

文章编号: 1008—2786(2000)01—0001—06

希夏邦马峰达索普冰川高海拔区夏季风期间大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征

康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 段克勤

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析表明, 本区夏季风期间大陆性气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于海洋性气团降水, 同类型气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间呈正相关关系。达索普冰川高海拔区高程效应明显的降水过程, $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化梯度较小为 $-0.1\text{‰}/100\text{ m}$ 。无高程效应特征的降水过程, 可能与降水时的天气状况有关。同时地形对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随高程的分布有较大影响。达索普冰川区近东西向区域内降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 分布与高程效应一致, 而近南北向区域内则与高程效应相反。

关键词: 希夏邦马峰; 夏季风期间; 降水; $\delta^{18}\text{O}$

中图分类号: P343. 6; P426. 65 文献标识码: A

两极地区气温是决定降水中稳定同位素比率的主导因素^[1~3], 但在热带地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈反相关关系, $\delta^{18}\text{O}$ 主要受到“降水量效应”影响^[1, 4~6]。青藏高原降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候学意义研究表明, 在高原北部地区, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 同气温呈正相关关系, 特别是 $\delta^{18}\text{O}$ 和气温的月平均值之间关系更为显著^[6~10]; 而青藏高原南部地区在夏季风期间, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受“降水量效应”影响^[11~13]。本文通过希夏邦马峰北坡达索普冰川高海拔区收集的降水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析, 认识本区夏季风期间影响降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主导因素和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的分布等, 为进一步的深孔冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究提供依据。

1 样品采集与分析

“1997 希夏邦马冰芯科学考察”期间, 在希夏邦马峰北坡达索普冰川高海拔区 ($28^{\circ}33'\text{ N}$, $85^{\circ}44'\text{ E}$) 采集到一批降水样品(图 1)。采样方法为降雨样品直接用干净的方盆盛接, 降雪样品用预先清洗干净的塑料袋直接采集, 待样品在塑料袋内自然融化后装入预先清洗干净的聚乙烯塑料瓶内。所有样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 均在中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室由 MAT-252 气体同位素质谱仪进行了分析测试, 其精度为 0.5‰ 。

2 夏季风期间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征

达索普冰川前进营地(海拔 $5\,800\text{ m}$)的降水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果见表 1。降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于

收稿日期: 1999—05—14; 改回日期: 1999—11—25
基金项目: 国家攀登计划(95—预—40 和 95—预—24)、中国科学院院重大项目(KZ951—A1—402 和 KZ951—A1—204)、国家自然科学基金(49871022)以及中科院兰州冰川冻土研究所与美国俄亥俄州立大学伯德极地研究中心、新罕布什尔大学气候变化研究中心的合作项目支持。样品采集得到“1997 希夏邦马冰芯科学考察队”所有队员的帮助, 样品分析由孙维贞完成, 作者表示衷心的感谢
作者简介: 康世昌(1969—), 男, 甘肃陇西人, 博士。1995 年毕业于兰州大学地理科学系, 获硕士学位。1999 年在兰州冰川冻土研究所获博士学位。现主要从事山地冰川与气候环境的研究工作, 已发表论文 10 篇

