

文章编号:1007-7588(2012)08-1565-09

# 天山乌鲁木齐河源区夏季径流量与0℃层高度的关系

潘淑坤, 张明军, 王圣杰, 李小飞, 黄小燕

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:**采用1985年-2006年夏季天山乌鲁木齐河源区3个水文监测点(乌源1号冰川水文点、空冰斗水文点与总控制水文点)的日平均径流资料和乌鲁木齐探空站逐日高空大气0℃高度资料,应用统计方法定性与定量相结合地分析了22年来该区域夏季0℃层平均高度变化和日平均径流变化趋势及其相关性。研究表明:1号冰川水文点的0℃层高度和日平均径流的相关性最好,且日平均径流的变化趋势滞后0℃层高度变化,其次是总控制水文点,空冰斗水文点的相关性最差;日平均径流与超前2~3 d、持续3~4 d的0℃层高度累积值之间的相关系数最大。最后选取1号冰川水文点相关系数最高的序列进行回归分析,日平均径流与0℃层高度之间呈指数函数关系,以0℃层高度为因子,建立了日平均径流的非线性一元回归模型。

**关键词:**夏季;0℃层高度;日平均径流;乌鲁木齐河源区

## 1 引言

随着全球变暖,新疆自20世纪80年代以来,气温急剧上升,降水量增加<sup>[1-4]</sup>,大多数河流从1980年代中期至1990年代初年径流量呈增加趋势,尤其天山山区,其它地区也有不同程度的增加<sup>[5]</sup>。由于山区的降水增幅不大,平原增加的降水对径流贡献也很有限<sup>[6]</sup>,因此大部分河流径流增加与冰川融水增多有关<sup>[7-8]</sup>。新疆共发育有冰川1 8499条,总面积2 5342km<sup>2</sup>,冰储量2696km<sup>3</sup>,约占中国冰川总储量的48.23%<sup>[9]</sup>。近几十年来,新疆冰川经历着显著的加速退缩状态<sup>[10-11]</sup>。由于冰川区一般海拔较高,处于大气的中低层,所以冰川的积累与消融显著地受大气中低层各特性层气候变化的影响,尤其受夏季0℃层高度变化的影响<sup>[12]</sup>。在对流层中,气温随高度增加而降低,当地面气温上升至0℃以上时,高空则会出现0℃层所对应的海拔高度,即气象学上所说的0℃层高度。0℃层高度的变化反映高空冷气和暖气团的环流变化,因此0℃层高度是气象预报工作提前反应气温的一个有效指标,其变化趋势

总是提前于地面气温的变化趋势<sup>[13]</sup>。0℃层高度是大气探测的一个重要特性层,反映着大气对流层中下层的温度状况,该层的升降一定程度上影响山体地表0℃线的升降,进而影响山区水的冻融过程<sup>[14]</sup>。

乌鲁木齐河发源于中天山天格尔Ⅱ峰北坡,流域总面积4484km<sup>2</sup>,流域平均海拔3000m以上<sup>[13]</sup>。自20世纪80年代以来,乌鲁木齐河源区一直是中国西北地区河川径流研究的热点区域之一<sup>[2,15]</sup>。蓝永超等<sup>[16]</sup>就乌鲁木齐河出山径流对气候变化的敏感性进行了分析,径流总体上呈波动状上升态势。韩添丁等<sup>[17]</sup>在年时间尺度上研究了乌鲁木齐河径流与降水及冰川的变化情况。近年来,0℃层的地位受到重视,引起很多学者关注。毛炜峰等<sup>[18]</sup>定量分析了0℃层与夏季阿克苏河洪水的关系。王永莉等<sup>[19]</sup>在年代际和年际尺度上,分析了和田河夏季流量与区域0℃层高度变化的关系。目前,利用探空资料来探讨夏季0℃层高度变化对西北干旱区径流影响的工作较少,而把两者进行定量分析的工作相对更少<sup>[20]</sup>。1号冰川海拔较高,消融主要发生在夏季,为

收稿日期:2012-01-12;修订日期:2012-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:41161012);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(编号:NCET-10-0019);国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号:2010CB951003)。

作者简介:潘淑坤,女(满族),辽宁丹东人,硕士生,主要从事全球气候变化方面的研究。E-mail:pskwan@sina.com

通讯作者:张明军,E-mail:mjzhang2004@163.com

此,把夏季0℃层高度变化与乌鲁木齐河径流进行定性和定量的对比研究,可以丰富小流域河源区径流量与气象变化响应关系的认识,以期对西北内陆地区径流预报有所补益。基于此,本文以乌鲁木齐河源区日平均径流资料为依据对夏季0℃层高度变化与乌鲁木齐河源日平均径流的关系进行了定性分析与定量的分析,以期为今后的冰川融雪径流的预报与水资源利用提供理论依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

夏季(6月-8月)0℃层高度资料应用国家气象局提供的乌鲁木齐探空站1985年-2006年夏季6月-8月逐日08:00时和20:00时两个时次的探空观测资料,每日两次探空资料求平均作为日平均值。

河流径流为1985年-2006年连续22年乌鲁木齐河源区1号冰川水文点、空冰斗水文点和总控制水文点三个观测站的日平均径流(1996年因暴雨引起特大洪水,使总控和空冰斗水文点断面冲毁,缺少流量资料),这部分径流主要受自然降水和冰雪冻融过程影响。河源为天山乌鲁木齐河源1号冰川(简称1号冰川),在河源区,中国科学院天山冰川站一直开展有冰川、高山积雪、多年冻土等常年观测研究项目,并设有1号冰川水文点、空冰斗水文点和总控制水文点等3个水文监测点(图1),用于监测河源区不同特征下垫面的径流过程<sup>[7]</sup>。1号冰川水

