

引用格式:向燕芸,陈亚宁,张齐飞,等.天山开都河流域积雪、径流变化及影响因子分析[J].资源科学,2018,40(9):1855-1865.  
[Xiang Y Y, Chen Y N, Zhang Q F, et al. Trends of snow cover and streamflow variation in Kaidu River and their influential factors [J]. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1855-1865.] DOI: 10.18402/resci.2018.09.15

# 天山开都河流域积雪、径流变化及影响因子分析

向燕芸<sup>1,2</sup>, 陈亚宁<sup>2</sup>, 张齐飞<sup>2,3</sup>, 卞薇<sup>2,3</sup>

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所/荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**本文分析了开都河流域源流区积雪变化与气象要素及径流的变化趋势, 讨论了气象-积雪-径流三者之间的关系。结果表明:开都河流域2000—2016年间积雪覆盖率呈微弱上升趋势(0.1%/10a), 其中, 最大积雪覆盖率增加速率约为0.33%/a, 而最小积雪覆盖率则呈减小趋势(-0.017%/a); 在年内表现为春、夏季节积雪面积减少, 而秋、冬两季增加; 在过去的45年间(1972—2016年), 融雪期在春季提前了约10.35天, 而秋季延迟了约7.56天; 温度对春季积雪变化影响较大, 而降水则对冬季积雪变化影响较大。河川径流与径流峰值均呈增加趋势, 年径流增幅约2.26亿m<sup>3</sup>/10a, 其中夏季径流对气温( $\varepsilon=1.41$ )和降水( $\varepsilon=0.5$ )变化敏感, 而春季对积雪面积的变化响应敏感( $\varepsilon=0.59$ )。开都河流域山区温度升高和降水增加对径流的影响明显。

**关键词:**积雪面积; 径流; 气候变化; 开都河

DOI: 10.18402/resci.2018.09.15

## 1 引言

流域水循环是一个非常复杂的过程, 受区域气候、地形条件及人类活动等多个因素影响<sup>[1-4]</sup>。全球气候变暖加快了水循环, 改变了山区产汇流过程, 导致了冰川积雪融水和降水对径流补给的变化<sup>[5]</sup>。尤其对于降水稀少的干旱地区而言, 山区降水和冰川、积雪是河流的主要补给源, 气候变暖引起的冰雪加速消融可以在一定时间内补给径流, 增大径流量, 然而, 持续的升温会加快这一重要水资源的萎缩, 导致径流过程及水资源量的改变<sup>[6,7]</sup>。

在全球变暖的大背景下<sup>[8]</sup>, 天山山区气候变暖趋势更为显著, 研究表明, 过去半个世纪以来天山地区气温正在以0.34℃/10a的速度上升, 且在1997年气温发生突变<sup>[9]</sup>, 此后一直处于高位震荡, 复杂的地形特征使得天山地区冰雪对气候变化非常敏感, 目前针对天山山区及各典型流域积雪面积<sup>[10-13]</sup>、积

雪深度<sup>[14]</sup>、积雪日数<sup>[15]</sup>及融雪期长度<sup>[16]</sup>等的时空变化特征已做了较多研究, 随着遥感技术的发展, 积雪数据资料也从站点观测资料发展到 Landsat、SPOT、MODIS 等遥感影像资料, 其中MODIS 积雪产品的应用最为广泛, 如董安青采用归一化积雪指数以及MODIS 1B数据的第1、2、4、6通道的光谱反射率进行积雪识别, 提取新疆地区的积雪覆盖数据并分析了研究区积雪覆盖年内年际变化特点以及与气象因子的相关性<sup>[17]</sup>; 赵文宇等基于MOD10A2 (Terra) 和MYD10A2 (Aqua) 积雪产品, 获取新疆天山年积雪日数并分析了2002—2014年积雪日的年际变化以及多年平均积雪日随高程和坡度的变化特征<sup>[15]</sup>。大量研究结果显示, 除地形条件之外, 温度和降水是影响区域积雪覆盖的最主要气候要素<sup>[18]</sup>, 温度影响积雪累积与消融及降水形式, 降水则直接影响积雪来源<sup>[19,20]</sup>, 不同海拔、不同坡向对气候变化

收稿日期: 2017-11-25; 修订日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助(41630859; 41701024)。

作者简介: 向燕芸, 女, 湖北宜昌人, 硕士生, 主要从事干旱区积雪水文研究。E-mail: xiangyyxj@163.com

通讯简介: 陈亚宁, E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

的响应程度不同,积雪覆盖的变化情况也不尽相同<sup>[21,22]</sup>。已有的研究表明近十几年来积雪覆盖面积、积雪期和融雪期长度都呈现强烈的年际波动特征,且不同季节、不同地理位置变化趋势并不一致<sup>[23]</sup>。流域水文过程也对气候和积雪变化产生了明显的响应,其响应除了表现在径流增多之外<sup>[24]</sup>,还表现在径流年内分配规律的改变、极端水文事件的发生频率和强度变化等方面<sup>[7]</sup>,山区水文过程更加复杂,水资源系统也越发脆弱<sup>[25]</sup>,因此,研究气候变化及其对水资源要素的影响对当前乃至未来干旱区水资源的可利用性评估至关重要。

开都河流域位于新疆天山南坡,主要依靠冰雪融水和降水补给<sup>[26]</sup>,其中,积雪面积的年内和年际变化直接影响流域径流的季节和年际分配。作为巴音郭楞自治州的母亲河和塔里木河重要的支流,开都河流域的水储量及水文水资源的变化引起了学者的广泛关注,如Deng等对开都河流域气候变化对径流的影响研究发现,气温和降水是影响流域径流变化的最主要因素<sup>[27]</sup>;Chen从气候变化和人类活动两个方面对影响开都河流域径流进行了剖析<sup>[1]</sup>;彭秋燕则利用融雪径流模型新安江模型,通过设定不同的气候变化情景以探究气候变化对径流的影响<sup>[28]</sup>。目前针对开都河流域的研究主要是侧重于气候变化与径流的关系<sup>[29]</sup>,较少对气候、积雪及径流三者之间关系进行系统分析;另外,针对积雪的研究也大多是基于MODIS数据分析其积雪面积的变化趋势,而针对积雪的消融过程即融雪期开始与结束时间等要素的分析较少。随着近年来气候的变暖,开都河流域积雪消融规律及过程将产生怎样的变化,积雪的减少如何影响河川径流变化,流域水文过程与水资源又如何响应尚不清楚,因此对该地区积雪变化的监测和研究,适时正确地评估开都河流域积雪覆盖变化,揭示积雪变化对河川径流的影响,对于该地区的绿洲发展和水资源可持续利用有着极其重要的意义。本文以开都河流域为研究区,基于MODIS积雪数据以及站点气象水文数据,分析流域年内及年际积雪面积变化特征,并结合站点1972—2016年气象水文数据,分析融雪期积雪消融期开始与结束时间变化趋势以及气象-积雪-径流三者之间的关系,探讨气候变化对积雪覆盖及其径

