

冰川冻土

Journal of Glaciology and Geocryology
ISSN 1000-0240,CN 62-1072/P

## 《冰川冻土》网络首发论文

题目: 分布式水文模型 DHSVM 在西北高寒山区流域的适用性研究

作者: 赵奕,南卓铜,李祥飞,徐毅,张凌

收稿日期: 2017-10-09 网络首发日期: 2019-02-22

引用格式: 赵奕,南卓铜,李祥飞,徐毅,张凌.分布式水文模型 DHSVM 在西北高寒

山区流域的适用性研究[J/OL]. 冰川冻土.

http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190222.0928.006.html





网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间: 2019-02-22 14:40:01

第 网络道影地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.10 人 P.2 10 902 在 0928 1006.html

JOURNAL OF GLACIOLOGY AND GEOCRYOLOGY 2019年02月

DOI:10.7522/j. issn. 1000-0240. 2019. 0003

ZHAO Yi, NAN Zhuotong, LI Xiangfei, et al. On applicability of a fully distributed hydrological model in the cold and alpine watershed of Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1). [赵奕, 南卓铜, 李祥飞, 等. 分布式水文模型 DHSVM 在西 北高寒山区流域的适用性研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1).]

# 分布式水文模型 DHSVM 在西北高寒山区流域的 适用性研究

奕¹, 南卓铜¹, 李祥飞¹, 徐 毅¹, 张

(1. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 分布式水文 - 土壤 - 植被模型(Distributed Hydrology Soil Vegetation Model, DHSVM)是基于 栅格离散的分布式水文模型, 对地表水热循环的各个过程能进行很精细地刻画, 被广泛应用于世界各 地很多类型的流域的高时空分辨率的水文模拟,然而它在高寒山区的适用性并不清楚。基于 300 m 数 字高程模型,应用 DHSVM 模型对典型的高寒山区流域八宝河流域 2001-2009 年的水文过程展开模 拟, 并采用流域出口祁连站的水文实测数据对模型进行了精度评价。参数敏感性分析表明, 土壤横向 导水率、田间持水量和植被反照率等是该区域主要的敏感性参数。模型默认参数会高估高寒山区流域 的潜在蒸散发量,导致夏季径流量远小于观测值。通过参数率定,模型校准期(2001-2004)的模拟日 径流和月径流 Nash 效率系数分别达到 0.72 和 0.87; 而模型验证期(2005-2009)分别为 0.60 和 0.74。 结果表明, DHSVM 模型基本具备了模拟高寒山区流域降水-径流过程的能力。然而, 由于 DHSVM 模型缺少对高寒山区流域土壤的冻融过程的刻画,春季径流的模拟精度明显受到影响,需要在将来重 点改进。

关键词: DHSVM 模型; 高寒山区; 八宝河流域; 参数敏感性分析; 径流模拟

中图分类号: P334+.92/ 文章编号: 1000-0240(2019)01-0xxx-11 文献标志码: A

# 引言

水文模型是用数学语言和物理过程对水文现象 和过程进行概化的表述。结合地理信息系统 (GIS)、遥感技术等方式获取的详细流域信息,分 布式水文模型被广泛应用于水文模拟预报、水资源 分配利用等领域。分布式水文-土壤-植被模型 (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model, DHS-VM)基于数字高程模型(DEM)进行流域划分,细 致地模拟地形、植被、土壤等流域下垫面条件与水 文过程变化的关系[1]。DHSVM 在几米到数百米分 辨率的中小型流域上都有较成功的应用。Cuartas 等[2] 讨论了 DHSVM 应用于不同空间尺度流域的 可靠性; Safeeq 等[3]利用 DHSVM 模型探索了地下 水开采与地下水径流量的关系; Alvarenga 等[4]分 析了森林覆盖率对 DHSVM 模型模拟结果的影响: Lan 等<sup>[5]</sup>通过 DHSVM 模型特有的道路模块分析了 道路对水文过程的影响。康丽莉等[6]在兰江河流 域运用 DHSVM 模型,验证了模型在温暖湿润地区 的适用性;石超等[7]将 DHSVM 模型应用于四川盆 地的平通河流域,并讨论了模型的误差原因。

Vol. 41, No. 1

Feb., 2019

高寒山区流域由于特殊的冰川冻土地貌以及植 被条件,其水文特征较其他流域有明显的差异。目 前很多水文模型如概念模型 HBV[8], 半分布式模 型 TOPMODEL<sup>[9]</sup>、SRM<sup>[10]</sup> 模型,分布式模型 SWAT<sup>[11]</sup>、DLBRM<sup>[12]</sup>、VIC<sup>[13]</sup>和 DTVGM<sup>[14]</sup>和陆 面过程模型如 Noah<sup>[15]</sup>、NCAR LSM<sup>[16]</sup>均在具有鲜 明高寒山区流域特征的中国西北黑河流域上游有过

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2018-08-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0603603); 国家自然科学基金(41671055); 江苏高校自然科学研究项目(17KJA170003); 南京师

范大学"青蓝工程"资助

作者简介: 赵奕(1994-), 男, 江苏常州人, 2016 年在南京师范大学获学士学位, 现为南京师范大学硕士研究生, 从事地表过程建模及 信息系统. E-mail: 161302111@ stu. njnu. edu. cn

通信作者: 南卓铜, E-mail: nanzt@ njnu. edu. cn.

