

SWAT 对大沙河水库流域径流模拟研究

李凤欢¹, 罗澈葱^{2,3}, 翟海涛^{1,2}, 孙莹蓓^{1,2}, 李慧贇^{3,4}

(1. 暨南大学 生态学系, 广州 510632; 2. 暨南大学 资源环境与可持续发展研究所, 广州 510632;

3. 南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 4. 广东省高校水体富营养化与赤潮防治重点实验室, 广州 510632)

摘 要:广东开平大沙河水库为开平市主要供水源,其入库河流都受到不同程度的污染,水库呈富营养化状态需控制外源营养盐的输入。为了探究 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型在亚热带地区的适用性,为流域污染管理提供参考,运用 ArcSWAT2009 对大沙河水库流域进行了径流模拟和评价研究。用 LH-OAT 方法进行参数敏感性分析,找出对径流模拟影响较大的 15 个参数,采用 2003—2012 年的水库总入流数据对模型进行率定和验证。结果表明,LH-OAT 敏感性分析方法可准确地找出模型的敏感参数;将时间尺度分别为日和月的率定和验证结果进行比较,月模拟效果明显较好,其与实测数据的相关系数 R^2 分别为 0.884 和 0.911,纳什系数(NSE)分别为 0.879 和 0.907;模型的自动率定 SCE-UA 方法在大沙河水库流域的水量模拟中较适用,值得进一步研究应用,为水质水量管理工作提供参考。

关键词: ArcSWAT2009; 径流模拟; 敏感性分析; 自动率定

中图分类号: TV121.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0087-07

Simulation of Runoff Parameters with SWAT in Dashuhe Reservoir Watershed

LI Feng-huan¹, LUO Lian-cong^{2,3}, ZHAI Hai-tao^{1,2}, SUN Ying-bei^{1,2}, LI Hui-yun^{3,4}

(1. Department of Ecology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China;

2. Institute of Resources, Environment and Sustainable Development, Ji'nan University, Guangzhou

510632, China; 3. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Nanjing 210008, China; 4. Key Laboratory of Aquatic

Eutrophication and Control of Harmful Algal Blooms of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Dashuhe Reservoir is the main source of drinking water for Kaiping City, Guangdong Province. With increasing pollution of inflow waters arising from developments of animal farming, industry and agriculture, the reservoir is now eutrophic and the external loadings need to be reduced for water quality regulation. For testing its availability for subtropical area and water environment management, ArcSWAT2009 was applied to simulate and evaluate the river inflows of Dashuhe Reservoir. LH-OAT method was used for sensitivity analysis. 15 parameters were sensitive to the simulation of river inflows. Auto-calibration and validation were conducted based on observed inflows data during 2003—2012. The results indicated that the LH-OAT method could effectively find out the sensitive parameters. The monthly simulations had a better result than the daily simulations, the monthly coefficients of determination (R^2) were 0.884 and 0.911 and Nash-suttcliffes coefficients were 0.879 and 0.907, respectively, which suggests that SCE-UA is effective for SWAT calibration at Dashuhe Reservoir catchment and SWAT model might be externally applied for water environment management in this area.

Key words: ArcSWAT2009; runoff simulation; sensitivity analysis; auto-calibration

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型 评估管理措施的改变对流域点源和非点源污染的影响^[1]。该模型偏重于水文的模拟,能预测流域的总径

是一个连续时间序列的半分布式流域模型,主要用来

收稿日期:2013-11-15

修回日期:2013-12-05

资助项目:中国科学院“百人计划择优支持项目”(Y0BROB045);广东省水利科技创新项目(201102);水体富营养化与赤潮防治广东普通高校重点实验室开放基金项目(KLGHEIKLB07007);国家自然科学基金项目(40871095)

作者简介:李凤欢(1986—),女,河南濮阳人,硕士研究生,主要研究方向为水环境数值模拟。E-mail:lfh0219@163.com

通信作者:罗澈葱(1972—),男,湖南娄底人,博士,教授,主要研究方向为水环境数值模拟。E-mail:lcluo@niglas.ac.cn

流量、泥沙流失量和营养盐负荷。模型将土地利用和流域水文等过程联系起来,可对流域管理中各种决策的适用性进行评估。关于该模型的原理及应用已有广泛介绍^[1-3]。目前国外对 SWAT 的研究较早和深入,主要方面有:关于 GIS 界面的描述、水文评估、构建及输入数据变化的影响、自动率定和敏感性分析、气候变化的影响作用、与其他模型及方法的比较、与其他模型的连接、污染评估等^[2]。国内对 SWAT 的研究起步较晚,在模型各方面的研究比较初步^[4-5]。水量平衡是 SWAT 中所有过程的驱动力,它影响植物生长及泥沙、营养盐、杀虫剂和病菌的迁移运动。水文循环又由天气驱动,需要提供逐日降雨、最高最低气温、太阳辐射、风速、相对湿度等观测数据^[6]。为了更好地使用 SWAT 的预测和评估作用,必须将水量平衡的不确定性降到最小。

