

# 考虑径流成分的雅鲁藏布江月径流模拟

赵智超<sup>1</sup>, 富 强<sup>2</sup>, 高 超<sup>1</sup>, 张徐杰<sup>2</sup>, 许月萍<sup>1</sup>

(1.浙江大学水文与水资源工程研究所, 浙江 杭州 310058;  
2.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:**通过构建雅鲁藏布江流域分布式水文模型 SWAT,并以 1989~1998 年为率定期,1999~2005 年为验证期对 3 个水文站(奴各沙、羊村、奴下)的月径流进行了模拟。从模型参数组里选取径流成分模拟不同的 2 组参数,以 Nash-Sutcliffe 效率系数( $NS$ )、相关系数( $R^2$ )及相对误差( $PBIAS$ )为评价指标,来分析模型的模拟结果好坏。结果表明:率定期内,在径流成分 1 下奴各沙、羊村站和奴下站的 $R^2$ 值高达 0.9 以上, $NS$ 系数分别为 0.9、0.92 和 0.72, $PBIAS$ 的值为 7.1%、18.5%及 34.2%,但径流成分与实际情况出入较大。而径流成分 2 下,模拟得到的评价指标虽然不是很高,但径流成分比较合理。验证期总体结论一致。因此,建议在模型率定验证中要充分考虑径流成分的作用,从而提高模型模拟的精度。

**关键词:**SWAT 模型;径流成分;流量过程线;雅鲁藏布江

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)02-0026-05

## 1 研究背景

雅鲁藏布江流域自然地理条件极为复杂和独特,其水资源储量丰富,开展对雅鲁藏布江的水文研究可以深入了解西藏地区水资源的变化趋势,对当地水资源的合理开发和高效利用、可持续发展具有重要意义。目前,对雅鲁藏布江水文过程的模拟研究较多,如高冰<sup>[1]</sup>等构建了 3km 网格的分布式水文模型 GBHM 模拟雅鲁藏布江流域的水文情况,结果表明该模型可以较好的模拟河道流量。顿珠加措<sup>[2]</sup>利用月水量平衡模型对雅鲁藏布江的支流年楚河进行了模拟,发现年楚河流域逐月径流量变化相对平稳,年内分配极不均匀,汛期与枯水期径流量相差较大。Li 等<sup>[3]</sup>运用 SIMHYD 和 GR4J 两个模型来模拟雅鲁藏布江流域在 2 种不同气候情景下的月和年降水径流等情况,结果表明未来径流会大幅度减少。近年来,国内外广泛应用 SWAT 分布式水文模型来进行水文模拟<sup>[4-5]</sup>,罗睿<sup>[4]</sup>应用 SWAT 模型发现黄河中游三川河流域的月径流模拟时模型率定和验证期的 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.71 和 0.73,模拟效果比较理想。姚苏红<sup>[5]</sup>在内蒙古闪电河流

域月径流过程模拟表明,SWAT 模型在干旱区半干旱区的模拟结果较好,在同类地区有适用性。然而,上述研究虽然应用了不同的水文模型进行了径流模拟,但模型率定时通常只考虑单个或若干个目标函数(评价指标),模型性能评估时也只针对整个流量过程线,而对流量过程线各个组成部分的模拟合理性考虑欠缺。同时,国内外 SWAT 研究多为径流模拟,鲜有涉及径流成分是否模拟正确的研究。本文基于 SWAT 模型,结合雅鲁藏布江流域的高程数据、土地土壤数据及水文气象数据,对雅鲁藏布江流域进行了月径流模拟,并根据模型常规评价指标和径流成分分析了模型的模拟效果,考察了分布式水文模型在高原地区的适用性,为高原地区的水文模拟研究提供参考。

## 2 研究区概况

雅鲁藏布江是中国最长的高原河流,位于西藏自治区境内,平均海拔在 4 000m 以上,流域年降水量区域差异极大,上游地区气候寒冷,雨量稀少,属高原寒温带气候,年平均降水量 300mm,中游地区气候温凉,属高原温带气候,年平均降水量为 300~600mm,下游

