

# 新安江模型和人工神经网络的耦合应用

宋晓猛, 孔凡哲

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 提出了一种集成人工神经网络的概念性水文模型, 该模型是一种半分布式概念性水文模型, 考虑了降雨的空间变异性, 流域特征的不均匀性等因素对径流过程的影响。采用遗传算法进行概念性模型参数优选, 同时考虑雨量站的空间分布, 利用 GIS 和 DEM 数据进行流域单元划分; 对于每个子流域, 考虑模型输入参数和降雨资料的空间分布特性, 进行产流计算; 在径流演算过程中, 利用人工神经网络的非线性映射方法代替传统概念模型中线性叠加方法计算整个流域的出口流量过程。以半湿润的淮河上游支流的大坡岭流域为例, 对模型的可行性进行验证, 并与单一的新安江模型的结果进行了比较。验证结果表明, 集成人工神经网络技术和新安江模型的耦合模型有较好的模拟和预报结果。

**关键词:** 新安江模型; 人工神经网络; 遗传算法; 耦合模型; 半分布式模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)06-0135-04

中图分类号: P338.9

## Application of Xinanjiang Model Coupling with Artificial Neural Networks

SONG Xiaomeng, KONG Fanzhe

(School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract:** A hybrid form of rainfall-runoff models integrating artificial neural networks (ANNs) with conceptual models is proposed. The integrated model is a semi-distributed form of conceptual rainfall-runoff models, in consideration of the spatial variation of rainfall, the heterogeneity of watershed characteristics and their impacts on runoff. Genetic algorithm is used to optimize the parameters of the conceptual model and GIS software and DEM data are used to divide the whole catchment into sub-catchments based on the spatial distribution of rain-gage stations. As a result, in each sub-catchment, runoff generation is simulated in consideration of the spatially distributed model parameters and rainfall inputs. In runoff routing, instead of a linear superposition of routed runoff from all sub-catchments as traditionally performed in a semi-distributed form of conceptual models, artificial neural networks as an effective tool in nonlinear mapping are employed to estimate runoff. The feasibility of the new approach is demonstrated in Dapoling watershed, the upper tributary of Huaihe River basin, and the results of coupling model are compared with those of the Xinanjiang model. Verified results of the model indicate that the approach integrating artificial neural networks with conceptual models presented in this paper can achieve the promising results with acceptable accuracy for flood event simulation and forecast.

**Keywords:** Xinanjiang model; artificial neural networks; genetic algorithm; coupling model; semi-distributed model

流域水文模型是水文科学中的一个最重要的分支之一, 是研究水文自然规律和解决水文实践问题的主要工具, 按照模型构建的基础可以分为系统理论模型、概念模型和物理模型<sup>[1]</sup>。在近半个世纪以来, 许多流域水文模型被应用于流域防洪和降雨径流过程研究, 包括系统模型中的简单线性模型(SLM), 线性扰动模型(LPM), 约束线性系统模型(CLS), 人工神经网络模型(ANN)等, 集总式概念性水文模型中的 Stanford 模

型<sup>[2]</sup>, Sacramento 模型<sup>[3]</sup>和 Tank 模型<sup>[4]</sup>, 半分布式概念性水文模型中的 Topmodel 模型<sup>[5-6]</sup>, 新安江模型<sup>[7]</sup>和 Arno 模型<sup>[8]</sup>, 以及基于物理模型的分布式水文模型 SHE 模型<sup>[9]</sup>, Dhsvm 模型<sup>[10]</sup>, Dbsim 模型<sup>[11]</sup>, Ihdm 模型<sup>[12]</sup>, Topkapi 模型<sup>[13]</sup>和 Gbhm 模型<sup>[14]</sup>等。相较于系统模型单纯的经验关系和物理模型单纯的数学物理意义, 概念性模型综合利用了一些简单的物理概念和经验关系, 以其模型结构简单, 参数率定方

收稿日期: 2010-04-13

修回日期: 2010-05-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于数字平台的分布式流域水文模型研究”(50309002)

作者简介: 宋晓猛(1987-), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 硕士研究生, 研究方向为水文预报和流域水文模拟。E-mail: wenqingsxm@126.com

便,因此被广泛应用于洪水预报过程<sup>[15]</sup>。一般而言,概念性水文模型是集总式模型,认为流域表面上各点的水力学特征是均匀分布的,把整个流域作为一个单元体,但是降雨径流转化过程是一个非常复杂的水文现象,包含很多个相互作用的过程,如蒸散发,下渗,产流和汇流演算等过程,因此流域地形特征的不均匀性以及模型输入资料的时空变化性,使得传统的概念性水文模型的问题显现出来<sup>[16]</sup>。

