

中亚阿姆河上游产流过程特征研究

王晓蕾^{1,2}, 孙林¹, 张宜清^{1,2}, 罗毅¹

(1. 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 阿姆河是中亚最大的一条河流, 其径流主要来源于西天山和帕米尔高原的积雪、冰川融水, 由于地处高山区, 数据获取困难, 对其产流的具体组成与季节分布特征认识不足。本文利用分布式水文模型模拟阿姆河1951-2005年的产流过程, 分析雪、冰融水年内分布和年际变化特征以及气候变化的影响。结果表明: ① 阿姆河产流区融雪集中在3-7月, 冰川产流在6-9月, 雨、雪、冰产流比例分别为18%、67%和15%, 雪、冰融水产流超过80%; ② 阿姆河总产流集中在4-9月, 占年产流量的83%, 地表流、基流和侧向流分别占径流量的38%、46%和16%; ③ Mann-Kendall非参数检验($\alpha=0.05$)显示, 1951-2005年间, 阿姆河产流区降水呈显著减少趋势, 气温呈显著升高趋势, 雨、雪、冰产流量与总产流量均呈减小趋势, 特别是在1995年之后, 由于气温的持续上升和降水急剧下降, 产流量减少幅度加大, 1996-2005年与1951-1995年相比, 雨、雪、冰产流分别减少35%、20%和4%, 总产流减少了21%。

关键词: 分布式水文模型; 阿姆河; 融雪产流; 融冰产流

1 引言

阿姆河是中亚最大的河流, 是塔吉克斯坦、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦的重要水资源, 也是咸海最主要水源(Nezlin et al, 2004)。它发源于中亚天山西段和帕米尔高原西部, 是世界上山区产流比例最高的河流之一(Viviroli et al, 2004), 径流量主要来自积雪和冰川融水, 属于积雪—冰川补给型河流(Froebrich et al, 2004; Conrad et al, 2007)。研究阿姆河流域上游径流构成及其雪冰产流过程特征, 将有助于认识阿姆河及同类型河流径流过程变化规律, 也能为流域水资源的开发利用提供参考。

阿姆河流域产流区实地考察困难, 数据稀缺, 对其水循环研究局限于一些比较简单的研究方法, 如实测径流过程的时间序列分析(Savitskiy et al, 2008), 或针对个别支流利用概念性水文模型预估未来气候变化对径流的影响(Hagg et al, 2013; Kure et al, 2013), 对于降雨、冰川、融雪产流过程尚缺乏系统、深入的研究。

本文采用具有降雨、融雪、融冰产流(概称为“三元”产流)过程模拟能力的分布式水文模型, 模拟研究“三元”产流, 特别是积雪、冰川融水产流的过程特征, 尝试更深入地认识雪冰流域径流水资源形成与变化机理, 研究方法和取得的认识对类似高寒山区雪冰流域的研究亦有参考意义。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

阿姆河产流区位于 $34^{\circ}30' \sim 43^{\circ}45'N$ 、 $58^{\circ}15' \sim 75^{\circ}07'E$ 之间, 其东南部为高海拔山区, 海拔高程800~6100 m, 平均3600 m(图1)。阿姆河由喷赤河、瓦赫什河、卡菲尔尼甘河、苏尔汉河和昆杜兹河五条支流组成。其中, 喷赤河是最大支流, 全长921 km(Nezlin et al, 2004); 瓦赫什河位居第二, 河长524 km。喷赤河、瓦赫什河汇流形成阿姆河。卡菲尔尼甘河、苏尔汉河和昆杜兹河分别从右岸和左岸注入阿姆河, 径流量约占阿姆河总径流量的15%(Agal'tse-

收稿日期: 2014-04; 修订日期: 2014-12。

基金项目: 国家国际科技合作计划项目(2010DFA92720); 国家自然科学基金重点项目(41130641)。

作者简介: 王晓蕾(1986-), 女, 山东滨州人, 博士生, 主要从事流域水文模拟研究, E-mail: wangxiaolei232@163.com。

通讯作者: 罗毅(1966-), 男, 河南罗山人, 研究员, 主要从事流域水文学与水文模型研究, E-mail: luoyi@igsnr.ac.cn。

引用格式: 王晓蕾, 孙林, 张宜清, 等. 2015. 中亚阿姆河上游产流过程特征研究[J]. 地理科学进展, 34(3): 364-372. [Wang X L, Sun L, Zhang Y Q, et al. 2015. Runoff generation in the headwater of Amu Darya, Central Asia[J]. Progress in Geography, 34(3): 364-372.]. DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.03.011

