# HSPF 模型水文水质参数敏感性分析

## 罗 川,李兆富\*,席 庆,潘剑君

(南京农业大学资源与环境科学学院,南京 210095)

摘 要:参数敏感性分析是模型不确定性量化的重要环节,有助于对关键参数的识别,减少参数的不确定性影响,进而提高参数优化效率。以太湖地区典型小流域为研究区,采用扰动分析法对 HSPF 模型水文模块、泥沙模块以及氮磷输移等水文、水质模拟过程的参数进行了敏感性分析。研究结果显示:水文模块选取的 17 个参数中有 7 个敏感: UZSN、INFILT、AGWRC 对径流的敏感级别为 Ⅲ类,LZSN、DEEPFR、INTFW、IRC 敏感级别为Ⅱ类。泥沙透水地面模块选取的 9 个参数中,KSER、KGER、JGER 为Ⅲ类敏感参数, JSER 为Ⅳ类敏感参数;不透水地面模块选取的 4 个参数中,KEIM、JEIM、ACCSDP 对泥沙产量的敏感级别为Ⅲ类;河道模块选取的 5 个参数中,KSAND、EXPSND 为Ⅲ类敏感参数,TAUCS、TAUCD 为Ⅱ类敏感参数。总氮模拟选取了 23 个参数分析敏感性,其中 WSQOP、SQOLIM、MON-GRND-CONC 为Ⅳ类敏感参数,KATM20、MON-IFLW-CONC 为Ⅲ类敏感参数,TCNIT、PHYSET、MALGR 敏感级别为Ⅱ类。磷素输移模拟选取了 12 个参数,MON-GRND-CONC 敏感级别为Ⅲ类,MON-POTFW、MON-IFLW-CONC、 MALGR、PHYSET 敏感级别为Ⅱ类。研究结果对于开展基于 HSPF 模型的流域水文水质研究工作参数的选取具有一定的参考价值, 尤其对于太湖周边地区众多低山丘陵小流域进行 HSPF 模型水文水质模拟时敏感性参数的选取具有借鉴意义。 关键词:参数敏感性;HSPF 模型;水文水质模拟;扰动分析法

中图分类号:X143 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)10-1995-08 doi:10.11654/jaes.2014.10.017

#### Sensitivity Analysis of Hydrological and Water Quality Parameters of HSPF Model

LUO Chuan, LI Zhao-fu\*, XI Qing, PAN Jian-jun

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Model sensitivity analysis measures the variability of output variables caused by perturbations in parameter values and input data. It is important for parameter selection, model calibration, and model improvement. As one of the integrated watershed model, HSPF (Hydrological Simulation Program–Fortran) model has a lot of parameters related to the physical characteristics of local watershed. In order to ascertain the sensitive parameters for hydrology and water quality simulation of HSPF model, a typical small watershed in the Taihu Lake hilly region was used as a case study. Perturbation method was employed to evaluate the sensitivity of parameters of hydrology, sediment and N and P transportation modules. It was found that seven of 17 selected parameters in the hydrology module were sensitive. The sensitive level of UZSN, INFILT, and AGWRC was Type III, while that of LZSN, DEEPFR, INTFW, and IRC Type II. Of nine parameters for the pervious surface of sediment, the sensitive level of KSER, KGER and JGER was Type III, and JSER Type IV. Among the four parameters for impervious surface, the sensitive level of KEIM, JEIM and ACCSDP was Type III. The reach parameters KSAND and EXPSND had Type III sensitivity, while TAUCS and TAUCD had Type II sensitivity. In selected 23 parameters for nitrogen simulation module, WSQOP, SQOLIM, MON–GRND–CONC were Type IV, KATM20 and MON–IFLW–CONC Type III, and TCNIT, PHYSET and MALGR Type II sensitive. Phosphorus module had 12 parameters, of which MON–GRND–CONC was Type III and MON–POTFW, MON–IFLW–CONC, MALGR, and PHYSET Type II sensitive parameters. These results would be useful for selection of sensitive parameters for hydrology and water quality simulation used for HSPF model, especially for small hilly watersheds in the Taihu Lake area.

Keywords: parameter sensitivity; HSPF model; hydrological and water quality simulation; perturbation analysis method

收稿日期:2014-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41171071);江苏高校优势学科建设工程项目;国家科技支撑计划子课题(2012BAJ22B02-03);教育部留学回国 人员科研启动基金资助项目

作者简介:罗 川(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为流域非点源污染。E-mail:lc\_notek@163.com

<sup>\*</sup>通信作者:李兆富 E-mail:lizhaofu@njau.edu.cn

流域的水文水质输移过程受气候、土壤、植被、土 地利用以及流域自身地形地貌等多种因子共同作用 的影响,存在着明显的时空变异特征,而模型是研究 时空变异的有效途径和方法<sup>[1]</sup>。HSPF(Hydrological Simulation Program–Fortran)模型源于斯坦福模型SWM (Stanford Watershed Model)<sup>[2]</sup>,于 1981年由Robert Cart Johanson提出。它是一个半分布式的概念模型, 充分考虑了流域陆面参数在空间上的变异性,把空间 分布的物理属性结合到了水文响应单元<sup>[3]</sup>。HSPF模 型内嵌于 BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Non–point Sources)分析系统中,该系 统集成的 GIS 功能为模型所需的地形、地貌、土地利 用、流域等数据的自动生成和叠加处理提供了方便。

