

文章编号: 1000-0240(2011)06-1243-08

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川昼、夜径流变化特征

高明杰, 韩添丁, 叶柏生, 焦克勤

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2001—2005 年消融期的水文气象实测资料, 分析了河源区径流量的昼、夜变化特征, 并对径流变化过程与气温、降水等关系进行了相关分析. 结果表明: 从 5 月份消融初期开始, 昼、夜平均流量都较小, 随着强消融期的到来, 迅速增大, 到消融期后期(8 月份末), 又逐渐变小. 就年际相同月份昼(夜)平均流量相比而言, 不确定性较大; 年内消融季节各月昼、夜平均径流的变化不同: 5 月份基本没有昼夜变化, 从 6 月份昼夜变化增大, 而且径流最大值出现在 16:00—18:00, 最小径流发生在 9:00—10:00. 消融季节各月典型晴朗天气下的径流延迟情况是: 6 月份最大径流比最高气温延迟 1~2 h, 7 月基本没有延迟, 8 月份延迟 2~3 h; 6—8 月份的昼、夜平均径流量比率都大于 1(除 2002 年 6 月), 从 6 月份开始比率逐渐增大(除 2004 年 7 月).

关键词: 乌鲁木齐河源; 1 号冰川; 昼、夜径流特征; 降水

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

普遍认为, 冰是地球表面上分布最广泛的, 目前它覆盖全球陆地面积($148.3 \times 10^6 \text{ km}^2$)的 10.7% ($15.9 \times 10^6 \text{ km}^2$), 或者说, 占据全球面积($509.6 \times 10^6 \text{ km}^2$)的 3.1%^[1]. 其中, 南极冰盖和格陵兰冰盖占据了绝大部分, 其他以高山冰川和冰帽的形式分布于世界各个山脉. 高山区在水循环过程中扮演着重要的角色^[2]: 在冷湿季节, 它以冰雪形式储存水分, 在干暖季节, 以融水的形式释放形成径流. 同时, 冰川对气候变化反应敏感^[3], 其中山地冰川更为敏感地响应了气候变化^[4]. 尤其是 20 世纪以来, 随着全球气候变暖, 全球多数高山冰川出现退缩, 最近 20 a 这一退缩又出现了加速的趋势, 而冰川的变化明显地改变着径流的特征, 由此可见, 径流的变化间接地受到气温的影响. 关于径流的变化特征以及气温变化对径流的影响, 前人已做过大量的研究, 康尔泗^[5]早在 1991 年就对乌鲁木齐河源 1 号冰川的融水延迟特征利用染色剂示踪的方法进行过研究; 韩添丁等^[6-8]对径流的多年特征、极值特征

以及径流变化的原因进行了探究; 宫恒瑞等^[9]分析了春季融雪 0 °C 层高度与乌鲁木齐河径流量的关系. 其他流域也有一些研究, 如高鑫等^[10]、Cao Xin 等^[11]对塔里木河和叶尔羌河的径流变化进行了分析. 但是就径流的昼、夜变化、昼夜径流对气温的延迟响应等的相关研究还不多, 本研究对此进行了分析, 并对昼、夜径流与气温、降水的关系进行了初步探讨.

1 研究区域

新疆天山乌鲁木齐河源 1 号冰川($86^{\circ}49' \text{ E}$, $43^{\circ}06' \text{ N}$; 以下简称 1 号冰川)位于天山中部喀拉乌成山主脉北坡, 天山北坡乌鲁木齐河河源, 大致地处新疆的中心, 南北疆的交界处^[12]. 1 号冰川原为一条双冰斗-山谷冰川, 由于全球气候变暖, 引起冰川退缩, 1 号冰川末端汇合的东、西支于 1993 年完全分离, 并成为各自独立的冰川, 冰川长度和面积由 1962 年的 2.40 km 和 1.950 km^2 分别减少到 2000 年的 2.20 km 和 1.733 km^2 ^[13]. 1 号水文站点位于 1 号冰川冰舌末端下游约 300 m 的河道上(图

收稿日期: 2011-03-18; 修订日期: 2011-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871036); 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951404); 中国科学院“百人计划”项目; 水利部公益性行业科研专项经费项目(2007SHZ1246)资助

作者简介: 高明杰(1984—), 男, 河南濮阳人, 2009 年毕业于河南大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所硕士研究生, 主要从事寒区水文水资源以及水文过程的模拟研究. E-mail: gmjpyhn@126.com

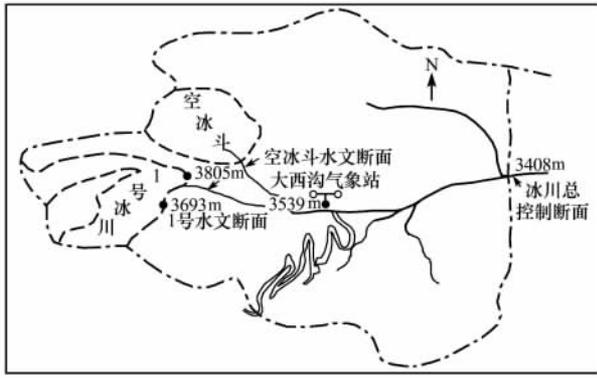


图 1 乌鲁木齐河 1 号水文站点的位置^[6]

Fig. 1 Map of the Ürümqi River Source region, the locations of hydrological gauges also showed

1), 断面海拔 3 659 m, 流域面积 3.34 km².

