



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.008

高端, 穆振侠. 天山西部山区 VIC 模型的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 44-48, 58. GAO Rui, MU Zhenxia. Application of VIC Model in Western Tianshan Mountains[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 44-48, 58. (in Chinese)

天山西部山区 VIC 模型的应用

高 瑞, 穆振侠

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为能够更好地指导高寒山区融雪径流模拟研究与洪水预报方面的工作, 以天山西部山区的喀什河流域为研究区, 根据研究区内 1990 年-2000 年内的水文气象数据、CFSR 再分析数据、DEM、土壤及植被等数据, 借助构建的 VIC 模型进行径流模拟研究。根据模拟结果, 可以看出: (1) 气象资料匮乏区可以将 CFSR 再分析数据作为数据源, 但此数据与实际情况存在一定偏差, 需进行相应修正; (2) 本研究以优选水文站降水数据作为 CFSR 再分析数据修正依据, 以水文站所在 CFSR 再分析数据网格为标准, 通过与其他 CFSR 网格降水数据建立相关关系进行 CFSR 异常数据剔除的方法是可行的; (3) 构建的 VIC 模型在本研究区具有一定的适用性, 且模型参数取值较合理; (4) 率定期内, 月尺度下模型效率系数和多年径流相对误差分别为 0.80 和 4.7%, 日尺度下分别为 0.64 和 3.3%; 而在验证期内, 月尺度下模型效率系数和多年径流相对误差分别为 0.84 和 14.5%, 日尺度下分别为 0.70 和 13.1%。

关键词: VIC 模型; CFSR 再分析数据; 天山西部山区; 融雪径流

中图分类号: P332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0044-05

Application of VIC Model in Western Tianshan Mountains

GAO Rui, MU Zhenxia

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: To guide the studies on snowmelt runoff simulation and flood forecast in alpine regions, in this paper, we took the Kashi River basin in Western Tianshan Mountains as the study area, and built a VIC model to conduct runoff simulation study based on the hydro-meteorological data, CFSR reanalysis data, DEM, soil and vegetation data of the study area during 1990 to 2000. It was found that: (1) CFSR reanalysis data can be used as a data source in areas lacking meteorological data, but they should be calibrated as they deviate from the real situation. (2) It is feasible to remove CFSR abnormal data by using the precipitation data of an appropriate hydrological station as the basis on which CFSR reanalysis data are calibrated, taking the CFSR reanalysis data grid of the hydrological station as the standard, and establishing its correlations with other CFSR grids. (3) The established VIC model had certain applicability in the study area, and the parameters in this model were reasonable. (4) In the calibration period, the relative errors of model efficiency coefficient and multi year runoff were 0.80 and 4.7% respectively on the monthly scale, and 0.64 and 3.3% respectively on the daily scale. In the verification period, the relative errors of model efficiency coefficient and multi year runoff were 0.84 and 14.5% respectively on the monthly scale, and 0.70 and 13.1% respectively on the daily scale.

Key words: VIC model; CFSR reanalysis data; Western Tianshan Mountains; snowmelt runoff

收稿日期: 2016-07-21 修回日期: 2016-09-01 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469034; 51209181; 51569031); 新疆维吾尔自治区地方公派出国留学成组配套项目(XJDF201307); 新疆水文学及水资源重点学科基金项目(xjswszyzdxk20101202)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51469034; 51209181; 51569031); Xinjiang Autonomous Regional Public Schools Abroad Study Group Matching Project(XJDF201307); Xinjiang Hydrology and Water Resources Key Science Foundation Project(xjswszyzdxk20101202)

作者简介: 高 瑞(1992-), 男, 山东滕州人, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: grui92@163.com

通讯作者: 穆振侠(1980-), 男, 山东莒县人, 副教授, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: muzhenxia@126.com

高寒山区所特有的冰川、积雪及冻土不仅是气候变化的敏感指示剂、重要的水资源^[1],也是生态环境变化的脆弱区域,易受人类活动与气候变化的影响。由于冰川、积雪消融规律及冻土的冻融过程受多种外界与自身因素的复杂影响,加之这一区域实测资料获取受限,因此人们对这一区域水文循环规律、气候变化影响等的认识有限,还不能清晰的合理刻画与再现相应的水文变化过程。另外,近年来受气候变化的影响,极端水文事件频现,且其强度越来越大^[2,4],给所在区域带来了较大的经济损失。在此背景下,利用水文模型仿真流域下垫面概况及模拟并预测未来情景下径流变化的特点,已经成为预防水文灾害行之有效的重要途径之一。