收稿日期:2016-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91547106;51379183)

作者简介:赵智超(1992-),男,浙江诸暨人,硕士研究生,主要研究方向为水文水资源。E-mail:21412089@zju.edu.cn

地区低谷气候温热,湿润多雨,属热带亚热带气候,年平均降水量在 4 000mm 以上。径流补给以大气降水为主,但不同子流域的补给类型稍有差别,有地下补水为主、雨水补给为主、冰川融水为主的河段。雅鲁藏布江内有拉萨、羊村、日喀则、奴各沙、奴下等 13 个水文站,其中奴各沙、羊村和奴下三个水文站位于其干流上,几乎控制了整个流域。

### 3 水文模型构建

#### 3.1 模型简介

SWAT(Soil Water Assessment Tool)模型是美国农业部的农业研究中心研发的分布式水文模型,具有很强的物理机制,利用地形、土地利用、土壤、气象等基础数据,可以模拟水文循环、泥沙运移、植被生长和营养物质循环等物理过程。其主要功能是在具有不同土壤类型、土地利用和管理条件特征的大尺度复杂流域内,预测土地管理措施对产水、产沙及污染负荷的长期影响<sup>[6]</sup>。SWAT 模型将流域分成多个子流域,并且将每个子流域又划分成很多个水文响应单元(HRUs)。所谓水文响应单元,是指由唯一的土地利用类型和土壤类型组合而成模型中最小的水文计算单元。SWAT 模型运算的基础是水量平衡方程<sup>[7]</sup>:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P - Q_s - ET - W - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中: $SW_0$ 与 $SW_t$ 分别为土壤的始末含水量(mm); $P$ 为当日的降水量(mm); $Q_s$ 为当日的地表径流量(mm); $ET$ 为当日的蒸散发量(mm); $W$ 为当日下渗至深层地下水的水量(mm); $Q_{gw}$ 为当日的地下水出流量(mm); $t$ 为时间(d)。SWAT 模型中通常采用 SCS 曲线法模拟地表产流,该方法为估算各种土地利用和土壤类型下的径流量提供了基础;模型默认采用 Penman-Monteith 法计算蒸散发;对地下水的模拟包括浅层和深层含水层,体现了较强的物理机制。

#### 3.2 数据来源及处理

SWAT 模型所需的数据主要有地理空间数据、非空间属性数据库、气象数据和水文数据。其中空间数据包括数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、土地利用数据和土壤数据。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站,数据为分辨率 90m 的 SRTM 数据。土地利用数据来自于 GLC2000 项目,空间分辨率为 1km×1km。流域内包含了 16 种不同的土地利用,把这 16 种土地类型按照

SWAT 模型中的土地利用数据库的类型进行重分类,分为森林、牧场、草地、水域和荒地。土壤数据来自于维也纳国际应用系统研究所构建的土壤数据库 HWSD(Harmonized World Soil Database)数据,其空间分辨率为 1km×1km。对中国土壤图按土纲进行重分类,覆盖雅鲁藏布江流域的共有 9 类。利用 HWSD 数据库提供的土壤属性数据和 SPA(Soil-Plant-Air-Water)<sup>[8]</sup>计算得到所需的土壤属性数据,包括土壤湿密度、土壤层有效持水量、土壤饱和导水率等。

气象数据来源于“中国气象数据共享服务网”发布的中国地面气候资料集。雅鲁藏布江流域周围共有 39 个气象站点,因为每个站点的启用年份不同,我们从中挑选了 27 个站点,数据时段统一选为 1978~2009 年。气象数据包括日降水量、最低最高气温、风速和日照、相对湿度等实测数据。经划分,雅鲁藏布江流域共得 37 个子流域,196 个水文响应单元(HRU)。