2 数据收集与整理

本研究采用了 1 号水文站点 2001—2005 年消融季节(5 月中下旬—8 月)的逐时水文气象资料, 同时结合大西沟气象站的日降水资料进行了分析. 流量资料是通过把水尺和水位计观测的水位校正以后, 用水位—流量关系(率定曲线)来将水位转换为流量. 为了研究的需要, 将每天的流量资料划分为两部分: 昼平均流量(09:00—20:00)和夜平均流量(21:00—次日 08:00). 每天的逐时气温也相对应进行划分为昼气温和夜气温.

3 1 号冰川昼、夜平均流量特征分析

3.1 2001—2005 年各月昼、夜平均流量变化

图 2 是 2001—2005 年冰川消融期(5—8 月)昼、夜平均流量图, 各月昼、夜平均流量比率也已表 1 中给出. 昼、夜平均流量对比关系如下: 2001 年 5—8 月各月的昼平均流量均大于夜平均流量, 昼、夜平均流量也逐月增大, 同时, 昼、夜平均流量的比率也变大, 由 5 月的 1.151 增大到 8 月的 1.617. 这很可能是由于随着消融季节的到来, 气

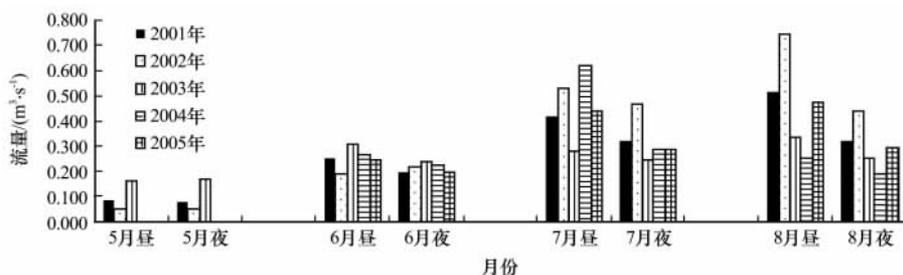


图 2 2001—2005 年各月昼、夜平均流量

Fig. 2 Monthly mean daytime and nighttime discharges in the ablation periods during 2001—2005

温逐渐升高, 从而使得冰雪融化加剧, 融水流量增大, 所以昼、夜平均流量都逐渐增大. 另外, 在消融季节, 由于气温对昼、夜径流的影响程度不同, 同时还有降水的影响, 使得昼、夜平均流量比率变大.

表 1 2001—2005 年各月昼、夜平均流量比率变化

Table 1 Variations of the ratios of monthly mean daytime discharge to monthly mean nighttime discharge in the ablation periods (2001—2005)

月	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
5	1.151	0.997	0.949		
6	1.263	0.875	1.268	1.181	1.281
7	1.301	1.137	1.116	2.147	1.523
8	1.617	1.685	1.338	1.34	1.634

2002 年 5 月份昼平均流量小于夜平均流量, 但相差不多. 6 月份昼平均流量也小于夜平均流量, 通过对比 2001—2004 年 6 月份的平均气温发现: 2002 年低于 2001 年和 2003 年, 但高于 2004 年, 而且 2002 年 6 月 18—21 日平均气温均在 0 °C 以下. 而 2002 年 6 月昼夜径流比率均小于 2001、2003 和 2004 年, 同时 2004 年 6 月比率小于 2001 和 2003 年. 这说明, 2002 年 6 月昼、夜径流比率偏小主要是由于发生的降雪事件延缓了融水的释放过程, 而 2004 年 6 月比率偏小主要因为气温较低, 冰雪融水较小, 汇流到监测点需要较长的时间所致. 2002 年 7、8 月份昼、夜平均流量都迅速变大, 与 6 月份相比, 7 月份的昼、夜平均流量分别增大了 73% 和 10%, 8 月份分别增大了 285% 和 100%. 而且 8 月份昼、夜平均流量比率比 7 月份更大, 由 1.137 增大到 1.685, 增幅为 55%. 2002 年各月之间的比率变化幅度与 2001 年相比变大, 但最大比率相差不多, 只比 2001 年高出 7%.