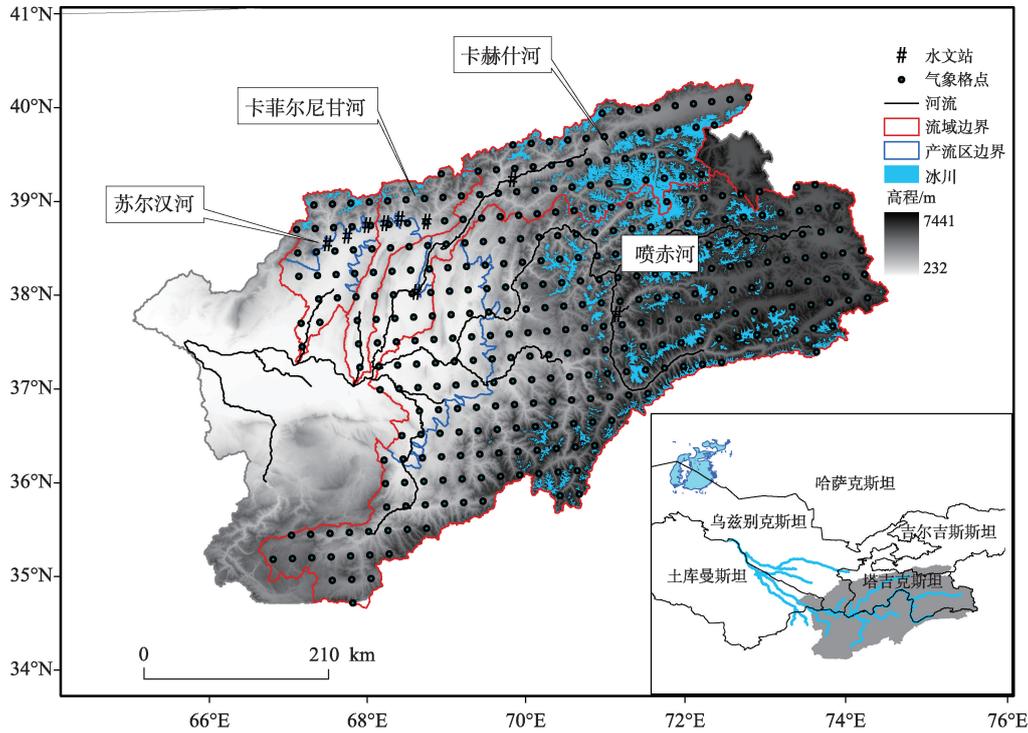


图1 阿姆河产流区位置示意图

Fig.1 Headwaters of the Amu Darya River, Central Asia

va et al, 2011)。

阿姆河产流区属于大陆性气候,夏季(6-8月)酷热干燥,冬季(12-次年2月)寒冷多雪。7月平均气温可高达26~30℃,1月气温可低至-30℃以下。多年平均降水量500mm左右,季节分布不均,冬、春两季(12-次年5月)降水丰富,占年降水比例77%,夏秋(6-11月)降水占比23%。冬春降水以降雪为主,春末至秋初积雪、冰川融水产流对河川径流有重要贡献(Rakhmatullaev et al, 2010)。

2.2 SWAT-RSG 模型简介

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是一个基于物理过程的分布式水文模型(Arnold et al, 1996),在不同气候、流域类型、土壤、土地覆盖、农业管理措施条件下的水循环研究中有广泛应用(Gassman et al, 2007; Arnold et al, 2012)。SWAT模型具有降雨产流和积雪—融雪产流的模拟能力,但不具备冰川水文过程模拟能力。Luo等(2013)结合冰川水文学的理论方法和SWAT模型的特点,提出了一套分布式冰川水文过程模拟方法,并融入SWAT2005代码中,解决了利用SWAT模型模拟雨、雪、冰产流的方法问题。该方法将单条冰川视为独立的水文响应单元,将冰川水文响应单元划分为连续的高程带,在带内计算冰川积累与消融,根

据整体冰川的年物质平衡变化计算冰川体积变化,根据冰川体积变化计算冰川面积变化,冰川面积与冰川物质平衡耦合。冰川水文单元的动态过程如图2所示,详细计算方法可参考有关文献(Luo et al, 2013)。同时,Luo(2012)还提出了一个线性“双库”组合的方法模拟含水层出流,解决了SWAT2005采用线性“单库”模拟含水层出流效果不佳的问题。因此,本文采用在SWAT2005代码基础上进行了上述两项改进的模型,为便于区别,记为SWAT-RSG(Rain, Snow and Glacier)模型。

在本模型中,从形式上看,产流由地表流、地下水流和侧向流三部分构成。从来源上,产流由降雨、积雪融水和冰川融水产流三部分形成,降雨产流(Qrain)是指流域内冰面以外的降雨扣除植物截留、填洼、入渗和蒸发后形成地表径流的部分。融雪产流(Qsmlt)是冰面以外的积雪融水到达地面扣除地面蒸发、填洼后的部分,由于入渗,融雪产流并非与融雪同时开始,在时间上要推迟一些(芮孝芳, 2004),且融雪产流量小于融雪产水量。关于冰川融水量的计算方法较多,常用的是将冰、冰上雪的融水量总计为冰川融水;冰川融水的一部分会再冻结,冰面降雨部分会冻结成冰,部分在冰表形成径流;冰川融水和冰面降水到达冰川末端出口的部