流变化的影响,探明流域气候及积雪覆盖变化形势下积雪水文响应过程,为流域水资源合理开发和科学配置提供科学依据。

## 2 研究区概况

开都河流域位于新疆天山南坡,焉耆盆地北缘,河流发源于天山中部海拔5000m的萨尔明山的哈尔尕特和扎克斯台沟,出山口以上流域集水面积约1.9万km<sup>2</sup>,山区流域平均海拔3100m,流域地势北高南低,地形复杂(图1)。河流属于冰雪融水和雨水混合补给型,年径流总量约35.15亿m<sup>3</sup>,春季节性积雪融水补给河流,多年平均春季(3—5月)径流总量约7.8亿m<sup>3</sup>,夏季则以高山冰雪融水和山区降水补给为主<sup>[30,31]</sup>,多年平均夏季(6—8月)径流总量约15.5亿m<sup>3</sup>,河流多年平均冰雪融水补给量约为5.08亿m<sup>3</sup>。流域年均气温仅为-4.16℃,平均最大积雪深度为12cm,具有明显的高寒气候特征。

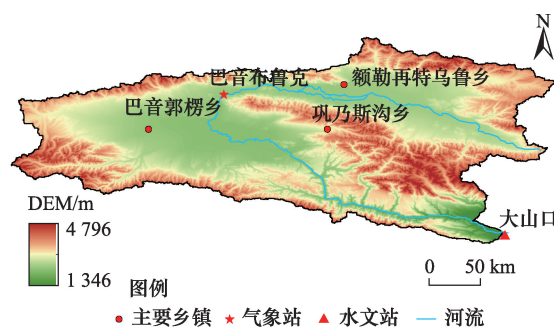


图1 研究区位置示意

Figure 1 Location of the Kaidu River Basin

## 3 数据来源与研究方法

### 3.1 数据来源及预处理

本文气象水文数据分别选取开都河流域内巴音布鲁克气象站(84.15°E, 43.03°N, 海拔2435m)1972—2016年间的气温、降水及大山口水文站(85.73°E, 42.2°N, 海拔1330m)1972—2016年间径流观测资料,气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)<sup>[32]</sup>,水文数据由新疆维吾尔自治区水文水资源局提供。积雪面积数据源于美国雪冰数据中心(National Snow & Ice Data Center, <http://nsidc.org/>)网站下载的MODIS(Moderate Resolution Imaging spectroradiometer)积雪产品MOD10A2<sup>[33]</sup>。MOD10A2数据由逐日积雪分类产品MOD10A1影像8天数据合成,最大程度地降低

2018年9月

了云层的影响,数据的格网分辨率为500 m。本次研究共选用了2000年3月—2016年12月共1532景MOD10A2产品,影像编号为h23v04、h24v04,首先利用MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对源数据进行格式和地图投影转换,将hdf格式转换为TIFF格式,投影方式设置为UTM投影,WGS84投影坐标系统,重采样方法为最邻近法(Nearest Neighbor),然后利用ArcGIS完成研究区的裁剪、像元重分类,将各像元分为0和1,分别代表无积雪和有积雪,最后通过积雪面积提取,获得近17年(2000—2016年)开都河流域积雪覆盖率(Snow Cover Area, SCA%)数据。

### 3.2 研究方法

本文利用Mann-Kendall(M-K)参数检验法检测长时间序列气象、水文及SCA数据资料以获取各要素多年变化趋势及显著性。在M-K趋势检验中,对于给定的置信水平 $\alpha$ ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ,则原假设 $H_0$ 是不可接受的( $H_0=R$ ),即在置信水平 $\alpha$ 上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 $Z$ 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势<sup>[34]</sup>。

选取Pearson相关分析方法,分别就积雪与气候要素、径流与积雪和气候要素之间的相关性进行分析。考虑到相关性不能直接代表变量间的因果性<sup>[35]</sup>,为进一步研究水文过程对气候变化的响应,本文采用Zheng等提出的敏感性系数计算方法<sup>[36]</sup>,用于分析年流量对气候要素及积雪面积的敏感性。计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{\bar{X}}{\bar{Q}} \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Q_i - \bar{Q})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中 $\varepsilon$ 为流量对气候要素或SCA的敏感系数,指气象要素或SCA变化1%,引起的径流变化 $\varepsilon\%$ ;  $X_i$ 为气象要素或SCA;  $Q_i$ 为流量;  $\bar{X}$ ,  $\bar{Q}$ 分别为气象要素或SCA和流量的多年平均值。同理也可利用此方法计算SCA对气候要素的敏感系数以反映积雪覆盖面积对气候变化的响应。

为定量辨识气象要素及SCA对径流的贡献率,其贡献率的计算公式为:

$$\phi = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times \varepsilon \times 100\% \quad (2)$$

式中 $\phi$ 指气象要素或SCA对径流的贡献率;  $\Delta x$ 为

气象要素或SCA多年变化量。

## 4 结果分析

### 4.1 积雪覆盖变化

对开都河流域最大、最小和平均积雪覆盖率变化分析显示,2000—2016年间开都河流域积雪覆盖总体呈略微增加的趋势。其中,最大积雪覆盖率与平均积雪覆盖率为增加趋势,增幅分别为0.33%/a、0.12%/a,而最小积雪覆盖面积呈减小趋势(-0.017%/a)。从2000—2016年最大积雪(图2a)、最小积雪(图2b)面积空间分布来看,积雪面积显著增加区域主要位于流域西南海拔较低地区,最小积雪面积主要在西南及东部高海拔地区变化显著,而流域中部积雪面无明显变化。

