6 月多雨,降水量占全年降水量的 50%,易发生洪涝灾害;7—9 月降水量占全年降水量的 20%,旱灾频繁。河川径流年内、年际变化较大。

东湾流域位于伊河河源地区,111°E~112°E、33.5°N~34.5°N 之间,以东湾水文站作为流域控制出口,流域面积 2 856 km²。流域地势西高东低,上游林地面积大,属大陆性季风气候区。降水量的分布极不均匀,年降水量在 500~1 100 mm 之间,且随地形高度的增加而递增,因而山地为多雨区,河谷及附近丘陵为少雨区。降水年际变化较大,年最大降水量是年最小降水量的 2 倍左右,且年内分配极为不均,每年 7—9 月的降水量占年降水总量的 50% 以上。

王快水库位于河北省曲阳县郑家庄西、大清河水系沙河上游,控制流域面积 3 370 km²,有流域内 13 个雨量站的雨量资料,多年平均降雨量为 595.1 mm,多集中在 7—9 月。上游一般为深山区,北部海拔约 700 m,主要河道纵坡平均为 0.53%,河床呈 V 形,两岸皆为岩石,几乎无台地,河床覆盖物为大块石和砂砾。中游为浅山区,河床纵坡为 0.25%,河谷较开阔,一般河宽为 500 m 左右,河道较顺直,呈复式河床,覆盖物为砂砾石,河床冲淤变化较大。下游大部分为片麻岩,风化严重,土质一般为砂砾土和砂壤土,土层较薄,最厚土层不超过 1 m,植被较差。

2 研究方法

2.1 新安江模型

新安江模型是由河海大学水文系水文预报教研室在赵人俊教授的带领下研制,并逐步完善起来的一个降雨径流模型^[8-9]。其结构设计为分散型的,分为蒸散发计算、产流计算、分水源计算和汇流计算 4 个层级结构。目前该模型在国内洪水预报中得到了广泛的应用。

2.2 优化方法

单纯形调优法^[10-13]对于求解变量不多的问题是很有用的,本研究变量最多 4 个,并且鉴于单纯形法收敛速度快、结构简单^[14],本文采用单纯形法对模型参数进行率定,利用经验方法得到模型参数初始值(各分块相同)。

选用两类目标函数,如式(1)与式(2)所示。在多目标优化问题中存在平衡最优解^[15-16],即各个目标保持等权重,并且多目标等权重优化在优化问题中经常被采用。本文尝试取式(1)和式(2)等权重相加,作为目标函数,效果良好。

$$G = \sum_{t=1}^n [(q_o(t))^{0.5} - (q_s(t))^{0.5}]^2$$

(1)

$$D_c = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [q_o(t) - q_s(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [q_o(t) - \bar{q}_o]^2}$$

(2)

式中: G ——目标函数值; $q_o(t)$ —— t 时刻实测流量, m^3/s ; $q_s(t)$ —— t 时刻模拟流量, m^3/s ; $\bar{q}_o$ ——实测流量均值, m^3/s ; n ——资料系列长度; D_C ——确定性系数。

3 结果和讨论

3.1 分水源参数变化

实际降雨是不均匀的。若降雨不均匀造成了部分流域产流,其产生的径流量与平均雨量相同的均匀降雨所产生的径流量是不相等的。若水文模型参数取值相同、初值相同,则流域分块所模拟的径流量要大于不分块所模拟的径流量。

新安江模型 S_M 值受资料均化影响显著,体现在降雨资料时段均化上就是时段越短 S_M 越大,因为时段越短越不容易产生地表径流。其不但决定了地表径流的多少,影响洪峰形态,而且对地表径流与地下径流的比重起了决定性作用。这里研究空间均化对新安江模型 S_M 值的影响。

将同时优化 S_M 、 C_s 定为方案 1,同时优化 S_M 、 C_s 和 C_l 定为方案 2,同时优化 S_M 、 C_s 和 C_c 定为方案 3,同时优化 S_M 、 C_s 、 C_l 和 C_c 定为方案 4,应用于屯溪、东湾与王快流域,观察流域分块对 S_M 的影响(图 1)。

