

天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源分析

冯芳^{1,2}, 李忠勤¹, 金爽¹, 冯起², 刘蔚²

(1. 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, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所阿拉善荒漠生态水文试验研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 依据乌鲁木齐河流域山区 3 个站点实测次降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 数据以及气象观测资料, 结合临近 GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) 站点数据, 对其降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源进行了分析。结果表明, 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动范围大, 但呈现明显的季节性变化: 冬季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较低, 夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较高。受流域山区气候和地理条件影响, 从上游到下游各站点大气降水线截距和斜率均呈现逐渐减小趋势。大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与日均气温存在密切正相关关系, 且温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的相关性优于 δD 。降水中 $d\text{-excess}$ 值也表现出季节性变化, 冬季降水 $d\text{-excess}$ 值高于夏季降水。利用 HYSPLIT 4.0 气团轨迹模型, 得出夏季水汽主要来源西风环流输送, 冬季受西风环流和极地气团共同影响。

关键词: 降水; $\delta^{18}\text{O}$; δD ; 大气降水线; $d\text{-excess}$ 值; 水汽来源; 乌鲁木齐河

中图分类号: P426.61

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2013)05-0634-08

在水循环过程中, 氢氧同位素比率能非常敏感地响应环境的变化, 是区别不同水体介质的一个理想指标, 能反映自然水在相变过程中同位素的分馏过程^[1]。大气降水作为水循环的主要输入项, 是自然界水循环中的一个重要环节, 对降水中氢氧同位素进行研究是利用稳定同位素技术研究全球及局地水循环和气候变化所必需的前提^[2]。伴随降水中氢氧同位素的变化, 由蒸发、凝聚、降落和径流等过程形成各种水体介质, 因形成条件不同稳定同位素含量在时空上会发生敏感的变化^[3-5]。大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 组成特征也是指示地区气候的一个重要指标, 大量研究已证实降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的关系, 受到纬度效应、高程效应、降水量效应、温度效应、水汽来源等因素的影响^[6-8]。在区域水循环研究过程中, 水汽来源研究一直是水文学家关注的热点, 其对深入了解区域水循环过程及结构具有重要意义^[9-11]。

国外对大气降水稳定同位素研究起步较早。Craig^[12]对降水中氢氧同位素研究发现, 全球氢氧同位素变化成线性相关 ($\delta\text{D} = \delta^{18}\text{O} + 10$), 之后出现了大量降水同位素机理和特征的研究^[13]。国内对降水稳定同位素研究始于 1966 年的珠穆朗玛峰科学考察, 至今已有 40 多年的历史, 其间陆续开展了不同规模的取样工作, 也取得了丰富的研究成果^[13-16]。尽管在全球范围和大范围内降水同位素研究已持续多年, 但针对小范围(特别是小流域)多站点降水同位素特征和差异研究较少, 对流域内不同高度、气候带和降水过程稳定同位素变化的物理机制研究仍不深入^[17]。因此, 本文选取中国西北典型内陆河流域乌鲁木齐河为研究对象, 对流域山区连续的次降水样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 组成特征及水汽来源进行了分析。

1 研究区概况

乌鲁木齐河(43°00'N ~ 44°07'N, 86°45'E ~ 87°56'E)是西北典型内陆河流域, 属于天山北坡内陆河水系的中等流域, 山区流域是主要产流区, 外围被广阔的沙漠和戈壁包围。中国科学院天山冰川站在乌鲁木齐

收稿日期: 2012-11-08; 网络出版时间: 2013-08-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20130814.1037.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(41121001); 中国科学院国家重点实验室自主项目(SKLCS-ZZ-2012-01-01)

作者简介: 冯芳(1984-), 女, 湖北荆州人, 博士研究生, 主要从事寒区旱区雪冰水化学和环境化学研究。

E-mail: fengfangjs2006@163.com

河流域1号、总控水文点和后峡基本站进行长期水文和气象常规观测。河源区为冰川冰缘作用区,3 600 m以上发育有现代冰川,中上游流域为森林草甸区。1号水文点位于1号冰川冰舌末端下游300 m,海拔3 693 m,控制流域面积为3.34 km²;总控水文点设在河源区大西沟和罗布道沟汇合处,海拔3 408 m,控制流域面积28.9 km²;大西沟国家气象站位于海拔3 539 m处;后峡基本站位于乌鲁木齐中游河谷,海拔2 130 m(图1)。

乌鲁木齐河流域位于欧亚大陆中部,远离海洋,属于典型大陆性气候,山区气温随着高度增加而递减,递减率以夏季最大。据流域山区大西沟和后峡气象站多年统计资料显示,平均气温分别为-5.2℃和1.1℃,年均降水量分别为458 mm和401 mm。水汽来源主要受大西洋气流和北冰洋气流影响,冬季(10月至翌年3月)严寒少雨,5~9月是主要的降水发生期,集中了全年90%的降水,同期亦是冰川主要消融期^[7]。