将全年分为四个季节,春季(3—5月),夏季(6—8月),秋季(9—11月),冬季(12—2月),分别对各个季节SCA变化趋势进行分析(图3),结果发现,

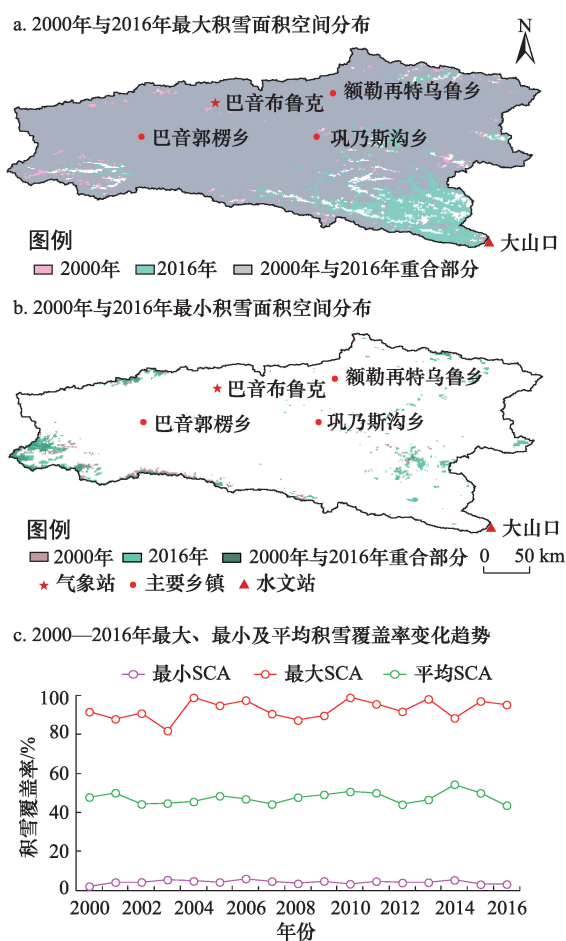


图2 2000—2016年最大、最小及平均SCA%时空变化趋势

Figure 2 Spatial distribution and variation trend of maximum, minimum and mean snow cover from 2000 to 2016



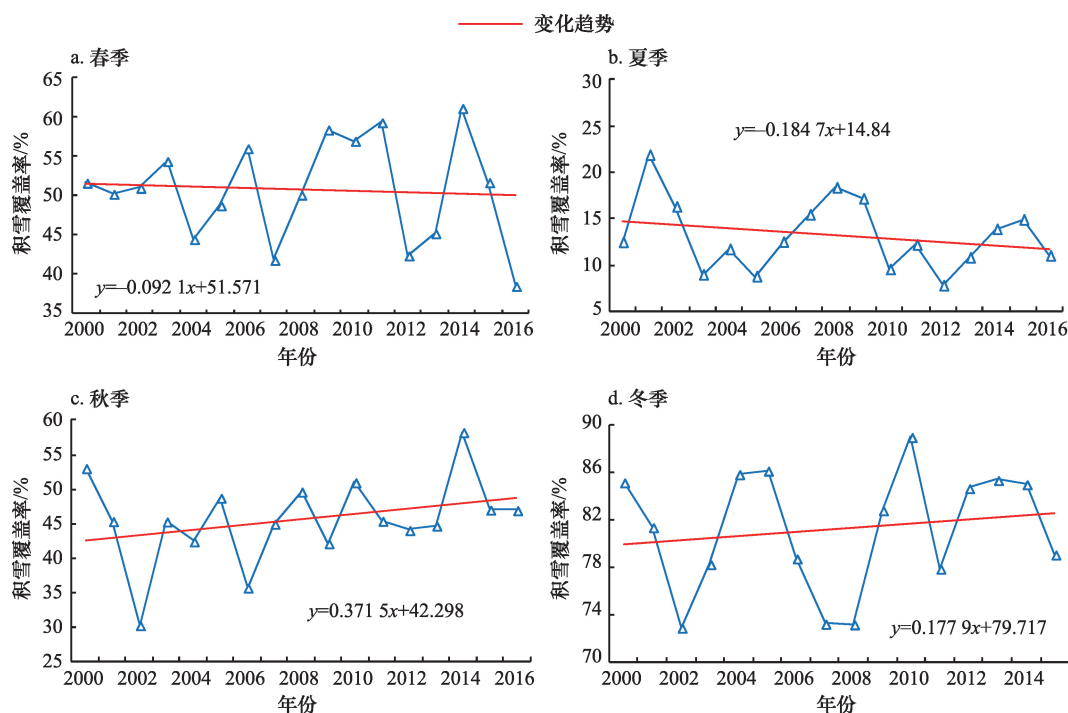


图3 2000—2016年流域各季节SCA变化趋势

Figure 3 Seasonally variation of SCA in the Kaidu River Basin from 2000 to 2016

2000—2016年间,流域积雪面积在春夏季节呈现减少趋势,其中夏季面积显著减少,减少速率约0.25%/a,春季各年积雪面积波动较大,呈微弱的减少趋势(0.1%/a);秋冬季节积雪面积呈增加趋势,增加速率分别为0.39%/a、0.06%/a。

对开都河流域年内不同季节SCA变化趋势M-K趋势检验结果显示(表1)也与趋势分析结果基本一致,M-K检验结果显示,2000—2016年年际积雪面积也呈增加的趋势但不显著,除夏季外,其它季节积雪面积均呈增加的趋势,但都未通过0.05的显著水平检验。线性趋势分析与M-K趋势检验结果在春季存在差异的原因可能与SCA数据时间序列较短有关。

基于巴音布鲁克气象站1972—2016年间日均温数据,同时参考李宝富对融雪期开始与结束时间

的定义<sup>[15]</sup>,本文将每年3—6月间第一次连续五天日均温高于0℃的日期定义为融雪期开始的时间,将8—10月份第一次连续五天日均温低于0℃的日期定义为融雪期结束的时间,以此来计算开都河流域近几十年(1972—2016年)的融雪期变化。研究发现(图4),1972—2016年间,开都河流域融雪期开始时间大致介于3月20日—4月30日之间,线性趋势表明流域融雪期开始时间明显提前,提前速率约2.3d/10a,近45年来约提前了约10.35天;融雪期结束时间大致介于9月20日—10月30日之间,表现为延迟趋势,延迟速率约1.68d/10a,45年来延迟了约7.56天。这意味着开都河流域融雪期天数由177天增加到195天。这一变化趋势与前人研究结果一致<sup>[16]</sup>,但开都河流域融雪期提前速率低于西北干旱区平均水平。

