

乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 现代环境过程分析*

侯书贵 秦大河 李忠勤 皇翠兰

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境实验室, 兰州 730000)

摘 要 据乌鲁木齐河源地区一个完整年周期的大气降水样品、1 号冰川连续雪坑样品及浅冰芯样品的实测 $\delta^{18}\text{O}$ 资料, 初步探讨冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的形成过程和影响因素, 以及 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间的关系转变。结果表明本区大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间存在显著的正相关关系, 但由于冬季雪层内水汽运移作用和风力导致积雪的重新分布作用, 以及夏季雪层中融水渗浸作用等积雪沉积后的影响, 1 号冰川冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与实测气温记录之间存在明显的差异, 即研究区域的冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录不再具有明显的温度指标意义。

关键词 降水 雪 冰 $\delta^{18}\text{O}$ 现代环境过程 乌鲁木齐河源

分类号 P597

早在 60 年代, 世界气象组织(WMO)/国际原子能机构(IAEA)就在全世界范围内建立了降水中稳定同位素观测网, 其中欧洲地区降水中稳定同位素研究开展得较早也较深入^[1-2]。我国从 1991 年底开始在青藏高原也进行了系统、连续的降水和冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究, 探讨了不同来源水汽团对降水中氧同位素的影响^[3], 发现大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的正相关关系^[4], 并据此分别恢复了青藏高原小冰期以来、2000 年以来和末次间冰期以来的气候变化^[5-7]。但对于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 在形成冰芯记录的过程中所发生的沉积后变化过程目前尚无报道。本文根据乌鲁木齐河源区 1995 年 6 月至 1996 年 6 月一个完整年周期大气降水样品、1 号冰川冬季和夏季连续雪坑样品以及 1 号冰川东支积累区浅冰芯样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量结果, 分析本区大气降水、雪坑和浅冰芯内 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征, 以及 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间的正相关关系的建立和改造过程, 并探讨了影响冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的主要因素。

1 样品采集和分析过程

1.1 大气降水样品

大气降水采样点为天山冰川观测站之高山营地(3545m, 图 1 之 P 点)。共收集 121 个大气

第一作者简介: 侯书贵 男 27 岁 博士研究生 冰川化学与环境

*国家自然科学基金(编号: 49571020)和中国科学院天山冰川观测试验站基金(编号: 95001)资助项目

收稿日期 1997-03-31, 改回日期 1997-08-13

降水样。样品从野外运回后即放入 -15°C 低温室保存, 在分析前两天取出融化, 以备分析。

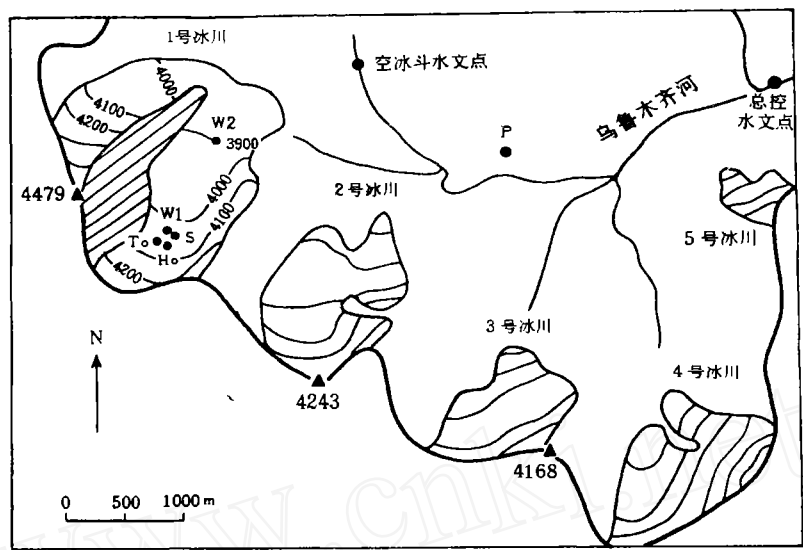


图1 采样点示意图

Fig.1 A map of the headwater of Ürümqi River, showing the sampling locations

样品测量在中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境实验室进行, 所用仪器为 MAT-252 气体质谱仪, 结果以“标准平均大洋水 (SMOW)”的千分差表示, 精度在 $\pm 0.5\%$ 之内。下述各类样品的处理和分析方法大体相同。