为了减小和评估模型的不确定性,一般先对模型进行参数敏感性分析和参数率定。SWAT2009 模型自带参数敏感性分析和自动率定模块,可分析判断敏感性参数并对其进行调整,使模型在流域中的应用效果最佳。SWAT2009 自带的参数敏感性分析模块采用 LH-OAT 法进行参数敏感性分析。该方法结合了拉丁超立方(Latin Hypercube, LH)和每次单因素(One-At-a-Time, OAT)采样方法,保证在所有参数的可行空间中,根据 OAT 的设计进行精确采样,每次模型运行的输出变化都可归结到输入参数的变化,从而保证参数敏感性分析的效率^[7]。模型自动率定程序基于混乱复杂的进化算法—Shuffled Complex Evolution 数学算法(SCE-UA)和一个单一的目标函数。SEC-UA 可以快速有效地解决参数全局采样问题,被认为是连续流域中最有效的方法,并被广泛运用到水文模型中^[8-11]。

最常用的评估水文率定和验证的统计分析方法为相关系数 R^2 和纳什系数^[8](Nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSE),对于月模拟的 NSE 要求大于 0.5 且当 R^2 大于 0.6,才能认为模拟结果较满意^[2]。 R^2 表示观测数据中可被模型解释的总体变量的比例, NSE 表示观测值和模拟值在对比图中对 1:1 线的符合情况,但是 R^2 和 NSE 并不能表示模拟是否偏高或偏低,而偏差百分率 PBIAS 可用来计算模拟值与实测值偏离的情况^[9]。为了探究模型在亚热带地区的适用性,在大沙河水库流域进行 SWAT 模型构建,并对其水文过程进行模拟,运用 ArcSWAT2009 模型自带模块进行参数敏感性分析,找出对径流模拟影响较大的 15 个参数,采用 2003—2012 年的水库日入流和月入流数据分别对模型水量平衡

进行率定和验证,用 PBIAS、 R^2 和 NSE 来对模型进行评估,并对结果进行初步分析。

1 研究材料和方法

1.1 研究区概况

开平市大沙河水库位于广东省开平市区西北部,地处开平、恩平、新兴的交汇处($21^{\circ}56'—22^{\circ}39'N$, $112^{\circ}3'—114^{\circ}48'E$),是拦截大沙水而成,属多年调节水库。水库集雨面积 217 km^2 ,水库面积 16.3 km^2 ,总库容 2.58 亿 m^3 ,正常库容 1.568 亿 m^3 ,正常蓄水位 34.81 m ,是一座具有灌溉、防洪、发电、供水、养殖、造林等多种功能的大(II)型水库^[12],水库流域见图 1。研究区属亚热带海洋性季风气候,全年温和湿润,雨量充沛,暴雨强烈而频繁。年平均气温 22°C ,最低气温 1°C 。全年无霜期 333 d ,年降雨量 $1\,700\sim 2\,400\text{ mm}$,4—9 月降雨量占全年总降雨量的 82.1% 。年日照为 $2\,009\text{ h}$,年太阳辐射为 104 W/m^2 。年蒸发量为 $1\,534.3\text{ mm}$ 。境内季风明显,4—9 月多吹偏南风,10 月—翌年 3 月多吹偏北风。夏季受热带气旋影响,多台风、暴雨,冬季受寒潮影响时出现寒潮和霜冻^[13]。

水库上游流域地表径流主要有大沙河、白沙河、富食河、蟠龙河,在图中分别对应入流 1、入流 2、入流 4、入流 5。流域径流年际变化与降水相对应,季节变化很大。研究发现,主要的 5 条入库河流分别受到不同程度的污染,入流 1 主要受到上游林业(速生桉)及农业方面的污染,入流 2 和入流 3 主要受上游生活污水及养殖废水的污染,入流 4 和入流 5 主要受到养殖及农业方面的污染,大量营养盐的输入使水库易呈富营养化状态^[14]。其水量水质直接关系到开平市 36.34 万人民的健康与社会经济的可持续发展,因此,研究 SWAT 模型在大沙河水库流域的适用性,对大沙河水库水源管理和保护具有现实意义,对模型在亚热带地区的推广应用具有重要意义。