2003 年 6—8 月昼平均流量都比夜平均流量大, 但和 2001、2002 年明显不同的是 2003 年 6 月

的昼、夜平均流量比前两年偏大,而 7、8 月的昼、夜平均流量则明显比前两年偏小,同时昼、夜平均流量的比率明显变小.这是因为 2003 年 7—8 月阴雨天气较多,降水量较大(2001 年 8 月降水量是 87.7 mm,2002 年 8 月降水量是 51 mm,2003 年 8 月降水量是 100.6 mm),减弱了白天冰雪消融,而降水增加的流量又不足以弥补消融减弱引起的径流减少量所致.

2004 年和 2005 年 6—8 月各月昼平均流量都比夜平均流量大(因 5 月份径流形成初始时间差异,导致资料时段不同,主要分析 6—8 月的变化).但 2004 年 8 月的昼、夜平均流量与同年 7 月份相比明显减少,分别只占 7 月份的 42% 和 67%.甚至比 6 月份还稍低,分别是 6 月份的 97% 和 85%.其原因可能也是因为降水较多的缘故(2004 年 8 月降水量为 112.5 mm),后面将有进一步的分析.

昼、夜平均流量随时间的变化趋势是:2001 年昼平均流量 5—8 月呈明显增大趋势,但各月与其前月相比,增大的幅度是逐渐减小的:6 月是 5 月的 2.818 倍,7 月是 6 月的 1.638 倍,8 月是 7 月的 1.240 倍;夜平均流量 5—7 月逐渐增大然后 8 月稍有减少(8 月份是 7 月份的 0.998 倍),6—8 月增大的幅度逐月减小:分别是 2.568, 1.590, 0.998, 从这组数据也可以看出夜平均流量的增幅比昼平均流量小.2002 年昼平均流量 5—8 月份呈明显上升趋势,各月的增幅均大于 2001 年,但也是逐月减小的;而夜平均流量 5—7 月明显上升,8 月比 7 月份略有减少(8 月是 7 月的 0.951 倍);2003 年昼平均流量由 5 月到 6 月增加明显,7 月份下降,8 月稍有增大,略高于 6 月,而夜平均流量 5 月到 6 月显著增加,而后 6—8 月基本不变;2004 年日(昼、夜)平均流量由 6 月至 7 月都在增加,但夜晚没有白昼时增加更显著,8 月昼、夜平均流量急剧减少,比同年 6 月还少;2005 年平均流量由 6 月至 7 月都增加,白昼增加更大,7 月到 8 月基本不变.

3.2 各年相同月份的昼、夜平均流量变化

分析 2001—2005 年同月份昼、夜平均流量(图 1),各年 6 月份昼、夜平均流量对比显示:2002 年 6 月昼平均流量相对其他年份明显偏少,约占 2001—2005 年 6 月昼平均流量的 3/4,2003 年最大,是 2002 年的 1.6 倍.而夜平均流量各年之间差别不大.另外,2002 年的昼平均流量比 2001 年少,但是夜平均流量却比 2001 年大.7 月的昼平均流量各年不同,2003 年最小,2004 年的最大,约是

2003 年的 2.199 倍.各年 7 月份的夜平均流量以 2002 年最高,最低还是 2003 年,约是 2002 年的一半,同时 2003 年的昼夜比率仅为 1.116 而 2004 年昼夜比率为 2.147.各年 8 月昼平均流量以 2002 年最高,2003 年最低.2002 年约是 2003 年的 2.894 倍,同时它也是这 5 年各月昼、夜平均流量的最大值;8 月昼、夜平均流量以 2004 年最低,还不到 2002 年的一半.虽然每年相同月的昼、夜平均流量不同,但是各年同月的昼、夜平均流量比率相差不大(表 1),2003 年 7 月除外.

3.3 各月昼、夜平均流量的多年平均

由图 3 可知,2001—2005 年 5 月昼径流量 5 a 平均值与夜径流量平均值基本相等,昼夜平均流量比率为 1.010;而这 5 a 的 6 月昼平均流量超过了夜平均流量,但幅度不是很大,比率为 1.172;7 月和 8 月的昼平均流量都大大超过了夜平均流量,昼、夜平均流量比率分别为 1.416 和 1.558.因此,从多年来看,消融季节的昼、夜平均流量比率呈逐月递增趋势.8 月与 7 月相比,昼平均流量比 7 月稍有增加,多年夜平均流量 8 月却比 7 月的稍低.从趋势上来看,5—8 月的多年昼平均流量,随着月份呈递增趋势;而多年夜平均流量,5、6、7 月是呈递增趋势,8 月稍微减少.从总体上看,各月(5—8 月)的径流量多年平均值是逐月递增的.