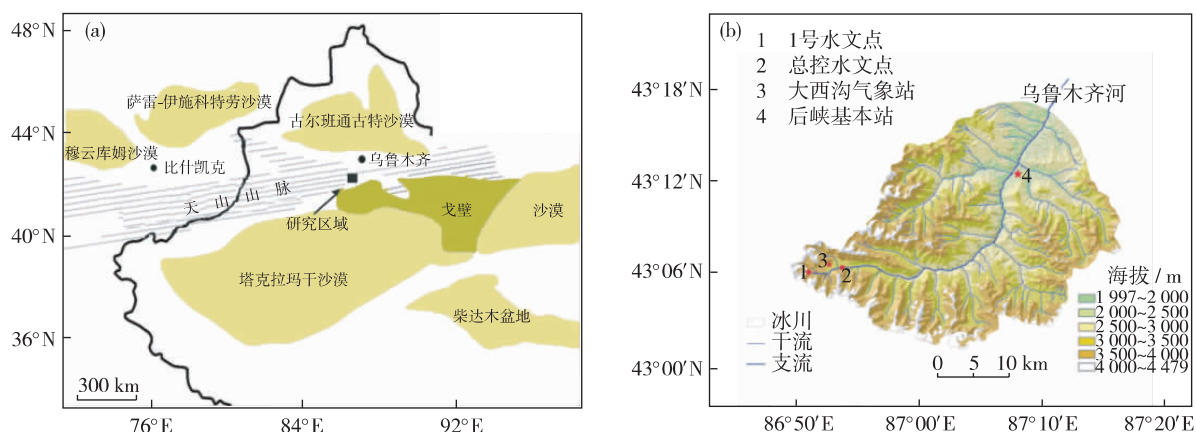


图1 天山乌鲁木齐河流域山区及水文气象观测点位置

Fig. 1 Sketch map showing the source area of the upper Urumqi River and the sampling sites

2 数据采集与分析

2006年5月~2007年8月,在乌鲁木齐河流域山区1号、总控水文点和后峡基本站连续采集降水样品。以次降水为单位收集样品,每次降水开始,即将事先用蒸馏水洗净的干燥采样盒置于1.2 m高的柱子上收集降水,降水结束后,为避免因降水蒸发导致稳定同位素发生分馏,立刻用采样瓶收集降水水样,同时记录降水开始和结束时间。对于液态降水,直接倒入清洗过的60 mL聚乙烯采样瓶中,并立即封存。若为固态降水,则先装入密封采样袋里在常温下完全融化后,再装入采样瓶中。本次研究共采集到降水样品324个,其中1号水文点采集91个(降雪55个,降雨36个),总控水文点采集129个(降雪76个,降雨53个),后峡基本站采集104个(降雪39个,降雨65个)。

样品分析工作在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈国家重点实验室内完成。所有样品从野外运回后于-15℃低温保存,在测试分析前将样品取出,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。采用液态氢氧同位素分析仪(LGR, DLT-100 LWIA, USA)进行分析测试, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 比率用相对于标准平均大洋水(V-SMOW)的千分差值表示, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均分析误差分别为 $\pm 0.6\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。如某一日内有若干次降水,则该日降水同位素为各次降水的加权平均值。

此外,文中所用日平均气温和日降水量等气象数据来源于天山冰川观测试验站各站点的气象站观测资料,所有气象站均采用仪器自动记录与人工记录相结合的方式采集数据。

3 结果与讨论

3.1 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化

降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 能很好地反映研究区地理和气候因素, 由于水分子的平衡分馏作用, 任何地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 比率均受到区域气温季节性变化影响, 尤其在内地地区更加显著。图 2 为乌鲁木齐河流域山区 1 号、总控水文点和后峡基本站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和日均气温随时间的变化趋势。2006 年 5 月~2007 年 8 月 3 个站点大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动范围都非常大, 其中以后峡基本点 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围最大, 最大值和最小值分别达到 -27.56‰ 和 1.67‰ , 变化幅度为 29.23‰ , 也表明乌鲁木齐河流域山区气候的变化非常极端。降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现明显的季节性变化, 冬季降水对应较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 夏季降水对应较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。采样期间 1 号、总控水文点和后峡基本站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值分别为 -8.29‰ 、 -7.74‰ 和 -6.63‰ 。