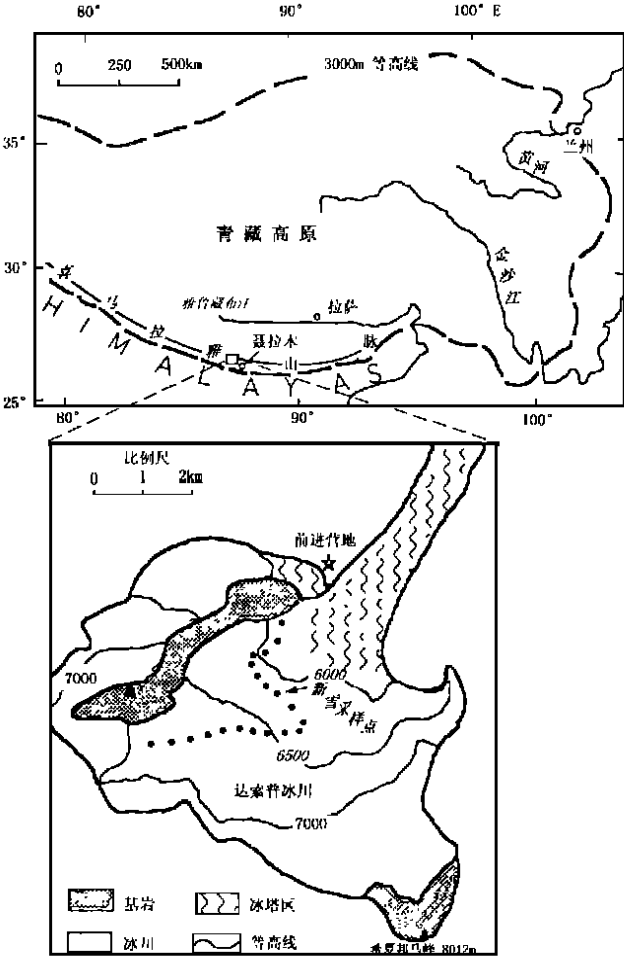


图 1 达索普冰川高海拔区降水样品采集点位置略图
Fig. 1 Sites of precipitation sampling in high elevation of the Dasiupu Glacier

由 500 hPa 天气图可见(图 2a、b), 9 月 4 日喜马拉雅山中段地区为暖高压控制, 此高压在两天内由西北向东南方向移动, 没有明显天气系统入境, 说明降水事件 1、2 可能为局地降水。由研究区附近的气象台站风向以偏南风为主推断, 这两次降水可能是喜马拉雅山南坡较温暖(对应气温较高)的水汽气团在偏南风作用下运移到北坡冷却而形成。9 月 8 日 20 时喜马拉雅山地区有一较大范围暖高压(图 2c), 至 9 月 9 日 08 时高压逐渐南移(图 2d), 并在希夏邦马峰地区生成一个小槽, 08 时亦有阵雨发生, 从其邻近气象台站的风向(偏南)推测, 降水事件 3 的形成与降水事件 1、2 类似。

—26.77 ‰~—9.53 ‰, 平均值为—17.84 ‰。姚檀栋等在唐古拉山垭口附近观测的结果表明^[4], 大陆性气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 介于—15.81 ‰~—4.30 ‰, 而远距离传输的海洋性气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 介于—28.44 ‰~—22.66 ‰, 大陆性气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 远高于海洋性气团降水。青藏高原内陆的大陆性气团其水汽主要来源于众多湖泊、河流的蒸发, $\delta^{18}\text{O}$ 在这些水体中比较富集, 因此大陆性气团水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 亦较高。海洋性气团因沿途经历多次降水过程的分馏, 重同位素的水分子不断丢失, 故 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较小。对于希夏邦马峰北坡不同降水过程的 $\delta^{18}\text{O}$ 差异, 同样可能是降水的水汽来源不同所致。这里以四次降水事件为例, 对不同气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异作进一步分析。四次降水事件的样品在达索普冰川上沿不同海拔采集(图 1)。

达索普冰川四次降水事件 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值与降水前后海拔 7 000 m 的气温比较可见, 降水事件 1、2、3 中 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值随气温的降低而减小, 降水事件 4 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显高于前 3 次降水, 但对应的气温又远低于前 3 次降水, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的这种关系可以从不同降水气团来分析。

表 1 达索普冰川区前进营地(5 800 m a. s. l.)
1997—08~09 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化

Table 1 Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation at the Advanced Camp (5 800 m a. s. l.) in the Dasiupu Glacier from August to September, 1997		
降水日期(1997)	降水时间	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
8月15日	13:30~14:00	-16.51
8月17日	21:00~次日7:00	-20.28
8月18日	16:30~18:30	-9.59
8月18日	22:00~次日6:00	-11.22
8月24日	14:30~15:30	-9.53
8月27日	17:50~18:45	-20.89
8月30日	15:00~16:30	-16.42
8月30日	21:00~次日2:00	-24.63
9月3日	10:00~次日2:00	-17.33
9月4日	16:00~17:30	-21.49
9月5日	19:30~次日9:00	-26.77
9月9日	8:00~16:00	-22.34
9月10日	9:30~17:00	-20.84
9月19日	20:00~次日6:00	-11.85