1.2 数据准备

本研究区域选择从大沙河水库上游到水库出水口位置。专题图的原始数据主要从国际科学数据平台(<http://www.csd.cn/>)下载,所需专题文件主要参考 Anders Nielsen^[15],选用国际较通用的格式,采用墨卡托投影统一坐标系,投影带为:WGS_1984_UTM_Zone_49N。由 ArcGIS 以研究区域图为掩膜剪切各原始数据得到专题图,数字地形图(DEM, Digital Elevation Model)的栅格大小是 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$,与此对应,土地利用和土壤图也转为同样栅格大小的 tif 格式。

1.2.1 DEM及坡度分布图 大沙河流域 DEM 原始数据为 SRTM 90 m 第 4 版栅格文件,分辨率为 1:10 万,在 ArcSWAT 中对坡度分析结果如图 2 所示。

1.2.2 土地利用图 大沙河土地利用图原始数据来自欧洲航天局(European Space Agency) Globcover v2009,分辨率 1:10 万,在 ArcGIS 中对其进行切割及重分类制成土地利用图。大沙河水库流域集水区较小,由于本区为大沙河水库的水源保护区,近年来的封山育林、退耕还草等水土保持工作,使本区土地利用结构稍微发生了变化,主要表现为耕地所占面积有所减小。研究区内植被主要以次生林和人工林为主。次生林天然植被主要有亚热带常绿季雨林、南亚热带常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、灌丛与草坡。人工林主要是集约林业,以桉树和松树为主。

1.2.3 土壤数据 土壤分布图原始数据来源于世界土壤数据库(HWSD, Harmonized World Soil Database),分辨率为 1:100 万,经过切割并采用 HWSD 中土壤代码分类制得土壤专题数据。流域内土壤为 6 类:潯育水稻土、麻黄壤、麻红壤、麻赤红壤、页赤红壤、酸性紫色土,其中以麻赤红壤分布最广。

SWAT 进行非点源污染模拟需要土壤的空间数据和属性数据,属性数据包括土壤物理和化学属性数据。土壤物理属性决定土壤剖面中水和气的运动情况,并对水文响应单元(HRUs, Hydrologic Response Units)中的水循环影响很大;土壤的化学属性则决定土壤营养物质的存在状态和丰度。基于 HWSD 中的中国土壤数据^[16],参照 SWAT 数据格式,将相似土壤类型归并,制作该流域土壤属性数据库。大部分参数参考 HWSD 和中国土壤参比数据库,土壤侵蚀方程中的土壤可蚀性因子 K 可通过查阅土壤可蚀性诺模图得到。

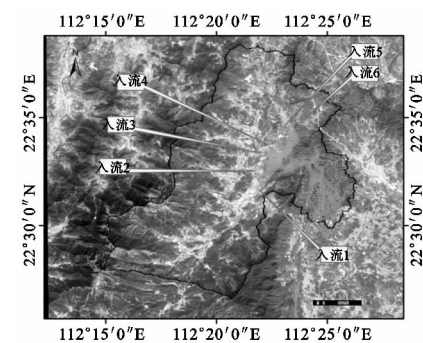


图1 大沙河水库流域图

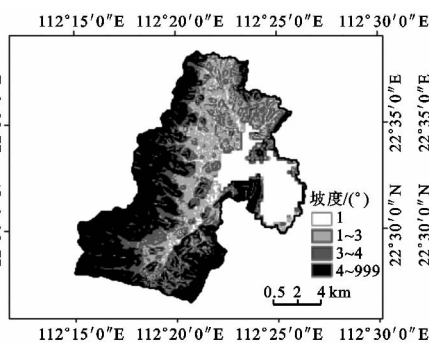


图2 大沙河水库流域坡度分布

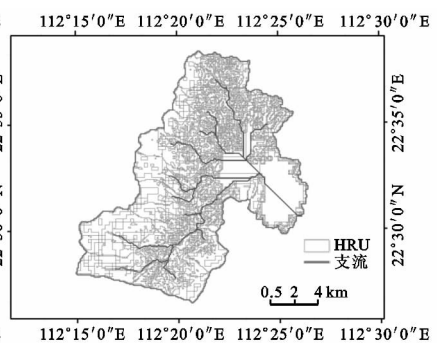


图3 大沙河水库流域 HRUs 分布情况

1.3.2 水量平衡计算 SWAT 模拟的水文过程包括冠层截留、地表径流、入渗、蒸发、横向流动、渠道排水、土壤剖面水的重新分布、消费用水、回流和渗漏。水库水平衡包括入流、出流、水面降雨、蒸发、库底渗