#### 3.3 模型的率定及验证

文中选择 SWAT-CUP2012 来进行自动率定,选取了 28 个参数作为率定的基本参数,模拟次数为 1 000 次。把 1989~1998 年作为模型的率定期,1999~2005 年为验证期,其预热期为 1987 及 1988 两年,模型率定时选择 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)作为目标函数来进行径流模拟。我们以奴下站的率定为例,表 1 中列出了率定的所有参数。

#### 3.4 率定结果的分析

本文首先将模型模拟得到的月径流数据与实测数据相对比,并采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)、相关系数( $R^2$ )及相对误差(PBIAS)三个参数对模型性能进行适用性评价。通常取 $|PBIAS| < 30\%$ 作为模拟误差的评判标准,Nash-Sutcliffe 效率系数越大, $R^2$ 越高,说明模拟效果越好,适用性越高。取 $NS > 0.5$ 作为径流模拟效果评价标准, $NS < 0$ ,说明模型模拟效果极其不理想。 $R^2$ 越接近 1,说明模拟径流量与实际径流量的拟合度越高,取 $R^2 > 0.6$ 作为径流拟合度的评价标准<sup>[9]</sup>。

表 2、3 分别显示了率定期和验证期时两组不同参数组的三个评价指标值。我们发现径流成分 1(最优参数组)时,奴各沙站率定期的 NS 系数为 0.9,相关系数 $R^2$ 为 0.9,相对误差 PBIAS 为 7.1%。奴各沙站验证期的 NS 系数为 0.79,相关系数 $R^2$ 为 0.87,相对误差 PBIAS 为 -29.6%。相比较而言,奴各沙站率定期时三个评价指标值都比验证期好,率定期的 NS 系数和相关系数都十分理想,验证期的 NS 系数和相关系数也

表1 奴下站参数率定表

Table1 The calibrated parameters for the Nuxia station

序号	参数名称	物理意义	初始范围
1	v__ALPHA_BF.gw	基流 $\alpha$ 系数	0~1
2	v__GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	0~500
3	r__GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	0.02~0.2
4	r__RCHRG_DP.gw	深蓄水层渗透系数	0~1
5	r__REVAPMN.gw	浅层地下水再蒸发系数	0~500
6	r__CANMX.hru	最大冠层蓄水量	0~100
7	r__CN2.mgt	SCS 径流曲线系数	35~98
8	r__SOL_K.sol	饱和水力传导系数	0~2000
9	r__SOL_Z.sol	土壤深度	0~3500
10	r__SOL_AWC.sol	土壤可利用水	0~1
11	v__SOL_ALB.sol	潮湿土壤反照率	0~0.25
12	r__USLE_P.mgt	USLE 水土保持因子	0~1
13	r__ESCO.hru	土壤蒸发补偿因子	0~1
14	r__EPCO.hru	植物吸收补偿因子	0~1
15	r__SURLAG.bsn	地表径流滞后系数	0.05~24
16	r__SMFMX.bsn	6 月 21 日雪融系数	0~20
17	r__SMFMN.bsn	12 月 21 日雪融系数	0~20
18	r__SFTMP.bsn	降雪气温	-20~20
19	r__SMTMP.bsn	雪融最低气温	-20~20
20	r__TIMP.bsn	结冰气温滞后因子	0~1
21	r__CH_ERODMO.rte	河道冲刷细数	0~1
22	r__CH_N2.rte	主干道的曼宁系数 $n$ 值	-0.01~0.3
23	r__TLAPS.sub	气温递减率	-10~10
24	r__CH_COV1.rte	河道侵蚀系数	-0.05~0.6
25	r__CH_COV2.rte	河道覆盖系数	-0.001~1
26	r__CH_K2.rte	饱和水力导系数	-0.01~500
27	r__PLAPS.sub	降水递减率	-1000~1000
28	r__SNOEB.sub	高程带上的最初含雪量	0~999999