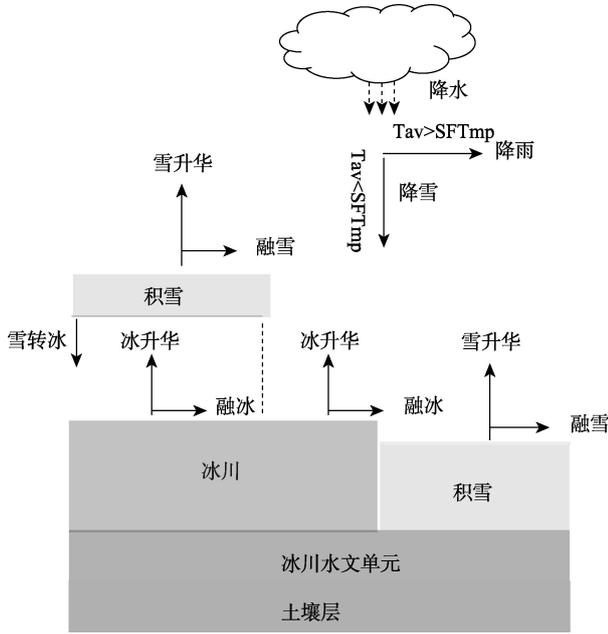


图2 动态冰川HRU方法示意图(Luo et al, 2013)
(Tav为日均温,SFTmp为降雪发生的临界温度)

Fig.2 Schematic diagram of dynamic Hydrological Response Unit method (Luo et al, 2013)
(Tav is average daily temperature and SFTmp is the critical temperature below which snowfall occurs)

分,称为冰川产流量(Qgmlt)(杨针娘, 1991; Unger-Shayesteh et al, 2013)。降雨、融雪、融冰产流形成的地表径流扣除沿程损失而到达出山口形成河川径流的一部分;降雨、融雪、融冰水量入渗土壤中的部分,及以侧向流的形式进入河道,进一步补给含水层,以基流的形式进入河道,这两部分扣除沿程损失到达出山口,构成河川径流的另外一部分。

2.3 SWAT-RSG模型构建

2.3.1 空间数据输入

SWAT-RSG模型建模需要输入流域高程数字模型、土壤、土地覆盖、冰川分布数据。本文采用的数据情况如表1所示。

HWSD土壤数据库提供了分层次的土壤粒级分布、有机碳含量等信息,根据上述信息,利用美国农业部开发的土壤水特性计算程序 SPAW 计算出

土壤可利用有效水量、饱和水力传导系数等SWAT模型模拟土壤水动态需要的参数。最终阿姆河产流区包括16种土壤类型,输入模型之前的重分类值与模型中对应的代码统计如图3a所示。

本文模拟计算起始于1951年,需要冰川面积、末端高程、冰川面积—高程分布信息作为模拟冰川水文过程的初始值,但尚无一个能够提供阿姆河产流区上述信息的独立数据源,所以采用的是帕米尔冰川数据集(Pamir Glaciers Dataset V.1)-1970s,帕米尔冰川数据集(Pamir Glaciers Dataset V.1)-2000s和世界冰川编目WGI(World Glacier Inventory)多源冰川数据集融合的结果。将冰川目录与欧洲航天局2009年土地利用覆盖图合并,依照SWAT模型土地利用覆盖分类标准,阿姆河产流区共划分为8个土地覆盖利用类型(图3b)。

2.3.2 气象数据输入

由于高海拔区域观测数据缺乏,本文采用高分辨率逐日亚洲陆地气象数据集 APHRODITE(Yatagai et al, 2012)和普林斯顿大学构建的全球气象数据集 PGMFD(Sheffield et al, 2006)。APHRODITE和PGMFD数据集都包括日降水量和日气温。APHRODITE为基于地面观测数据的空间插值,空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,数据序列长度为1951-2007年;PGMFD是结合地面观测数据和美国国家大气科学研究中心和环境预报中心(NCEP-NCAR)再分析资料空间插值,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,序列长度为1948-2007年。

2.3.3 子流域和水文单元划分

基于研究区的DEM、土壤图和土地利用覆盖图,利用ArcSWAT的流域剖分工具,将研究区划分为1715个子流域和17581个水文单元(HRUs)。其中,喷赤河和昆杜兹河、瓦赫什河、卡菲尔尼甘河和苏尔汉河分别包括1141、325、96和153个子流域,12081、4011、676和813个HRUs,以及6506、2207、268和250个冰川水文单元。流域计算面积分别为156653、39238、11540和13533 km^2 ,产流区面积分别为

表1 利用SWAT-RSG模型模拟中亚阿姆河产流区采用的空间数据

Tab.1 Spatial databases used in modeling the headwaters of the Amu Darya River by the SWAT-RSG model

空间数据	比例尺/分辨率	格式	来源
DEM	90 m	ESRI Grid	国际农业研究咨询组织空间咨询团体(CGIAR-CSI)(http://srtm.csi.cgiar.org/)
土壤图	1:100万	Arc/Info Coverage	世界粮食组织FAO的HWSD(http://www.fao.org/mr/land/soils/harmonized-world-soil-database/en/)
土地利用图	300 m	Arc/Info Coverage	欧洲航天局2009年最新版世界卫星地图
中亚冰川编目		Arc/Info Coverage	世界冰川监测机构(WGMS)于1989年发布的世界冰川目录(WGI),帕米尔冰川数据集(Pamir Glaciers Dataset V.1)

