城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析

王浩昌[1],杜鹏飞[1*],赵冬泉[1],王浩正[2],李志一[1] (1.清华大学环境科学与工程系,北京 100084；2.北京清华城市规划设计研究院,北京 100084)

摘要：采用逐步回归法分析典型城市降雨径流管理模型(SWMM)水文参数的全局灵敏度,为模型参数的有效识别提供参考.结果表明,汇水区面积对总产流起决定性作用.在雨强较小(10.5mm)的情况下,透水区参数灵敏度很小,可在参数识别中设为经验值;在较强降雨(52.5mm)情况下,管道曼宁系数是决定峰值流量与峰值发生时间的关键参数.减小汇水区面积的不确定性可提高其他参数的灵敏度,有利于参数的有效识别.

关键词：降雨径流；逐步回归；全局灵敏度；城市降雨径流管理模型(SWMM)

中图分类号：X143 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2008)08-0725-05

Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model. WANG Hao-chang[1], DU Peng-fei[1*], ZHAO Dong-quan[1], WANG Hao-zheng[2], LI Zhi-yi[1](1.Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Beijing Tsinghua Urban Planning and Design Institute, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2008, 28(8)：725~729

Abstract：Stepwise regression analysis approach was used to assess the global sensitivity of the hydrological parameters of storm water management model (SWMM) in this study. The catchment area played a dominant role in determining surface runoff. When precipitation was low(10.5mm), the parameter in pervious zone showed very low sensitivity, indicating that those parameter could be set to empirical values. When precipitation was high(52.5mm), roughness of conduit was the most sensitive parameter to peak flow and peak time. Reduction of the catchment area could increase the sensitivity of other parameters, providing better condition for parameter calibration.

Key words：rainfall-runoff；stepwise regression；global sensitivity analysis；stom water management model (SWMM)

城市化的发展使城区不透水区比例增大,降雨径流随之增加.近年来随着城市点源污染的有效控制,降雨径流污染问题显得日渐突出.利用模型进行水文水质模拟是研究城市暴雨径流污染管理和控制的重要手段.暴雨径流管理模型(SWMM)是美国 EPA 开发的暴雨径流管理模型,在城市降雨径流模拟中有着广泛的应用[1-3],近年来在我国也有一些应用案例[4-5].

灵敏度分析是通过研究模型参数对模型输出的影响,识别关键参数,为模型识别参数提供重要参考.国内对模型参数的灵敏度分析多限于局部灵敏度分析[6].由于局部灵敏度分析方法仅能反映单个参数在初始取值附近的变化对模型输出的影响,而无法对参数在整个取值空间的影响及参数之间的共同作用做出估计.全局灵敏度分析作为一种新的灵敏度分析手段,在国外的模型识别研究中取得了广泛应用[7-9].目前主要的全局灵敏性分析方法有多元回归法、Morris 法、傅里叶幅度灵敏度检验法(FAST)以及基于方差分析的 Sobol 法等[10].其中,多元回归法由于计算量小,易于操作,被大量应用[11-13].

作者采用基于逐步回归的全局灵敏度分析方法,结合参数识别的具体需求,研究 SWMM 模型水文水力参数的灵敏度,为模型参数的有效识别提供依据.

1 研究方法

1.1 研究区概况与监测方法

选取北京市某个具有独立分流制管网系统

收稿日期：2008-01-03

基金项目：国家“973”项目(2006CB403407);国家自然科学基金资助项目(50778098/E080403)

* 责任作者, 副教授, dupf@tsinghua.edu.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的小流域做为研究区域,总面积 12.9hm^2,不透水面积约占 70%,概化为 26 个汇水区,64 条管道.在降雨过程中,用虹吸式雨量计记录雨量,用明渠流量计在流域出口处记录流量.对 2007 年 10 月 5 日历时 3h 的降雨进行分析,总雨量 10.5mm.