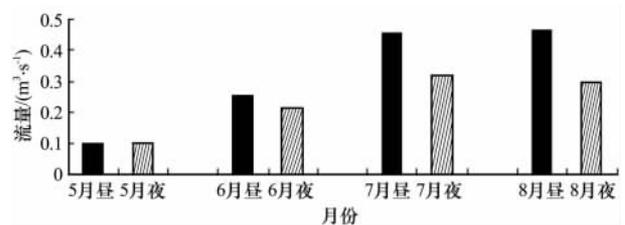


图 3 各月昼、夜平均流量的多年(2001—2005)平均值
Fig. 3 The monthly daytime and nighttime discharges in summer months averaged over 2001—2005

3.4 消融季节各月份径流的昼、夜变化

由于气温在年际、季节、月以及昼夜尺度均存在变化,致使融水径流也存在相应尺度水平上的变化,消融季节不同月份昼、夜径流的平均变化如图 4.据观测,从 6 月开始,多年平均的逐时径流已有明显昼夜变化,最大径流 $0.319 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 发生在 18:00,最小径流 $0.157 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 发生在 10:00.7 月变化进一步增大,最大径流出现在 17:00 为 $0.581 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最小径流 $0.240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 出现在 9:00.8 月昼夜变化幅度达到最大,为 $0.399 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

s^{-1} ，其中最大径流为 $0.626 m^3 \cdot s^{-1}$ ，出现在 16:00，最小径流 $0.227 m^3 \cdot s^{-1}$ 出现在 9:00。昼夜平均流量是逐月增加的，变化幅度也逐渐增大。从图 4 看出，消融季节初期(5 月)流量曲线比较平坦，几乎是平的，随着强消融季节的到来，平均流量曲线变得陡峻，但是上升比下降时要陡峻，即上升速度快，而下降速度慢。这是由消融之初，冰川较大的冷储效应和冰川的物理特性所致，所以径流会有很大的延迟效应，另外，5 月气温还较低，融水很可能还没有到达冰面又重新冻结了，形不成径流。也有可能是 5 月径流初始时间差异，变化趋势不明显。而在消融中期(6—8 月)，由于较高的有效辐射和大范围裸冰的暴露减弱了反射率，使得消融强烈进行，形成大量融水，这就导致了径流对冰雪融水快速的周期性响应。如图 4 所示：各月的最大径流出现在 16:00—18:00，最小径流出现在 9:00—10:00。

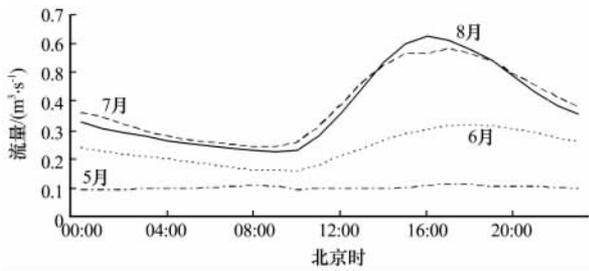


图 4 2001—2005 年各月逐时径流变化
Fig. 4 The daily cycle of average discharges in summer months during 2001—2005

3.5 昼、夜径流的延迟特征

冰川表面消融产生的融水和冰川末端融水径流的出现之间有一个时间间隔，要弄清楚融水产生和径流的形成之间的时间间隔，需要排除其他因素(如降水和阴雨天气)的影响，而只考虑太阳辐射直接影响造成的消融。同时要尽可能地降低因距离而造成的时间延迟，本研究的观测水文站点在冰川末端下方 300 m 处，符合要求。由于从长期来看，径流的延迟情况年与年之间变化不大，所以这里只考虑不同月份的差别而不考虑年之间的差别。图 5 分别对 6 月、7 月和 8 月选取了连续 3 个典型晴朗天气日(由于消融季节连续晴朗天气较少，本研究选取 3 d)的资料，做出其径流与气温昼、夜变化对照曲线。6 月日最高气温出现在 14:00—17:00，最大径流出现在 16:00—18:00，延迟 1~2 h 左右；7 月份日最高气温出现在 14:00—15:00，最大径流出现

在 14:00—15:00，基本没有延迟，8 月日最高气温出现时间虽然也是在 14:00—15:00，但最高气温值比 7 月小，而最大径流发生在 17:00—18:00，径流延迟 2~3 h。