比较理想,但率定期的相对误差为 7.1%,尚在合理范围内,而验证期时的相对误差则达到-29.6%,只能勉强接受。总体来看奴各沙站率定期和验证期月径流模拟效果比较理想,拟合程度也不错。羊村站率定期  $NS$  系数为 0.92,相关系数  $R^2$  为 0.95,相对误差  $PBIAS$  为 18.5%。羊村站验证期的  $NS$  系数为 0.91,相关系数  $R^2$  为 0.91,相对误差  $PBIAS$  为-4.4%。羊村站三个评价指标值都十分好,说明模拟情况良好。奴下站率定期  $NS$  系数为 0.72,相关系数  $R^2$  为 0.92,相对误差  $PBIAS$  为 34.2%。羊村站验证期的  $NS$  系数为 0.78,相关系数  $R^2$  为 0.95,相对误差  $PBIAS$  为 27.1%。奴下站作为最后出口站点模拟较之前两个站点模拟结果差,尤其相对误差在率定期和验证期都不是非常理想,这可能与奴下站点附近的土地利用有关,结合土地利用数据发现奴

下站点附近有大量森林地貌,而奴各沙站和羊村站附近森林地貌较少。总体看来,SWAT 模型在雅江流域的模拟结果还不错,适用性比较高。

对径流成分 2(径流成分模拟良好)的参数组进行分析,我们从表 2 和表 3 可以比较发现三个站点的评价指标值都有所下降,其中奴各沙站降比最多,纳什效率系数( $NS$ )从 0.9 下降至 0.54,决定系数  $R^2$  从 0.9 下降至 0.61,羊村站和奴下站下降幅度稍小,纳什效率系数( $NS$ )分别从 0.92 和 0.72 下降到了 0.82 和 0.63,决定系数  $R^2$  分别从 0.95 和 0.92 下降到了 0.82。不过三个站的相对误差( $PBIAS$ )变化有所不同,奴各沙站和羊村站的相对误差都有所减小,奴下站的相对误差增加不明显。

表2 两次模拟情况下率定期的评价指标值

Table2 The evaluation indexes of the twosimulations for calibration

站点名称 评价指标	奴各沙		羊村		奴下	
	径流 成分 1	径流 成分 2	径流 成分 1	径流 成分 2	径流 成分 1	径流 成分 2
$NS$	0.9	0.54	0.92	0.82	0.72	0.63
$R^2$	0.9	0.61	0.95	0.82	0.92	0.82
$PBIAS/\%$	7.1	-4.7	18.5	8.4	34.2	36.6

表3 两次模拟情况下验证期的评价系数值

Table3 The evaluation indexes of two simulationsfor validation

站点名称 评价参数	奴各沙		羊村		奴下	
	径流 成分 1	径流 成分 2	径流 成分 1	径流 成分 2	径流 成分 1	径流 成分 2
$NS$	0.79	0.69	0.91	0.86	0.78	0.71
$R^2$	0.87	0.79	0.91	0.86	0.95	0.89
$PBIAS/\%$	-29.6	-31.4	-4.4	-1.4	27.1	30.8

3.5 径流成分的分析 and 讨论

异参同效,即寻优过程中总是可以搜索到几组或者很多组不同的参数值,使得水文模型的效果一样或者类似<sup>[10]</sup>。诸多研究探讨了水文模型的异参同效性问题,通过选取不同的  $NS$  值来分析参数的不确定性问题<sup>[11-12]</sup>。本文则选取不同  $NS$  值的两组参数来分析径流成分的模拟效果,希望能为避免异参同效现象和参数选优提供一定的参考。

我们从 1 000 次模拟中较为主观地选取  $NS>0.5$  而径流成分模拟情况不同的两组参数来分析 SWAT 模型的模拟效果,其中一组为模型模拟的最优参数组(径流成分 1),另一组为径流成分模拟较接近实际情况的参数组(径流成分 2)。这里,径流成分 2 并不一定是径