## 4.2 气温、降水变化对积雪变化的影响

积雪的时空分布变化与气候变化密切相关。从1972—2016年开都河流域年平均气温与年均降水量的变化可见(图5),开都河流域气温与降水均呈现出明显的上升趋势,升温速率约0.27℃/10a,低于整个天山区的升温幅度(0.34℃/10a)<sup>[30]</sup>;降水增加

表1 2000—2016年流域SCA变化M-K趋势检验结果

Table 1 Mann-Kendall trend test of SCA from 2000 to 2016

	春季	夏季	秋季	冬季	年际
Z	0.12	-0.70	0.25	0.23	0.29
H <sub>0</sub>	A	A	A	A	A

注:Z表示时间序列存在增加或减少趋势;H<sub>0</sub>表示零假设,即未出现显著变化趋势,A为接受零假设。

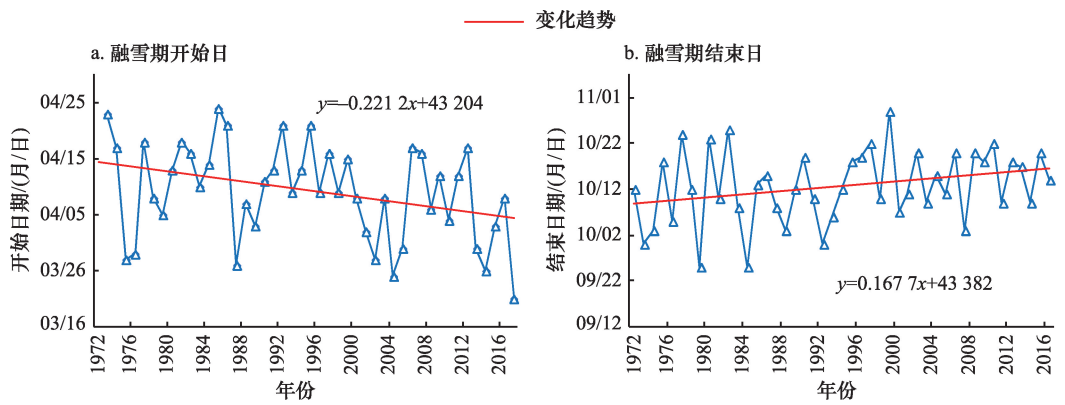


图4 1972—2016年流域融雪期开始及结束时间变化趋势

Figure 4 Variation trend of onset and cessations of the snowmelt period in the Kaidu River Basin from 1972 to 2016

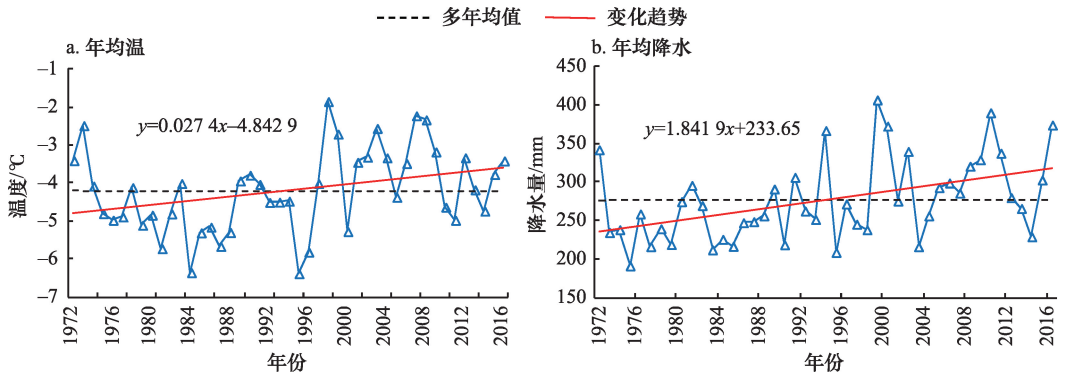


图5 1972—2016年开都河流域年均温及降水变化过程

Figure 5 Variation trend of average temperature and annual precipitation in the Kaidu River Basin from 1972 to 2016

速率约 18.42mm/10a, 高于整个天山区降水增幅 (8.4 mm/10a)<sup>[7]</sup>。而与长时间序列变化趋势不一致的是, 2000—2016 年间年均温呈下降的趋势, 17 年间温度约降低了 0.38℃, 降水则依旧呈增多的趋势但增幅有所放缓, 17 年间降水约增加了 9.91mm。

同时, 对比 1972—2016 年开都河流域内巴音布鲁克气象站 (2458m) 与流域附近的巴仑台气象站 (1739m) 气温与降水变化趋势发现, 不同海拔位置气候变化幅度存在一定差异。海拔较低的巴仑台近几十年间气温上升速率 (0.33℃/10a), 略高于巴音布鲁克站, 而其降水增加速率 (16.33mm/10a) 略低于巴音布鲁克站。

对比 2000—2016 年不同季节气温与降水变化分析可见 (表 2), 2000—2016 年流域年均温呈略微下降趋势, 其中春、夏两季温度呈上升趋势, 秋、冬两季呈下降趋势, 且均不显著; 流域年降水呈不显

表2 2000—2016年各季节及全年气温、降水变化 M-K 检验

Table 2 Mann-Kendall trend test of seasonally and annual temperature & precipitation from 2000 to 2016				
	气温		降水	
	Z	H <sub>0</sub>	Z	H <sub>0</sub>
春季	0.41	A	0.12	A
夏季	0.59	A	0.29	A
秋季	-1.40	A	-0.70	A
冬季	-1.04	A	-0.29	A
全年	-0.04	A	0.37	A

注: Z 表示时间序列存在增加或减少趋势; H<sub>0</sub> 表示零假设, 即未出现显著变化趋势, A 为接受零假设。

著增加趋势, 其中春夏两季呈上升趋势, 秋、冬两季呈下降趋势, 且均不显著。

为探究流域气候要素与积雪变化的关系, 对 2000—2016 年间各季节积雪面积 (SCA) 与气象要素进行 Pearson 相关分析。结果显示 (表 3), SCA 与