1.2 参数取值

降雨径流模型中,参数可分为测量参数和率定参数[14].SWMM 模型的水文水力相关参数有 14 个.其中,汇水区面积(Area)、不透水率(Pct-Imperv)、汇水区坡度(Slope)、汇水区宽度(Width)和管道长度(Length)是 5 个具有显著空间特征的参数,可以通过测量获得.但是由于测量技术的限制以及概化过程的主观性,测量参数往往存在一定误差.Pct-Imperv 及 Length 的测量误差很小,本研究中直接使用测量值.Area 受模型概化主观性的影响很大,尤其是在研究区域较小的情况下,不确定性更为明显.Slope 和 Width 受测量方法的限制,很难准确得到.本研究中引入 3 个比例因子 Pct-Area,K-Width,K-Slope 代替 Area,Width 与 Slope,模型的实际输入参数等于比例因子与测量参数的乘积.综上所述,分析共包括 12 个率定参数.

表 1 SWMM 水文水力模块参数

Table 1 SWMM hydrology and dydraulic module parameters

编号	参数名称	物理意义	取值范围
1	N-Imperv	不透水区曼宁系数	0.005~0.04
2	N-perv	透水区曼宁系数	0.1~0.8
3	S-Imperv	不透水区洼蓄量(mm)	0.2~2
4	S-perv	透水区洼蓄量(mm)	2~10
5	Pct-Zero	不透水区中无洼地不透水区所占比例(%)	50~80
6	MaxRate	最大渗透率(mm/h)	3~50
7	MinRate	最小渗透率(mm/h)	1~3
8	Decay	渗透衰减系数	2~7
9	Area(Pct-Area)	汇水区面积比例因子(%)	50~80
10	Width(K-Width)	汇水子区宽度因子	0.5~2
11	Slope(K-Slope)	汇水子区坡度因子	0.5~2
12	Manning-N	管道曼宁系数	0.005~0.040

由于各率定参数的概率分布未知,假定所有参数均服从均匀分布.新引入的 3 个比例因子通过主观经验给定取值范围,其他参数取值范围均根据模型手册及文献调研确定.参数的具体含义及取值范围见表 1.

1.3 全局灵敏度分析

区别于局部灵敏度分析,全局灵敏度分析同时考虑所有参数的影响,考察不同参数的变化对模型输出的共同作用.基于随机采样的分析方法(蒙特卡罗分析方法)[15]是一种应用广泛的全局灵敏度分析方法.该方法根据参数的概率分布对所有参数进行随机采样,并对各参数样本进行模拟计算,通过对模型输出与各参数进行统计分析得到各参数的灵敏度.本研究中采用拉丁超立方采样方法(Latin Hypercube Sampling)进行采样,采用逐步回归法(Stepwise Regression)进行参数灵敏度分析.

逐步回归的主要目的是得到最优的回归方程,即在回归方程中只包含对因变量有显著影响的自变量,不包含对因变量贡献不显著的自变量.其实施过程是按自变量对因变量贡献大小的顺序将自变量逐步引入到回归方程.每一步都要对已引入回归方程的变量计算其偏回归平方和,在预先给定的 F 水平下进行显著性检验,将对因变量影响不显著的变量剔除.接着对未引入回归方程中的变量分别计算其偏回归平方和,并对偏回归平方和最大的一个变量在给定 F 水平下作显著性检验,如果显著则将该变量引入回归方程.重复这个过程,直到在回归方程中的变量都不能剔除而又无新变量可以引入时为止.

可用逐步回归的结果解释参数的全局灵敏度,具体含义:未选入回归模型的参数对模型输出的贡献可忽略不计;参数被选入回归模型的顺序定性地表征了参数的灵敏度;在每一步 R^2 的改变量定量地表征了引入该参数使模型输出不确定性得以解释的比例;标准回归系数(SRC)的绝对值是参数灵敏度的定量指标,SRC 的符号表示了该参数对输出量的正或负的效应[15-16].