文点设在离1号冰川末端300m的河道上,实施1号冰川冰雪径流的监测,断面海拔3659m,流域面积3.34km<sup>2</sup>,其中冰川面积1.74km<sup>2</sup>。空冰斗水文点设在1号冰川左侧,斗口朝南,进行高山区积雪、多年冻土融水径流的观测,断面海拔3805m,流域面积1.68km<sup>2</sup>。总控制水文点设在乌鲁木齐河源区大西沟和罗布道沟汇合处,监控乌鲁木齐河源区降水和7条冰川以及冰川周围高山积雪、多年冻土的总融水径流;总控制断面海拔3408m,流域面积28.9km<sup>2</sup>,其中冰川面积5.6km<sup>2</sup>。

### 2.2 研究方法

高空温度上升后并维持一段时间才能形成融雪(冰)径流,流域内山区冰雪融化转换为径流需要一定的停滞时间。为定量分析0℃层高度与日平均径流的关系,设计了如下计算方案<sup>[8]</sup>。

**2.2.1 0℃层高度时间累积序列的建立** 首先对0℃层高度进行标准化处理,然后对每个基本0℃层高度序列 $X_i$ 作步长分别取0d、1d、2d、3d、4d的前向平均,建立5组时间累积序列 $X_{i,j}$ ,变换后的时间累积序列 $X_{i,j}$ 中的元素与原序列 $X_i$ 中的元素对应关系如下:

$$X_{i,j} = (X_{i-j+1} + X_{i-j+2} + \dots + X_i) / j$$

$$(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

式中 $i$ 表示样本序号; $n$ 表示样本总数; $j$ 表示时间累积序列号;显然对于时间累积序列 $X_{i,j}$ ,当 $j=1$ 时,第1个累积序列,即累计1d,实际上就是基本序列 $X_i$ ,当 $j=3$ 时,表示第3个累积序列,即累计3d,是前2d及当天共计3d的平均值序列。

**2.2.2 0℃层高度序列与日流量序列的前向交叉相关系数** 对每个0℃层高度时间累积序列,在计算其与日流量的相关系数时,分别计算了0℃层高度序列超前步长不等的前向交叉相关系数,前向交叉步长 $k$ 分别取0、1、 $\dots$ 、6d。 $X_{i,k}$ 为0℃层高度序列; $Y_i$ 为流量序列; $R_{j,k}$ 为相关系数;则有:

$$R_{j,k} = \text{Cor}(X_{i,j}, Y_i)$$

$$(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4, 5; k=0, 1, 2, \dots, 7-j) \quad (2)$$

式中 $\text{Cor}(X, Y)$ 算符表示求两样本序列相关系数; $i, j, n$ 含义同前; $k$ 表示0℃层高度序列的前向交叉步长, $k=1$ 时,指0℃层高度序列相对于日流量序列超前步长为1d,实际上就是计算两序列的同步相关系

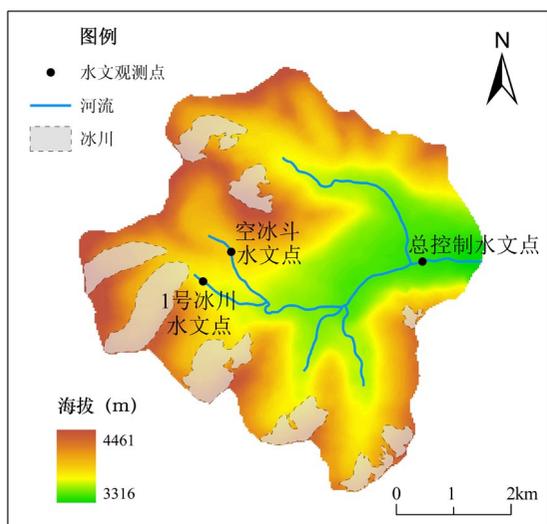


图1 乌鲁木齐河源区3个水文监测点位置

Fig.1 Three hydrological observation stations at the headwater of the Urumqi River

2012年8月

数。例如,  $R_{4,3}$  表示 0℃层高度的第 4 个时间累积序列表对于日流量序列步长为 3d 的前向交叉相关系数。

根据  $R_{j,k}$  ( $j=1, 2, 3, 4, 5; k=0, 1, 2, \dots, 6-j$ ), 则可以分析出 0℃层高度提前几天的变化与日流量之间有最高的相关系数, 还能够分析 0℃层高度的空间分布差异与日流量之间的关系。

### 3 0℃层高度与乌鲁木齐河源区日平均径流的关系

#### 3.1 0℃层高度与乌鲁木齐河源区径流的年际变化

图 2 为乌鲁木齐河源区径流与 0℃层高度的年际变化趋势示意图。由于 3 个水文点集水区下垫面的差异, 使各水文点径流量的变化呈现出不同的变化趋势, 从各水文点年平均径流的变化过程(图 2) 来看(1996 年因暴雨引起特大洪水, 使总控和空冰斗水文断面冲毁, 缺少流量资料), 1 号冰川水文点、空冰斗水文点和总控制水文点径流都呈上升趋势, 其气候倾向率分别为  $0.007\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ 、 $0.005\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$  和  $0.011\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ 。1 号冰川水文点和空冰斗水文点径流上升趋势不明显, 振幅变化也不大, 而总控制水文点径流上升趋势较明显, 且振幅变化较大。从图 2d 可以看出, 0℃层高度从 1985 年-2006 年表现出增加趋势, 其气候倾向率为  $7.917\text{m/a}$ , 增加较明显, 振幅变化也较大。

