

天山北坡中段融雪径流敏感性分析

——以军塘湖流域为例

孟现勇^{1,2,3}, 吉晓楠⁴, 孙志群^{1,2}, 孔祥盛⁵, 刘志辉^{2,6}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610207; 5. 新乡学院 计算机与信息工程学院, 河南 新乡 453003; 6. 干旱生态环境研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 以天山北部中段军塘湖为典型研究区, 利用军塘湖河流域径流和气象数据分析了高山融雪径流与温度、降雨的定量关系。基于天山北坡中段 10 个气象站(乌苏、石河子、沙湾、玛纳斯、呼图壁、昌吉、米泉、小渠子、大西沟、天池)1961—2010 年逐月气温、降水数据等实测数据为基础进行 Mann—Kendall 趋势检验与分析。以模比系数差积曲线在 M—K 检验基础上分析径流、温度与降水之间的趋势关系。以 SWAT 模型为框架建立新疆军塘湖河流域水文过程模型, 利用红山水库 12 a 径流数据在 SWAT 模型参数校准后对新疆天山北坡融雪径流过程进行敏感性分析预测。通过改变 SWAT 模型输入数据的平均温度、降水量等因素分析了其对融雪径流的敏感性及其影响。结果发现, 从冬季至初春温度及降水等因素变化仅在融雪期对径流产生较大影响。此外, 温度数据的变化对军塘湖天山北坡流域融雪径流的影响较降水量大。

关键词: 融雪过程; 气候变化; 天山北坡; SWAT

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0277-06

中图分类号: P333.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.055

Sensitive Analysis of Snowmelt Runoff on North Slope of Tianshan Mountains

—Taking Juntanghu Watershed as an Example

MENG Xian-yong^{1,2,3}, JI Xiao-nan⁴, SUN Zhi-qun^{1,2}, KONG Xiang-sheng⁵, LIU Zhi-hui^{2,6}

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology of the Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 4. Sichuan University, College of Architecture and Environment, Chengdu, Sichuan 610207, China; 5. Department of Computer Engineering, Xinxiang University, Xinxiang, Henan 453000, China; 6. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: The relationship between mountainous snowmelt runoff and temperature and rainfall was analyzed by using surface flow and climate data from the Juntanghu watershed, a typical study area for the central area of the northern Tianshan Mountains. Monthly temperature and precipitation data(1961—2010) observed from ten meteorological stations in the central area, including Wusu, Shihezi, Shawan, Manasi, Hutubi, Changji, Miquan, Xiaoquzi, Daxigou and Tianchi, were used for the Mann—Kendall trend analysis. The coefficient difference product curve was selected to analyze the relationship among temperature, runoff and precipitation. Hydrological modeling was conducted by using the soil and water assessment tool(SWAT). The parameters were calibrated by using the surface flow data(12 years) from the Hongshan Reservoir to predict the snowmelt runoff process of the Northern Tian Muontains in Xinjiang Wei Autonomous Region. Through changing the factors, such as average temperature and precipitation, results from sensitivity analysis demonstrated that snowmelt runoff was mainly affected by temperature and precipitation in snowmelt season. Moreover, from winter to spring, the effects of changing temperature were greater than those of precipitation

收稿日期:2013-04-01

修回日期:2013-06-25

资助项目:水利部公益性行业科研专项经费项目“内陆干旱区实施最严格水资源管理关键技术”(201301103); 国家自然科学基金项目(70361001); 绿洲生态教育部重点实验室开放课题“中亚地区水分变化及对新疆降水的影响”(XJDX0201-2013-07); 国家自然科学基金项目(40871023)

作者简介:孟现勇(1987—),男(汉族),宁夏回族自治区银川市人,博士研究生,研究方向为大气数据同化与陆面过程模拟、3S 集成与系统开发等。E-mail:mx0001@gmail.com。

通信作者:刘志辉(1957—),男(汉族),新疆维吾尔自治区石河子市人,博士,教授,主要从事水文水资源及“3S”技术应用等工作。E-mail:lzh@xju.edu.cn。

on snowmelt runoff in the study area. This research leads to some potential contributions in understanding the mechanisms of snowmelt runoff in the warming central area of the Northern Tianshan Mountains.