在整个采样期间 3 个站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值共出现 9 次正值, 其中最大值 3.2‰ 出现在夏季 6 月 23 日 1 号水文点, 该次降水量为 1.0 mm , 日平均气温为 $14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于乌鲁木齐河流域深居欧亚大陆内陆, 夏季温度高, 加上本次降水量较小, 产生降水的水汽有相当一部分受局地蒸发影响使其 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高; 同时, 雨滴在降落过程中由于蒸发产生重同位素的富集, 也使得降水中氢氧同位素值更高, 甚至出现正值 [2,11]。3 个站点 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值均出现在冬季, 1 号水文点 2006 年 12 月 26 日 (-24.12‰)、总控水文点 2007 年 1 月 2 日 (-23.97‰) 和后峡基本站 2007 年 1 月 3 日 (-27.56‰)。

结合乌鲁木齐河流域下游乌鲁木齐站 ($43^{\circ}47'\text{N}$, $87^{\circ}37'\text{E}$, 海拔 918 m) 月降水氢氧同位素 GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) 数据 (1986—2003 年) 进行全流域降水同位素季节性变化特征分析 (<http://isohis.iaea.org>)。如图 3 所示, 该站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 最大值和最小值分别为 -27.97‰ 和 1.80‰ , 变化幅度达 29.77‰ , 与上游山区存在相似规律; 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 多年平均值为 -12.42‰ , 明显高于上游山区的平均值; 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 多年月平均值同样呈现明显的季节性变化, 且与月平均温度表现出相同的变化趋势, 冬季降水对应较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 夏季降水对应较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (图 3)。

另外, 与前人研究成果进行对比, Hou 等 [14] 观测研究了 1995 年 6 月~1996 年 6 月乌鲁木齐河源区一个完整周期年连续每次降水样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节性变化规律。结果表明, 河源区高山营地 (海拔 $3\,545\text{ m}$) 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 比值波动范围相当大, 且夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现两次正值, 分别为 1995 年 8 月 3 日 (0.97‰) 和 7 月 6 日 (0.87‰), 冬季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值为 1996 年 1 月 24 日 (-34.24‰), 与本次研

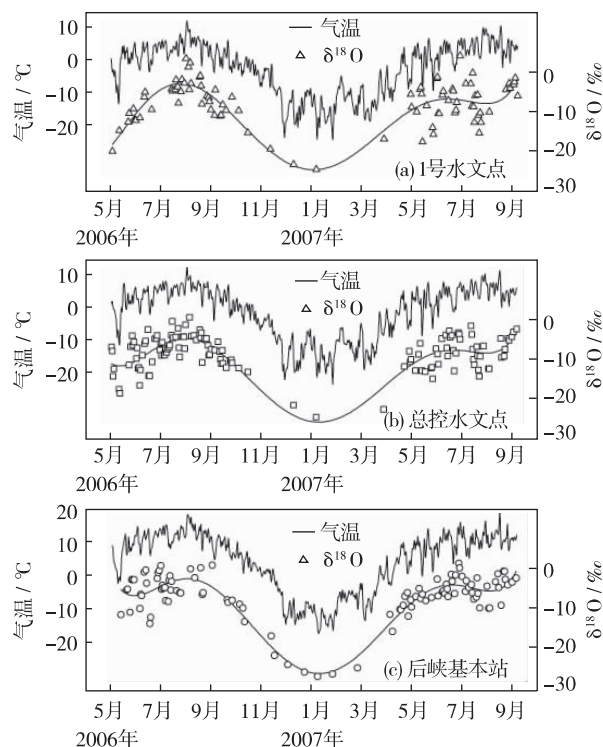


图 2 乌鲁木齐河流域山区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和日均气温变化趋势

Fig. 2 Time series of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and average daily temperature in the upper Urumqi River basin

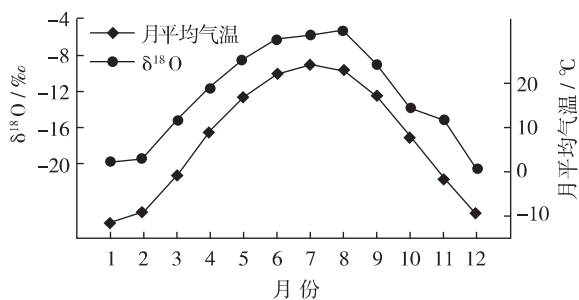


图 3 乌鲁木齐站多年降水月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和月平均气温变化趋势

Fig. 3 Time series of monthly mean $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and average monthly temperature at Urumqi station

究结果较为一致。

3.2 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的温度效应

在降水过程中, 随时间延续水汽团内剩余水汽逐渐贫化重同位素, 降水同位素含量主要受水汽气团凝结成雨水的份额和分馏的水汽来源控制, 而凝结的降水份额受气压和温度影响, 加上温度影响降水过程中同位素分馏系数, 导致大气降水中氢氧同位素组成与当地温度通常存在正相关关系^[3]。许多学者已成功利用 $\delta^{18}\text{O}$ 指标恢复冰芯中记录的气候变化, 这些解释依赖于现代降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与地区气候之间的相互关系。