1.2.4 气象数据 SWAT 模型需要输入的气象数据包括逐日最大最小气温、太阳辐射、风速、降雨量和相对湿度。本研究中所用数据为 1981—2012 年流域附近气象站的观测数据,其中 1981—2011 年日最大最小气温、风速和相对湿度采用中国国家气象信息中心阳江观测站数据,降水数据由水库管理站提供,太阳辐射为广州站的测量结果,2012 年气象数据由大沙河水库灯山副坝处的自动气象站收集得到。

1.2.5 水文资料 大沙河水库的水文资料包括大沙河水库库容、面积、年均供水、灌溉面积、泄洪量等数据及 2001—2012 年水库逐日总入流数据,这些资料由开平大沙河水库管理中心提供。

1.3 SWAT 模型及敏感性分析方法

1.3.1 子流域划分 用专题及属性数据构建模型,基于 DEM 进行子流域划分,设研究区为闭合流域,出水口位置位于大沙河水库灯山坝处,在集水面积阈值为 199.73 km² 的尺度上提取流域水系,共划分为 30 个子流域。将土地利用和土壤数据导入到 SWAT 数据库后,可设置一个标准决定 HRU 的分布。首先对土地利用、土壤数据和坡度进行重分类,进行叠加分析,然后定义 HRU 的分布标准。HRU 定义时选用复合 HRU 方法,阈值水平选用面积百分比表示,小于此百分比的数据将被忽略,其余数据将重新计算面积百分比。子流域上土地利用类型的阈值设为 5%,土地利用区域上土壤类型的阈值设为 10%,土壤区域上坡度阈值设为 10%,重分类后生成 369 个水文响应单元(HRUs)如图 3 所示。对流域进行划分能够使模型反映出不同植被及土壤条件下蒸发量的变化。径流在每个 HRU 上单独预测,并按径流汇总得到流域总径流,这提高了精确性并使水平衡过程有较好的物理意义。

漏和分散。

SWAT 模型中水文循环的模拟依据水量平衡方程^[6](Water Balance Equation):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

式中: SW_t ——最终土壤水分含量(mm); SW_o ——土壤初始水含量(mm); t ——时间(d); R_{day} ——第 i 天的降水量(mm); Q_{surf} ——第 i 天的地表径流(mm); E_a ——第 i 天的蒸发量(mm); W_{seep} ——第 i 天从土壤剖面进入到渗流区的水量(mm); Q_{gw} ——第 i 天返回的水量(mm)。

1.3.3 LH-OAT 敏感性分析方法 敏感性分析可以有效地确认参数敏感性顺序, ArcSWAT 自带的参数敏感性分析模块采用 LH-OAT 法进行参数敏感性分析。LH-OAT 敏感性分析方法将参数敏感度表示为一个无量纲的指数, 反映了模型输出结果随参数的微小改变而变化的程度^[17]。该方法采用拉丁超立方采样 (Latin Hypercube, LH) 和每次单因素采样 (One-At-a-Time, OAT) 相结合的方法, 兼有二者的优点。

LH-OAT 算法首先进行 LH 采样, 将整个参数空间分为 m 层, 分别对每一层进行一次随机采样, 各生成一个包含 p 个参数的 LH 采样组, 每组采样值作为该层区间的基线, 然后进行 OAT 采样, 按照设定的百分率改变该组的参数值(1 次 1 个参数), 计算每次参数改变对目标函数变化的影响。在所有参数的可行空间中, 根据 OAT 的设计进行精确采样, 每次模型运行的输出变化都可归结到输入参数的变化, 从而保证参数敏感性分析的效率。若评估参数个数为 p , LH 采样点数为 m , 则模型将运行 $m(p+1)$ 次, 在结果中产生最大平均变化百分率的参数被列为最敏感参数^[18]。

1.3.4 SCE-UA 参数率定方法 参数率定方式有手动调参、SWAT 模型参数自动率定以及 SWAT_CUP 参数率定等方式^[17, 19]。自 SWAT2005 版本以来, 模型开始带有自动率定程序, 该程序基于混乱复杂的进化算法(SCE-UA)和一个单一的目标函数。SCE-UA 先从可行参数空间中随机采样得到初始参数分布群体, 基于给定的参数范围对 p 个参数进行优化。将参数群分为几个群落, 每一群落包含 $2p+1$ 个点, 每个群落依据用单一形法的统计过程运算^[7]。SEC-UA 可以快速有效地解决参数的全局采样问题, 被认为是连续流域中最有效的方法。

SCE-UA 方法对 SWAT 模型进行参数优化的目标函数 SSQ^[7] (Sum of the squares of the residuals) 为:

$$SSQ = \sum_{i=1}^n (x_{i, \text{观测}} - x_{i, \text{模拟}})^2 \quad (2)$$

式中: $x_{i, \text{观测}}$ —— i 时间观测值; $x_{i, \text{模拟}}$ —— i 时间模拟值; n ——观测次数, 以日为时间步长对模型进行