1.2 冬季雪坑样品

冬季雪坑样品采集点为 1 号冰川东支 4030m 和 3900m 处(图 1 之 W1 和 W2 点)。首次雪坑采集于 1995 年 12 月 25 号, 分别记为雪坑 1 和 2。后续采样是将原雪坑向前挖去约 1m 后进行采样, 冬季雪坑的采样日期和编号见表 1 所示。

表1 乌鲁木齐河源1号冰川雪坑连续采样的日期与雪坑编号

Table 1 The sampling dates of snowpit samples from the No.1 Glacier at the headwater of Ürümqi River

采样日期	1995-12-25		1996-01-08		1996-01-19		1996-01-29	
W1 (4030m)	雪坑1		雪坑3		雪坑5		雪坑7	
W2 (3900m)	雪坑2		雪坑4		雪坑6		雪坑8	
采样日期	1996-05-11	1996-05-14	1996-05-18	1996-05-19	1996-05-22	1996-05-30	1996-06-07	1996-06-12
S (4040m)	T1	T4	T5	T6	T8	T11	T16	T20

按雪层剖面特征分层取样。采样时首先用不锈钢铲刀将各取样范围内的雪层切割成立柱状, 装入洁净塑料袋, 室温下自然融化后注入专用聚乙烯塑料瓶。后续处理过程同上所述。

1.3 夏季雪坑样品

夏季雪坑采样点位于 1 号冰川东支粒雪盆约 4040m 处(图 1 之 S 点), 样品采集和分析

过程与冬季雪坑样相同。夏季雪坑的采样日期和编号见表 1 所示。

1.4 冰芯样品

1996 年 5 月在乌源 1 号冰川东支粒雪盆海拔 4040m 处钻取一支 7.0m 的浅冰芯 T_0 (图 1 之 T_0 点)。现场进行冰芯地层的描述工作, 然后使用不锈钢锯人工截取样品, 间距为 3cm。样品后续处理过程同上所述。

1990 年 11 月在冰芯 T_0 附近 (4058m) 也钻取了一支 57m 的冰芯 H_0 , 并分析了顶部 6.6m 样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 。分析工作在日本名古屋大学水圈研究所进行, 所用仪器为 MAT251¹⁾。

2 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其与气温的关系

样品分析结果表明本区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动范围相当大, $\delta^{18}\text{O}$ 最小值为 1996 年 1 月 24 日的 -38.24‰ , 仅有的两个正值为 1995 年 8 月 3 日的 0.97‰ 和 1995 年 7 月 6 日的 0.87‰ 。全部降水样品的算术平均值为 -11.01‰ , 其中 1995 年 7、8 两月降水样品的算术平均值分别为 -6.94‰ 和 -7.31‰ 。1981 年 7 月 9 日至 8 月 17 日 Watanabe *et al.*^[8] 曾对乌源地区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征进行过短期研究, 所采集样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 范围介于 -1‰ 至 -16‰ 之间, 7、8 月份降水样品的算术平均值分别为 -7.5‰ 和 -6.8‰ , 两次研究结果是比较一致的。

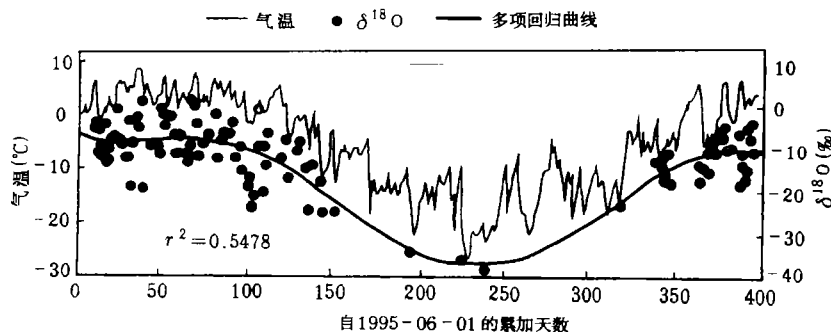


图2 1995年6月—1996年6月乌源地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation samples from the headwater of Ürümqi River during June, 1995 to June, 1996