应用或适用性研究<sup>[17]</sup>。这些模型中,多数缺少对高寒山区流域特有的过程如冰川/积雪融水、冻融过程的表达,因此一些工作针对性地对现有模型进行改进或者与其他模型集成以提高总体的模型能力。Zhang 等<sup>[18]</sup>将 SWAH 模型与水文模型 DHM集成,探索了高寒山区流域冻土及土壤温度对水文过程的影响;Niu 等<sup>[19]</sup>讨论了 CLM2.0 中冻土对积雪融化和土壤含水量的影响;Gao 等<sup>[20]</sup> 改进了Noah-MP模型使之在青藏高原等高寒地区的模拟能力进一步提高;阳勇等<sup>[21-22]</sup>对比了不同模型对寒区冻土水热过程的模拟能力差异,并探讨了冻土对流域水热过程的影响机制。

半分布式和分布式模型由于采用了空间剖分方法(如子流域 - 水文响应单元),在复杂地形地貌上能较好反应流域水文过程。理论上讲,基于网格离散的全分布式水文模型如 DHSVM 能够更好地表达流域的空间异质性,然而此类模型在高寒山区流域的适用性研究还相对较少。郝正纯等尝试性地将 DHSVM 应用于青海省的宝库河流域,初步验证了模型在高寒山区流域的适用性,但模拟精度较低,月尺度上的模拟流量与观测流量的拟合趋势不理想[23]。中国西北部的高寒山区流域有其独特的气候和水文条件,高寒山区流域特有的冰川冻土等地理环境对流域内的水文过程有很大影响。全分布式水文模型在高寒山区流域的改进和应用是个有挑战的工作。

本文利用 DHSVM 模型对黑河流域上游的八宝河流域进行水文过程模拟,通过参数敏感性分析和参数率定对模型进行了校准,评价了 DHSVM 在高寒山区流域进行水文模拟的适用性,并探讨了土壤的季节性冻融对模型模拟结果的影响。

# 1 模型与数据

#### 1.1 DHSVM 模型

DHSVM 模型是一个基于数字高程模型 (DEM)的分布式水文模型,它依据 DEM 格网将流域分割成若干个计算单元格,每个计算单元有各自的坡度、植被、土壤类型以及经过的河道等信息。在每一个时间步长内,模型对每个单元格的能量平衡和质量平衡进行求解,模拟流域的水文过程。

DHSVM模型包含七个模块:蒸散发模块、双层地表积雪模块、冠层截雪和融化模块、不饱和土壤水运动模块、饱和土壤水汇流模块、坡面汇流模块以及河道汇流模块。DHSVM模型的产流和汇流

计算基于 DEM 进行,可以自定义模型计算的空间步长,使模型可以在高时空分辨率下进行精细的水文过程模拟计算。每个单元格的质量平衡如式(1) 所示:

$$\Delta S_{s1} + \Delta S_{s2} + \dots + \Delta S_{sn} + \Delta S_{io} + \Delta S_{iu} + \Delta W$$
  
=  $P - E_{io} - E_{iu} - E_{to} - E_{tu} - E_{s} - P_{2}$  (1)

式中: $\Delta S_{io}$ 、 $\Delta S_{iu}$ 分别表示植被上下冠层的存储水量变化; $\Delta S_{s1}$ 、 $\Delta S_{s2}$ ,…, $\Delta S_{sn}$ 表示各个土壤层的水量变化( $\mathbf{m}^3$ ); $\Delta W$  表示积雪的变化量<sup>[1]</sup>( $\mathbf{m}^3$ ),冠层雪水量的积累和融化通过单层的能量和质量平衡模型来模拟,地表积雪通过双层能量和质量平衡模型来计算;P 表示单元格降水量( $\mathbf{m}$ ),和从上游单元格流入的水量( $\mathbf{m}^3$ ),其中降水量由流域内的一个或多个测站的观测值插值到每个单元格上,并与其他变化量统一单位; $\Delta E_{io}$ 、 $\Delta E_{iu}$ 、 $E_s$ 分别表示植被上冠层、下冠层以及土壤层的蒸发量, $E_{to}$ 、 $E_{tu}$ 表示植被上冠层、下冠层的蒸腾量( $\mathbf{m}^3$ ),将地表植被按照高度和类型分为两个冠层,利用双冠层蒸散发模型<sup>[1]</sup>分别计算,土壤层蒸散发量根据改进的 Penman-Monteith 公式<sup>[24-25]</sup>计算; $P_2$ 表示单元格流出至下游单元格或河道的汇流( $\mathbf{m}^3$ )。

DHSVM 模型在每个单元格上的汇流由两部分组成: 地表径流和壤中流。在计算单元格地表径流的时候,模型分别考虑了超渗产流、蓄满产流和返回流三种产流方式,其中返回流是地下水位上升超过地表后返回至地表的产流,包含土壤含水量饱和后从土壤返回地表的流量,以及涵洞等人工地物返回地表的流量。壤中流采用达西定律进行计算,将土壤分为若干层,非饱和土壤层只存在垂直方向的水量交换,饱和土壤层依据相邻单元格间的水力梯度形成侧向的壤中流,直到被河道截流。具体过程如图 1 所示。

河道汇流采用线性水库法,对河道整体进行汇流的模拟<sup>[1]</sup>,如式(2)和(3)所示:

$$I(t) - O(t) = \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

$$S = KO(t) \tag{3}$$

式中: I(t)和 O(t)分别为河道在时间步长 t 内的流入量和流出量, S 为河道的蓄水量, K 代表蓄水量常数, 其物理意义为平均流域汇流时间。

#### 1.2 研究区域

八宝河属于祁连山区黑河流域的东支,由东向西汇人黑河主干流。八宝河全长约104.1 km,流域面积约2448 km²,平均海拔约3500 m,上下游高

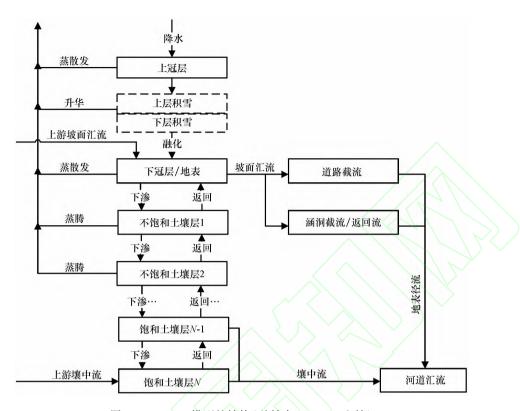


图 1 DHSVM 模型的结构(总结自 DHSVM 文档)