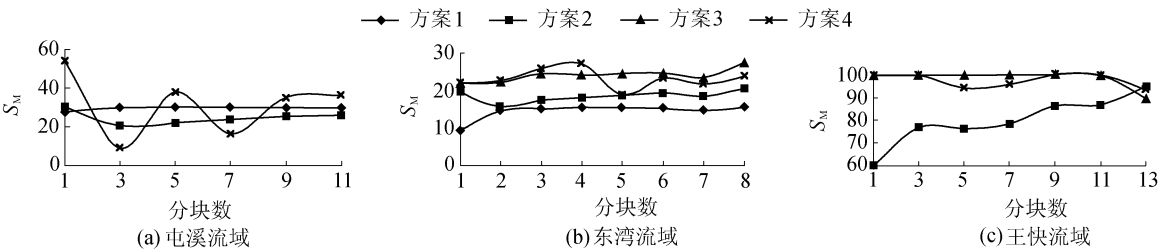


图 1 流域分块变化对 S_M 的影响

Fig. 1 Effect of variation of watershed subdivision on S_M

流域分块数增加,新安江模型模拟径流量增加,若 S_M 值不变,则地表径流量相应地增加,模拟时段内洪峰、洪量偏大。因此,需相应增大 S_M 值,合理调整水源比例,不使地表径流量因分块变化而变化。

3.2 汇流参数变化

本次研究各单元流域及各单元河段取同一参数,因此参数并不代表子流域下垫面特征,而是流域平均值。

对于汇流而言,流域分块数变化主要体现在单元流域调蓄能力变化及马斯京根法分段演算分段数的变化。例如,流域分块数减小,子流域合并,则单元流域面积增大,河网调蓄能力增强,马斯京根法计算河段数减小。如东湾流域:分 2 块时子流域以下到流域出口的河段数分别是 4 和 0,总数为 4;不分块时河段数为 0,没有河道洪水演算。因此,子流域合并就是把部分马斯京根汇流演算并入到子流域坡地汇流及河网汇流中,这必然引发相关参数的变化。

河道汇流演算相当于梯级水库串联,是串联计算;每块单元流域在全流域出口的流量过程线性叠加,则是并联计算。子流域合并,可以理解为串联数与并联数同时减少。从串联角度看,若子流域河道洪水演算入流量固定,各河段马斯京根法参数统一且固定不变,则河段数减少,河槽调蓄作用也将减少,减少程度与河段数减少数目有关;从并联角度看,若全流域时段产流总量不变,则子流域合并,并联数目减少,调蓄作用也减少,减少程度与子流域权重变化及河段减少数目有关。但由前所述,流域分块变化,则模型产流量必然发生变化。因产流量变化,则 S_M 值和水源比例发生变化,因而流域分块对汇流的影响较复杂,需实际验证。

将方案 1~4 应用于屯溪、东湾与王快流域,观察流域分块对汇流参数的影响,结果见图 2~7。

a. 屯溪流域。由图 2~3 可以看出:方案 1 时, C_s 值随流域分块数的增加而减小;方案 2 时, C_s 值随分块数的增多,其基本呈减小趋势,分块数为 7 时突然增大, C_l 值较稳定(与分块数关系不大);方案 4 时, C_s 值优化后的结果幅度变化不大, C_l 值优化结果变化幅度较大且没有规律, C_c 值优化结果随分块数的增多而急剧下降。综上所述,随着分块数的增多,洪量、洪峰合格数及确定性系数大多呈增长趋势,伴有波动,偶有例外。

b. 东湾流域。由图 4 和图 5 可以看出:方案 2 时,参数变化同屯溪流域;方案 3 时, C_s 值随分块数的增

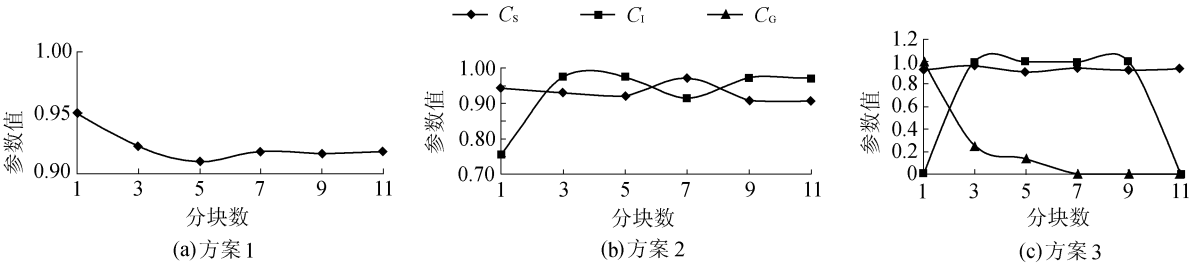


图2 参数值随分块数的变化(屯溪流域)
Fig. 2 Variation of parameter with number of subdivisions (Tunxi watershed)