为强化研究流域内站点降水中稳定同位素的物理机制, Yao 等^[17] 对乌鲁木齐河流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系进行了研究, 发现在乌鲁木齐河流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度存在密切正相关关系, 且受局地降水事件增多的影响, 越往冰川作用区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 对温度反映越敏感。本次研究结果, 如图4所示, 1号、总控水文点和后峡基本站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与日均气温之间相关性分别为 $\delta^{18}\text{O} = 0.83T - 8.08$ ($R^2 = 0.57$), $\delta^{18}\text{O} = 0.79T - 10.19$ ($R^2 = 0.63$), $\delta^{18}\text{O} = 0.84T - 13.96$ ($R^2 = 0.74$); δD 与日均气温之间的相关性分别为 $\delta\text{D} = 6.32T - 49.06$ ($R^2 = 0.53$), $\delta\text{D} = 5.76T - 64.20$ ($R^2 = 0.57$), $\delta\text{D} = 6.11T - 92.33$ ($R^2 = 0.69$)。乌鲁木齐河流域山区3个站点降水中氢氧同位素比值与日均温度之间具有很好的正相关关系, 且温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关性均优于 δD 。

由于流域山区属于干旱半干旱气候, 降水过程中受到强烈的蒸发, 其同位素分馏效应主要受动力同位素效应支配, 由于相态转变时氢氧分子动能差异的影响, 引起不平衡蒸发, $\delta^{18}\text{O}$ 在蒸发剩余降水中的富集比 δD 更为显著, 富集程度与蒸发强度呈正比, 这种富集导致氧同位素含量受气温的影响比氢同位素更为灵敏^[4]。即在干旱半干旱乌鲁木齐河流域山区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 比 δD 更容易富集, 受气温的影响比后者更明显, 因此前者比后者对温度更具有指示意义, 更适合于研究该区水体中环境同位素变化机理和古地下水反演古气候。

3.3 地区大气降水线变化特征

当地大气降水线是一个地区降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 线性关系, 可以很好地反映地区自然地理和气象气候条件, 对同一站点降水中氢氧同位素而言, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间往往存在线性关系, 显示出较强的地域性^[4]。为研究乌鲁木齐河山区流域大气降水线的变化规律, 分别对3个站点降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 比值作了回归分析。

如图5所示, 乌鲁木齐河源区两个站点的大气降水线非常接近, 1号和总控水文点大气降水线分别为 $\delta\text{D} = 7.78\delta^{18}\text{O} + 13.75$ ($R^2 = 0.97$) 和 $\delta\text{D} = 7.61\delta^{18}\text{O} + 12.63$ ($R^2 = 0.98$), 两者的截距和斜率都相近; 中游山区后峡基本站地区大气降水线则为 $\delta\text{D} = 7.43\delta^{18}\text{O} + 9.68$ ($R^2 = 0.97$), 与河源区两个站点相比, 斜率和截距都有明显降低。这表明乌鲁木齐河流域中游山区后峡基本站气候与河源区气候相比, 其大陆性的程度和蒸发状况明显增加^[4]。

为进一步研究流域内大气降水线特征与地理综合自然条件之间的关系, 同样利用乌鲁木齐站 GNIP 数据 1986—2003 年多年月降水氢氧同位素进行回归分析。得出下游站点大气降水线方程为: $\delta\text{D} = 7.23\delta^{18}\text{O} + 3.60$ ($R^2 = 0.95$), 斜率和截距分别为 7.23 和 3.60, 与后峡基本站(7.43 和 9.68) 相比, 斜率和截距也存在明显降低。

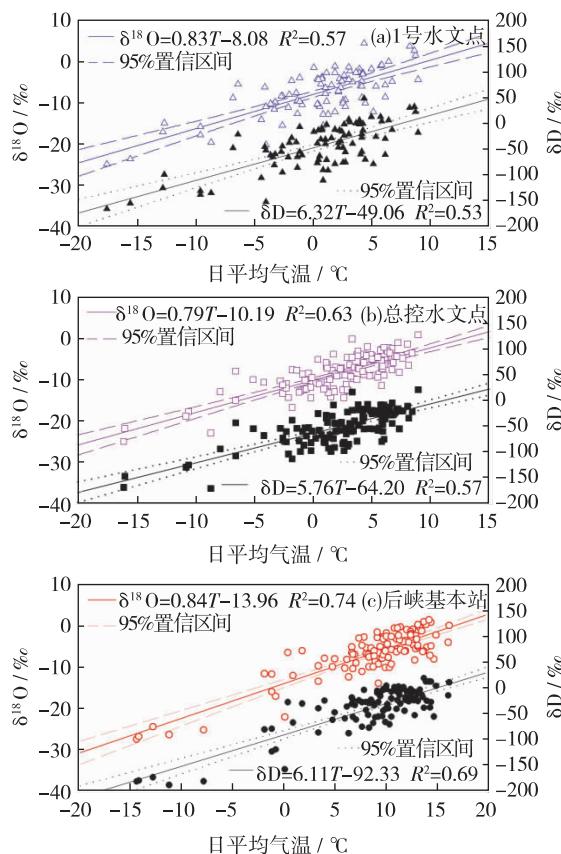


图4 乌鲁木齐河流域降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与日均温度的关系

Fig. 4 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD values and average daily temperature