表3 2000—2016年积雪面积与气温和降水的相关关系

Table 3 Correlation between snow cover area and precipitation &amp; temperature from 2000 to 2016

季节	春季	夏季	秋季	冬季
气温	-0.71**	-0.08	-0.66**	-0.55*
降水	0.17	0.1	0.11	0.62*

注:\*\*、\*的相关系数分别通过0.01、0.05水平检验。

气温的相关程度略高于与降水的相关程度,所有季节气温与SCA均呈负相关,除夏季外,SCA与气温均显著性相关;而降水与SCA在各个季节均呈正相关,仅在冬季通过了0.05的显著性水平检验,相关系数达0.62,说明气温是影响全年积雪面积变化的主要因素,而冬季降水则是积雪的主要来源。

对流域各个季节SCA对气温和降水的敏感性分析显示(表4),开都河流域SCA对气温的敏感系数范围为-0.38~0.04, $\varepsilon(T, SCA)$ 的绝对值的最大值出现在春季(-0.38),其次为夏季,表示气温变化1%将会使开都河流域春季与夏季积雪面积分别变化0.38%和0.22%;SCA对降水的敏感系数范围为-0.08~0.07之间, $\varepsilon(P, SCA)$ 绝对值的最大值出现在夏季(-0.08),表示降水量变化1%将会使开都河流域夏季积雪面积变化0.08%,值得注意的是,SCA对夏季降水的敏感系数小于零,即降水增多反而会引引起积雪面积的减少,这是由于夏季降水是以降雨的形式降到地面,反而会促进积雪的融化。

表4 2000—2016年积雪面积对气温和降水的敏感性

Table 4 Sensitivity coefficients of snow cover area to precipitation &amp; temperature from 2000 to 2016

季节	春季	夏季	秋季	冬季
气温	-0.38	-0.22	0.13	0.04
降水	0.07	-0.08	0.04	0.06

温度升高降低降雪率<sup>[7,10]</sup>,对积雪的积累消融速率有着直接影响。如在2003—2007年间,年均温与年均SCA分别呈现出先降后升与先升后降的趋势,二者变化趋势相反,且变化拐点都出现在2005年。从各个季节来看,气温与SCA的相关系数与敏感系数均在春季达到最大值,分别为-0.71( $p>0.01$ )、-0.38,春季是季节性积雪融化期,春季气温的变化直接影响积雪消融速率和消融期开始的时间,春季气温的逐年升高加速了积雪的消融,也导致了融雪期提前;夏季降水的增多和气温的上升则加速了高

海拔地区永久性积雪的消融,导致了积雪覆盖面积的减少,冬季降水的增加和气温的降低则更有利于积雪增多。

#### 4.3 径流变化及其对气候、积雪变化的响应

对开都河流域1972—2016年间月流量和1972—2012年间日流量数据分析显示(图6、图7),开都河流域年内流量峰值出现在7月,最小值出现在12月,冬季径流基本保持稳定,年内径流夏季所占比重最大,约占全年径流量的44%,其次为春季(22%),冬季径流所占比重最小(12%),4月气温回升,融雪开始,径流开始大幅增加;从多年变化趋势图可以看出,1972—2016年间流域出山口水量呈增多趋势,年径流增幅约2.26亿 $m^3/10a$ 。年流量峰值也表现为更加集中,并呈增加趋势(图7),增幅约21%。其中,流量峰值的最大值出现在1999年7月20日,达793 $m^3/s$ ,与降水多年最大值出现的日期一致(7月19日);流量峰值出现的日期集中于6—8月,但详细分析发现,峰值出现的日期呈推后趋势,41年间约推后了16.65天,与夏季最大降水过程后移存在一定的联系,然而,夏季降水时间上变化的具体原因还有待进一步研究。

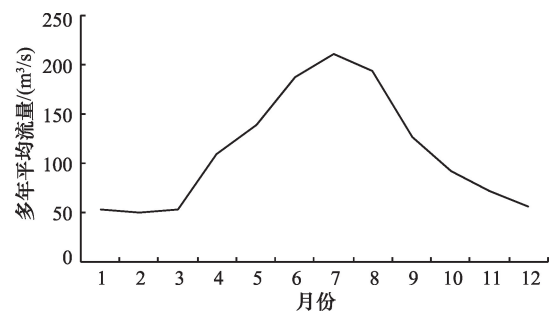


图6 开都河流域流量年内变化趋势

Figure 6 Monthly mean streamflow variation trend in the Kaidu River Basin

为了进一步查明径流变化的原因,本文选取开都河流域2000—2016年各个季节平均流量与气候要素和积雪面积数据进行了分析,结果显示(表5),春季气温与流量的相关性通过了0.05的显著水平检验,呈显著正相关,相关系数达0.6,春季气温的升高加速了积雪的消融,融雪水形成径流,但出山口流量对气温的敏感系数 $\varepsilon(T, Q)$ 的绝对值的最大值和气温对流量的贡献率的最大值都出现在夏季(1.41, 6.2%),即夏季气温变化1%将引起流量变化