Keywords: snowmelt process; climate change; northern slope of Tianshan Mountains; SWAT

新疆维吾尔自治区位于欧亚大陆腹地,远离大洋,东至太平洋约 3 400 km,南距印度洋约 2 200 km,西到大西洋约 6 900 km,北至北冰洋约 3 400 km^[1]。降水稀少且时空分布不均,沙漠广布,其特殊的地理位置和水文分布特点及气候的条件决定了融雪过程的复杂性。中亚天山带是全球水循环变化和气候变化的热点区域。根据观测资料表明,到 21 世纪全球平均增温约 1.1~6.4 °C^[2],而 1990—1999 年是近 1 000 a 来北半球平均气温最高的 10 a,其中 1998 年最热^[3]。中国西部环境随着全球气候变暖必然会受到影响,引发水资源在时空上的水资源空间和数量的重新变化与分布,从而对人类社会环境也起到一定的影响作用。国内许多学者^[4-8]针对气候变化下的径流特征也做过相关研究,并提出综合治理对策^[9-10]。由于高纬度、高海拔地区在气候变化影响下的水文循环变化过程较为明显,因此,针对高海拔地区水文循环与气候变化的研究尤其重要。

新疆融雪型洪水频次在全球变暖的影响下有增加的趋势。近几十年来,在玛纳斯、呼图壁、塔城、乌苏等地均发生了严重的春季混合型融雪洪水灾害,造成该地区房屋倒塌、交通阻断、群众伤亡等巨大损失^[11-12]。研究全球气候变化条件下的天山北坡山区春季融雪径流敏感性变化不仅可以合理开发水资源,还可以有效地预防自然灾害。由于天山北坡地区为高寒山区,积雪对气候的变化响应十分敏感。此外,由于地形较为复杂,每个高程带的太阳辐射亦不相同,加之重冻结现象的发生,导致高山融雪径流不确定性大大增加。

本文以天山北坡中段为气候大背景,将军塘湖流域作为典型研究区,利用天山北坡 10 个站点近 1961—2010 年的月平均温度、降水量数据分析天山北坡中部地区气象与径流过去 50 a 突变点及趋势变化。此外,结合水和土壤评估模型(SWAT)模型对天山北坡军塘湖流域融雪径流进行融雪径流敏感性分析,此外,在不同气候场景分析其对高山融雪径流的影响与相互作用。

1 研究区概况

军塘湖河,又称为图古里克河,是天山西段新疆呼图壁县境内的一条小河,发源自天山北坡特斯盖南缘三道马场以西的特力斯喀达板,支流呈线状分布,分东沟、西沟两条,这两条支流在低山带的纳扎尔

汇集后在出山口处被红山水库拦蓄,出库后流经呼图壁县西部的前山丘陵后进入平原。全流域除源头高程在 3 400 m,大多高程在 1 000~1 500 m。军塘湖位于塔西河与呼图壁河的中低山带,山势平缓,土质类型有栗钙土、棕钙土、灌溉棕钙土和灰钙土等,植被以苔草狐草、铁杆蒿、琵琶柴、梭梭等为主。军塘湖河从源头至红山水库河长约 60 km,红山水库以上集水面积约 861 km²,流域总面积约 1 218 km²,流域平均高程约 1 503 m,东西两大支渠汇集口以上河道纵坡为 62.5%,汇管口以下至红山水库河道纵坡为 52.6‰,多年平均径流量 3.27×10^6 m³,经水库调节后被下游灌区所利用。军塘湖河具有明显的干旱区河流水文特征,并可分为径流形成区和径流散失区,两区的分界线在河流出山口附近。

研究区地处北半球中纬度区域,受北冰洋冷空气和温带天气系统影响,夏季酷热,冬季寒冷,降水量小,气候干燥,昼夜温差大。河川径流的主要补给是流域降水,军塘湖河上游分布有冰川,而冰川、融雪水常年补给河道径流。此外,在春季融雪期间,冰雪融水对地表径流贡献也不容忽视。

2 数据来源

本研究土壤数据来源于世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD),经过 ArcGIS 软件重分类,其精度可达 30 m。土地利用/覆被数据采用 IGBP 分类系统 2000 年中国土地覆盖数据,由国家自然科学基金委员会环境与生态科学数据中心提供。经过重采样处理,空间分辨率为 30 m。DEM 数据采用 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 第 1 版本(V1),以上所有数据均统一为 WGS_1984_UTM_Zone_45N 投影。气象数据来自新疆气象局,主要包括研究区温度、辐射、降水、风速等。此外,径流数据由新疆呼图壁县红山水库提供。