优化。

本文选用的评价方法是偏差百分率 PBIAS^[9]、相关系数 R^2 和纳什系数 NSE。PBIAS 用来计算模拟值与实测值偏离的情况, 该数值越接近 0 越好, 一般要求其绝对值小于 15%, 正值表示模拟值偏高, 负值表示模拟值偏低。 R^2 表示观测数据中可被模型解释的总体变量的比例, $0 \leq R^2 \leq 1$, 较高的 R^2 值代表模型较好的模拟表现。NSE 表示观测值和模拟值在对比图中对 1:1 线的符合情况, $NSE \leq 1$, 值越接近于 1, 模拟结果越具有代表性。当 R^2 大于 0.6, 且 NSE 大于 0.5 时, 可认为模型较适用^[2]。 R^2 值及 NSE 可由 SWATPlot 对实测值与模拟值的对比得到。

选用 2003—2012 年逐月和逐日总入库流量数据分别进行参数率定和验证。其中设 2003—2007 年为模型率定期, 2008—2012 年为模型验证期。

2 结果与分析

2.1 参数敏感性分析

参数敏感性与气候、物理过程和土地利用情况等条件有关, 不同气候区的参数敏感性不同。模型中径流敏感性参数有 26 个, 其中 6 个参数与融雪有关。对日模拟值和月模拟值分别进行参数敏感性分析, 设定所有 HRU 范围的参数值改变, 在运行 270 次后, 结果如表 1 所示。其中前 15 个参数相同而敏感性顺序有差异, 土壤蒸发补偿系数 Esco 是最敏感的参数; 浅层地下水径流系数 Gwqmn、SCS 径流曲线系数 Cn₂、基流 α 系数 Alpha_Bf、最大冠层蓄水量 Canmx 和地下水再蒸发系数 Gw_Revap 等对日、月径流的模拟影响最为显著。因为研究区域全年气温在零上, 无降雪产生, 与降雪融雪有关的参数不敏感, 排序均为 27。

2.2 模型校正和验证

依据敏感性分析结果, 对排名前 15 个参数进行参数自动率定。运用 2003—2012 年入库总流量数据, 在 ArcSWAT2009 的自动率定模块中选用太阳伞 (Parasol)^[18] 方法, 对径流月模拟值及日模拟值分别进行率定和验证, 参数率定和验证结果如表 2 和图 4、图 5 所示。

在以月为时间尺度的模型率定和验证中, 观测数据的月流量采用日均流量, 降雨量采用月总降雨量。在以日为时间尺度的模型率定和验证中, 观测数据的流量和降雨量均采用逐日数据。月模拟的率定期 R^2 值为 0.879, NSE 值为 0.884, 验证期 R^2 为 0.911, NSE 为 0.907, 很明显月模拟可满足模型模拟要求。日模拟的率定期 R^2 值为 0.681, NSE 值为 0.681, 验

证期 R^2 为 0.651,NSE 为 0.648,日模拟也能满足率定基本要求。总体上,水平衡误差为 $-1.03\% \sim -5.5\%$,负值表示模拟值比观测值低。验证期的误差较率定期大一些,但验证期的观测数据可被模型解释的总体变量比例较高,观测值与模拟值的拟合度较好。相对来说,月模拟效果要好于日模拟效果。

表 1 参数敏感性分析结果

参数名称	参数含义	排序①	敏均值①	排序②	敏均值②
Alpha_Bf	基流 α 系数	4	0.114E+00	6	0.526E-01
Biomix	生物混合效率指数	18	0.116E-02	18	0.107E-02
Blai	最大叶面积指数	12	0.220E-01	7	0.305E-01
Canmx	最大冠层蓄水量	5	0.869E-01	5	0.124E+00
Ch_K2	河道有效水电率	9	0.411E-01	12	0.157E-01
Ch_N2	主河道曼宁系数值	11	0.282E-01	14	0.491E-02
Cn ₂	SCS 径流曲线系数	3	0.123E+00	2	0.223E+00
Epc _o	植物蒸腾补偿系数	16	0.201E-02	17	0.202E-02
Esco	土壤蒸发补偿系数	1	0.407E+00	1	0.418E+00
Gw_Delay	地下水滞后系数	15	0.405E-02	15	0.444E-02
Gw_Revap	地下水再蒸发系数	10	0.324E-01	4	0.172E+00
Gwqmn	浅层水径流系数	2	0.289E+00	3	0.219E+00
Revapmn	再蒸发水位阈值	8	0.601E-01	13	0.527E-02
Sftmp	可降雪温度	27	0.000E+00	27	0.000E+00
Slope	平均坡度	14	0.174E-01	8	0.290E-01
Slsubbsn	平均坡长	19	0.727E-03	27	0.000E+00
Smfmn	最小融雪因子	27	0.000E+00	27	0.000E+00
Smfmx	最大融雪因子	27	0.000E+00	27	0.000E+00
Smtmp	融雪温度	27	0.000E+00	27	0.000E+00
Sol_Al _b	潮湿土壤反照率	20	0.226E-03	27	0.000E+00
Sol_Aw _c	土壤可利用水量	6	0.809E-02	11	0.170E-01
Sol_K	土壤饱和导水率	13	0.194E-01	10	0.286E-01
Sol_Z	土壤深度	7	0.709E-01	9	0.413E-02
Surlag	地表径流滞后时间	17	0.186E-02	16	0.413E-02
Timp	雪被温度滞后因子	27	0.000E+00	27	0.000E+00
Tlaps	气温下降率	27	0.000E+00	27	0.000E+00

