

# 四个概念性水文模型在黑河流域上游的应用与比较分析

何思为<sup>1</sup>,南卓铜<sup>2</sup>,王书功<sup>3</sup>,丁永建<sup>2</sup>

(1.四川大学水利水电学院,四川 成都 610065;2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000;  
3.匹兹堡大学土木与环境工程系,美国宾州匹兹堡 15261)

**摘 要:**首先结合新安江模型、TopModel、HBV 模型和 Sacramento 模型机理,从模型结构的土层划分、土壤水分计算、蒸散发计算、产流区不均匀性的考虑、产流机制、下渗机制等多个方面进行了理论上的比较,然后选择黑河流域上游为研究区,结合模拟结果对这四个概念性水文模型在黑河上游山区流域应用情况,从土壤水分、蒸散发、径流过程和各径流组分四个方面进行了分析比较。结果显示,概念性水文模型对黑河干流上游山区径流模拟有较好的模拟效果,但是对土壤水分、蒸散发等水文过程只能描述其变化趋势,难以定量,同时,我们还可以得出在所用四个模型中,HBV 模型在黑河干流上游山区出山口的径流拟合中有和其他 3 个模型相当的 Nash-Sutcliffe 效率系数,并且在枯水期的表现也好,适用性最好。

**关键词:**概念性水文模型;黑河流域上游;模型结构;新安江模型;TopModel;HBV 模型;Sacramento 模型  
**中图分类号:**TV124      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0852(2012)03-0013-07

## 引言

近年,随着计算机和 3S 技术的发展,水文模型研究开始从概念性水文模型转移到分布式水文模型<sup>[1-4]</sup>。但是,应用分布式水文模型需要大量的土壤、植物等生物、化学、物理参数,对驱动数据的要求也比较高,一些观测资料稀疏的流域亟需开展水文预报工作但往往不能满足其资料需求。相对地,概念性水文模型不但具有完整的物理基础,能够科学地表达水文循环的机理,反映水文循环的过程,而且仅需要标定较少的参数即可进行径流模拟。对水文预报机构而言,如果采用概念性水文模型能够达到预报精度,则将大大降低预报成本,并且,使得对一些观测资料较少的流域,也可以开展水文预报。因此,研究概念性水文模型仍然有重要意义。关于不同概念性水文模型在流域的适用性也有文章进行过比较研究。文献[5]对新安江模型、Sacramento 模型和 Tank 模型模型从蒸散发、产流、水源划分等方面做

了说明,并对参数不独立的原因做了详细解释;文献[6]对新安江模型、HBV 模型、SMAR 模型、SIMHYD 模型和 TopModel 从水源划分、产流机制、汇流计算和产流空间不均匀性等方面做了理论上的比较。这些研究主要是从理论上进行比较和分析,对模型在实际应用中的案例没有或者较少涉及。20 世纪 60 年代以来,人类活动造成黑河流域出现了河湖干涸、林木死亡、草场退化等严重的生态环境问题<sup>[7]</sup>,亟需进行水资源的合理配置和有效调度,以期实现人与生态环境的和谐共处。研究黑河流域上游的适用性,从模拟结果出发来分析模型的结构差别对其模拟效果的影响。

## 1 研究区概况和模型概述

### 1.1 研究区概况

以黑河流域上游为研究区。黑河流域是我国第二大内陆河,出山口莺落峡以上为其上游流域,从 90m SRTM DEM 数据可以得到流域海拔范围为 1668~5005m。根据

收稿日期:2010-11-18

基金项目:科技部 863 课题(2008AA12Z205);中科院重要方向项目(KZCX2-YW-Q10-1)

作者简介:何思为(1988-),男,甘肃会宁人,硕士研究生,2010年毕业于西安理工大学,现主要从事黑河流域陆面过程模型应用和改进研究。

E-mail: hesiweide@163.com

通讯作者:南卓铜(1977-),男,研究员,主要从事空间决策支持系统、水文建模环境及地理信息系统应用研究。E-mail: nztong@lzb.ac.cn

1959~1993年资料统计<sup>[11]</sup>,黑河莺落峡以上流域的冰川覆盖度为0.59%,年径流量 $16.05 \times 10^8 \text{m}^3$ ,冰川面积 $59 \text{km}^2$ ,冰川融水补给率为3.4%。

