

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2011. 01. 007

水文模型参数敏感性的区间分析

李 丹¹ 张 翔¹ 张 扬¹ 朱马别克·努尔合买提²

(1. 水资源与水电工程科学国家重点实验室 ,湖北 武汉 430072 ; 2. 新疆阿勒泰水文水资源勘测局 ,新疆 阿勒泰 836500)

摘要 :介绍 SIMHYD 降水径流模型的结构及计算原理 ,利用该模型模拟了丹江口以上汉江上游流域的月流量过程 ,并采用区间分析方法分析 SIMHYD 模型参数的敏感性。结果表明 :SIMHYD 模型可以较好地模拟该流域的月流量过程 ,根据参数敏感性大小可将 SIMHYD 模型参数归为 3 类 :第 1 类为敏感参数 ,如 S_{MSC} 和 S_{UB} ;第 2 类为较敏感参数 ,如 C_{RAK} 和 K ;第 3 类为非敏感参数 ,如 I_{NSC} , C_{OEFF} 和 S_Q 。

关键词 :水文模型 ;参数 ;敏感性分析 ;区间分析

中图分类号 :TV12 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)01-0029-04

Application of interval analysis of sensitivity of parameters of hydrologic model/LI Dan¹ ,ZHANG Xiang¹ ,ZHANG Yang¹ ,Dzhumabek Noor Ahmat²(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science , Wuhan 430072 , China* ; 2. *Altay Hydrology and Water Resources Bureau of Xinjiang , Altay 836500 , China*)

Abstract : The structure and principles of the SIMHYD rainfall-runoff model were introduced. The monthly runoff process in the upper reaches of Hanjiang River upstream Danjiangkou was simulated by use of the model. On such a basis , the sensitivity of parameters of the SIMHYD model was analyzed by means of the interval analysis method. The results show that the SIMHYD model can be employed to satisfactorily simulate the monthly runoff process of the study area. The parameters of the SIMHYD model can be classified into three groups : (1) sensitivity parameters such as S_{MSC} and S_{UB} , (2) local sensitivity parameters such as C_{RAK} and K , and (3) non-sensitivity parameters such as I_{NSC} , C_{OEFF} and S_Q .

Key words : hydrologic model ; parameter ; sensitivity analysis ; interval analysis

水文模拟与预测过程中不可避免地存在着不确定性。模型输入数据、模型参数以及模型结构的不确定性会在水文模拟过程中综合 ,最终表现在输出结果上。对模型参数进行敏感性分析是研究参数不确定性的分析方法之一 ,也是水文模拟及预测中不可或缺的一环。

现阶段处理参数敏感性的方法主要有 3 种 ,即随机方法、模糊方法和区间分析方法^[1]。前 2 种方法需要较多的统计数据来描述不确定性参数的概率分布或隶属函数 ,而区间分析方法只需已知参数的上下界。此外 ,区别于前 2 种方法 ,区间分析方法抛弃了“寻优”思想 ,认为模型参数不是唯一确定的 ,计算结果是包含可行解集的 1 个最小区间集合 ,这样能为更准确地评估所得结果提供一定的依据。3 种方法各有优缺点 ,在有些情况下 ,由于试验数据不充分 ,采用随机方法难以反映实际情况 ,同时模糊方法自身存在人为的不确定性 ,此时宜采用区间分析方

法。苏秋红等^[2]应用区间分析思想 ,将区间优化方法引入水库调度问题 ,不仅原理清晰 ,计算方法易于理解 ,而且该方法的预测结果优于动态规划方法的结果 ,王海鹰^[3]针对四河段河流的排放口最优处理问题 ,给出了求解约束非线性规划的区间分析方法并求得最优解 ,王济干等^[4]将区间分析方法运用到水资源配置的和谐性评判中 ,使评判结果更有意义。目前孔隙水文地质学中主要有 2 类问题 :正问题 ,即已知水文地质参数预测水流在地下如何流动 ;逆问题 ,即通过测定水流如何流动估计相应的水文地质参数。Birdie 等^[5]用区间分析方法来解决这 2 类问题中的不确定性。研究表明 ,区间分析方法为解决这 2 类问题提供了可行的工具。