注:以日为尺度的敏感性分析结果为排序①,敏均值①;以月为尺度的敏感性分析结果为排序②,敏均值②。

表 2 参数率定和验证结果

时间	尺度	水平衡 误差/%	R^2	NSE	阶段
2003—2007	月	-1.034	0.879	0.884	率定
2008—2012	月	-4.99	0.911	0.907	验证
2003—2007	日	-1.056	0.681	0.681	率定
2008—2012	日	-5.498	0.651	0.648	验证

率定期年均降雨量为 1 559.52 mm,验证期年均降雨量 2 114.28 mm,降雨量较大时流量也相应增

大,年径流中约 81.6%在汛期产生。月模拟结果中,总体水平衡误差为 $-1.034\% \sim -4.99\%$,由图 4 可知,总体上模拟与观测吻合情况较好,月模拟结果具有代表性,多数情况下汛期的模拟值与观测值符合情况较好,非汛期的模拟值较观测值低。日模拟结果中,总体误差为 $-1.056\% \sim -5.5\%$,由图 5 可知,模拟值与观测值存在较大差异。在非汛期,模拟值偏低,而在汛期特别是暴雨情况下,模拟结果偏高。

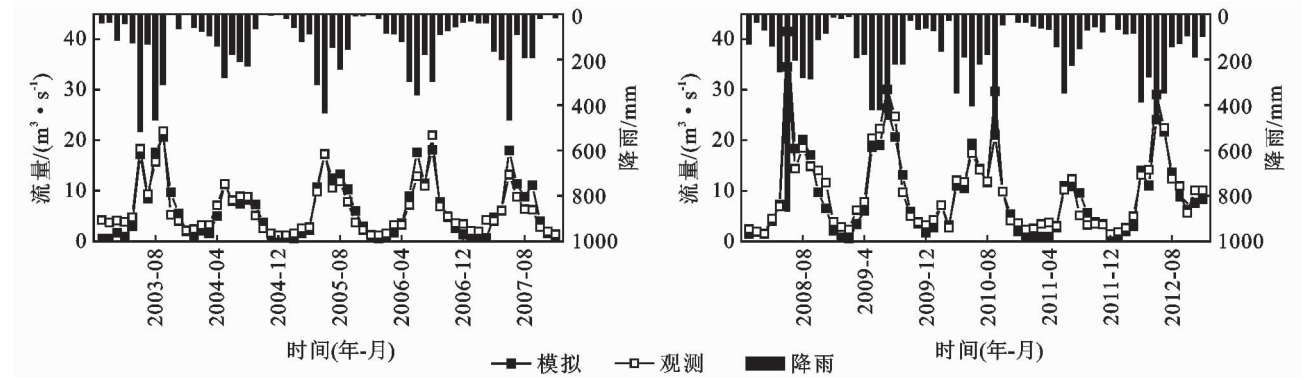


图 4 月径流参数率定和验证

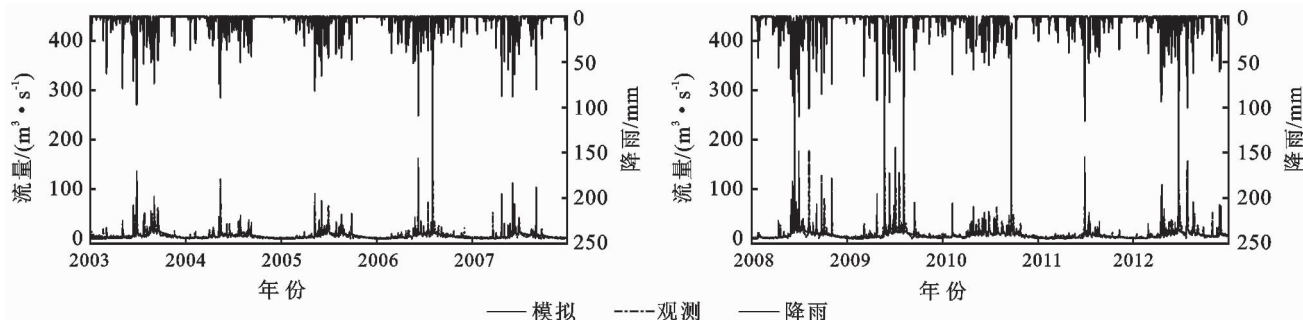


图5 日径流参数率定和验证

3 讨论

本研究用 LH-OAT 敏感性分析方法找到对径流敏感的 15 个参数,减少了率定的盲目性。对径流模拟结果有重大影响的参数主要有土壤蒸发补偿系数 Esco、浅层水径流系数 Gwqmn、SCS 径流曲线系数 Cn_2 、基流 α 系数 Alpha_Bf、最大冠层蓄水量 Canmx 和地下水再蒸发系数 Gw_Revap。这些敏感性参数表明土地利用及植被覆盖对径流模拟影响较大。该流域的河流主要发源于西部的山区,流经丘陵和平地,土地利用正常情况下变化不大,但经济林区砍伐时会造成部分地区植被变化很大。

由于资料限制,仅对全流域水量平衡敏感的 15 个参数进行率定和验证,月模拟率定期 R^2 值为 0.879, NSE 值为 0.884,验证期 R^2 为 0.911, NSE 为 0.907;日模拟率定期 R^2 值为 0.681, NSE 值为 0.681,率定后 R^2 为 0.651, NSE 为 0.648,总体水平衡误差为 $-1.03\% \sim -5.5\%$,总体上模拟值稍低,结果表明,模型在该流域较适用,月模拟效果比日模拟效果好。