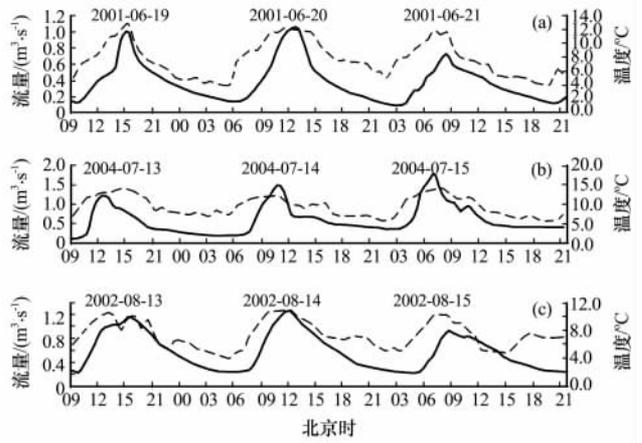


图 5 不同年份典型晴朗天气下的径流(实线)、气温(虚线)昼夜变化

Fig. 5 Diurnal variations of discharge (solid line) and air temperature (dashed line) for selected clear days for different months in different years

分析显示，不同月份最大径流相对日最高气温的延迟情况不同，从 6 月到 7 月延迟时间逐渐变短，然后从 7 月到 8 月这种延迟又逐渐的变大。一般而言，径流延迟的幅度依赖于水从冰川内部或冰下汇流距离以及内部排水网的结构。消融季节初期，由于冰川表面积雪的融水入渗存储，最大径流的延迟时间较长；随着强消融季节的到来，季节性积雪消融，排水系统日益发达，排水能力增强，使得最大径流的延迟时间缩短；到消融后期，气温变低，用于消融的有效能量减少，冰川融水量减少，流速降低，从而使得最大径流相对最高气温的延迟时间变长。

日最低气温和日最小径流的出现时间各月分别是：6 月最低气温出现在 7:00—8:00，最小径流出现在 8:00—10:00；7 月日最低气温的出现时间是 5:00—7:00，而最小径流的时间一般在 6:00—9:00，但不稳定，而且会出现一段时间的径流不变情况。8 月最低气温是在 7:00—8:00，最小径流出现在 8:00—9:00。可见在强烈消融的 7 月，最小径流并不受最低气温的限制。通过昼夜最大、最小径流和对日最高、最低气温的延迟情况可知，最高气温对夜径流量是有贡献的，而夜最低气温对昼径流量也有一定的制约。对比 6—8 月的气温和径流变

表 2 2002 年 6 月和 2001 年 6 月份气温、径流和降水的对比

Table 2 Air temperature, runoff and precipitation in June, 2002 and June, 2001

年	昼平均 气温/°C	夜平均 气温/°C	日平均 气温/°C	平均最高 气温/°C	平均最低 气温/°C	昼平均流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	夜平均流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	降水量 /mm	降水日数 /d
2001	5.2	2.2	3.7	7.9	0.3	0.255	0.202	70.7	14
2002	5.0	1.5	3.2	7.4	-0.3	0.194	0.221	157.7	16

化, 日极值气温整体水平较高时, 昼、夜径流量也较大。

4 昼、夜径流变化特征的原因分析

为了探求影响昼、夜径流变化的因素, 本研究选取昼、夜径流变化特征明显不同的特殊月份作为研究对象。由于特征显著, 更有利于原因的分析。

4.1 昼平均流量小于夜平均流量

2002 年 6 月昼平均流量小于夜平均流量, 现针对这一现象选取 2001 年 6 月份作为对照进行研究。

表 2 显示: 2002 年 6 月的昼、夜平均气温, 日平均气温以及平均最高最低气温均比 2001 年低。其中昼、夜平均气温比 2001 年分别低 0.2 °C 和 0.7 °C, 日平均气温降低了 0.5 °C, 平均最高最低气温分别降低了 0.5 °C 和 0.6 °C。而且 2002 年 6 月平均最低气温低于 0 °C。2002 年 6 月份的降水量达到了 157.7 mm, 是 2001 年的 2 倍多, 降水日数比 2001 年多两日。在降水量增大的情况下, 2002 年 6 月的昼平均流量却比 2001 年少, 这说明降水对径流的贡献不足以弥补因气温降低导致融水减少对径流的损失。而 2002 年 6 月昼平均流量小于夜平均流量并不是由于气温较低这单一因素所致, 因为单纯的较低气温会使昼、夜平均流量都降低。例如图 5 中在连续晴朗天气下, 8 月份的气温稍低于 7 月, 但是 8 月份的夜平均流量小于昼平均流量的, 而且 8 月份的昼、夜平均流量均小于 7 月, 而 2002 年的夜平均流量却大于昼平均流量。充分说明这种现象的产生是阴雨天气环境造成的。因为当在晴朗的天气下时, 夜径流主要来自于较少的冰雪融水, 而在阴雨天气较多的情况下, 夜径流不但来自于融水, 还来自降水, 并且降水的增加可以弥补气温降低导致的一部分融水减少量, 所以夜径流减少微弱; 而白天由于气温骤减, 冰雪融水量也大量减少, 虽有降水补给, 但降水不足以弥补融水的减少量, 使得昼平均流量锐减, 甚至低于夜平均流量。