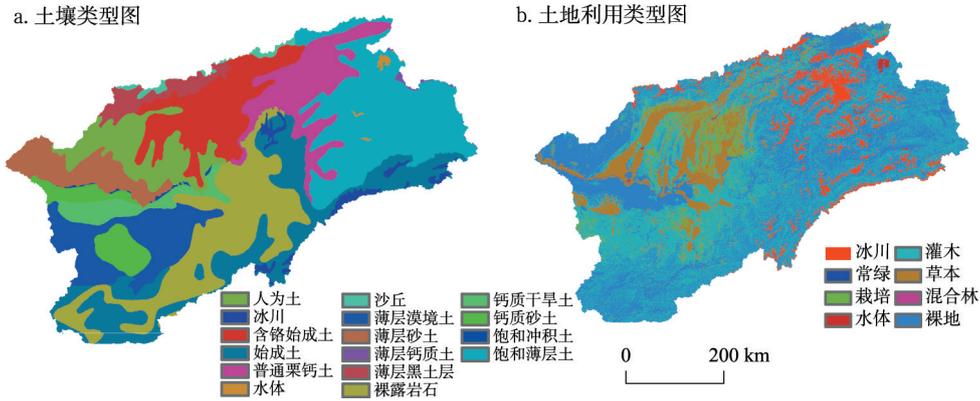


图3 阿姆河产流区土壤(a)和土地利用分类图(b)

Fig.3 Soils (a) and land use/cover (b) in the headwater catchment of the Amu Darya River

138079、32380、6035 和 6170 km², 冰川面积占产流区面积比例分别为 4.6%、12.1%、1.8%和 1.5%。

2.4 模型参数化与评价

SWAT-RSG 模型参数化依据水文站实测径流数据进行。实测径流数据为从俄罗斯水文研究所收集到的 1961-1985 年 9 个水文站的月径流数据序列。将径流数据序列分成两个时段: 1961-1975 年用于参数率定, 1976-1985 年用于参数验证。采用纳什效率系数 NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency, Nash et al, 1970), 百分比偏差 PBIAS(Percentage of Bias), 以及线性相关决定系数(R²) 3 个指标评价模型参数化效果。评价指标表达式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_{mean}^{obs})^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_1^n (Q_i^{obs})} \times 100 \quad (2)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_{mean}^{obs})(Q_i^{sim} - Q_{mean}^{sim})}{\sqrt{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_{mean}^{obs})^2} \sqrt{\sum_1^n (Q_i^{sim} - Q_{mean}^{sim})^2}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: Q_i^{obs} 为第 i 个实测值, Q_i^{sim} 为第 i 个模拟值, Q_{mean}^{obs} 为实测平均值, Q_{mean}^{sim} 为模拟平均值, n 为实测数据个数。

SWAT-RSG 模型模拟蒸散、土壤水、地下水、积雪—融雪、冰川等多方面的水文过程, 涉及参数众多。一些学者给出了其中一些参数的变化区间(Li et al, 2010; 李慧等, 2010; Luo et al, 2012; Luo et al,

2013; 白淑英等, 2013)。本文对上述文献给出的参数进行综合整理, 得到这些参数的变化区间(表 2), 作为 SWAT-RSG 模型参数取值的参考。

3 结果与分析

3.1 模型参数率定与检验

SWAT-RSG 模型参数化结果与参数初始取值一并显示在表 2 中。从结果来看, 在阿姆河产流区, 这些参数取值都位于文献综合归纳后的参数变化区间, 初步判断参数取值是合理的。进一步, 利用喷赤河、瓦赫什河、卡菲尔尼甘河、苏尔汉河四条支流的水文站观测的月流量数据分别计算在参数率定期和验证期的评价指标 NSE、PBIAS 和 R², 列于表 3。在率定期, 9 个水文站中 8 个的 NSE 大于 0.75, PBIAS 绝对值小于 15%, R² 大于 0.8, 属于“优秀”级别(Morasi et al, 2007); 苏尔汉河的 Dashnabad 水文

表 2 中亚阿姆河产流区 SWAT-RSG 模型参数化结果

Tab.2 Calibrated and validated SWAT-RSG model parameters for simulating the headwaters of the Amu Darya River

参数	定义	参数值 变化范围	调整后参数 值/范围
ALPHA_BF	基流衰退系数	0~1	0.02~0.8
RCHRG_DP	深层库下渗比例	0~1	0.4
CH_K2	河道导水系数/(mm/hr)	0~300	10~50
gmfm _x	最大融冰度日因子/(mm/(°C·d))	1.4~16.0	3.0~14.5
gmfm _n	最小融冰度日因子/(mm/(°C·d))	1.0~16.0	1.0~8.8
SMFM _X	最大融雪度日因子/(mm/(°C·d))	1.4~6.7	2.5~3.5
SMFM _N	最小融雪度日因子/(mm/(°C·d))	1.4~6.7	1.0~2.5

站的NSE为0.74, PBIAS为-15.8%,属于“良好”级别,并十分接近“优秀”级别(Morasi et al, 2007)。在验证期,除瓦赫什河的加尔姆站与努列克水电站的NSE分别为0.74和0.33,喷赤河的Khorog站和苏尔汉河的Karatog站PBIAS为23%和16%外,其他水文站的NSE和PBIAS的绝对值均分别大于0.8和小于15%。总体来看,参数化达到了“良好”和“优秀”的水平(Morasi et al, 2007)。

图4显示了几个水文站实测和模拟径流过程的对比。除瓦赫什河水电站在1979年后冬季模拟值比实测值偏低外,其他水文站的模拟过程与实测过程吻合良好,基本可以反映该流域月径流变化过程,但也存在差异。造成模拟与实测流量差异的原因主要有:

(1) 努列克水电站在1972年开始发电,1980年建成,而本文主要研究高山产流区的径流特征,因此构建模型时未考虑水库调蓄功能,在1979年之后不能模拟出水电站发挥调蓄作用后的径流。

(2) 某些日模拟径流量偏高或偏低,导致某些月的模拟径流与实测径流有偏差,这与本模型中气象站为不同子流域共用有关,并且在同一子流域不同高程上的降水是由降水高程变率递推得出的,因此导致使用相同气象站的不同区域同一天降水或不降水,最终日模拟径流量出现偏大或偏小状况。

(3) 2-4月模拟值普遍较实测值偏低,主要是由于本模型较少考虑冻土冻融过程,融雪水下渗,排出到河道时间延迟,在融雪初期河道模拟流量比实测流量小。

从模型参数化的评价指标来看,在阿姆河产流

表3 SWAT-RSG模型在中亚阿姆河产流区参数化的评价指标

Tab.3 SWAT-RSG model performance evaluation indices for simulating the headwaters of the Amu Darya River

流域	水文站	率定期			验证期		
		NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS	R ²
喷赤河	Khorog	0.94	5.57	0.94	0.87	23.00	0.95
	Garm	0.77	-6.68	0.80	0.74	-9.09	0.77
瓦赫什河	Nurek	0.88	-0.10	0.88	0.33	-4.61	0.61
	Alibegi	0.88	-2.33	0.88	0.85	9.04	0.86
卡菲尔尼甘河	Chinor	0.87	4.82	0.96	0.88	9.92	0.94
	Dagana	0.89	11.48	0.93	0.92	8.80	0.94
苏尔汉河	Karatog	0.89	6.49	0.90	0.82	16.11	0.86
	Dashnabad	0.74	-15.84	0.87	0.80	-11.26	0.82
	King-guzar	0.78	-4.50	0.79	0.89	-6.65	0.90

区建立的SWAT-RSG模型和参数能很好的再现河流的径流过程。

3.2 阿姆河径流年内过程特征

运用已建好的阿姆河产流区SWAT-RSG水文模型,模拟了1951-2005年日径流过程,按旬(10日)统计,如图5所示。

阿姆河产流区多年平均降水量为511 mm,降水集中在冬春季节(12月-次年5月),占全年降水量的77%,7-9月降水较少。阿姆河产流区多年平均产流量为658×10⁸ m³,产流深为360 mm。产流年内分布与降水不一致,集中在4-9月,占年总产流的83%,7月达到峰值,9月之后急剧下降。

图5同时给出了地表流、基流和侧向流三部分构成,分别占总产流的比例为38%、46%和16%。其中,地下水流占河川径流比例接近50%,对于稳定河川径流年内分布过程具有重要作用,特别是对维持河道枯水季流量有重要意义。

3.3 阿姆河流域产流区积雪与冰川产流特征

3.3.1 年内变化过程及产流构成特征

图6是按旬(10日)统计得到的阿姆河产流区

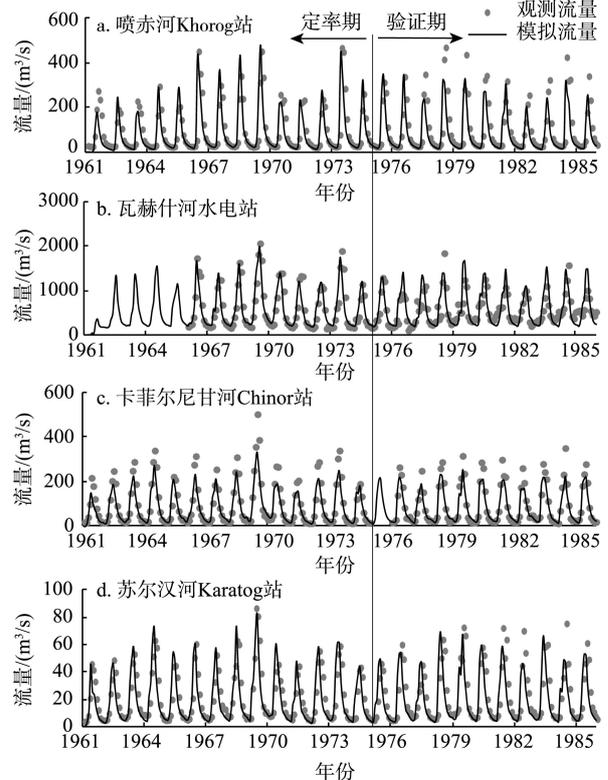


图4 中亚阿姆河产流区4个水文站点的模拟和实测月径流量对比

Fig.4 Comparison of the simulated and the observed monthly streamflow values at four gauges located within the headwaters of the Amu Darya River