目前,国内外学者利用能量平衡和经验公式等方法^[5]针对融雪融冰方面做了大量的研究,并取得了一定的成果。但是考虑到融雪融冰过程的复杂性及外界因素的干扰,对受到相关影响的水文过程认识的尚且不够充分。在天山西部山区,有学者使用改进了的新安江模型^[6]和 SWAT 模型^[7-9]分别模拟了此地区的水文过程,但忽略了冻土对水文过程的影响;在新疆乌鲁木齐河源区^[10]和玛纳斯河流域^[11],部分学者借助 SRM 模型在仅考虑了融雪这一影响因素的情况下对径流进行了模拟研究。由于各个区域的土壤质地具有差异性,产流机制有所不同,目前进行水文过程研究的模型多从蓄满产流或超渗产流单一的产流机制来进行水文过程的研究^[12],与实际情况可能存在一定的差异。考虑到 VIC 模型以混合产流作为产流机制^[13],能够较好地反映流域的实际情况,在模拟产汇流过程中考虑到了冰川、融雪和冻土因素的影响,该模型又在三江源地区^[14]、拉萨河流域^[15]、阿克苏河流域^[16]及昆马利克河流域^[17]均具有较好的适用性,但还未在天山西部山区应用,本文遂尝试在天山西部山区构建 VIC 模型并对其水文过程进行研究,讨论模型在此地区的适用性。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

喀什河流域位于伊犁河谷东北部,北临天山山脉的博罗科努山和依连哈比尔尕山,南接天山支脉阿吾勒勒山;其地理坐标范围为 $81^{\circ}47' - 84^{\circ}56'$,北纬 $43^{\circ}37' - 44^{\circ}13'$,整个流域面积约为 $9\,541\text{ km}^2$;河谷大致呈东西走向,东高西低,两岸大致平行,致使从西边方向来的湿气能够长驱直入,并在中、高山区滞留,山区年降水量在 700 mm 以上^[18]。流域海拔

在 $1\,364 \sim 4\,584\text{ m}$ ^[9] 的范围内; $3\,660\text{ m}$ ^[5] 以上几乎为永久性积雪区,冰川面积达 421.6 km^2 ^[18]。受当地气候及下垫面的影响,喀什河径流补给项来自冰川积雪消融、降雨及地下水。研究区水系图见图 1。

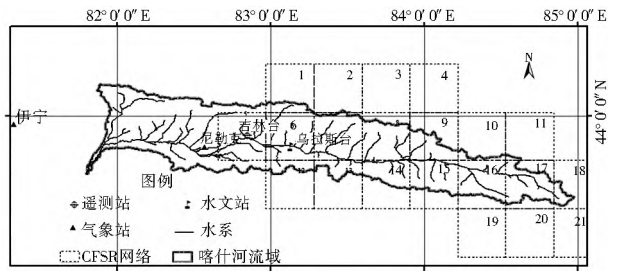


图 1 喀什河流域水文气象站点分布

Fig. 1 Distribution of hydro-meteorological stations in Kashi River basin

1.2 数据来源

VIC 模型的构建需要的数据有气象数据、DEM 数据、土壤数据和植被数据,数据主要来源如下所述。

(1) 水文气象数据:收集喀什河流域内的三个实测水文、气象站点及周边气象站 1990 年 - 2000 年逐日的水文与气象资料。其中,乌拉斯台为水文站,尼勒克和伊宁站为气象站,吉林台为遥测站。

(2) DEM 数据:采用全球 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 分辨率的 SRTM 数据(www.cgiar-csi.org),借助 ArcGIS 平台重采样为 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$ 分辨率的网格。

(3) 土壤数据:土壤数据来自 Land Atmosphere Interaction Research Group at Beijing Normal University(<http://globalchange.bnu.edu.cn/home>)所提供的全球及国内 30 秒弧的土壤数据产品。

(4) 植被数据:植被数据来自马里兰大学 1998 年制作的全球 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率的地表覆盖类型数据,该数据共包含 14 类地表覆盖物(<http://glcf.umd.edu/data/landcover/>)。

(5) CFSR 再分析数据:因研究流域内实测站点较少,且主要分布在流域下游。模型的构建缺乏数据的支持,所以需要借助数据拓展源来完成模型的构建。因此,本文以 CFSR 再分析数据为拓展源^[19]进行模型的构建。CFSR 再分析数据(<http://globalweather.tamu.edu/>)的空间分辨率为 $0.312^{\circ} \times 0.312^{\circ}$,时间分辨率为日。CFSR 网格分布见图 1。