从图 2 可见本区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现明显季节变化, 即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。由于降水采样点没有设置气温观测仪器, 我们以总控水文点 (海拔 3408m) 和空冰斗水文点 (海拔 3805m) 的自记气温资料, 使用线性插值换算出采样点的气温。图 3 给出了每次降水事件的 $\delta^{18}\text{O}$ 依日平均气温的相关散布 (图 3a) 以及每月全部降水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 的算术平均值依月平均气温的相关散布 (图 3b, 不包括没有降水样品的月份), 两种情况下 $\delta^{18}\text{O}$ 依日平均气温 T 的线性回归方程分别为: $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.94T(\text{°C})$

1) 韩健康, 乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯微粒浓度和化学成分分析。中国科学院天山冰川观测试验站年报 (10), 1991, 87—96。

$-12.382 (r^2 = 0.52, n = 121)$; $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 1.29T(\text{°C}) - 13.05 (r^2 = 0.98, n = 10)$, 可见乌源地区大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间存在显著的正相关关系。Watanabe *et al.*^[8] 的短期研究结果与此一致。

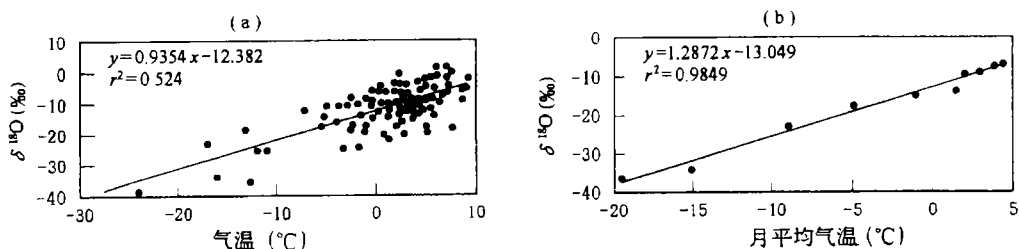


图3 $\delta^{18}\text{O}$ 依气温的相关散布 (图3b中不含无降水样品月份)

Fig.3 Scatter diagram of $\delta^{18}\text{O}$ values against temperature (the months that no precipitation events happened were excluded in Fig.3b)

根据章新平等^[4]的研究, 1991 年 9 月至 1992 年 12 月时段内青藏高原东北部沱沱河、德令哈和西宁 3 站全部降水事件中 $\delta^{18}\text{O}$ 依气温 T 的线性回归方程分别为: $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.40T(\text{°C}) - 11.07$ (沱沱河, $r = 0.44, n = 119$); $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.57T(\text{°C}) - 12.88$ (德令哈, $r = 0.74, n = 64$, 取降水开始时的气温); $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.61T(\text{°C}) - 12.45$ (德令哈, $r = 0.76, n = 64$, 取降水结束时的气温); $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.29T(\text{°C}) - 8.52$ (西宁, $r = 0.37, n = 105$), 可见乌源地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的关系明显优于青藏高原东北部的研究结果, 对大气降水月平均状况的分析也得到同样结果。这容易理解为乌源地区处于欧亚大陆内部, 水汽源区甚远, 而气团不断冷却连续形成降水后, 水汽中重同位素含量逐渐减小; 同时由于降落水滴在大气中的蒸发以及与周围水汽的同位素交换进一步改变降水中的同位素成分, 都引起降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的正相关关系趋于增强^[9]。

3 冬季雪坑 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征

图 4 给出了 W1 和 W2 点两处雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 连续变化剖面。