3 研究方法

3.1 Mann-Kendall 检验法

根据天山北坡 10 个站点(乌苏、石河子、沙湾、玛纳斯、呼图壁、昌吉、米泉、小渠子、大西沟、天池)50 a (1961—2010 年)月平均温度和降水量作为分析资料,采用非参数 Mann-Kendall(M-K)检验法检验天山北坡中段年平均温度及降水的趋势及突变情况。由于 Mann-Kendall 检验法适用于非正态分布的数

据(如气象数据、水文数据等),计算方法简易^[13-14],很多学者利用 Mann—Kendall 检验法分析径流、气温、降水等要素时间序列的趋势变化。

3.2 Mann—Kendall 趋势检验结果及分析

3.2.1 天山北坡年际温度特征分析 根据 Mann—Kendall 分析结果(图 1),天山北坡中段地区年平均温度自 1961—2010 年通过了 0.001 的显著水平检验,增长率达到 0.39 °C/10 a,突变点发生在 1995 年且通过了 0.01 显著水平检验。天山北坡平均温度的增长和中国西北部地区平均温度保持同步 0.34 °C/10 a。但该温度略微高于全球温度平均值 0.14 °C/

10 a。在高山和绿洲地形中,绿洲的温度上升率最高,可达 0.42 °C/10 a,而山地是最低的,达 0.21 °C/10 a,这可能是因为在高山积雪、冰川的影响及高山生态系统的缓冲作用。从四季角度分析,温度在夏季变化率最大,在春季变化率最小。变差系数(C_v)值是统计学中常用的分析参数,主要用来分析水文及其特征的年纪变化情况。分析表明,天山北坡整体温度是稳定的, C_v 值为 0.168。温度变差系数在每个季节并不高,范围从 0.073~0.246。温度变差系数在夏季较小,表现出微弱的变化而在秋季则最大表现出了稳定的变化。

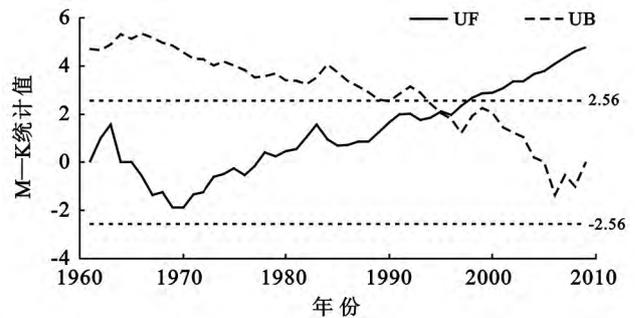
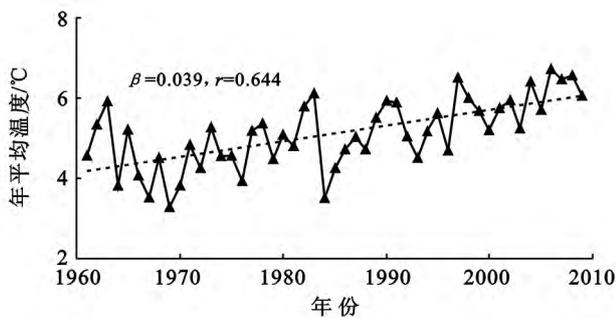


图 1 天山北坡中段地区 1961—2010 年均温度 Mann—Kendall 趋势及突变点检验

3.2.2 天山北坡年际降水特征分析 根据 M—K 分析结果(图 2),在过去 50 a 中,天山北坡中段年均降水增长率为 14.18 mm/10 a,突变点出现在 1991 年,并通过了 0.05 的显著水平检验。降水增长率在山区最大,可达 21.10 mm/10 a,在绿洲地区则为最小增长率,只有 12.17 mm/10 a。从四季角度看,降水增长率在冬季

最大、秋季最小。降水变差系数(C_v)是指年降水量的距平数与多年平均降水量之比的百分数,用以表征某一地区降水的年际变化程度,天山北坡总体降水变化趋于稳定,降水变差系数为 0.178,降水变差系数在每个季节并不高,范围从 0.221~0.443,亦属稳定变化。此外,降水变差系数在夏季最小在冬季最大。

