

乌鲁木齐河源冰川径流中总可溶性固体和 悬浮颗粒物的特征及影响因素分析^{*}

高文华¹ 李忠勤^{1 2 **} 张明军^{1 2} 高前兆² 董志文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 / 天山冰川站, 兰州, 730000)

摘要 通过对天山乌鲁木齐河源1号冰川进行连续4年(2004—2007年)冰川融水径流观测取样,应用数理统计、不同参数和模型比较等方法,对径流中总可溶性固体(TDS)和悬浮颗粒物(SPM)的特征及影响因素进行分析研究。结果表明,总体上冰川区径流中TDS和SPM与其它区域相比浓度较低,且随时间变化明显。TDS年际变化较小,年内变化表现为消融初期和末期浓度较高,消融强烈时浓度较低;SPM年际变化较大,年内变化与TDS呈相反的变化趋势。气温和降水通过影响径流量来影响TDS和SPM的含量变化。气温较高,降水量较大时,径流量较大,径流中TDS浓度较低,SPM浓度较高。影响因素分析表明,径流中TDS主要受冰川融水、高山降水以及径流化学侵蚀影响,而SPM主要受流水侵蚀、冰川侵蚀和不溶粉尘等影响。

关键词 乌鲁木齐河源, 冰川径流, TDS和SPM, 变化特征, 影响因素。

高海拔冰川是西北干旱区的重要水资源,对冰川融水中成分的变化特征及其影响因素进行研究,对于西北干旱区水资源的合理利用和水质水环境的评价具有重要的参考价值。冰川融水形成的河流是一个开放的系统,与大气圈、生物圈和岩石圈也存在着相互作用,河流周围的环境对河流中的物质变化有重要影响。已有研究^[1-2]表明,在降水较多的地区,河流中的物质主要受大气降水和河流侵蚀作用的控制,而在冰川融水形成的河流中,尤其是冰川末端位置的径流中,水质的特征则还要受到冰川冰雪中化学物质以及其它杂质如粉尘、有机物和悬浮的黑炭等影响。冰川径流中总可溶性固体(TDS)和悬浮颗粒物(SPM)是水质状况的重要参数,其含量和成分随时间和空间的改变会发生很大变化,对其变化特征进行研究有着重要的意义,尤其是在人类难以到达的河流发源地、冰川区进行长期径流取样观测,并对其中TDS和SPM的特征进行研究,可以弥补和完善对于高海拔冰川径流水质的认识。

在全球范围内,已有许多研究针对河流中的TDS和SPM的变化特征及其影响因素进行了探讨,如Sinyukovich^[3]、Zabaleta等^[4]对所在研究区河流中TDS和SPM与流量大小、气候条件等影响因素关系的研究表明,径流量、降水量和风速对径流中的物质变化会造成影响。许炯心^[5]和师长兴^[6]对黄河支流中悬移质的研究表明,降水量、风力侵蚀、水岩相互作用和周围地表物质等都会对其造成影响。然而,以上这些研究都集中在河流的中下游地区,对河源区径流相关特征及影响因素的研究则很少。已有一些研究对我国天山乌鲁木齐河径流变化进行了探讨^[7-9],但对其上游冰川径流水质状况,包括TDS和SPM的季节变化特征和影响因素分析的研究尚未开展。

鉴于冰川区径流研究的重要性,本文依据乌鲁木齐河源区冰川水文点2004—2007年消融期(5—9月)的水样资料,对冰川径流中TDS和SPM的变化特征及影响因素进行分析和探讨。

1 实验方法

选取的研究区域位于天山乌鲁木齐河源(86°45′—87°56′E, 43°00′—44°07′N)。山区流域面积

2010年5月31日收稿。

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127); 国家自然科学基金项目(40631001, 40571033, 40701035, 40371028, J0630966); 国家基金委创新群体项目(40121101); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0019)资助。

^{**} 通讯联系人, E-mail: Lizq@lzb.ac.cn

1070 km², 流域内山势高, 坡降大, 流水侵蚀力和冲刷力强, 垂直地带性明显, 海拔 3600 m 以上发育有现代冰川。1 号冰川(43°05′N, 86°48′E) 为河源区面积最大的一条冰川, 为冰斗-山谷冰川, 由已经分离的东、西支组成。径流样品采集于河源区的 1 号冰川水文点, 距离 1 号冰川末端只有 200 m, 控制流域面积 3.34 km²。2004—2007 年消融期(5—9 月) 在乌鲁木齐河源区 1 号冰川水文点进行了水样取样工作。水样为每日 14:00 采集, 共采集 373 个样品。所有样品的采集过程严格按照相关采样规范进行, 保证样品清洁无污染。径流水样用蒸馏水清洗过的塑料瓶直接采集。积雪样品采集时按雪层剖面分层取样, 将样品装入洁净塑料袋内, 待其自然融化后装入样瓶。同时本研究比较了 1 号冰川部分冰芯数据。采集好的样品在 -18℃ 的冷冻状态下储存, 直至在中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室分析。