2 模型简介

Variable Infiltration Capacity,简称 VIC。该模型是由华盛顿大学、加利福尼亚大学伯克利分校及普林斯顿大学的研究人员基于 SVA TS(soil vegetation atmospheric transfer schemes)的思想构建的

大尺度分布式水文模型。该模型可对水循环过程中的水量平衡进行模拟计算,得到每个网格内的水文要素,如径流、蒸发等,再经汇流模型以得到流域出口的流量过程。该模型不仅能够模拟水循环过程中的水量平衡,还能够进行能量平衡的模拟,在水文模型发展过程中弥补了对能量过程描述的不足。VIC 模型将流域划分为若干个网格,每个网格都遵循能量平衡和水量平衡原理进行水文气象过程的模拟,如网格内可以模拟得到土壤层蒸发、植被散发、侧向热通量、感热通量、长短波辐射、地表径流和基流等。

3 模型的构建

3.1 气象驱动数据的建立

受到气象站点个数及其分布不均匀的限制,本

文需要借助 CFSR 再分析数据进行气象驱动数据的构建。从乌拉斯台与吉林台两个实测站点中选择与 CFSR 再分析数据相关性较好的作为 CFSR 再分析数据的代表站,并以此站点数据为依据,通过 CFSR 网格之间的关系修正 CFSR 再分析数据。

(1) 代表站的选择。

考虑到 CFSR 降水数据与实际情况存在较大的差异,因此需要从实测站点中选择较好的代表站作为依据对其进行修正。利用乌拉斯台和吉林台的月降水数据分别与 CFSR 月降水数据进行相关性分析^[20],可以得到乌拉斯台与 CFSR 的相关性好于吉林台站的,见表 1。在乌拉斯台和 CFSR 月降水数据之间的 21 个相关系数中低于 0.60 的有 3 个,余下的 18 个相关系数均大于 0.70,因此选择乌拉斯台站的降水资料作为 CFSR 降水数据修正的依据。

表 1 各 CFSR 网格与实测站点相关系数(r)表

Tab.1 Correlation coefficient (r) of each CFSR grid with each observation station

CFSR 网格编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
吉林台	0.67	0.67	0.64	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81	0.80	0.77	0.68
乌拉斯台	0.74	0.75	0.72	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.80	0.71
CFSR 网格编号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
吉林台	0.79	0.78	0.77	0.70	0.54	0.32	0.28	0.75	0.73	0.72	
乌拉斯台	0.83	0.82	0.81	0.76	0.59	0.35	0.30	0.77	0.73	0.72	

(2) CFSR 网格的筛选。

尽管研究区内 CFSR 降水数据与实际降水的整体趋势存在一致性,但仍有部分网格较实际情况存在较大差异,因此需要把存在较大差异的网格剔除。本研究以乌拉斯台水文站所在 CFSR 网格数据为依据,建立与其他 CFSR 网格的降水数据的相关关系(表 2),以相关系数大于 0.6 为标准,进行异常 CFSR 网格降水数据的剔除。

表 2 乌拉斯台所在 CFSR 网格的月降水与其他 CFSR 网格月降水相关系数(r)表

Tab.2 Correlation coefficient (r) between the monthly precipitation of U lastay's CFSR grid and other CFSR grids

10	1	2	3	4	5	6	7	8	9
相关系数	0.87	0.82	0.81	0.80	0.70	0.76	0.82	0.89	0.96
10	11	12	13	14	15	19	20	21	
相关系数	0.96	0.66	0.74	0.79	0.77	0.39	0.33	0.32	

注: 10 号网格即乌拉斯台站所在的 CFSR 网格。

(3) 其他气象要素的准备。

通过 CFSR 再分析数据与实测数据的对比, CFSR 再分析数据中的日最高气温、日最低气温及日平均风速与实际情况偏差较小,本研究未对其进行修正,直接应用于模型的构建。

3.2 其它参数文件的构建

(1) 土壤参数。

根据研究需要与实际情况,本文将土壤分为三层,其中上表层为 0.091 m,第二层与第三层均为 2.205 m,并以此对相关土壤参数进行计算。

(2) 植被参数。

模型植被参数由两部分组成:网格植被类型参数和植被参数库。其中网格植被类型参数是基于马里兰大学全球 1 km 的土地覆盖数据构建的,包括了植被类型数目、比例和根系分布。植被参数库包含了所有植被类型的相关参数,如各种植被类型的最小气孔阻力、叶面积指数和短波辐射率等,其中叶面积指数来自 2000 年到 2010 年的多年月平均值。