2018年9月

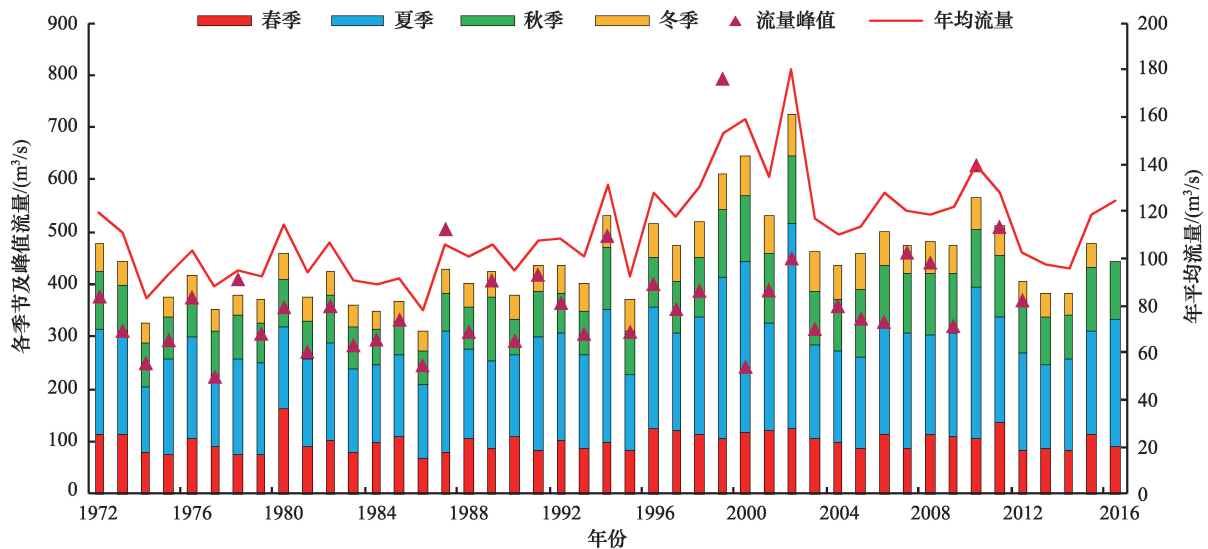


图7 1972—2016年开都河流域多年平均流量及峰值变化趋势

Figure 7 Annual &amp; peak streamflow variation trend in the Kaidu River Basin from 1972 to 2016

表5 2000—2016年流量与各气象积雪要素关系

Table 5 Relationship between annual streamflow and climatic variables &amp; SCA from 2000 to 2016

	春季			夏季			秋季			冬季		
	相关系数	敏感系数	贡献率	相关系数	敏感系数	贡献率	相关系数	敏感系数	贡献率	相关系数	敏感系数	贡献率
气温	0.60*	0.04	-3.17	0.19	1.41	6.20	0.19	-0.04	-1.26	0.37	-0.55	-6.51
降水	0.43	0.11	0.03	0.65**	0.50	3.97	-0.07	-0.02	0.73	-0.06	-0.02	0.25
积雪面积	0.48	0.59	-1.90	0.13	0.13	-5.18	-0.04	-0.30	-4.05	-0.19	-0.58	-0.75

注:\*\*、\*的相关系数分别通过0.01、0.05水平检验。

1.41%,这与夏季温度升高导致高山区永久性积雪与冰川加速消融有关。降水在春、夏季节与径流呈正相关,且在夏季二者相关性达到了极显著水平,相关系数达0.65( $p>0.01$ ),流量对降水的敏感系数和降水对流量的贡献率也都在夏季达到最大值。降水作为流域径流的重要补给来源,主要集中在夏季,且以液态降雨形式直接补给河川径流,与径流变化呈显著正相关关系;在秋冬季节二者呈微弱的负相关关系,一方面秋冬季节降水较少,另一方面,这期间的降水主要是以固态降雪形式,且降水往往伴随着降温过程,因此,降水与径流在秋冬季节呈负相关;积雪面积与径流在当年春夏季呈不显著正相关,秋冬季节呈不显著负相关关系。流量对积雪面积的敏感系数 $\varepsilon$  (SCA,Q)的最大值出现在春季(0.59%),即春季积雪面积变化1%将引起流量变化0.59%,积雪融水为春季径流的主要补给方式,积雪

面积的大小决定了山区水储量的变化;冬季径流对这三个要素的敏感程度均较低,这是由于冬季开都河流域平均气温都在0℃以下,基本不存在融雪水补给径流,降水也都是以降雪的形式落到地面形成积雪,冬季径流主要依靠地下水补给,故而受这三个要素影响较小。

从1972—2016年降水变化与出山口年平均流量变化趋势图来看(图8),降水与径流的相关性特征显著,年降水量与年平均流量变化趋势非常相似,峰值与谷值出现的年份也基本一致,以2013—2016年为例,随着降水的增多(19.2mm/a),河水流量也在显著升高,4年间年流量从97.14m³/s上升到124.17m³/s,而温度和SCA的变化趋势并不与之一致。

## 5 讨论

对开都河流域2000年以来的气候变化趋势分析发现,与近几十年温度变化趋势不一致的是,



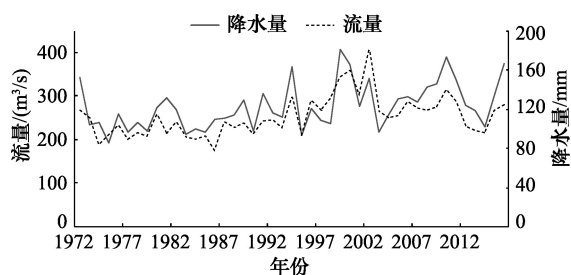


图8 1972—2016年降水量与流量趋势对比

Figure 8 Variation trend of annual precipitation and streamflow from 1972 to 2016

2000—2016年温度呈现出下降的趋势,但是,西北干旱区气候变化具有一定的复杂性,仅从短期内、个别角度很难准确揭示其变化过程及趋势,并且难以定论区域气候转型还是波动变化<sup>[37]</sup>,因此,仅十几年的气候数据并不能准确揭示流域气候变化的趋势。针对天山地区气候变化趋势,当前已有较成熟的研究结果,研究发现,自1998年以来天山地区温度一直处于高位震荡<sup>[38]</sup>,另外,Fu等<sup>[39]</sup>对开都河流域1961—2009年温度变化趋势分析发现,不同海拔不同季节温度变化趋势不一致,平原绿洲地区温度呈显著上升趋势,但山区变化趋势并不一致。基于此,2000年以来的十几年乃至未来的几十年开都河流域的气候是否会呈现出温度降低的趋势还难以定论,但当前温度上升的大趋势是可以肯定的。

气候变化不仅引起径流补给方式和水资源数量的改变,还会改变径流年内分配规律。受夏季降水增多的影响,开都河流域1972—2016年间流量峰值增大,但是流量峰值出现的日期却有所延后,峰值出现日期延后的趋势与天山山区最大径流出现时间提前的趋势并不一致<sup>[40]</sup>,这主要是由于开都河流域流量峰值主要出现在6—8月,这一季节主要是依靠降水补给,因此气候变化引起的融雪期提前对流量峰值出现的日期并无明显影响。

开都河流域径流变化机理较为复杂,影响因素众多,其中人为活动对径流变化的贡献仅占不到10%<sup>[41]</sup>。流域径流补给方式包括冰雪融水和降水,其中冰川融水仅占年出山口径流量15%左右<sup>[26]</sup>,对径流的影响较小,降水和融雪水是最主要的补给方式,积雪消融对气温变化敏感,因此,冬季积雪的增多和春夏温度的上升直接导致补给径流的融雪水