与全球大气降水线 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 相比, 4 个站点大气降水线斜率均小于 8。截距河源区两站点大于 10, 中游站点 9.68 接近 10, 下游站点 3.60 远小于 10。比较整个流域 4 个站点的大气降水线, 发现从河源区到下游地区大气降水线截距和斜率呈逐渐减小趋势(图 5)。乌鲁木齐河流域地处欧亚大陆内部, 属于典型大陆性气候区, 由于天山山区海拔等地理因素的作用, 流域具有自然条件垂直分带性, 导致流域内各站点处于不同气候带及降水过程不同, 也引起各站点地区大气降水线存在差异。

3.4 降水中 d -excess 值变化特征与水汽来源分析

降水中 d -excess 值反映水汽对于平衡状态的偏差, 主要由于水在蒸发过程中的动力分馏作用引起, D/H 比 $^{18}O/^{16}O$ 稳定同位素分馏程度相对更强, 使得降水氢氧同位素比率呈线性变化之外, 其线性关系还出现一个差值。 d -excess 值被认为是表征区域水汽来源的最重要参数, 本研究对降水中 d -excess 值进行初步分析。如图 6 所示, 以全球平均值 10‰ 为界, 降水中 d -excess 值全年普遍偏高, 但以 20‰ 为界, 降水中 d -excess 表现出明显季节性特征, 冬季明显偏高, 夏季较低。同样利用乌鲁木齐站 GNIP 数据 1986—2003 年多年月降水 d -excess 平均值进行对比分析, 如图 7 所示, 乌鲁木齐站降水 d -excess 的平均值也具有相似的季节变化规律, 降水中 d -excess 在冬季偏高, 夏季偏低。

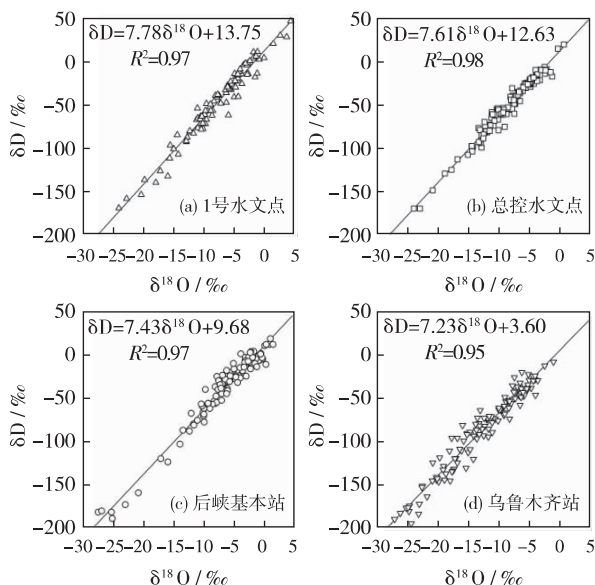


图 5 乌鲁木齐河流域各站点地区大气降水线

Fig. 5 Local meteoric water lines at four stations along the Urumqi River basin

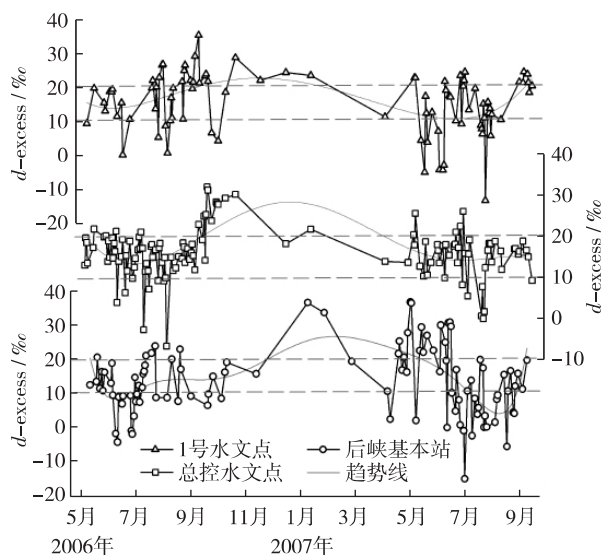


图 6 乌鲁木齐河流域山区降水中 d -excess 值随时间变化趋势

Fig. 6 Variation of d -excess values in precipitation at three stations

直接从 NCEP/NCAR 网站 (<http://www.cdc.noaa.gov>) 上下载美国 NOAA-CIRES 气候诊断中心提供的 NCEP/NCAR 全球大气再分析格点资料, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 对研究区及其附近区域 2006 年 7 月和 2007