Fig. 1 Structure of the distributed hydrology soil vegetation model (DHSVM)

程差超过 2 000 m。八宝河流域(图 2)位于我国西北部高寒山区,是典型的大陆性气候控制的内流流域。流域内日照时间充足,太阳辐射量大,气候干旱。八宝河流域全年降水量约为 400 mm,大部分集中在夏季,每年 10 月至次年 4 月可能出现降雪,约占全年降水量的 5%,使得河流流量呈现出明显的季节性变化。流域内 3 600 m 海拔以下是季节性冻土,3 600 m 以上下伏多年冻土<sup>[26]</sup>。冰川、积雪融水、表面土壤的季节性冻融都影响了流域的水文过程。而且随着气候持续变暖,多年冻土区的退化

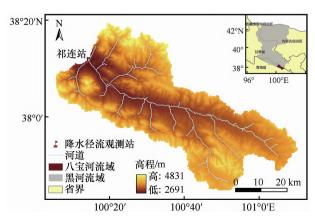


图 2 八宝河流域位置

Fig. 2 Location map of the Babao River basin

也将影响到流域水文过程。干旱少雨的气候条件和冰川冻土地理环境共同形成了八宝河流域独特的水文特征。

#### 1.3 数据准备

DHSVM 模型的输入数据包括 DEM、土壤类型数据、土地利用类型数据、流向数据、土壤厚度数据和流域掩膜数据等格网数据,以及河道数据、河道格网数据、河流等级、气象驱动等数据。

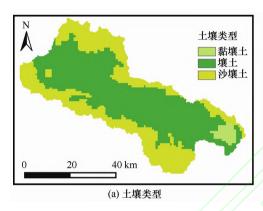
八宝河流域的 DEM(图 2)来源于黑河流域 ASTER Global DEM 数据集, 重采样、转换投影后 得到八宝河流域的 300 m 分辨率 DEM 数据, 根据此 DEM 生成流向数据和流域掩膜文件。

气象数据来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。八宝河流域内有一个气象观测站:祁连站(编号52657)。气象要素包括祁连站2001-2009年逐日的气温、风速、湿度、长波辐射、短波辐射和降水数据。我们将数据转换成3h时间分辨率,其中气温、风速、湿度、长波辐射、短波辐射采用日均值,逐日降水数据平分至每个3h时间单元中。我们借助 MicroMet 软件[27] 以祁连站的数据对整个流域的单元格进行气象数据插值。MicroMet 能较好体现高程对各个气象要素的影响。

通过将黑河流域 1 公里土地覆盖格网数据集<sup>[28]</sup>按照 300 m 进行重采样得到八宝河流域的地表土地利用类型数据(图 3a)。流域内包含草地、耕地、混合林、裸地、湿地和水域六种土地利用类型,其中草地面积占全流域面积 78.4%,荒地占14.8%,湿地占2.8%,水域占3.6%,耕地和混合林共占0.4%,分布面积较小,可以忽略。流域土壤数据来自黑河流域土壤类型数据集<sup>[29]</sup>(图 3b),流域内有黏壤土(Clay loam)、砂壤土(Sandy

loam) 和壤土(Loam) 三种土壤类型,分别占流域总面积的 2.5%、39.5% 和 58%。

流域内的河道数据根据赵彦博等的方法<sup>[30]</sup>生成,河道的宽度、深度等属性参考历史资料和Google Earth卫星影像数据的进行赋值,根据卫星影像显示的河道宽度及比例尺计算实际的河道宽度。河流初始状态数据采用模型提供的代码生成,河道曼宁系数设置为0.0001。



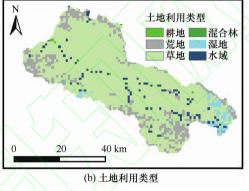


图 3 八宝河流域土壤类型(a)和土地利用类型(b)分布

Fig. 3 Distribution of the soil (a) and land use types (b) in the Babao River basin

#### 1.4 模型调参与运行

因为分布式水文模型模拟结果受时空分辨率的影响较大,我们综合考虑驱动数据和参数的精度,对四个空间分辨率(50 m、90 m、200 m、300 m)和两个时间分辨率(3 h、24 h)进行测试,以选择合适的时空间分辨率。

DHSVM 模型的参数主要包括三类: (1) 全局参数:包括流域空间属性、地表粗糙度、降水递减率、温度递减率等参数; (2) 植被参数:对植被冠层截流和蒸散发有较大影响,主要有叶面积指数、气动阻力、植被反照率等参数; (3) 土壤参数:主要影响不同类型土壤的蓄水量以及渗透、汇流速率,主要有导水率、下渗系数、田间持水量等参数。我们使用 EFAST 方法<sup>[31]</sup>分析主要参数的敏感性。EFAST 方法是一种基于方差的全局参数敏感性分析方法,该方法通过合适的搜索曲线在参数取值范围内进行参数分布,从而建立参数之间的相互联系,EFAST 方法不仅可以得到单个参数独立作用的敏感性。