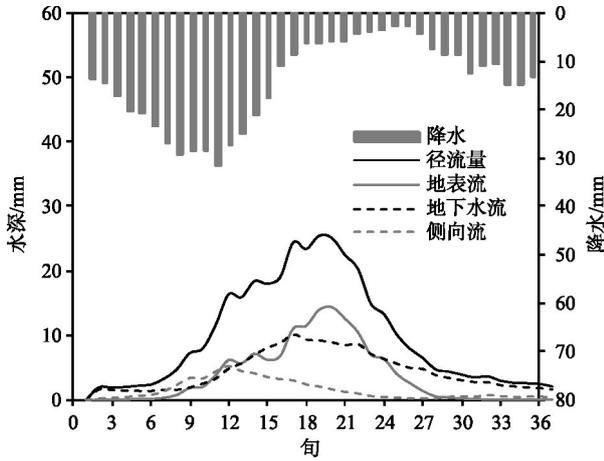


图5 中亚阿姆河产流区降水、蒸发、产流年内变化过程
Fig.5 Seasonal distributions of the precipitation, evapotranspiration, and runoff simulated by the SWAT-RSG model in the headwaters of the Amu Darya River

1951-2005年多年平均产水过程线。融雪主要集中在3-7月,开始时间为2月底,随着降雪增多气温升高,在4月中旬达到最大,至7月底融雪结束。这种较长期融雪产水,原因在于融雪是从低海拔向高海拔逐步推进;冰川产流相对较少,6月底开始,7月底8月初达到峰值,9月底结束,6-9月冰川产流占总产流的比例为25%;降雨产流集中在3-5月;在融雪、融冰和降雨的共同作用下,径流在7月达到峰值。

如表4所示,1951-2005年期间,阿姆河产流区多年平均降水511 mm,其中降雪占62%;产流量为360 mm,其中雨、雪、冰产流比例为18:67:15,融雪和冰川产流是径流量的主要补给来源;水量平衡中有17.1 mm的亏缺,降水、产流与蒸发三者不能平衡,主要是早期积累的冰川消融补给所致。

3.3.2 产流年内变化趋势

通过 Mann-Kendall 趋势检验 (Kendall, 1938;

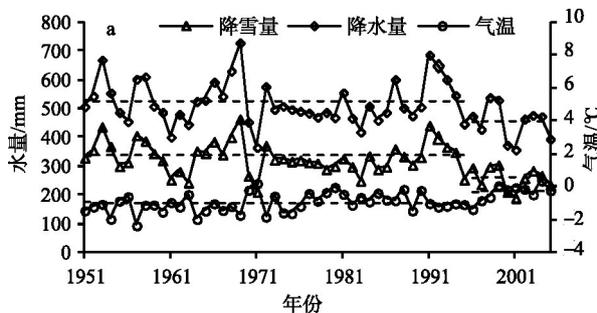


图7 1951-2005年阿姆河产流区降水、气温及融雪产流、冰川产流、总产流年际变化特征
(虚线代表各变量在1951-1995年和1996-2005年两个时段平均值)

Fig.7 Inter-annual variations of snowmelt, glacier melt, and total runoff in the upstream of the Amu Darya River, 1951-2005
(The dotted line represents the average values of variables during 1951 to 1995 and 1996 to 2005)

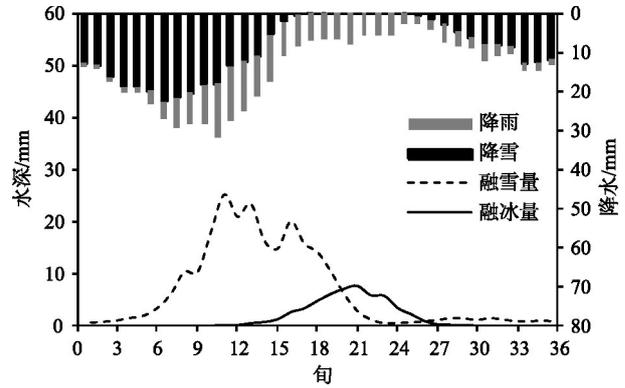


图6 SWAT-RSG模型模拟的阿姆河产流区降雨和降雪量,融雪、融冰产水量年内分变化过程

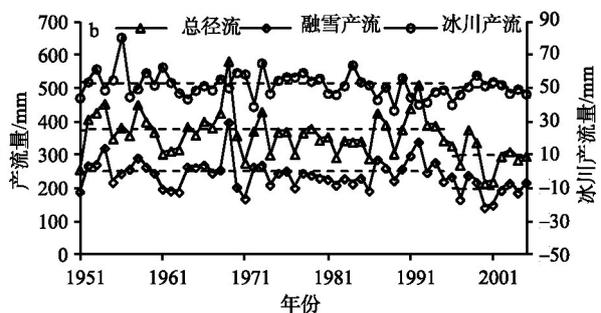
Fig.6 Seasonal distributions of rainfall and snowfall, snowmelt, and glacier melt simulated by the SWAT-RSG model in the headwaters of the Amu Darya River

表4 1951-2005年中亚阿姆河产流区多年平均水量平衡表

Tab.4 Annually averaged water balance components in the headwaters of the Amu Darya River, 1951-2005

水量平衡分量	降水及产流组成	水量/mm	比例/%
降水	降雨	195	38
	降雪	315	62
产流	冰川产流	53	15
	融雪产流	240	67
	降雨产流	67	18
蒸散		168	
平衡		-17	