4.2 昼平均流量大于夜平均流量

表 3 显示, 2004 年 7 月的昼平均气温比 2003

年高 3 °C, 日平均气温比 2003 年高 2.6 °C。2004 年 7 月昼夜平均温差为 3.6 °C, 比 2003 年的 2.7 °C 高 0.9 °C。2003 年 7 月的降水量为 85.5 mm, 降水日为 14 d, 连续无降水天气不超过 2 d。2004 年降水量为 65.7 mm, 降水日数是 10 d, 而且有连续多日晴朗天气: 9—11 日, 13—18 日。但 2004 年 7 月的昼平均流量是 2003 年 2.13 倍, 夜平均流量比 2003 年稍多。同时 2004 年 7 月的昼、夜平均流量比率为 2.147, 而 2003 年的比率是 1.097。由此可见 2004 年昼夜平均流量以及比率都较大, 是由于降水总量和降水日数较少, 晴朗天气多, 尤其是连续晴朗天气, 使得气温较高, 因此融水增多。图 6 中 2003 年 7 月 14 日有一次大的降水, 降水量高达 36.2 mm, 造成当天气温降低, 昼、夜平均流量都减少, 但是 15 日降水停止后, 气温恢复, 流量也增大。可见一次性大的降水过程, 虽然降水量很大, 但是气温降低, 影响当时的冰雪消融, 流量也会减少。分析 2004 年 7 月的昼、夜平均流量、气温和降水得知: 降水时期, 同样也是气温下降、径流减少期。但是 2004 年 7 月降水日少, 晴朗天气多, 而且是连续晴朗天气, 使气温能够长时间保持较高的水平, 冰雪迅速融化形成径流。如 2004 年 7 月 12—17 日的连续晴朗天气, 使日平均气温在 17 日达到最高; 18 日虽然没有降水, 但是日平均气温却迅速下降, 径流也锐减了大约 1/2, 这是因为阴天或多云天气导致的气温降低所致。通过对比典型降水过程、典型晴朗天气以及多云天气可以看出: 造成 2003 年 7 月流量减少的主要原因是阴雨天气导致的气温降低, 冰川融水减少, 与降水量关系不大, 但和阴雨天气日数相关, 阴雨天气越多, 流量越小。2004 年 7 月的昼、夜平均流量比率较大, 是因为晴朗天气下, 白天气温高, 消融快而且消融量大, 形成较大的径流; 夜径流虽然也增加, 但是增加的幅度没白天大。根据前文所知, 1 号冰川的径流延迟时间较短, 所以白天的消融对夜径流贡献也较少。这就造成了较大的昼夜平均流量比率。分析 2004 年 7 月 18—23 日可知, 在连续阴

表 3 2003 年 7 月和 2004 年 7 月份气温、径流和降水的对比

Table 3 Air temperature, runoff and precipitation in July, 2003 and July, 2004

年	昼平均 气温/°C	夜平均 气温/°C	日平均 气温/°C	平均最高 气温/°C	平均最低 气温/°C	昼平均流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	夜平均流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	降水量 /mm	降水日数 /d
2003	4.7	2.0	3.3	7.2	0.2	0.290	0.265	85.5	14
2004	7.7	4.1	5.9	10.0	2.4	0.619	0.288	65.7	10