在测试分析前将样品从冰柜中取出, 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。TDS 使用 DDSJ-308A (0.001) 型电导率仪(上海雷磁仪器厂) 进行测定。使用美国 Accusizer 780A 光学粒径检测仪对水样中 SPM 进行分析。该仪器可测量悬浮颗粒物的粒径范围是 0.57—400 μm, 采用单离子光学传感技术, 通过比较监测的脉冲高度和由一组均质的已知粒径的标准粒子获得的一条标准校正曲线, 建立粒子在一个时间段的粒度分布。实验的分析误差控制在 5% 以内^[10]。仪器分析得到各个粒径范围内悬浮颗粒物的精确数量, 计算其数量浓度, 根据地壳表层岩石的平均密度为 2.65 g·cm⁻³, 即可计算出悬浮颗粒物的质量浓度。雪样和冰芯样品中粉尘微粒的测定前人研究已有论述^[10-12]。此外, 气象数据来自于位于中国科学院天山冰川站冰川区海拔 3700 m 水文气象站常规观测资料和中国气象局大西沟气象站资料。同时, 运用度日模型(Degree-day Model) 计算了乌鲁木齐河源 1 号冰川冰雪消融量, 以便分析冰川径流中 TDS 和 SPM 受冰川融水量变化的影响。

2 结果和讨论

2.1 冰川径流 TDS 和 SPM 浓度及随时间的变化

实验分析表明, 天山乌鲁木齐河源冰川径流中 TDS 和 SPM 随时间变化表现出明显的变化规律。冰川区径流中 TDS 和 SPM 与其它区域相比有着很大不同和独有特征。2004—2007 年径流中 TDS 的浓度年平均最大值为 48.08 mg·L⁻¹, 最小值为 31.29 mg·L⁻¹, 平均浓度为 42.16 mg·L⁻¹, 明显低于世界不同区域河流的平均值 65 mg·L⁻¹^[13]; 径流中 SPM 的浓度年平均最大值为 166.93 mg·L⁻¹, 最小值为 122.00 mg·L⁻¹, 平均浓度为 139.40 mg·L⁻¹。根据 Meybeck 等人对世界河流中悬浮物浓度的等级划分^[14], 乌鲁木齐河源区冰川径流中 SPM 的浓度较低。冰川区 TDS 和 SPM 的低值反映了其特殊性。在高海拔冰川区, 大气中的水汽经过向高山地区蒸馏和传输形成降水, 水中的 TDS 含量较低, 加上高海拔区域蒸发小, 受浓缩作用影响小; 同时经过冷藏由冰川和积雪消融出流, 属于淡水出流, 水循环范围有限, 而且在冰川成冰的过程中, 会造成可溶性离子不同程度上的流失。多年针对天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区研究点的观测和研究结果^[15]表明, 消融期间, 可溶性离子的浓度均有不同程度的减少, 其中 SO₄²⁻ 的浓度减小幅度最大, Mg²⁺ 的变化较小。其变化顺序为: SO₄²⁻ > Ca²⁺ > Na⁺ > NO₃⁻ > Cl⁻ > K⁺ > Mg²⁺。可溶性离子的大量减少使得冰川冰融水中 TDS 含量较少。SPM 为悬浮物质, 与周围环境和土质密切相关, 包括冰川径流中的固体颗粒, 因处于河源区, 还有一些不溶于水的胶体物质和少量微生物, 通常来源于冰川泥、流水冲刷出的河床泥沙, 随水漂流进入的生物和微生物, 大气传输沉降在积雪和冰川的气溶胶粉尘颗粒, 以及山坡两侧受风化或风力吹入河谷的颗粒物等。然而, 由于处于河流源区, SPM 浓度相对较低。

冰川径流中 TDS 和 SPM 随时间的变化可以反映其年内和年际变化特征。图 1 显示了 2004—2007 年乌鲁木齐河源 1 号冰川径流中 TDS 和 SPM 在年内不同月份的平均值。总体变化特征表现为, 径流中 TDS 在 5 月和 9 月时其浓度较高, 7 月浓度最低。即消融初期和消融末期时, 径流中 TDS 浓度较高; 消融强烈时, 径流中 TDS 浓度较低。径流中 SPM 的浓度在年内的变化特征与 TDS 不同, 表现为 5 月和 9 月径流中 SPM 的浓度较低, 7 月其浓度相对较高。即消融初期和末期时, 径流中 SPM 的浓度较低; 消融强烈时, 径流中 SPM 的浓度较高。图 2 反映了 2004—2007 年乌鲁木齐河源 1 号冰川水文点径流中 TDS 和 SPM 及日平均流量、日平均气温和降水量随时间的变化。径流中 TDS 和 SPM 的年内变化特征在图中得