月模拟与日模拟效果的差异原因主要是日观测值代表性较低,且在汛期河道上游用水闸调节流量,日径流受人为影响大,导致日模拟与观测值偏差较大,在暴雨时特别明显,同时降雨的时空差异性也会导致一定偏差^[20],在降雨丰富时偏差的百分率较小。

Anders Neilsen 等^[15]对该流域土壤饱和导水率 Sol_K 和土壤可利用水量 Sol_Awc、基流 α 系数 Alpha_Bf、地下水滞后系数 Gw_Delay、地下水再蒸发系数 Gw_Revap、SCS 径流曲线系数 Cn_2 、降雨递减率 Plaps 及曼宁值分区域运用手动和 SWAT_CUP 调参,也得到了较好的径流模拟效果,其验证期模拟效果不如率定期好,总体上模拟值稍高。本研究结果与其结果的差异可能是调整后参数值不同导致的,不同的参数组合可以得到相似的模拟结果。其参数率定主要依据经验进行,曼宁系数比常值高,他对径流峰值的缓冲作用做了估计和补偿。这些可能是导致总体模拟值偏高的原因。而本研究对于鱼塘和水闸并

未考虑,且各参数值较低,所以导致总体模拟偏低。

邱临静等^[21]的研究认为 DEM 和子流域提取阈值会影响模拟的精度,欧春平等^[22]认为土地利用/覆被变化较大时对 SWAT 水循环模拟的地表径流影响较大;赖格英等^[23]研究了土地利用和植被覆盖的变化对水文响应的影响,认为植被变化对中等强度的暴雨影响最大,且有明显的洪峰滞后效应;翟晓燕等^[24]对沙澧河的径流模拟认为气候条件对水文过程有重要影响,其中温度降低会引起径流增加;袁军营等^[25]对柴河流域的径流模拟认为小流域中的水库存在会影响洪峰的模拟效果,对日模拟效果影响更显著;这些是模型应用普遍存在的问题。

该流域中模型的不确定性因素主要有:(1) 数据精度的不确定性,原始数据的精度较小可能会影响水系的提取和 HRU 的划分;(2) 未知因素,例如流域内的灌溉回流、畜禽养殖、倾倒垃圾入河、修路、水闸的影响等,这些因素往往无法了解到或不被模型所包括;(3) 气象因素,例如降雨、温度、蒸发量等数据的空间差异性,单个观测点不能反映所有区域的实际情况;(4) 参数值的不唯一性,对全流域进行率定的参数值不一定适用于所有子流域或 HRU,有时还需要对部分区域分别进行率定,不同的参数组合可以得到相似的结果。

