

托木尔峰青冰滩 72 号冰川流域同位素 特征及径流分割研究*

宋梦媛¹ 李忠勤^{1,2} 金爽² 冯芳² 王晓艳²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 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, 兰州 730000)

提 要: 利用 2010 年 8 月在托木尔峰青冰滩 72 号冰川流域采集的不同水体样品, 分析了典型冰川流域的氢氧同位素变化特征, 并进行了初步的径流分割研究。结果表明, 青冰滩 72 号冰川流域河水、冰川融水、降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 含量存在显著差异; 根据河水、冰川融水和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 比值关系, 得出托木尔峰青冰滩 72 号冰川流域河水由冰川融水和降水组成; 在夏季洪水期, 进一步通过二元分割模型计算得出, 冰川融水所占比例为 74.8%, 降水所占比例为 25.2%, 冰川融水是托木尔峰青冰滩 72 号冰川流域径流的主要补给来源。

关键词: 青冰滩 72 号冰川; 氢氧同位素; 冰川融水; 径流分割

中图分类号: P426

文献标识码: A

水资源短缺及合理利用是我国西北干旱地区所面临的严重问题, 解决这一问题的关键是理解区域水循环的机制, 特别是水资源的季节性变化、来源和基流组成等^[1]。不同水体中 ^{18}O 、 D 稳定同位素特点作为研究水循环同位素应用的前提和必要条件^[2,3], 为研究区域水循环过程提供了一个很好的方法, 也为确定各种水体的形成和演化机制提供重要的科学依据, 同时能为区域水资源的合理利用奠定基础。目前, 应用稳定同位素方法来研究大气降水变化过程、地下水、冰雪融水和地表径流相互转化等研究, 已成为冰川、气候和水文学家所共同研究的热点问题^[4-6]。

定量计算河水中冰雪融水含量, 从而研究高寒流域产流过程, 其结果不仅用于降雨径流关系、补给水源和坡地汇流的研究, 还可反映全球变化^[7]。国外同位素径流分割的研究较早, 1963 年 Gonfiantini 等使用环境同位素对意大利两条河流量组成的研究以及原苏联 Voronokov、Zekster 的工作开始了此类分析方法, 但直到 70 年代发展了性能好且较经济的质谱仪后, 才有较广泛的应用^[8]。国内的研究始于 1993 年, 顾慰祖利用 ^{18}O 的分裂因素, 将天山乌鲁木齐河在不同时间和地点的补给来源划分为降水、融雪水、地下水和冰融水。结果表明, 地下水和冰雪融水是乌鲁木齐河的主要补给来源^[9]。

我国西北内陆地区, 干旱少雨, 生存与发展的水资源主要来源于冰川融水, 是内陆干旱区水资源的重要组成部分, 充当着固体水库的角色^[10]。托木尔峰地区是我国天山地区冰川数量最多, 规模最大的冰川发育分布区^[11]。到目前为止, 国内外对高寒地区氢氧稳定同位素的研究还较少, 特别是在该区南坡还是资料空白区。因此, 开展托木尔峰流域氢氧同位素特征及水循环机制的研究意义重大。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

托木尔峰地区位于天山南麓, 塔里木盆地北缘, 山脉平均海拔 5400 ~ 6600m, 不仅是天山最大的冰川作用地区, 同时也是世界上有名的山岳冰川分布区之一。降水主要来自于北冰洋和大西洋的潮湿气流, 6 月至 8 月占全年降水的 50% 左右, 虽然 10 月至翌年 4 月降水只占全年降水量的 30% 左右, 但都是冰川上

* 收稿日期: 2014-6-5; 修回日期: 2014-7-9。

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(41121001); 国家自然科学基金(41161012); 中国博士后科学基金项目(2013M532094) 资助。

作者简介: 宋梦媛(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事同位素水文方面研究。E-mail: mysong2014@163.com

的净积累,7~8月为冰川消融的盛季^[12,13],消融量大于积累量。青冰滩72号冰川位于托木尔峰南缘,昆马力克河源头(图1),冰川面积5.23km²,海拔4200m,冰储量0.398km³,属于复合型山谷冰川。

1.2 野外样品采集

样品采集于2010年8月9至12日,因该区8月份冰川消融最强盛,且在8日和9日有两场降水。样品均采用60ml聚乙烯塑料采样瓶收集,在冷冻状态下运抵中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室冷库保存,测试分析前置室温下自然融化。