到很好地反映,同时也可以据此对其年内特征在年际上的变化进行验证.由图2可见,TDS的年际变化差异不大且变化过程较一致.然而,SPM的年际变化差异较大,且峰值变化较不稳定,这通常与径流洪峰的发生过程有关.如2004年和2006年径流中SPM的浓度峰值较高,并且2004年SPM的峰值多集中在6月中旬到7月下旬,而2006年SPM的峰值出现在7月中旬到8月下旬(图2).TDS和SPM均与气温和日平均流量随时间的变化有着很好的对应性,其中,TDS与气温和日平均流量呈负相关,SPM与气温和日平均流量呈正相关.然而,TDS浓度与降水量随时间变化表现出明显的不同,二者为明显的负相关关系,降水量越大,TDS浓度越小;降水量越小,TDS浓度越大(图2).这说明高山降水过程和冰川加速消融都对TDS浓度有着很大影响.SPM与降水量也有较好的一致性,降水量越大,则SPM浓度越大,说明降水量较大时引发的河流冲刷侵蚀作用对SPM影响较大.

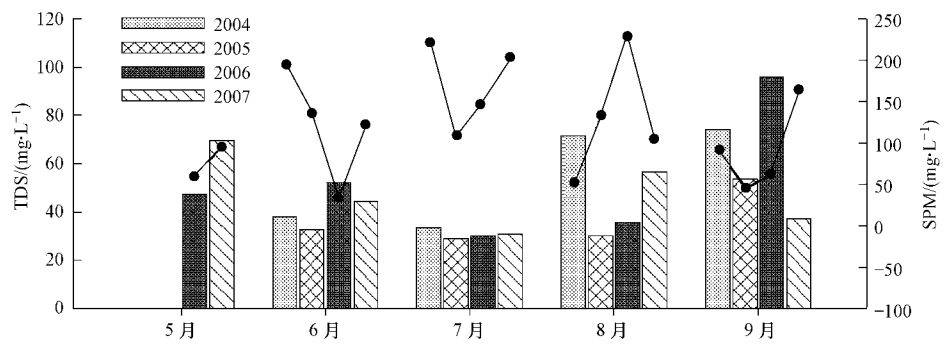


图1 2004—2007年冰川径流中TDS和SPM的月平均值变化
(TDS:柱状图;SPM:点线图)

Fig.1 Variation of TDS and SPM monthly average observed in the glacier melt runoff, 2004—2007

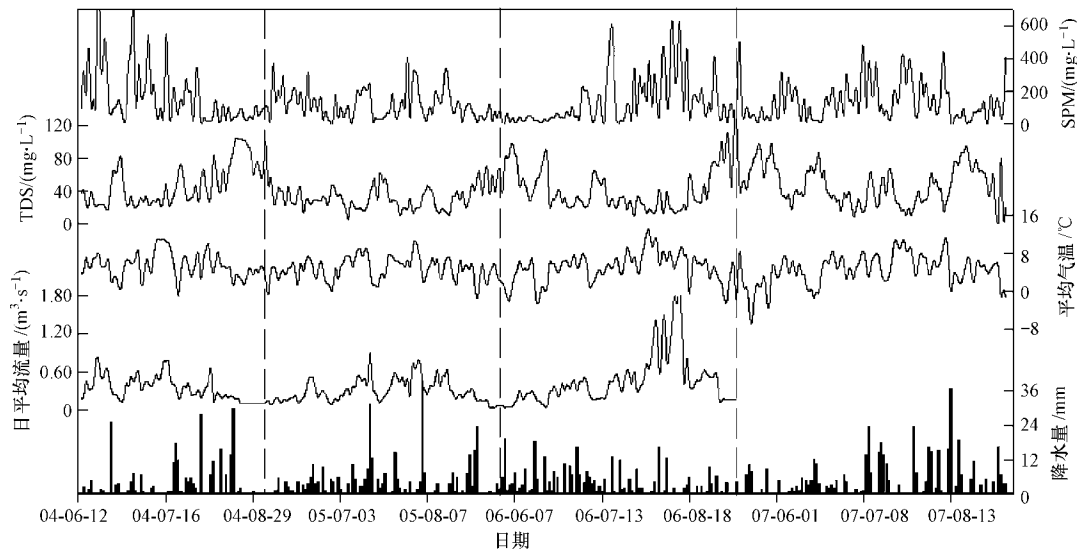


图2 2004—2007年冰川径流中TDS,SPM,日平均流量,日平均气温和降水量随时间变化

Fig.2 Variation of TDS,SPM,daily runoff,average temperature and precipitation in the glacier melt runoff, 2004—2007