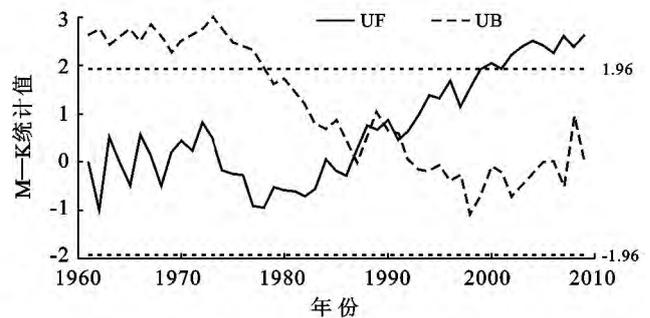
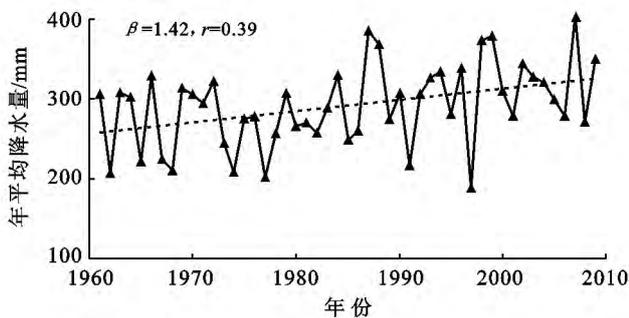


图 2 天山北坡中段地区 1961—2010 年年均降水量 Mann—Kendall 趋势及突变点检验

以上得出的结论为,气温在 1961—2010 年呈明显上升趋势,降水亦呈现较大增加趋势。

3.3 基于差积曲线的天山北坡中段地区气象水文要素的变化趋势分析

通过对天山北坡近 10 个站点的 1986—2010 年月均降水量、气温及红山水库年径流量等要素使用模比差积曲线进行分析,结果见图 3。从图 3 中可以发现:1986—2010 年气温、降水和径流大体分别呈现 5、

2 及 3 个变化阶段,降水与径流具有较好的同步性,1986—1988 年降水和径流呈现出明显增加趋势,而从 1989—1997 年降水和径流出现明显波动减少的趋势,降水在 1998—2010 年波动上升,而径流则在 1997—2003 年缓慢上升并经历震荡后,在 2010 年突然上升。1986—1996 年温度呈现波动降低并在 1996 年到达温度最低点,这与天山北坡中段地区 1961—2010 年年均温度 Mann—Kendall 突变点检验结果一

致。从 1996—2010 年, 温度呈现出快速上升趋势。1986—1996 年平均气温为 5.296, 低于 1997—2010 年平均温度的 6.196, 增幅为 17%。由于模比系数差积曲线分析周期(1986—2010 年)略小于 Mann—Kendall 趋势及突变点检验周期(1961—2010 年), 可能检验结果并不明显, 但可发现 M—K 检验中, 年均温度突变点发生在 1995 年, 而模比差积曲线显示在 1996 年温度发生了突变。于此相同的是, M—K 检验中年均降水量过去 50 a 的突变点发生在 1991 年, 而模比差积曲线显示在 1991 年温度趋势相对与 1990 年迅速下降。从图 3 中可以发现, 尽管径流和降水具有较好的一致性, 但径流往往具有滞后性, 气候变化在一定程度上可影响降水并间接影响径流量。

