

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190474

# HYPE 水文模型在中国不同气候区域的应用研究

孙雪纯<sup>1</sup>, 宁少尉<sup>2</sup>, 宋凡<sup>3</sup>, 陈元芳<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

3. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心), 北京 100053)

**摘要:**将瑞典国家水文气象局开发的分布式水文模型 HYPE 应用于我国黑河流域、水阳江流域和沱江流域三种不同气候区,选择纳什效率系数 NSE 作为统计指标进行精度评估。HYPE 模型在不同气候区均表现出良好的模拟效果,月径流模拟结果显著高于日时间尺度模拟结果。因此,可在类似地区推广使用该模型,同时可为无资料地区提供相关的模拟数据信息,为水资源管理提供服务。

**关键词:**HYPE 模型;黑河流域;水阳江流域;沱江流域;径流模拟

**中图分类号:**TV124

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2021)03-0057-06

## 0 引言

流域水文模型为流域降雨径流形成的精细机理和复杂的耦合关系提供了研究工具<sup>[1]</sup>,随着对流域产汇流机理认识水平的提升和科学技术的进步,水文模型发展快速,国内常用的水文模型有 SWAT 模型、HBV 模型和新安江模型等。在我国干旱区和山区河流的径流模拟与预测中,SWAT 模型因模拟效果较好而得到广泛应用,而湿润及半湿润地区则较多选择预报精度高模拟性能好的新安江模型。找到一种在不同气候区均具有良好模拟效果的水文模型成为必要,可给国内水文研究提供新思路。2005~2007 年期间瑞典国家水文气象局(SMHI)开发的水文模型 HYPE(Hydrological Predictions for the Environment, HYPE),已成功应用于欧洲陆面水文,包括水文统计、水质模拟和水文模拟等方面,实践结果证明该模型模拟性能较好<sup>[2-4]</sup>,但该模型较少应用于中国大陆。因此,本文旨在引入一个新型水文模型 HYPE,在我国三个不同气候区进行径流模拟,对模型的模拟性能进行有效评估并与以往研究结果作比较,为类似区域合理有效地选取水文模型提供科学依据。

## 1 研究区域概况

### 1.1 黑河流域

黑河是我国西北地区第二大内陆河,以黑河出山口莺落峡控制的上游集水面积约为  $1.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,河道长 303km,其中高山地面积占 72%,河流台地占 27%,绿洲丘陵占 1%,是黑河流域的产流区和水源来源区<sup>[5]</sup>。黑河流域属于典型干旱区,气候干燥,降水稀少而集中,多大风,日照充足,太阳辐射强烈,昼夜温差大。流域年均气温不足  $2^\circ\text{C}$ ,年均降水量 350mm。

### 1.2 水阳江流域

水阳江流域由安徽省宣城水文站( $30.95^\circ\text{N}$ ,  $118.80^\circ\text{E}$ )控制,流域集水面积约为  $3520 \text{ km}^2$ 。流域地处北半球中纬度过渡地带,属于典型的湿润区亚热带季风气候<sup>[6]</sup>,年均气温  $15\sim 16^\circ\text{C}$ ,年均降雨量  $1300\sim 1600 \text{ mm}$ 。梅雨季节(6~8月)的降雨量达到一年内总降雨量的 40%~60%,降雨量的变化特点也直接导致流域径流量年内分配不均且年际变化大,每年 6~8 月汛期径流量占全年总径流量的 55%~70%以上。

### 1.3 沱江流域

红河是我国西南地区一条重要的国际河流,本次

收稿日期:2020-01-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HG TB0095);国家自然科学基金资助项目(51779067, 51709071)

作者简介:孙雪纯(1994—),女,安徽宿州人,硕士,主要研究方向为水文模拟及水资源管理。E-mail:461946050@qq.com

通信作者:宋凡(1989—),男,山西介休人,博士,高级工程师,主要从事水文模拟及地下水监测管理方面的工作。E-mail:songfan-1989@foxmail.com