作为半分布式水文模型的优秀代表,HSPF 模型 在国外应用研究已经相当深入[47]。然而由于模型运行 需要大量的输入数据和参数,目前在模型应用的文献 中,对水文水质模块各组参数的使用过程存在明显差 异。Mishra 等<sup>14</sup>在印度某流域非点源污染模拟研究中, 只选取了5个影响径流和5个影响泥沙的敏感参数, 对调整了哪些N、P参数并没有说明;Im 等同选择弗吉 尼亚州的一个城镇化流域,模拟未来土地利用变化对 水文水质的影响,选取了7个影响径流的敏感参数, 12个影响泥沙的敏感参数,8个影响 TN 的敏感参数 以及5个影响P的敏感参数;Ribarova 等<sup>66</sup>分别选取 14个影响径流的参数和7个影响氮、磷营养盐的参 数,对保加利亚 Iskar 河进行了首次洪水营养盐浓度 的预测;Liu 等<sup>17</sup>利用 HSPF 模型为研究滨岸带土地利 用变化对水文水质的影响,选取了7个径流敏感参 数,5个N和5个P敏感参数。在这些研究中,对 HSPF 水文水质模块中参数的使用存在不同程度的差 异性,而且没有对各参数的敏感性进行分析。在国内, HSPF 模型的应用研究相对较少,模型应用过程中对 敏感参数的选择大多参考国外研究成果而缺乏系统 的指导。近几年在潮河<sup>18</sup>、东江<sup>19</sup>以及淡水河<sup>109</sup>等流域 开展的水文、泥沙和氮磷营养盐的模拟为 HSPF 模型 在国内的应用奠定了一定的基础,但对水文水质参数 的使用同样存在上述现象。在国内外这一系列的研究 中普遍缺乏对模型的参数进行系统的敏感性分析。由 于缺乏参数敏感性分析,一方面使得各地区选取敏感 性参数时具有一定的盲目性;另一方面增加了模型参 数的不确定性,而模型参数的不确定性对模拟结果有 显著的影响[11]。并且,由于模型校准时不同的参数组 合可能会得到相同的模拟结果,参数选择的准确性成

#### 农业环境科学学报 第 33 卷第 10 期

为模型模拟结果真实可靠的关键。因此,对 HSPF 模型水文水质参数的敏感性进行系统的分析对指导模型的应用非常必要。

目前国内应用较多的 SWAT 模型已经开展过参数敏感性分析工作<sup>[12]</sup>,对其在国内的应用奠定了良好的基础,在国内关于 HSPF 模型的综述<sup>[13]</sup>中也对模型参数敏感性分析工作的开展进行了展望。对模型参数进行敏感性分析能够帮助我们迅速理解模型中每一个参数对模拟结果的影响,并筛选出关键参数,减少率定的盲目性和参数的不确定性。本研究以太湖地区典型低山丘陵小流域——中田河流域为实验区,选取了 HSPF 模型水文水质模拟过程的相关参数并进行了系统的研究探索,旨在找出影响水文水质的一系列关键参数,为 HSPF 模型在国内的适应性研究和进一步推广应用奠定基础。

#### 1 数据与方法

#### 1.1 模型实验区概况与数据来源

中田河流域位于太湖西部丘陵山区,流域面积 45.77 km<sup>2</sup>,是太湖地区典型的低山丘陵流域。河流发 源于安徽宣城大梅岭山区,是天目湖重要入湖水系之 一,而天目湖是江苏溧阳的主要饮用水源地,承载着 溧阳市约 78 万人的饮用水安全。流域气候类型属亚 热带季风气候,流域多年(1971—2010 年)平均降水 量为 1170 mm 且降水集中于 4—9 月,全年平均温度 17.5 ℃。流域内分布有低山、丘陵、平原等多种地貌类 型;土地利用方式主要是林地、耕地、草地、园地;地带 性土壤为黄棕壤,山间谷地、山间平原发育有渗育型 水稻土。

太湖流域地处长江三角洲南翼,北滨长江,总面积 3.69 万 hm<sup>2</sup>。流域属北亚热带季风气候,四季分明, 多年平均降雨量为 1181 mm,其中 60%的降雨集中在 5—9 月。流域内分布有丘陵、平原、洼地等地貌类型; 由于气候地带性变化的影响,太湖流域丘陵山区的地 带性土壤相应为亚热带的黄棕壤与中亚热带的红壤。 非地带性土壤有 3 类,其中滨海平原盐土分布于杭州 湾北部与上海东部平原,冲积平原草甸土分布于沿江 广大的冲积平原,沼泽土分布于太湖平原湖群的沿湖 低地。耕作土壤主要为水稻土。

由于中田河流域内的地形地貌、气候条件及土壤 特性等方面与太湖流域丘陵区总体情况具有较高的 相似性,在中田河流域开展研究具有一定的代表性与 典型性。 HSPF 模型构建需要的空间数据包括地形数据、 土地利用数据及土壤数据等,属性数据包括气象数 据、水文数据。其中地形数据源自研究区 1:5 万地形 图,由 ArcMap 数字化后得到矢量文件,建立中田河 流域数字高程模型(DEM);土地利用数据采用 2009 年 0.5 m 空间分辨率的航拍影像,使用 ArcGIS 完成 目视解译,同时经实地勘察验证,完成土地利用现状 图;土壤数据主要来自《江苏省溧阳县土壤志》,土壤 类型在 ArcMap 中直接矢量化得到。气象数据来源于 中国气象科学数据共享服务网溧阳站点,包括日最高 气温、日最低气温、20:00—20:00 降水量、平均风速 及日蒸发量等。