流成分模拟最好的参数组,只是为了说明径流成分问题。

由于三个站点模拟得到的径流成分模拟类似,根据前面径流模拟分析结果显示,羊村站的模拟较好,更具有代表性,因此这里以羊村站为例进行分析。图 1 和图 2 分别为率定期径流成分 1 和径流成分 2 的径流成分占比图。从图中我们可以发现径流成分 1 在率定期时其地表径流几乎为 0,壤中流和地下径流分别占据全部径流量的 75%和 25%左右,这极其不符合常理<sup>[13]</sup>。之前有研究表明雅鲁藏布江径流补给主要来源于大气降水补给、融雪补给和地下水补给,在河流干流上游及中游上段,以地下水补给为主;中游下段至下游上段,补给形式转为以雨水、融雪混合补给型;进入大峡谷以下暴雨区,河流以雨水补给为主<sup>[13]</sup>,所以在羊村站地表径流应该占据相当大的比值,而径流成分 1 模拟得到的径流成分占比与实际情况严重不符。而径流成分 2 的径流占比图中,我们发现地下径流占了总径流量的

60%左右,地表径流占了 30%~40%,壤中流只有 10%左右,同刘天仇<sup>[13]</sup>研究得到的径流成分相接近。图 3 和图 4 分别为验证期径流成分 1 和径流成分 2 的径流成分占比图,其与率定期基本相似,变化不大。

径流成分是径流模拟的重要组成部分,径流成分模拟准确是径流合理模拟的前提。通过不同参数组的比较,我们发现径流成分 1 模拟时,三个评价指标都很理想,表明 SWAT 模型对雅鲁藏布江流域非常适用,但是同时在分析其径流成分时,我们发现模拟得到的径流成分占比极其不理想,与实际情况相去甚远。而径流成分 2 的模拟结果显示,三个评价指标也在接受范围内,但 *NS* 有所降低,其径流成分模拟则与现实情况较为相似。这可能与雅鲁藏布江所处自然环境有关,其位于数据资料匮乏且有冰川分布的高海拔地区,同时 SWAT 的融雪模块对冰川径流的模拟能力也相对较弱<sup>[14]</sup>,可能导致最优参数组在进行径流模

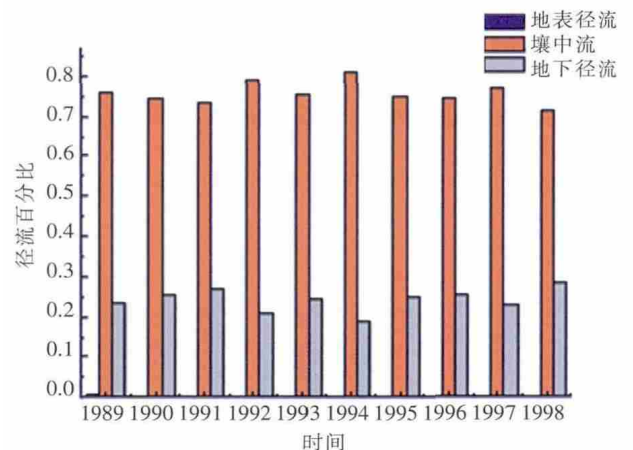


图 1 率定期内羊村站在径流成分 1 时的径流成分图  
Fig.1 The simulated runoff components for the 1st parameter set at the Yangcun station during calibration