## 1.2 模型概述

本文所采用的四个概念性水文模型包括:①新安江模型<sup>[12]</sup>,目前,关于该模型有不同的版本<sup>[13-14]</sup>,本文采用二水源新安江模型;②TopModel<sup>[15]</sup>模型,它是一个建立在变动产流面积概念上介于集总式模型和分布式模型之间的半分布式水文模型。③HBV<sup>[16]</sup>模型,它也可以看做是一个半分布式的模型。④Sacramento<sup>[17]</sup>模型(以下简称SAC模型)是美国加利福尼亚州的萨克拉门托河流预报中心在第IV号Stanford模型<sup>[18]</sup>基础上改进

和发展的一个确定性、概念性的集总参数模型。

## 2 模型结构比较

水文模型是一个集合水文循环的各个过程而抽象组合起来的一个系统,由于建模人员对水文过程的理解和采取的表达策略不同,就会造成不同水文模型结构的差异。对于本文涉及的四个概念性水文模型结构上的差异,主要从雨雪转化考虑、土壤划分、土壤水分计算、蒸散计算、变化产流、土壤下渗、水源划分、汇流计算方法、汇流计算顺序、模型参数和驱动数据十个方面展开比较,见表1。

表1 四个概念性水文模型结构比较表  
Table1 Itemized comparison of model structure

模型	新安江	TopModel	HBV	Sacramento
雨雪转化	不考虑	不考虑	考虑	不考虑
土壤划分	上层	植被根系区、	无	上层张力水、上层自由
	下层	非饱和区		水、下层张力水、下层
	深层	饱和地下水区		自由水
土壤水分计算	蒸散发之后三层之和	迭代计算土壤含水量	土壤湿度的指数函数	蒸散发之后各部分之和
蒸散计算	三层蒸散	只发生在植被根系区,是土	是土壤湿度和潜在蒸散	按照土壤分层、下垫面
	发模式	壤湿度和潜在蒸发的函数	发、控制系数LP的函数	特性,分五部分计算
变化产流	蓄水容量曲线	地形指数	不考虑	变动不透水面
产流机制	蓄满产流	蓄满产流	蓄满产流	蓄满产流
土壤下渗	先上后下线性下渗	先上后下线性下渗	线性下渗	霍顿下渗曲线
水源划分	二水源	二水源	三水源	五水源
汇流方法	瞬时单位线线性水库	等流时线法	等边三角形权重法	无因次单位线
汇流顺序	先汇后合	先汇后合	先汇后合	先汇后合
模型参数	10个	8个	14个	16个
驱动数据	降水、蒸发	降水、蒸发、DEM	降水、气温、蒸发	降水、蒸发

注:本文使用二水源新安江模型,汇流计算时瞬时单位线采用一个脉冲响应函数模拟<sup>[19]</sup>。TopModel为兰卡斯特大学Keith Beven教授在1985编写,经1993,1995两次修订之后的版本。HBV模型是斯德哥尔摩大学Jan Seibert教授于2005年开发的HBV轻量版。Sacramento模型是在亚利桑那大学版本上修订的版本。

## 3 模拟结果比较和分析

### 3.1 数据及模型设定

模型驱动需要降水、蒸发、气温和径流数据。黑河流域上游流域面积约 $10\,000 \text{km}^2$ ,为了使得模型的驱动数据能够较好代表整个流域的状况,我们选取了位于研究区内和研究区附近且没有明显地貌景观差别的具有1990年1月1日~2000年12月31日期间逐日观测资料的站点。满足条件的有降水观测资料站点

有8个,有蒸发和气温观测资料的站点各有5个。对观测资料采用了以下处理方法:降水数据取祁连、扎马什克、莺落峡、冰沟、新地、肃南、康乐和大野口8个站点降水观测值的平均值;蒸发数据取野牛沟、莺落峡、冰沟、新地、肃南5个站的平均值;气温数据取张掖、民乐、肃南、冰沟和新地5个站的平均值;径流数据是流域出口站点莺落峡的观测流量。

我们把11年的资料分为预热期、标定期和验证期。对新安江模型、TopModel、HBV和SAC模型均用

Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)作为目标函数,采用模拟退火算法<sup>[19-20]</sup>完成参数的标定。具体的预热期、标定期和验证期划分如表 2 所示。