在对水文现象了解不完全、对参数的认识不充分的情况下 ,区间分析方法是一种较好的描述不确定性的方法。然而 ,区间分析方法在水文与水资源学相关领域的研究还十分有限 ,取得的成果较少 ,还

基金项目 :国家自然科学基金重点基金(40730632)

作者简介 :李丹(1985—) ,女 ,广东佛山人 ,硕士研究生 ,从事水文水资源与水文模型研究。 E-mail :danylee@126. com

有很大的研究空间^[6]。此外,水文模型在数学上是1组多元非线性方程组。如果将非线性方程组的参数采用区间表示,则其变为区间非线性方程组。目前,求解大型区间非线性方程组可能会产生严重的保守性问题,这是困扰区间分析方法得以广泛应用的主要障碍之一。

笔者以汉江上游流域为研究区域,利用简单集总式水文模型SIMHYD模型对该流域进行月径流模拟计算。在此基础上,应用区间分析方法对SIMHYD模型进行参数敏感性分析,并进一步讨论模型各参数的敏感性。

1 SIMHYD模型与区间分析

1.1 SIMHYD模型

SIMHYD模型是由HYDROLOG模型^[7-8]和MODHYDROLOG模型简化而来的,通过降雨和地区潜在蒸发能力数据来估计径流量。该模型的1个特点是考虑了超渗和蓄满2种产流机制,并把HYDROLOG模型的17个参数简化为7个参数,具有概念清晰、结构合理、参数较少、调参方便和计算精度较高等优点。

1.1.1 模型结构

SIMHYD模型的径流产出量由3部分生成:超渗地表径流、壤中流和基流(图1)。下面简单介绍这3部分径流量的生成过程。首先,降雨被地表植被截留,大于入渗能力的那部分剩余雨量就成为超渗地表径流。入渗水量经过土壤水分的再分配可分为3部分:壤中流量、下渗补给地下水的水量和土壤含水量。壤中流是土壤湿润度的线性函数,由土壤湿润度的线性关系算出。同样通过土壤湿润度的线性比例可以算出下渗补给地下水的水量。剩余的水量就作为土壤水保存下来。土壤蒸发量也是土壤湿润度的线性函数,但必须小于潜在蒸发能力。土壤蓄水容量是一个有限值,超过的水量便补给地下水。地下水的基流量是由地下水储藏量乘上基流退

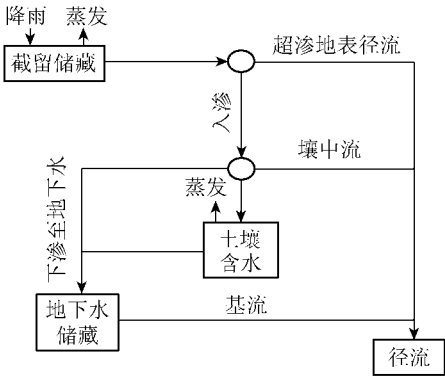


图1 SIMHYD模型结构

水系数而得。

1.1.2 模型参数及参数率定

SIMHYD模型有7个参数: I_{NSC} 为截留储藏能力参数; α_{mm} ; C_{OFF} 为最大入渗损失参数; α_{mm} ; S_Q 为入渗损失指数; S_{MSC} 为土壤持水能力参数; α_{mm} ; S_{UB} 为壤中流出系数; C_{RAK} 为地下水方程比例系数; K 为基流退水系数。