冰川径流中TDS和SPM浓度的年内和年际变化特征与区域环境具有密切关系.已有研究表明径流量的大小及补给来源对径流中物质含量变化起着重要作用^[3,16-17].天山乌鲁木齐河源冰川水文点径流分割的结果表明^[18],径流主要以冰雪融水补给为主.径流中TDS和SPM与流量、日平均气温以及降水量之间的密切关系说明(图2),气温和降水是重要的影响因素,通过影响流量来影响水质状况.当气温较高时,则对应的流量较大,径流中TDS浓度较低,SPM浓度较高;当气温较低时,对应的流量较小,径流中TDS浓度较高,SPM浓度较低.将2004—2006年乌鲁木齐河源冰川水文点的流量与TDS和SPM做拟合分析,得出如下拟合方程:

$$\text{TDS} = aQ^b \tag{1}$$

$$\text{SPM} = cQ + d \tag{2}$$

式(1)和式(2)中,TDS为总可溶性固体, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; SPM为悬浮颗粒物, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Q 为日平均流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; a 、 b ($b < 0$)、 c 和 d 为拟合参数. 拟合方程中流量的适用范围在 $0.04\text{--}2.00\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 之间. 流量与TDS的相关系数 R 在 $-0.58\text{--}-0.84$ 之间,与SPM的相关系数 R 在 $0.48\text{--}0.67$ 之间,相关性较好. 图3显示了2006年冰川水文点径流中TDS和SPM随流量的变化关系. 由图3可见,TDS与流量之间表现出明显的负相关,相关系数为 $R = -0.63$. TDS随流量的增加整体呈下降趋势. 当流量较小时,TDS的浓度较高,随着流量的增加,TDS的浓度逐渐减小. 当流量在 $0\text{--}0.30\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 之间逐渐增大时,TDS浓度下降的速度较快,而随着流量的继续增大,TDS浓度下降减缓,当流量超过 $0.80\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 之后,TDS随流量的增加而维持在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右变化. 与TDS不同,SPM与流量之间表现出正相关关系(图3). SPM随流量增加而呈增大趋势. 在消融初期和消融末期时,径流补给以融雪水和浅层地下水补给为主,径流量较小,径流对TDS的稀释作用较弱,因此消融初期和末期时径流中TDS浓度较高. 然而较小的径流补给量也导致径流的水动力条件较弱,径流的冲刷作用较小,同时不同补给来源中SPM的补给量也较少,因此消融初期和末期时径流中SPM的浓度较低. 在消融强烈时期,径流补给以冰雪融水和降水量补给为主,径流量较大,径流对TDS的稀释作用增强,因此径流中TDS浓度较低. 然而径流量瞬间增大时产生的水动力条件也较强,径流中SPM补给量也较大,因此径流中SPM的浓度较高.

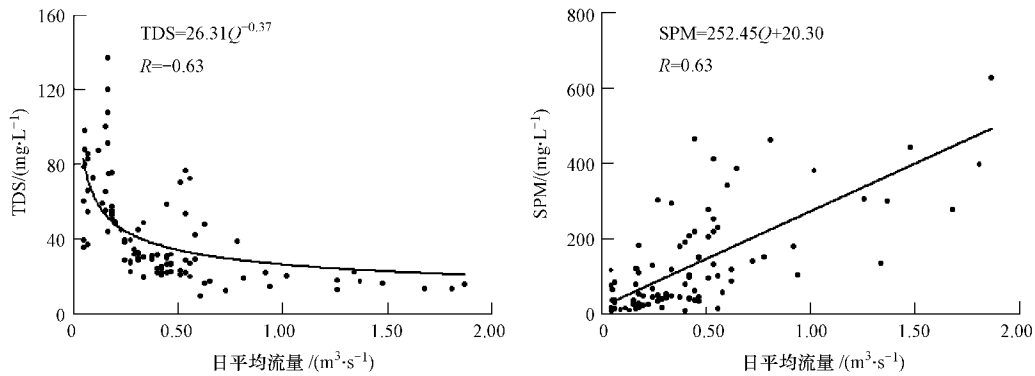


图3 2006年1号冰川水文点径流中TDS和SPM随径流量的变化

Fig.3 Variations of TDS and SPM with runoff in the Glacier No.1 hydrological point in 2006

