文章编号:1000-0240(2010)03-0573-07

乌鲁木齐河源冰雪及多年冻土径流过程特征

韩添 丁 高明杰, 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: 在全球气候变暖背景下, 乌鲁木齐河源自 20 世纪 90 年代中后期呈现出显著气温升高和明显 降水增加趋势, 乌鲁木齐河源区 1 号冰川及空冰斗山坡春季冰雪消融径流开始产流的时间有明显的推 后趋势; 同时径流结束、河道断流的时间也有不太显著的推后现象, 其间接说明了高山区冰川及多年 冻土融冻过程有了明显的消融季节推后特征. 2000 年以后春季径流明显大于 20 世纪 80 年代, 其中冰 川主要消融期径流变幅明显小于前期, 空冰斗山坡夏季径流显著增大且变幅明显变大. 分析认为, 乌 鲁木齐河源径流的这些变化, 主要是河源区冬、秋季的明显升温, 大气降水、季节性积雪融水和冻土活 动层融冻过程变化等的反映.

关键词:冰雪融水;河川径流;乌鲁木齐河源

中图分类号: P339 文献标识码: A

0 引言

冰川、冰盖、冻土、积雪以及海冰等所组成的 冰冻圈是全球气候系统中重要的和变化最显著的组 成部分,冰冻圈的变化不仅对气候系统带来影响, 同时对水资源、生态环境等的影响也十分显著.伴 随着气候的暖湿变化,天山南北诸多河流径流量出 现了不同程度的增加,如以 1987—2000 年均值与 1956—1987 年相比较,天山北坡增加了 5%~ 15%,而南坡增加达 20%~40%^[1],其反映气候变 化影响的同时,也反映了下垫面因素及河流补给特 征等的区域差异.同样,气候变化也导致了多年冻 土层升温及活动层增厚等的变化^[2-3],其对区域水 文过程、生态环境等也产生了深刻的影响.相关研 究显示^[4-5],在中国天山及青藏高原地区,冬季增 温导致冬季多年冻土区径流增加趋势非常明显.

天山乌鲁木齐河源区冰川、水文气象和径流等 观测事实显示: 1958—2004 年这 46 a 间, 年均气温 升高了 0. 8 $^{\mathbb{C}}$ (0 017 $^{\mathbb{C}_{\circ}}$ a⁻¹), 其中以冬季和秋季 的升温最为明显; 其间, 平均降水量增加了 86 mm (1.9 mm ° a⁻¹),或19.3%,1995年后降水增加最显著.其中,1996-2004年的增加量占到 17.4%^[6].1号水文点径流在1997年发生了明显的突变现象,年平均径流深由1980-1996年的5850 mm,增加到1997-2003年的8740mm,增加了 大约50%^[7].基于气候变化对河源高山区水文过程 (冰川、积雪、多年冻土等)的显著影响,分析河源 区冰雪及多年冻土径流变化对气温、降水等变化响应,对认识气候变化对寒旱区径流变化及水资源合 理利用意义重大.

1 研究区域

研究区位于天山乌鲁木齐河源区,为典型高山 多年冻土区域,河源区流域面积 28.9 km²(其中冰 川面积 5.6 km²);区域内 1 号冰川(86°49′E,43° 06′N)为乌鲁木齐河河源,1号水文点设在离 1 号 冰川冰舌 末端约 300 m 的 河道上,断面 海拔 3 659 m,流域面积 3 34 km²(其中冰川面积 1.708 km²),实时监测 1 号冰川冰雪融水径流.空冰斗水 文点设在乌鲁木齐河源区左侧,是高山区降水、积

收稿日期: 2009-11-06; 修订日期: 2010-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871036); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB411502); 中国气象局公益性行业科 研专项经费项目(GYHY200706008); 水利部公益性行业科研专项经费项目(2007SHZ1-46)资助

作者简介:韩添丁(1964—),男,甘肃武山人,副研究员,2007年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位,现主要从事寒 区水文与环境研究. E-mail: tdhan @lzb.ac.en

^{?1994-2018} China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

雪及多年冻土融水径流的观测断面,断面海拔 3805m,流域面积1.68km²(图1).本文依托这两 个小流域的实测资料,对比研究冰川和多年冻土山 坡径流的变化,探讨气候变化背景下,乌鲁木齐河 源区冰雪径流的变化特征和多年冻土活动层变化的 水文效应.