Mann, 1945)($\alpha=0.05$)结果显示,阿姆河产流区年均气温呈显著上升趋势,上升率为 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,降水呈显著减少趋势,减少率为 $13\text{ mm}/10\text{ a}$,其中降雨和降雪也呈现明显减少趋势(图7a)。受气温、降水变化影响,融雪产流呈显著减少趋势,冰川产流亦呈减少趋势,但不显著;在降雨、融雪、融冰的共同



作用下,总产流量呈显著减少趋势,年均减少率为 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,且在1995年之后产流量减少幅度增大(图7b)。

将1951-2005年分为两个时段:1951-1995年(I)和1996-2005年(II),取各时段气温、降水和各产流组成平均值进行对比,如表5所示。相对第(I)时段,阿姆河产流区第(II)时段年均气温上升 $0.66 \text{ }^\circ\text{C}$,降水减少了14%,其中降雪减少22%,降雨变化较小。受以上因素影响,总产流减少了21%。其中,融雪产流减少20%,可归结为降雪减少所致;冰川产流减少4%,推测原因,虽气温上升使得冰川融水强度增加,但流域降水减少,冰面上降水量亦在减少,降水减少程度大于气温升高引起的冰融水增加程度,因此冰川产流在减少;尽管降雨略微增加,但由于气温升高导致蒸散量加大,降雨产流减少35%。由上述结果可知,1951-2005年间阿姆河产流区受气温升高降水减少的影响,径流呈减少趋势。

表5 1996-2005年与1951-1995年阿姆河产流区水量变化比较

对比变量	降水及产流组成	1951-1995	1996-2005	相对变化
气温/ $^\circ\text{C}$		-0.96	-0.30	0.66°C
降水/mm		526	454	-14%
	降雨	191	194	2%
	降雪	334	261	-22%
产流/mm		376	297	-21%
	冰川产流	53	51	-4%
	融雪产流	250	200	-20%
	降雨产流	72	47	-35%
蒸散/mm		165	177	7%

4 结论与讨论

(1) 本文利用具有雨、雪、冰产流过程模拟能力的分布式水文模型模拟阿姆河产流区1951-2005年逐日、月产流和径流过程,并选取9个水文观测站点进行参数率定和验证。结果表明,除努列克水电站外,其余8个站点月模拟结果效率系数和相关系数均达到了0.7以上,偏差也较小,表明该模型在阿姆河流域具有较好的适用性,能够进一步分析产流构成特征。

(2) 阿姆河产流区产流主要集中在4-9月,占全年83%,7月达到峰值。从形式上看,地表流和基流分别占径流的38%和46%;从来源上看,积雪和冰川融水产流分别占总产流的67%和15%。

(3) 通过对阿姆河产流区1951-2005年气温、降水及产流的趋势分析表明,阿姆河产流区降水显著减少,气温显著升高。降雨、融雪产流和冰川产流及总产流量均呈减少趋势,特别是在1995年之后,减少幅度加大,主要原因在于气温上升和降水减小加剧,1996-2005年与1951-1995年相比,产流量减少了21%。

前人研究亦得到结论:在过去几十年,阿姆河支流的径流呈减少趋势(Savitskiy et al, 2008; Olsson et al, 2010),但都集中于出山口径流,未能揭示产流构成特征。而雪冰融水对于雪冰流域人类生存和发展是关键的水文过程,尤其在夏季,雪冰融水是阿姆河的主要水源。本文利用增加融冰模拟能力的分布式水文模型,实现了将雪、冰融水产流从总产流中分离出来,讨论积雪、融冰产流的年内和年际变化特征,从机理上更深入地认识了产流及径流的变化规律和分布特征,可为水资源管理者提供重要依据。但由于苏联解体及阿姆河产流区高山地形复杂性影响,气象及水文数据缺乏,再分析数据以及降水、气温高程变率的使用可能导致模拟结果存在一定的不确定性,今后需进行不确定分析,确保模拟结果更具可靠和可利用性。

参考文献(References)

- 白淑英,王莉,史建桥,等. 2013. 基于SWAT模型的开都河流域径流模拟[J]. 干旱区资源与环境, 27(9): 79-84. [Bai S Y, Wang L, Shi J Q, et al. 2013. Runoff simulation for Kaidu River Basin based on SWAT model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 27(9): 79-84.]
- 李慧,靳晟,雷晓云,等. 2010. SWAT模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究:以玛纳斯河径流模拟为例[J]. 水资源与水工程学报, 21(1): 79-82. [Li H, Jin S, Lei X Y, et al. 2010. Study on the importance of sensitivity analysis and auto-calibration of SWAT model: taking the case study of Manasi Watershed[J]. Journal of Water resources and Water Engineering, 21(1): 79-82.]
- 芮孝芳. 2004. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社. [Rui X F. 2004. Principle of hydrology[M]. Beijing, China: China Water & Power Press.]
- 杨针娘. 1991. 中国冰川水资源[M]. 甘肃: 甘肃科学技术出