#### 3.2 0℃层高度与乌鲁木齐河源区日平均径流的变化

对乌鲁木齐河源区水文站点 1985 年-2006 年的日平均径流进行线性回归分析, 结果表明, 1 号冰川水文点的日平均径流除 1990 年和 2004 年-2005 年略有下降之外, 其他年份均呈上升趋势, 并且上升趋势明显。空冰斗水文点, 1985 年、1987 年和 1991 年-2002 年日平均径流表现为下降之势, 其中 1992 年-1996 年、1998 年和 2002 年下降幅度较大; 而 1986 年、1988 年-1990 年和 2003 年-2006 年却呈上升趋势, 以 2003 年、2004 年上升趋势最为明显。总控制水文点的日平均径流在 1990 年、1992 年与 2004 年-2005 年略有下降, 1995 年几乎没有变化, 其他年份均呈上升趋势。值得说明的是径流增加趋势明显, 而径流增加的主要原因是高山区降水的显著增加和强烈的升温过程导致了冰川的大量消融<sup>[17]</sup>, 因而三个水文点径流出现减少或变化不明显

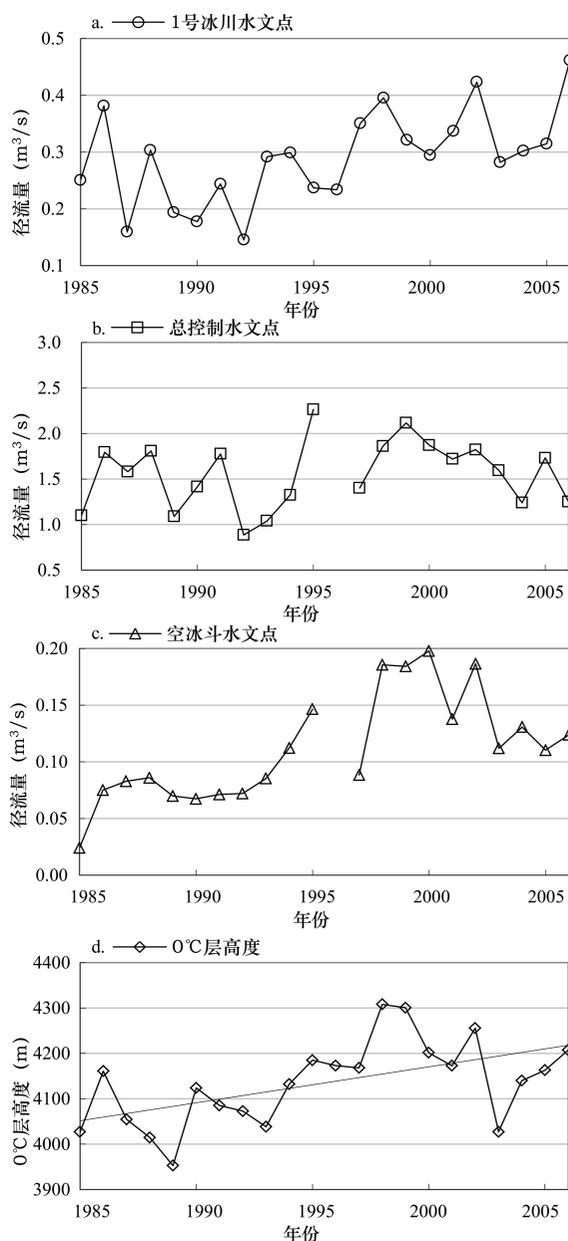


图 2 乌鲁木齐河源区径流与 0℃层高度的年际变化趋势  
Fig.2 Interannual variations of 0℃ isotherm height and streamflow at the headwater of the Urumqi River

趋势的原因可能是降水的减少和升温过程不明显所致。

对乌鲁木齐探空站 1985 年-2006 年的 08:00 时和 20:00 时的 0℃层高度做平均值并进行线性回归分析, 结果表明: 除 1997 年 0℃层高度略有下降和 1990 年变化不明显以外, 1985 年-1989 年和 1998 年-2006 年均呈上升趋势, 尤其以 2006 年上升趋势最为明显, 且振幅较大。这主要是由于 0℃层是高

空大气的一个特性层,高空大气的温度随大气的运动变化非常剧烈,0℃层高度的变化振幅也表现的非常明显<sup>[13]</sup>。因此1997年0℃层平均高度略有下降可能是因为当年夏季气温总体呈现下降的趋势,而1990年变化不明显可能是因为当年夏季气温变化比较平稳,因而总体变化趋势不显著。将0℃层高度与乌鲁木齐河源区日平均径流进行对比,分析其变化趋势时发现,0℃层高度与乌鲁木齐河源区日平均径流的变化趋势基本相同,但乌鲁木齐河源区日平均径流的趋势滞后于0℃层高度的变化,这是因为当气温上升至一定程度,上年度积累的冰雪开始融化,使乌鲁木齐河源区河水流量增加。当0℃层高度波动较大时,相应的近地面气温变化也较大,反映在融雪量的结果就是乌鲁木齐河源区日流量波动较大。由于把每年的乌鲁木齐0℃层高度和乌鲁木齐河源区日平均径流进行分析比较繁琐,因此本研究以2006年为例,对乌鲁木齐0℃层高度和乌鲁木齐河源区日平均径流进行详细的分析(见图3)。

2006年6月(图3a),0℃层高度呈增加趋势,其气候倾向率为24.66 m/d,且振幅较大;1号冰川水文点、总控制水文点和空冰斗水文点的日平均径流也均呈上升趋势,气候倾向率分别为0.010 m<sup>3</sup>/(s·d),0.025 m<sup>3</sup>/(s·d)和0.002 m<sup>3</sup>/(s·d),尤其以1号冰川水文点上升趋势最为明显。7月(图3b),0℃层高度略有上升,气候倾向率为11.17m/d;1号冰川水文点的日平均径流也表现为略微上升,气候倾向率为0.006m<sup>3</sup>/(s·d)。由于1号冰川水文点的日流量主要来自冰川融水,0℃层高度越高,则说明地面气温越高,0℃层高度上升趋势不明显,表明地面气温上升也不明显。因此,当冰川消融不明显时,日平均径流上升趋势也不高;空冰斗水文点趋势变化不明显,但振幅较大。空冰斗水文点产生径流的时间主要集中于5月-8月,其他时间产生

