

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.003

# 无资料地区水文模拟及相似性分析

姚 成<sup>1</sup>, 章玉霞<sup>1</sup>, 李致家<sup>1</sup>, 孙 龙<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部水文局, 北京 100053)

**摘要:** 基于新安江模型, 利用参数移植方法开展嵌套式流域无资料情况下的水文模拟研究。结果表明, 产流参数的移植精度较高, 汇流参数的移植精度相对较低, 流域坡度对其影响较大。在新安江次洪模型的的实际应用中, 需要对地貌特征加强考虑。通过对流域水文相似性分析, 发现在地形指数分布曲线相似的情况下可以移植模型的产流参数; 当采用地貌单位线进行流域汇流计算时, 参数移植的应用效果较好。

**关键词:** 新安江模型; 水文模拟; 水文相似性; 参数移植; 无资料地区; 屯溪流域; 嵌套流域

**中图分类号:** P338      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2013)02-0108-06

## Hydrological simulations and similarities in ungauged basins

YAO Cheng<sup>1</sup>, ZHANG Yuxia<sup>1</sup>, LI Zhijia<sup>1</sup>, SUN Long<sup>2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** Based on the Xin'anjiang model, the parameter transformation method was used for hydrological simulations in a nested ungauged basin. The results show that the accuracy of runoff simulations is better than that of flood peak simulations due to the effect of the basin slope. Hence, the effect of topographic attributes should be considered in operational application of the Xin'anjiang model to ungauged basins on an hourly time scale. The analysis of hydrological similarities indicates that the runoff parameters can be transformed when the distribution functions of the topographic index are similar for gauged and ungauged basins. Better results can be achieved using the geomorphologic unit hydrograph in ungauged basins.

**Key words:** Xin'anjiang model; hydrological simulation; hydrological similarity; parameter transformation; ungauged basin; Tunxi Basin; nested basin

无资料地区水文预报研究涉及水文科学的基础理论和方法,是水文科学研究中方兴未艾的研究热点和难点。为了推进无资料地区水文科学理论的发展,国际水文科学协会于 2003 年启动了 PUB (predictions in ungauged basins) 国际水文计划,意在用 10 a 时间集中研究无资料地区的水文预报问题,探索解决该问题的新途径和新方法,实现水文理论的重大突破,促进水文科学在解决实际问题中的应用<sup>[1-2]</sup>。PUB 计划的启动极大地激发了学者们开展无资料地区水文预报研究的热情<sup>[3-7]</sup>。

水文模型作为一种研究流域内复杂水文现象的有效工具,一直在 PUB 研究领域发挥着重要作用。由于在无资料地区没有或缺乏历史观测资料,不能进行模型参数的率定与检验,因此,解决参数的确定问题是水文模型在无资料地区应用的关键所在。目前,常用的模型参数确定方法包括参数移植、参数估计以及参数的区域回归方法等。随着对 PUB 问题研究的深入,参数移植法在实际预报工作中的应用日趋广泛<sup>[8]</sup>。

笔者基于新安江模型,以位于皖南山区的嵌套式屯溪流域为例,采用 SCE-UA 算法率定屯溪流域的模型参数,并假设其内部子流域为无资料流域,对模型参数进行移植,在不经重新率定参数的情况下客观评价新安江模型模拟嵌套站点出流过程的能力,并对影响参数移植精度的主要因素以及流域间的水文相似性进行

分析,以期为进一步提高无资料地区水文预报精度奠定基础。

## 1 新安江模型及其参数率定

### 1.1 模型简介

新安江模型作为一个概念性水文模型,自建立以来已得到大量的应用验证,取得良好的验证效果,是目前在中国的实时洪水预报中应用最广泛的水文模型之一。该模型先根据降水和下垫面特征将流域划分为若干个单元,然后对每个单元分别进行产汇流计算,得到各个单元流域的出流过程,最后将其演算至流域出口并进行叠加,即可得到整个流域的出流过程。新安江模型由4个模块组成,包括蒸散发模块、产流模块、分水源模块以及汇流模块,每个模块分别对应不同的模型参数<sup>[9]</sup>。在进行模型的实际应用时,如何确定合理可靠的模型参数往往是需要解决的首要问题<sup>[10]</sup>。