为进一步探讨冰雪融水在河流物质含量的变化中所起的作用,本文分析了TDS和SPM随冰雪融水量的变化.在众多研究方法中,度日模型(Degree-day Model)是估算冰雪消融最为常用和最为简单的方法之一^[19].已有研究^[20-21]运用度日模型计算天山乌鲁木齐河源1号冰川数十年来的物质平衡变化序列.本文采用度日模型来计算冰雪消融量,再将其换算成冰雪融水径流量.具体计算公式如下:

$$M = \text{DDF} \times \text{PDD} \tag{3}$$

式(3)中, M 为冰川或雪的消融水当量, $\text{mm w. e.}\cdot\text{d}^{-1}$; DDF为冰川或雪的度日因子, $\text{mm w. e.}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; PDD为某一时段内的正积温 $^{\circ}\text{C}$.其一般由(4)获取.式(4)中 T_i 为某天(i)的日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; H_i 为逻辑变量,当 $T_i \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $H_i = 1.0$;当 $T_i \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $H_i = 0.0$.

$$\text{PDD} = \sum_{i=1}^n H_i \times T_i \tag{4}$$

此外,正积温的计算也可假定气温呈正态分布来实现.若日或月平均气温以气温的谐波变化来表示(T_d),则:

$$T_d(t) = T_a + T_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{A}\right) + T_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{A}\right) \tag{5}$$

式(5)中, A 为研究时段内的总天数; T_a 为年平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_1 和 T_2 为回归参数.本研究乌鲁木齐河源区连续多年(自1959年以来)常规气象观测验证发现气温变化基本符合该公式的适用条件.

对于正态分布的气温,其研究时段内的正积温由下式计算:

$$PDD = \int_0^A \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} e^{\frac{-(T_d(t)-T_m)^2}{2\delta^2}} dT dt \tag{6}$$

式(6)中,为气温分布标准差; T_m 为研究时段内的平均气温,℃. 这种正积温的计算方法已在其它研究中得到验证^[22]. 现有研究资料的计算结果也表明了这种计算方法的可行性.

图4为冰川径流中TDS和SPM随冰雪融水量的变化. 径流中TDS和SPM与冰雪融水量的拟合方程分别如下:

$$TDS = 20.67Q_m^{-0.17} \quad (R = -0.68 \quad n = 77) \tag{7}$$

$$SPM = 309.15Q_m + 79.52 \quad (R = 0.55 \quad n = 77) \tag{8}$$

式(7)和式(8)中,TDS为总可溶性固体,mg·L⁻¹; SPM为悬浮颗粒物,mg·L⁻¹; Q_m 为冰雪融水量,m³·s⁻¹; R 为相关系数; n 为样品数. 拟合方程中冰雪融水量的适用范围在0.001—0.960 m³·s⁻¹之间. 由图4可见,径流中TDS与冰雪融水量之间表现出负相关关系,说明冰雪融水量的增加对径流中的TDS浓度起稀释作用. 其余年份的TDS与冰雪融水量也进行了相同的拟合分析,相关系数 R 在-0.51—-0.68之间,相关性较好. 径流中SPM随冰雪融水量的增加变化幅度较大,但总体上SPM的浓度随冰雪融水量的增加而增大. 对其余年份的SPM与冰雪融水量进行同样的拟合分析表明,2004年的拟合分析结果较差,其余年份的拟合较好,相关系数 R 在0.40—0.55之间. 总之,冰雪融水量是冰川区径流的重要组成部分,其变化对径流中的TDS和SPM的浓度变化产生较大影响.

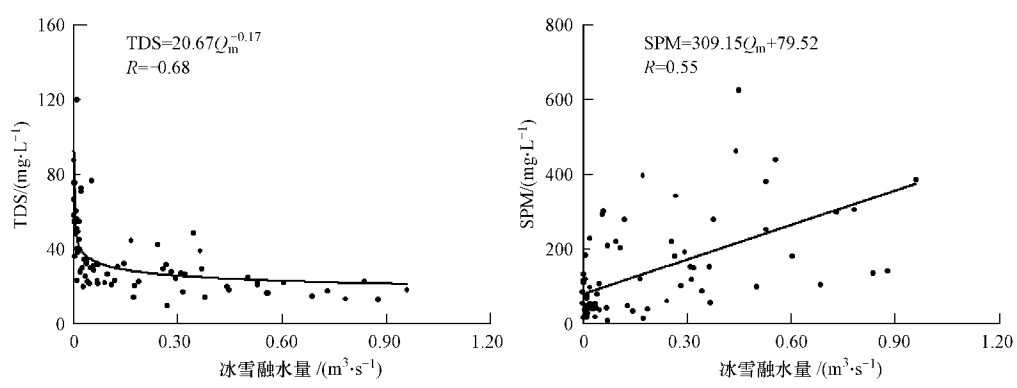


图4 2006年1号冰川水文点径流中TDS和SPM随冰雪融水量的变化

Fig. 4 Variation of TDS and SPM with glacier melt water in the Glacier No. 1 hydrological point in 2006