基于传统新安江模型和人工神经网络模型的不足,许多学者提出了一些改进,覃光华等<sup>[17]</sup>运用改进的自适应 BP 算法进行河道洪水预报,结果较为满意;黄胜<sup>[18]</sup>将混沌相空间理论和神经网络相结合用于径流系统的中长期预报,提供了较好的预报精度;刘星才等<sup>[19]</sup>集合消除趋势波动分析和人工神经网络技术用于水文序列预测,明显提高了人工神经网络的精度。孔凡哲和李莉莉<sup>[20]</sup>利用 DEM 数据建立了流域形状和地形特征与汇流参数的定量关系,提高了模拟精度;周买春和 Jayawardena<sup>[21]</sup>提出了一种双抛物线型的土壤蓄水容量曲线以改进新安江产流模型;李致家等<sup>[22]</sup>运用 DEM 网格数据构建了栅格新安江模型。但以上研究仅针对各自模型内部改进,并不涉及不同类型模型的耦合问题。因此本研究提出了集成 ANN 和新安江模型(XAJ)的耦合模型(ANN-XAJ),以便有效地解决降雨—径流过程的非线性动力学特征问题。

## 1 基于 ANN 和 XAJ 的耦合模型

### 1.1 耦合模型框架

随着水文模型不断发展,传统意义的系统理论模型和集总式概念性模型在应用中存在很多不足,但严格意义的分布式物理模型应用由于技术水平而受到限制,为此出现了半分布式的水文模型。而考虑降雨和模型参数空间变化产生的半分布式概念模型作为一种改进,提高了模型的性能,但其采用线性叠加的方法计算流域出口总流量,忽略了降雨径流转化过程的非线性特性,基于此本研究提出了融合 ANN 和新安江模型的耦合模型(ANN-XAJ),基本结构如图 1 所示。整体上可以分为两个部分,第一部分是新安江模型计算各个子流域的出口流量,第二部分是采用 ANN 模型将各个子流域的出口流量演算到输出层即流域总出口流量。

### 1.2 模型计算

1.2.1 单元划分 在划分单元流域时,应考虑雨量站的空间分布,保证每个单元流域内都有雨量站,同时尽可能以自然流域分水线为界划分单元,采用

DEM 数据,利用 ArcView 中 HEG-GeoHMS 模块划分单元流域。

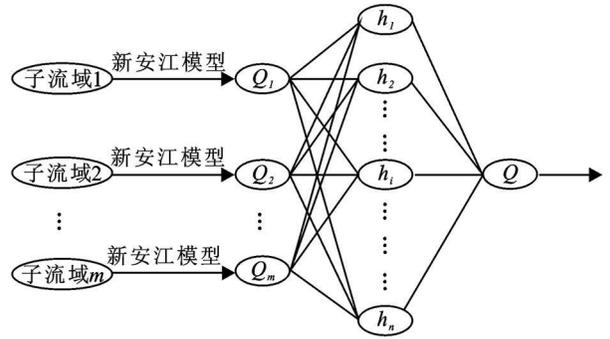


图 1 神经网络和新安江模型的耦合模型

1.2.2 产流计算 采用三水源新安江模型的蓄满产流机制,利用流域蓄水容量曲线进行产流计算。

1.2.3 汇流计算 地表径流,壤中流和地下径流采用线性水库的计算公式,单元流域河网汇流过程采用马斯京根法计算,单元流域出口流量演算到总流域出口采用 3 层 BP 模型计算。

1.2.4 参数率定 选用多目标遗传算法进行新安江模型和人工神经网络模型率定,得到优化的模型参数。选择洪峰流量误差和洪量误差最小最为率定参数的目标函数<sup>[23]</sup>,即

$$\min F = \alpha F_1 + (1 - \alpha) F_2 \quad (1)$$

式中:  $\alpha$ ——权重系数,本文选择其值为 0.5;  $F_1$ ——洪峰误差;  $F_2$ ——洪量误差,具体计算公式为:

$$F_1 = \left[ \sum_{i=1}^n (Q_0(i) - Q_c(i))^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^n |R_0(i) - R_c(i)| \quad (3)$$

式中:  $n$ ——资料系列长度;  $Q_0$ ——实测洪峰值;  $Q_c$ ——计算洪峰值;  $R_0$ ——实测洪量;  $R_c$ ——计算洪量。

### 1.3 不同模型模拟结果的比较

根据《水文情报预报规范(SL250-2000)》中洪水预报精度评定选择相对误差和确定性系数为评价指标<sup>[24]</sup>。

$$\varepsilon = \frac{y_c - y_0}{y_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ci} - y_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_o)^2} \quad (5)$$