模型率定采用自动模式寻优方法^[9],该方法通过给定的10组参数和参数的上下界来获得满足目标函数最小的全局最优参数。模型率定的目标函数定义为

$$O_{BJ} = \sum_{i=1}^n (R_{ST_i} - R_{EC_i})^2 \tag{1}$$

式中: R_{ST_i} 为模拟流量; R_{EC_i} 为实测流量。

1.2 参数敏感性区间分析方法

对于某一结构仿真分析系统,假定具有 n 个模型参数,这些参数构成1个模型参变量集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,其中每个参数 x_j ($j = 1, 2, \dots, n$)都有其区间范围 $[x_j, \bar{x}_j]$;另外,还有 m 个仿真决策目标,这些目标构成决策目标集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$,且每个仿真决策目标 y_i ($i = 1, 2, \dots, m$)都有其可行域区间 $[y_i, \bar{y}_i]$ 。该结构仿真分析系统由 $X \rightarrow Y$ 的1个映射构成,并有

$$\begin{cases} y_1 \leq \theta_{11}x_1 + \theta_{12}x_2 + \dots + \theta_{1n}x_n \leq \bar{y}_1 \\ y_2 \leq \theta_{21}x_1 + \theta_{22}x_2 + \dots + \theta_{2n}x_n \leq \bar{y}_2 \\ \vdots \\ y_m \leq \theta_{m1}x_1 + \theta_{m2}x_2 + \dots + \theta_{mn}x_n \leq \bar{y}_m \end{cases} \tag{2}$$

式中: θ_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)为第 j 个模型参数对第 i 个决策目标的综合影响因子。

设模型参数 x_j ($j = 1, 2, \dots, n$)在其区间 $[x_j, \bar{x}_j]$ 内对决策目标 y_i ($i = 1, 2, \dots, m$)的边界影响值为 $[y_{ij}, \bar{y}_{ij}]$,且 $[y_{ij}, \bar{y}_{ij}]$ 是区间 $[y_i, \bar{y}_i]$ 的1个子集。令

$$\theta'_{ij} = \frac{(\bar{y}_{ij} - y_{ij})}{(\bar{y}_i - y_i)} \tag{3}$$

则 θ'_{ij} 为模型参数 x_j 对决策目标 y_i 的独立影响因子,且 $0 \leq \theta'_{ij} \leq 1$ 。 θ'_{ij} 越趋近于零,模型参数 x_j 对决策目标 y_i 的影响程度越小,即模型参数 x_j 对决策目标 y_i 的敏感性越小;反之, θ'_{ij} 越趋近于1,模型参数 x_j 对决策目标 y_i 的影响程度越大,即模型参数 x_j 对决策目标 y_i 的敏感性越大。由此可以确定各模型参数对各个决策目标的敏感性因子矩阵 θ' :

$$\theta' = \begin{bmatrix} \theta'_{11} & \theta'_{12} & \dots & \theta'_{1n} \\ \theta'_{21} & \theta'_{22} & \dots & \theta'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta'_{m1} & \theta'_{m2} & \dots & \theta'_{mn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

从矩阵 θ' 中可看出,每个模型参数对应的列向量值为其对各个决策目标的独立影响因子,该因子的数值大小直接反映该模型参数对该决策目标的影响程度。敏感性因子矩阵 θ' 的行向量表示各个模型参数对相同决策目标的影响程度。 θ'_{ij} 的值越大,表明该模型参数对决策目标的敏感性越强;反之,就越弱。该方法在一定程度上考虑了各参数之间的影响^[10]。

随着参数区间变异系数(区间半径与区间中点的比值)的不同,获得的参数对决策目标的敏感性因子也是不同的。当变异系数相同时,可以得出相同的参数对决策目标的敏感性因子^[11]。因此,参数区间取为参数在相同变异系统下的变化区间,决策目标区间用参数区间通过区间算法获得。

2 SIMHYD 模型的应用及参数敏感性区间分析

以汉江流域为实例,应用 SIMHYD 模型得到模型率定和检验结果,并据此对 SIMHYD 模型的 7 个参数进行参数敏感性区间分析。

2.1 汉江流域概况

汉江是长江中游最大的支流,发源于秦岭南麓,干流流经陕西、湖北 2 省,于武汉市汇入长江,全流域集水面积为 159 000 km²,干流全长 1 577 km,呈东西向。汉江流域处于南北气候分界的过渡地带。流域多年平均降水量为 700~1 100 mm,由上游向下游增大。本文的研究区域为丹江口以上的汉江上游流域,以黄家港水文站为上游控制站,流域面积为 95 219 km²,多年平均降水量为 904 mm,主要集中在 5—10 月。