研究区选择红河流域右侧最大支流沱江(黑水河)流域。该流域位于湿润地区,集水面积约为  $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,发源于云南省大理州润县宝华乡石丫口山。流域内河流横截面很窄,坡度约为 0.37。沱江流域属于热带季风气候,夏季温暖潮湿,冬季凉爽干燥。沱江流域径流年内分配极不均匀,1988年至2004年,莱州站的年均径流量约为  $1168 \text{ m}^3/\text{s}$ ,年均降雨量约为  $1320 \text{ mm}$ ,其中雨季(5~10月)的降水量可达年降水量的85%以上<sup>[7]</sup>。

典型流域情况如图1所示:

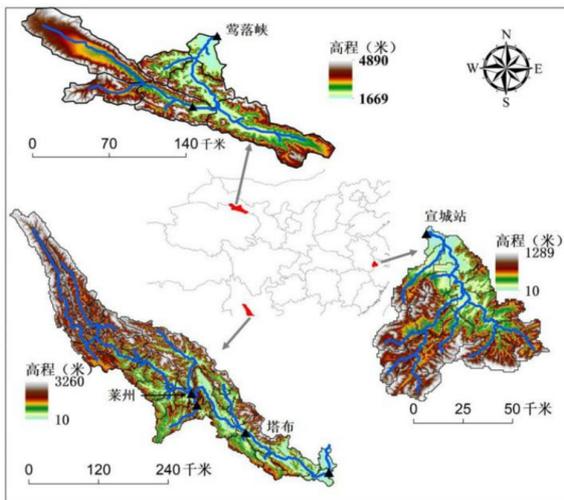


图1 流域地形及站点分布(上为黑河流域;左下为沱江流域;右下为水阳江流域)

Fig.1 Topography and station distribution map of the basin (Heihe River basin on the top, Da River basin on the left and Shuiyangjiang River Basin on the right)

## 2 方法和数据

### 2.1 HYPE 模型

HYPE 模型是一种基于日尺度评估水文和水质的分布式水文模型,该模型功能强大且简单易用,能满足在无测量数据时提供可广泛使用的相关模拟数据的要求。该模型的研究起点是基于 HBV 和 HBV-NP 模型应用的经验。2010年 Göran Lindström 等人对 HYPE 模型开发过程进行详细描述,并将估计参数转移到瑞典南部的 Rönneå 和 Vindån 两个流域,测试了区域模型参数的有效性,且径流过程模拟和水质模拟的结果均与观测值基本一致<sup>[2]</sup>。2014年 Marie Bergstrand 等人基于水文模型 S-HYPE 提出了一种高效的方法,从瑞典全境的观测和模拟流量中计算出高分辨率水文统计参数,新方法使得新的统计数字易于更新,并能在任何给

定的时间段内计算<sup>[3]</sup>。HYPE 模型也在不断发展,与2010年 Göran Lindström 等人对其描述相比,在降水强度及其对侵蚀的重要性方面有所改善,引入了沿河道和沟渠的边缘地带,考虑了大气位置的空间变化和对土地利用的依赖性。

#### 2.1.1 HYPE 模型结构

当一个河流的集水区被划分成几个子流域时(见图2a),HYPE 模型可以先模拟每个子流域的径流,然后再把每个子流域产生的从上游到下游的出流累加起来,形成全流域出流。如果流域存在水库,水库应位于子流域的出口处,先计算水库的入流(包括降落在库区的雨量以及水库水面的蒸发量),然后根据调度规则或频率曲线得到水库的出流。如果在强降水的情况下,渗透速率不足,并且如果地下水表面到达地面,则可能发生地表排水,大孔隙可以将水直接引至排水通道。来自不同土壤类别(土地利用和土壤类型的组合 SLC)的水流汇集在一起,并通过水道和湖泊进行运输(见图2b)。