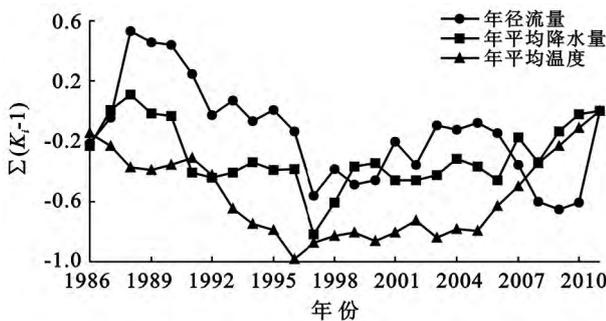


图 3 天山北坡中段地区年均降水量、气温及径流量模比系数差积曲线分析

4 流域水文模型

半个多世纪以来, 流域水文模型已经得到了越来越广泛的应用, 其在水文学中扮演的角色也越来越广泛。流域水文模型通常分为 3 类: 系统理论模型、概念模型、物理模型^[15-17]。前两者一般可称为集总模型, 而物理模型都是分布式模型。此外还有介于其之间的半分布式水文模型。如 SWAT, TOPMODEL 等。由于 SWAT 模型在国内研究趋于成熟且对于大尺度流域预测精准等特性^[18-19], 本研究拟采用 SWAT 模型作为本研究后续工作。

4.1 水和土壤评估模型(SWAT)

SWAT 模型是美国农业部(USDA)农业研究中心(agricultural research services, ARS), Jeff Amond 开发的流域尺度模型。该模型是目前国内外应用较多的半分部式流域模型。该模型可模拟没有观测数据的流域(如高寒山区)。此外, 该模型具有较高的计算效率, 可对流域进行长期连续性模拟。

全球气候变化对水资源供给的影响是一个重要研究领域, SWAT 模型通过 Manipulating 模型所读取的气候输入变量(降水、温度、太阳辐射、风速、相对

湿度、潜在蒸散发及天气发生器参数等)模拟气候变化。各个子流域气象场要素调整可通过下式实现:

$$R_{\text{day}}' = R_{\text{day}} \left(1 + \frac{\text{adj}_{\text{pcp}}}{100}\right) \quad (1)$$

式中: R_{day}' ——某天子流域的降水累积变化量(mm); R_{day} ——某天子流域的降水量(mm); adj_{pcp} ——降水量的变化率(%)。

$$\bar{T}_{\text{av}}' = \bar{T}_{\text{av}} + \text{adj}_{\text{tmp}} \quad (2)$$

式中: \bar{T}_{av}' ——日平均气温累积变化量(°C); \bar{T}_{av} ——日平均气温(°C); adj_{tmp} ——温度变化量(°C)。

4.1.1 SWAT 水文陆地循环阶段 SWAT 水文循环基于水量平衡方程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (3)$$

式中: SW_t ——土壤最终含水量(mm); SW_0 ——第 i 天的土壤初始含水量(mm); t ——模拟时间(d); R_{day} ——第 i 天的降水量(mm); Q_{surf} ——第 i 天的地表径流量(mm); E_a ——第 i 天的蒸发量(mm); W_{seep} ——第 i 天从土壤剖面进入包气带的水量(mm); Q_{gw} ——第 i 天回归流的水量(mm)。

4.1.2 积雪覆盖 SWAT 根据日均温度将降水划分为降雨、冻雨与冻雪。临界温度 T_{s-r} 根据研究区实际情况确定, 是划分降雨与降雪的依据。如果日均气温低于临界温度, 则 HEU 内为降雪, 雪水当量加在积雪上。积雪质量守恒方程为:

$$SNO = SNO_0 + R_{\text{day}} - E_{\text{sub}} - SNO_{\text{melt}} \quad (4)$$

式中: SNO ——某天积雪含水量; SNO_0 ——某天前一天积雪含水量; R_{day} ——第 i 天的降水量(mm, 仅当 $T_{\text{av}}' \leq T_{s-r}$ 时计算此项); E_{sub} ——某天积雪的升华量(mm); SNO_{melt} ——某天的融雪量(mm)。积雪量用覆盖在整个 HRU(水文响应单元)区域上的深度表示。

由于影响积雪范围变化的因子每年均相似, 可将特定时段子流域积雪面积与现存积雪建立关系, 并用面积消退曲线表示, 即用子流域中现存积雪表示季节性增长和消退^[20]。

面积消退曲线基于自然对数, 方程如下:

$$SNO_{\text{cov}} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \cdot \left[\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp(\text{cov}_1 - \text{cov}_2 \cdot \frac{SNO}{SNO_{100}}) \right]^{-1} \quad (5)$$

式中: SNO_{cov} ——积雪覆盖面积占 HRU 面积的分数; SNO ——某天积雪含水量(mm); SNO_{100} ——积雪 100% 覆盖区域时的雪深温度(mm); cov_1 , cov_2 ——定义曲线形状的系数。