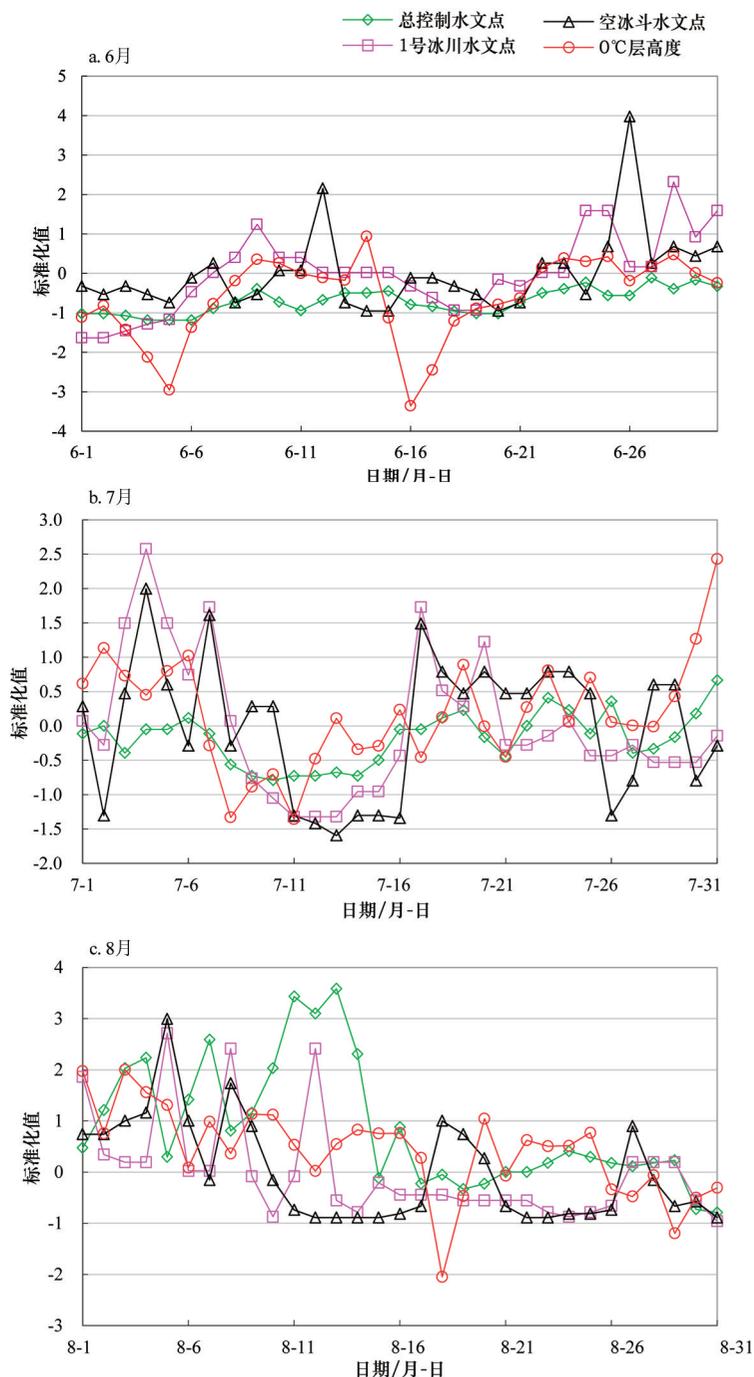


图3 2006年6月、7月、8月0℃层高度与乌鲁木齐河源区日平均径流  
Fig.3 0℃ isotherm height and the average daily streamflow at the headwater of the Urumqi River in June, July and August, 2006

的降水主要以冰雪的形式积累下来,到下一年消融期产生冰雪融水形成径流,因此本年度的降水也在一定程度上影响下一年的径流量。如果上一年的累积降水少,则下一年的径流量也会有所减少;总控制水文点的日平均径流呈下降趋势,其日平均径

2012年8月

流源自于1号冰川水文点和空冰斗水文点汇合的日流量,当径流增加量不足以抵消蒸发量时,总控制水文点的径流量就会减少。8月(图3c),0℃层高度呈下降趋势,气候倾向率为 $-30.85\text{ m/d}$ ,三个水文点的日平均径流也呈下降趋势,气候倾向率分别为 $-0.031\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ , $-0.026\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 和 $-0.006\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 。0℃层高度下降,说明地面气温下降,进而导致冰雪融水减少,因此1号冰川水文点和空冰斗水文点的日平均径流呈下降趋势。而总控制水文点的日平均径流是由1号冰川水文点和空冰斗水文点的日流量汇至而成的,主要受制于两个支流的影响,因而也随支流的变化而变化,最终导致总控制水文点的日平均径流也表现为下降趋势。

### 3.3 0℃层高度时间累积与日平均径流的相关性

本研究的水文监测点包括了冰川区与非冰川区等不同的下垫面条件,对于河源区的径流来源具有较好的代表性。为了分析乌鲁木齐河源区不同下垫面背景下的日平均径流与0℃层高度的相关性差异,以8月为例分别计算了0℃层高度的不同时间累积值与3个水文监测点日平均径流之间的关系(表1)。

由表1可见,不同下垫面条件下日平均径流序列与0℃层高度序列的相关性存在着明显的差异。1号冰川水文点的二者的相关性最好,绝大部分通

过了0.01显著性检验,只有1993年的相关性略低,但也通过了0.05显著性检验。空冰斗水文点的日平均径流序列与0℃层高度序列的相关性最差,仅2005年通过了0.01显著性检验,绝大部分没有通过显著性检验。总控制水文点的日平均径流序列与0℃层高度序列的相关性介于1号冰川水文点与空冰斗水文点之间,绝大部分能通过0.05显著性检验,只有1992年的相关性很低,为负值。