### 1.2 HSPF 水文水质模拟原理与参数选择

在HSPF模型中,根据不同土地利用方式分为透水地面(林地、耕地、草地等)和不透水地面(建筑用地)。流域水文过程在不透水模块的模拟主要包括降水、截留、地表径流以及蒸发;在透水模块的模拟除了以上过程外还包括地表填洼、渗透、蒸腾、壤中流和地下水流等过程,模型自上而下分为树冠层、植被层、各土壤层(表层土壤、上土壤层、下土壤层、地下水涵养层),降水在这6层间进行分配,最终由地表径流、壤中流和地下水流进入河流。基于此,本文参考HSPF模型手册径流过程模拟的相关方程以及国内外研究成果<sup>[14-18]</sup>,共选取了17个对流域水文过程有影响的参

数进行敏感性分析(表1)。

水体中的泥沙主要来源于降雨对透水地面土壤 的侵蚀以及对不透水地面的冲刷。HSPF中透水地面 泥沙的模拟在 SEDMNT 模块中完成,包括两部分过 程:由降雨引起泥沙与土壤基质的分离过程;地表径 流对泥沙的搬迁过程。不透水地面对泥沙的模拟在 SOLIDS 模块下完成,其只有地表径流对泥沙的搬迁 这一过程。在河道中,泥沙的模拟在 SEDTRN 模块中 进行,主要是考虑水流演进中泥沙在河道的传输。本 研究参考 HSPF 模型泥沙相关方程及国外文献<sup>[4,19]</sup>选 取了 18 个参数进行敏感性分析(表 2)。

HSPF模型对水质的模拟有两种方法:水质成分的积累和消耗以一阶消解速率来表示;潜在因素法,该法假定水质成分与泥沙运移有密切关系。氮和磷的营养物循环分别在 PQUAL(Quality constituents for pervious land)、IQUAL(Quality constituents for impervious land)、IQUAL(Quality constituents for reaches)等模块下用简单的经验关系对透水地段(PERLND)、不透水地段(IMPLND)和地表水体(RCHRES)进行模拟。由于硝酸盐和亚硝酸盐通常不会被沉淀吸附,它们的模拟采用一阶消解速率法,而磷的负荷量通常与沉淀的负荷量相关,因此,磷的模拟是采用潜在因素法来计算磷与沉淀的强度关系。每个子流域中氮和磷的模拟以各自的土地利用为基本

模型参数	参数含义	单位 一	取值范围			
			典型	可能	- 5 值(相对敏感度)	<b></b>
LZSN	额定的下土壤层蓄积	in	3~8	2~15	-0.07	Ш
INFILT	土壤渗透率	$\mathrm{in} { {}^{\bullet} \mathrm{h}^{\mathrm{-l}}}$	0.01~0.25	0.001~0.500	0.23	Ш
LSUR	坡面漫流平均坡面长度	ft	200~500	100~700	-0.005	Ι
SLSUR	坡面漫流平均坡度	—	0.01~0.15	0.001~0.300	0.003	Ι
AGWRC	地下水消退系数	$d^{-1}$	0.92~0.99	0.850~0.999	0.69	Ш
INFEXP	入渗方程的指数	—	2	1~3	-0.002	Ι
INFILD	最大渗透能力与平均渗透能力的比例	—	2	1~3	-0.04	Ι
DEEPFR	地下水出流中进入深层地下水的比例	—	0~0.2	0~0.5	-0.1	Ш
BASETP	基流的蒸散发百分比	—	0~0.05	0~0.2	-0.02	Ι
CEPSC	截留能力	in	0.03~0.20	0.01~0.40	0	Ι
UZSN	额定上土壤层蓄积	in	0.1~1.0	0.05~2.00	-0.54	Ш
NSUR	曼宁系数	—	0.15~0.35	0.1~0.5	-0.005	Ι
INTFW	壤中流出流系数	—	1~3	1~10	0.121	П
IRC	壤中流消退系数	$d^{-1}$	0.5~0.7	0.30~0.85	0.102	Ш
LZETP	下土壤层蒸发系数	—	0.2~0.7	0.1~0.9	0	Ι
UZS	上层土壤蓄水容量	—	—	0~100	0	Ι
CEPS	植物截留蓄积厚度	in	—	0~100	0	Ι

表 1 径流参数敏感性分析结果 Table 1 Sensitivity analysis of flow parameters

#### Table 2 Sensitivity analysis of sediment parameters 取值范围 模型参数 参数含义 单位 S值 敏感性 典型 可能 透水地面 KRER 泥沙分离方程系数 0.15~0.45 $0.05 \sim 0.75$ 0 Ι JRER 1.5~2.5 1~3 0 I 泥沙分离方程指数 \_ $\mathrm{d}^{\text{-1}}$ AFFIX 土壤紧实度影响系数 0.03~0.10 $0.01 \sim 0.50$ 0 Ι COVER 土地覆盖层中抗侵蚀的百分比 0~0.9 0~0.98 0 Ι \_ $\mathrm{lb}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{ac}^{\text{-1}}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{d}^{\text{-1}}$ NVSI 0 I 泥沙搬迁速度 0~5 $0 \sim 20$ Ш KSER 泥沙冲刷方程系数 0.5~5.0 0.1~10.0 0.36 IV JSER 泥沙冲刷方程指数 1.5~2.5 1~3 -1.05Ш KGER 泥沙冲蚀方程系数 0~0.5 0~10 0.77 Ш JGER 泥沙冲蚀方程指数 1~3 1~5 -0.62不透水地面 KEIM 固定颗粒冲刷方程系数 $0.5 \sim 5.0$ 0.1~10.0 0.26 Ш Ш $1 \sim 2$ 1~3 JEIM 固定颗粒冲刷方程指数 \_\_\_\_ -0.48ACCSDP 固定颗粒堆积速度 $t \cdot ac^{-1} \cdot d^{-1}$ 0~2 0~30 0.22 Ш $d^{\text{-l}}$ REMSDP 固定颗粒搬迁速度 0.03~0.20 0.01~1.00 -0.051 Ι 0.27 Ш 河道 KSAND 砂粒运动幂函数系数 >0 Ш EXPSND >00.92 砂粒运动幂函数指数 \_\_\_\_ \_ $\mathrm{lb}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{ac}^{\text{-1}}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{d}^{\text{-1}}$ Ш TAUCS 河床冲蚀临界切应力 >1E-10-0.063 $\mathrm{lb}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{ac}^{\text{-1}}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{d}^{\text{-1}}$ I TAUCD 泥沙起动临界切应力 \_\_\_\_ >1E-10-0.05 泥沙侵蚀度系数 $lb \cdot ft^{-2} \cdot d^{-1}$ \_\_\_\_ 0.018 Ι М >0