### 1.2 参数率定方法

随着计算机技术与现代数学方法的发展,新安江模型参数的率定方法正逐渐由人工试错法向自动优化方法转变。其中,比较具有代表性的是SCE-UA全局优化算法。该算法将基于确定性的复合形搜索技术与自然界中的生物竞争进化原理相结合,能够根据目标函数快速搜索到全局最优解,是一种可以有效解决非线性约束最优化问题的方法<sup>[11]</sup>。笔者即是采用SCE-UA算法对新安江模型的参数进行率定和检验。

当采用SCE-UA算法进行水文模型参数率定时,目标函数的选取对于率定结果有着显著影响,不同的目标函数往往会得到不同的优化结果。为了使SCE-UA算法中的目标函数能够较全面地描述由实测资料所反映的水文特征,根据GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》中的精度评定指标,采用综合误差系数( $C_{EC}$ )<sup>[12-13]</sup>的方法建立目标函数( $F_{un}$ ):

$$C_{EC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \tag{1}$$

$$F_{un} = 1 - C_{EC} \tag{2}$$

式中: $E_i$ ——任意一个独立的误差或精度评定指标; $n$ ——评定指标的个数。

对于洪水过程而言,以径流深相对误差( $R_{RE}$ )、洪峰相对误差( $R_{PE}$ )、峰现时差( $P_{TE}$ )以及确定性系数( $D_C$ )作为评定指标,则 $n=4$ ;对于日径流过程而言,可以只采用 $R_{PE}$ 与 $D_C$ 作为评定指标,则 $n=2$ 。 $C_{EC}$ 介于0~1之间, $C_{EC}$ 值越大,目标函数 $F_{un}$ 值越小,表明模型计算结果越好;反之, $C_{EC}$ 值越小, $F_{un}$ 值越大,表明模型计算结果越差。

## 2 应用实例

### 2.1 研究流域概况

选用位于皖南山区的屯溪流域作为研究流域,该流域邻近中国东南沿海,属亚热带季风气候区,四季分明,气候温和,多年平均气温约为17℃。屯溪流域面积为2 692 km<sup>2</sup>,地势西高东低,相对高差较大。该流域植被良好,雨量充沛,多年平均降雨量约为1 800 mm,降水在年内、年际分配极不均匀,汛期内的降雨量一般占年总降雨量的60%以上,为典型的湿润流域。除屯溪水文站外,流域内还有6个水文站(图1),均具有较丰富的日径流资料与次洪过程资料。屯溪流域及其嵌套子流域的地貌特征值及其相关资料见表1。表1中的流域地貌特征值均是基于数字高程模型(DEM)<sup>[14]</sup>提取得到的。

### 2.2 应用结果分析

基于SCE-UA算法,利用屯溪流域70%的实测资料率定新安江模型参数,剩余30%的资料用于模型参数检验。对于月潭、万安等嵌套子流域,模型参数直接采用屯溪流域的率定结果,不再进行模型参数的重新率定。图2、图3为屯溪流域及其嵌套子流域的率定期与检验期内日径流模拟结果与次洪模拟结果箱形图,

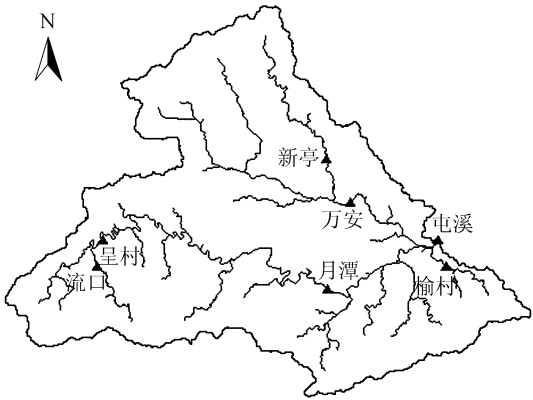


图1 屯溪流域水系及其嵌套水文站点分布

Fig. 1 Drainage network of Tunxi Basin and locations of nested hydrological stations