八宝河流域植被稀疏,类型主要以草地为主, 植被参数相比较其他流域来说相对简单。我们重点 考虑了土壤参数中的横向导水率、最大下渗系数、 地表反照率、田间持水量、纵向导水率和曼宁系数,以及植被参数中的叶面积指数和植被上下冠层反照率等参数,进行敏感性分析。通过搜索曲线确定9组共585个参数集合,对每个参数集合进行时长为1a的模型模拟,并利用模拟结果分析参数的独立敏感性以及与其他参数之间的关联性。

模型运行的初始状态根据当地当日的气象资料等数据确定,土壤含水量、地表积雪量等无法通过已有资料获取的初始运行状态变量,根据起始年模型模拟的均值赋值。在模型进行正式模拟前,给予适当的预热时间,以减少初始状态对模型不确定性的影响。

最后利用 Nash 系数对 DHSVM 模型的日径流、月径流模拟结果进行评估。Nash 效率系数模型 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) [32] 通常用来验证水文模型模拟结果的精度,计算如公式 4 所示:

$$E_{ns} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{sim},i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{\text{obs},i} - \overline{Q}_{\text{obs}})^{2}}\right)$$
(4)

式中:  $Q_{\text{obs},i}$ 为观测径流量;  $Q_{\text{sim},i}$ 为模拟径流量;  $\overline{Q}_{\text{obs}}$ 为观测径流量的均值;  $E_{ns}$ 越接近 1,表示模拟精度越高,可信度高; 越接近 0,表示模拟结果接近观

测值的平均水平,不能准确的反映变化趋势,峰谷 值误差较大。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 模型时空分辨率的选择

不同时空分辨率下八宝河流域的水文过程的模拟结果如图 4 所示。在 100 m 及更粗空间尺度上,

模型模拟精度与横向导水率有较大关系,在其他参数不变的情况下,随着分辨率的提升,适当降低模型的横向导水率,可以保持较高的模拟精度。当分辨率提升到50m时,模拟径流量会远低于观测结果,且难以通过参数调节改善模拟结果,表明现有的数据情况无法支持该分辨率和更精细分辨率的运行。

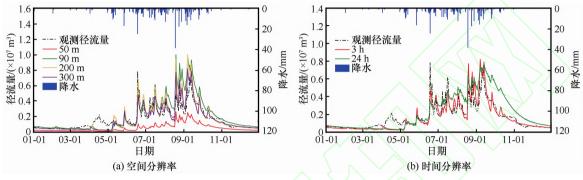


图 4 2009 年不同空间分辨率(a)和时间分辨率(b)下的模拟结果 Simulation results at varying spatial (a) and temporal resolutions(a) in 2009

在300 m 分辨率的空间精度下,对模型进行24 h 和3 h 不同时间分辨率的模拟(图 4b),3 h 的时间分辨率下,模型的模拟结果较好,而24 h 的时间分辨率无法有效反应径流量的变化趋势,这是因为 DHSVM 内部的一些物理过程是在小时尺度上进行描述,无法运行在日尺度上。因此经综合考虑,我们采用了300 m 空间分辨率和3 h 时间步长进行计算。

#### 2.2 敏感性分析结果

参数敏感性分析结果如 5 所示,其中主敏感性 表示参数单独变化时的敏感性,总敏感性表示参数 与其他参数关联时的敏感性,纵坐标数值越高,表 示参数敏感性越高。结果表明在八宝河流域,土壤 参数中的土壤横向导水率、田间持水量对模型结果 影响较大;植被参数中的叶面积指数和反照率对模

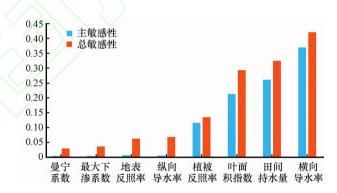


图 5 DHSVM 模型主要土壤和植被参数敏感性分析结果 Fig. 5 Sensitivity of main soil and vegetation parameters in DHSVM

型结果影响较大。

敏感性参数的建议取值范围和率定后结果如表 1 所示。其中 Soil 1~3 分别表示黏壤土、壤土和砂

表 1 主要敏感参数取值范围和率定结果

Table 1 Range of main sensitive parameters and calibrated values 单位 建议取值范围 率定理

参数名称	单位	建议取值范围	率定取值
曼宁系数	-	0.001 ~ 0.15	0.03
最大下渗系数	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-3}$
地表反照率	-	0 ~ 1	0.1
纵向导水率	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	$2.10\times10^{-3}($ Soil $1$ ) ; $3.38\times10^{-3}($ Soil $2$ ) ; $5.23\times10^{-2}($ Soil $3$ )
植被反照率	-	0 ~ 1	0.8 (Veg 2); 0.75 (Veg 3)
叶面积指数	$m^2 \cdot m^{-2}$	0.5 ~22	0.1 (Veg 2); 1.5 (Veg 3)
田间持水量	$m^3 \cdot m^{-3}$	0.18 ~ 0.41	0.29 (Soil 1); 0.23 (Soil 2); 0.28 (Soil 3)
横向导水率	m • s <sup>-1</sup>	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	$2.1 \times 10^{-2}$ (Soil 1); $0.8 \times 10^{-3}$ (Soil 2); $6.23 \times 10^{-2}$ (Soil 3)

土

壤土。该区土地利用类型中,草地和荒地占到流域总面积的93%以上,该两类型是影响模型模拟的主要因素,其他四种类型对模拟的精度影响不大,因此表1中只展示草地(Veg 3)和荒地(Veg 2)的植被反照率和叶面积指数月均值。其中叶面积指数率定值低于建议取值范围下限,是因为高寒流域植被状况往往较差。