2 1 号冰川径流变化特征

2.1 冰川消融径流的日变化比较

对比分析 20 世纪 80 年代中期以前和至 90 年 代中后期乌鲁木齐河源 1 号冰川水文点的冰雪融水 径流的变化特征发现,除了年际的增加趋势比较明 显外,同样春季径流有着明显增大的特点,主要体 现在冬春季季节积雪的消融增加.选择典型年份 1986 年和 2001 年径流日变化过程比较分析研究, 可以更加直观的看出径流的这种变化特点(图 2): 年际径流的增大趋势还是比较明显, 1986 年和 2001 年年平均流量分别为 0. 247 m³ · s⁻¹和 0 250 m³ · s⁻¹,冰川融水径流维持在一个相对较大的基 流水平.

在春季径流增大的同时,近年来河源区 5 月份 冰雪消融开始产流的时间却有明显推后的现象,而 9月份冰雪径流断流、河床冻结的时间变化不太明 显(图 3).初步分析认为:这种现象的出现可能与 冬季降雪增多,4.月份降雪明显减少(5.月份降雪明 显增加^{)[8},导致冰川表面反射率增大有关;另一 方面,河源区3月份明显的降温趋势和4-5月份 微弱的增温过程无疑也对冰雪消融起到了抑制作 用.而20世纪90年代后期径流结束时间相对稳定 的推后可能与气温升高造成冰川冷储的减少^{[9},冰 川对气温变化的敏感性大大增强的原因有关.









- 2.2 径流的日内变化分析
- 2.2.1 无降水日1号冰川径流变化

根据典型实时径流资料,1号冰川径流在无降 水时段(以2003年8月23-25日为例),径流大小 变化完全取决于气温的高低.从图4可以看出,气 温的日最大值均出现在14:00,而径流的日最大值 出现在15:00,并伴随着温度的下降迅速减退,第 二天早上8:00达到日最小值.相关分析显示,实时 径流与前2h的气温相关关系最好,不同时段径流 ing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 3期

逐时相关:

$$Q$$
时 = 4.13664e^{0.8182t}, r = 0.59 (1)
径流与前 1 h 的(t_{-1})相关:

 $Q_{\text{H}} = 3.9824 e^{0.9115 t_1}, \quad r = 0.69$ (2) 径流与前 2 h 的(t_{-2})相关:

$$Q_{\rm HJ} = 4.322 {\rm e}^{0.9018 t_{-2}}, \quad r = 0.71$$
 (3)

r = 0.66

(4)

以上结果与无降水日旬平均径流和旬平均气温 (1句)的相关关系较为接近,关系为^[10]:

 $Q_{\rm F} = 0.390 {\rm e}^{0.9018t}$.



Fig. 4 Curves of air temperature and runoff for a period of non-precipitation in the Glacier No. 1 Hydrological Gauge at the sources of Ürümqi River

2.2.2 典型大降水过程下1号冰川径流变化

通过 2003 年 7 月 14 日河源区一次大的降水过 程(1 号冰川气象点纪录降雪量为 36 2 mm)的分析 可以看出,河源区冰雪融水径流的变化主要还是与 气温变化关系密切(图 5).影响冰川区径流变化的 另一个主要因素降水也非常关键,由于降水时段冰 川区气温的大幅下降,冰雪消融量明显减少,而当 降水停止,气温迅速回升时,更多的冰雪径流将会 产生,所以降水对径流的影响具有两面性.在高山



Fig. 5 Changes in air temperature, precipitation and runoff for a period of large precipitation in the

Glacier No.1 Hydrological Gauge at

Electronic Publish

21994-2018 the sources of Ürümgi River

冰川区,降水产流量往往不足以弥补冰雪消融量减 少造成的径流减少量,因此,降水时期冰川区径流 量通常小于无降水时期.