对于 W1 雪坑系列, $\delta^{18}\text{O}$ 剖面随时间变化比较明显, 而且主要表现在雪坑顶部位置。如雪坑 1 顶部的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -23.2‰ , 该层位在后续雪坑中不再出现。1996 年 1 月 10 日和 1 月 24 日, 分别发生了两次降雪过程, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 和降水量分别为 -35.9‰ (1.6mm) 和 -38.2‰ (0.4mm)。两次降雪过程的极小 $\delta^{18}\text{O}$ 在雪坑 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面中也没有表现出来。比较 W1 连续雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面可看出雪坑中、下部的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化不大, 总体 $\delta^{18}\text{O}$ 特征基本保持不变。说明在所研究的时间尺度和环境条件下, W1 点处雪层内的水汽运移不足以导致 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面特征的改变。与 W1 雪坑系列不同, 海拔为 3900m 处的 W2 雪坑系列则明显说明雪层内水汽运移对 $\delta^{18}\text{O}$ 的平滑作用。雪坑 2 和 4 采样期间无降雪过程发生, 二者的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面基本相似, 但雪坑 4 的 $\delta^{18}\text{O}$ 波动幅度略小, 相邻层位间 $\delta^{18}\text{O}$ 数值差异的悬殊程度也有所减弱。雪坑 6 顶部 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -37.0‰ 的雪层系 1996 年 1 月 10 日降雪所致, 此外雪坑 4 和 6 的最大差异还在于雪坑 6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面发生进一步的平滑作用, 这种作用在雪坑 8 中更进一步

加剧。从图中容易看出雪坑各相邻采样层位间 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异程度已变得相当小。