2.2 冰川径流中TDS和SPM变化的影响因素分析

采用参数FCRD (Flux Change Relative to Discharge)可以更准确地解释不同年份间由于水源补给差异造成的水文变化对径流中TDS和SPM的影响^[23]. FCRD通过不同年份TDS和SPM的比值除以相应年份的径流量的比值而得到. 为便于分析,FCRD值均采用径流量大的年份除以径流量小的年份. 具体计算公式为:

$$FCRD_{y_i/y_j}^x = \frac{X_{y_i}/X_{y_j}}{Q_{y_i}/Q_{y_j}} \tag{9}$$

式(9)中, X 为研究对象,即TDS或SPM,μ·a⁻¹; y_i 和 y_j 为年份; Q 为年径流总量($Q_{y_i} > Q_{y_j}$),μ³·a⁻¹. 表1为1号冰川水文点径流中TDS和SPM在不同年份间的比值及FCRD值. 结果显示,FCRD^{TDS}_{2006/2004} = 0.82, FCRD^{SPM}_{2006/2004} = 0.89,均小于1. 即径流中TDS增加的程度小于径流量增加的程度,表明相对于2004年,2006年增加的水量对径流中TDS起稀释作用. 比较2004—2006年1号冰川水文点径流的年冰雪融水量、液态降水量及两者总和(表2)发现,2006年的年冰雪融水量、液态大气降水和两者总和分别是2004年的1.43倍、1.85倍和1.56倍. 说明相对于2004年,2006年增加的水量来源于降水量. 表明液态大气降水对径流中TDS起稀释作用. FCRD^{TDS}_{2004/2005} = 1.41, FCRD^{SPM}_{2004/2005} = 1.48,均大于1. 即径流中TDS和SPM增加的程度大于径流量增加的程度,表明2004年增加的水量对径流中TDS和SPM的含量起增加作用. 由表2可见,相对于2005年,2004年增加的水量为冰雪融水. 而从表3看出,径流中TDS浓度明显高于1号冰川表层雪和冰芯中TDS的浓度,是表层雪和冰芯中TDS浓度的6倍和14倍. 表明冰雪融水中

TDS 补给径流的同时,对径流中 TDS 起稀释作用. 根据实验室分析得出的冰芯样品中粉尘微粒的数量浓度、平均粒径以及雪冰中不溶微粒的平均密度($2.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),即可计算出冰芯中不同深度中的粉尘浓度. 将不同深度粉尘微粒的浓度和平均粒径取平均值视为冰芯中粉尘的平均浓度和平均粒径(表 3). 比较表层雪、冰芯中粉尘微粒的浓度与冰川径流中 SPM 的浓度可以看出,径流中 SPM 的浓度要明显高于表层雪中粉尘微粒的浓度,而低于冰芯中粉尘的浓度,表明冰雪融水中不溶微粒补给径流的同时,对径流中 SPM 起增加作用. 而径流中 SPM 的平均粒径高于表层雪和冰芯中粉尘的平均粒径,表明径流中 SPM 不完全来源于冰雪融水中 SPM 的补给,还有冰川侵蚀物质和河流冲刷侵蚀作用的影响. 因此,相对于 2005 年,2004 年径流中 TDS 增加的程度大于径流量增加程度的原因为径流的化学侵蚀增强导致,而 SPM 增加程度大于径流量增加程度则是冰雪融水中 SPM 的补给和径流物理侵蚀增强的共同作用. 此外,由于处于沙尘源区,春夏期间频发的沙尘活动沉积在雪冰中,随融水带到径流中,也影响 SPM 浓度. $\text{FCRD}_{2006/2005}^{\text{TDS}}$ 和 $\text{FCRD}_{2006/2005}^{\text{SPM}}$ 也均大于 1,而且 2006 年增加的水量也是冰雪融水补给造成,因此其分析结果和 2004 年与 2005 年对比的结果一致.