量增多,而年降水量与年平均流量变化趋势非常相似,降水尤其夏季降水的显著增加在很大程度上影响到流域年径流量。

## 6 结论

(1)2000—2016年间积雪覆盖率总体呈微弱上升趋势,年均SCA增幅约0.1%/a,最大和平均积雪覆盖率都呈增加的趋势,增幅分别为0.33%/a,0.12%/a,最小积雪覆盖率则呈减小趋势(-0.017%/a),其中春夏季节SCA呈减少趋势,秋冬季节呈增加趋势;1972—2016年间融雪期提前了10.35天,延迟了7.56天。

(2)1972—2016年,开都河流域年均温与各个季节平均气温都呈上升趋势,其中,夏季升温最为显著( $p > 0.01$ ),升温速率可达 $0.28^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;年降水量也呈极显著增加趋势( $p > 0.01$ ),夏季降水量显著增多( $p > 0.01$ ),增加速率约 $5.82\text{ mm}/10\text{a}$ 。相关性与敏感性分析结果均表明流域积雪面积受气温影响较大,二者相关系数与敏感系数均在春季达到最大值,分别为 $-0.71$ ( $p > 0.01$ )、 $-0.38$ ;降水与积雪面积在冬季相关性最高( $0.62$ , $p > 0.05$ )。

(3)1972—2016年间,开都河山区来水量呈增多趋势,年径流增幅约 $2.26\text{ 亿 m}^3/10\text{a}$ ,并流量峰值增大、出现日期有所延后。分析结果表明春季径流对积雪面积的变化响应敏感( $\varepsilon = 0.59$ ),夏季径流对气温( $\varepsilon = 1.41$ )和降水( $\varepsilon = 0.5$ )变化响应敏感。开都河流域山区温度升高和降水增加对径流的影响明显。

## 参考文献(References):

- [1] Chen Z S, Chen Y N. Effects of climate fluctuations on runoff in the headwater region of the Kaidu River in northwestern China[J]. *Front. Earth Sci.*, 2014, 8(2): 309–318.
- [2] Silvan R, Immerzeel W W, Pellicciotti F. Contrasting climate change impact on river flows from high-altitude catchments in the Himalayan and Andes Mountains[J]. *PNAS*, 2016, 113(33): 9222–9227.
- [3] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303–309.
- [4] Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 587–592.



2018年9月

- [5] Sun C, Yang J, Chen Y, *et al.* Comparative study of streamflow components in two inland rivers in the Tianshan Mountains, North-west China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 1-14.
- [6] Immerzeel W W, Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [7] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 71(1): 18-26. [Chen Y N, Li Z, Fang G H, *et al.* Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [8] Ji F, Wu Z H, Huang J P, *et al.* Evolution of land surface air temperature trend[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 462-466.
- [9] Jiang Yuanan, Chen Ying, Zhao Yizhou, *et al.* Analysis on changes of basic climate elements and extreme events in Xinjiang, China during 1961-2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 4(1): 20-29.
- [10] Zheng W L, Du J K, Zhou X B, *et al.* Vertical distribution of snow cover and its relation to temperature over the Manasi River Basin of Tianshan Mountains, Northwest China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(4): 403-419.
- [11] 张鹏, 李忠勤, 金爽, 等. 近30年来乌鲁木齐河源区空冰斗季节性积雪对气候变暖的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 158-163. [Zhang P, Li Z Q, Jin S, *et al.* The response of seasonal snow accumulation to the global warming in Kongbingdou basin during the past 30 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(2): 158-163.]
- [12] 陈敏, 高璐, 曹永强, 等. 2001-2014年阿克苏河流域山区积雪时空变化分析[J]. 水利水电学报, 2016, 35(9): 28-37. [Chen M, Gao L, Cao Y Q, *et al.* Spatio-temporal variation analysis of mountain snow cover in Aksu River basin during 2001-2014[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(9): 28-37.]
- [13] 李斐, 刘苗苗, 王水献. 2001-2013年开都河流域上游积雪时空分布特征及其对气象因子的响应[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1160-1158. [Li F, Liu M M, Wang S X. Change in snow coverage and responses to climate change from 2001 to 2013 in the upper reaches of Kaidu River Basin[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1160-1158.]
- [14] 邱冬梅. 基于MODIS的主要积雪参数反演及其应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011. [Qiu D M. The Inversion of Main Snow Parameter based on MODIS Data and Its Application[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2011.]
- [15] 赵文宇, 刘海隆, 王辉, 等. 基于MODIS积雪产品的天山年积雪日数空间分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1510-1517. [Zhao W Y, Liu H L, Wang H, *et al.* A study of spatial distribution of snow cover days in the Tianshan Mountains based on MODIS snow products[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(6): 1510-1517.]
- [16] 李宝富, 陈亚宁, 陈忠升, 等. 西北干旱区山区融雪期气候变化对流量的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1461-1470. [Li B F, Chen Y N, Chen Z S, *et al.* The effect of climate change during snowmelt period on streamflow in the mountainous Areas of North-west China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1461-1470.]
- [17] 董安青. 基于遥感方法的新疆积雪覆盖与气象因子的相关性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2009. [Dong A Q. Study on the Relevance of Snow Cover and Meteorological Factors of Xinjiang Based on Remote Sensing Methods[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2009.]
- [18] Li H, Tang Z, Wang J, *et al.* Synthesis method for simulating snow distribution utilizing remotely sensed data for the Tibetan Plateau [J]. *Apply Remote Sensing*, 2014, 8(16): 396-403.
- [19] Bi Y B, Xie H J, Huang C L, *et al.* Snow cover variations and controlling factors at upper Heihe River basin, Northwestern China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 6741-6762.
- [20] Wang W, Huang X D, Deng J, *et al.* Spatio-temporal change of snow cover and its response to climate over the Tibetan Plateau based on an improver daily cloud-free snow cover product[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 169-194.
- [21] Zheng W L, Du J K, Zhou X B, *et al.* Vertical distribution of snow cover and its relation to temperature over the Manasi River Basin of Tianshan Mountains, Northwest China[J]. *J. Geogr. Sci.*, 2017, 27(4): 403-419.
- [22] Adnan A T, Jan F A, Pierre C, *et al.* Comparative assessment of spatiotemporal snow cover changes and hydrological behavior of the Gilgit, Astore and Hunza River basins(Hindukush- Karakoram- Himalaya region, Pakistan) [J]. *Meteorology Atmospheric Physics*, 2016, 128(6): 793-811.
- [23] 唐志光, 王建, 王欣, 等. 近15年天山地区积雪时空变化遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 556-563. [Tang Z G, Wang J, Wang X, *et al.* Spatiotemporal variation of snow cover in Tianshan Mountains based on MODIS[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(3): 556-563.]
- [24] 周京武, 阿不力米提·阿不力克木, 毛炜峰, 等. 天山南坡清水河流域径流过程对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 685-690. [Zhou J W, Abulimiti A, Mao W Y, *et al.* The responses of the runoff processes to climate change in the Qingshuihe River watershed on the southern slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 685-690.]
- [25] 阿不力米提江·阿不力克木, 陈春艳, 玉苏甫·阿不都拉, 等. 2001-2012年新疆融雪型洪水时空分布特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 226-232. [Abulimitjan A, Chen C Y, Yusup A, *et al.* The temporal and spatial distribution features of snowmelt flood events in Xinjiang from 2001 to 2012[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 226-232.]