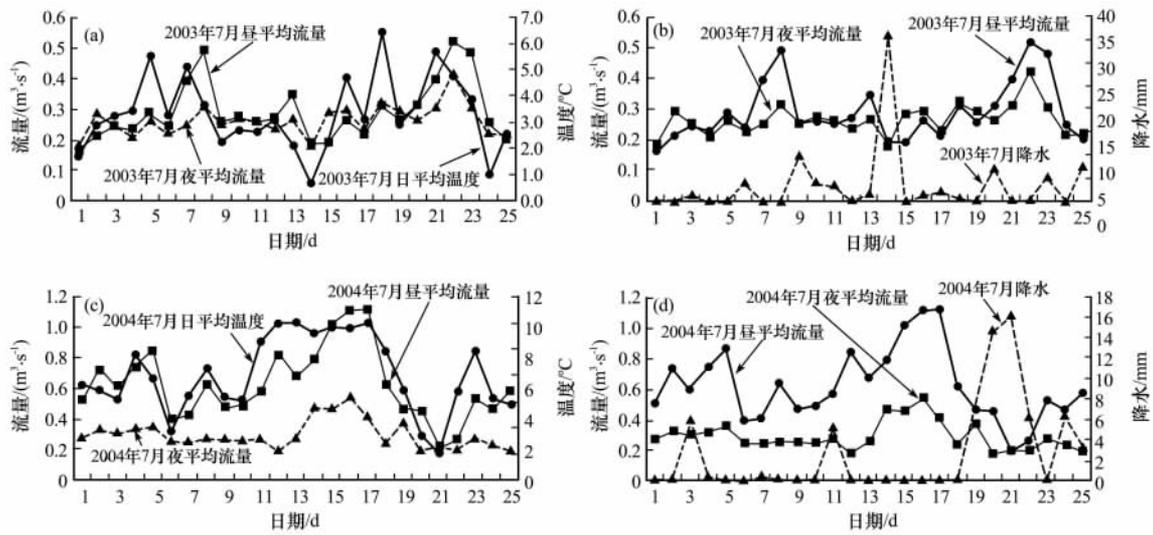


图 6 2003 年 7 月和 2004 年 7 月昼、夜平均流量和气温、降水变化曲线

Fig. 6 Variations of the daytime and nighttime discharge, air temperature and precipitation in July, 2003 and July, 2004

雨天气下,昼、夜平均流量都是有基流和降水组成,大小趋于相同,比率变小,这刚好印证了 2003 年 7 月昼、夜平均流量比率小是因为阴雨天气较多的缘故。

4.3 气温与昼、夜平均流量的关系

通过分析昼、夜平均流量和昼平均气温、夜平均气温、日均温、日最高气温、日最低气温的相关性得知,昼平均流量、夜平均流量都是和昼平均气温的相关系数最大,在 0.01 的置信水平上相关系数分别是 0.6722 和 0.5604。而昼、夜平均流量和日降水量不存在相关性,这说明昼、夜平均流量都是受昼平均气温的影响,随着气温升高,昼、夜径流增大,而不受降水量的影响。另外还发现,虽然昼平均气温对昼、夜平均流量都有影响,但影响程度不同,对昼径流的影响更大。

5 结论与讨论

通过对乌鲁木齐河源 1 号冰川 2001—2005 年消融季节(5—8 月)昼、夜径流变化的分析得出以下结论:

(1) 2001—2005 年多年昼、夜平均流量变化趋势性更加明显,昼、夜平均流量随消融增强而逐渐增加(除 2004 年),昼、夜平均流量的相对差值也逐渐扩大,8 月夜平均流量有所减少。2001—2005 年各月的昼、夜平均流量,从 5 月开始逐渐增大,8 月末开始减少。每年各月(6—8 月)的昼平均流量都大于夜平均流量(除 2002 年 6 月)。

(2) 相同月份昼、夜平均流量比较而言,在 6 月,2002 年的昼平均流量最小,而且昼夜平均流量比率小于 1。其他年份比率都大于 1,但相差不大,最小为 2002 年 6 月的 1.181,最大为 2005 年 6 月的 1.281。7 月份比率增大,但是 2003 年的比率仅为 1.116,比当年 6 月的 1.268 还小,而 2004 年的为 2.147,比所有月份的比率都大。

(3) 昼、夜径流多年平均日变化有明显特征,最大径流 $0.319 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 发生在 18:00,最小径流 $0.157 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 发生在 10:00。7 月份变化进一步增大,最大径流出现在 17:00 为 $0.581 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最小径流 $0.240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 出现在 9:00。8 月昼夜变化幅度达到最大,为 $0.399 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,其中最大径流

为 $0.626 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在 16:00, 最小径流 $0.227 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 出现在 9:00. 各月的流量逐渐增加, 变化幅度逐渐变大. 消融季节各月份典型晴朗天气下的径流相对于气温有延迟, 6 月延迟 1~2 h, 7 月份基本没有延迟, 8 月延迟 2~3 h, 这和冰川内部或冰下汇流距离以及内部排水网的结构有关, 此外, 由于消融季节连续多日的晴朗天气较少, 因此延迟情况也可能受晴朗天气前后较长时间的阴雨天气影响, 有待进一步研究.

(4) 昼平均流量小于夜平均流量的直接原因是昼平均流量骤减, 而夜平均流量下降较少. 造成这种现象的根本原因是阴雨天气较多, 导致气温降低, 使得冰雪融水大量减少, 同时降水又不足以弥补融水的减少量, 所以昼径流骤减; 夜径流量本身较少, 气温降低造成的径流减少量又被降水弥补一部分, 从而使得夜径流下降较少. 而昼夜比率最大的 2004 年 7 月, 是因为晴朗天气较多, 尤其是连续晴朗天气, 使气温持续升高, 消融增强, 昼平均流量增大; 夜径流虽然增大, 但是由于白天冰雪融水延迟时间较短, 因此对夜径流贡献较小.

(5) 昼夜径流的变化和昼平均气温显著相关, 在 0.01 置信水平上的相关系数分别为 0.6722 和 0.5604. 但与降水量相关性较弱.