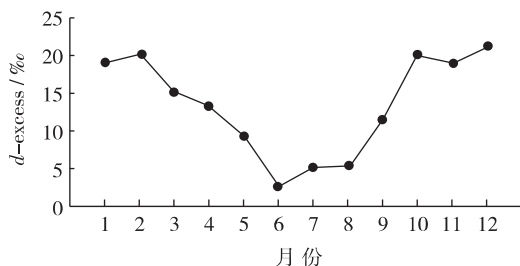


图 7 乌鲁木齐 GNIP 站点多年月降水平均 d -excess 值

Fig. 7 Time series of monthly mean d -excess in precipitation at Urumqi station

年 1 月 500 hPa 的平均风场和湿度场进行了计算, 分别代表乌鲁木齐河流域夏季和冬季的水汽来源状况(图 8)。结果表明, 无论是夏季还是冬季水汽主要来源于西风输送, 在冬季同时受极地气团的影响。

为进一步确定研究区水汽来源, 本文利用 NOAA 所提供 HYSPLIT 4.0 气团轨迹模型, 结合 NCEP 的全球再分析格点资料, 以总控水文点和后峡基本站作为气团运动终点, 分别计算采样期间每次降水 96 h 之前降水气团轨迹(气团高度为地面以上 1 500 m、2 500 m、3 500 m 共 3

层,图9),该轨迹包括气团水平和垂直方向的运移路径,所有计算结果均由气团轨迹图表示^[1]。由于大多降水事件的气团轨迹图非常类似,本文只列出6次典型降水事件的气团轨迹图(图9)。结果表明,尽管两个采样点海拔差异大(海拔2 130 m、3 545 m),但气团轨迹显示两站点大气传输过程和路径具有一致性。夏季水汽来源平稳的西风带,冬季水汽来源是西风带和极地气团共同作用的结果,证实水汽来源的季节性变化。

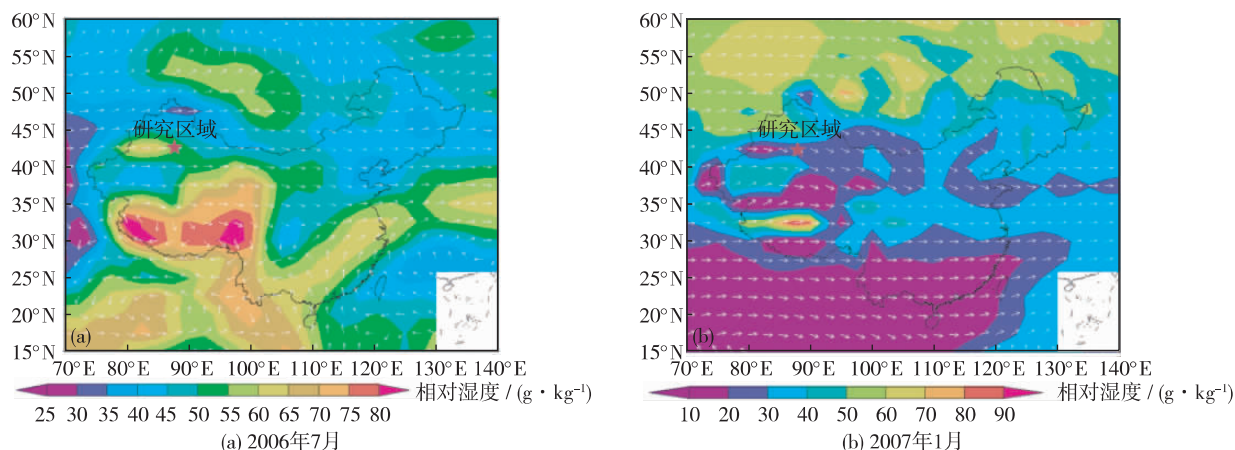
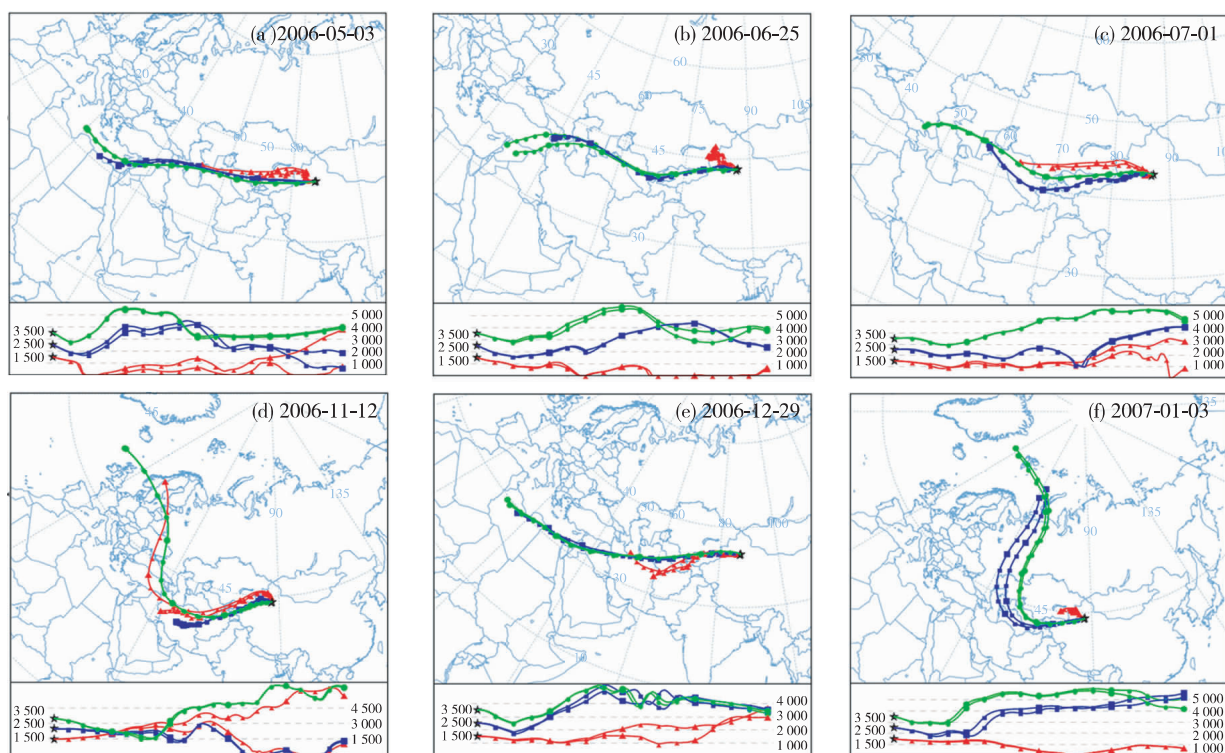