- 版社. [Yang Z N. 1991. Glacier water resources in China [M]. Gansu, China: Gansu Science and Technology Press.]
- Agaltseva N, Blogov M V, Spektorman T Y, et al. 2011. Estimating hydrological characteristics in the Amu Darya River Basin under climate change conditions[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 36(10): 681-689.
- Arnold J G, Allen P M. 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 176: 57-77.
- Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the Asabe*, 55: 1491-1508.
- Conrad C, Dech S, Hafeez M, et al. 2007. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 21: 197-218.
- Froebrich J, Kayumov O. 2004. Water management aspects of Amu Darya[M]//Nihoul J J, Zavialov P, Micklin P. Dying and dead seas climatic versus anthropic causes. Berlin, Germany: Springer Netherlands: 49-76.
- Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions[J]. *Transactions of the Asabe*, 50(4): 1211-1250.
- Hagg W, Hoelzle M, Wagner S, et al. 2013. Glacier and runoff changes in the Rukhk catchment, upper Amu Darya Basin until 2050[J]. *Global and Planetary Change*, 110: 62-73.
- Kendall M G A. 1938. New measure of rank correlation[J]. *Biometrika*, 30: 81-93.
- Kure S, Jang S, Ohara N, et al. 2013. Hydrologic impact of regional climate change for the snowfed and glacierfed river basins in the Republic of Tajikistan: hydrological response of flow to climate change[J]. *Hydrological Processes*, 27: 4057-4070.
- Li Z L, Shao Q X, Xu Z X, et al. 2010. Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: a case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 385: 76-83.
- Luo Y, Arnold J, Allen P, et al. 2012. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4): 1259-1267.
- Luo Y, Arnold J, Liu S, et al. 2013. Inclusion of glacier processes for distributed hydrological modeling at basin scale with application to a watershed in Tianshan Mountains, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 477: 72-85.
- Mann H B. 1945. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrica*, 13: 245-259.
- Moriasi D, Arnold J, Van Liew M, et al. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the Asabe*, 50: 885-900.
- Nash J, Sutcliffe J. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
- Nezlin N P, Kostianoy A G, Lebedev S A. 2004. Interannual variations of the discharge of Amu Darya and Syr Darya estimated from global atmospheric precipitation[J]. *Journal of marine systems*, 47: 67-75.
- Olsson O, Gassmann M, Wegerich K, et al. 2010. Identification of the effective water availability from streamflows in the Zerafshan River Basin, Central Asia[J]. *Journal of Hydrology*, 390(3-4): 190-197.
- Rakhmatullaev S, Huneau F, Kazbekov J, et al. 2010. Groundwater resources use and management in the Amu Darya River Basin(Central Asia) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 59: 1183-1193.
- Savitskiy A G, Schlüter M, Taryannikova R V, et al. 2008. Current and future impacts of climate change on river runoff in the Central Asian river basins[M]//Claudia P, Pavel K, Geogr J. Adaptive and integrated water management. New York: Springer: 323-339.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling[J]. *Journal of Climate*, 19: 3088-3111.
- Unger-Shayesteh K, Vorogushyn S, Farinotti D, et al. 2013. What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters: a review[J]. *Global and Planetary Change*, 110: 4-25.
- Viviroli D, Weingartner R. 2004. The hydrological significance of mountains: from regional to global scale[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8: 1017-1030.
- Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. 2012. APHRODITE: constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 1401-1415.

Runoff generation in the headwater of Amu Darya, Central Asia

WANG Xiaolei^{1,2}, SUN Lin¹, ZHANG Yiqing^{1,2}, LUO Yi¹

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Amu Darya is the largest river in Central Asia that provides water resources to downstream water users and flows into the Aral Sea. Runoff of the Amu Darya River is dominated by snowmelt and glacier melt originating from the alps. Quantification of snowmelt and glacier melt contribution to the runoff is important for understanding the dynamic characteristics of the streamflow. This study investigates the glacier and snow melt processes in the headwaters of Amu Darya by using a glacier-enhanced SWAT model. The simulations were run through 1951 to 2005. The results indicate that the SWAT-RSG model could well estimate the monthly streamflow process of the Amu Darya River Basin, and the efficiency coefficient and absolute value of PBIAS in the calibration period (1961-1975) and validation period (1976-1985) could be higher than 0.6 and lower than 25%, respectively. Snowmelt and glacier melt contributed 67% and 15% of the annual runoff. The Amu Darya River is mainly supplied by melting high-mountain snow and glaciers, which was concentrated in March to July and June to September, respectively. Owing to the combined effect of rainfall, snowmelt, and glacier melt, the runoff is concentrated in April to September, accounting for 83% to the total runoff, and the peak occurred in July. The results of Mann-Kendall trend analysis indicate that precipitation showed a significant decreasing trend and temperature showed a significant increasing trend from 1951 to 2005, and experienced a sudden jump in 1995. Due to the change of temperature and precipitation, snowmelt showed a decreasing trend and the value during 1996 to 2005 (Period II) was 20% lower compared to that in 1951 to 1995 (Period I). Due to the shrink of glacier area and reduction of precipitation, glacier melt showed a non-significant decreasing trend between 1951 and 2005 and the annual glacier melt in Period II was 4% less than that in Period I. Despite that the rainfall had slightly increased, the rain runoff was reduced by 35% as a result of the increased evapotranspiration. Consequently, the streamflow was reduced by about 260 million m³ each year from 1951 to 2005. The runoff showed a 21% reduction from Period I to Period II. The study of runoff generation characteristics in the headwaters of the Amu Darya River can provide references for the water resource management in the Amu Darya River Basin and Central Asia.

Key words: SWAT-RSG model; Amu Darya River; snow runoff; glacier runoff