每个子流域又根据其土地利用、土壤类型和海拔高度被划分为多个分区,并进一步划分成大小不同的类,反应不同土地覆盖/植物以及土壤的蒸散发量和其他水文条件差异,即水文响应单元 HRU<sup>[8]</sup>(见图2c)。分别演算各个 HRU 的径流,相加获得整个流域上的总模拟径流量。每个 HRU 最多具有三个土层的垂直分辨率(见图2d),根据实际情况分配深度,并确定三种土壤类型(耕层土壤、粗粒土壤和细粒土壤)的持水特性。土壤的持水特性,主要是与孔隙度和土壤可利用水量联系在一起的。分别计算各土层的水平衡,当

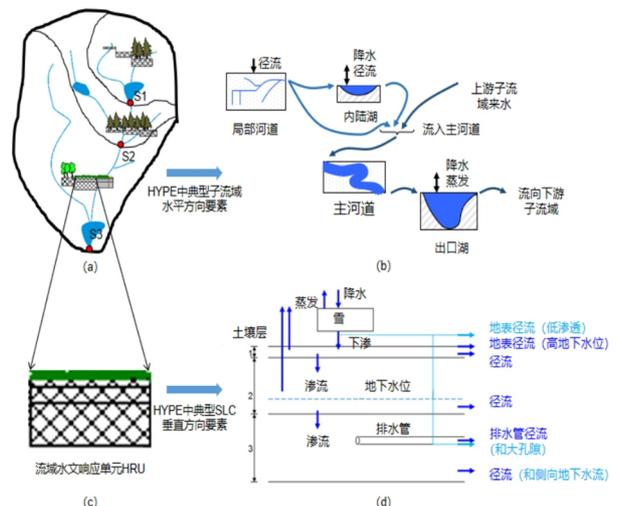


图2 HYPE 模型结构示意图

Fig.2 HYPE model structure schematics

最大孔隙开始被水填满时,地下水排水发生,地下水表面在土壤剖面中的位置被计算为最大孔隙中充满水的比例函数。如图 2a 子流域 S2 有三个不同的土壤深度等级,子流域 S3 有不同土壤类型和土地利用的分层土壤<sup>[4]</sup>。图 2 整体从横向和纵向两个维度反映了流域土壤层中水流路径<sup>[2]</sup>。

### 2.1.2 HYPE 模型基础参数及优化

模型参数确定了模型功能,大部分参数与土壤类型或土地利用有关,如蒸散发参数、土壤保水能力,还有部分参数是整个集水区的通用参数。如果流域划分为多个子流域,植被类型多个,则参数个数成倍增加。在众多参数中,有些参数可以根据流域地形、气候、降水特点等直接确定,还有些参数对模型的敏感性低,无需经过太多调试就可以确定参数值。此外,通过自动率参,即使不进行手动调参也可获得相对不错的模拟结果,但仍离不开人为的技巧性。由于篇幅有限,下表 1 仅介绍部分影响蓄水量(CEVP、CEVPPH、WCEP)和产流(RRCS1、SRRCS、SRRATE)的基础参数。

常用的参数优化方法是蒙特卡罗模拟(Monte Carlo,简称 MC)和差分进化算法(Differential Evolution,简称 DE)。MC 算法的简单性和理论上合理的统计基础使得该方法得到了广泛应用,但其收敛速度较慢,误差会随置信水平的不同而不同,不确定性较大。DE 算法是一种高效的并行搜索算法,但其收敛速度很大程度上依赖于算法的控制参数。因此,在 HYPE 模型中选择了将 DE 算法融入马尔可夫链蒙特卡罗方法(Differential Evolution Markov Chain Monte Carlo,简称 DEMC 算法),该方法能确保群体的多样性,随进化过程的进行而不断更新最优个体,最终加速算法找到全局最优解<sup>[9-10]</sup>。