此外,为了比较枯水期模拟的表现,把流量取对数之后的效率系数 LOG(NSE)<sup>[21-22]</sup>作为模型模拟效果另一个评价指标,其计算公式如下:

$$\text{LOG(NSE)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log Q_{\text{obs}} - \log Q_{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^N (\log Q_{\text{obs}} - \log \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{obs}}$ 为观测流量; $Q_{\text{sim}}$ 为模拟流量; $\overline{Q_{\text{obs}}}$ 为观测流量的平均值; $N$ 为观测的时段数。

表2 模型标定方法及结果

Table2 Calibration methods and model settings of the compared four models

模型	标定方法	预热期	标定期	验证期
新安江、TopModel、HBV、SAC	模拟退火	1990.1.1~1990.12.31	1991.1.1~1995.12.31	1996.1.1~2000.12.31

### 3.2 模拟结果分析

本文所选的四个模型在验证期都有和标定期相似的精度(表 3),限于篇幅,在以下模拟结果分析中仅给出 1991.1.1~1992.12.31 模拟结果\*。

#### 3.2.1 模拟径流结果分析

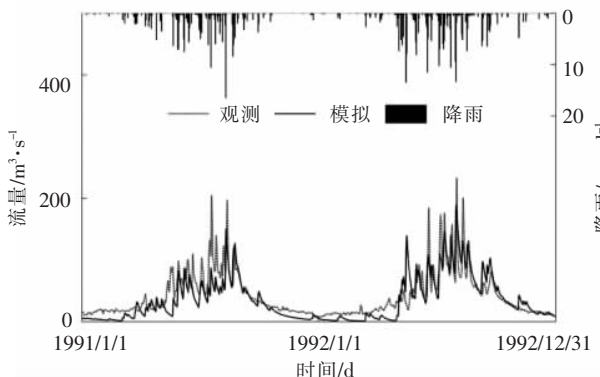
径流模拟是水文模型的主要功用之一,新安江、TopModel、HBV 和 SAC 模型的径流过程模拟结果依次如图 1(a),(b),(c),(d)所示,其 Nash-Sutcliffe 效率系

数见表 3。

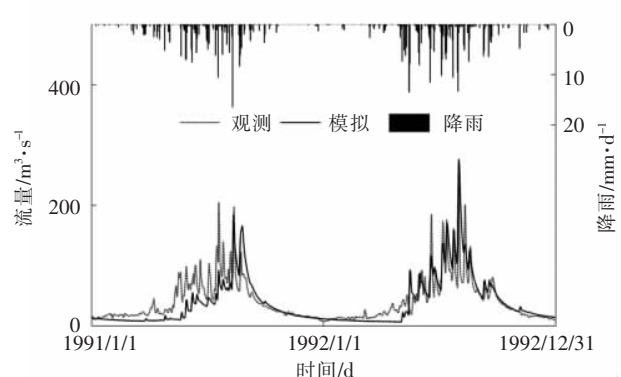
表3 模型径流过程模拟精度表(%)

Table3 Simulation accuracy of the runoff(%)

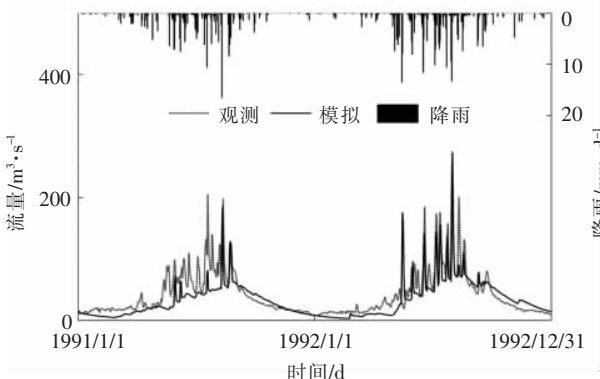
模型	新安江	TopModel	HBV	SAC
标定期 NSE	67.26	64.88	69.58	59.51
验证期 NSE	66.83	68.10	63.62	59.19
标定期 LOG(NSE)	7	55.46	59.61	-27.34
验证期 LOG(NSE)	34.67	58.91	69.30	-5.92