本次研究共采集水样53个,其中河水样品共19个,冰川末端水文点15个、小库尔干河和地窝子河观测点各2个;降水样品共6个,其中水文点和大本营各2个,小库尔干河和3950m冰面各1个;冰川融水样品共28个,其中冰川末端8个,冰面上A、B、C、D排观测花杆水样共16个,3950m冰面4个。由于冰川末端融水样品的同位素值即可表示冰川融水的同位素值,因此本文仅在径流分割时使用末端的数据。

1.3 室内样品分析

所有样品从野外运回后于-15℃保存,测试分析前在洁净等级为百级的超净工作台和恒定室温下自然融化,以备分析。采用液态氢氧同位素分析仪(LGR-DLT-100 LWIA)测试 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 比率用相对于标准平均大洋水(V-SMOW)的千分差表示^[14], $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均分析误差为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.6\text{‰}$ 。所有样品进行三次测试分析,计算出各样品同位素平均值得出 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素值。

青冰滩72号冰川流域径流主要为冰川融水和降水两种水体组分的混合,因此采用两元分割模型进行分割,其径流分割方程为^[15]:

$$Q_t = Q_g + Q_p \quad (1)$$

$$Q_t C_t = Q_g C_g + Q_p C_p \quad (2)$$

式中: Q_t 、 C_t 分别表示河水的径流量和同位素含量; C_g 和 C_p 分别表示冰川融水和降水的同位素含量; Q_g 和 Q_p 则分别表示冰川融水量和降水量。为计算水体的同位素值并进行径流分割,通常使用体积加权平均值法^[16]进行计算,以氧同位素 ^{18}O 为例,得其表达式如下:

$$\delta^{18}\text{O}_e = \frac{\sum_{i=1}^N M(i) \delta^{18}\text{O}_m(i)}{\sum_{i=1}^N M(i)} \quad (3)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}_e$ 和 $\delta^{18}\text{O}_m$ 分别表示同位素的计算值和实测值; $M(i)$ 表示冰川融水量。

2 结果与分析

2.1 不同水体氢氧同位素特征研究

表1、表2、表3分别给出了本次研究所观测的青冰滩72号冰川流域中河水、降水和冰川融水同位素比值。河水中氢氧稳定同位素的组成是不同水源的同位素含量、其混合比例和蒸发分馏作用综合响应的结果。根据观测结果可以看出,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化范围分别为 $-10.78 \sim -7.3\text{‰}$ 和 $-63.98 \sim -58.29\text{‰}$,平均值分别为 -9.85‰ 和 -61.35‰ ;而冰川融水同位素值分布相对集中(图2), $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化范围分别为 $-11.78 \sim -7.1\text{‰}$ 和 $-76.24 \sim -32.11\text{‰}$,平均值分别为 -10.48‰ 和 -65.69‰ 。

较之河水中氢氧同位素值,冰川融水与河水相差

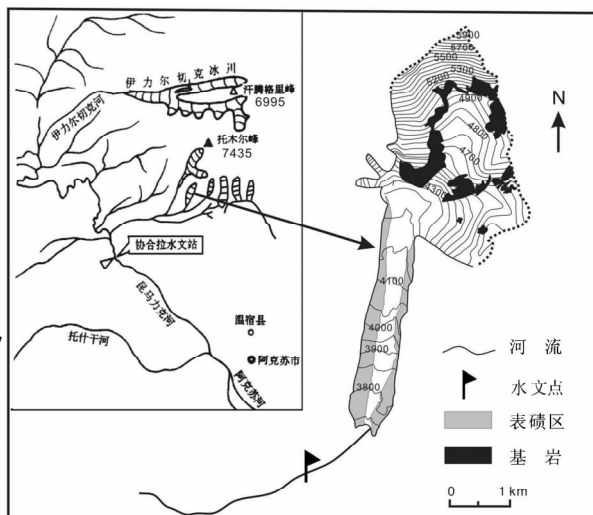


图1 青冰滩72号冰川地区位置

Figure 1 Location of Glacier No. 72 in Qinghingtian

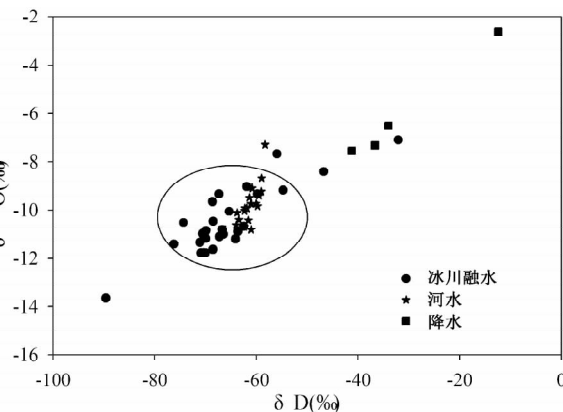


图2 冰川融水、降水和河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征

Figure 2 Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in glacial meltwater, rainfall and river water