3 空冰斗融雪及冻土山坡径流特征

3.1 径流的日变化

相似于 1 号冰川径流的年际变化,空冰斗径流 的增大趋势还是比较明显,1986 年和 2001 年年平 均流量分别为 0 055 m³ · s⁻¹和 0 074 m³ · s⁻¹ (图 6),但 2001 年径流变率远大于 1986 年,这无疑与 河源区降水增加及变增幅增大^[8,11] 及强降水过程增 多^[12] 关系密切.资料显示,1986 年和 2001 年河源 区降水量分别为 392 8 mm 和432 6 mm (图7),消 融期 5—9 月所占年度的降水比例分别为 83 6%和 91.3%.这也是气候变暖的典型降水径流的变化特 点.



Fig. 6 Runoff changes in the Ice-Free Cirque Hydrological Gauge at the sources of Ürümqi River in 1986 and 2001





同样,近年来5月份冬春季积雪消融开始产流的时间也有明显推后的现象,而9月份冰雪径流停止、河床冻结的时间变化不大(图8).初步分析认为,这种现象的出现虽然有着和1号冰川春季径流产流推后相同的气温、降水等特征,但表现着不同的产汇流结果,条季降雪消融初期4月份的降水明

显减少导致土壤干燥,尽管 5 月份降雪呈现增加趋 势,但积雪融水更多的用在下渗、湿润干燥的活动 层土壤上,其必将造成产流时间的推后.





从高山多年冻土的观测研究初步分析认为来 看,冻土表层含水量较大,春季多年冻土融化深度 较浅,积雪融化后主要用于雪层和土壤表面的下渗 和蒸发,也有部分渗入季节融化层成为冻结层上 水.当这一过程相对稳定后,融雪径流将以浅层水 的形式汇流补给河流,此后,当积雪融化后蒸发量 较大,而多年冻土的蒸发量还主要取决于温度的高 低.其实,冻土水文过程始于前期的积雪覆盖大 小,而消融大小和强度与期间的气温及地温关系密 切,也是温度和降水等要素的综合反映.7-8月为 大的消融期,也是降水增幅最大且多为降雨的月 份,径流大小取决于降水量多少及降水强度等.

3.2 空冰斗土壤温、湿度与径流时变化

3.2.1 无降水日空冰斗水热状况及径流分析

图 9 是 2003 年 8 月 23 — 26 日实时观测的空冰 斗夏季无降水日土壤水热要素等的变化特点. 从 0 ~60 cm 深度范围土壤剖面的地温变化可以看出 (图 9a),地温变化表现的随土壤深度加深变幅减小 和消融季温度降低的变化特点非常明显,表层土壤 由于太阳辐射、土表蒸发、植物蒸腾和风吹等原因 温度变化比较强烈.相对于气温变化,剖面深度10 ~60 cm 地温变化有明显的滞后(表1).深度30 cm 以下,响应于气温变化的最高地温时间将到次日, 而50~60 cm 深度温度相对接近且变化较小,日最 高温度达到时间也基本同时,大气因素的影响已经 远低于对地表.

土壤含水量由地表-地下反映的高-低的趋势同 样明显,但不同深度土壤水分随时间的变化微弱, 也没有明显的日变化特点(图 9b),这是干旱时段 冻土活动层变化的主要特点.如果干旱时段持续时 间变长,随着土表蒸发、植物蒸腾等作用,将会破 坏土壤水分的运移规律和内部环境,从而加快多年 冻土和草场的退化速度.

实时监测资料显示,空冰斗径流在 2003 年 8 月 23-26 日强消融期无降水时段,径流大小与气 温的变化基本没有关系(图 10).从图 10 可以看出, 气温的日最大值均出现在 14:00 左右,而径流没有 明显的日变化过程,只是反映了降水后土壤水分运 移过程的阶段性变化.反映了无降水发生时,多年 冻土径流所反映的基流大小,其明显与前期降水发 生的时间、历时及强度等有关.而春季消融期开始 阶段无降水日的径流-气温相关性相似于冰川无降 水日的变化,径流大小基本取决于气温的高低.