图8 研究区及其附近区域风场和湿度场分布特征

Fig. 8 Spatial distributions of the mean wind fields and relative humidity fields at 500 hPa over study area and adjacent regions



绿色、蓝色、红色曲线分别代表地面以上3 500 m、2 500 m和1 500 m高度气团轨迹

图9 不同季节的典型气团轨迹

Fig. 9 HYSPLIT reverse-calculated 96 h trajectories in different seasons

降水中 $d\text{-excess}$ 值主要取决于形成降水的水汽来源的相对湿度,乌鲁木齐河流域位于欧亚大陆内部,远离海洋,夏季水汽来源受西风环流控制,主要来自于北大西洋。夏季时西风带的强度变大,大西洋暖湿气流湿度较大,形成的降水中 $d\text{-excess}$ 值较低;冬季水汽来源主要受西风环流和更为干燥的极地水汽共同作用,

随着水汽减少大气相对湿度降低,加上气压高,温度低,湿度小,蒸发少,沿途水汽补充较少,使得研究区内冬季降水量和次数明显减少,且降水剩余水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对更低,降水 $d\text{-excess}$ 值出现较大值。

4 结 论

(1) 乌鲁木齐河流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动范围相当大,并呈现出明显的季节性变化,冬季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低,夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高。

(2) 乌鲁木齐河源区两站点大气降水线截距和斜率非常相近,且从乌鲁木齐河上游到下游 4 个站点大气降水线截距和斜率都呈现逐渐减小趋势。

(3) 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与日均气温存在密切的正相关关系,且温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的相关性优于 δD 。表明降水 $\delta^{18}\text{O}$ 比 δD 对温度更具有指示意义,更适合于研究区域水体环境同位素变化机理和反演古气候。

(4) 降水中 $d\text{-excess}$ 值也表现出季节性变化,冬季降水中 $d\text{-excess}$ 值普遍高于夏季降水中 $d\text{-excess}$ 值。利用 HYSPLIT 4.0 气团轨迹模型,得出夏季水汽主要来源西风环流输送,冬季受西风环流和极地气团的共同影响。