2 结果与讨论

2.1 参数对不同输出变量的灵敏度分析

选取 3 个在降雨径流模拟中有着重要意义的输出变量:总产流、流量峰值、峰值发生时间,分

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

析模型参数对各输出变量的灵敏度.结果表明(表 2),对于不同输出变量,各参数的灵敏度有着显著的差异,对总产流影响显著的 Pct-Area 对峰值时间没有影响,而对峰值时间最灵敏的参数 Manning-N 对总产流却无影响.对总产流而言,Pct-Area 是最灵敏的参数,在仅引入该参数之后,回归模型的 R^2 值已达 0.891,说明 Pct-Area 对总产流起着决定性的作用;而对流量峰值及峰值时间而言,各参数的灵敏度则比较均衡,并没有起决定性作用的参数.总产流与流量峰值的最终回归模型的 R^2 值均达到 0.9 以上,说明这 2 个输出变量与模型参数之间有着显著的线性关系;而峰值时间的最终回归模型 R^2 值仅达到 0.699,线性关系较差.SRC 的符号说明了各参数对输出变量的贡献的正负,如对峰值时间,Manning-N,S-Imperv, N-Imperv 的 SRC 符号均为正,说明增大这些参数可以使流量峰值时间延后.此外,在本场降雨的情景下,透水区相关参数(表 1 中第 2、4、6、7、8 号参数)对 3 个输出变量的灵敏度很小,甚至无贡献,说明在小雨强的情景下,透水区参数不可识别.

表 2　灵敏度分析结果

Table 2　Result of sensitivity analysis

回归次序	总产流			流量峰值			峰值时间		
	参数名	SRC	R^2	参数名	SRC	R^2	参数名	SRC	R^2
1	Pct-Area	0.937	0.891	Pct-Area	0.488	0.248	Manning-N	0.561	0.342
2	S-Imperv	−0.209	0.934	S-Imperv	−0.461	0.455	N-Imperv	0.323	0.444
3	Pct-Zero	0.148	0.957	N-Imperv	−0.443	0.654	S-Imperv	0.310	0.539
4	N-Imperv	−0.084	0.964	K-Width	0.337	0.770	K-Width	−0.280	0.617
5	K-Width	0.080	0.970	Pct-Zero	0.263	0.846	Pct-Zero	−0.236	0.675
6	K-Slope	0.042	0.972	Manning-N	−0.241	0.906	K-Slope	−0.156	0.699
7	MaxRate	−0.018	0.972	K-Slope	0.168	0.933			
8	S-perv	−0.015	0.973	Decay	0.023	0.934			
9	MinRate	−0.014	0.973						

2.2　雨强对参数灵敏度的影响

参数的灵敏度与模型的应用条件紧密相关,在某种应用条件下不灵敏的参数,在另一种条件下可能是灵敏的.局部灵敏度分析的相关研究显示,雨强对参数灵敏度有较大影响[6].由于除雨强外,雨型、降雨时长等因素也会对分析结果造成影响,为消除这些因素的影响,这里不使用真实降雨情景,而将 10 月 5 日降雨强度放大 5 倍作为大雨强情景,与 2.1 节中的结果进行对比(图 1).结果显示,在较强降雨情景下,对总产流而言,Pct-Area 仍是最灵敏的参数且起决定性作用;对流量峰值和峰值时间而言,Manning-N 的增幅明显,成为起决定性作用的参数.Pct-Area、K-Width、N-Imperv 对流量峰值均是前 5 位的灵敏参数;Manning-N、K-Width、N-Imperv 对峰值发生时间均是前 5 位的灵敏参数;其他参数的灵敏度变化较大.

透水区相关参数对这 3 个输出变量均显示出一定的灵敏度.此结论可直观地理解为,在小雨强条件下,透水区的渗透作用使得透水区径流量很小甚至不产流;而在大雨强条件下,透水区积水的速度超过了渗透的速度,使得透水区产生一定量的径流,从而使透水区相关参数显示出一定灵敏度.

2.3　面积不确定性对参数灵敏度的影响

由上述分析可知,Pct-Area 对总产流起着至关重要的作用,Pct-Area 的不确定性(表现为参数的取值范围)过大必然会对掩盖其他参数对模型输出的影响,从而使其他参数难以识别.在基础资料充足的情况下,可以通过详细的概化减小 Pct-Area 的不确定性;也可利用 Pct-Area 对总产

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

流的极度灵敏度,使用总产流来对 Pct-Area 的取值范围做粗略识别.为研究 Pct-Area 的不确定性减小对参数灵敏度的影响,将 Pct-Area 取值范围缩小到 50~60,其他参数取值范围不变,重新进行灵敏度分析,结果见图 2.