4 模型检验

本研究以多年径流相对误差 E_r 和效率系数 E_c 为目标函数(公式如下)来评价模型模拟效果。多年平均径流量相对误差反映了总量的精度,相对误差的绝对值越小,模拟精度越好。效率系数反映径流过程模拟效果的好坏,确定性系数越大,过程拟合的

就越好, 模拟的精度也就越高。

$$E_r = (Q_c - Q_o) / Q_o \times 100 \quad (1)$$

$$E_c = 1 - \sum_i (Q_{i,c} - Q_{i,o})^2 / \sum_i (Q_{i,o} - Q_o)^2 \quad (2)$$

式中: Q_c 和 Q_o 分别为模拟和实测的多年平均径流深(mm); $Q_{i,c}$ 和 $Q_{i,o}$ 分别为模拟和实测的径流系列值(mm)。

5 结果及分析

本研究以 1990 年的数据作为模型的预热期; 1991 年- 1996 作为模型的率定期; 1997 年- 2000 作为模型的验证期。从日时间尺度与月时间尺度上分别构建 VIC 模型, 不同时间尺度下径流模拟结果

见图 2, 所率定出的对应水文参数如表 3 所示, 模型在不同时间尺度、不同阶段下的效率系数与多年径流相对误差见表 4。

从月径流模拟过程图 2(a) 可以明显看出, 模拟与实测值的变化趋势具有较好的一致性, 并且径流与降水的峰谷变化趋势较为一致, 模拟径流枯水期较实测径流值偏低, 最大径流出现时间与实测峰值出现时间一致但在量上存在一定的差异, 总体来说模拟效果较为理想。模型率定期效率系数与多年径流相对误差分别为 0.80 和 4.7%, 验证期效率系数和多年径流相对误差分别为 0.84 和 14.5%, 说明月时间尺度下模型模拟效果较好(表 4)。

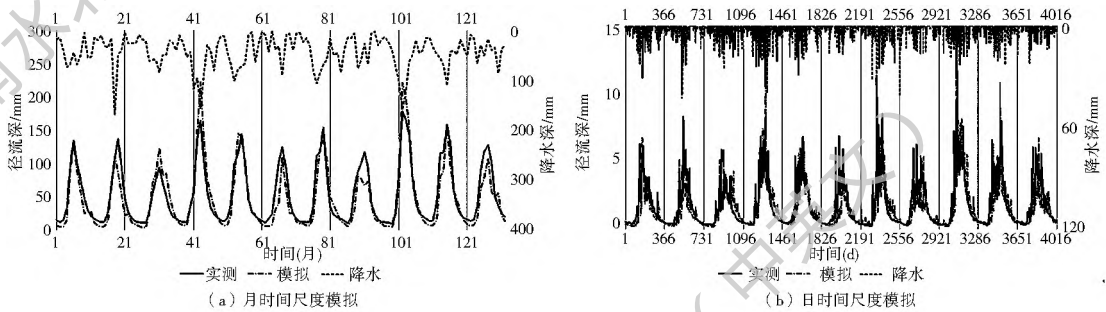


图 2 日尺度与月尺度径流过程模拟图

Fig. 2 Diagram of simulated runoff on daily and monthly scales

表 3 两种时间尺度下率定参数结果

Tab. 3 Parameter results after calibration on daily and monthly scales

参数	月尺度模拟	日尺度模拟
Ds_{max}	14.250	9.375
Ds	0.001	0.010
Ws	0.600	0.500
d_3	1.730	1.600
d_2	0.100	0.100
B	0.400	0.225

表 4 VIC 模型模拟效果

Tab. 4 Simulation effect of VIC model

	率定期		验证期	
	E_c	E_r (%)	E_c	E_r (%)
日尺度	0.64	3.3	0.70	13.1
月尺度	0.80	4.7	0.84	14.5

从日径流模拟过程图 2(b) 可以看出, 模拟与实测值的变化趋势较一致, 并且径流与降水的峰谷变化趋势也一致; 径流低值模拟较好, 高值存在一定的差异, 总体来说模拟效果较好。模型率定期内效率系数和多年径流相对误差分别为 0.64 和 3.3%; 验证期内的效率系数和多年径流相对误差分别为 0.70 和 13.1%, 说明日时间尺度下模型模拟效果较好(表 4)。