2.2 模型的建立

汉江上游地区有 8 个水文站,选取汉江黄家港以上流域 1987—2001 年各测站的日降雨、月蒸发及月径流数据进行模拟与检验。利用 1987—1996 年连续 10 年的日降雨及月蒸发资料对模型参数进行率定,利用率定出的参数对 1997—2001 年连续 5 年的月径流数据进行检验。本研究区的降雨和蒸发数据是采用各水文站

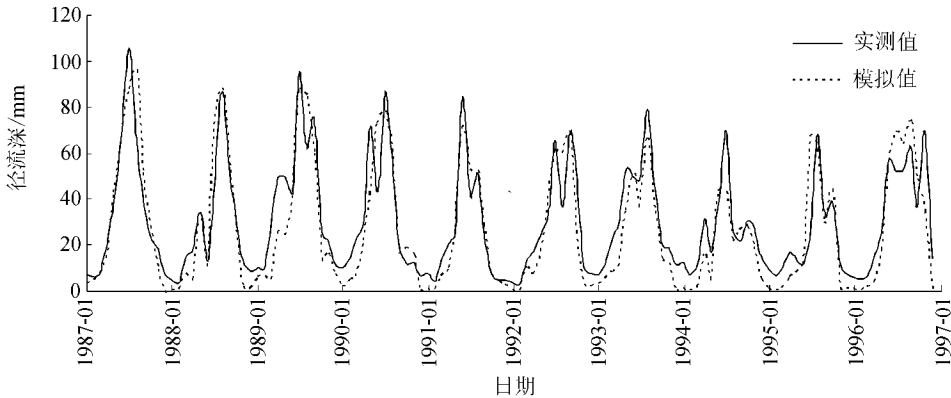


图 2 汉江上游流域率定期月径流模拟值与实测值的比较

的实测数据,通过泰森多边形法加权而得。采用 Nash 效率系数 R^2 、相关系数 r 和相对误差 E_{RR} 对模型进行结果评价。 R^2 的计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{ST_i} - R_{EC_i})^2}{\sum_{i=1}^N (R_{EC_i} - \bar{R}_{EC})^2} \tag{5}$$

式中 $\bar{R}_{EC}$ 为实测流量的均值; N 为模拟的时段数。

2.3 模型率定和检验结果

模型参数率定结果如下: $I_{NSC} = 0.002 \text{ mm}$, $C_{\text{OEFF}} = 160.000 \text{ mm}$, $S_Q = 3.000$, $S_{MSC} = 500.000 \text{ mm}$, $S_{UB} = 1.666$, $C_{RA} = 1.000$, $K = 0.500$ 。

模型率定期和检验期月径流模拟结果见图 2、图 3。结果评价见表 1。研究结果表明, SIMHYD 模型在汉江上游流域模拟产流是适用的。

表 1 结果评价

阶 段	R^2	r	$E_{RR}/\%$
率定期 (1987—1996 年)	0.74	0.90	14.30
检验期 (1997—2001 年)	0.82	0.93	1.06

2.4 SIMHYD 模型参数敏感性区间分析

采用敏感性区间分析方法对 SIMHYD 模型的 7 个参数进行分析,各参数值前面已率定得出。本文所用的参数区间取为参数在相同变异系统下的变化区间,变异系数取为 0.1。决策目标为 1997—2001 年的模拟月径流,是用参数区间通过区间算法获得。运用 SIMHYD 模型,通过区间算法可以获得模型各参数对决策目标的敏感性因子 θ' ,由 θ'_{ij} 多年月平均值可绘出图 4。

从图 4 中 SIMHYD 模型的 7 个参数对决策目标(月径流模拟值)的敏感性因子可以直接进行参数对决策目标影响程度的比较。由此可见,相同的模型参数对于不同的决策目标(不同月径流模拟值)的影响程度是不同的,并且不同的模型参数对于相同的决策目标的影响程度也是不同的。得出如下结论: SIMHYD 模型的