表1 HYPE水文模型径流模拟基本参数

Table1 Basic parameter table of runoff simulation of HYPE hydrological model

参数	名称	区间	单位
CEVP	蒸散发系数	0-0.9	mm <sup>3</sup> C <sup>-1</sup> ts <sup>-1</sup>
CEVPPH	蒸散发的相位修正系数	0-90	d
WCEP	土壤持水量	0.05-0.5	—
RRCS1	土层径流退水系数	0.01-0.99	ts <sup>-1</sup>
SRRCS	饱和地表水退水系数	0-0.8	ts <sup>-1</sup>
SRRATE	超渗流量衰减系数	0-0.9	—

### 2.1.3 WHIST 工具

HYPE 模型提供了自带的 WHIST 程序,可在

WGS84 地理坐标系下进行流域创建和水文建模。WHIST 分别使用高程(DEM)、累积流量(ACC)和流向(DIR)网格创建水文连通流域,再根据设置参数细分为子流域。在本次研究中,使用的是 500m 分辨率的 DEM 数据,既保证了网格边界的精度,又在 WHIST 工具中得以适用。WHIST 具有一个可以自动生成完整流域的选定流出流域的功能。系统将自动添加新的方格以覆盖已给定 HAROID 的未完成流域,并开始新的迭代,直到无法检测出未完工流域为止。当生成新流域时,出口点单独位于流网中来控制子流域的确切位置。例如为了模拟测量站的径流,可以创建或调整将用作控制点的坐标,控制点可以从 SHAPE 或 ASCII 文件中导入,也可以通过点击地图手动定位,控制点的作用是强制程序在指定点处定位出口点。

### 2.1.4 HYPE 模型精度评价指标

HYPE 模型模拟结果评价指标通常采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 NSE,以判断模拟径流量与实测径流量的拟合优度,NSE 越趋近于 1 表明模拟效果越好。公式如下所示:

$$NSE=1-\frac{\sum_{t=1}^N(Q_{s,t}-Q_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^N(Q_{o,t}-\bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

式中: $Q_{s,t}$ 为在时间  $t$  的模拟径流; $Q_{o,t}$ 为在时间  $t$  的观测径流; $\bar{Q}_o$ 为观测径流的均值。

## 2.2 数据

HYPE 模型输入数据主要包括水文气象和基本属性数据,并以文本格式保存。水文气象数据包括研究区域主要气象站位置及逐日气温、主要雨量站位置及逐日降水量和流域出口控制站的逐日流量资料。应用 WHIST 提取流域边界并进行子流域划分后,导入 GIS 中进行数据处理。提取坡度、河流长度等基本属性数据,并对原始土壤类型和土地利用数据进行重分类,叠加分析数字化土壤类型和土地利用,最终得到水文响应单元数据。黑河流域被划分为 7 个子流域和 79 个单一土壤类型和单一土地利用类型组合的 HRUs;水阳江流域被划分为 16 个子流域和 109 个 HRUs;沱江流域被划分为 34 个子流域和 175 个 HRUs。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 径流模拟结果

利用 HYPE 水文模型在典型流域进行日尺度和月尺度降雨径流模拟,第一年为预热期。各个站点率

定期和验证期的模拟情况如表 2 所示。

表2 典型流域径流量模拟情况

Table2 Runoff simulation of typical basins

流域名称	控制站点	模拟期	NSE (月)	NSE (日)
黑河流域	莺落峡站	率定期 1991.1.1–1995.12.31	0.936	0.819
		验证期 1997.1.1–2000.12.31	0.911	0.809
水阳江流域	宣城站	率定期 2011.1.1–2014.12.31	0.956	0.782
		验证期 2015.1.1–2017.12.31	0.863	0.684
沱江流域	莱州站	率定期 1992.1.1–1995.12.31	0.965	0.857
		验证期 1996.1.1–2002.12.31	0.955	0.877
	塔布站	率定期 1992.1.1–1995.12.31	0.955	0.87
		验证期 1996.1.1–2002.12.31	0.952	0.86