该图描述了各个精度统计结果的最大值、上四分位数、中位数、下四分位数及其最小值,表明新安江模型在不同流域模拟精度的变化幅度。表2统计了率定期与检验期内模型模拟结果的合格率、平均相对误差水平以及 $D_c$  均值的整体效果。

表1 屯溪流域及其嵌套子流域概况

Table 1 Characteristics of Tunxi Basin and nested sub-basins

| 流域及嵌套子流域 | 流域面积/km <sup>2</sup> | 河道坡度/% | 主河道长/km | 平均高程/m | 日资料年数 | 洪水场次数 |
|----------|----------------------|--------|---------|--------|-------|-------|
| 屯溪       | 2692                 | 0.15   | 143.9   | 380.0  | 42    | 35    |
| 月潭       | 952                  | 0.21   | 109.8   | 428.0  | 35    | 51    |
| 万安       | 865                  | 0.40   | 56.1    | 363.6  | 17    | 33    |
| 呈村       | 290                  | 0.95   | 36.2    | 582.7  | 25    | 32    |
| 新亭       | 184                  | 0.78   | 41.1    | 520.3  | 36    | 48    |
| 流口       | 107                  | 0.81   | 22.6    | 555.9  | 19    | 22    |
| 榆村       | 96                   | 1.53   | 22.1    | 452.7  | 13    | 39    |