4.1.3 融雪过程 SWAT 模型融雪模块认为融雪

量取决于积雪温度、空气温度、融雪速率及融雪面积。假设积雪温度为前期日均空气温度的函数,变化参照气温的阻尼函数变化。

积雪温度计算方程如下:

$$T_{\text{snow}(d_n)} = T_{\text{snow}(d_{n-1})} \cdot (1 - \ell_{\text{sno}}) + \bar{T}_{\text{av}} \cdot \ell_{\text{sno}} \quad (6)$$

式中: $T_{\text{snow}(d_n)}$ ——某天的积雪温度($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{snow}(d_{n-1})}$ ——前一天的积雪温度($^{\circ}\text{C}$); ℓ_{sno} ——积雪温度滞后因子; \bar{T}_{av} ——当天平均气温($^{\circ}\text{C}$),随着其值接近 1.0,平均气温对积雪温度的影响越来越大,但前一天积雪温度的影响越来越小。

SWAT 通过线性函数计算融雪量,即融雪量是积雪温度和最高气温的均值与积雪基温或阈值温度之差线性函数:

$$\text{SNO}_{\text{milt}} = B_{\text{milt}} \cdot \text{SNO}_{\text{cov}} \left[\frac{T_{\text{SNOW}} + T_{\text{MX}}}{2} - T_{\text{milt}} \right] \quad (7)$$

式中: SNO_{milt} ——模拟日的融雪量(mm); B_{milt} ——模拟日的融雪因子($\text{mm}/(\text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$); SNO_{cov} ——积雪覆盖 HRU 的分数; T_{SNOW} ——模拟日的雪盖温度($^{\circ}\text{C}$); T_{MX} ——模拟日的最高气温($^{\circ}\text{C}$); T_{milt} ——融雪温度阈值($^{\circ}\text{C}$)。

融雪因子由于存在季节性变化,冬至和夏至分别达到最小值和最大值:

$$b_{\text{milt}} = \frac{b_{\text{max}} - b_{\text{min}}}{2} \cdot \sin\left(\frac{n-81}{58.09}\right) + \frac{b_{\text{max}} + b_{\text{min}}}{2} \quad (8)$$

式中: b_{milt} ——模拟日融雪因子 [$\text{mm}/(\text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$]; b_{max} ——6月21日融雪因子 [$\text{mm}/(\text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$]; b_{min} ——12月21日融雪因子 [$\text{mm}/(\text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$]; n ——模拟日在 1 a 中的天数。

4.2 SWAT 模拟及分析

在本次研究中,天山北坡军塘湖流域被划分为 33 个子流域,SWAT 模型以军塘湖流域红山水库径流量为参照,利用 2000—2010 年径流数据作为模型校准与验证,其中 2000 年 1 月 1 日至 2004 年 12 月 31 日为模型的校准期,2006 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日为模型的验证期。

在模型的校准期,SWAT 模型 Nash—Sutcliffe 效率系数(NSE)为 0.65,确定性系数(R^2)为 0.70,在模型的验证期,SWAT 模型的(NSE)为效率系数为 0.61,确定性系数(R^2)为 0.75。说明模型已经达到了模拟的精度要求。图 4 为 2000 年春季洪峰期间模拟及实测情况。

由于天山北坡军塘湖流域径流高峰期一般在春季融雪期(每年 2 月 20 日—3 月 20 日),因此从模拟结果中抽取该时段作为研究分析时期,由于空气温度和降水作为融雪最重要影响因子,可将不同温度和降水场景下的径流变化加以预测及分析。

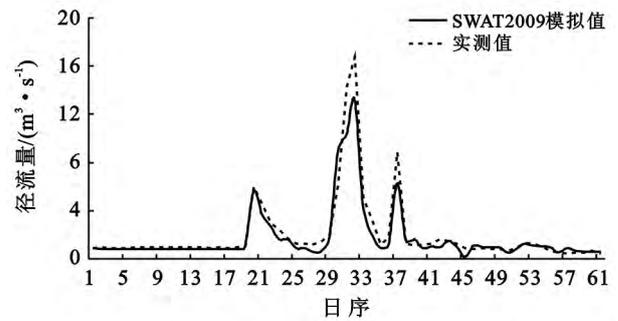


图 4 军塘湖流域 2000 年春季洪峰期模拟与观测值对比

4.3 不同场景下融雪径流变化趋势分析

由于气候变化变量主要包括空气温度、降水量及积雪覆盖。从图 1 可发现年均温度在 1996 年呈现出明显的持续上升趋势,自此将 SWAT 模型空气温度数据分别升高 1 及 3 $^{\circ}\text{C}$,由于降水相对于空气具有更大的不确定性,在此将降水数据分别设置为(降水 + 10%,降水 - 10%)。