#### 2.3 蒸散发估算参数的修正

图 6 是利用默认的参数和植被数据模拟的八宝河的日径流量。可以发现在冬、春两季拟合结果较好; 夏季气温高、蒸散发量大的时期,模拟结果明显小于观测结果,且模拟流量曲线随降水变化的起伏趋势没有观测结果明显; 秋季蒸散发量减小,此时模拟流量比较接近观测流量,且符合降水变化的趋势。

以2009年的祁连站日径流量模拟结果为例(图6),默认参数的模拟结果显示,模型6-8月有降水时期的径流模拟结果远小于观测结果,且没有随降水变化的起伏趋势,1-5月、10-12月,以及6-8月无降水时期的模拟结果准确度较高,整体Nash系数只有0.34。DHSVM模型在无降水时期的径流模拟结果比较准确,说明模型对基流的模拟结果比较好,对降水引起的地表径流模拟结果不好。

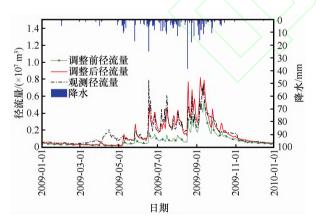


图 6 参数调整前后的 2009 年祁连站日径流模拟对比 Fig. 6 Comparison of simulated daily streamflow at the Qilian Station in 2009 with and without parametric calibration

检查发现降水发生期的蒸散发量被严重高估。 我们通过调整各个植被类型的反照率和叶面积指数,减少了潜在蒸散发量,发现在夏季有降水时期的模拟结果明显改善,从而提高了参与地表汇流和下渗的净降水量。调整后的2009年径流模拟结果显示,总蒸散发量比用默认参数的结果减少了 32%,年均蒸散发量约为 260 mm,与阳勇等的估算结果<sup>[33]</sup>相近。总径流量上升了 39%,Nash 效率系数提升到了 0.75,6-8 月的模拟径流量明显提升,整体变化趋势与降水的变化趋势相一致,在数值上也可以相互匹配。我们利用调整后的参数进行长时间的模拟,发现所有年份的日、月径流量的模拟结果都得到较大改善,这说明在干旱区域,被模型高估的潜在蒸散发量会严重影响 DHSVM 模型的模拟精度,必须加以参数校准。

DHSVM 模型采用的双层植被冠层模型,利用 Penman 公式[34] 计算潜在蒸散发量, 当上冠层不存 在时, 所有的潜在蒸散发量会全部分配给下冠层, 这会导致只有下冠层的区域计算出的蒸散发量会大 干实际蒸散发量。在 DHSVM 模型的计算中, 需要 先进行蒸散发量的计算,剩余的净降水量再进行汇 流计算,如果潜在蒸散发量过大,那么总降水量的 大部分会被分配给蒸散发量,使得参与汇流过程的 降水量少于实际情况。在夏季降水集中的时期,蒸 散发量过大会导致净降水量减少,河流总径流量小 于观测结果,且河流径流量随降水变化的趋势会变 得不明显。八宝河流域地处中国西北部,是典型的 干旱区内陆河流, 夏季气温高, 且地表植被稀疏, 流域内93%的区域是草地和裸地,属于没有上冠层 的土地利用类型,其中草地的面积占比高达78%。 自 1994 年起, 黑河流域的潜在蒸散发量呈显著上 升趋势[35],但由于降水稀少且集中在夏季,实际蒸 散发量远小于潜在蒸散发量。由于 DHSVM 模型特 殊的蒸散发计算方式,蒸散发量对最终径流量的影 响十分巨大。

#### 2.4 模拟结果

利用祁连山站 2001 - 2004 年的水文资料,对横向导水率、田间持水量、叶面积指数、植被反照率等单元格参数以及曼宁系数等河道系数进行了校准,用 2005 - 2009 年祁连站观测流量对模拟结果进行了验证。结果发现 DHSVM 模型较为准确地模拟出了八宝河流域流量变化(图7、图8)。率定期日径流量 Nash 系数达到 0.72,月径流量 Nash 系数达到 0.87,验证期日径流量 Nash 系数为 0.60,月径流量 Nash 系数为 0.74,模型对 2001 - 2003 年、2005 - 2006 年、2009 年的模拟结果比较好,2004年、2007 年以及 2008 年的模拟精度相比于其他年份较低,其中 2004 年、2007 年夏季模拟径流量较观测流量偏低,2008 年偏高,且模拟结果的径流与降雨的变化趋势拟合良好,能够正确反映流域内水

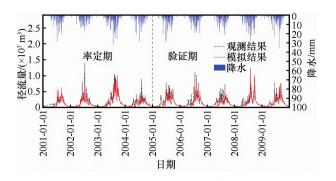


图 7 八宝河流域日径流量模拟结果
Fig. 7 Simulated and observed daily streamflow in the
Babao River basin

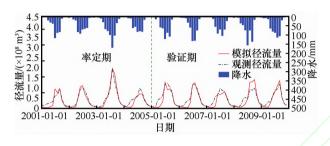


图 8 八宝河流域月径流量模拟结果
Fig. 8 Simulated and observed monthly streamflow in the
Babao River basin

文过程与降水之间的响应关系。

对比模型模拟的日径流量(图7)与观测值,发 现模型在11月至次年5月的模拟结果比较准确, 这几个月降水少,流域的径流量主要受地下水控 制,说明模型能很好地模拟地下水对河流的影响。 6-10月的日模拟径流量随着降水量的变化呈现出 明显的波动,模拟结果能准确地反映降水对流域河 流径流量的影响,但模拟流量的峰值与实际观测结 果仍然存在一定的差异, 植被土壤等参数和气象驱 动数据质量以及模型物理过程的表达都可能导致这 些模拟偏差。除了 2002 - 2003 年, 其他年份 4 月 左右,气温从0℃以下回升到0℃以上之后的一段 时间,模拟结果都会比观测结果严重偏小,可能是 与模型不能有效表达浅层土壤的冻融过程有关。总 体来说, DHSVM 模型基本能准确模拟八宝河流域 的水文状况,说明 DHSVM 模型在我国西北部高寒 山区流域,有较好的适用性。