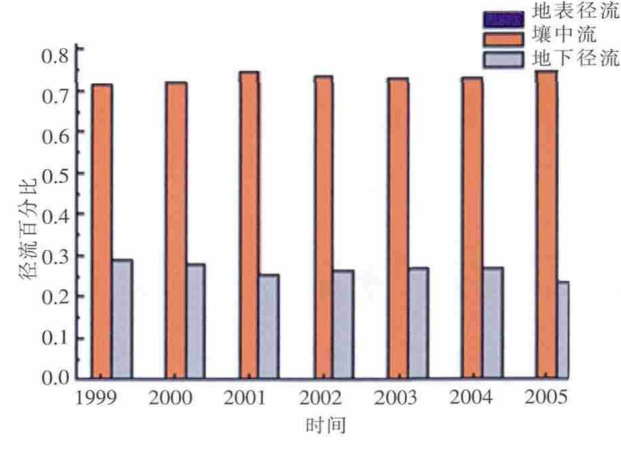


图 3 验证期内羊村站在径流成分 1 时的径流成分图  
Fig.3 The simulated runoff components for the 1st parameter set at the Yangcun station during validation

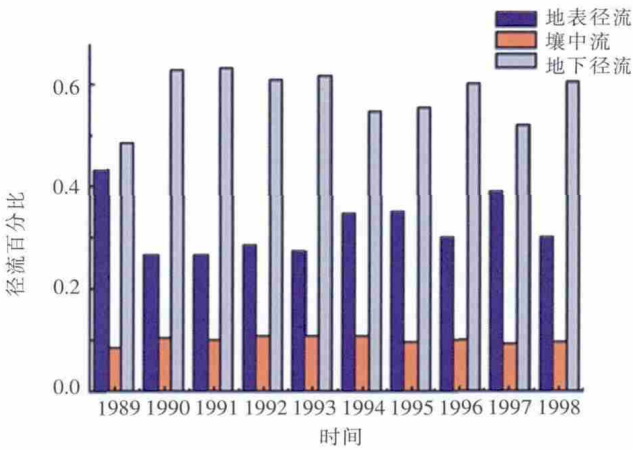


图 2 率定期内羊村站在径流成分 2 时的径流成分图  
Fig.2 The simulated runoff components for the 2nd parameter set at the Yangcun station during calibration

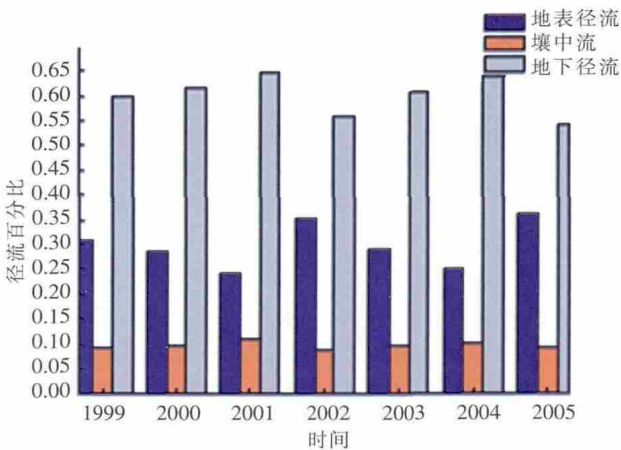


图 4 验证期内羊村站在径流成分 2 时的径流成分图  
Fig.4 The simulated runoff components for the 2nd parameter set at the Yangcun station during validation

拟时  $NS$  效率系数高, 而径流成分不理想的情况。同时, 这也提醒我们在进行 SWAT 模型模拟时, 当评价指标优异且模拟得到的月径流值与实测值重合度非常好时, 不一定代表这次水文模拟就一定接近实际情况, 各项评价指标并不能完全保证模拟的可靠性。因此在进行 SWAT 模拟时不应只追求评价指标的优异 (尤其只考虑一项指标时通常会导致模拟的偏差), 而更应该关注径流成分是否符合实际情况, 从而降低模型模拟的不确定性。

#### 4 结果分析与讨论

本文运用 SWAT 模型对雅鲁藏布江流域进行了建模, 并进行了参数的优选。结果表明, 不应当将选定的评价指标值作为评判模型模拟优劣的唯一指标, 同时应当考虑模拟中径流成分的模拟效果, 最好把径流成分纳入模型的参数优选目标中, 以减少水文模型参数的不确定性, 提高水文模拟的精度。