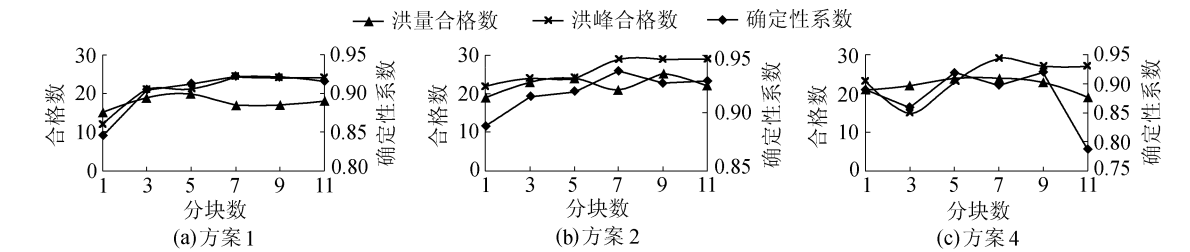


图3 合格数随分块数的变化(屯溪流域)
Fig. 3 Variation of qualified amount with number of subdivisions (Tunxi watershed)

多而减小, C_6 随分块数的增多而增大,至8块时突然变小;方案4时,参数波动较大,规律性不强。随分块数的增多,洪量、洪峰合格数及确定性系数大多呈增长趋势,伴有波动。

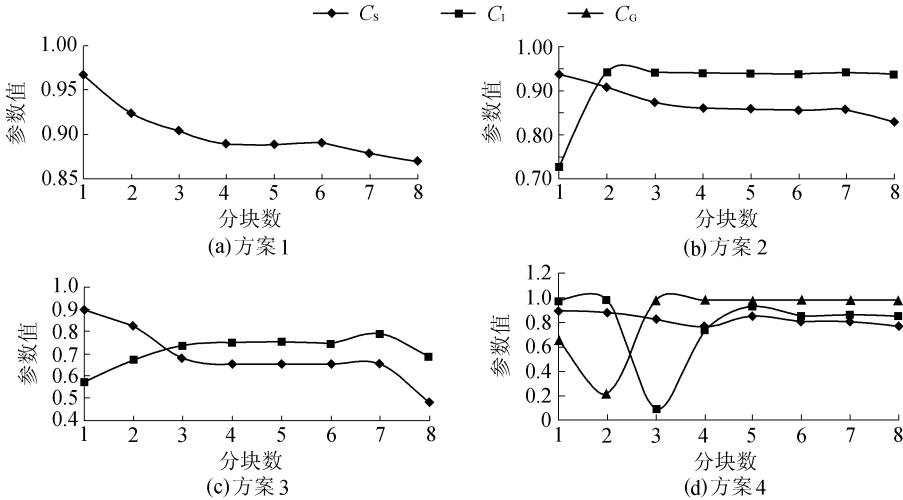


图4 参数值随分块数的变化(东湾流域)
Fig. 4 Variation of parameter with number of subdivisions (Dongwan watershed)

c. 王快流域。从图6和图7可以看出:方案2时, C_s 值随分块数的增加呈减小趋势,随后趋于稳定,为0.85~0.86, C_1 值比较稳定, C_6 值基本在0.95~0.96范围;方案3时, C_s 值随分块数的增加先减小后增大, C_6 值较稳定,约为0.997;方案4时, C_s 值随分块数的增加先减小后增大, C_1 值随分块数的增加先增大后减小, C_6 值较稳定,基本在0.997~0.998范围。综上所述,随分块数的增多,洪量、洪峰合格数及确定性系数大多呈增长趋势,伴有波动。

4 结 论

- a. 不同目标函数对参数优化的结果不同,其中式(1)与式(2)加权所得目标函数的优化参数稳定,结果最优。
- b. 当参数维数较低时,单纯形法是高效、稳健的优化算法。改变流域分块数,通过单纯形法自动优化,可以得到符合物理意义的参数值,并能看出参数的变化规律。同时优化参数 S_M 、 C_s 与 C_1 效果较好; C_6 可通