- [26] 蓝永超, 钟英君, 吴素芬, 等. 天山南、北坡河流出产径流对气候变化的敏感性分析—以开都河与乌鲁木齐河出产径流为例[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 712–718. [Lan Y C, Zhong Y J, Wu S F, et al. Sensitivity of mountain in runoff of rivers originated from the south slope and the north slope of the Tianshan Mountain to climate change—taking mountain runoff of Urumqi River and Kaidu River for example[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(6): 712–718. ]
- [27] Deng H J, Chen Y N, Wang H J, et al. Climate change with elevation and its potential impact on water resources in the Tianshan Mountains, Central[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 135: 28–37.
- [28] 彭秋燕. 开都河径流过程模拟及对气候变化响应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015. [Peng Q Y. The Simulation of the Kaidu River Runoff Process and the Study of the Response of the Kaidu River to the Climate Change[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015. ]
- [29] 柏玲, 刘祖涵, 陈忠升, 等. 开都河源流区径流的非线性变化特征及其对气候波动的响应[J]. 资源科学, 2017, 39(8): 1511–1521. [Bai L, Liu Z H, Chen Z S, et al. Runoff nonlinear variation and responses to climate fluctuation in the headwater region of the Kaidu River[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1511–1521. ]
- [30] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513–527. [Shen Y P, Su H C, Wang G Y, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(I): hydrological effect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513–527. ]
- [31] Zhang Y C, Li B L, Bao A M, et al. Study on snowmelt runoff simulation in the Kaidu River basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(1): 26–35.
- [32] 中国气象局气象数据中心. 中国气象数据网[EB/OL]. (2017–8–1) [2017–11–25]. [http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_MUL\\_DAY\\_V3.0.html](http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html). [Meteorological Data Center of the China Meteorological Administration. China Meteorological Data Network[EB/OL]. (2017–8–1) [2017–11–25]. [http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_MUL\\_DAY\\_V3.0.html](http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html). ]
- [33] Shrestha M, Wang L, Koike T, et al. Modeling the spatial distribution of snow cover in the Dudhkoshi region of the Nepal Himalayas [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(1): 204–222.
- [34] Kour R, Patel N, Krishna A P. Assessment of temporal dynamics of snow cover and its validation with hydro-meteorological data in parts of Chenab Basin, western Himalayas[J] *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(5): 1081–1094.
- [35] 黄艳艳. 雅砻江上游积雪面积变化与径流关系研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016. [Huang Y Y. Study on the Relationship between the Changes of Snow Cover Area and Runoff in Upper Reaches of Yalong River[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016. ]
- [36] Zheng H G, Zhang L, Zhu R R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin[J]. *Water Resource Research*, 2009, 45(7): 641–648.
- [37] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295–1304. [Chen Y Y, Li Z, Fan Y T, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295–1304. ]
- [38] Li Z, Chen Y, Li W. et al. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(24): 12345–12356.
- [39] Fu A H, Chen Y N, Li W H, et al. Spatial and temporal patterns of climate variations in the Kaidu River Basin of Xinjiang, Northwest China[J]. *Quaternary International*, 2013, 311(11): 117–122.
- [40] Berghuijs W R, Woods R A, Hrachowitz M, et al. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 583–586.
- [41] Chen Z S, Chen Y N, Li B F. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2013, 111(3–4): 537–545.

## Trends of snow cover and streamflow variation in Kaidu River and their influential factors

XIANG Yanyun<sup>1,2</sup>, CHEN Yaning<sup>2</sup>, ZHANG Qifei<sup>2,3</sup>, BIAN Wei<sup>2,3</sup>

(1. College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography,  
Chinese Academy of Science, Uruimqi 830011, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

**Abstract:** Water resources, a key factor, restricted economic and social development and ecological security in arid region of Northwest China. The water resources in arid area mainly come from snow melt water and mountain precipitation. Therefore, studies on the impact of climate on snow cover and runoff in arid region of Northwest China have a significant impact on the water resources management, ecological protection, and economic and social development. Based on MODIS data, the meteorological and hydrologic station data, the present investigation was conducted to analyze the trends of annual snow cover and streamflow variations in the Kaidu River and discuss the relationship between climate change, snow cover, and streamflow. We used Mann-Kendall test, Pearson correlational analysis method, and sensitivity analysis. We found that the total snow cover fraction showed a slightly increasing trend from 2000 to 2016 ( $-0.017\%/a$ ). The annual maximum snow cover increased but the annual minimum snow cover exhibited a decreasing trend. Seasonally, the snow cover decreased in spring and summer, increased in autumn and winter. In the past 45 years (1972-2016), the onset of snowmelt period documented a shift of 10.35 days earlier while ending date did move 7.56 days later. The correlation between snow cover and meteorological variables suggest that the snow cover was mostly affected by temperature in spring and was mostly influenced by precipitation in winter. Both the annual streamflow and peak streamflow exhibited an increasing trend from 2000 to 2016 in a speed of 226 million  $m^3$  per decade. The streamflow is sensitive to the variations of temperature and precipitation in summer, and to the variations of snow cover in spring. Increasing of temperature and precipitation is the primary factor leading the increasing of streamflow.

**Key word:** snow cover area; streamflow; climate change; Kaidu River