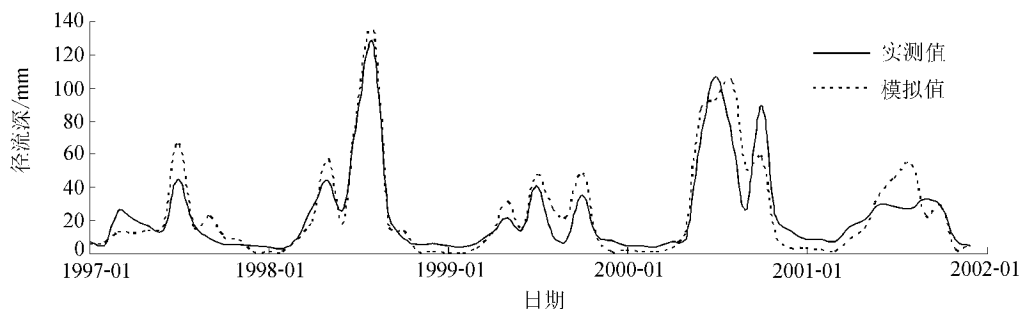


图3 汉江上游流域检验期月径流模拟值与实测值的比较

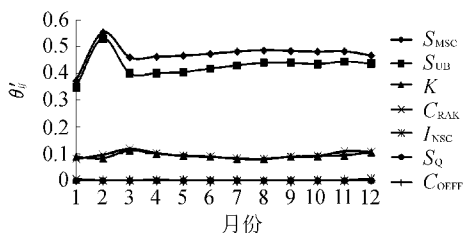


图4 模型参数对决策目标的敏感性因子

7个参数,最敏感的是 S_{MSC} 和 S_{UB} ,其次是 C_{RAK} 和 K ,最不敏感的是 I_{NSC} , C_{OFF} 和 S_Q 。下面将从模型结构入手,结合研究流域的水文气候分析结果的合理性。

在蒸发损失计算方面,蒸发损失包括地表植被截留水分蒸发和土壤水分蒸发两部分,其中土壤水分蒸发根据土壤湿润度(S_{MS}/S_{MSC})和剩余蒸发能力计算, S_{MS} 是土壤湿度,在土壤下渗量计算方面,下渗计算是整个模型计算的核心,假定下渗率与土壤湿润度之间具有负幂指数关系,在径流成分计算方面,模拟径流由地表径流、壤中流和基流线性叠加得到,壤中流是壤中流出系数、土壤下渗量和土壤湿润度的乘积,在水分储蓄量计算方面,模型中包括地表植被水分储蓄、土壤湿度和地下水储蓄3种水分储蓄,其中土壤湿润度是最为重要的中间状态变量,在一定程度上决定了壤中流、地下水补充的计算。从上述模型结构的4个方面可以说明, S_{MSC} 以土壤湿润度的形式对模型系统有全局性的影响,即该模型参数对模型的影响贯穿模拟计算的全过程。另外,尽管在暴雨径流过程中以地表径流为主,但由于所研究地区降水丰富,在一般降雨情况下,壤中流是产流的主要形式,这可能是造成 S_{UB} 敏感性较高的原因。

从图4可以看出,7个参数敏感性差别较大,可分为不敏感、较敏感与敏感参数3组。不敏感参数 I_{NSC} , C_{OFF} 和 S_Q 随月份几乎没有变化,较敏感参数 C_{RAK} 和 K 在3月份出现微小的峰值,敏感参数 S_{MSC} 和 S_{UB} 在2月份出现较大的峰值。 S_{MSC} 与土壤质地、结构、垒结性有关, S_{UB} 是壤中流出系数,2个参数均与壤中流的形成密切相关。在2月份出现峰值的原因可能是流域经过了降水较少的11月至次年1月,到了2月流域较