参考文献:

- [1] 高冰, 杨大文, 刘志雨, 等. 雅鲁藏布江流域的分布式水文模拟及径流变化分析[J]. 水文, 2008, 28(3): 40–44. (GAO Bing, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Application of a distributed hydrological model for the Yarlung Zangbo River and analysis of the river runoff[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 40–45. (in Chinese))
- [2] 顿珠加措. 年楚河流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 人民黄河, 2015, (4): 33–37. (DUNZHU Jiacao. Runoff variation of the Nianchu River in Yarlung Tsangpo River basin and its response to climate change [J]. Yellow River, 2015, (4): 33–37. (in Chinese))
- [3] Li F, Xu Z, Liu W, et al. The impact of climate change on runoff in the Yarlung Tsangpo River basin in the Tibetan Plateau [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(3): 517–526.
- [4] 罗睿, 徐宗学, 程磊. SWAT 模型在三川河流域的应用[J]. 水资源与工程学报, 2008, 19(5): 28–33. (LUO Rui, XU Zongxue, CHENG Lei. Application of SWAT Model in the Sanchuan River catchment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(5): 28–33. (in Chinese))
- [5] 姚苏红, 朱仲元, 张圣微, 等. 基于 SWAT 模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 175–180. (YAO Suhong, ZHU Zhongyuan, ZHANG Shengwei, et al. Using SWAT model to simulate the discharge of the river Shangdianhe in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 175–180. (in Chinese))
- [6] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. SWAT theoretical documentation version 2005[J]. Blackland Research Center, Temple, TX 2005.
- [7] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73–89.
- [8] Saxton K, Willey P. The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation [M]. Watershed Models, 2005.
- [9] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(3): 885–900.
- [10] Jin X, Xu C Y, Zhang Q, et al. Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3–4): 147–155.
- [11] Beven K. A manifesto for the equifinality thesis [J]. Journal of Hydrology, 2006, 320(1–2): 18–36.
- [12] Tian Y, Booij M J, Xu Y P. Uncertainty in high and low flows due to model structure and parameter errors [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2014, 28(2): 319–332.
- [13] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征[J]. 地理学报, 1999, (S1): 157–164. (LIU Tianchou. Hydrological characteristics of Yalung Zangbo River[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(S1): 157–164. (in Chinese))
- [14] 孙瑞, 张雪芹. 基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文, 2010, 30(3): 28–32. (SUN Rui, ZHANG Xueqin. Progress in application of watershed runoff simulation based on SWAT [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(3): 28–32. (in Chinese))

### Simulation of Monthly Runoff Considering Flow Components in Yarlung Zangbo River

ZHAO Zhichao<sup>1</sup>, FU Qiang<sup>2</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>, ZHANG Xujie<sup>2</sup>, XU Yueping<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrology and Water Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The semi-distributed hydrological model SWAT was built for the Yarlung Zangbo River Basin. After calibration (1989–1998) and validation (1999–2005), the monthly runoff was simulated at three hydrological stations (Nugesha, Yangcun, Nuxia). We selected two sets of parameters to analyze the performance of SWAT model through Nash–Sutcliffe Efficiency ( $NS$ ), determination coefficient ( $R^2$ ) and relative error ( $PBIAS$ ). The results show that for Parameter Set 1,  $R^2$  at three stations were as high as 0.9,  $NS$  were 0.9, 0.92 and 0.72,  $PBIAS$  were 7.1%, 18.5% and 34.2% respectively during the calibration. However, the simulations of runoff components are unrealistic. For Parameter Set 2, although the evaluation indexes were not very high, its runoff components are reasonable. This is the same case during the validation. Therefore, it is recommended that the simulation skills of runoff components be considered during model calibration and validation.

**Key words:** SWAT model; runoff component; discharge hydrograph; Yarlung Zangbo River