典型流域出口测站验证期逐日实测流量与模拟流量散点图如图 3 所示：

沱江流域两个站点月尺度模拟率定期和验证期 NSE 均大于 0.95, 日尺度模拟率定期和验证期 NSE 均大于 0.85, 模型模拟性能优异; 与实测流量相比, 验证期的模拟流量在枯水期明显低估。黑河流域月尺度模拟率定期和验证期 NSE 均大于 0.9, 日尺度模拟率定期和验证期 NSE 均大于 0.8, 模型模拟性能较好; 但在枯水期模拟流量对比实测流量, 有明显延迟现象。水阳江流域月尺度模拟率定期和验证期 NSE 分别为 0.956 和 0.863, 日尺度模拟率定期和验证期 NSE 分别为

0.782 和 0.684, 模拟性能良好。

### 3.2 结果分析与讨论

#### 3.2.1 不同气候区模拟结果对比分析

将 HYPE 模型与同一研究区的其他水文模型模拟结果作对比, 以 NSE 效率系数为评价指标, 表明在同一时间尺度上, HYPE 模型模拟效果突出 (见表 3)。在模拟期相近的情况下, 模拟莺落峡站日径流过程时, HYPE 模型模拟结果要优于 SWAT 和 TOPMODEL 的模拟效果, 在月时间尺度上与 SWAT、WASMOD 模拟结果相近。由于未能完全准确的模拟融雪径流以及未考虑冻土造成的超渗产流, 使得 SWAT 模型模拟精度偏低, 且日尺度模型突发性暴雨的坦化作用也对模拟效果产生影响; 由于黑河流域地势起伏较大, 根据泰森多边形法则由点降水量计算流域面降雨量时没有充分考虑流域地形条件的空间差异性, 导致模型输入的降水数据代表性差, 可能导致 WASMOD 模型对流量峰值的响应欠佳, 流量模拟值误差偏大<sup>[11]</sup>。韩杰等人<sup>[12]</sup>基于 TOPMODEL 模型采用 PRISM 方法空间内插降水数据, 加之在地形指数空间变化不明显的平坦区域, 不能够很好体现产汇流特点和概化水文效应的有效参数化过程, 而使得 TOPMODEL 模型的效率受到一定影响。在沱江流域, 模拟莱州站和塔布站日径流过程时, HYPE 模型的模拟效果要优于改进的 TOPMODEL 模型 (BTOPMC), 在月时间尺度, 也同样优于