表 2 泥沙参数敏感性分析结果

单元,然后一起汇聚到河流并流向流域出口<sup>[20]</sup>。文中 参考相关 N、P 方程及国外研究成果<sup>[7]</sup>对 N、P 敏感参 数进行了敏感性分析(表 3、表 4)。

#### 1.3 参数敏感性分析方法

参数敏感性分析(Sensitivity analysis)是研究参数 变化所引起的模型响应,是模型不确定性分析的重要

#### 表 3 总氮参数敏感性分析结果

Table 3	Sensitivity	analysis of	TN	parameters

Table 5 Sensitivity analysis of The parameters					
模型参数	参数含义	单位	取值范围	<i>S</i> 值	敏感性
WSQOP	地表径流速率	$\operatorname{in} \cdot h^{-1}$	>0.01	1.52	IV
SQOLIM	渗透性土壤地表径流储存水分最大量	$qty \cdot ac^{-1}$	>0	1.34	$\mathbf{IV}$
IOQC	壤中流出流量中水质成分的浓度	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	0	Ι
AOQC	地下水出流量中水质成分的浓度	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	0	Ι
POTFW	由泥沙冲刷带走水质成分的速率	$qty \cdot t^{-1}$	>0	0	Ι
ACQOP	地表径流中水质累积速率	$qty \boldsymbol{\cdot} ac^{-1} \boldsymbol{\cdot} d^{-1}$	>0	0	Ι
KDSAM	脱附作用	$d^{-1}$	>0	0	Ι
KADAM	吸附作用	$d^{-1}$	>0	0	Ι
KDNI	脱硝作用	$d^{-1}$	>0	0	Ι
KAM	氨化作用	$d^{-1}$	>0	0	Ι
KNI	硝化作用	$d^{-1}$	>0	0	Ι
MON-ACCUM	地表径流中水质成分的月累积速率	$\mathrm{lb}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{ac}^{-1}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{d}^{-1}$	>0	0.04	Ι
MON-IFLW-CONC	水质成分在壤中流出流中的月浓度值	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	0.22	Ш
MON-SQOLIM	地表径流中水质成分的月最大存储量	$lb \cdot ac^{-1}$	>9.999 99E-07	0.03	Ι
MON-GRND-CONC	水质成分在地下水中的月浓度值	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	4.9	IV
KATM20	20℃下总氨氧化率	$h^{-1}$	>0.000 9	0.3	Ш
KNO <sub>2</sub> 20	20 ℃下亚硝酸盐氧化率	$h^{-1}$	>0.000 9	0	Ι
TCNIT	氮氧化率的温度校准系数	—	1~2	0.18	Ш
KNO <sub>3</sub> 20	20 ℃下硝酸盐反硝化率	$h^{-1}$	>0.000 9	0	Ι
TCDEN	反硝化率的温度校准系数	—	1~2	0	Ι
DENOXT	反硝化作用停止的溶解氧浓度阈值	$mg \cdot L^{-1}$	>0	0	Ι
PHYSET	浮游植物沉积速率	$ft \cdot h^{-1}$	>0.000 9	0.06	Ш
MALGR	藻类生长速率	$L \cdot h^{-1}$	>0.000 9	0.07	I

Table 4 Sensitivity analysis of 1 parameters					
模型参数	参数含义	单位	取值范围	<i>S</i> 值	敏感性
MON-POTFW	冲刷效能因子月值	$\mathrm{lb}\!\cdot\!t^{\scriptscriptstyle -1}$	>0	0.08	Ш
MON-IFLW-CONC	水质成分在壤中流出流中的月浓度值	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	0.11	Ш
MON-GRND-CONC	水质成分在地下水中的月浓度值	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	0.51	Ш
SQOLIM	渗透性土壤地表径流储存水分最大量	$qty \cdot ac^{-1}$	>0	0	Ι
IOQC	壤中流出流量中水质成分的浓度	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	0	Ι
AOQC	地下水出流量中水质成分的浓度	qty•ft <sup>-3</sup>	>0	0	Ι
KDSP	磷酸盐解吸一阶反应速率	$d^{-1}$	>0	0	Ι
KADP	磷吸附一阶反应速率	$d^{-1}$	>0	0	Ι
KIMP	磷固定一阶反应速率	$d^{-1}$	>0	0	Ι
KMP	有机磷矿化一阶反应速率	$d^{-1}$	>0	0	Ι
MALGR	藻类生长速率	$\mathbf{L} \cdot \mathbf{h}^{-1}$	>0.000 9	0.11	Ш
PHYSET	浮游植物沉积速率	$ft \cdot h^{-1}$	>0.000 9	0.15	П