不大,相关性明显,显然冰川融水是该区流域水体的主要补给来源。另外,从表2中可以看出,8月10日几乎所有的冰川融水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素值都比9日较高,原因可能为:青冰滩72号冰川9日平均气温为 10.7°C ,10日较高为 13.45°C ,气温升高使蒸发加剧导致同位素富集,表现了同位素蒸发分馏的“温度效应”。降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化范围分别为 $-10.83 \sim -1.34\text{‰}$ 和 $-66.71 \sim -12.45\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的平均值分别为 -6.03‰ 和 -41.31‰ ,同河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均值比较,降水的同位素值变化幅度较大,从图2中可以看出降水与河水相关性不明显。

表2 冰川融水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素值Table 2 Values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in glacier meltwater

序号	采样位置	采样时间(2010-8-9)		序号	采样位置	采样时间(2010-8-10)	
		$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$			$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$
1	末端4	-11.12	-67.28	15	末端4	-10.91	-63.64
2	末端3	-11.78	-70.35	16	末端3	-9.34	-67.37
3	末端2	-11.78	-70.85	17	末端2	-9.66	-68.64
4	末端1	-10.69	-62.51	18	末端1	-11.21	-64.10
5	A排冰	-8.4	-46.75	19	A排冰	-10.48	-68.49
6	A排水	-11.0	-70.63	20	A排水	-10.87	-69.92
7	B排冰	-13.66	-89.63	21	B排冰	-7.1	-32.11
8	B排水	-11.78	-70.09	22	B排水	-9.55	-61.73
9	C排冰	-11.35	-71.14	23	C排冰	-11.42	-76.24
10	C排水	-11.19	-69.94	24	C排水	-10.06	-65.39
11	D排冰	-9.19	-54.74	25	D排冰	-7.67	-55.96
12	D排水	-9.04	-61.87	26	D排水	-9.35	-59.82
13	3950m冰	-10.53	-74.34	27	3950m冰	-11.02	-66.54
14	3950m水	-11.64	-68.57	28	3950m水	-10.83	-66.71

2.2 冰川流域不同水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 相关性

如果冰川流域河水径流由两个不同水源组分混合而成,则其 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值位于两个组分之间^[17],两组分的同位素值与河水相关性,可反映出其混合比例的大小^[7]。青冰滩72号冰川流域河水的 $\delta^{18}\text{O}$ ($-9 \sim -11\text{‰}$)大致位于冰川融水和降水之间(图3),青冰滩72号冰川河水和冰川融水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的关系相近,冰川融水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布于 $-9.5 \sim 12.5\text{‰}$ 之间, δD 分布于 $-55 \sim -70\text{‰}$ 之间,大致在一条趋势线上,表明青冰滩72号冰川流域河水的主要来源为冰川融水。

青冰滩72号冰川降水主要集中于8月,根据Craig^[18]提出的全球降水线方程 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$,降水同位素都落于全球大气降水线的上部(图3)。大气降水中氢氧同位素含量的变化主要受水循环过程中蒸发和凝结过程的分馏作用以及水源区初始状态的控制^[19],研究区降水主要来自大西洋和北冰洋的潮湿气流,水汽在海陆间经过长距离输送加之受到夏季强烈蒸发作用的影响,导致水汽受到较强的分馏作用而使 ^{18}O 和D贫化,从而使降水中 ^{18}O 和D贫化。

2.3 同位素径流分割计算结果

文中研究根据青冰滩72号冰川流域河水、降水和冰川融水的同位素值,对水文观测点上游流域进行径流分割(图1),因此采用水文观测点的河水样品进行计算。根据公式(1)、(2)可推导出二元径流分割

$$\text{模型简易方程,即公式(4)、(5): } K_g = \frac{Q_g}{Q_t} \times 100\% = \frac{C_t - C_p}{C_g - C_p} \times 100\% \quad (4)$$