表 2 达索普冰川高海拔区四次降水过程的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值及气温观测值
Table 2 The average $\delta^{18}\text{O}$ values and temperature of four precipitation events in high elevation of the Dasuopu Glacier

降水事件	降水时段	采样海拔(m)	样品 $\delta^{18}\text{O}$	平均值	气温观测记录(7000m) ¹⁾	
					观测时间	气温(℃)
1	9月3日10:00~9月4日2:00	5800~7000	17	-17.67	9月4日14:00	18.8
2	9月4日23:00~9月5日5:00	5860~7000	19	-20.78	9月5日14:00	8.8
3	9月9日8:00~10:00	5860~6940	19	-22.73	9月9日14:00	-1.8
4	9月19日20:00~9月20日6:00	5800~7000	21	-12.26	9月19日14:00	-4.0
					9月20日14:00	-7.4

1)气温为简易阿斯曼观测仪观测结果。

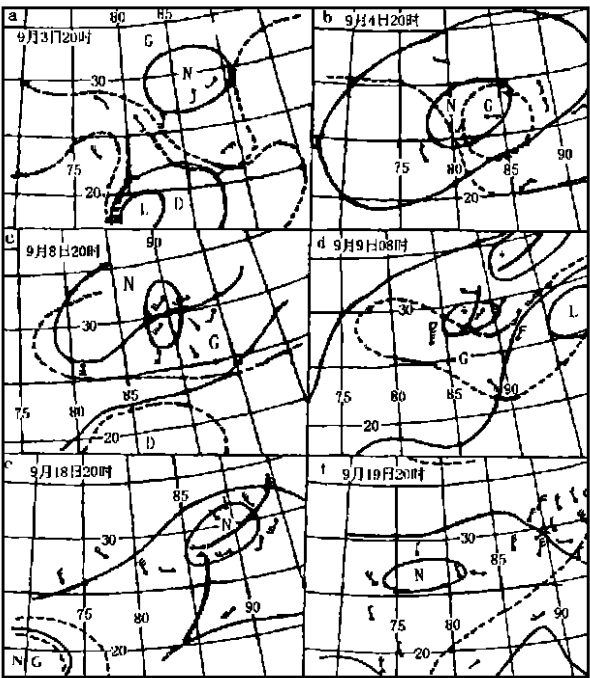
降水事件4发生前的9月18日20时,希夏邦马峰地区处在两个槽的交汇处(图2e),大部分台站风向为西或西北风,至19日20时槽消失,无较大降水系统出现(图2f),因而降水事件4仍为局地降水。由附近台站风向以偏北风为主判断,本次降水可能是喜马拉雅山北坡邻近地区蒸发的水汽在西北风作用下因地形抬升形成降水。降水事件4中 $\delta^{18}\text{O}$ 值远高于前3次降水,表明源自希夏邦马峰北坡邻近地区的水汽气团中 $\delta^{18}\text{O}$ 远高于喜马拉雅山以南的海洋性气团。这一结果与姚檀栋等的研究一致^[14],海洋性气团中 $\delta^{18}\text{O}$ 的较低值则正是由“降水量效应”影响所致。具有相同水汽来源的降水事件1、2、3,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值随气温降低而减小,表明 $\delta^{18}\text{O}$ 的次一级变化受到了“温度效应”的影响。总之,希夏邦马峰北坡达索普冰川高海拔区夏季风期间,不同性质的水汽气团(南来的海洋性气团和局地大陆性气团)是影响降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主导因素,而气温则是次一级的因素。

3 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的变化

4次降水过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的变化见

图3。降水事件1和4中, $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的升高变化不明显,降水事件2中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔升高有增大趋势。而降水事件3中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔升高呈显著减小趋势,二者的相关系数达到0.87, $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化梯度为-0.1 ‰/100 m。

降水中稳定同位素比率随海拔变化的研究表明^[16~19],稳定同位素比率一般随海拔的升高而减小,即表现出稳定同位素比率的高程效应,其原因是由于地形抬升造成的冷却加强以及降落水滴的蒸发造成不同海拔处气团中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的差异。稳定同位素比率随海拔的减小梯度似乎与纬度有关,即纬度越高,减小的梯度越大,反之亦然。如降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化梯度,在珠穆朗玛峰北坡地区海拔