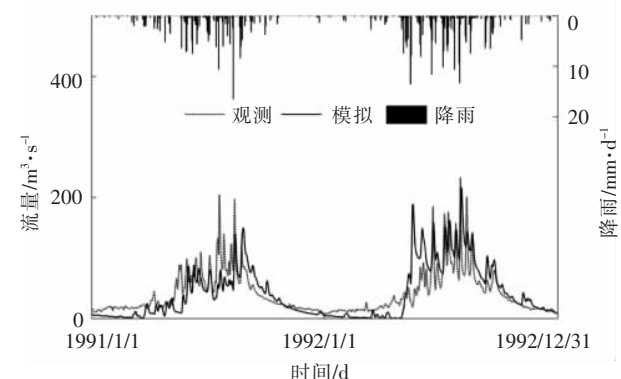
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1 模型径流比较,(a)新安江模型、(b)TopModel、(c)HBV 模型和(d)SAC 模型

Fig.1 Simulated runoffs using XAJ (a),TopModel (b),HBV (c)and SAC (d)models

\* 读者如有兴趣可以索要其他年份模拟结果 hesiweide@163.com

结合 NSE 效率系数和图 1, 我们可以看出, 这四个模型有类似的径流的模拟性能, 但是这 4 个模型都表现出对峰值的模拟能力比较差, 原因可能是因为这 4 个模型均为蓄满产流, 而黑河地处干旱内陆地区, 主要是以超渗产流为主。

4 个模型的 LOG(NSE) 计算结果见表 3, 从这个结果可以看出, 新安江模型和 SAC 模型对枯水期的模拟能力相当差, HBV 最优, TopModel 次之。

从模拟情况还可以看出, 4 个模型对每一年年初的径流模拟都比实际流量偏低, 这主要是因为黑河流域上游处于寒区, 每一年年初会有冰雪融水补给, 而我们在应用这 4 个模型均没有考虑冰雪融水补给。

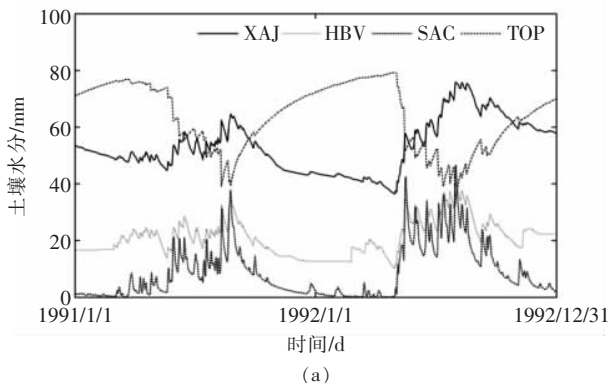
新安江模型和 SAC 模型的 NSE 效率系数相当, 径流过程线比较接近, 在枯水期的表现也接近, 这一点我们可以从它们的模型结构得到解释:

(1) 两者均是对流域划分了透水面积和不透水面积部分。新安江模型采用蓄水容量曲线减小产流面积空间不均匀性的影响, SAC 模型则是通过变动透水面积和永久不透水面积减小下垫面不均性的影响, 这对于地形简单, 植被多样性较差, 面积较小的流域可以认为具有同样的效果;

(2) 对土壤蓄水层均划分较细。新安江模型划分为上、下、深三层, SAC 模型则划分为上层张力水、上层自由水、下层张力水和下层自由水四层;

(3) 汇流计算采用的是相似的方法。新安江模型对地表径流采用单位线进行汇流, 对地下径流采用线性水库调蓄, SAC 模型是把地表径流和经过蓄水层调蓄的地下径流相加, 然后再采用单位线进行汇流计算。

而 TopModel 和 HBV 模型各自在土壤层划分、土壤水分计算、水源划分和汇流计算等方面都有各自的特点, 所以模拟所得径流过程线差别较大。



### 3.2.2 土壤水分分析

图 2(a) 为 4 个模型土壤水分的计算结果, 其中新安江, HBV 和 SAC 模型均是土壤含水量, 而 TopModel 是土壤缺水量。

由于 4 个模型所采用的土壤水分计算方法各不相同, 从图 2(a) 可以看出, 不同模型计算得到土壤含水量相差很大, 不过, 这 4 个模型对土壤水分变化趋势的描述还是比较准确, 均表现为冬季土壤水分少, 夏季土壤水分多, 降雨多的时段土壤湿度大, 降雨少的时段土壤湿度小。