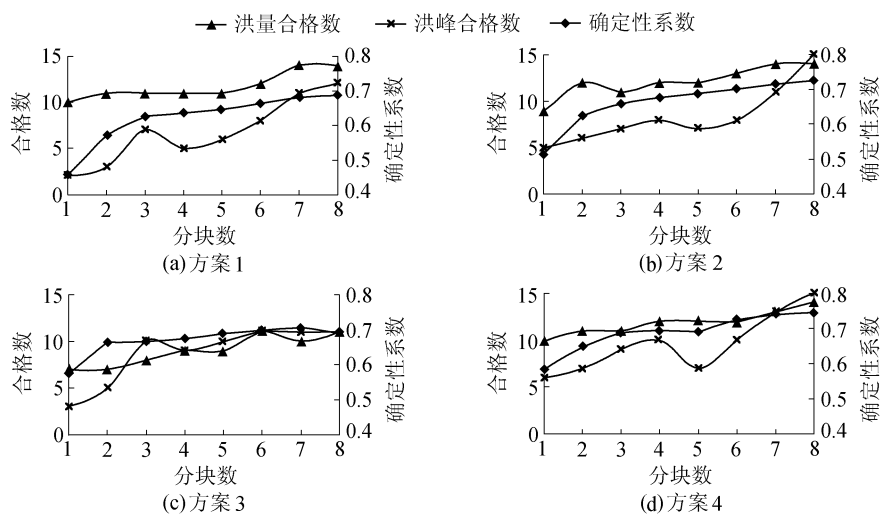


图5 合格数随分块数的变化(东湾流域)
Fig. 5 Variation of qualified amount with number of subdivisions (Dongwan watershed)

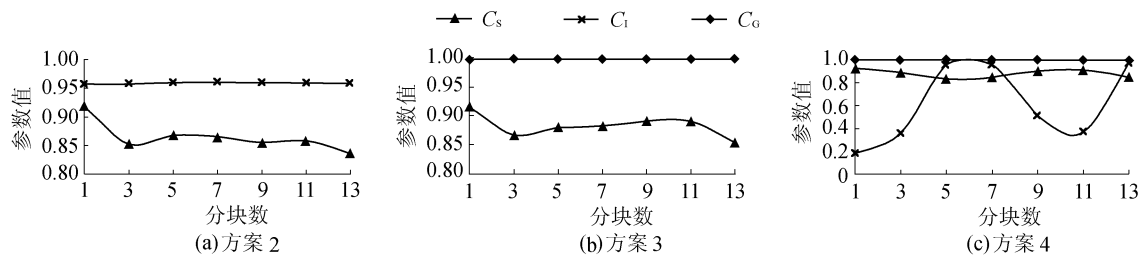


图6 参数值随分块数的变化(王快流域)
Fig. 6 Variation of parameter with number of subdivisions (Wangkuai watershed)

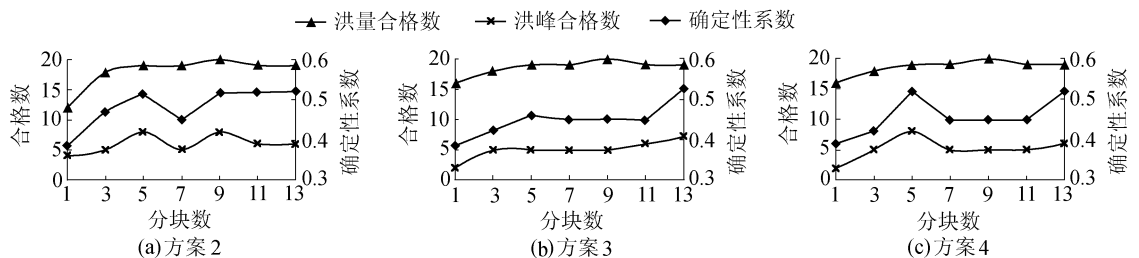


图7 合格数随分块数的变化(王快流域)
Fig. 7 Variation of qualified amount with number of subdivisions (Wangkuai watershed)