总的来看, 两种时间尺度下 VIC 模型均在天山西部山区具有较好的表现, 说明 VIC 模型在天山西部山区具有一定的适用性, 模型在构建过程采用 CFSR 再分析数据作为拓展源是可行的, 且所构建的模型在调试过程中所采用或确定的参数较为合理。但所构建的模型局部时间段内模拟径流值与实测径流值之间存在一定的差异, 究其原因可能存在于以下几个方面:

(1) 由于研究区实测气象数据较少, 以 CFSR 再分析数据为气象数据拓展源, 尽管可以使用, 但还是与实际值存在一定的偏差;

(2) 模型构建过程中对冰川、冻土及融雪因素的考虑不够充分, 参数值的设置依据不够合理。有些参数无法借助实测手段获取, 只能根据其意义在合理的范围内取值, 可能与实际情况存在一定偏差。

6 结论

本文以天山西部山区的喀什河流域为典型研究区, 根据所在区域的实际情况、地理特征、植被情况, 并综合考虑研究区冰川、积雪与冻土因素构建了 VIC 模型, 总体可以看出:

(1) 考虑到研究区的数据资料较为匮乏, 选用 CFSR 再分析数据作为气象数据拓展源是可行的;

通过优选出的乌拉斯台站点作为 CFSR 再分析降水数据的修正依据是可行的;以乌拉斯台水文站所在的 CFSR 网格的降水为标准,与流域内其他网格的 CFSR 降水数据建立相关关系进行异常 CFSR 降水数据的剔除是可行的;

(2) 基于天山西部山区实际的混合产流方式、土壤下垫面和植被覆盖的实际情况,并综合考虑了冰川、积雪与冻土因素构建的 VIC 模型具有一定的适用性,且模型构建过程中所采用的参数较为合理;

(3) 分别以日、月为时间分辨率进行径流模拟,总体来看模拟径流变化趋势与实测径流变化趋势一致。在模型率定期内,月时间尺度下模型效率系数和多年径流相对误差分别为 0.80 和 4.7%,日时间尺度下分别为 0.64 和 3.3%;而在模型验证期内,月时间尺度下模型效率系数和多年径流相对误差分别为 0.84 和 14.5%,日时间尺度下分别为 0.70 和 13.1%。

从模拟的结果来看,尽管 VIC 模型在天山西部山区具有较好的适用性,但模拟径流值与实测径流值之间仍然存在一定的误差,该误差可能来自两个方面:一是 CFSR 再分析数据的代表性不足,并且修正过后的 CFSR 降水与实际降水仍存在一定的偏差;二是模型中有些参数值的设置与实际情况存在一定的偏差。在今后的研究中,如果能找到精度更好地气象数据,并充分考虑研究区的实际情况进而对模型相关参数进行设置,模型模拟精度可能会进一步提高,以期更好地指导所在区域融雪径流模拟研究与洪水预报方面的工作。

参考文献(References):