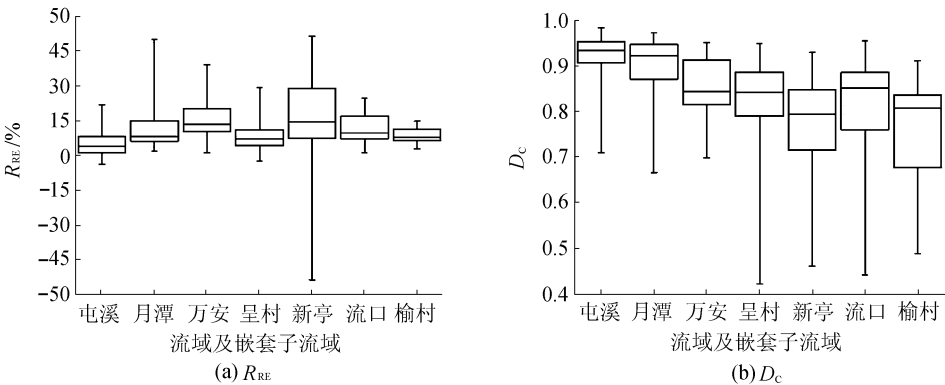


图2 新安江日模型模拟结果统计箱形图

Fig. 2 Boxplots of statistics for the daily Xin'anjiang model simulations

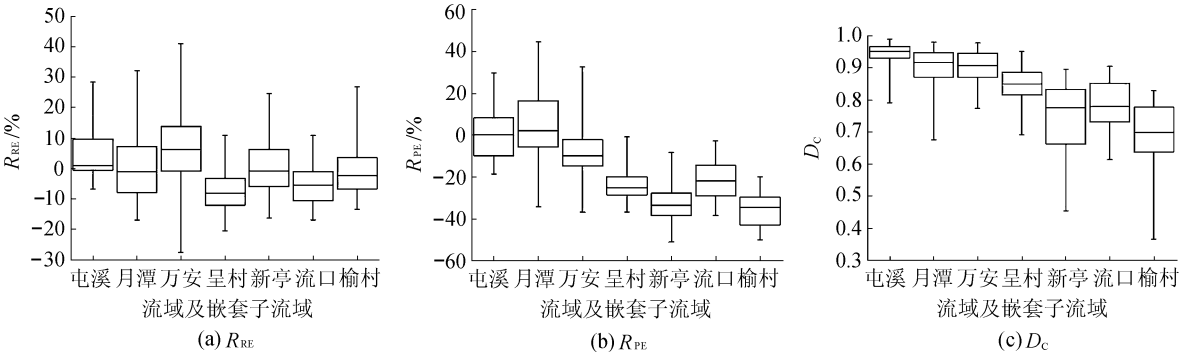


图3 新安江次洪模型模拟结果统计箱形图

Fig. 3 Boxplots of statistics for hourly Xin'anjiang model simulations

由图2、图3及表2可知,采用SCE-UA优化算法,新安江模型能够很好地用于屯溪流域的日径流与洪水过程模拟,可以取得较高的模拟精度。对于嵌套子流域而言,采用参数移植法的模型模拟径流深与过程线的精度相对较高,对 $R_{RE}$ 与 $D_c$ 的控制相对较好;而模拟的洪峰与峰现时间精度相对较低。若以 $D_c$ 作为精度等级评定标准,参数移植精度等级均可达乙级以上;若以 $R_{PE}$ 合格率作为等级评定标准,只有月潭、万安2个流域的参数移植精度可达乙级,其他4个流域的模拟精度甚至达不到丙级。比较而言,子流域面积越大,洪峰模拟精度相对越高。该结果表明,在嵌套式流域采用参数移植法进行新安江模型实际应用时,径流深计算结果一般能够满足精度需求,获得的洪水过程比较合理,但洪峰误差相对较大,在实际应用时需加以重视。

在用新安江模型进行次洪过程模拟时,流域蓄水消退系数( $C_s$ )的取值对模拟结果影响相当大<sup>[15]</sup>。由参数移植结果可知,即使在嵌套式流域内进行 $C_s$ 的移植,洪峰模拟精度仍然不高。分析其原因,可能主要是流域的坡度( $S_A$ )差异导致。一般而言, $S_A$ 越小,流域的汇流速率越慢,此时受到的流域调蓄作用相对越强,

$C_s$  取值也应该较大;反之, $S_A$  越大,汇流越集中,流域的汇流速率越快,受到的流域调蓄作用越弱, $C_s$  取值也应该较小。由于屯溪流域及嵌套子流域间的坡度值存在较大的差异,直接采用屯溪流域的  $C_s$  模拟子流域的洪水过程,其精度势必会受到影响。因此,在新安江次洪模型的参数移植中,有必要对地貌特征加强考虑。

表 2 新安江次洪模型模拟结果误差统计

| Table 2 Accuracy statistics of hourly Xin' anjiang model simulation results |          |          |          |             |             |            |          |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|------------|----------|
| 流域及嵌套子流域                                                                    | 合格率/%    |          |          | 平均相对误差水平    |             |            | $D_c$ 均值 |
|                                                                             | $R_{RE}$ | $R_{PE}$ | $P_{TE}$ | $R_{RE}/\%$ | $R_{PE}/\%$ | $P_{TE}/h$ |          |
| 屯溪                                                                          | 94.3     | 91.4     | 94.3     | 6.1         | 10.2        | 1          | 0.94     |
| 月潭                                                                          | 96.1     | 78.4     | 80.4     | 7.9         | 13.3        | 3          | 0.90     |
| 万安                                                                          | 90.9     | 84.8     | 100      | 9.7         | 11.2        | 1          | 0.91     |
| 呈村                                                                          | 96.9     | 21.9     | 87.5     | 8.4         | 23.8        | 3          | 0.85     |
| 新亭                                                                          | 97.9     | 12.5     | 89.6     | 7.6         | 32.6        | 2          | 0.75     |
| 流口                                                                          | 100      | 40.9     | 54.5     | 7.3         | 21.8        | 4          | 0.78     |
| 榆村                                                                          | 97.4     | 2.6      | 79.5     | 5.9         | 35.5        | 3          | 0.69     |