过分析退水曲线推求而出,不必参与参数率定。

c. 流域分块数变化引发降雨输入变化,导致模型产流量变化。流域分块数少,则降雨资料均化程度高,相同参数下模型产流量少;反之亦然。因此,模型分块数变化,产流及分水源参数必然发生变化,具体到新安江模型就是参数 S_M 发生变化。本文结果表明,流域分块数增加, S_M 增大。

d. 流域分块数变化,引发汇流串并联数变化。串联数指马斯京根分段连续演算河段数目,并联数指子流域数目。经本研究验证,流域分块数增加, C_s 值呈减小趋势, C_c 及 C_l 值保持稳定。

e. 随着流域分块数增加,屯溪、东湾及王快流域的洪量、洪峰合格数及确定性系数都呈增长趋势,说明 3 000 km² 左右的流域当分块数小于雨量站数时,无论是在湿润流域还是在半湿润及半干旱流域,分块数增加能够提高模拟精度。屯溪、东湾及王快流域分块数从 1 增加到 3 时,模拟精度明显改善;分块数大于 3 时模拟精度有改善但不明显。分块数等于 3 时,子流域面积约 1 000 km²,这也说明流域分块子流域面积不宜大于 1 000 km²,这样才有较好的模拟效果。

参考文献:

[1] LI Zhijia, KAN Guangyuan, YAO Cheng, et al. An improved neural network model and its application in hydrological simulation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000958.

[2] ZHANG Huilan, WANG Yujie, WANG Yunqi, et al. The effect of watershed scale on HEC-HMS calibrated parameters; a case study in the Clear Creek watershed in Iowa, U. S. [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(7): 2735-2745.

[3] AOUISSI J, BENABDALLAH S, CHABAANE Z L, et al. Sensitivity analysis of SWAT model to the spatial rainfall distribution and watershed subdivision in streamflow simulations in the Mediterranean context: a case study in the Joumine watershed. Tunisia [C]//IEEE. Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO): 2013 5th International Conference. Washington, D. C. : IEEE Computer Society, 2013: 1-6.

[4] TRIPATHE M P, RAGHUWANSHI N S, RAO G P. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(5): 1137-1156.

[5] KUMAR S, MERWADE V. Impact of watershed subdivision and soil data resolution on SWAT model calibration and parameter uncertainty[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(5): 1179-1196.

[6] 邱临静,郑粉莉, RUNSHENG Y. DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3754-3763. (QIU Linjing, ZHENG Fenli, RUNSHENG Y. Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3754-3763. (in Chinese))

[7] 李曼曼,韩会玲,刘晓英,等. SWAT 模型最佳子流域划分方案研究:以云南洱海流域为例[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 185-189. (LI Manman, HAN Huiling, LIU Xiaoying, et al. Study on optimal sub-division scheme of watershed using SWAT mode;a case study in Erhai Basin, Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(2): 185-189. (in Chinese))

[8] 赵人俊. 流域水文模拟新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.

[9] 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'anjiang model and its further development[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 1-5. (in Chinese))

[10] BARATI R. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using Nelder-Mead Simplex algorithm [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(11): 946-954.

[11] 辛朋磊,李致家,汤嘉辉,等. 新安江模型参数全局优化:以月潭流域为例[J]. 湖泊科学, 2011(4): 626-634. (XIN Penglei, LI Zhijia, TANG Jiahui, et al. Parameter global optimization of the Xin'anjiang model: a case of Yuetan Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2011(4): 626-634. (in Chinese))

[12] LI Zhijia, XIN Penglei, TANG Jiahui. Study of the Xinanjiang model parameter calibration [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1513-1521

[13] 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.

[14] 阚光远,李致家,刘志雨,等. 概念性水文模型与神经网络模型的耦合应用研究[J]. 水力发电学报, 2013(2): 9-13, 21. (KAN Guangyuan, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. Application and study on coupling of conceptual hydrological model and neural network model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013(2): 9-13, 21. (in Chinese))

[15] 董磊华,熊立华. 水文模型中不同目标函数的影响分析比较[J]. 水文, 2009, 29(3): 24-27. (DONG Leihua, XIONG Lihua. Effects of objective functions on performance of hydrological models[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(3): 24-27. (in Chinese))

[16] ZEHE E, BECKER R, BARDOSSY A, et al. Uncertainty of simulated catchment runoff response in the presence of threshold processes: role of initial soil moisture and precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1): 183-202.