式中: DC——确定性系数;  $y_c$ ——预报值;  $y_0$ ——实测值;  $\bar{y}_o$ ——实测值的均值。

## 2 应用实例

### 2.1 研究区域

选择淮河上游支流大坡岭流域作为研究区域验证耦合模型应用效果。大坡岭水文站是淮河干流上

游的第一个控制水文站。该站控制流域面积 1 640 km<sup>2</sup> 以上河流长度 73 km, 多年平均降雨量 1 050 mm, 流域内主要雨量站 6 个。流域内多为山区丘陵, 植被良好, 经过多年实测资料分析, 最大土壤蓄水量  $I_m$  为 70 mm, 其大坡岭水文站实测洪水资料序列较长, 本研究选择其 1978—2000 年间的 10 场洪水资料验证模型。

### 2.2 模型应用

模型选择大坡岭流域 10 场洪水过程, 其中 7 场用于优选模型参数, 3 场用于验证模型, 每场洪水过程的计算时段为 1 h。在模型中采用多目标遗传算法进行模型参数率定, 可得优选模型参数如表 1 所示, 根据雨量站的空间分布划分流域单元, 利用 ArcView 和流域 DEM 数据信息进行单元划分, 划分结果如图 2 所示, 通过计算可得到流域单元 A, B, C, D, E 和 F 的面积权重分别为 0.27, 0.19, 0.16, 0.12, 0.15 和 0.11。

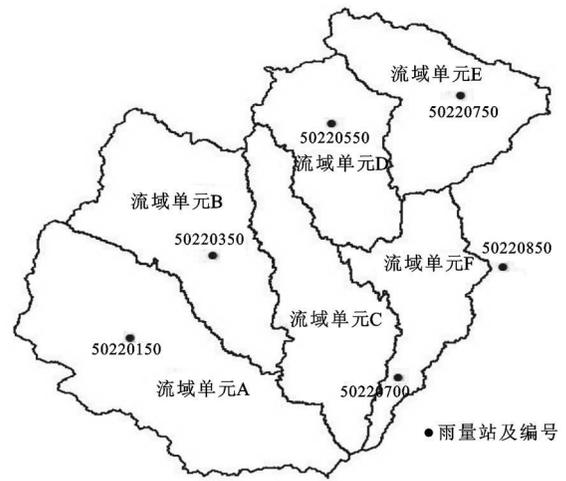


图 2 根据雨量站划分的子流域

注: 流域单元 C 无雨量站, 其值采用单元 B 和 F 雨量的加权平均值; 单元 F 的雨量值采用雨量观测站 50220700 和 50220850 的加权平均值。

表 1 新安江模型参数优选结果

KC	WM	WUM	WLM	B	C	SM	EX	KI	KG	CS	CI	CG	KE	XE	L
0.992	130	20	80	0.3	0.1	18.0	1.2	0.228	0.472	0.8	0.563	0.981	1.6	0.25	0

注: KC 蒸散发折算系数; WM 流域平均蓄水容量; WUM 上层蓄水容量; WLM 下层蓄水容量; B 蓄水容量曲线指数; C 深层蒸散发系数; SM 自由水蓄水容量; EX 自由水蓄水容量曲线指数; KI 壤中流出流系数; KG 地下水出流系数; CS 地表消退系数; CI 壤中流消退系数; CG 地下水库消退系数; KE 马斯京根模型参数; XE 马斯京根模型参数; L 滞后时间。

### 2.3 结果分析

10 场洪水过程模拟结果如表 2 所示, 同时作为对比, 也提供了原始新安江模型的计算结果, 根据误差统计结果显示, ANN—XAJ 耦合模型模拟各场次降雨的洪峰流量误差均小于 20%, 其中最小的为 0.09%, 最大的为 19.16%, 新安江模型最小为 1.42%, 最大的为 21.85%, 从洪量误差判断, ANN—XAJ 耦合模型计算的结果较好, 均小于 20%, 最小为

- 0.8%, 最大为 13.60%, 而新安江模型最小为 3.01%, 最大为 - 22.13%。此外, 比较根据计算结果选择率定的 910705 次洪水过程和验证的 980803 次洪水过程结果(图 3)可以看出, 耦合模型的应用结果达到了预报的精度要求。总体分析表明, ANN—XAJ 耦合模型在该区的应用结果略好于新安江模型, 具有较好的模拟和预报精度。