3 水文相似性分析

通过以上分析可以发现,在嵌套式流域进行新安江模型的参数移植,能够取得较好的径流深模拟结果,但洪峰模拟精度不高,表明研究流域在产流过程上具有一定的相似性,而流域汇流过程差异较大。一般而言,流域水文响应是降雨和下垫面条件综合作用的产物,当降雨条件一定时,流域的地形地貌特征对流域水文响应有着重要的影响<sup>[16]</sup>。因此,笔者以研究流域的地貌特征为基础,开展流域的水文相似性分析,以探寻提高无资料地区参数移植精度的方法。

就流域产流而言,可将地形指数作为一个相似性判别标准,因为它反映了土壤缺水量与产流过程的空间分布<sup>[17-18]</sup>。地形指数的数学表达为  $\ln\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right)$ ,其中  $\alpha$  为单宽集水面积, $\tan\beta$  为局部地表坡度,描述了径流在流域中任意一点的累积趋势以及在重力作用下顺坡移动的趋势<sup>[19]</sup>。一般而言,在湿润地区地形指数大的地方往往位于河道附近或河谷低洼处,而这些区域的地下水埋深较浅,包气带相对较薄,易于产流;相反,地形指数小的地方大多位于流域的上游山坡,远离河道,包气带相对较厚,不易产流,这与实际的产流现象基本相符<sup>[12]</sup>。因此,可以认为流域上地形指数相同的点具有相同的降雨-径流响应,而通过流域的地形指数分布曲线即可模拟变动的产流面积。对于不同的研究流域,即可认为是地形指数分布曲线相同或相似的流域,在降雨-径流过程上具有一定的相似性。

根据地形指数的计算方法,利用 DEM 信息,对屯溪流域及其嵌套子流域的地形指数进行计算,提取各个流域的地形指数分布曲线如图 4 (a)所示。可以看出,屯溪流域与其各子流域的地形指数分布曲线很相似,结合新安江模型的产流模拟结果(图 2 (a)、图 3 (a)与表 2 中  $R_{RE}$  的统计结果),进一步表明,在地形指数分布曲线相似的流域进行模型产流参数移植,可以取得较高的产流计算精度,地形指数分布曲线的相似性可作为判别新安江模型产流参数能否进行移植的标准。

就流域汇流而言,它是地貌扩散与水动力扩散共同作用的结果,基于统计物理学方法的地貌单位线理论使流域汇流同流域的地形地貌特征有机地结合起来<sup>[20]</sup>,因此也可将地貌单位线作为一个相似性判别标准。文献[21]采用雨滴汇流时间等于其流路长度与其速度之商这一基本关系式,基于 DEM 信息,提出由流路长度分布律和坡度分布律确定地貌单位线的方法,取得了良好的验证效果。笔者采用该方法提取了屯溪流域与其各子流域的地貌单位线,如图 4 (b)所示。可以看出,各个流域的地貌单位线存在较大的差异性,表明流域间汇流过程的相似性较小,这与前述的分析结论相吻合。

4 基于地貌单位线的参数移植分析

通过新安江模型参数移植的应用结果以及相似性分析可以看出,若流域间地形指数分布曲线相似度较高,则可以直接移用新安江模型的产流参数,且能够获得较好的径流深计算结果;但若在地貌单位线相似度不高的情况下直接移用模型的汇流参数,则不易获得高精度的洪峰计算结果。新安江模型中流域汇流演算采用滞后演算法,其中敏感性参数  $C_s$  受流域地貌特征的调蓄作用,在不同流域间难以直接移用。考虑到地貌单位线理

论能够更好地反映地貌特征对流域汇流的影响,笔者尝试将该理论用于新安江模型中,即采用新安江模型进行流域的产流计算,采用地貌单位线进行流域的汇流计算,进而分析此种情况下的参数移植精度。

在确定地貌单位线时所用的坡面流速计算公式为<sup>[19]</sup>

$$v=aS^{0.5}$$

(3)