本研究初步表明 SWAT 模型在该地区有较好的适用性,比较适合在广东亚热带地区应用,为流域管理提供决策依据。但是模型应用中还存在一些问题,输入数据的精度较小会影响结果的精确性和应用范围,且全流域水量平衡参数率定的结果仅对全流域水量平衡的模拟有意义。若要进一步应用模型,还需要更高精度的原始数据,熟悉研究区域的环境特点和水资源管理情况,掌握充足且详细的数据资料,对模型分区域进行参数率定,提高子流域径流模拟效果。

致谢:感谢 Anders Nielsen 在 SWAT 模型构建方面给予的帮助,感谢姜仕军老师对论文修改的建议,感谢韦桂峰老师、杨尚、戴淑君和么旺的帮助和支持,感谢开平大沙河水库管理中心提供的管理资料。

参考文献:

- [1] Douglas-Mankin K R, Srinivasan R, Arnold J G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(5): 1423-1431.
- [2] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. The soil and water assessment tools: historical development, applications, and future research directions[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [3] 王中根, 刘明昌, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [4] 赖格英, 吴敦银, 钟业喜, 等. SWAT 模型的开发和应用进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(3): 243-250.
- [5] 杨菁芸, 张万昌. SWAT 模型及其在水环境非点源污染中的应用研究进展[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 160-266.
- [6] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool: theoretical documentation (Version 2009)[EB/OL]. [2013-09-18]. <http://twri.tamu.edu/reports/2011/tr406.pdf>
- [7] Griensven A V. Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005[EB/OL]. [2013-09-18]. http://biomath.ugent.be/~ann/swat_manuals/SWAT2005_manual_sens_cal_unc.pdf
- [8] LEI Xiaohui, CHEN Ning, JIANG Yunzhong. Parameters Auto Calibration With Modified SWAT Model in Beijing[EB/OL]. [2013-9-18]. http://www.seiofbluemountain.com/upload/product/201002/1265611824_jm1wpnbe.pdf
- [9] Srinivasan R, Zhang X, Arnold J. SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(5): 1533-1546.
- [10] 朱丽, 秦富仓, 姚云峰, 等. SWAT 模型灵敏性分析模块在中尺度流域的应用: 以密云县红门川流域为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 161-165.
- [11] 李慧, 靳昊, 雷晓云, 等. SWAT 模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究: 以玛纳斯河径流模拟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 79-82.
- [12] 梁绍良. 开平市大沙河水库灌溉供水量平衡计算分析[J]. 南昌水专学报, 2004, 23(3): 37-41.
- [13] 江门市地方志编纂委员会. 江门年鉴[M]. 中国县镇年鉴社, 2012.
- [14] 杨尚, 罗澈葱, 翟海涛, 等. 大沙河主要入库河流氮磷营养输入分析[J]. 生态科学, 2013, 32(2): 158-164.
- [15] Nielsen A, Trolle D, Me W, et al. Assessing ways to combat eutrophication in a Chinese drinking water reservoir using SWAT [J]. Marine and Freshwater Research, 2013, 64(5): 475-492.
- [16] Nachtergaele F, Velthuisen H V, Verelst L, et al. HWSO Documentation[EB/OL]. [2013-09-18]. http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/documents/HWSO/HWSO_Documentation.pdf
- [17] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model Use, Calibration, And Validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [18] Michael W. Van Liew. Guidelines for Using the Sensitivity Analysis and Auto-calibration Tools for Multi-gage or Multi-step Calibration in SWAT [EB/OL]. [2013-09-18]. [http://www.heartlandwq.iastate.edu/NR/rdonlyres/E1A747FB-4B95-485C-97C4-A055CD4DBEF2/136892/Guidelines for Sensitivity and auto-calibrations wat.pdf](http://www.heartlandwq.iastate.edu/NR/rdonlyres/E1A747FB-4B95-485C-97C4-A055CD4DBEF2/136892/Guidelines%20for%20Sensitivity%20and%20auto-calibrations%20wat.pdf)
- [19] 杨军军, 高小红, 李其江, 等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 83-88.
- [20] 赫芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 降雨的空间不均匀性对模拟产流量和产沙量不确定的影响[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 446-452.
- [21] 邱临静, 郑粉莉. DEM 格式分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3754-3763.
- [22] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究: 以海河流域为例[J]. 水利发电学报, 2009, 28(4): 124-129.
- [23] 赖格英, 刘志勇, 刘胤文. 流域土地利用/覆盖与植被变化的水文响应模拟研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 10-14.
- [24] 翟晓燕, 夏军, 张永勇. 基于 SWAT 模型的沙澧河流域径流模拟[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(2): 142-145, 155.
- [25] 袁军营, 苏保林, 李卉, 等. 基于 SWAT 模型的柴河水库流域径流模拟研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 361-365.