表 1 1 号冰川水文点径流中 TDS 和 SPM 在不同年份间的比值及 FCRD 值
Table 1 FCRD values and ratios of TDS and SPM in the Glacier No. 1 hydrological point in the different years

	Q	TDS		SPM	
		FCRD	比值	FCRD	比值
2006:2004	1.26	0.82	1.03	0.89	1.13
2006:2005	1.34	1.16	1.55	1.32	1.77
2004:2005	1.06	1.41	1.49	1.48	1.57

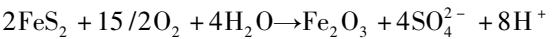
表 2 2004—2006 年 1 号冰川年冰雪消融量、年液态降水量及两者总和
Table 2 The annual glacier melt water, the annual precipitation and the sum of annual glacier melt water and precipitation in the Glacier No. 1, 2004—2006

	冰雪总消融量($\times 10^4$)/ m^3	液态降水总量($\times 10^4$)/ m^3	冰雪消融量和液态降水量总和($\times 10^4$)/ m^3
2004	96.28	40.30	136.58
2005	92.77	57.73	150.49
2006	138.08	74.35	212.43

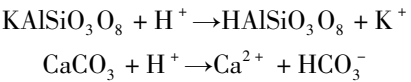
表 3 1 号冰川表层雪和冰芯中 TDS 和粉尘微粒与 1 号冰川水文点径流中 TDS 和 SPM 的多年平均值比较
Table 3 TDS, SPM and dust in the surface snow, ice and hydrological point of the Glacier No. 1

	TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SPM 和粉尘微粒的浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SPM 和粉尘微粒的平均粒径/ μm
表层雪	6.38	95.29	1.45
冰芯	2.95	154.36	1.70
冰川径流	42.18	139.40	1.98

河流侵蚀的化学作用即溶解、水解、水化、碳酸盐化、氧化和生物分化等,可形成不同种类的泥沙和离子;而物理侵蚀为河流对物质的冲刷、输移、沉积等,会形成不同大小的泥沙颗粒^[24]. 由于冰川时刻处在缓慢移动之中,冰体对基岩的磨蚀和拔蚀作用使得矿物颗粒更易破碎和表面积增大,并且还会产生新的磨光面,增强矿物的水解能力. 此外,冰碛物空隙发育,有利于增加水岩相互作用的机会^[9]. 乌鲁木齐河源径流水文特征的研究表明^[8-9],乌鲁木齐河源 1 号冰川具有很强的溶解含 S 矿物的作用,而河源区岩石表面大量存在的硫铁矿为这一化学过程提供了物质条件,其反应过程为:



河源区岩石表面大量存在的氧化铁为这一反应提供了证据. 而产生的 H^+ 还会进一步引起长石类矿物的水解. 对于 1 号冰川径流而言,主要是钾长石和方解石的水解,反应过程如下:



此外,由于河源区流域内皆为陡峭山地,集水内的坡降大,冰雪融水补给径流时,水体的流速快,下

渗量小,冲刷力强,从而造成河流更强的物理侵蚀。综合分析,TDS 主要受冰川融水和高山降水的影响,径流化学侵蚀也有影响。而径流中 SPM 变化受流水侵蚀和冰川侵蚀双重影响,而且一定程度上沉积在冰雪中的大气粉尘颗粒也有影响,有时雨水的冲刷也有较大的影响。

3 结论

(1) 冰川区径流中 TDS 和 SPM 与其它区域相比浓度较低,且随时间变化明显。TDS 年际变化较小,而年内变化明显,消融初期和末期时其浓度较高,消融强烈时其浓度较低;SPM 年际变化较大,年内变化与 TDS 呈相反的变化趋势,表现为消融初期和末期其浓度较低,消融强烈时其浓度较高。反映了典型大陆型冰川区径流独有的特点。

(2) 径流中 TDS 和 SPM 浓度与气温、降水和径流量有明显的关系。气候变化引起径流量的变化;随着径流量的增加,TDS 的浓度呈减小趋势,SPM 的浓度呈增大趋势。其中,径流中冰雪融水量的变化是引起径流中 TDS 和 SPM 浓度变化的直接原因。

(3) 对冰川径流中 TDS 和 SPM 的影响因素进行了分析。径流中 TDS 浓度主要受冰川融水增加、高山区大气降水以及径流化学侵蚀作用的影响,而 SPM 浓度则主要受流水冲刷侵蚀、冰川侵蚀带来的悬浮物,以及沉降在雪冰中的大气粉尘颗粒物等影响。