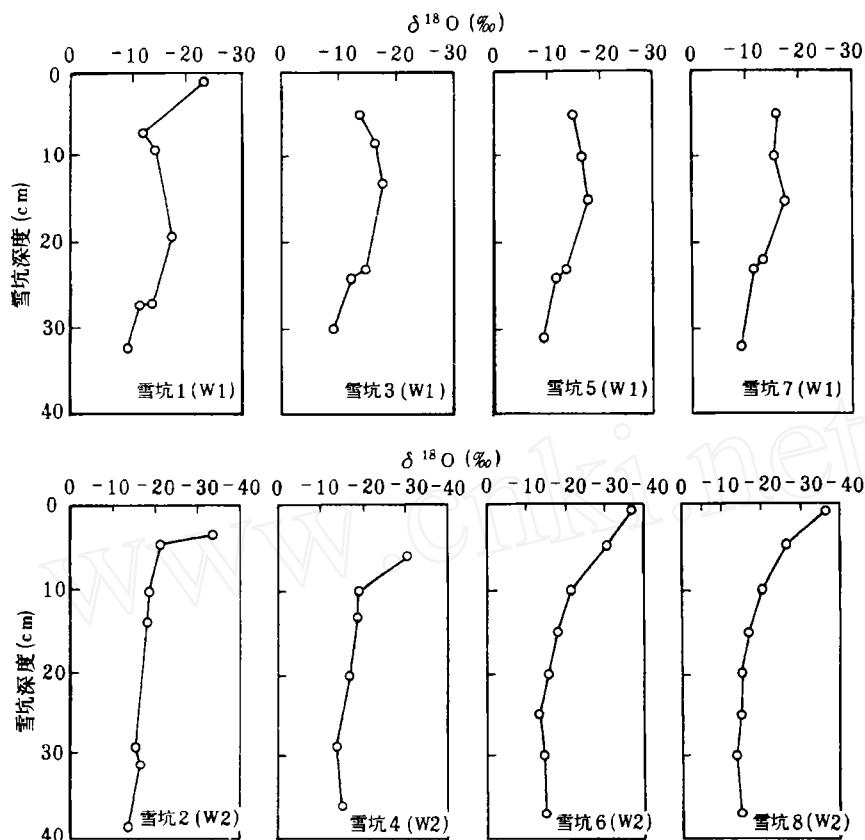


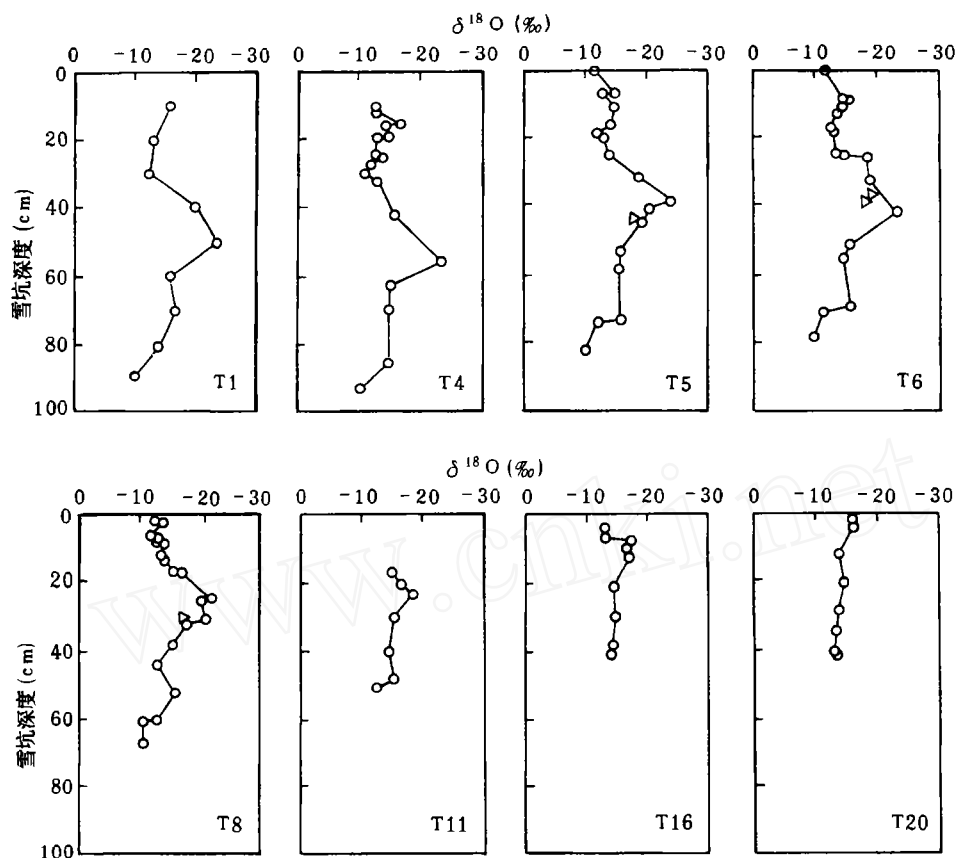
图4 乌鲁木齐河源1号冰川冬季雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 连续变化剖面

Fig.4 Successive $\delta^{18}\text{O}$ profiles of the snowpits from the No.1 Glacier at the headwater of Ürümqi River during winter

除雪层内的水汽运移造成冬季雪坑 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面发生平滑作用外,风吹雪导致的积雪重新分布和沉积过程是引起 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面发生变化的另一主要原因。比较图4所示的W1雪坑和W2雪坑系列的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面,可见二者的差别非常明显,如雪坑1顶部的最低 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -23.2‰ ,而雪坑2相应层位的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -33.6‰ 。比较同期采集的雪坑3和4、雪坑5和6、以及雪坑7和8的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面,同样说明W1雪坑系列顶部的极小 $\delta^{18}\text{O}$ 层位缺失。尤其明显的是采样期间发生的两次降雪过程所积累的极小 $\delta^{18}\text{O}$ 层位在W1雪坑系列中均无体现。这反映了降雪在冰川表面沉积后,由于冬季风力较大,冰川较高处的积雪容易被风重新吹扬而在海拔较低处发生二次沉积作用,从而导致冰川表面雪层内 $\delta^{18}\text{O}$ 分布的不均匀性。冬季吹雪的这种作用将导致冰川积累区内所提取的冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高。

4 夏季雪坑 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征

图5给出了夏季雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 连续变化剖面。

图5 乌鲁木齐河源1号冰川夏季雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 连续变化剖面Fig.5 Successive $\delta^{18}\text{O}$ profiles of the snowpits from the No.1 Glacier at the headwater of Ürümqi River during summer

T1 雪坑 51cm 以上基本由细粒或中、细粒雪构成,以下为粗粒雪和深霜,仅在 79cm 处出现一不连续的薄冰层。T1 雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面也较简单,表现为顶、底部的双峰和中间部位的低谷特征。顶、底峰的 $\delta^{18}\text{O}$ 分别约为 -12.2‰ 和 -9.9‰ , 50cm 处谷底的 $\delta^{18}\text{O}$ 约为 -23.3‰ , 整个雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 波动幅度为 13.4‰ 。