表 2 各洪水事件的模型结果比较

洪水编号	降雨量/ mm	实测洪峰流量/ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	XAJ 模型			ANN—XAJ 耦合模型			
			洪峰流量 误差/ %	洪量 误差/ %	确定性 系数	洪峰流量 误差/ %	洪量 误差/ %	确定性 系数	
模型 率定	780623	215.9	1 510	16.61	- 4.57	0.950	10.49	- 1.76	0.949
	800623	181.5	1 880	1.42	5.94	0.959	- 3.47	9.04	0.944
	840612	145.3	1 595	6.29	- 4.04	0.967	5.45	7.31	0.965
	870605	111.4	1 650	8.10	8.96	0.982	0.09	12.19	0.965
	890606	245.6	3 280	21.85	- 6.29	0.936	19.16	- 1.01	0.942
	910705	105.0	1 540	- 3.88	7.07	0.936	3.71	9.47	0.919
	910805	171.8	1 540	- 10.69	3.01	0.967	- 16.77	13.60	0.939
模型 验证	960628	134.8	1 550	4.24	- 22.13	0.864	- 2.09	- 7.92	0.880
	980803	159.4	1 730	3.60	- 10.51	0.905	- 1.91	- 0.80	0.902
	000602	208.4	1 950	1.68	- 18.94	0.921	- 6.04	- 11.98	0.943

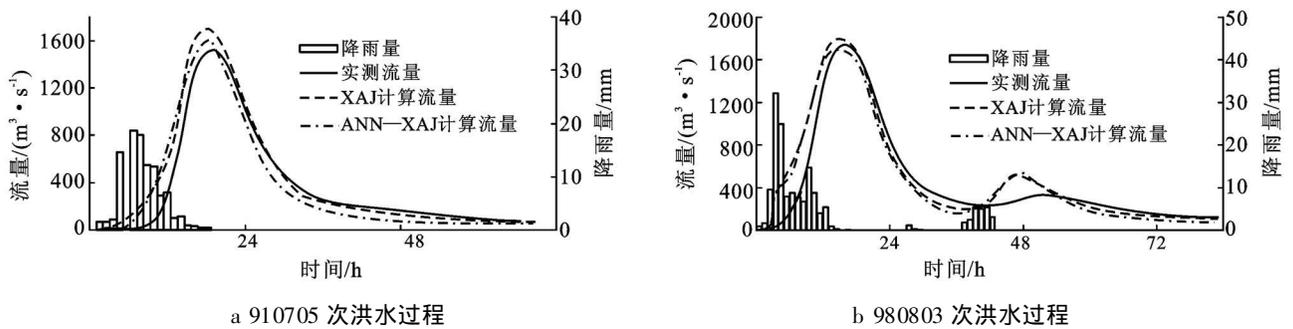


图 3 洪水过程模拟结果比较

### 3 结论

本研究提出了集成 ANN 和新安江模型的耦合模型(ANN-XAJ), 方便有效地解决了降雨-径流过程的非线性动力学特征问题。模型采用遗传算法进行参数优选, 同时根据雨量站点的空间分布利用 ArcView 中的 HEG-GeoHMS 和 DEM 数据进行流域单元划分, 可以得到符合自然流域边界的流域单元; 在径流演算过程中, 利用人工神经网络的非线性映射方法代替传统概念模型中线性叠加方法计算了整个流域的出口流量过程。