3.2.2 典型大降水过程的空冰斗水热状况及径流 特点

通过 2003 年 7 月 14 日河源区一次大的降水过 程(空冰斗气象点纪录的降雪量达 37 mm)的分析 可以看出,空冰斗融水径流变化的主要影响因素还 是前期的降水量大小,而与气温的变化关系随着每 一次降水的下渗和产流发生,其间相关关系相对较 弱(图 10).图 11 表明,由于 7 月 12 日以来的不连 续降水已经湿润了土壤,而始于 7 月 14 日 16:00, 终止于 7 月 15 日 16:00 的连续降水,导致了积雪 覆盖后大约 24 h 后,融雪径流达到第 1 次极大值. 随着雪盖的完全融化,约 3 d 后出现这次大的降水 过程的最大径流量 0 46 m³ · s⁻¹ (7 月 18 日 23:00).该次降水过程在土壤水热要素的变化上也 表现出了完全不同于无降水日的变化特点(图 12).

表1 日最高气温及地温的滞后时间

Table 1 The lagging time of the daily maximum ground temperature relative to the daily maximum air temperature

剖面深度	气温	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
时间	14:00	20:00	22:00	2:00	8:00	12:00	12:00

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



of Ürümgi River

从 0 ~ 60 cm 土壤剖面的地温变化可以看出(图 12a),常规地温表现的随土壤深度加深地温变幅减 小和消融季温度降低的变化特点非常明显. 随着 7 月 14 日连续降雪的发生,导致气温的迅速降低,相 对于气温变化,地温变化的滞后性,也造成了剖面 不同深度的地温变幅的明显减小和温度变低;7月 15 日连续降水的结束,使得地温迅速回升,尤其是 地表 10 ~ 20 cm 的地温回升更甚且变幅更大. 但降 水时段,地气温等的日变化特点已被削弱. 分析发 现,不同深度的地温变化与径流显著相关^[13].

土壤含水量由地表-地下反映的高



Fig. 11 Variations of precipitation and runoff for a period of large precipitation in the Ice-Free Cirque Hydrological Gauge at the sources of Ürümgi River



Fig. 12 Variations of the ground temperatures (a) and soil moistures (b) in the active layer before and after a large precipitation

同样明显,降雪过程中,均有大约滞后1d的土壤 水分急剧增多现象(图12b).经过数小时后,随着 降雪消融形成地表径流,又开始回落到平稳阶段, 土壤水分经过内部的运移变化将达到一个相对稳定 的范围.降水过程在地表反射辐射和热通量的变化 上表现出了非常典型的周期变化.

4 结论与讨论

低的趋势

气候变化直接结果是乌鲁木齐河源区冰雪融水 径流的变化与气温变化的关系更加密切,但影响冰 川区径流变化的另一个主要因素降水也非常关键. 由于降水时段冰川区气温的大幅下降,冰雪消融量 明显减少,而当降水停止,气温迅速回升时,更多 的冰雪径流将会产生,所以降水对径流的影响具有 两面性.在高山冰川区,降水产流量往往不足以弥 补冰雪消融量减少造成的径流减少量,因此,降水 时期冰川区径流量通常小干无降水时期.

20 世纪 80 年代中期至 90 年代初期前后乌鲁 木齐河源 1 号冰川和空冰斗径流的年内变化比较显 著,除了径流增加的趋势比较明显,近年来 5 月份 1 号冰川春季径流在明显增大的同时,冰雪消融开 始产流的时间却有明显的推后现象,这种现象的出 现可能与冬春季降雪增多,导致冰川表面反射率提 高和积雪对冰川消融的保护作用有关.径流结束时 间的推后无疑与气温升高造成冰川冷储的减少,冰 川对气温变化的敏感性大大增强等原因有关.从典 型年份 1986 年和 2001 年径流日变化也可以直观地 看出径流的这种变化特点.

以固态降水为主的空冰斗径流变化表现为,年 径流增大趋势明显且变幅增大,同样也存在冬春季 积雪消融开始产流时间的推后现象.分析认为,降 水的增加是导致空冰斗径流明显增大的直接原因, 而冻土退化、活动层加厚是导致的春季融雪径流产 流时间推后主要原因.主要体现在冬春季融雪消融 初期,融水更多的用在下渗、湿润加厚和干燥的活 动层土壤上,而只有融化土壤达到饱和后,以下覆 未融冻土为界面开始产流.