图 2(a) 中所示的 HBV 模型模拟得到的土壤含水量在每一年的冬季基本是水平不变的, 这是因为: ① HBV 模型考虑的雨雪之间的转化, 当气温低于临界温度时, 降水就会被模拟转化成降雪, 降雪并不产流来补充土壤水分; ② 冬季气温低于临界温度, 流域被积雪覆盖, 反射能力较强, 潜在蒸发(EP)较小, 再加之模型标定时候所取得的潜在蒸散发量变形曲线形状控制参数 FC 很大, 导致实际蒸散发(EA)和潜在蒸散发(EP)之间的换算系数很小, 这样, EA 近似于零。综合上面两点可以说明土壤水分没有补充也没有蒸发, 因而维持在一个较小值不变。

通过上述对 4 个模型土壤水分的模拟结果进行分析, 可以推断, 概念性水文模型对土壤水分模拟所得结果中其数值是不可信的, 但描述的变化趋势准确。

### 3.2.3 蒸散发结果分析

新安江、TopModel、HBV 和 SAC 模型计算得到的年均实际蒸散量分别为 138mm, 149mm, 159mm 和 196mm。从图 2(b) 可以看出, 新安江和 HBV 模型得到的实际蒸散发趋势相近, 连续性均较好, 但是 TopModel 和 SAC 模型模拟的结果波动很大。

TopModel 认为流域的蒸散发只发生在植被根系区,

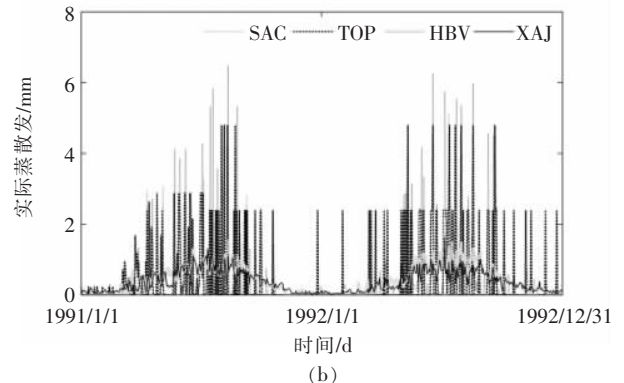


图 2 模拟所得土壤含水量(a)和蒸散发(b)比较

Fig.2 Simulated soil moisture (a) and evaporation (b) with the four models



是土壤水分和潜在蒸散发的函数,由于该区属于上层,土壤水分含量极不稳定,故蒸散发的计算值波动很大。

HBV 模型的蒸散发计算和 TopModel 一样,也是采用一个分段函数来表示土壤含水量和潜在蒸散发对实际蒸散发的影响,但是在黑河流域的应用效果明显要好于 TopModel,这主要是因为 HBV 模型的蒸散发计算是以整个土壤层为水分来源,避免了由于表层土壤蓄水量参数取值对蒸散发的影响。

SAC 模型的蒸散发计算和新安江模型原理一样,是按照土壤层的划分自上向下递减,逐层计算,然后相加,但是所得结果时段间波动很大。SAC 模型蒸散发量对于土壤含水量的变化很敏感,这是因为其蒸散发主要来自上层张力水,而在模型参数优化时,我们取的上层张力水的最大蓄水容量为 3mm,这样,很容易达到饱和,也很容易枯竭,因此蒸发数据对降水很敏感。

3.2.4 径流成分分析

径流成分是由水源划分决定的,4 个模型中新安江和 TopModel 是二水源,HBV 是三水源,SAC 模型是

五水源。为了方便比较,现统一将各个模型的径流成分归为两类:地表径流(包含地面径流和壤中流)和地下径流(基流成分)。

新安江、TopModel、HBV 和 SAC 模型模拟所得结果中地下径流所占比例分别为 64.47% ,91.51% ,83.31% ,73.89% ,依次对应图 3 中的 (a), (b), (c), (d)。可以看出 4 个模型中地下径流在各自所模拟的总径流中所占比例相差很大,这一方面是因为我们上面分类的简单造成,另一方面和模型本身的机理密切相关。但是从图 3 上可以看出:①所有的表面径流均产生于降水较大的时段,并且随着时段降水的不同波动很大,表现为暴涨暴落,这和客观实际是相符的;②除去 TopModel 外,其余地下径流涨落都比较稳定,并且连续性也好,这也是很符合实际的。