通过对淮河上游支流大坡岭流域的应用结果表明, 提出的耦合模型具有较好的模拟预报效果, 总体精度略好于新安江模型的效果, 为今后的水文模型耦合应用提供部分参考意见。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Dooge J C. Problems and methods of rainfall-runoff modeling[M] // Ciriani T A, Maione U, Wallis J R. Mathematic Models for Surface Water Hydrology. London Pisa Wiley: The Workshop Held at the IBM Scientific Center, 1977: 71-108.
- [ 2 ] Crawford N H, Linsley R S. Digital simulation in hydrology: The Stanford watershed model IV [R]. Stanford, CA: Department of Civil Engineering, Stanford University, 1966.
- [ 3 ] Burnash R J, Ferral R L, McGuire R A. A general streamflow simulation system conceptual modeling for digital computer[R]. Sacramento, CA: U S Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources, 1973.
- [ 4 ] Sugawara M. Automatic calibration of the tank model [J]. Hydrologic Sciences Bulletin, 1979, 24(3): 375-388.
- [ 5 ] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrologic Sciences Bulletin, 1979, 24: 43-69.
- [ 6 ] Sivpalan M, Beven K J, Wood E F. On hydrological similarity II: A scaled model of storm runoff production[J]. Water Resources Research, 1987, 23 (12): 2266-2278.
- [ 7 ] Zhao R J. The Xinanjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135: 371-381.
- [ 8 ] Todini E. The ARNO rainfall-runoff model[J]. Journal of Hydrology, 1996, 175: 339-382.
- [ 9 ] Abbott M, Bathurst J, Cunge J, et al. An introduction to the European hydrological system: Systeme hydrologique Europeen, 'SHE,' 2: Structure of a physically based, distributed modelling system[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87: 61-77.
- [ 10 ] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmier D P. A distributed hydrology vegetation model for complex terrain[J]. Water Resources Research, 1994, 30: 1665-1679.
- [ 11 ] Garrote L, Bras R L. A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models[J]. Journal of Hydrology, 1995, 167: 279-306.
- [ 12 ] Calve A, Wood W L. The institute of hydrology distributed model[M] // Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo., 1995: 595-626.
- [ 13 ] Todini E, Ciarapica L. The TOPKAPI model[M] // Singh V P. Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo., 2001: 471-504.
- [ 14 ] Yang D, Herath S, Musiak K. Hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions[J]. Hydrologic Science Journal, 2002, 47 (1): 49-65.
- [ 15 ] 梁忠民, 李彬权, 余钟波. 考虑空间变异性的统计产流模型研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2009, 45 (3): 403-408.
- [ 16 ] Chen J Y, Adams B J. Integration of artificial neural networks with conceptual models in rainfall-runoff modeling[J]. Journal of Hydrology, 2006, 318: 232-249.

- [6] 崔琰, 李锐, 杨勤科, 等. 基于 GIS 的区域土壤侵蚀模型设计[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 32-36.
- [7] 张东, 张万昌. 基于渗蓄一体化动态产流机制的分布式水文模型研究[D]. 南京: 南京大学, 2006.
- [8] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large-area hydrologic modeling and assessment(part I): Model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [9] Cronshey R G, Theurer F D. Proceedings first federal interagency hydrologic modeling[C] // AnnAGNPS-non point pollutant loading model, 1998: 19-23.
- [10] Bouraoui F, Dillaha T A. Answers-2000: Runoff and sediment transport model[J]. Journal of Environmental Engineering, 1996, 122(6): 493-502.
- [11] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. Gleams: Groundwater loading effects of agricultural management systems[J]. Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers) 1987, 30(5): 1403-1418.
- [12] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171-183.
- [13] Knisel W G. Creams: A field scale model for chemicals, runoff, and erosions from agricultural management systems [R]. USDA Conservation Research Report, 1980.
- [14] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses [M] // Washington D. C: USDA, United States Department of Agriculture(USDA). Agricultural handbook, 1978.
- [15] Wischmeier W H. A soil erodibility nomograph farm land and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26: 189-193.
- [16] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤流失量的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 14(2): 19-24.
- [17] 傅世锋, 查轩. 基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J]. 地球信息科学, 2008, 10(3): 390-395.
- [18] 许月卿, 邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2008, 28(4): 67-71.
- [19] 赵琰鑫, 张万顺, 王艳, 等. 基于 3S 技术和 USLE 的深圳市茜坑水库流域土壤侵蚀强度预测研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(3): 23-28.
- [20] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. Answers: A model for watershed planning [J]. Transaction of the ASCE, 1981, 23(4): 938-944.
- [21] 原立峰, 常春平, 张青峰. 基于元胞自动机的小流域侵蚀产沙模型研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 85-89.
- [22] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [23] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [24] Gutman G. Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2): 121-136.

(上接第 138 页)

- [17] 覃光华, 丁晶, 刘国东. 自适应 BP 算法及其在河道洪水预报上的应用[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 37-41.
- [18] 黄胜. 相空间神经网络耦合模型在水文预测中的应用[J]. 人民长江, 2008, 39(11): 10-11.
- [19] 刘星才, 许有鹏, 唐郑亮. 改进的人工神经网络模型在水文序列预测中的应用研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(1): 85-90.
- [20] 孔凡哲, 李莉莉. 数字高程模型在新安江模型中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 393-396.
- [21] 周买春, Jayawardena A W. 利用双抛物线型土壤蓄水容量曲线对新安江产流模型的改进[J]. 水利学报, 2002(12): 38-43.
- [22] 李致家, 姚成, 汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 131-134.
- [23] Song X M, Kong F Z. Application of genetic algorithm and GIS in Xinanjiang model[EB/OL]. (2008-11-11) [2009-10-16]. Sciencepaper Online of China, <http://www.paper.edu.cn/en>.
- [24] 包为民. 水文预报[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 321-322.