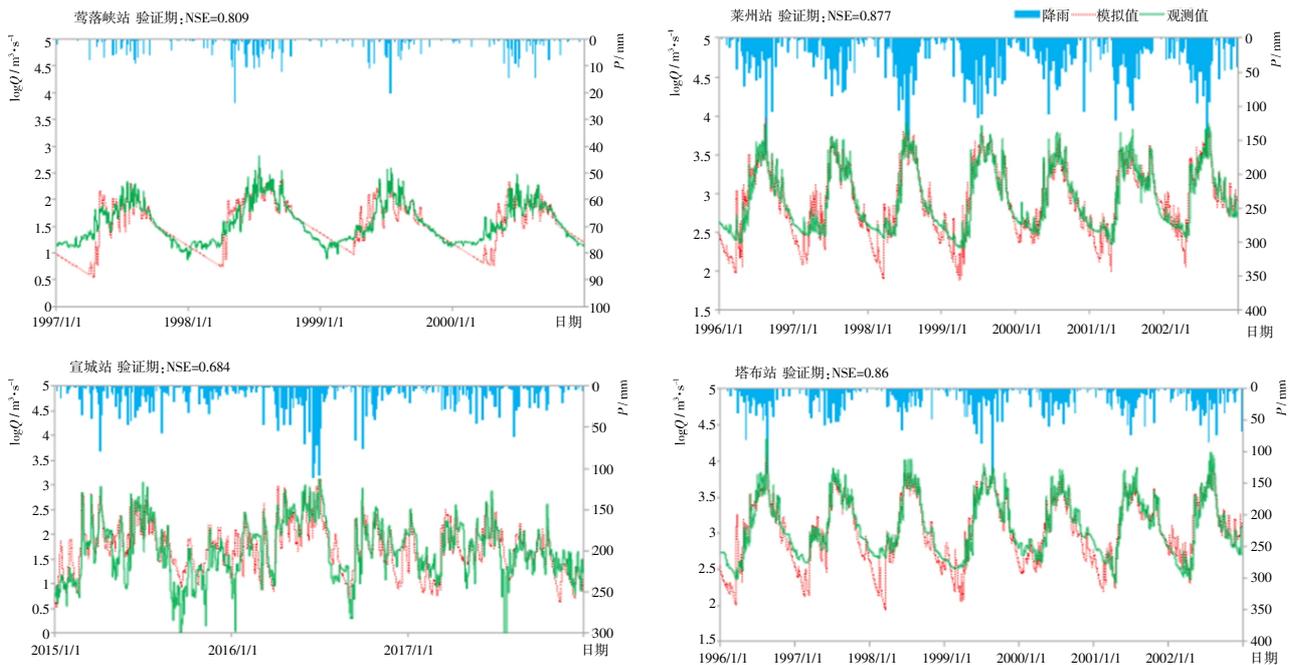


图3 典型流域出口测站验证期逐日实测流量与模拟流量对比

Fig.3 Comparison of daily scale measured and simulated flow at the outlet of typical basin stations in the validation period

表3 典型流域其他水文模型的径流模拟效果

Table3 Runoff simulation effect of other hydrological models in typical basins

流域名称	控制站点	模型名称	尺度	模拟期	NSE
黑河 流域	莺落 峡站	SWAT <sup>[11]</sup>	日	率定期(1990.1.1~1996.12.31)	0.732
				验证期(1997.1.1~2000.12.31)	0.678
			月	率定期(1990.1.1~1996.12.31)	0.948
				验证期(1997.1.1~2000.12.31)	0.923
		WASMOD <sup>[11]</sup>	月	率定期(1990~1997)	0.942
				验证期(1997~2001)	0.928
TOPMODEL <sup>[12]</sup>	日	率定期(1990.1.1~1993.12.31)	0.734		
		验证期(1994.1.1~1999.12.31)	0.703		
沱江 流域	塔布站	BTOPMC <sup>[13]</sup>	日	率定期(1991~1995)	0.70
				验证期(1996~2000)	0.60
	月		率定期(1991~1995)	0.75	
			验证期(1996~2000)	0.70	
	莱州站 和 塔布站	SWAT <sup>[14]</sup>	月	模拟期 (1988~1993)	率定期 0.89
				验证期	0.85

SWAT 模型在莱州站和塔布站的模拟效果,这是由于选择的 DEM 分辨率较高,加之所选模拟时段与本文差别较大,都会对最终模拟效果产生影响<sup>[13-14]</sup>。

3.2.2 模型参数值区域差异分析

本次研究以 NSE 效率系数为目标函数,共率定 22 个参数,表 4 列出其中 8 个代表性参数在 NSE 效率系数达到最大时的取值,并结合流域下垫面因子等因素分析个别参数值区域差异的影响因素。土壤水分计算模块的蒸散发修正参数 *cevpph* 与温度和土地利用关系密切。当温度越低、植被覆盖度越高时,土壤蒸发越小,参数值越大。黑河流域莺落峡站年均温为 -2.97℃,土地利用类型以森林草原为主,植被覆盖度较高,在低温和高植被覆盖度的条件下,降低了土壤蒸发,因此需上调参数值;沱江流域降水丰富,土壤表层

供水充足,另外土壤上层的枯枝落叶层减低了土壤深层的蒸发量,参数值也较大。径流响应模块的土壤持水量 *wcep* 与土壤类型和土层厚度有关。水阳江流域和沱江流域多为红壤土和黄壤土,但沱江流域受水土流失影响,土层浅薄,影响了土壤保水性能。除此之外,其还与流域内土壤结构相关联,如黑河流域的土壤类型主要为高山土,腐殖质层较厚,土壤团粒结构好,从而影响土壤保水能力。