式中: $v$ ——坡面流速; $S$ ——坡面坡度; $a$ ——反映坡面糙率的经验系数。

由于 $S$ 可以根据DEM计算得到,在确定地貌单位线时需要率定的参数只有 $a$ 。利用式(3)提取不同流域地貌单位线时,若流域的坡度存在差异,即使采用相同的 $a$ 值,所获得的结果亦不相同,仍然能够在一定程度上反映流域间汇流过程的差异性。

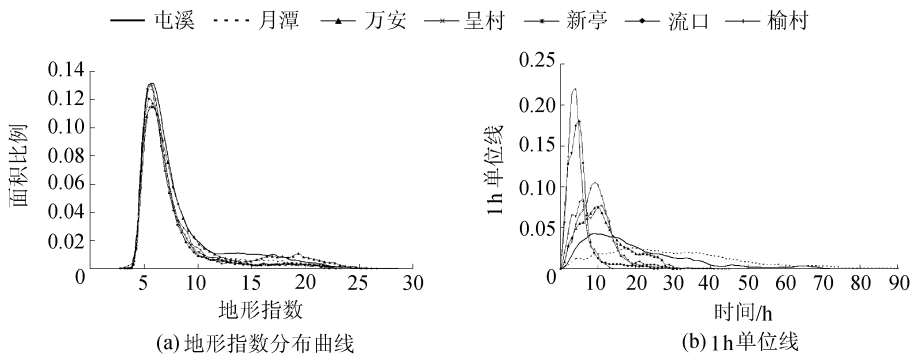


图4 基于DEM提取的地形指数分布曲线和1h单位线

Fig. 4 Distribution functions of topographic index and 1-h unit hydrograph  $u(1,t)$  obtained from DEM

根据屯溪流域的次洪过程资料,通过率定得 $a=1.76\text{ m/s}$ ,将该参数值移用于月潭、万安等6个嵌套子流域,所得到的洪水模拟结果见表3。可以看出,在新安江模型中采用地貌单位线法进行汇流计算也能取得较高的计算精度。对比表2和表3后发现,对于除月潭以外的5个子流域而言,移用地貌单位线参数 $a$ 时的洪峰模拟精度明显优于移用滞后演算法参数 $C_s$ 时的洪峰模拟精度。该结果表明,在无资料地区洪水模拟预测中,可用地貌单位线法计算流域的汇流过程,以便更好地考虑地貌特征的影响,这将有助于提高无资料地区的参数移植精度。

表3 基于地貌单位线的新安江次洪模型模拟结果误差统计

| 流域及嵌套子流域 |  | 合格率/%    |          |          | 平均相对误差水平    |             |            | $D_c$ 均值 |
|----------|--|----------|----------|----------|-------------|-------------|------------|----------|
|          |  | $R_{RE}$ | $R_{PE}$ | $P_{TE}$ | $R_{RE}/\%$ | $R_{PE}/\%$ | $P_{TE}/h$ |          |
| 屯溪       |  | 94.3     | 91.4     | 94.3     | 6.0         | 10.2        | 1          | 0.94     |
| 月潭       |  | 96.1     | 72.5     | 78.4     | 8.2         | 15.6        | 3          | 0.89     |
| 万安       |  | 90.9     | 87.9     | 100      | 9.5         | 9.8         | 1          | 0.92     |
| 呈村       |  | 100      | 75.0     | 93.8     | 8.1         | 13.6        | 2          | 0.78     |
| 新亭       |  | 97.9     | 81.3     | 93.8     | 7.5         | 12.1        | 1          | 0.77     |
| 流口       |  | 100      | 63.6     | 86.4     | 7.5         | 20.4        | 2          | 0.79     |
| 榆村       |  | 97.4     | 87.2     | 97.4     | 5.8         | 12.5        | 1          | 0.83     |