参考文献(References):

- Zhang Guowei, Wu Sufen, Wang Zhijie. The signal of climate shift in Northwest China deduced from river runoff change in Xinjiang Region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 183-187. [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.]
- [2] Jin Huijun, Liu Zongxiang, Toshio Sone. Permafrost temperature in the ice pass at the source of the Ürümqi River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 25-29. [金会军,刘宗香,曾根敏雄. 天山乌鲁木齐河源冰大坂多年冻土温度监测[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 25-29.]
- [3] Zhao Lin, Li Ren, Ding Yongjiang. Simulation on the soil water-thermal characteristics of the active layer in Tanggula Range [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30 (6): 930-937. [赵林、李韧,丁永建.唐古拉地区活动层土 壤水热特征的模拟研究[J].冰川冻土,2008,30(6): 930-937.]
- [4] Liu Jingshi, Wei Wenshou, Huang Yuying, et al.. Hydro-

logical response of winter streamflow to climate change and permafrost degradation in Manas Watershed, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **28**(5): 656-662. [刘景时,魏文寿,黄玉英,等. 天 山玛纳斯河冬季径流对暖冬和冻土退化的响应[J].冰川冻 土, 2005, **28**(5): 656-662.]

- [5] Gong Tong Lang, Liu Changming, Liu Jingshi. Hydrological response of Lhasa river to climate change and permafrost degradation in Xizang [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61 (5): 519-526. [巩同梁,刘昌明,刘景时.拉萨河冬季径流 对气候变暖和冻土退化的响应[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 519-526.]
- [6] Li Zhong qin, 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.]
- [7] Han Tianding, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. The fact analysis of increasing runoff in the ürümqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 655-659. [韩 添丁,叶柏生,丁永建 等. 乌鲁木齐河流域径流增大的事实 分析[J].冰川冻土, 2005, 27(5): 655-659.]
- [8] Han Tianding, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. Precipitation variations in the southern and northern slopes of Mt. Tianger in the Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 761-766. [韩添丁,叶柏 生,丁永建,等. 天山天格尔山南北坡降水特征研究[J].冰 川冻土, 2004, 26(6): 761-766.]
- [9] Li Zhong qin, Han Tianding, Jin Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at Headwater of ü rüm qi River, Tianshan, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 117-123. [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 40 年观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123.]
- [10] Lu Chuanlin. Relationship of glacial ablation and meltwater runoff to air temperature [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(1): 79-84. [路传琳. 冰川消融及其对径 流与气温的关系[J]. 冰川冻土, 1983, 5(1): 79-84.]
- [11] Han Ping, Xue Yan, Su Hongchao. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang Region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 179-182. [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.]
- [12] Zhang Shuming, You Xiyao, Huang Yuying. Research on the an nual peek flood series of the rivers in Xinjiang [J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(5): 26-29. [章曙明,由希尧,黄玉英.新疆河流最大洪峰流量系列初步研究[J]. 水文, 2001, 21(5): 26-29.]
- [13] Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Comparison analysis of runoff change in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 414-422. [谢昌卫,丁永建,刘时银,等. 长 江黄河源寒区径流时空变化特征对比[J].冰川冻土, 2003, 25(4): 414-422.]

Characteristic of Runoff Process of the Glacier and Permaforst in the Headwaters of the Ürümqi River

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

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

Abstract: The startng date of spring runoff is postponed both in the Glacier No. 1 and the Ice-Free Cirque, and so is the ending date of autumn runoff, but not significantly, which indirectly show the ablation season and thawing season delayed; on the other hand, since 2000 the spring runoff has been markedly more than that in the 1980s, with an minor variation amplitude in the principal ablation period. In the Ice-Free Cirque, both summer runoff and runoff variation amplitude all increase clearly. It is believed that the variations of runoff in the Ürümqi River basin are resulted from the positive increase of air temperature in winter and autumn and the changes in precipitation, snowmelting water and freezing-thawing of the active layer of permafrost.

Key words : glacier and snow melting water ; runoff ; headwaters of the Uümqi River