模拟结果在春季和夏季多雨季节存在的一些误差,与以下因素有关:(1)气象驱动数据不足以反映流域的真实空间分布,八宝河流域只有一个气象站点的数据依据高程插值到每个单元格,而且流域地形地貌复杂,高差大,使得输入模型的气象要素格网数据质量不够。(2)植被关键参数不能有效反

映该区时空上的变化,一方面受限于原始的植被数据的质量,另一方面在9a的模拟过程中,植被参数被假设为不随时间变化,而一些植被参数可能具有季节和多年的变化。(3)土壤温度被设置为与地表温度相同,没有考虑土壤温度与地表温度之间的差异,无法有效表达土壤温度在季节和年际的动态变化。(4)尽管 DHSVM 在积雪上有细致的考虑,对高寒山区的冰川融水、土壤冻结融化过程缺少表达能力,导致出现春季的模拟结果比观测结果偏小的误差。

#### 2.5 季节性冻融影响分析

冻土通过影响土壤导水率、季节性冻融等方式,影响着高寒流域内的水文过程<sup>[36-37]</sup>。八宝河流域平均海拔3500 m,最高海拔达到5000 m左右,年平均气温在-5℃左右,平均冻结概率0.5,流域内分布有大面积的季节性冻土和多年冻土,在海拔4600 m以上区域存在冰川<sup>[26,38]</sup>。研究表明,八宝河流域冻土的最大冻结面积出现在1月,4月左右气温回升到0℃以上时,不冻结面积迅速增大,至6、7月份,不冻结面积达到最大<sup>[39]</sup>。在积雪、冰川融水、冻土冻结和融化的过程中,八宝河的水文过程也会受其影响发生变化<sup>[36,40-41]</sup>,DHS-VM模型对积雪有较为细致的考虑,但没有考虑到冰川融水、土壤冻融过程对水文过程的影响,在这些特殊的时间段,会影响到径流变化的模拟能力。

对比 2005 - 2009 年各年份日模拟径流量与观 测径流量(图9),发现每年3月末至5月初左右, 观测径流量都有一个明显的上升, 但降雨量和模拟 径流量没有表现出相应的变化趋势。此时气温正好 从0℃以下开始回升到0℃以上,处于积雪、冻土 开始融化的时期,气温变化曲线表现出与径流量变 化曲线明显的相关性。图9表明,在气温升到0℃ 之后的一段时间,观测径流量变化趋势与气温变化 趋势高度一致,这部分上升的径流来自积雪、冰川 融水、冻结土壤的融水等温度敏感的产流方式。八 宝河流域冬季降水稀少,只占全年降水量的5%左 右,对流域径流量的影响较少。Wang 等[42]发现随 着气温上升, 冻土活动层增加使得土壤蓄水量上 升,降水径流和基流也随之上升,同时冰川融化也 为流域带来了一定的径流量。这部分上升的径流量 与观测结果较为接近。而且模型内已经有计算积雪 融水的过程,模拟表明,积雪融水量只占总模拟径 流量的3%,不足以对径流量造成较大的影响。因 此我们认为,这部分的径流主要来自土壤的季节性

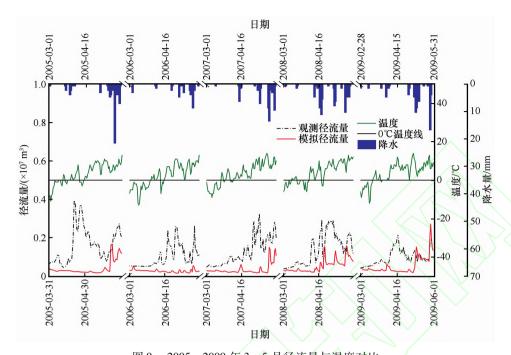


图 9 2005 – 2009 年 3 – 5 月径流量与温度对比 9 Streamflow and temperature in March to May, 2005 – 2009

冻融过程。

DHSVM 模型充分考虑了降水和基流对径流量的影响,可以将 DHSVM 模型的模拟结果认为是只考虑基流和降水情况下的径流量,3 月末至 5 月的观测径流量为基流、降水和季节性冻融累加后的径流量,将此期间观测径流量减去模拟径流量,可以估算出季节性冻融量,平均约为 53.2 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup>,占全年径流量的8.5%,与 Zhang 等<sup>[18]</sup>利用冻土模型计算出来的结果相近。这部分的径流量 DHSVM 模型无法有效模拟,对模拟精度造成很大影响,属于模型本身缺陷导致的系统性误差,这表明在高寒山区应用 DHSVM,需要重点改进模型对土壤春季融水的表达。

#### 3 结论

本文选择一个基于网格离散的分布式水文模型 DHSVM 模拟了典型高寒山区流域 - 祁连山区八宝河流域 2001 - 2009 年的水文变化(时间分辨率 3 h, 空间分辨率 300 m),探讨了 DHSVM 模型在干旱区高寒山区流域的适用性,得到以下结论:

(1) DHSVM 模型在西北高寒山区流域有较好的适用性,可以在较高的时空分辨率下实现精细的水文过程模拟。高分辨率的模拟需要相应的高精度驱动数据和参数支持,八宝河流域的数据现状适合百米和小时尺度的模拟分辨率。经过参数率定,率