5 结 语

- a. 采用基于综合误差系数的SCE-UA优化算法,新安江模型能够很好地用于屯溪流域的日径流与洪水过程模拟,可以取得甲级模拟精度。
- b. 对于嵌套的6个子流域而言,进行新安江模型的参数移植,径流深模拟结果较好,获得的出流过程比较合理,但洪峰误差和峰现时差较大。在次洪模拟时应对地貌特征加强考虑,建立模型汇流参数与地貌特征的定量关系,寻求参数的地貌规律,降低其对观测资料的依赖性。
- c. 地形指数分布曲线的相似性可以作为判别新安江模型产流参数能否进行移植的标准。若流域间地形指数分布曲线相似度较高,可以考虑直接移用模型产流参数。对于地貌单位线相似性较小的流域,不建议直接移用模型的滞后演算法参数。在进行无资料地区汇流过程模拟时,采用地貌单位线法有助于提高参数移植的精度与适应性。地貌单位线的相似性能否直接作为水文模型汇流参数移植的判别标准尚需进一步验

证。同时,在进行无资料地区参数移植时还应该进一步加强对土壤、植被等因素的考虑。

## 参考文献:

- [1] SIVAPALAN M, TAKEUCHI K, FRANKS S, et al. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(6): 857-880.
- [2] 贾仰文,王浩,倪广恒,等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [3] 刘苏峡,刘昌明,赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1333-1339. (LIU Suxia, LIU Changming, ZHAO Weimin. Towards the methodology for predictions in ungauged basins[J]. *Process in Geography*, 2010, 29(11): 1333-1339. (in Chinese))
- [4] BÁRDOSSY A, SINGH S. Robust estimation of hydrological model parameters[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 5: 1641-1675.
- [5] YAO Cheng, LI Zhijia, BAO Hongjun, et al. Application of a developed Grid-Xin'anjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(9): 923-934.
- [6] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xin'anjiang model using geographically based information[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 468/469: 47-62.
- [7] 姚成,纪益秋,李致家,等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2012, 40(1): 42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(1): 42-47. (in Chinese))
- [8] WAGENER T, WHEATER H, GUPTA V. Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments[M]. London: Imperial College Press, 2004.
- [9] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [10] 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))
- [11] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. *Water Resource Research*, 1992, 28(4): 1015-1031.
- [12] 姚成. 基于栅格的新安江(Grid-Xin'anjiang)模型研究[D]. 南京:河海大学,2009.
- [13] 叶金印,姚成,李京兵,等. 综合误差系数在新安江模型参数全局优化中的应用[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2013, 41(1): 1-5. (YE Jinyin, YAO Cheng, LI Jingbing, et al. Global parameter optimization for the Xin'anjiang model based on the comprehensive error coefficient[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2013, 41(1): 1-5. (in Chinese))
- [14] 中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台. SRTM 90 米分辨率数字高程原始数据[EB/OL]. [2009]. <http://datamirror.csdb.cn>.
- [15] ZHAO Renjun, LIU Xinren. The Xin'anjiang model[C]//SINGH V. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado: Water Resources Publications, 1995: 215-232.
- [16] 李致家,于莎莎,李巧玲,等. 降雨-径流关系的区域规律[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2012, 40(6): 597-604. (LI Zhijia, YU Shasha, LI Qiaoling, et al. Regional pattern of rainfall-runoff relationship[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(6): 597-604. (in Chinese))
- [17] BEVEN K, KIRKBY M. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [18] 孔凡哲,芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. *地理研究*, 2003, 22(6): 709-715. (KONG Fanzhe, RUI Xiaofang. Hydrological similarity of catchments based on topography[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(6): 709-715. (in Chinese))
- [19] QUINN P, BEVEN K, LAMB R. The  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework[J]. *Hydrological Processes*, 1994, 9: 161-185.
- [20] 芮孝芳. 水文学研究进展[M]. 南京:河海大学出版社,2007.
- [21] 芮孝芳. 由流路长度分布律和坡度分布律确定地貌单位线[J]. *水科学进展*, 2003, 14(5): 602-606. (RUI Xiaofang. Study of determining geomorphologic unit hydrograph by means of probability density functions of path length and slope[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(5): 602-606. (in Chinese))