表1 河水和降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素值Table 1 Values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in river water and rainfall

降水		河水	
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$
-10.83	-66.71	-10.43	-61.57
-7.55	-41.23	-9.11	-60.85
-6.52	-34.07	-9.83	-59.77
-7.32	-36.69	-10.03	-62.36
-2.63	-12.45	-10.63	-63.98
-1.34	-56.71	-9.74	-60.08

表3 8月10至11日水文点河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素值Table 3 Values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in river water at observation station during August 10 to 11

水文点河水					
采集时间	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	采集时间	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$
22:00	-10.83	-61.05	12:00	-10.71	-62.40
0:00	-9.24	-59.03	14:00	-10.41	-63.43
2:00	-9.74	-61.09	16:00	-9.49	-61.38
4:00	-9.92	-61.85	18:00	-8.68	-58.99
6:00	-7.30	-58.29	20:00	-10.11	-63.83
8:00	-9.41	-59.49	22:00	-9.92	-62.27
10:00	-10.78	-63.24			

$$K_p = \frac{Q_p}{Q_t} \times 100\% = \frac{C_t - C_g}{C_p - C_g} \times 100\% \quad (5)$$

进一步根据体积加权平均值法计算出各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值,冰川融水为 -10.87‰ ,降水为 -6.71‰ ,河水为 -9.82‰ 。通过计算得出各水体的径流分割比例,其中冰川融水占河流总径流量的 74.8%,降水所占比重较小,为 25.2%。

3 讨论

从 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化范围看,降水的同位素变化范围最大,冰川融水次之,而河水的变化范围最小,这体现了蒸发分馏作用对不同水体同位素的影响;从平均值来看,冰川融水和河水比较相差较小,降水的平均值与河水相差较大,表明青冰滩 72 号冰川流域降水对河川径流的补给较少。

此外,与 2009 年 72 号冰川融水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 (-68.09‰) 和同地区的青冰滩 73 号冰川融水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 (-73.62‰) 相比,文中 2010 年的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值略高,原因可能为 2010 年较之 2009 年消融加剧,冰川消融程度的不同导致水体同位素富集程度不同。

本地区冰川融水在河川径流中的比重,同干旱区大多数冰川对于河川径流的补给比重相近,如刘玉虹^[17]得出的我国黑水河流域的径流分割结果,冰雪融水比重为 63.8~92.6%;蒲焘^[20]得出玉龙雪山白水河湿季冰川融水的补给比重为 40.7~62.2%,与之相比较,本研究中青冰滩 72 号冰川流域河水的补给来源组分比例,较为符合西北干旱地区河水中各组分的补给贡献率。

4 结论

(1) 根据青冰滩 72 号冰川流域内冰川融水、降水和河水的稳定同位素特征的相互关系可知,该冰川流域内冰川融水的同位素值变化幅度相对稳定,其中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化范围分别为 $-11.78 \sim -7.1\text{‰}$ 和 $-76.24 \sim -32.11\text{‰}$;而降水变化幅度比较大, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化范围分别为 $-66.71 \sim -12.45\text{‰}$;河水样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的同位素值变化范围分别为 $-10.78 \sim -7.3\text{‰}$ 和 $-63.98 \sim -58.29\text{‰}$,冰川融水与之基本一致。

(2) 通过流域内不同水体同位素差异示踪法,对研究区的河水不同补给来源进行估算,得出青冰滩 72 号冰川流域夏季上游冰川融水和降水占河水的比例分别为 74.8% 和 25.2%,托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川流域水体主要为降水和冰川融水。

(3) 与天山其他典型冰川相比,托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川消融明显更加强烈,随着全球变暖加剧,新疆水资源管理部门应更加重视冰川融水的作用,合理利用水资源。

参考文献

- [1] Kong Yanlong, Pang Zhonghe. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge[J]. Journal of Hydrology, 2012(2): 121-129.
- [2] Feng Fang, Li Zhongqin, Zhang Mingjun, et al. Deuterium and oxygen 18 in precipitation and atmospheric moisture in the upper Urumqi River Basin, eastern Tianshan Mountains[J]. Environmental Earth Science 2013 68(4): 1199-1209.
- [3] 李晖,周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 47-50.
- [4] 刘君,郭华良,刘福亮等. 包头地区大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征浅析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 157-162.
- [5] 卫克勤. 同位素水文地球化学[J]. 地球科学进展, 1992, 7(5): 67-68.
- [6] 黄天明,聂中青,袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8): 76-81.
- [7] 孔彦龙,庞忠和. 高寒流域同位素径流分割研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 619-625.
- [8] 顾慰祖. 论流量过程线划分的环境同位素方法[J]. 水科学进展, 1993, 7(2): 105-111.