表 4 P 参数敏感性分析结果

Table 4 Sanaitivity analysis of Dr

内容之一,也是研发和评价模型不可或缺的环节。

在实际应用中,集合了大量参数的水文模型需要 进行模拟结果与真实值之间的对比以评估模拟的精 确度,而水文模型的过度参数化是个难点问题。为解 决参数的过度化问题,对模型参数进行敏感性分析是 十分必要的,参数敏感性分析能有效识别关键参数, 减少不确定性参数对模型的影响,从而提高模拟的精 确度。常用的水文模型参数敏感性分析方法包括扰动 分析法、RSA 方法、GLUE 方法等[21]。由于计算思路简 单实用,扰动分析方法的应用比较普遍,薄会娟等[2] 采用该法对新安江模型的参数进行了分析;席庆等[2] 采用此种方法对 AnnAGNPS 模型的水文水质参数进 行分析,找出了对模型输出结果影响最大的参数。鉴 干扰动分析法在模型敏感参数分析中的有效性,本文 也采用该法计算了参数的敏感性,其公式为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(Q_{i+1} - Q)/Q_b}{(P_{i+1} - P_i)/100}}{n-1}$$

式中:S为参数相对敏感度; $P_{i}$ , $P_{i+1}$ 分别为第 $i_{i}$ ,i+1次 计算参数的调整百分率;Q<sub>b</sub>为率定后模型的输出结 果; $Q_i$ , $Q_{i+1}$ 分别为第i,i+1次计算模型输出结果;n为 计算次数。

根据敏感度的高低,并参考李燕等[24]对敏感性 级别进行了如下分类:0≤|S|<0.05 不敏感(【):0.05≤ |S|<0.2 一般敏感(Ⅱ);0.2≤|S|<1.0 敏感(Ⅲ);|S|≥ 1.0 极度敏感(IV)。

#### 2 结果与讨论

#### 2.1 HSPF 模型径流模块参数敏感性分析结果

径流模拟是水质模拟的基础,流量的准确模拟是

模型真实表达流域水文水质过程的关键。本文采用扰 动分析法公式计算了径流模块相关参数对径流过程 的敏感性,计算结果见表1。

分析结果显示:共有7个参数对模拟流域径流过 程有明显影响,它们分别是 INFILT、UZSN、DEEPFR、 AGWRC、LZSN、INTFW、IRC, 其中 INFILT、AGWRC、 UZSN 敏感级别为Ⅲ类。INFILT 是影响土壤中水分分 配的关键参数,它控制着降雨转变成地表径流、地下 径流以及土壤含水量的分配比例,提高 INFILT 可以 减少瞬时地表径流而增加地下水量产生更多的基流, 降低则会产生更多的壤中流和坡面流。AGWRC 是地 下水退水速率,控制着地下水退水过程,它等于当前 的地下水排放量与24h前的排放量的比值,整个流 域的退水速率与流域特征有关,包括气候、地形、土壤 和土地利用方式。UZSN 与 LZSN、地表特征以及地形 这三个因素相关,并且随着季节的变化而变化,UZSN 值增加会提高上层的蓄水容量和蒸发能力,这样将导 致坡面流减少,UZSN 降低则增加坡面流。LZSN、 DEEPFR、INTFW、IRC 敏感级别为 II 类。LZSN 与降雨 和流域的土壤特性有关,提高 LZSN 的值则会使下 土壤层的蓄水容量上升继而相应提高了蒸发能力,导 致流量的减少,反之亦然<sup>[15]</sup>。DEEPFR 表示地下水出 流中进入深层地下水的比例,其值越大产流越小。 INTFW 是决定截留水进入地下成为壤中流的系数, 增加 INTFW 值使壤中流增加,减少坡面流,在总水量 不变情况下减少高峰流量,基流并不受其影响。IRC 主要影响壤中流从存储中排放的比率,它通过改变高 峰暴雨流量和基流曲线的下阶段(退水区域)来影响 水文类型。 INTFW 和 IRC 在日流量的调整中有着重 要作用。

不敏感参数方面:LSUR、SLSUR 对该区域径流的 影响微弱,可能是由于它们主要影响坡面流的大小, 而对径流的总量影响微弱。BASETP 为不敏感参数, 可能由于中田河流域植被覆盖率高,因而基流的蒸发 量有限,导致 BASETP 参数对径流量影响微弱。 CEPSC 和 CEPT 亦属不敏感参数,在蒸发过程和植物 吸收过程影响下,植被的截留量能有效进入土壤内部 的部分十分微小。LZETP 主要影响下土壤层的蒸发 量,对降雨过程中大流量和小流量级部分的径流调整 有影响,而对径流量的影响微弱,因此 LZETP 也是不 敏感参数。