干旱。2个参数的微小变化可能会使模拟结果产生较大变化。另外,研究流域5—10月降水占全年降水的70%~80%,而7个参数在5—10月均只有轻微变化,说明降水对参数影响并不大。相关文献^[12]也有类似结论,即降雨的不确定性对该模型模拟结果的影响不是很大。这可能是模型本身不能很好地模拟该产流过程、模型中区间运算方法不够严谨等诸多原因造成的。

3 结 语

水文模拟与预测中的不确定性定量研究是水文模拟技术向前发展的必经之路,如何减少预测中的不确定性,是目前水文研究的一个热门和前沿问题。参数敏感性分析有助于识别影响模拟结果的主要因子,避免调参工作陷入混乱无章,便于更好地理解、评估和减少不确定性。本文以汉江上游流域为研究区域,利用简单集总式水文模型SIMHYD模型对该流域进行了月径流模拟计算,研究结果表明SIMHYD模型在该流域模拟产流是适用的。在此基础上,应用区间分析方法对SIMHYD模型进行参数敏感性分析,得出SIMHYD模型的7个参数中最敏感的是 S_{MSC} 和 S_{UB} ,其次是 C_{RAK} 和 K ,最不敏感的是 I_{NSC} , C_{OFF} 和 S_Q 。从模型结构入手,结合研究流域的水文气候,分析参数敏感性差异的原因,并进行参数敏感性年内变化合理性分析。认为参数敏感性给模型模拟结果带来的不确定性影响很复杂。目前,在水文上利用区间分析方法进行模型参数的敏感性研究尚处于起步阶段,有必要进行进一步的研究和探索。

参考文献:

- [1] 苏静波.工程结构不确定性区间分析方法及其应用研究[D].南京:河海大学,2006.
- [2] 苏秋红,董增川.区间优化方法在水库调度中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):384-386.
- [3] 王海鹰.多元约束非线性规划的区间方法[J].计算物理,1992,9(4):539-541.
- [4] 王济干,董增川,张婕.区间分析在水资源配置和谐性评判中的应用[J].水利水电技术,2003,34(11):12-14.

(下转第41页)

上吸附的影响[J].环境科学学报 2004 24(4):696-701.

[2] LI Yu , WANG Ao , GAO Qian , et al. Competitive adsorption between atrazine and copper on the surficial sediments and natural surface coating samples[J]. Fresenius Environmental Bulletin 2009 ,18(12) 2373-2379.

[3] LI Yu , GAO Qian , WANG Xiao-li , et al. Synergetic and antagonistic effects of cadmium on adsorption of atrazine on surficial sediments [J]. Chemical Research in Chinese Universities 2009 25(2) :155-160.

[4] USERO J , GAMERO M , MORILLO J. Comparative study of three sequential extraction procedures for metals in marine sediments[J]. Environmental International ,1998 24(4) :487-496.

[5] 李鱼 ,王晓丽 张正 ,等.表层沉积物(生物膜)非残渣态组分的选择性萃取分离及其吸附铜/锌的特性[J].高等学校化学学报 2006 27(12) 2285-2290.

[6] 李鱼 ,王晓丽 陈昕 ,等.湿地水环境中表层沉积物吸附铅、镉能力的研究[J].吉林大学学报 :地球科学版 , 2005 35(2) 231-235.

[7] 李鱼 刘亮 董德明 ,等.有机氯类农药对自然水体生物膜吸附 Pb ,Cd 能力的影响[J].自然科学进展 2003 ,13(8) 866-869.

[8] LI Yu , WANG Ao , GAO Qian , et al. Measurement of atrazine adsorption onto surficial sediments (natural surface coatings) : new evidence for the importance of Fe oxides[J]. Chemical Research in Chinese Universities 2009 25(1) :31-36.

[9] HOLGER R M , NICOLAS M , CHRISTOPHER W K C. Use of artificial networks for predicting optimal alum doses and treated water quality parameters[J]. Environmental Modeling and Sofeware 2004 ,19 :485-494.

[10] 屈思义 陈亚新 史海滨 ,等.地下水文预测中 BP 网络的模型结构及算法探讨[J].水利学报 2004(2) 88-93.