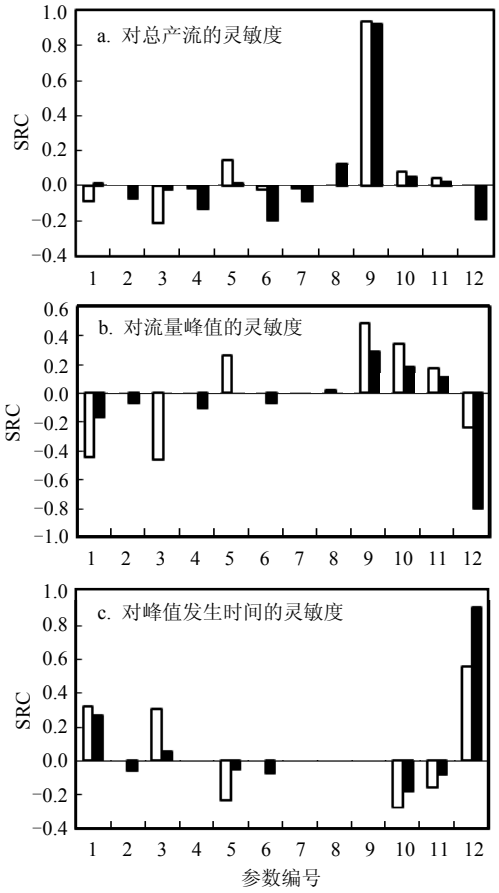

图 1 不同雨强情景灵敏度分析

Fig. 1 Sensitivity analysis for different rainfall conditions

雨强 □ 10.5mm; ■ 52.5mm

由图 2 可以看出,对总产流,Pct-Area 仍是最灵敏参数,但灵敏度明显降低,其他参数的灵敏度则相应地有所增加.而对于流量峰值,Pct-Area 的灵敏度的降幅更为明显,从第 1 位降至第 6 位,其他参数灵敏度均有不同程度的增加.对峰值时间而言,各参数的灵敏度基本保持不变,这是由于 Pct-Area 本身对峰值时间并无影响.

参数识别是利用监测结果反求参数的过程,显然,为使模拟结果与监测结果匹配,对模型输出影响越大的参数其可能的取值范围越小,这意味着越灵敏的参数越容易被识别.Pct-Area 不确定性的降低增加了其他参数的灵敏度,为其他参数的有效识别提供了有利条件.

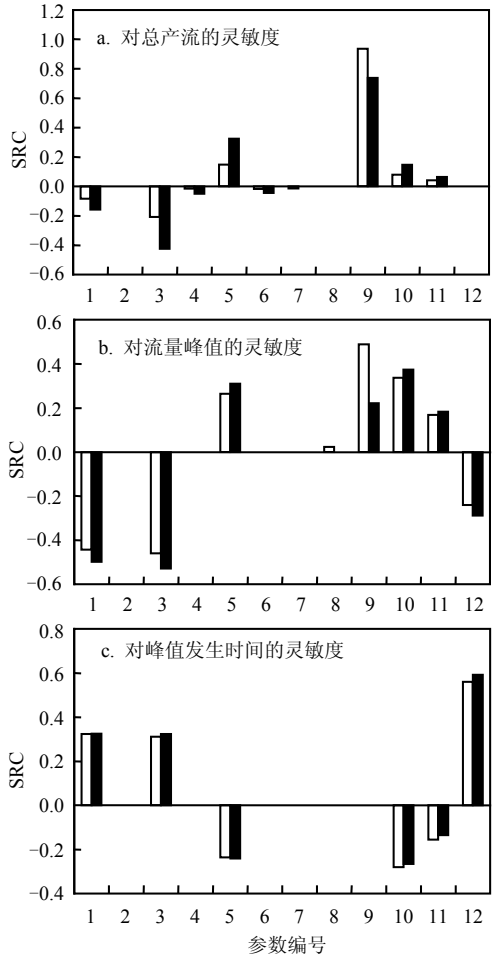

图 2 不同 Pct-Area 取值范围灵敏度分析

Fig. 2 Sensitivity analysis for different Pct-Area ranges

□ Pct-Area 取 50~80; ■ Pct-Area 取 50~60

3 结论

3.1 在不同雨强情景下,Pct-Area 对总产流均起决定性作用;Pct-Area、K-Width、N-Imperv 对流量峰值均是前 5 位的灵敏参数;Manning-N、K-Width、N-Imperv 对峰值发生时间均是前 5 位的灵敏参数;其他参数的灵敏度变化较大.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　在较强降雨情景下,Manning-N 对流量峰值和峰值发生时间起决定性作用,应仔细识别;在雨强较小的情景下,透水区相关参数极度不灵敏,在参数识别中可考虑将其设为经验值.