3.2.3 讨论

本次研究沱江流域的两个水文站点模拟结果相对较好,为了尽可能减少人为干扰,未对流域下游出口断面的和平站进行径流模拟。HYPE 模型在水阳江流域的模拟结果相对较差的原因有以下几点:①流域 DEM 数据的分辨率低,对地形起了坦化作用,坡度也有所减缓,影响流域汇流时间;②输入的降雨气温数据精度不高,对大流域影响较为明显;③水阳江流域内的水库大坝阻断了河流的连续性,水库调度使下游河道内年际和年内流量均发生了变化<sup>[15]</sup>,人类活动的干扰对模拟结果造成一定的影响。

HYPE 模型参数较多,在建模过程中需要不断调整参数组合,不确定性较大。大部分参数都有一定的物理意义,参数率定时会存在异参同效的问题。因此,为符合实际流域土壤水文特征,需要根据典型流域的土壤特征进行参数率定。此外,模拟预热期的选择也会对模拟效果产生影响。

4 结论

本文通过 HYPE 模型在我国三个不同气候区的径流模拟应用情况,评价该模型在中国的适用性,得出结论如下:

(1)HYPE 模型在中国不同气候区均表现出良好的模拟效果,月径流模拟效果显著高于日时间尺度。

表4 典型流域最优参数值

Table4 The optimal parameters for typical basins

参数名称	依赖关系	黑河流域参数取值						水阳江流域参数取值				沱江流域参数取值				
CEVP	土地利用	0.05	0.74	0.37	0.06	0.32	0.00	0.21	0.23	0.12	0.06	0.16	0.13	0.11	0.12	0.12
CEVPPH	通用	48.92					3.23					65.00				
WCEP1	土壤类型	0.10	0.28	0.05	0.05	0.22	0.05	0.10	0.20			0.17	0.19	0.20	0.06	0.24
WCEP2	土壤类型	0.11	0.07	0.37	0.25	0.20	0.14	0.12	0.27			0.17	0.19	0.20	0.06	0.24
WCEP3	土壤类型	0.22	0.39	0.21	0.11	0.31	0.05	0.32	0.37			0.17	0.19	0.20	0.06	0.24
RRCS1	土壤类型	0.77	0.85	0.45	0.71	0.09	0.20	0.99	0.83			0.50	0.30	0.30	0.40	0.70
SRRCS	土地利用	0.01	0.28	0.44	0.52	0.10	0.10	0.59	0.14	0.49	0.11	0.25	0.45	0.45	0.15	0.50
SRRATE	土壤类型	0.08	0.47	0.18	0.31	0.59	0.42	0.23	0.89			0.15	0.10	0.10	0.10	0.20

除个别极值外,实测径流量在波动幅度上明显要比模拟径流量强烈,模拟径流量在整体水平上偏于保守,峰值水平偏低。

(2)与其他水文模型模拟效果对比,HYPE 模型在同一时间尺度上都表现出了较好的径流模拟性能,在同类研究区具有良好的适用性,为国内水文研究提供新工具新方法,为开展同一区域不同水文模型性能的对比研究提供了条件。

(3)HYPE 模型输入数据量少、所需数据容易获取、计算简单方便、运行成本低、模型结构简单但模块功能齐全。模型能在日、周、月或年尺度上进行模拟,不仅能模拟流域出口断面的径流过程,对流域内部其他站点的径流模拟也同样适用,能够满足水资源管理需求。