T4、T5、T6 和 T8 雪坑中多次出现由融水渗透形成的薄冰层。在此类特征结构层处,加大了取样密度,以期探求雪层内结构不连续层的性质。从总体上看,此四个雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面与 T1 雪坑大体相似,均呈现两端高中间低的势态,尤其是雪坑下部的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面保持得相当好。雪坑上部新形成冰层的 $\delta^{18}\text{O}$ 虽稍有差异,但没有改变雪层剖面的原始沉积状态。在这几个雪坑内也同时采集了若干冰透镜体样或直接用样品瓶接取的融水样,在图 5 中均使用“ Δ ”标识出。这些样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般大于相应层位雪样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,代表了上覆富含稳定重同位素雪层的特征,并说明了积雪消融过程中轻、重稳定氧同位素的分离作用。T8 雪坑的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面虽然仍保持了 T1 雪坑的原始剖面特征,但其波动幅度降低至 11.3‰ ,表现出一定程度的平滑作用。

从 T11 雪坑开始,雪层 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面与 T1 所示的原始状况相比发生了根本变化。对于

T11 雪坑, 除顶部 17cm 雪层为采样当日所沉降的新雪外, 下伏积雪的 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值为 -18.4% , 最大值为 -12.6 , 波动幅度仅有 5.8% 。这种雪层融水渗浸所产生的平滑作用在 T16 和 T20 雪坑中进一步加剧。即使不考虑采样期间新降雪的影响, T16 和 T20 雪坑 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动幅度也分别下降为 4.0% 和 3.1% , 雪坑的原始层位特征几乎消失殆尽。

显而易见冰川雪层融水的渗浸作用不仅可以平滑掉 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化, 甚至可能从根本上改变雪层内 $\delta^{18}\text{O}$ 的原始记录状况, 这不仅给以 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化为主要手段的冰芯断代工作带来困难, 而且也使大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间的正相关关系难以保持。

5 冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其与气温记录的比较

图 6 比较了冰芯 H_0 和 T_0 的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面。两支冰芯剖面的显著特征是顶部雪层内 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动幅度都非常大, 沿冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动幅度趋于减小, 尤为明显的是冰芯 H_0 顶部的 $\delta^{18}\text{O}$ 极值在冰芯 T_0 的相应区段内已完全消失。从图 6 所示的线性回归趋势看, 冰芯 H_0 和 T_0 随深度增加 $\delta^{18}\text{O}$ 值均趋于增大, 而且冰芯 H_0 的斜率略大于冰芯 T_0 。同时两支冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值也有较大差异, 冰芯 H_0 从 120cm 至冰芯底部范围内 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -11.02% , 与全部大气降水样品的算术平均值 -11.01% 相差无几, 而冰芯 T_0 从 90cm 至冰芯底部 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -10.09% 。由图 6 也可看出两支冰芯相同沉积时段内 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面的对应程度相当差。

根据冰芯钻取处的年净积累量资料, 并参考冰川污化层等特征, 大致将冰芯 T_0 的 0—250cm 范围对应于 90 年代, 250—500cm 冰芯对应于 80 年代, 500cm 以下至冰芯底部对应于整个 70 年代, 因此图 6 的冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录所揭示的是 70 年代以来的气温降低现象。图 7 给出了乌源 1 号冰川附近大西沟气象站的实测气温变化曲线, 可见从 70 年代以来, 本区气温略趋于增加, 因此 1 号冰川冰芯记录与实测气温变化之间呈现相反的变化态势, 即上文表明的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间的正相关关系在冰芯记录中不再保持。

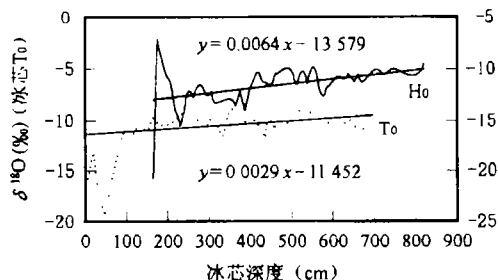


图6 乌鲁木齐河源1号冰川冰芯 H_0 和 T_0 的 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面