参考文献 (References):

- [1] Singha P, Haritashya U K, Kumar N, *et al.* Hydrological characteristics of the Gangotri Glacier, central Himalayas, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2006(327): 55—67.
- [2] Casassa G, Lopez P, Pouyaud B, *et al.* Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: examples from North America, the Alps, central Asia and the Andes [J]. *Hydrological processes*, 2009 (23): 31—41.
- [3] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, *et al.* Response of glacier melting to climate change—Take Ürümqi Glacier No. 1 as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(6): 333—342. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应—以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(6): 333—342.]
- [4] Zhou Zaiming, Jing Zhefan, Zhao Shuhui, *et al.* Response of glacier moving speed to climate change—Take Ürümqi Glacier No. 1 as an example[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, **31**(2): 2237—244. [周在明, 井哲帆, 赵淑惠, 等. 冰川运动速度对气候变化的响应——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. *地球学报*, 2010, **31**(2): 2237—244.]
- [5] Kang Ersi. A preliminary study on the drainage system in the ablation area of Glacier No. 1 at the source of Ürümqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, **12**(3): 219—228. [康尔泗. 乌鲁木齐河源 1 号冰川消融区排水系统初探[J]. *冰川冻土*, 1991, **12**(3): 219—228.]
- [6] Han Tianding, Gao Mingjie, Ye Baisheng, *et al.* Characteristic of runoff process of the glacier and permafrost in the headwaters of the Ürümqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(3): 573—579. [韩添丁, 高明杰, 叶柏生, 等. 乌鲁木齐河源冰雪及多年冻土径流过程特征[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(3): 573—579.]
- [7] Han Tianding, Ding Yongjian, Jiao Keqin, *et al.* Analysis of the extreme of snow and glacier meltwater runoff at the headwaters of the Ürümqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(2): 276—281. [韩添丁, 丁永建, 焦克勤, 等. 天山乌鲁木齐河源冰雪径流的极值分析[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(2): 276—281.]
- [8] Han Tianding, Li Zhongqin, Ye Baisheng. Increasing in runoff in the ice-free cirque at the headwaters of the Ürümqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **23**(4): 389—393. [韩添丁, 李忠勤, 叶柏生. 乌鲁木齐河源空冰斗径流增大的原因分析[J]. *冰川冻土*, 2003, **23**(4): 389—393.]
- [9] Gong Hengrui, Shi Yu, Feng Zhimin. Relationship between the 0°C layer height and the streamflow of the Ürümqi River in the period of spring snowmelt [J]. *Journal of Arid Zone Research*, 2010, **27**(1): 69—74. [宫恒瑞, 石玉, 冯志敏, 等. 春季融雪 0°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): 69—74.]
- [10] Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, *et al.* Glacier runoff change in the upper stream of Yarkant River and its impact on river runoff during 1961—2006[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(3): 445—453. [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—453.]
- [11] Gao Xin, Ye Baisheng, Zhang Shiqiang, *et al.* Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961—2006 in the Tarim River Basin, China[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2010, **53**(6): 880—891.
- [12] Zhang Guangxing, Wei Wenshou, Xin Yu, *et al.* The response of the Glacier No. 1 to the height change at the level of 0°C in summer at the riverhead of the Ürümqi River, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(6): 1057—1062. [张广兴, 魏文寿, 辛渝, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川对夏季 0°C 层高度变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(6): 1057—1062.]
- [13] Jiao Keqin, Jing Zhefan, Han Tianding, *et al.* Variation of the Glacier No. 1 at the headwater of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains during the past 42 years and its trend prediction[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(3): 253—260. [焦克勤, 井哲帆, 韩添丁, 等. 42 年来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化及趋势预测[J]. *冰川冻土*, 2004, **26**(3): 253—260.]

Characteristics of Daily Cycle of Discharge from Glacier No. 1 at Headwaters of Ürümqi River

GAO Ming-jie, HAN Tian-ding, YE Bai-sheng, JIAO Ke-qin

*(State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)*

Abstract: Characteristics of the daily cycle of discharge and the relation between discharge and the extreme air temperature are analyzed based on the observation during 2001–2005 in the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains. The studies indicate that the daytime and nighttime discharges were small at the preliminary ablation stage in May, and then became more. The daytime (or nighttime) discharge in the same month for different years was different. The daily cycle of discharge for different months during summer months were dissimilar. It did not change much in May and then increased from June. The

maximum runoff was observed in the evening (16:00–18:00) and the minimum one occurred in the morning (9:00–10:00). Meltwater runoff usually had lags behind air temperature for the selected clear days. In June the peak runoff delayed one to two hours comparing with the daily maximum air temperature, while it hardly delayed in July. However, it delayed about two to three hours in August. The ratios of monthly daytime discharge to nighttime discharge in summer months during 2001–2004 were larger than 1.0, except for July, 2002. The ratio increased from May to August, except for 2004.

Key words: headwaters of the Ürümqi River; Glacier No. 1; daily cycle characteristics of discharge; precipitation