图例: — 等温线 — 等压线 — 槽线 * 降雨 G 高压区 D 低压区
N 暖区 L 冷区 风矢 西夏邦马峰

图 2 达索普冰川高海拔区四次降水事件前后 500 hPa 天气图
Fig. 2 Weather maps of 500 hPa before and after four precipitation events in the high elevation of the Dasuopu Glacier

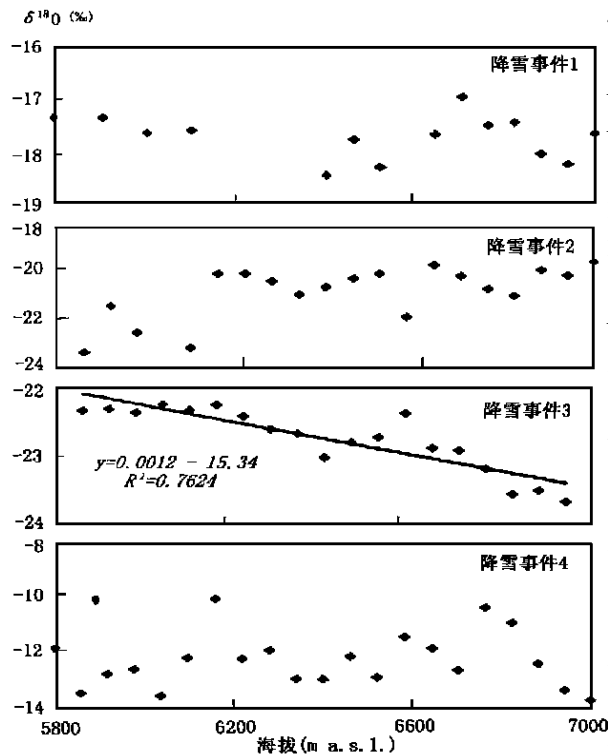


图3 达索普冰川高海拔区四次降水过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的变化
Fig. 3 Elevation distributions of $\delta^{18}\text{O}$ in four precipitation events in the high elevation of the Dasuopu Glacier

定空气层位结构的暴风雪，以及降水形成的高度一致等，同样可以导致稳定同位素比率随海拔变化的不确定性^[21, 23]。由于上述3次降水事件的样品采集是在降水之后的12小时内完成，积雪的后期变化可以忽略不计，因此3次降水事件中 $\delta^{18}\text{O}$ 未呈现高程效应则可能主要由当时的天气状况所致。

地形因素对 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的变化也有一定的影响。降水事件1和4在海拔6400 m~7000 m间，降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的变化趋势大致呈倒“V”型(图4)。在达索普冰川区的采样路线上，海拔6750 m~7000 m是近东西向且坡度较为平缓的区域，降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的变化呈现高程效应。而海拔6400 m~6750 m近南北向且坡度较大的区域，降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与高程效应相反。因此，在海拔6400 m~6750 m的区域内降水时的天气状况可能对 $\delta^{18}\text{O}$ 的高程分布影响较大，但呈现与高程效应相反的原因还需进一步的研究。

4000 m~7000 m为 $-2\text{‰}/100\text{ m}$ ^[29]，而喜马拉雅山南坡海拔2600 m~4300 m为 $-3.4\text{‰}/100\text{ m}$ ，阿尔卑斯山约为 $-5\pm3\text{‰}/100\text{ m}$ ^[21]。此外，Niewodniczanski等在全球4个高海拔山地(南美Andes、中亚Hindu Kush、喜马拉雅山南坡、非洲Kenya和Kilimanjaro山脉)的研究表明^[23]， $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化梯度在 $-0.6\text{‰}/100\text{ m}$ ~ $-1.0\text{‰}/100\text{ m}$ 的范围内变化，必须清楚这些样品大部分不是新降雪，积雪的后期变化对稳定同位素高程效应将会产生影响^[18]。在希夏邦马峰达索普冰川高海拔区， $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化梯度仅为 $-0.1\text{‰}/100\text{ m}$ ，可能反映了低纬地区稳定同位素的垂直变化梯度较小这一事实。