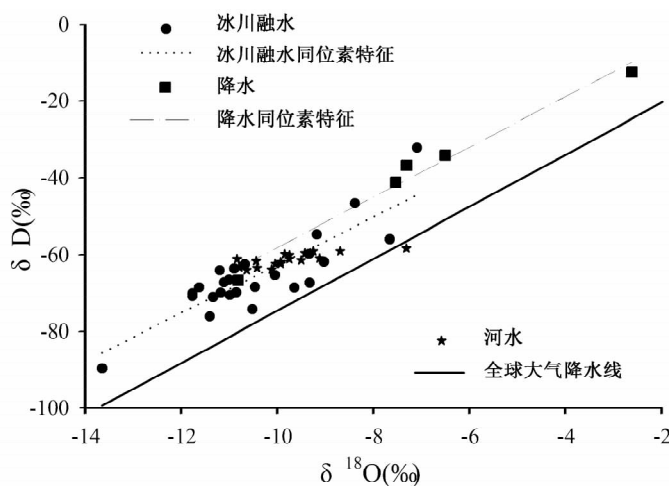


图3 冰川融水、降水和河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 关系
Figure 3 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in glacier meltwater, rainfall and river water

- [9] Gu W Z , Longinelli A. A case study on the hydrological significance of stable isotope data on alpine catchments with snow cover and glaciers [M]. Snow and Glacier Hydrology (Proceedings of the Kathmandu Symposium) , 1993: 371.
- [10] 杨针娘. 中国冰川水资源 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 53 – 110.
- [11] 赵爱芳, 张明军, 李忠勤, 等. 托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究 [J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1485 – 1490.
- [12] 曹敏, 李忠勤, 李慧林. 天山托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川表面运动速度特征研究 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 21 – 29.
- [13] 雒园, 李慧林, 李忠勤, 等. 托木尔峰地区神奇峰冰川 3950m 处物质平衡与气象要素关系分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 62 – 67.
- [14] Craig H. Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen – 18 in natural waters [J]. Science, 1961, 133: 1833 – 1834.
- [15] 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川近期研究与应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2011: 93.
- [16] Liu Y H , Fan N J , An S Q , et al. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the wet season in the Heishui River , China [J]. Journal of Hydrology , 2008 , 353: 314 – 321.
- [17] 王恒纯. 同位素水文地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 54 – 57.
- [18] Craig H. Isotopic variations in meteoric water [J]. Science, 1961, 133: 1702 – 1703.
- [19] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京西山鹫峰地区氢氧稳定同位素特征分析 [J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 642 – 650.
- [20] Pu Tao , He Yuanqing , et al. Characteristics of water stable isotopes and hydrograph separation in Baishui catchment during the wet season in Mt. Yulong region , south western China [J]. Hydrological Processes , 2012 , DOI: 10. 1002/hyp. 9479.

Characteristics of water isotopes and hydrograph separation in the Glacier No. 72 of Qingbingtian , Tomur Peak

SONG Mengyuan¹ , LI Zhongqin^{1 2} , JIN Shuang² , FENG Fang² , WANG Xiaoyan²

(1. College of Geography and Environment Sciences , Northwest Normal University , Lanzhou 730070 , China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

Abstract: Based on the different water samples collected at the Glacier No. 72 of Qingbingtian in August 2010 , the stable isotopes characteristics and hydrograph separation were discussed in this paper. The results indicated difference of oxygen – 18 and deuterium existed among the river water , glacier meltwater and rainfall samples. According to the relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD of stream , glacier meltwater and rainfall , the stream flow of Glacier No. 72 of Qingbingtian catchment was separated into components of glacier meltwater and rainfall. In summer flood period , the contribution of glacier meltwater to Glacier No. 72 of Qingbingtian river basin was 74. 8% , and that of rainfall was 25. 2% , which meant that glacier meltwater was the main supplying water source of stream flow.

Key words: Glacier No. 72 of Qingbingtian; stable isotopes; glacier meltwater; hydrograph separation