[11] KANAN Y , SEVGI D. Artificial neural network (ANN) approach for modeling of Pb(II) adsorption from aqueous solution by Antep pistachio (Pistacia Vera L.) shells[J]. Journal of Hazardous Materials 2008 ,153 :1288-1300.

[12] KUNWAR P S , PRIYANKA O , AMRITA M , et al. Partial least squares and artificial neural networks modeling for predicting chlorophenol removal from aqueous solution[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems ,2009 ,99 : 150-160.

[13] RECKNAGEL F , FRENCH M , HARKONEN P , et al. Artificial neural network approach for modeling and predication of algal blooms[J]. Ecological Modeling ,1997 , 96 :11-28.

[14] CÜMARAH F F ÖZ B , GÜLER B , et al. The application of artificial neural networks for the prediction of water quality of polluted aquife[J]. Water Air and Soil Pollution 2000 ,119 : 275-293.

[15] SAHOO G B , RAY C , WADE H F. Pesticide prediction in ground water in North Carolina domestic wells using artificial neural networks[J]. Ecological Modeling 2005 ,183 :29-46.

[16] 孟凡欣 郭伟良 杜林娜.纤维堆囊菌发酵液中埃博霉素含量的 HPLC 法分析[J].高等学校化学学报 2009 ,30(10) :1960-1964.

[17] 王岙.共存污染物对沉积物及其主要组分吸附阿特拉津的影响研究[D].长春 :吉林大学 2009.

[18] 尚钢 吴代华.基于神经网络对扁壳结构载荷位置识别问题的研究[J].固体力学学报 2001 22(1) 63-65.

[19] 高雪鹏 丛爽.BP 网络改进算法的性能对比研究[J].控制与对策 2001 ,16(2) :167-171.

[20] 朱利中 徐霞 胡松 ,等.西湖底泥对水中苯胺、苯酚的吸附性能及机理[J].环境科学 2000 21(2) :28-31.

[21] DONG De-ming , LIU Liang , HUA Xiu-yi , et al. Comparison of lead , cadmium , copper and cobalt adsorption onto metal oxides and organic materials in natural surface coatings[J]. Microchemical Journal , 2007 , 85 : 270-275.

[22] GUO Shu-hai , WANG Xiao-li , LI Yu , et al. Investigation of Fe , Mn , Zn , Cu , Pb and Cd fractions in the natural surface coating samples and surficial sediments in the Songhua River , China[J]. Journal of Environmental Sciences ,2006 ,18(6) : 1193-1198.

(收稿日期 2010-05-14 编辑 高建群)

(上接第 32 页)

[5] BIRDIE T R , SURANA K S. The Use of interval analysis in hydrologic system[J]. Reliable Computing ,1998 4 :269-281.

[6] 邱艳霞.区间分析在水文预测不确定性研究中的应用[D].武汉 :武汉大学 2008.

[7] CHIEW F H S , PEEL M C , WESTERN A W. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD[C]// Mathematical Models of Watershed Hydrology. Littleton , Colorado :Water Resources Publication 2002.

[8] FRANCIS C , McMAHON T A. Application of the daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG to 28 australian catchments [J]. Journal of Hydrology ,1994 ,153 :383-416.

[9] 夏仕锋.基于区间数学的结构不确定性区间分析方法的研究[D].南京 :河海大学 2000.

[10] MOORE R E , KEARFOTT R B , CLOUD M J. Introduction to interval analysis[M]. Philadelphia :Society for Industrial and Applied Mathematics PA 2009.

[11] 张扬.水文系统不确定性区间分析方法及其应用研究[D].武汉 :武汉大学 2009.

[12] ZHANG Xiang , CHEN Xiao-dan , FRANCIS C , et al. Application of the rainfall-runoff model SIMHYD to two catchments in China[C]//CHEN Xiao-hong. Hydrological Sciences for Managing Water Resources in the Asian Developing World. Guangzhou :IAHS 2008 :101-107.

(收稿日期 2010-04-02 编辑 骆超)