1号冰川水文点的0℃层高度与乌鲁木齐河日平均径流的相关性虽最好,但是最大相关系数的累计天数却并不一致。1985年-1987年、1990年、1995年、1998年、2001年和2006年0℃层高度与乌鲁木齐河源日平均径流的相关系数随累计天数的增加而增加,累计5d时日平均径流与0℃层高度的相关系数最大(由于样本数量有限,再继续计算累计天数的相关系数时,样本数量逐渐减少而不具有代表性)。而2002年累计1d就达到最大相关系数,1992年-1994年、1997年和2004年-2005年0℃层高度序列提前1d,累计2d移动平均序列与日平均径流的相关系数最高,累计2d后相关系数开始下降;1988年-1989年、1996年、2000年和2003年累计3d达到最大相关系数,1991年和1999年累计4d达到最大相关系数。在总控制水文点,1987年和1992年累计1d就达到最大相关系数,1988年-1991年、

表1 乌鲁木齐河源区8月不同水文监测点日平均径流与0℃层高度序列的最大相关系数

Table 1 Maximum correlation coefficients between the 0℃ isotherm height in August and the average daily streamflow of the Urumqi River at the three hydrologic observation stations

年份	1号冰川	空冰斗	总控制	年份	1号冰川	空冰斗	总控制
1985	$R_5=0.562^{**}$	$R_5= 0.338$	$R_5= 0.503^{**}$	1996	$R_5=0.725^{**}$	-	-
1986	$R_5=0.871^{**}$	$R_1= 0.097$	$R_1= 0.904^{**}$	1997	$R_5=0.639^{**}$	$R_1= 0.196$	$R_1=0.795^{**}$
1987	$R_5=0.710^{**}$	$R_1= -0.193$	$R_5= 0.715^{**}$	1998	$R_5=0.634^{**}$	$R_5= 0.195$	$R_1=0.049$
1988	$R_5=0.594^{**}$	$R_1= -0.184$	$R_5= 0.504^{**}$	1999	$R_1= 0.551^{**}$	$R_1= 0.181$	$R_5=0.393$
1989	$R_5=0.709^{**}$	$R_1= -0.002$	$R_5= 0.471^{**}$	2000	$R_5=0.742^{**}$	$R_1= 0.226$	$R_1=0.192$
1990	$R_5=0.757^{**}$	$R_5= 0.391^*$	$R_5= 0.812^{**}$	2001	$R_5=0.712^{**}$	$R_1= -0.060$	$R_1=0.517^{**}$
1991	$R_1=0.599^{**}$	$R_5= -0.278$	$R_5= 0.410^*$	2002	$R_1=0.565^{**}$	$R_5= 0.461^*$	$R_5=0.494^*$
1992	$R_5=0.743^{**}$	$R_1= 0.146$	$R_5= -0.219$	2003	$R_5=0.801^{**}$	$R_5= -0.277$	$R_5=0.087$
1993	$R_5=0.402^*$	$R_5= 0.313$	$R_1= 0.418^*$	2004	$R_5=0.729^{**}$	$R_1= 0.254$	$R_1=0.589^{**}$
1994	$R_5=0.703^{**}$	$R_1= -0.298$	$R_1= 0.312$	2005	$R_5=0.724^{**}$	$R_5= 0.577^{**}$	$R_5=0.520^{**}$
1995	$R_5=0.653^{**}$	$R_5= -0.254$	$R_5= 0.494^*$	2006	$R_5=0.595^{**}$	$R_5= 0.398^*$	$R_5=0.465^*$

注: \*表示通过0.05显著性检验, \*\*表示通过0.01显著性检验, -表示缺值。

1999年、2002年-2003年和2005年0℃层高度序列中提前2d, 累计3d移动平均序列与日平均径流的相关系数最高, 之后开始下降; 1986年、1993年-1994年、1997年、2001年和2004年0℃层高度序列中提前3d, 累计4d移动平均序列与日平均径流的相关系数最高, 之后减小; 2000年0℃层高度与日平均径流的相关系数先减小后升高, 在累计5d移动平均时达到最高。1985年、1995年和2006年日平均径流与0℃层高度的相关系数随着累计天数的增加而增加, 累计5d时乌鲁木齐河日平均径流与观测站0℃层高度的相关系数最大。因为空冰斗水文点的0℃层高度与日平均径流的相关性很低, 因此日平均径流序列与0℃层高度序列的向前交叉相关系数变化规律就不予以阐述。

6月和7月的日平均径流序列与0℃层高度序列的相关性变化与8月大致相同, 1号冰川水文点的日平均径流序列与0℃层高度序列相关性最好, 其次是总控制水文点, 空冰斗相关性最差。但也有个别年份相关性与之不同, 如: 1997年的7月总控制水文点的日平均径流与0℃层高度的相关性高于1号水文点; 2002年和2004年的6月空冰斗的日平均径流与0℃层高度的相关性高于总控制水文点, 但低于1号水文点等。

综上所述, 1号冰川水文点的日平均径流序列与0℃层高度序列的相关性最好, 其次是总控制水文点, 相关性最差的是空冰斗水文点。1号冰川水文点位于离1号冰川末端300m的河道上, 径流主要来源于冰雪融水, 冰雪的消融主要受气温的影响, 0℃层高度的变化总是提前于地面气温的变化, 因此0℃层高度越高, 地面气温越高, 冰雪消融产生的径流越多, 1号冰川水文点的径流也就越大; 因此, 1号冰川水文点受0℃层高度的影响最大。总控制水文点位于乌鲁木齐河源区大西沟和罗布道沟汇合处, 径流主要来源于乌鲁木齐河源区降水和冰川及冰川周围高山积雪、多年冻土的总融水。当0℃层高度升高, 冰雪及多年冻土融水增多, 河流径流补给量也增多, 因为总控制水文点的径流补给除了冰雪融水外, 还有降水量的补给, 因此0℃层高度序列与总控制水文点日平均径流序列的相关性没有1号冰川水文点好。空冰斗水文点位于1号冰川左侧,