#### 参考文献:

- [1] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展, 2017,37(4):1-7+58. (RUI Xiaofang. On hydrological model of River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water resources, 2017,37(4):1-7+58. (in Chinese))
- [2] Lindström G, Pers C, Rosberg J, et al. Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model—A water quality model for different spatial scales [J]. Hydrology Research, 2010,(41):3-4,295-319.
- [3] Bergstrand M, Asp S S, Lindström G. Nationwide hydrological statistics for Sweden with high resolution using the hydrological model S-HYPE [J]. Hydrology Research, 2014,45(3):349-356.
- [4] Pers C, Temnerud J, Lindström G. Modelling water, nutrients, and organic carbon in forested catchments: a HYPE application [J]. Hydrological Processes, 2016(18):3252-3273.
- [5] 杨明金,张勃. 黑河莺落峡站径流变化的影响因素分析[J]. 地理科学进展, 2010,29(2):166-172. (YANG Mingjin, ZHANG Bo. Analysis of influencing factors of runoff changes at Yingluoxia station in Heihe River [J]. Progress in Geography, 2010,29(2):166-172. (in Chinese))
- [6] 孙翠梅,刘晶淼. TOPMODEL 在水阳江流域的应用及模型对 DEM 的敏感性检验[J]. 中国农村水利水电, 2007(2):102-105+108. (SUN Cuimei, LIU Jingmiao. Application of TOPMODEL in Shuiyang River basin and model sensitivity test to DEM [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(2):102-105+108. (in Chinese))
- [7] Le T P Q, Garnier J, Gilles B, et al. The changing flow regime and sediment load of the Red River, Viet Nam [J]. Journal of Hydrology, 2007,334(1-2):199-214.
- [8] Bergström, S. Computer Models of Watershed Hydrology—The HBV model [M]. Water Resources Publications Highlands Ranch(CO), 1995: 443-476.
- [9] 曹飞凤,尹祖宏. 融合 MCMC 方法的差分进化算法在水文模型参数优选中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2015,13(2):202-205. (CAO Feifeng, YIN Zuhong. Application of differential evolution algorithm combined with MCMC method in parameter optimization of hydrological model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2015,13(2):202-205. (in Chinese))
- [10] Vrugt J A, ter Braak C J F, Diks C G H, et al. Accelerating markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling [J]. International Journal of Non-linear Sciences and Numerical Simulation, 2009,10(3):273-290.
- [11] 李占玲,徐宗学. 黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010,46(3):344-349. (LI Zhanling, XU Zongxue. Runoff simulation and model evaluation in the upper mountainous area of Heihe River basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences), 2010,46(3):344-349. (in Chinese))
- [12] 韩杰,张万昌,赵登忠. 基于 TOPMODEL 径流模拟的黑河水资源探讨[J]. 农村生态环境, 2004,20(2):16. (HAN Jie, ZHANG Wanchang, ZHAO Dengzhong. Discussion on water resources of Heihe River Based on TOPMODEL runoff simulation [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2004,20(2):16. (in Chinese))
- [13] Wang J, Wang H, Ning S W, et al. Predicting future land cover change and its impact on streamflow and sediment load in a trans-boundary river basin [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2018,379:217-222.
- [14] Wang J, Ishidaira H, Sun W C, et al. Development and Interpretation of new sediment rating curve considering the effect of vegetation Cover for Asian basins [J]. The Scientific World Journal, 2013.
- [15] 陈敏,陈启慧,胡凤姣,等. 港口湾水库对下游河道生态径流的影响[J]. 水电能源科学, 2011,29(8):7-9+41. (CHEN Min, CHEN Qihui, HU Fengjiao, et al. Impact of Gangwanwan Reservoir on ecological runoff in downstream rivers [J]. Water Resources and Power, 2011,29(8):7-9+41. (in Chinese))

## Application of HYPE Hydrological Model in Different Climate Regions of China

SUN Xuechun<sup>1</sup>, NING Shaowei<sup>2</sup>, SONG Fan<sup>3</sup>, CHEN Yuanfang<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil Engineering and Water Conservancy Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Information Center (Hydrology and Water Resources Monitoring and Forecasting Center), MWR, Beijing 100053, China)

(下转第 48 页)