定期和验证期的日径流模拟的效率系数均在0.6以上,月径流模拟的效率系数达0.7以上。

- (2)模型默认参数会严重高估夏季蒸散发量,导致模型对夏季径流量的模拟结果远低于观测结果。横向导水率、田间持水量、叶面积指数和植被反照率等参数是模型主要的敏感参数,对这些参数进行率定可以显著提高 DHSVM 在高寒山区流域水文过程的模拟精度。
- (3) DHSVM 模型低估了高寒山区流域的春季 (3月末-5月初)径流量,是因为其缺少对季节性 冻融的表达。春季土壤季节融水导致的径流量占全 年总径流量的8.5%左右,对模型模拟精度有较大 影响。

我们需要在 DHSVM 中集成合适的冻土冻融过程算法,进一步提高 DHSVM 在高寒山区流域的水文模拟能力。

#### 参考文献 (References):

- Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain [J]. 1994, 30(6): 1665 1679.
- [2] Cuartas L A, Tomasella J, Nobre A D, et al. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia; model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model [J]. Journal of Hydrology, 2012, 462(5): 15 27.
- 3] Safeeq M, Fares A. Hydrologic effect of groundwater development in a small mountainous tropical watershed [J]. Journal

- of Hydrology, 2012, 428(13): 51 67.
- [4] Alvarenga L A, de Mello C R, Colombo A, et al. Assessment of land cover change on the hydrology of a Brazilian headwater watershed using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model [J]. CATENA, 2016, 143: 7-17.
- [5] Lan C, Giambelluca T W, Ziegler A D, et al. Use of the distributed hydrology soil vegetation model to study road effects on hydrological processes in Pang Khum Experimental Watershed, northern Thailand[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(1/2): 81 94.
- [6] Kang Lili, Wang Shourong, Gu Junqiang. The simulation test of the distributed hydrological model DHSVM on the runoff change of Lanjiang River basin [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 24(2): 176-182. [康丽莉,王守荣,顾骏强.分布式水文模型 DHSVM 对兰江流域径流变化的模拟试验[J]. 热带气象学报,2008,24(2): 176-182.]
- [7] Shi Chao, Xia Gong, Zhang Xingnan, et al. Hydrological simulation of Pingtong River basin based on distributed hydrological model DHSVM[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2014, 36(4): 19 23. [石超, 龚霞, 张行南, 等. 基于分布式水文模型 DHSVM 的平通河流域水文模拟[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 19 23.]
- [8] Kang Ersi, Cheng Guodong, Lan Yongchao, et al. A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of northwest China to climatic changes[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 1999, 29(S1): 52 – 63.
- [9] 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): 94-100. [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): 94-100.]
- [10] Wang Jian, Li Shuo. Effect of climatic change on snowmelt runoffs in mountainous regions of inland rivers in northwestern China
   [J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2006, 49(8):
   881 888.
- [11] 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 (Natural Sciences Edition), 2004, 28(2): 22 26. [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.]
- [12] Zhang Lanhui, Jin Xin, He Chansheng, et al. Comparison of SWAT and DLBRM for hydrological modeling of a mountainous watershed in arid northwest China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(5): 4016007.
- [13] Yue Jiajia, Pang Bo, Xu Zongxue. Estimating parameters of the variable infiltration capacity model using ant colony optimization [J]. Water Science and Technology, 2016, 74(4); 985 993.
- [14] Xia Jun, Wang Gangsheng, Tan Ge, et al. Development of distributed time-variant gain model for nonlinear hydrological systems[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2005, 48 (6): 713 723.
- [15] Nan Zhuotong, Shu Lele, Zhao Yanbo, et al. Integrated modeling environment and a preliminary application on the Heihe River Basin, China[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(8): 2145 2156.

- [16] Feng Qi, Zhang Yanwu, Si Jianhua, et al. Simulative experiment on energy transfer in APAC system at lower reaches of Heihe River[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1145 1150. [冯起,张艳武,司建华,等.黑河下游典型植被下垫面与大气间能量传输模拟研究[J].中国沙漠, 2008, 28(6): 1145 1150.]
- [17] Zhao Yanbo, Nan Zhuotong, Chen Hao, et al. Integrated hydrologic modeling in the inland Heihe River Basin, Northwest China
   [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(1): 35 50.
- [18] Zhang Yanlin, Cheng Guodong, Li Xin, et al. Influences of frozen ground and climate change on hydrological processes in an alpine watershed: A case study in the upstream area of the Hei'he River, Northwest China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2017, 28(2): 420 432.
- [19] Niu Guoyue, Yang Zongliang. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale [J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(5): 937 – 952.
- [20] Gao Yanhong, Li Kai, Chen Fei, et al. Assessing and improving Noah-MP land model simulations for the central Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120 (18): 9258 9278.
- [21] Yang Yong, Chen Rensheng, Ye Baisheng, et al. Heat and water transfer processes on the typical underlying surfaces of frozen soil in cold regions ( I ): model comparison[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1545 1554. [阳勇,陈仁升,叶柏生,等. 寒区典型下垫面冻土水热过程对比研究( I ): 模型对比[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1545 1554.]
- [22] Yang Yong, Chen Rensheng, Ye Baisheng, et al. Heat and water transfer processes on the typical underlying surfaces of frozen soil in cold regions (II): water and heat transfer [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1555 1563. [阳 勇,陈仁升,叶柏生,等. 寒区典型下垫面冻土水热过程对比研究(II):水热传输[J]. 冰川冻土,2013,35(6): 1555 1563.]
- [23] Hao Zhenchun, Liang Zhihao, Liang Liqiao, et al. Adaptability analysis of DHSVM model in runoff simulation of Baoku River basin[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(11):9-12. [郝振纯, 梁之豪, 梁丽乔, 等. DHSVM 模型在宝库河流域的径流模拟适用性分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(11):9-12.]
- [24] Monteith J L. Evaporation and surface temperature [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1981, 107 (451): 1-27.
- [25] Choudhury B J, Monteith J L. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 114(480); 373 398.
- [26] Wang Qingfeng, Zhang Tingjun, Wu Jichun, et al. Investigation on permafrost distribution over the upper reaches of the Heihe River in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 19-29. [王庆峰,张廷军,吴吉春,等. 祁连山区黑河上游多年冻土分布考察[J]. 冰川冻土,2013,35(1): 19-29.]
- [27] Liston G E, Elder K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet) [J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(2): 217 234.
- [28] Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling. MICLCover land cover map of the Heihe River Basin [DB]. Heihe Plan Science Data Center, 2011. DOI:10.3972/westdc.010.2013.db.heihe. [冉有华,李新,卢玲. 黑河流域1公里土地覆盖格网数据集[DB]. 黑河计划数据管理中心,2011. DOI:10.3972/westdc.010.2013.