径流主要来源于高山区积雪、多年冻土融水, 而高山区积雪主要是本年10月至翌年4月的降水积累, 若降水积累少, 那么积雪融水就少, 河流径流减少。因此空冰斗水文点的径流主要取决于本年10月至翌年4月的降水积累, 即与0℃层高度序列的相关性最差。

## 4 日平均径流回归模型的建立与效果分析

### 4.1 以0℃层高度为因子的日平均径流回归模型

由于空冰斗水文点和总控制水文点的日平均径流与0℃层高度的相关性系数检验没有1号冰川水文点的相关性检验明显, 1号冰川水文点的日平均径流序列与0℃层高度序列的相关性最高, 因此对1号冰川水文点1985年-2006年的日平均径流和0℃层高度进行回归分析。分别选取每年向前移动平均序列与乌鲁木齐河日平均径流相关系数最高的序列进行回归分析。根据文献[22]指出的, 流量与温度在旬、月的时间尺度上呈指数函数关系。因此, 选择指数函数回归模型:

$$Y(x) = a \cdot e^{b \cdot x} \quad (3)$$

式中 $x$ 为0℃层高度因子;  $a$ 、 $b$ 为回归方程系数;  $Y(x)$ 为回归日平均径流。

通过回归分析, 得到每年6、7、8月各月的日平均径流0℃层高度与1号冰川水文点的日平均径流回归方程系数及相关系数( $r^2$ ), 见表2。

从表2可以看出, 除了1985年-1987年以及1992年之外, 6月份0℃层高度与日平均径流相关性较好。在7月份, 1987年、1990年、1995年和1997年0℃层高度与日平均径流相关系数很小, 相关性较低, 而在其他年份相关性很好。8月份0℃层高度与日平均径流相关性都比较好, 相关系数在2003年达到最大。

运用SPSS软件, 对非线性一元回归方程进行显著性检验(F检验), 相关系数来表示统计量F, 通过对以上回归模型的显著性检验发现: 在1号冰川水文点, 1985年-2006年的0℃层高度与日平均径流的回归模型均能通过方程的显著性检验。这说明, 0℃层高度序列与日平均径流之间存在非线性关系, 用0℃层高度序列对乌鲁木齐河源日平均径流

表2 1号冰川水文点日平均流量与0℃层高度回归系数及相关系数

Table 2 Regression coefficients and correlation coefficients between the average daily streamflow at the Glacier No.1 Observation Station and the 0℃ isotherm height

年份	6月			7月			8月		
1985	$a=0.0126$	$b=0.0005$	$r^2=0.031$	$a=0.0002$	$b=0.0018$	$r^2=0.668$	$a=0.0020$	$b=0.0011$	$r^2=0.254$
1986	$a=0.0002$	$b=0.0014$	$r^2=0.194$	$a=0.0004$	$b=0.0015$	$r^2=0.265$	$a=2E-06$	$b=0.0029$	$r^2=0.587$
1987	$a=0.0269$	$b=0.0002$	$r^2=0.025$	$a=0.0050$	$b=0.0009$	$r^2=0.160$	$a=0.0005$	$b=0.0013$	$r^2=0.629$
1988	$a=4E-08$	$b=0.0037$	$r^2=0.758$	$a=0.0063$	$b=0.0010$	$r^2=0.658$	$a=0.0007$	$b=0.0014$	$r^2=0.246$
1989	$a=4E-11$	$b=0.0058$	$r^2=0.618$	$a=0.0001$	$b=0.0018$	$r^2=0.741$	$a=0.0008$	$b=0.0014$	$r^2=0.425$
1990	$a=0.0007$	$b=0.0014$	$r^2=0.621$	$a=0.0127$	$b=0.0006$	$r^2=0.015$	$a=1E-08$	$b=0.0037$	$r^2=0.562$
1991	$a=2E-09$	$b=0.0044$	$r^2=0.562$	$a=0.0002$	$b=0.0017$	$r^2=0.400$	$a=0.0084$	$b=0.0007$	$r^2=0.388$
1992	$a=0.0042$	$b=0.0007$	$r^2=0.101$	$a=0.0009$	$b=0.0013$	$r^2=0.766$	$a=0.0016$	$b=0.0011$	$r^2=0.471$
1993	$a=0.0008$	$b=0.0014$	$r^2=0.399$	$a=0.0003$	$b=0.0017$	$r^2=0.368$	$a=0.0423$	$b=0.0004$	$r^2=0.156$
1994	$a=0.0031$	$b=0.0010$	$r^2=0.388$	$a=0.0004$	$b=0.0016$	$r^2=0.437$	$a=0.0096$	$b=0.0008$	$r^2=0.484$
1995	$a=0.0018$	$b=0.0011$	$r^2=0.527$	$a=0.0801$	$b=0.0002$	$r^2=0.017$	$a=0.0005$	$b=0.0015$	$r^2=0.485$
1996	$a=0.0009$	$b=0.0013$	$r^2=0.420$	$a=1E-05$	$b=0.0023$	$r^2=0.747$	$a=0.0030$	$b=0.0009$	$r^2=0.465$
1997	$a=0.0005$	$b=0.0014$	$r^2=0.684$	$a=0.0543$	$b=0.0005$	$r^2=0.123$	$a=0.0197$	$b=0.0007$	$r^2=0.426$
1998	$a=0.0004$	$b=0.0015$	$r^2=0.616$	$a=6E-05$	$b=0.0020$	$r^2=0.608$	$a=3E-05$	$b=0.0021$	$r^2=0.538$
1999	$a=0.0002$	$b=0.0017$	$r^2=0.446$	$a=0.0002$	$b=0.0017$	$r^2=0.699$	$a=0.0029$	$b=0.0010$	$r^2=0.392$
2000	$a=5E-05$	$b=0.0019$	$r^2=0.459$	$a=0.0171$	$b=0.0007$	$r^2=0.637$	$a=0.0108$	$b=0.0008$	$r^2=0.510$
2001	$a=0.0018$	$b=0.0012$	$r^2=0.700$	$a=0.0129$	$b=0.0008$	$r^2=0.322$	$a=2E-05$	$b=0.0022$	$r^2=0.480$
2002	$a=0.0002$	$b=0.0017$	$r^2=0.634$	$a=0.0233$	$b=0.0007$	$r^2=0.524$	$a=0.1936$	$b=0.0002$	$r^2=0.347$
2003	$a=0.0058$	$b=0.0009$	$r^2=0.338$	$a=0.0159$	$b=0.0007$	$r^2=0.402$	$a=0.0006$	$b=0.0015$	$r^2=0.717$
2004	$a=5E-05$	$b=0.0021$	$r^2=0.637$	$a=0.0212$	$b=0.0007$	$r^2=0.393$	$a=0.0012$	$b=0.0012$	$r^2=0.545$
2005	$a=0.0025$	$b=0.0011$	$r^2=0.599$	$a=0.0017$	$b=0.0012$	$r^2=0.648$	$a=0.0090$	$b=0.0009$	$r^2=0.519$
2006	$a=0.0014$	$b=0.0012$	$r^2=0.610$	$a=0.0051$	$b=0.0010$	$r^2=0.624$	$a=0.0043$	$b=0.0012$	$r^2=0.333$