本文参数敏感性分析的结果共得到7个对中田 河流域径流过程有明显影响的参数,与目前国内外所 使用的径流参数[14-15,17,25]具有高度的一致性,并且这些 在不同区域而采用相似敏感参数的研究都取得了良 好的模拟结果。这说明扰动分析法对于模型径流参数 敏感性分析的有效性,以及大部分径流参数的敏感性 不随流域的不同而变化。此外,有部分研究认为 BASETP、CEPSC 等参数敏感,也有研究<sup>[20]</sup>认为 UZSN 参数不敏感,但他们的模拟结果仍然在模拟要求的精 度范围之内,可能是由于不同流域之间极大的差异性 引起的,这一点在Liu等<sup>77</sup>的研究中也有相应的描述。 另外,在Diaz-Ramirez<sup>[26]</sup>的研究中发现流域特征以及 降雨等相似的流域之间,敏感性参数趋于一致。因此, 在模型径流敏感性参数选取时,其他与中田河流域特 征如地形地貌、气候等具有较大差异的流域,只可参 考本文径流参数,具体敏感参数的选取需要自行分 析。对于太湖地区众多低山丘陵流域,由于流域之间 存在较高的相似性,中田河的径流敏感参数可以借 鉴,但各个流域的参数具体数值需要单独调整。

#### 2.2 HSPF 模型泥沙参数敏感性分析结果

泥沙的模拟由透水地面、不透水地面和河道模块 组成,由扰动分析法公式计算得到泥沙参数的敏感性 结果见表 2。

从分析结果可以看出:在透水地面模块,KSER、 KGER、JGER 敏感级别为Ⅲ类,JSER 敏感级别为Ⅳ 类。KSER 是描述泥沙冲刷过程的参数,它是反映坡 降、坡面流长度、土壤颗粒系数与糙率等因素的综合 作用的系数。KGER 为泥沙冲蚀方程系数,它是反映 泥沙从母壤中分离出来被水流带走过程的参数。 JSER 和 JGER 分别为以上两参数对应方程的指数。 其余参数为不敏感性参数,如 KRER、JRER 等,它们 作为泥沙分离方程系数与指数,其不敏感的原因可

#### 农业环境科学学报 第 33 卷第 10 期

能是泥沙的分离量与最终悬浮泥沙量没有必要联 系,主要还是要看临界切应力的大小。在不透水地面 模块,敏感参数为 KEIM、JEIM、ACCSDP, 且敏感级别 都为Ⅲ。KEIM 是反映坡降、固体颗粒系数和糙率等 因素综合作用的系数,经验取值范围为 0.05~5。JEIM 反映的是径流强度与沉淀转移能力之间的关系,增大 JEIM 的值会导致沉淀转移能力的提高,一般 JEIM 取 值在 1~2.5 之间。ACCSDP 是一个很重要的参数,如 果不能通过实测分析得出 ACCSDP 值,就必须查阅相 关文献以获得其值,它的变化范围一般为0.00025~ 0.05。在河道模块,KSAND 和 EXPSND 为Ⅲ类敏感参 数,这是两个需要重点率定的参数。TAUCS 和 TAUCD 敏感级别为Ⅱ类,它们直接控制泥沙的淤积 与否,河段中泥沙和粘土的临界切应力可通过分析 日最大切应力 TAU 时间序列获得。对于 TAUCS,超 过此值冲刷将逐渐增加,低于此值则不会发生冲刷 现象;对于 TAUCD,超过此值则不发生淤积,低于此 值表明有淤积。M 为不敏感参数,可能是由于泥沙的 产量跟临界切应力的大小有关而跟侵蚀度无关。

本文分别从透水地面、不透水地面以及河道对泥 沙的参数进行了较为全面的分析,归纳出泥沙各个模 块中相应的敏感参数,它们与目前研究中<sup>[27-28]</sup>泥沙模 块所使用的参数较为一致,再一次说明扰动分析法对 于 HSPF 模型敏感性参数分析的有效性。研究结果对 于其他流域泥沙参数的选取有直接的参考价值,特别 是对于太湖地区低山丘陵小流域有借鉴意义。此外, 泥沙参数的选取还应根据具体研究区情况而定,如研 究区内不含有不透水地面则相应地只选取泥沙透水 模块以及河道模块的参数进行分析。

#### 2.3 HSPF 模型氮素输出模拟参数敏感性分析结果

HSPF 模型并不能直接模拟总氮的结果,总氮负荷是通过计算总氨态氮、硝态氮、亚硝态氮及有机氮之和,模拟时主要考虑了降雨时氨氮及硝态氮随地表径流、壤中流、地下水流出以及氮的硝化、脱硝等一阶生化反应。参数敏感性分析结果见表 3。

从表 3 分析结果可以看出:WSQOP、SQOLIM、 MON-GRND-CONC、MON-IFLW-CONC、KATM20、 TCNIT、PHYSET、MALGR 是影响该流域 TN (Total Nitrogen)模拟过程的关键参数。其中,WSQOP、 SQOLIM 和 MON-GRND-CONC 为IV类敏感参数, WSQOP 与 SQOLIM 主要对硝态氮敏感而对 TAM (Total Ammonia)不敏感,MON-GRND-CONC 通过控 制地下水中 TN 的浓度来影响径流中 TN 的浓度值; MON-IFLW-CONC 与 KATM20 为 III 类敏感参数; PHYSET 和 MALGR 为 II 类敏感参数,水体中浮游植 物和藻类的新陈代谢活动是 N 循环中的重要组成部 分,这两个参数分别影响浮游植物与藻类的沉积与 生长(在下文磷参数的分析中也是同样的道理)。其 余参数为不敏感参数,其中 KADAM、KDSAM 分别控 制铵态氮与泥沙等沉淀物的吸附与脱附关系,由于 氦很少吸附在泥沙等沉淀物上面,这两个参数为非 敏感性参数。KDNI、KAM、KNI、KNO<sub>2</sub>20、KNO<sub>3</sub>20 等 参数分别控制着铵态氮、硝态氮以及亚硝态氮的反 应过程。如 KAM,这个参数控制着有机氮的氨化过 程,虽然损失了有机氮,但水体中的总氮并未受到影 响,因此这个参数也是不敏感性参数。在 Liu 等<sup>III</sup>的 研究中采用与以上相似的参数对 TN 进行了校准, 并且得出了较好的验证结果。