Fig.6 The $\delta^{18}\text{O}$ profiles of the H_0 and T_0 ice cores retrieved from the No.1 Glacier at the headwater of Ürümqi River

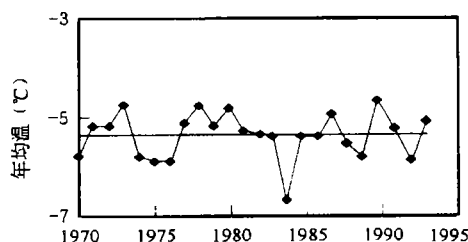


图7 乌鲁木齐河源地区大西沟气象站的实测气温变化

Fig.7 Temperature history monitored at the Daxigou Meteorological Station nearby the No.1 Glacier at the headwater of Ürümqi River

6 结 论

以上论述表明乌鲁木齐河源地区大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间存在显著的正相关关系, 但由于冬季雪层内水汽运移作用和风吹雪导致积雪的重新分布作用, 以及夏季雪层中融水渗浸作用等因素的影响, 乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与实测气温记录之间存在明显的差异, 这在一定程度上说明了 1 号冰川的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录不再具有温度指标意义。当然本次研究的时间尺度有限, 上述结论只能是比较初步的。

参 考 文 献

- 1 Jacob H, Sonntag C. An 8-year record of the seasonal variation of ^2H and ^{18}O in atmospheric water vapour and precipitation at Heibelberg, Germany. *Tellus*, 1991, 43B: 291—300.
- 2 Rozanski K, Araguas L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of Oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*, 1992, 258: 981—985.
- 3 姚檀栋, 丁良福, 蒲健辰等. 青藏高原唐古拉山地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其与水汽来源的关系. *科学通报*, 1991, 36(20): 1570—1573.
- 4 章新平, 施雅风, 姚檀栋. 青藏高原东北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征. *中国科学 B 辑*, 1995, 25(5): 540—547.
- 5 姚檀栋, 焦克勤, 杨志红等. 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化. *中国科学 B 辑*, 1995, 25(10): 1108—1114.
- 6 姚檀栋, 秦大河, 田立德等. 青藏高原 2ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. *中国科学 D 辑*, 1996, 26(4): 348—353.
- 7 Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E *et al.* Holocene-late pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibet Plateau. *Science*, 1989, 246: 532—535.
- 8 Watanabe O, Wu X, Ikegami K *et al.* Oxygen isotope characteristics of glaciers in the Eastern Tian Shan. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 1983, 5(3): 101—112.
- 9 章新平, 姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和降水量之间的关系. *冰川冻土*, 1994, 16(1): 31—40.

PRESENT ENVIRONMENTAL PROCESSES OF ICE CORE $\delta^{18}\text{O}$ RECORDS OF THE No.1 GLACIERS AT THE HEADWATER OF ÜRÜMQI RIVER, XINJIANG, CHINA

Hou Shugui Qin Dahe Li Zhongqin Huang Cuilan

(Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract

Analyses of stable oxygen isotope in precipitation samples during June, 1995 to June, 1996, in snowpit samples during the winter of 1995—1996 and during the summer of 1996, and in shallow ice core samples retrieved in May, 1996 from the

headwater of Ürümqi River are presented in this paper. The results indicate that:

1. A marked positive correlation between temperature and $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation is shown in the studying regions.

2. Smoothing effect by the vapour movement within the snowpacks and redistribution of snowpacks by wind-blowing are the main factors that can alter the original $\delta^{18}\text{O}$ profiles during winter. During the summer, the main affecting factor is the melt-water percolation processes.

3. Significant difference can be found between ice core $\delta^{18}\text{O}$ records and monitored temperature history nearby the glacier, which suggests that the post-deposition processes have changed the original temperature significance of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation to a certain degree.

Key words: precipitation, snow, ice, $\delta^{18}\text{O}$, present environmental processes, headwater of Ürümqi River