进行估计是可行的。因此可以认为,当用0℃层高度作为因子,对乌鲁木齐河的日平均径流进行回归模型的估计时,准确性较高。

#### 4.2 日平均径流模型的回归效果分析

从模型回归系数,即回归序列与实测序列的相关系数来定量地分析回归模型的水平高低。图4是1号冰川水文点2006年6、7、8月的实测序列与回归序列的曲线变化。从图4a可以看出,实测序列与回归序列的曲线形状及趋势非常接近,相关系数达到0.744,均方误差为0.009,很好的拟合出了1号冰川水文点6月的逐日径流的变化特征。7月的回归序列也比较接近实测日径流序列(图4b),相关系数为0.724,均方误差是0.029,基本拟合出了7月逐日径流的变化趋势。从图4c可见,8月的回归序列没有很好的拟合出实测日径流序列,相关系数只有0.366,相关性较差,均方误差达到0.123。由此可知

0℃层高度与日平均径流相关性越高,均方误差越小,回归序列拟合效果越好。

## 5 主要结论

(1)乌鲁木齐气象观测站08:00时和20:00时的0℃层平均高度除1997年略有下降和1990年变化不明显以外,其他几年均呈上升趋势。1号冰川水文点、空冰斗水文点和总控制水文点的日平均径流的变化趋势各不相同,1号冰川水文点的日平均径流在1990年和2004年-2005年略有下降;空冰斗水文点,1985年、1987年和1991年-2002年日平均径流呈下降趋势;总控制水文点的日平均径流在1990年、1992年与2004年-2005年略有下降和1995年几乎没变,其他年份呈上升趋势。

(2)1号冰川水文点、空冰斗水文点和总控制水文点在6月、7月和8月的日平均径流序列与0℃层高度序列的相关性大致相同。1号冰川水文点的日

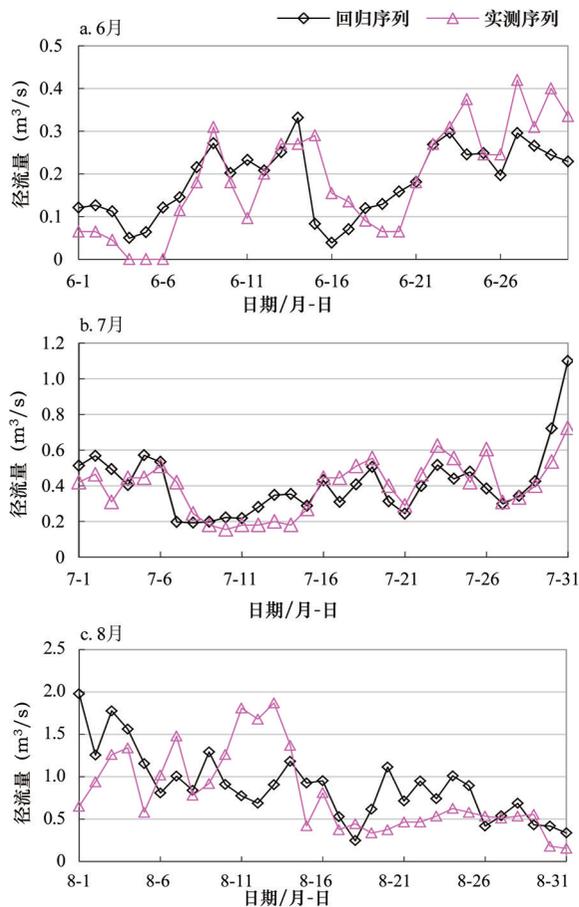


图4 2006年6月、7月、8月1号冰川水文点  
日平均径流的回归曲线

Fig.4 Forecast discharge of Glacier No.1 hydrological observation station in June, July and August, 2006

平均径流序列与 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度序列的相关性最好,绝大部分通过了0.01显著性检验,其次是总控制水文点,空冰斗水文点的相关性最差。三个水文点的 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度序列与日平均径流序列的最大相关系数的累计天数大部分是3d或4d。