#### 2.4 HSPF 模型磷素输出模拟参数敏感性分析结果

水体中磷以泥沙吸附态、溶解态和有机态 3 种形 式存在,其中溶解态磷的比例很低,有机态的磷主要 存在于生物体内,因此主要是模拟吸附态的无机磷。 磷参数敏感分析结果见表 4。

表4结果反映出 MON-GRND-CONC、MON-POTFW、MON-IFLW-CONC、MALGR、PHYSET 是影 响模型在该流域模拟磷的关键参数。其中,MON-GRND-CONC 是Ⅲ类敏感参数,MON-POTFW、MON-IFLW-CONC、MALGR、PHYSET 是Ⅱ类敏感参数,同 氮的参数分析类似。KDSP、KADP、KIMP、KMP是不敏 感参数,其中 KDSP 和 KADP 是分别控制磷解吸与吸 附作用的参数,可能由于水体中大部分的磷是吸附在 泥沙等沉淀物的表面,而溶解态磷的比例很低,并且 这两个过程是处于一个平衡状态,这两个参数对于调 节磷的解吸与吸附过程不会有明显的效果。KIMP 和 KMP 这一对参数控制着有机磷和无机磷的循环过 程,由于水体中有机磷的含量较少,少量的有机磷与 无机磷变化并不能对占大比例的吸附态磷总量产生 明显影响,而模型主要模拟吸附态的磷,这一对参数 同样为不敏感性参数。另外,由于无机磷的模拟采用 的是潜在因素法,SQOLIM、IOQ、AOQC 等参数可以忽 略,故也是不敏感性参数。

目前关于 HSPF 模型的应用中,对氮、磷敏感参数的讨论较少,由于 HSPF 模型中氮、磷复杂的模拟 机理,氮、磷的模拟一直是个难点问题,很难得到较为 精确的结果,这很可能与相关参数的选取具有直接关 系。本文采用扰动分析法对氮、磷有较大影响的参数 进行了探索,鉴于该方法在水文和泥沙部分的良好表现,其对氮、磷参数的分析具有同样的可信性,相关的研究可参考本文中氮、磷敏感参数。

#### 3 结论

本研究采用基于扰动分析的参数敏感度分析方法,以中田河流域为实验区,对 HSPF 模型水文水质的参数进行了分析,得出以下结论:

(1)对径流过程影响最大的7个敏感参数:LZSN、 UZSN、INFILT、AGWRC、DEEPFR、INTFW、IRC。其中, INFILT、AGWRC、UZSN 为Ⅲ类敏感参数,LZSN、 DEEPFR、INTFW、IRC为Ⅱ类敏感参数。

(2)泥沙的敏感参数:在透水地面模块,KSER、 KGER、JGER、JSER 为敏感性参数,其中 JSER 敏感级 别达到了Ⅳ类,其余 3 个为Ⅲ类敏感参数;在不透水 地面模块,KEIM、JEIM、ACCSDP 为敏感性参数且敏 感级别为Ⅲ类;在河道模块,KSAND、EXPSND、 TAUCS、TAUCD 为敏感性参数,其中 KSAND、EXP-SND 为Ⅲ类敏感参数,TAUCS、TAUCD 为Ⅱ类敏感参数。

(3)水质的敏感参数:MON-GRND-CONC、MON-IFLW-CONC、PHYSET 和 MALGR 对氮、磷的模拟结 果都敏感。对于氮的模拟,WSQOP、SQOLIM 敏感级 别为IV,TCNIT 是 II 类敏感参数,KATM20 是 III 类敏 感参数;对于磷的模拟,其敏感性参数除了同样对氮 敏感的 4 个参数外,MON-POTFW 也为 II 类敏感性 参数。

(4)研究结果对于其他流域开展 HSPF 模型水文 水质模拟工作时敏感参数的选取有一定的参考价值, 尤其对于太湖周边地区众多的低山丘陵小流域进行 水文水质模拟时敏感性参数的选取具有借鉴意义。

#### 参考文献:

- 邢可霞,郭怀成,孙延枫,等.流域非点源污染模拟研究:以滇池流域 为例[J]. 地理研究, 2005, 24(4):549-558.
   XING Ke-xia, GUO Huai-cheng, SUN Yan-feng, et al. Simulation of non-point source pollution in watershed scale: The case of application in Dianchi Lake Basin[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(4):549-558.
- [2] Crawford N H, Linsley R K. Digital simulation in hydrology:Stanford watershed model N[D]. Stanford University:Technical Report, 1966, No. 39.
- [3] Johnston M S, Coon W F, Mehta V K. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the Northeastern US: A comparison of HSPF and SMR[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1–4):57–76.