降水事件1、2和4并未呈现明显的稳定同位素高程效应特征，前人的研究也发现类似现象^[22]，这与降水时的天气状况和积雪的后期变化有关。Moser等指出^[18]，积雪的后期变化，如消融、蒸发或凝华以及风吹雪等可能会掩盖稳定同位素高程效应，甚至出现与其相反的趋势，也可能持续保持高程效应甚至于强化高程效应。另一方面，降水时的天气状况，如覆盖整个山体坡面的降水或无固

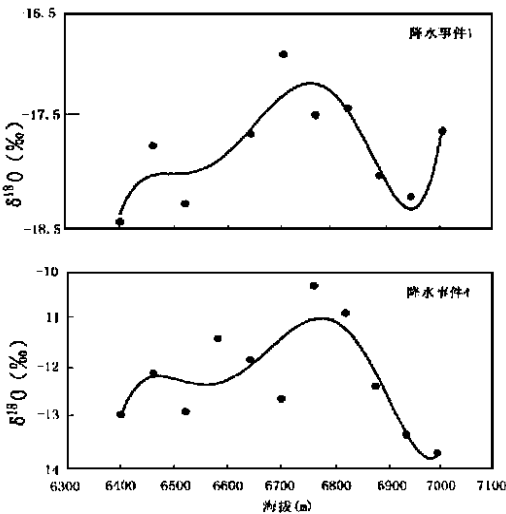


图4 达索普冰川高海拔区地形对 $\delta^{18}\text{O}$ 高程分布的影响
Fig. 4 Morphological effect on elevation distribution of $\delta^{18}\text{O}$

4 结 论

1. 希夏邦马峰北坡达索普冰川高海拔区夏季风

期间, 局地大陆性气团降水中值高于 $\delta^{18}\text{O}$ 海洋性气团降水。同类型气团降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间呈正相关关系, 即较高的气温对应较高 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

2. 达索普冰川高海拔区夏季风期间, 具有明显高程效应的降水过程, $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化梯度较小为一 $0.1\text{‰}/100\text{m}$ 。无高程效应特征的降水过程, 可能与当时的天气状况有关。地形对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔的变化影响较大。达索普冰川区近东西向坡度较小的区域 $\delta^{18}\text{O}$ 分布与高程效应一致, 而近南北向坡度较大区域 $\delta^{18}\text{O}$ 分布则与高程效应相反。

参考文献:

- [1] Dansgaard, W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, (16): 436~468
- [2] J. Jouzel, C. Lorius, J. R. Petit, et al. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160, 000 years)[J]. *Nature*, 1987, 329: 403~407
- [3] W. Dansgaard, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, 364: 218~220
- [4] K. Rozanski, L. Araguas-Araguas, R. Gonfiantini. Isotopic patterns in modern global precipitation[C]. In: P. K. Swart, K. C. Lohman, J. McKenzie and S. Savin (eds), *Climate Change in Continental Isotopic Records-Geophysical Monograph 78*, American Geophysical Union, Washington, D. C., 1993, 1~36.
- [5] P. M. Grootes, M. Stuiver, L. G., Thompson, et al. Oxygen isotope changes in tropical ice Quelccaya, Peru[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 1187~1194
- [6] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度和降水量的关系[J]. *地理科学*, 1995, 15(1): 1~7
- [7] 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[J]. *中国科学(B 辑)*, 1995, 25(5): 540~547
- [8] 章新平, 姚檀栋, 田立德. 青藏高原降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 时空分布特征初探[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 1996, 19(1): 83~86
- [9] 田立德, 姚檀栋, 杨志红. 青藏高原降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布特征及其影响因素[C]. 见: 青藏高原形成演化、环境变迁和生态系统研究—学术论文年刊(1995). 北京: 科学出版社, 1996, 243~250
- [10] T. Yao, L. G. Thompson, E. Mosley-Thompson, et al. Climatological Significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(D23): 29, 513~29, 537
- [11] 田立德, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 拉萨夏季降水中氧稳定同位素变化特征[J]. *冰川冻土*, 1997, 19(4): 295~301
- [12] H. Wushiki. Deuterium content in the Himalayan precipitation at Khumbu District, observed in 1974/1975. SEP-PYO[J]. *Journal of the Japanese society of snow and ice*, 1977, 39 (Special Issue), 50~56
- [13] C. P. Wake, M. Stievenard. The amount effect and oxygen isotope ratios recorded in Himalayan snow[C]. In: *Paleoclimate and Environmental Variability in AustralAsian Transect during the Past 2000 Years. Proceedings of the 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP-II Symposium*, 1995, 236~241
- [14] 姚檀栋, 丁良福, 蒲建成等. 青藏高原唐古拉山地区降雪中 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其与水汽来源的关系[J]. *科学通报*, 1991, 20: 1570~1573
- [15] P. A. Mayewski, W. B. Lyons, N. Ahmad. Chemical composition of a high altitude fresh snow fall in the Ladakh Himalaya[J]. *Geophysical Research Letters*, 1983, 10: 105~108
- [16] W. Ambach, et al. The altitude effect on the isotopic composition of precipitation and glacier ice in the Alps[J]. *Tellus*, 1968, 20(4): 595~600
- [17] Lorius, C. L. Merlivat, R. Hagemann. Variation in the mean deuterium content of precipitation in Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(28): 7027~7031