4.3.1 温度变化场景下融雪径流的变化 为了验证温度对融雪径流的变化,原始数据分别增加了 1 及 3 $^{\circ}\text{C}$,在保证其他气象场数据不变的情况下,利用 SWAT 2009 对融雪径流进行模拟(图 5)。

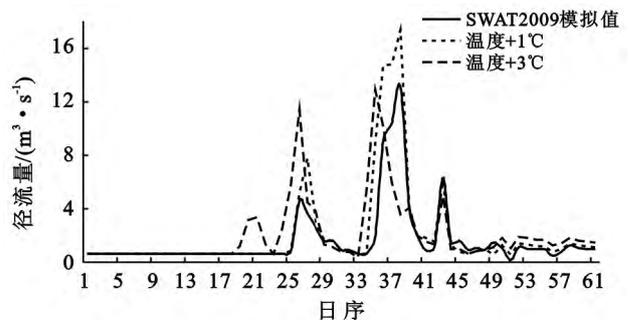


图 5 不同温度情景变化下的融雪模拟状况

如图 5 所示,当日均空气温度升高的情况下,融雪径流在融雪期间会发生较大的变化,而在其余时段并无变化,可见温度升高导致融雪过程增强,融雪径流量增大。在 27 d,当温度升高 1 $^{\circ}\text{C}$ 的情况下,融雪径流量由原来的 3.62 m^3/s 增加至升温后的 7.78 m^3/s 。此外在第 34 d 出现了融雪径流提前的现象,并在第 38 d 达到最高洪峰 17.37 m^3/s ,比未升温前增加了 4.27 m^3/s 径流量。当温度升高 3 $^{\circ}\text{C}$ 的情况下,融雪现象会大大提前,由原来的 25 d 提前到 18 d;且在 26 d 洪峰量为 12.393 m^3/s ,大大超过原温度情况下的 6.148 m^3/s ,后期在第 33 d 亦发生提前现象,在 35 d 提前到达洪峰,但并未超过原温度模拟的第二次洪峰值,可以考虑为早期雪盖已经融化完的原因。此外可以发现,在非融雪期间,不同温度场

景下融雪过程差异较小。

4.3.2 降水变化下融雪径流的变化 由于降水的不稳定性,将降水的值分别增加 10%,减少 10%,在保持空气温度等参数不变的情况下,并在保证其他气象场数据不变的情况下,利用 SWAT 2009 对融雪径流进行模拟。从图 6 可以发现,降水量的增加或减小并未对融雪径流产生太大的影响,降水量的减小影响了模型在第 35 d 对径流的模拟,由观测值的 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 低估为模拟值 $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$ 。降水的增加在 26 日对融雪径流产生了高估影响,由原来的 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $10.2 \text{ m}^3/\text{s}$,第 46—61 d 也具有类似表现(如图 6 所示)。