由于 TopModel 的径流成分是饱和坡面流和地下径流,其地下径流包括了壤中流的成分,因此实际模拟的地下径流过程线及径流成分和其他 3 个模型相差比较大。

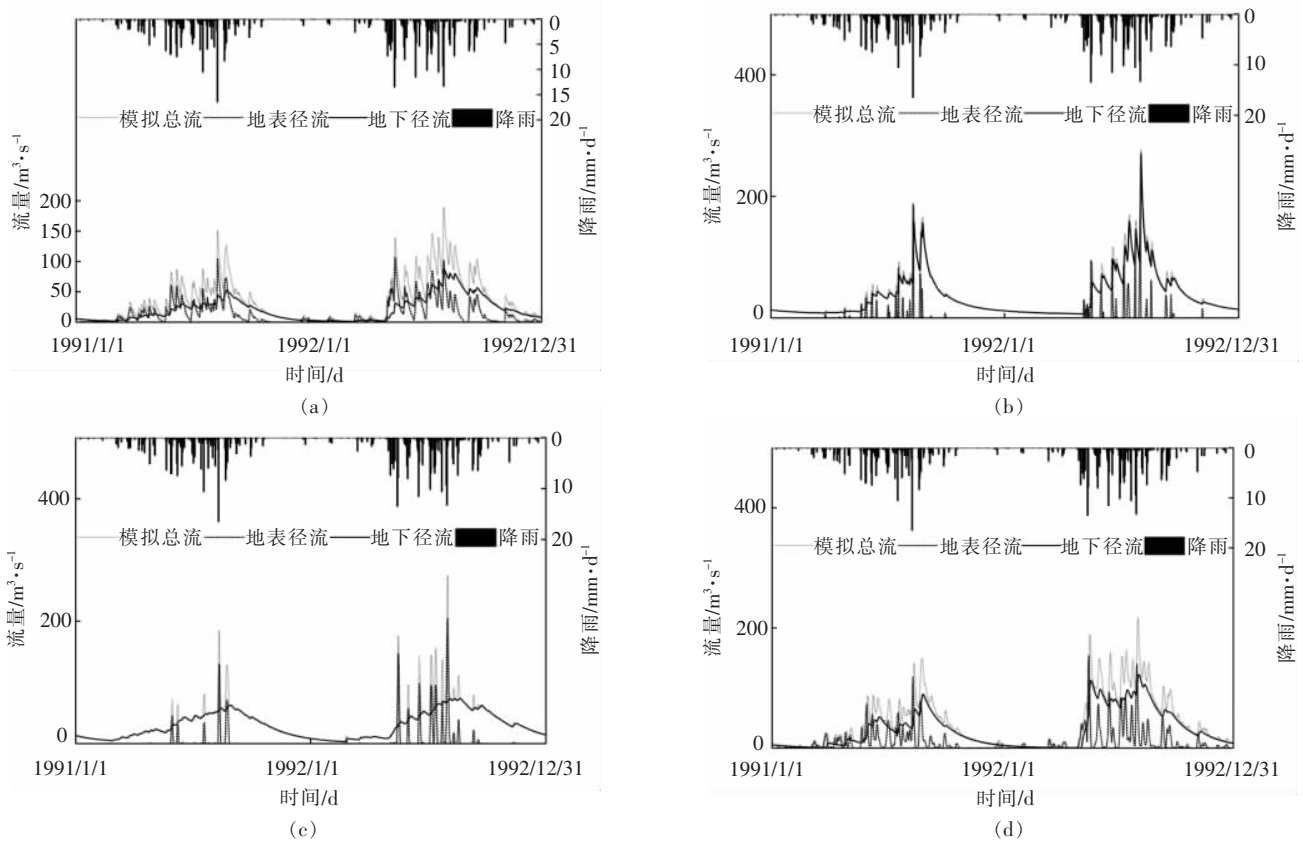


图3 模拟所得径流成分比较(a)新安江模型、(b)TopModel、(c)HBV 和(d)SAC 模型

Fig.3 Simulated discharge components using XAJ (a), TopModel (b), HBV (c) and SAC (d) models

从图4可以看出,对于基流的模拟能力除去 Top-Model 模型外,其他模型模拟所得过程线都比较稳定,和实际中基流的特点符合,这说明概念性水文模型仅就径流预报这一方面来评价还是可以接受的。