#### 农业环境科学学报 第 33 卷第 10 期

- [4] Mishra A, Kar S, Raghuwanshi N S. Modeling nonpoint source pollutant Losses from a small watershed using HSPF model[J]. *Journal of Envi*ronmental Engineering–Asce, 2009, 135(2):92–100.
- [5] Im S, Brannan K M, Mostaghimi S. Simulating hydrologic and water quality impacts in an urbanizing watershed1[J]. JA WRA Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(6):1465–1479.
- [6] Ribarova I, Ninov P, Cooper D. Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 211(1-2):241-246.
- [7] Liu Z, Tong S T Y. Using HSPF to model the hydrologic and water quality impacts of Riparian Land-Use change in a small watershed[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2011, 17(1):1-14.
- [8] 薛亦峰. 基于 HSPF 模型的潮河流域非点源污染模拟研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009:13-17.
  - XUE Yi-feng. Simulation of non-point source pollution on the basin of Chaohe River by HSPF Model[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009;13-17.
- [9] 董延军, 邓家泉, 李 杰, 等. 基于 HSPF 的东江分布式水文模型构 建[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(09):57-63.
  DONG Yan-jun, DENG Jia-quan, LI Jie, et al. Distributed hydrological model for Dongjiang watershed based on HSPF Model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(09):57-63.
- [10] 张 恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 基于 HSPF 及回归模型的淡水河流域 非点源负荷计算[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4):856-864. ZHANG Heng, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, et al. Estimating nonpoint pollution loading from the Danshui catchment based on HSPF and regression model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 856-864.
- [11] 李明涛. 流域非点源污染模型的比较与不确定性研究[D]. 北京:首都师范大学, 2011:9-15.
   LI Ming-tao. Comparision and uncertainty analysis of non-point source

model in the BASIN of Chao River[D]. Beijing: Capital Normal University, 2011:9–15.

[12] 黄清华,张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地 理, 2010, 33(1):8-15.

HUANG Qing-hua, ZHANG Wan-chang. Application and parameters sensitivity analysis of SWAT model[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33 (1):8–15.

[13] 李兆富, 刘红玉, 李 燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述[J]. 环 境科学, 2012, 33(7):2217-2223.

LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan. Review on HSPF model for simulation of hydrology and water quality processes[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7):2217–2223.

- [14] 李 燕.基于 HSPF 模型的水文水质过程模拟研究:以中田河流域 为例[D]. 江苏:南京农业大学, 2013:27-28.
  LI Yan. Study on hydrology and water quality process simulation based on HSPF model: A case study in Zhongtianhe River watershed[D].
  Jiangsu:Nanjing Agricultural University, 2013:27-28.
- [15] 薛亦峰, 王晓燕, 王立峰, 等. 基于 HSPF 模型的大阁河流域径流量 模拟[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(10):103-107.
   XUE Yi-feng, WANG Xiao-yan, WANG Li-feng, et al. Runoff simulation on watershed of dage river by HSPF model[J]. Environmental Sci-

cience & Technology, 2009, 32(10):103-107.

- [16] 刘 仙. 基于 BASINS/HSPF 模型的岩溶槽谷区地下水模拟研究: 以重庆青木关地下河系统为例[D]. 重庆;西南大学, 2009:7-12. LIU Xian. Simulation research of groundwater in karst valley based on BASINS/HSPF model:A case study of the Qingmuguan subterranean stream of Chongqing[D]. Chongqing:Southwest University, 2009:7-12.
- [17] Chung E S, Park K, Lee K S. The relative impacts of climate change and urbanization on the hydrological response of a Korean urban watershed[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(4):544–560.

[18] Rosenberg E A, Keys P W, Booth D B, et al. Precipitation extremes and the impacts of climate change on stormwater infrastructure in Washington State[J]. *Climatic Change*, 2010, 102(1–2):319–349.

- [19] Mishra A, Kar S, Singh V P. Determination of runoff and sediment yield from a small watershed in sub-humid subtropics using the HSPF model[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(22):3035–3045.
- [20] 董延军,李 杰,郑江丽.流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南[M].郑州:黄河水利出版社,2009:165-220.
  DONG Yan-jun, LI Jie, ZHENG Jiang-li. Watershed hydrology and water quality simulation software(HSPF) application guide[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2009:165-220.
- [21] 王中根,夏 军,刘昌明,等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4):649-655.
  WANG Zhong-gen, XIA Jun, LIU Chang-ming, et al. Comments on sensitivity analysis, calibration of distributed hydrological model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4):649-655.
- [22] 薄会娟, 董晓华, 邓 霞. 新安江模型参数的局部敏感度分析[J]. 人 民长江, 2010, 41(1):25-28.
  BO Hui-juan, DONG Xiao-hua, DENG Xia, et al. Local sensitivity analysis on parameters of Xin 'anjiang model[J]. Yangtze River,
- 2010, 41(1):25-28.
  [23] 席 庆, 李兆富, 罗 川, 等. 基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析[J]. 环境科学, 2014, 35(5):152-159.
  XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan, et al. Sensitivity Analysis of AnnAGNPS model's hydrology and water quality parameters based on the perturbation analysis method[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 152-159.
- [24] 李 燕,李兆富,席 庆. HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型 适用性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6):2139-2145.
  LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing. Parameter sensitivity analysis of runoff simulation and model adaptability research based on HSPF[J]. Environmental Science, 2013, 34(6):2139-2145.
- [25] Skahill B E, Baggett J S, Frankenstein S, et al. More efficient PEST compatible model independent model calibration[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(4):517–529.
- [26] Diaz-Ramirez, Jairo N. Sensitivity of simulating hydrologic processes to gauge and radar rainfall data in subtropical coastal catchments[J]. Water Resources Management, 2012, 26(12):3515-3538.
- [27] Mohamoud Y M. Enhancing hydrological simulation program-FOR-TRAN model channel hydraulic representation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(5):1280–1292.
- [28] Mitsova–Boneva. Exploring the variability in suspended sediment yield using BASINS–HSPF and probabilistic modeling: Implications for land use planning[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2007, 9(1): 29–40.