致谢: 谨此对天山冰川观测试验站参加本研究的所有观测人员表示衷心感谢。此外,实验室朱宇漫老师对样品的室内分析做了大量工作,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 738-747. (ZHANG Yinghua, WU Yanqing, WEN Xiaohu, et al. Application of environmental isotopes in water cycle [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 738-747. (in Chinese))
- [2] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [3] 刘光生, 王根绪, 孙向阳, 等. 多年冻土区火火山流域降水河水稳定同位素特征分析 [J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 621-627. (LIU Guangsheng, WANG Genxu, SUN Xiangyang, et al. Variation characteristics of stable isotopes in precipitation and river water in Fenghuoshan permafrost watershed [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 621-627. (in Chinese))
- [4] 李亚举, 张明军, 李忠勤, 等. 表层雪中稳定同位素季节变化及其与水汽输送的关系: 以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区为例 [J]. 地理研究, 2011, 30(5): 953-962. (LI Yaju, ZHANG Mingjun, LI Zhongqin, et al. Seasonal variations of stable oxygen isotope in surface snow and vapor transportation at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains [J]. Geographical Research, 2011, 30(5): 953-962. (in Chinese))
- [5] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006—2008 年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征初步分析 [J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 757-764. (LI Tingyong, LI Hongchun, SHEN Chuanzhou, et al. Study on the δD and $\delta^{18}\text{O}$ characteristics of meteoric precipitation during 2006—2008 in Chongqing, China [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 757-764. (in Chinese))
- [6] HE Yuanqing, PANG Hongxi, THEAKSTONE W H, et al. Isotopic variations in precipitation at Bangkok and their climatological significance [J]. Hydrological Processes, 2006, 20: 2873-2884.
- [7] YAMANAKA T, TAUJIMURA M, OYUNBAATAR D, et al. A 9-year record of stable isotope ratios of precipitation in Eastern Hungary: Implications on isotope hydrology and regional palaeoclimatology [J]. Journal of Hydrology, 2011, 400: 144-153.
- [8] KUMAR U S, KUMAR B, RAI S P, et al. Stable isotope ratios in precipitation and their relationship with meteorological conditions in the Kumaon Himalayas, India [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391: 1-8.
- [9] TIAN Lide, YAO Tandong, MACCLUNE K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: D10112. [doi: 10.1029/2006JD007718]
- [10] SJOSTROM D J, WELKER J M. The influence of air mass source on the seasonal isotopic composition of precipitation, eastern USA [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009(102): 103-112.
- [11] SINCLAIR K E, MARSHALL S J, MOEAN T A. A Lagrangian approach to modelling stable isotopes in precipitation over mountainous terrain [J]. Hydrological Processes, 2011(25): 2481-2491.

- [2] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应 [J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 327-334. (MENG Yuchuan, LIU Guodong. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 327-334. (in Chinese))
- [3] YU Wusheng, YAO Tandong, TIAN Lide, et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2008, 87(2): 158-169.
- [4] HOU Shugui, QIN Dahe, MAYEWSKI P A, et al. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and ice cores: A case study at the head of the Urumqi River, Tien Shan, China [J]. Journal of Glaciology, 1999, 45(151): 517-523.
- [5] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源 [J]. 地理学报, 2008, 63(1): 12-22. (LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Northwest China and the water vapor sources [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(1): 12-22. (in Chinese))
- [6] ZHAO Liangju, YIN Li, XIAO Honglang, et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(4/5): 406-416.
- [7] YAO Tandong, MASSON-DELMOTTE V, JOUZE J, et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River basin, east Tianshan Mountains, China [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3473-3476.

Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River basin, Eastern Tianshan*

FENG Fang^{1,2}, LI Zhongqin¹, JIN Shuang¹, FENG Qi², LIU Wei²

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Science/Tien Shan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Alashan Desert Eco-Hydrology Experimental Research Station, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The stable isotopes characteristics of hydrogen and oxygen in precipitation is an important aspect of the regional isotope hydrologic cycle. The variations of δD and $\delta^{18}\text{O}$ values in event-based precipitation samples are analyzed. The samples were collected from three stations (No. 1, Zongkong, Houxia) in the upper Urumqi River basin from May 2006 to August 2007. The $\delta^{18}\text{O}$ in event-based precipitation exhibits an extremely wide range and a distinct seasonal variation with enriched values in summer and depleted values in winter. The slopes and intercepts of the local meteoric water lines (LMWLs) along the Urumqi River Basin are No. 1 > Zongkong > Houxia > Urumqi the nearest Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) station. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in event-based precipitation and the mean air temperature show a significant positive correlation, and a better linear relation exists between $\delta^{18}\text{O}$ and air temperature than that of δD . Seasonal variations can be observed in d -excess of precipitation. The results of air-mass back trajectories of each precipitation event with the HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model indicate a dominant effect of westerly air masses in summer and the integrated influence of westerly and polar air masses in winter for the study area.

Key words: precipitation; $\delta^{18}\text{O}$; δD ; meteoric water line; d -excess; water vapor source; Urumqi River

* The study is financially supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (No. 41121001).