(3) 1985年–2006年,1号冰川水文点 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度序列与日平均径流序列的回归模型均能通过方程的显著性检验,表明 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度序列与日平均径流之间存在非线性关系。1号冰川水文点与对流层中低层自由大气夏季 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度变化具有很好的响应,因此,用 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度序列对乌鲁木齐河源日平均径流进行估计的方法在实际工作中是可行的,但这种响应的机制有必要进一步深入研讨。

#### 参考文献 (References):

- [1] 韩萍,薛燕,苏宏超.新疆降水在气候转型中的信号反应[J].冰川冻土,2003,25(2):179–182.
- [2] 吴素芬,刘志辉,韩萍,等.气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J].冰川冻土,2006,28(5):703–706.
- [3] 贾宏涛,赵成义,巴特儿·巴克,等.新疆气候变化影响的观测事实及其对农牧业生产的影响[J].干旱区资源与环境,2009,23(11):72–76.
- [4] 蓝永超,沈水平,苏宏超,等.全球变暖情景下新疆降水的变化[J].干旱区资源与环境,2008,22(10):66–72.
- [5] 张国威,吴素芬,王志杰.西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映[J].冰川冻土,2003,25(2):183–187.
- [6] 杨莲梅.新疆极端降水的气候变化[J].地理学报,2003,58(4):577–583.
- [7] 龚原,袁玉江,何清.气候变暖及人类活动对北疆中小河流降水径流关系的影响[J].中国沙漠,2003,23(5):569–572.
- [8] 高鑫,张世强,叶柏生,等.1961–2006年叶尔羌河上游流域冰川融水变化及其对径流的影响[J].冰川冻土,2010,32(3):445–454.
- [9] 刘慧明,荀斌,董孝斌,等.新疆冰川消融对气候变化的响应及应对策略[J].生态经济,2010,(2):176–178.
- [10] 马丽娟,赵景峰,张宏俊,等.气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响[J].干旱区地理,2010,33(2):210–216.
- [11] 王圣杰,张明军,李忠勤,等.近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应[J].地理学报,2011,66(1):38–46.
- [12] 张广兴,杨莲梅,杨青.新疆43a来夏季 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度变化和突变分析[J].冰川冻土,2005,27(3):376–380.
- [13] 宫恒瑞,石玉,冯志敏.春季融雪期 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度与乌鲁木齐河径流量的关系[J].干旱区研究,2010,27(1):67–74.
- [14] 张广兴.新疆夏季 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度变化对河流年径流量的影响[J].地理学报,2007,62(3):279–290.
- [15] 李忠勤,韩添丁,井哲帆,等.乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40a观测事实[J].冰川冻土,2003,25(2):117–124.
- [16] 蓝永超,钟英君,吴素芬,等.天山南、北坡典型河流出山径流对气候变化响应的分析对比[J].中国沙漠,2011,31(1):254–260.
- [17] 韩添丁,叶柏生,丁永建,等.乌鲁木齐河流域径流增加的事实分析[J].冰川冻土,2005,27(5):655–659.
- [18] 毛伟峰,吴钧,陈春艳. $0^{\circ}\text{C}$ 层高度与夏季阿克苏河洪水的关系[J].冰川冻土,2004,26(6):697–704.
- [19] 王永莉,玉苏甫·阿布都拉,马宏武,等.和田河夏季流量对区域 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度变化的响应[J].气候变化研究进展,2008,4(3):151–155.
- [20] 张广兴,孙淑芳,赵玲,等.天山乌鲁木齐河源1号冰川对夏季 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度变化的响应[J].冰川冻土,2009,31(6):1057–1062.
- [21] 韩添丁,叶柏生,李向应,等.乌鲁木齐河源径流电导率和TDS的变化特征[J].冰川冻土,2009,31(4):759–765.
- [22] 杨针娘,刘新仁,曾群柱,等.中国寒区水文[M].北京:科学出版社,2000.

## Relationship between Streamflow in Summer at the Headwaters of Urumqi River in the Tianshan Mountains and the 0°C Isotherm Height

PAN Shukun, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, LI Xiaofei, HUANG Xiaoyan

(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Urumqi River originates in northern slope of the Tianger Range of Tianshan Mountains. Many previous studies pay more attention to the river runoff of Urumqi River rather than the impacts of the change of 0°C isotherm height in summer on runoff. Therefore, based on the observed materials of daily 0°C isotherm height in summer from meteorological stations and the average daily streamflow materials during 1985-2006 from three hydrological observation stations in the headwater of Urumqi River, the paper has analyzed the 0°C isotherm height change and average daily runoff variety trend and its correlation with statistical methods. The results show that: 1) Streamflow of Glacier No.1 hydrological observation station, Ice-free Cirque hydrological observation station and Master Control hydrological observation station kept increasing during 1985-2006, and the trend rates of them are  $0.007\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ,  $0.005\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$  and  $0.011\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$  respectively. At the same time, the average height of 0°C isotherm increased by 7.917m/a. Besides, the average daily streamflow presents different change trends at the three stations; 2) The correlation between 0°C isotherm height and average daily streamflow at Glacier No.1 hydrological observation station is the best, but the change of the latter is lagging behind that of the former; Master Control hydrological observation station and Ice-free Cirque hydrological observation station respectively have the second and the worst correlation; 3) The correlation coefficient between the average daily streamflow and 0°C isotherm height accumulated value under the condition of 2~3 days ahead and 3~4 days' continuing is the largest; 4) The best regression models are gained by using the time series of the 0°C isotherm height and the average daily streamflow of the Urumqi River, and they present a relation of exponent function.

**Key words:** Summer; 0°C isotherm height; Average daily streamflow; Urumqi River