3.3　减小汇水区面积的不确定性可使其他参数的灵敏度增加,有利于参数识别.

参考文献:

[1] Wang W C, Williams S D. SWMM application in Indian River County, Florida [C]//Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering. New York, USA: ASCE, 1989: 454-459.

[2] Temprano J, Arango O, Cagiao J, et al. Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in northern Spain [J]. Water SA., 2006,32(1):55-63.

[3] Tsihrintzis V A, Hamid R. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM [J]. Hydrological Processes, 1998, 12(2):311-329.

[4] 董　欣,陈吉宁,赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用 [J]. 给水排水, 2006,32(5):106-109.

[5] 刘兴坡,刘遂庆,李树平,等.基于SWMM的排水管网系统模拟分析技术 [J]. 给水排水, 2007,33(4):105-108.

[6] 黄金良,杜鹏飞,何万谦,等.城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析 [J]. 中国环境科学, 2007,27(4):549-553.

[7] Kanso A, Chebbo G, Tassin B. Application of MCMC-GSA model calibration method to urban runoff quality modeling [J]. Reliability Engineering and and System Safety, 2006,91(10/11): 1398-1405.

[8] Tang Y, Reed P, Van W K, et al. Advancing the identification and evaluation of distributed rainfall-runoff models using global sensitivity analysis [J]. Water Resources Research, 2007,43(6): W06415.

[9] Van G A, Meixner T, Grunwald S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models [J]. Journal of Hydrology, 2006,324(1-4):10-23.

[10] 徐崇刚,胡远满,常　禹,等.生态模型的灵敏度分析[J].应用生态学报, 2004,15(6):1056-1062.

[11] Helton J C. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive-waste disposal [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1993, 42(2/3): 327-367.

[12] Downing D J, Gardner R H, Hoffman F O. An examination of response-surface methodologies for uncertainty analysis in assessment models [J]. Technometrics, 1985,27:151-163.

[13] Mckay M D, Beckman R J, Conover W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 1979, 21: 239-245.

[14] Yu P S, Yang T C, Chen S J. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model [J]. Journal of Hydrology, 2001,244(1/2):43-59.

[15] Saltelli A, Chan K, Scott E M. Sensitivity analysis [M]. New York: Wiley, 2000.

[16] Muleta M K, Nicklow J W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model [J]. Journal of Hydrology, 2005,306(1/4):127-145.

作者简介：王浩昌(1985-),男,山西忻州人,清华大学环境科学与工程系硕士研究生,主要研究方向为城市降雨径流模拟.发表论文 1 篇.

寻求破坏废水中的环境激素类物质

环境激素类物质(或称内分泌干扰剂)已引起普遍关注,其在废水中的浓度低,常规污水处理厂不易从废水中去除这类物质,最好是从源头消除.

最近美国农业部设在北达科他州 Fargo 的生物科学研究所的生理学家 Nancy Shappell 和她的同事说在美国地表水中已发现有内分泌干扰剂,有些是天然环境激素类物质.许多这类物质有雌激素活性.例如避孕药片中常见成分乙炔基雌二醇是环境中这类物质的主要来源之一.

为解决这一问题,研究人员试验了一种名为 Fe-TAML 或 Fe-B*的催化剂.在有过氧化氢存在的情况下,该催化剂能快速有效地破坏各种通常在经过处理后的废水中存在的类雌激素物质,据说能在 15min 内去除 95%环境激素类物质,包括乙炔基雌二醇.

研究人员计划在下一步试验 Fe-B*在实际废水中处理环境激素类物质的效率,另外还要进一步评估处理后副产物的可能毒性.据研究人员介绍,Fe-B*催化剂的另一个好处是可以破坏有害的细菌孢子.

江　年　摘自《Water Environment & Technology》April, 16(2008)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net