冰

土

db. heihe.

- [29] Li Fuxing, Qiu Baoming. Agrotype in 1980's dataset of the Heihe River Basin [DB]. Heihe Plan Science Data Center, 1988. [李福兴, 仇保铭. 黑河流域1980 年代土壤类型数据集 [DB]. 黑河计划数据管理中心, 1988.]
- [30] Zhao Yanbo, Cao Xuecheng, Nan Zhuotong, et al. An automatic method for generating stream network data for the DHSVM model using open source GIS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 793 800. [赵彦博,曹学诚,南卓铜,等. 基于开源 GIS 的 DHSVM 模型河网数据自动制备方法应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 793 800.]
- [31] Saltelli A, Tarantola S, Chan K P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output [J]. Technometrics, 1999, 41(1): 39 56.
- [32] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282 290.
- [33] Yang Yong, Chen Rensheng, Song Yaoxuan, et al. Measurement and estimation of grassland evapotranspiration in a mountainous region at the upper reach of Heihe River basin, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1055—1062. [阳勇,陈仁升,宋耀选,等. 黑河上游山区草地蒸散发观测与估算[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1055—1062.]
- [34] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1970, 10(3): 120 - 145.
- [35] Wang Zhongfu, Yang Lixiao, Bai Xiao, et al. Evaporation paradox in the Heihe River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1323 1332. [王忠富,杨礼箫,白晓,等. "蒸发悖论"在黑河流域的探讨[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1323 1332.]

- [36] Xi Axing, Liu Zhihui, Lu Wenjun. Processes of seasonal frozen soil freezing-thawing and impact on snowmelt runoff in arid area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 333 339.
- [37] Ouyang Wei, Bing Liu, Huang Haobo, et al. Watershed water circle dynamics during long term farmland conversion in freeze-thawing area[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 555 562.
- [38] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River basin in the last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 365 377. [怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近 50 年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 365 377.]
- [39] Peng Xiaoqing, Zhang Tingjun, Pan Xiaoduo, et al. Spatial and temporal variations of seasonally frozen ground over the Heihe River basin of Qilian Mountain in western China[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(4): 497 508. [彭小清, 张廷军, 潘小多, 等. 祁连山区黑河流域季节冻土时空变化研究[J]. 地球科学进展, 2013, 28(4): 497 508.]
- [40] Zhang Kai, Wang Runyuan, Han Haitao, et al. Hydrological and water resources effects under climate change in Heihe River basin [J]. Resources Science, 2007, 29(1): 77 83. [张凯, 王润元, 韩海涛, 等. 黑河流域气候变化的水文水资源效应[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 77 83.]
- [41] Wu Feng, Zhang Jinyan, Wang Zhan, et al. Streamflow variation due to glacier melting and climate change in upstream Heihe River Basin, Northwest China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 79: 11 19.
- [42] Wang Yuhan, Yang Dawen, Lei Huimin, et al. Impact of cryosphere hydrological processes on the river runoff in the upper reaches of Heihe River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1064 1071. [王宇涵,杨大文,雷慧闽,等. 冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1064 1071.]

# On applicability of a fully distributed hydrological model in the cold and alpine watershed of Northwest China

ZHAO Yi<sup>1</sup>, NAN Zhuotong<sup>1</sup>, LI Xiangfei<sup>1</sup>, XU Yi<sup>1</sup>, ZHANG Ling<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Distributed-Hydrology-Soil-Vegetation-Model (DHSVM) is a grid-based distributed hydrological model and has been widely used to simulate hydrological processes at high spatiotemporal resolution across the world owing to its particular calculation of surface water and heat balance. However, its applicability in cold and alpine regions remains unclear. This paper employed DHSVM to simulate hydrological processes during the period of 2001 to 2009 at a 300 meters and 3 hours modeling resolutions in the Babao River basin, a representative mountainous river basin located within the Oilian Mountains in the cold region of Northwest China. The applicability was thus validated with observations at the basin outlet. Parametric sensitivity analysis shows that lateral conductivity, field capacity, leaf area index and albedo are some most sensitive parameters. The default model parameters lead to overestimation of potential evaporation, and consequent underestimation of streamflow simulation in summers. Using calibrated parameters, the model can achieve good simulation with Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of 0.72 and 0.87 in the calibration period (2001 - 2004), and 0.60 and 0.74 in the validation period (2005 - 2009) for daily and monthly simulations, respectively. This study concludes that DHSVM is generally capable for simulating hydrological processes at high spatial and temporal resolutions in cold and alpine regions, although it is insufficient in representing freezing and thawing processes occurred in soil, resulting in lower accuracy of streamflow simulation in springs, which should be addressed in future when modelling in those areas.

Key words: DHSVM; cold and alpine region; the Babao River basin; sensitivity analysis; streamflow simulation

(本文编辑:周成林)