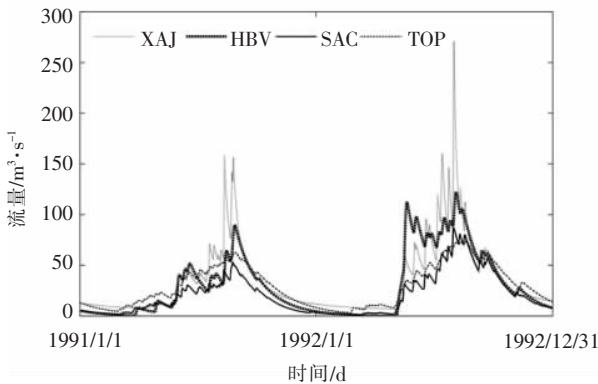


图4 四个模型基流比较

Fig.4 Simulation of baseflow with the four models

## 4 结语

通过前面对4个概念性水文模型结构的比较和应用结果分析,我们可以得出如下结论:

(1) 就径流的模拟能力而言,4个概念性水文模型在黑河干流上流山区都有较好的适用性,可是对土壤水分变化,蒸散发等水文过程仅能模拟出其变化趋势,很难定量的描述其变化。

(2) 仅从 Nash-Sutcliffe 效率系数比较,4个模型在黑河流域上游的可用性相当,但是通过对典型降水径流时段分析和 LOG(NSE)的表现显示,新安江模型和 SAC 模型在枯水期的模拟能力均比较差,HBV 模型最优,TopModel 次之。

(3) 4个模型对于基流的模拟能力除去 TopModel 模型外,不同模型模拟所得的基流量虽然在各自的总径流中比例相差较大,但是均比较稳定,结果合理。

本文所采用的4个概念性模型在黑河干流山区流域的径流模拟中均有较好的能力,但是由于本文没有对流域进行子流域划分,驱动数据是几个站点数据简单的平均法求得,难以代表整个研究区的状况,这可能是导致模拟蒸散发和土壤水分计算误差较大的原因,这主要受限于我们掌握的资料,下一步将补充完善更多资料,进行统一的子流域划分,应用同样的汇流算法,进一步检查4个模型在黑河流域的模拟性能。

参考文献:

[1] Moussa R,N Chahinian,C Bocquillon. Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment-model construc-

tion and multi-site validation [J]. Journal of Hydrology, 2007, 337 (1-2): 35-51.

- [2] 万洪涛,周成虎,万庆,等.地理信息系统与水文模型集成研究述评[J]. 水科学进展, 2001(04): 560-568. (WAN Hongtao, ZHOU Chenghu, WAN Qing, et al. Integration of geographical information system technology and hydrological model [J]. Advances in Water Science, 2001(04): 560-568.(in Chinese))
- [3] 王书功,康尔泗,李新. 分布式水文模型的进展及展望[J]. 冰川冻土, 2004, 26 (1): 61-65. (WANG Shugong, KANG Ersi, LI Xin. Progress and perspective of distributed hydrological models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 61-65.(in Chinese))
- [4] 王中根,刘昌明,左其亭,等.基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430-439. (WANG Zhonggen, LIU Changming, ZUO Qiting, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM[J]. Progress in Geography, 2002, 21(5): 430-439.(in Chinese))
- [5] 赵人俊. 流域水文模型的综合分析研究 [J]. 水文, 1989 (6): 1-5. (ZHAO Renjun. Comparative analyses of stream models[J]. Hydrology, 1989(6): 1-5.(in Chinese))
- [6] 张俊,郭生练,李超群,等.概念性流域水文模型的综合[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(2): 1-6. (ZHANG Jun, GUO Shenglian, LI Chaoqun, et al. Comparative study on conceptual hydrological models[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(2): 1-6. (in Chinese))
- [7] 贾仰文,王浩,严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟(I)——模型开发与验证[J]. 水利学报, 2006(5): 534-542. (JIA Yangwen, WANG Hao,YAN Denghua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe river basin[J]. 2006(5): 534-542.(in Chinese))
- [8] 康尔泗,程国栋,蓝永超,等.概念性水文模型在出山径流预报中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 18-26. (KANG Ersi, CHENG Guodong, LAN Yongchao,et al. Application of a conceptual hydrological model in the runoff forecast of a mountainous watershed[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(1): 18-26.(in Chinese))
- [9] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等.TopModel 模型在黑河干流出山径流模拟中的应用[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 428-434. (CHEN Rensheng, KANG Ersi, YANG Jianping, et al. Application of TopModel to simulate runoff from Heihe mainstream mountainous basin[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(4): 428-434.(in Chinese))
- [10] 黄清华,张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 22-26. (HUANG Qinghua, ZHANG Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude,cold,semi-arid catchment of Heihe river basin, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2004, 28(2): 22-26.(in Chinese))
- [11] 彭伟, 基于三种水文模型的流域径流模拟和土壤含水量模拟应用