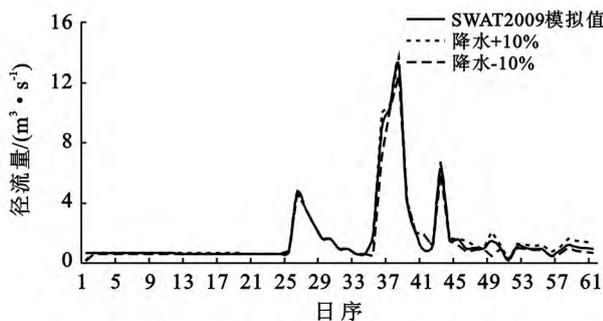


图 6 不同降水情景变化下的融雪模拟状况

5 结论

以天山北坡中段地区为气候大背景,分析其气候在过去 50 a 的变化,通过 Mann—Kendall 趋势检验和突变点检验发现,天山北坡中段在 1961—2010 年持续升温,突变点发生在 1995 年,而降水量在过去 50 a 里亦有增长趋势,突变点出现在 1991 年。利用模比差积曲线分析了天山北坡 10 个站点近期(1986—2010 年)年均降水量、年均气温及红山水库年净流量等要素关系其在近 25 a 中(1986—2010 年)的变化趋势;并利用模比差积曲线方法对之前的 Mann—Kendall 方法进行验证。分析结果发现, Mann—Kendall 温度突变点与模比差积曲线检验结果相一致。尽管径流和降水具有较好的一致性,但径流往往具有滞后性;通过校准后的 SWAT 模型在不同温度及降水量场景下对融雪径流进行模拟,结果发现,温度变化对于融雪的影响较降水对融雪径流的影响大。由于军塘湖流域位于天山北坡中段典型地区,因此,以上场景分析可近似适用于整个天山北坡中段中山带地区。在全球气候变化前提下,天山北坡中段融雪的变化将会随温度的变化而发生巨大改变。由于积雪融化过程中,洪水发生与否与季节性冻土、雪盖持水量、下垫面(如坡面、坡向、流域面积)有密切的关系,在未来研究中将会深入研究积雪—冻土演变过

程中,不同坡面、坡向、流域面积,不同温度、降水及融雪径流之间的相关关系。

[参 考 文 献]

- [1] 许崇海,徐影,罗勇. 新疆地区 21 世纪气候变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(3): 1-7.
- [2] 孟庆伟,刘继朝,苗长军,等. 豫北平原地下水与地表水联合调度初探[J]. 地下水, 2004, 26(4): 232-235.
- [3] 袁玉江,穆桂金. 新疆天山山区近 40 年春季气候变化特征与平原区的比较[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 35-40.
- [4] 孟现勇,刘志辉. 基于栅格尺度的沙漠化预警模型研究: 以塔里木河下游中段区域为例[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 24-32.
- [5] 时兴合,秦宁生,汪青春,等. 黄河上游径流变化特征及其影响因素初步分析[J]. 中国沙漠, 2007(4): 690-697.
- [6] 蓝永超,丁永建,刘进琪,等. 全球气候变暖情景下黑河山区流域水资源的变化[J]. 中国沙漠, 2005(6): 71-76.
- [7] 孟现勇,刘志辉. 塔里木河流域沙漠化监测预警系统设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(5): 159-162, 171.
- [8] 韩海涛,祝小妮. 气候变化与人类活动对玛曲地区生态环境的影响[J]. 中国沙漠, 2007(4): 608-613.
- [9] 钱鞠,王根绪,马金珠. 黄河上游玛曲县生态环境问题与综合治理对策[J]. 生态学杂志, 2002(3): 69-72.
- [10] 李瑜琴,赵景波. 过度放牧对生态环境的影响与控制对策[J]. 中国沙漠, 2005(3): 404-408.
- [11] 吴素芬,张国威. 新疆河流洪水与洪灾的变化趋势[J]. 冰川冻土, 2003(2): 199-203.
- [12] 仇家琪,颜新. 天山北坡中段春季融雪洪水及其灾害成因研究[J]. 干旱区地理, 1994(3): 35-42.
- [13] Sheng Yue, Pilon P, Cavadiasb G. Power of the Mann—Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1/4): 254-271.
- [14] 康淑媛,张勃,柳景峰,等. 基于 Mann—Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 501-508.
- [15] 石教智,陈晓宏. 流域水文模型研究进展[J]. 水文, 2006, 26(1): 18-23.
- [16] 孙志群,刘志辉,孟现勇. 基于 MODIS 的亚像元雪表面温度反演方法研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 166-170.
- [17] 孟现勇,刘志辉,乔鹏,等. 基于栅格尺度的双层融雪径流模型研究及应用[J]. 水文, 2013, 33(4): 10-15, 31.
- [18] 孟现勇,吉晓楠,刘志辉,等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源报, 2014, 29(3): 528-539.
- [19] 唐芳芳,徐宗学,左德鹏. 黄河上游流域气候变化对径流的影响[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1079-1088.
- [20] Eric A Anderson. A point of energy and mass balance model of a snow cover[R]. NOAA Technical Report NOAA Technical Report—NWS, 1976, 19: 138-144.