- [1] 周京武,高鹰,沈永平,等.天山南坡黄水沟与清水河寒区流域极端水文事件对气候变化响应[J].冰川冻土,2014,36(4): 1042-1048. (ZHOU Jingwu, GAO Ying, SHEN Yongping, et al. Response of extreme hydrological events to climate change in cold watersheds of Huangshuigou River and Qingshuihe River on the southern slope of Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 1042-1048. (in Chinese).
- [2] 张利平,杜鸿,夏军,等.气候变化下极端水文事件的研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11): 1370-1379. (ZHANG Liping, DU Hong, XIA Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1370-1379. (in Chinese).
- [3] 杨涛,陆桂华,李会会,等.气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J].水科学进展,2011,22(2): 279-286. (YANG Tao, LU Guihua, LI Huihui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 279-286. (in Chinese).
- [4] 孙桂丽,陈亚宁,李卫红.新疆极端水文事件年际变化对气候变化的响应[J].地理科学,2011,31(11): 1389-1395. (SUN Guili, CHEN Yaning, LI Weihong. Interannual and interdecadal variations of extreme hydrological events and response to climate change in Xinjiang[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(11): 1389-1395. (in Chinese).
- [5] 穆振侠,姜卉芳.高寒山区降水规律及融雪径流模拟[M].北京:中国水利水电出版社,2015: 13-14. (MU Zhenxia, JIANG Huifang. The Precipitation laws and snowmelt runoff simulation in high cold alpine areas[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015: 13-14. (in Chinese).
- [6] 穆振侠.天山西部山区分布式水文模型的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2007. (MU Zhenxia. Research on distributed hydrological model in Western Tianshan Mountains[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2007. (in Chinese).
- [7] 宋倩,穆振侠,姜卉芳. SWAT 模型在天山西部山区的应用[J].水资源与水工程学报,2013,24(6): 46-49. (SONG Qian, MU Zhenxia, JIANG Huifang. Application of SWAT model in western area of Tianshan Mountain[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(6): 46-49. (in Chinese).
- [8] 于宴民,穆振侠. CFSR 数据在高寒山区径流模拟中的适用性[J].灌溉排水学报,2015,34(11): 93-97. (YU Yanmin, MU Zhenxia. Applicability of CFSR data in runoff simulation of cold highland area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(11): 93-97. (in Chinese).
- [9] 于宴民,穆振侠. DEM 分辨率对喀什河流域径流模拟精度的影响[J].水电能源科学,2016,34(3): 19-23. (YU Yanmin, MU Zhenxia. Influence of DEM resolution on runoff simulation accuracy of Kashi River Basin[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(3): 19-23. (in Chinese).
- [10] 怀保娟,李忠勤,孙美平,等. SRM 融雪径流模型在乌鲁木齐河源区的应用研究[J].干旱区地理,2013,36(1): 41-48. (HUI Baajuan, LI Zhongqin, SUN Meiping, et al. Snowmelt runoff model applied in the headwaters region of Urumqi River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 41-48. (in Chinese).
- [11] 何咏琪.基于遥感及 GIS 技术的寒区积雪水文模拟研究[D].兰州:兰州大学,2014. (HE Yongqi. Snow hydrological simulation in alpine areas using remote sensing and GIS technologies[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese).
- [12] 刘家福,李京,李秀霞.中美典型水文模型比较研究[J].自然灾害学报,2014,23(1): 18-23. (LIU Jiafu, LI Jing, LI Xiuxia. Intercomparison of typical hydrological models developed by China and United States[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(1): 18-23. (in Chinese).
- [13] 何思为,南卓铜,张凌,等.用 VIC 模型模拟黑河上游流域水分和能量通量的时空分布[J].冰川冻土,2015,37(1): 211-225. (HE Siwei, NAN Zhuotong, ZHANG Lin, et al. Spatial-temporal distribution of water and energy fluxes in the upper reaches of the Heihe River simulated with VIC model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 211-225. (in Chinese).

- [14] 张磊磊,郝振纯,童凯,等. VIC 模型在三江源地区产汇流模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 18-20. (ZHANG Lei lei, HAO Zher chun, TONG Kai, et al. Application of VIC model to runoff simulation of three source regions[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(1): 18-20. (in Chinese))
- [15] 刘文丰,徐宗学,刘浏,等. 基于 VIC 模型的拉萨河流域分布式水文模拟[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2012, 48(5): 524-529. (LIU Wen feng, XU Zong xue, LIU Liu, et al. Distributed hydrological simulation in the Lhasa River basin based on Vic model[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2012, 49(5): 524-529. (in Chinese))
- [16] Zhao Q D, Ye B S, Ding Y J, et al. Simulation and analysis of river runoff in typical cold regions[J]. Sciences in Cold & Arid Regions, 2011, 03(06): 498-508.
- [17] Qiudong Zhao, Shiqiang Zhang, Yong Jian Ding, et al. Modeling hydrologic response to climate change and shrinking glaciers in the highly glacierized Kunma Like River Catchment, Central Tian Shan [J]. American Meteorological Society, 2015, 16: 2383-2402.
- [18] 王世江. 中国新疆河湖全书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 90-91. (WANG Shi jiang. Chinese rivers and lakes in Xinjiang [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydro-power Publishing House, 2010: 90-91. (in Chinese))
- [19] 胡增运,倪勇勇,邵华,等. CFSR、ERA-Interim 和 MERRA 降水资料在中亚地区的适用性[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 700-708. (HU Zeng yun, NI Yong yong, SHAO Hua, et al. Applicability study of CFSR, ERA-Interim and MERRA precipitation estimates in Central Asia [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 700-708. (in Chinese))
- [20] 金君良. 西部资料稀缺地区的水文模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (JIN Jun liang. Hydrological simulation research in data scarce areas of Western China [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))