- 研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009:9-10. (PENG Wei. Application and Research on Stream Flow Simulation and Soil Moisture Simulation Based on Distributed Hydrologic Models [D]. Ya'an: Sichuan Agriculture University, 2009:9-10.(in Chinese))
- [12] 赵人俊, 流域水文模拟-新安江模型和陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZHAO Renjun. Hydrological Simulation on Stream-Xin'anjiang Model and Shanbei Model [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1984: 117-118.(in Chinese))
- [13] 胡凤彬,夏佩玉,沈言贤. 四水源新安江流域模型及参数地理规律的探讨 [J]. 水文, 1986, 1: 16-24. (HU Fengbing, XIA Peiyu, SHENG Yanxian. A study of four components Xin'anjiang model and parameters regulation of geography [J]. Journal of China Hydrology, 1986,1:16-24.(in Chinese))
- [14] 王佩兰. 三水源新安江模型的应用经验[J]. 水文, 1982, 5: 26-33. (WANG Peilan. The experience of using three components Xin'anjiang model[J]. Journal of China Hydrology, 1982, 5: 26-33. (in Chinese))
- [15] Beven K,M Kirkby. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Journal, 1979, 24(1): 43-69.
- [16] Lindstr m G,B Johansson,M Persson, et al. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 1997, 201(1-4): 272-288.
- [17] Burnash R,R Ferral. A generalized streamflow simulation system[J]. Mathematical Models in Hydrology, 1974, 2: 838-847.
- [18] Crawford N,R Linsley. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV [M]. Dept. of Civil Engineering, Stanford University, 1966: 1-210.
- [19] 王书功, 水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006. (WANG Shugong. Study on Parameter Estimation for Hydrological Model and Uncertainty in Estimated Parameters [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, 2006.(in Chinese))
- [20] Kirkpatrick S. Optimization by simulated annealing: Quantitative studies[J]. Journal of Statistical Physics, 1984, 34(5): 975-986.
- [21] Ajami K. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system[J]. Journal of Hydrology, 2004, 298(1-4): 112-135.
- [22] Seibert J, Seibert J. HBV Light Version 2 User's Manual [M]. Stockholm University: Department of Physical Geography and Quaternary Geology, 2005: 8-10.

## Application and Comparative Analysis of Four Conceptual Hydrological Models for Upper Reach of Heihe River Basin

HE Siwei<sup>1</sup>, NAN Zhuotong<sup>2</sup>, WANG Shugong<sup>3</sup>, DING Yongjian<sup>2</sup>

(1.College of Hydraulic & Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065,China;

2.Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

3. Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 152610,USA)

**Abstract:** Four popular conceptual hydrological models, namely Xianjiang model, HBV, TopModel and Sacramento model, were evaluated in this paper in terms of model structure and application performance in the upper reach of the Heihe River Basin, a typical inland river basin in the arid region of West China. This paper begins with theoretical comparisons between the four models from varied aspects including soil profile division, soil moisture content calculation, evapotranspiration estimation, disparity of runoff generation area, runoff generation mechanism, and infiltration mechanism. In combination with their applications in the upper reach of the Huaihe River Basin, the four models were evaluated based on their estimates of soil moisture content, evapotranspiration, runoff process prediction and runoff components. The applications in the Huaihe River Basin show that conceptual hydrological models are good at runoff simulation and incapable of accurate estimation of soil moisture content and evapotranspiration despite. They can only simulate the change trends of these two variables. Among the four, the HBV model is proven best in the case study with better simulation in the water-stress period regardless of a similar overall Nash-Sutcliffe coefficient for runoff simulation, as its model structure explicitly considers the characteristics of a watershed in arid and cold regions.

**Key words:** conceptual hydrological model; upper reach of the Heihe River Basin; model structure; Xinanjiang model; TopModel; HBV; Sacramento model