参 考 文 献

- [1] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170: 1088-1090
- [2] Probst J L. Dissolved and suspended matter transported by the Girou River (France): mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasses basin[J]. *Hydrological Sciences*, 1986, 31: 61-79
- [3] Sinyukovich V N. Relationships between water flow and dissolved solids discharge in the major Tributaries of Lake Baikal[J]. *Current Science*, 2003, 2: 208-212
- [4] Zabaleta A, Martinez M, Uriarte J A, et al. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country[J]. *Catena*, 2007, 71: 179-190
- [5] Xu J X. Grain-size characteristics of suspended sediment in the Yellow River, China[J]. *Catena*, 1999, 38: 243-263
- [6] 师长兴. 风力侵蚀对无定河流域产沙作用定量分析[J]. *地理研究*, 2006, 25(2): 285-293
- [7] Williams M, Yang D Q, Liu F J, et al. Controls on the major ion chemistry of the Urumqi River, Tianshan, People's Republic of China[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 172: 209-229
- [8] 刘凤景, Williams M, 程国栋. 等. 天山乌鲁木齐河源融雪和河川径流中的水文化学过程[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(3): 213-219
- [9] 李翠林, 侯书贵, 秦大河. 天山乌鲁木齐河源径流水文化学空间差异及其控制因素[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(1): 72-76
- [10] 朱宇漫, 李忠勤, 尤晓妮. AccuSizer 780A 光学粒径检测仪在冰川微粒研究中的应用[J]. *现代科学仪器*, 2006, 26(3): 81-84
- [11] 董志文, 李忠勤, 王飞腾. 等. 天山东部冰川积雪中大气粉尘的沉积特征[J]. *地理学报*, 2008, 63(5): 544-552
- [12] 董志文, 李忠勤, 张明军. 等. 哈密庙尔沟平顶冰川积雪中粉尘微粒沉积特征[J]. *环境化学*, 2010, 29(3): 352-357
- [13] 陈静生, 王飞越, 夏星辉. 长江水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 74-85
- [14] Meybeck M, Laroche L, Dürr H H, et al. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39: 65-93
- [15] Li Z Q, Edwards R, Thompson E M, et al. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tian Shan, China[J]. *Ann Glaciol*, 43: 250-256
- [16] Xu J X. Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow River basin. China[J]. *Catena*, 2002, 49: 289-307
- [17] 胡春宏, 张治昊. 黄河口尾间河道平滩流量与水沙过程相应关系[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 209-214
- [18] Liu F J, Williams M, Sun J Y, et al. Hydrochemical process and hydrological separation at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(4): 362-370
- [19] 张勇, 刘世银. 度日模型在冰川与积雪研究中的应用进展[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 101-107
- [20] 刘时银, 丁永建, 王宁练. 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡对气候变化的敏感性研究[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(1): 9-13
- [21] Liu S Y, Xie Z C, Wang N L, et al. Mass balance sensitivity to climate change: a case study of glacier No. 1 at Urumqi riverhead, Tianshan Mountains, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 1999, 9(2): 134-140
- [22] Johannesson T, Sigurdsson O, Laumann T, et al. Degree-day glacier mass-balance modelling with applications to glaciers in Iceland, Norway and Greenland[J]. *Journal of Glaciology*, 1995, 41(138): 345-358

[23] Lafreniere M , Sharp M J. A comparison of solute fluxes and sources from glacial and non-glacial catchments over contrasting melt seasons [J]. Hydrological Processes , 19: 2991–3012

[24] 王家生, 陈立, 范北林 等. 河流水化学特性与流域泥沙输移的相关性研究[J]. 水科学进展 , 2009 , 20(5) : 658–662

CHARACTERISTICS AND INFLUENCE FACTORS OF THE TOTAL DISSOLVED SOLID AND SUSPENDED PARTICULATE MATTER IN THE GLACIER RUNOFF AT THE HEADWATERS OF URUMQI RIVER

GAO Wenhua¹ LI Zhongqin^{1,2} ZHANG Mingjun^{1,2} GAO Qianzhao² DONG Zhiwen²

(1. Geography and Environment College of North West Normal University , Lanzhou , 730070 , China;
2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute / Tianshan Glaciological Station , CSA , Lanzhou , 730000 , China)

ABSTRACT

High-altitude glacier is the main water resource in the Central Asia region. The study of characteristics on the glacier runoff has an important practical significance in the rational use and evaluation of the water resource in the area. Based on the TDS and SPM data of glacier runoff from the headwater of Urumqi River in Tian Shan , during the obtained period from 2004 to 2007 , empirical statistics , different parameters and model comparison are used to explain the variation and their influence factors. Results show that the concentrations of TDS and SPM are lower than other regions and there are apparent variations for TDS and SPM with time. The year-by-year change of TDS is quite small , however its annual change is obvious , with higher concentrations in the early and later stages of the melt season and lower concentrations in the intensive melt period; SPM has large year-by-year change , and its annual variation is the reverse trend of TDS. The temperature and precipitation affect the variations of TDS and SPM by the discharge. There are lower concentration of TDS and higher concentration of SPM in the glacier runoff when the temperature is high and precipitation is large , which lead to large discharge. The analysis of the main influence factors on TDS and SPM suggests that TDS is mainly influenced by glacier meltwater , precipitation and chemical erosion , and SPM is mainly influenced by physical erosion and insoluble material supplied in ice-snow melt water.

Keywords: Urumqi River , glacier runoff , total dissolved solid , suspended particle matter , characteristics , influence factors.