- [18] H. Morse, W. Stichler. Deuterium and oxygen-18 contents as an index of the properties of snow covers. Union Geodésique et Géophysique Internationale Association Internationale des Sciences Hydrologiques Commission des Neiges et Glaces [C]. Symposium Mécanique de la neige. Actes du colloque de Grindelwald avril 1974, (IAHS-AISH publication No. 114), 1975, 122~135
- [19] G. C. Bortolami. Isotope hydrology of Val Corsaglia, Maritime Alps, Piedmont, Italy, by G. C. Bortolami, B. Ricci, G. F. Susella and G. M. Zuppi. In: Isotope hydrology 1978, Proceedings of an international symposium on isotope hydrology, jointly organized by the International Atomic Energy Agency and the United Nations Educational [C], Scientific and Cultural Organization and held in Neuherberg, 19-23, June, 1978, Vienna [J], *International Atomic Energy Agency*, 1979, (1): 327~350
- [20] 章申, 于维新, 张榕森. 珠穆朗玛峰高海拔地区氢、氧同位素地球化学特征 [C]. 见: 珠穆朗玛峰地区科学考察报告 (1975), 气象与环境. 北京: 科学出版社, 1980, 238~243
- [21] H. Morse, W. Stichler. Deuterium measurements on snow samples from the Alps [C]. In: Isotope hydrology 1970, Proceedings of symposium on the use of isotopes in hydrology, 1970, Vienna. *International Atomic Energy Agency*, 1970, 43~56
- [22] J. Niewodniczanski, J. Granczak, L. Baranski et al. The altitude effect on the isotopic composition of snow in high mountains [J]. *Journal of Glaciology*, 1981, 27(95): 99~111
- [23] H. Behrens. Study of the discharge of Alpin glaciers by means of environmental isotopes and dye tracers [M]. In H. Behrens. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. 7, Ht. 1~2, 1971, 79~102

CHARACTERISTICS OF $\delta^{18}\text{O}$ IN PRECIPITATION DURING SUMMER MONSOON SEASON IN HIGH ELEVATION OF THE DASUOPU GLACIER, MOUNT XIXIABANGMA

KANG Shi-chang, QIN Da-he, YAO Tan-dong, DUAN Ke-qin

(*Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, LIGG, CAS, Lanzhou 730000*)

Abstract: During 1997 Xixiabangma Ice Core Scientific Expedition, precipitation samples were collected in the high elevation of the Dasuopu Glacier, Mt. Xixiabangma. Analysis shows that the $\delta^{18}\text{O}$ value in precipitation of the continental air mass is higher than that of marine air mass in the area. In the same type of air mass precipitation, $\delta^{18}\text{O}$ value is positively relevant with temperature. When the “elevation effects” is obvious, the gradient of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation with respect to elevation is about $-0.1\text{‰}/100\text{ m}$. The absence of the “elevation effects” may be caused by weather conditions (such as snow storms or horizontal and high cloud formation). Also topography influence the variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation with elevation. The “elevation effects” and the negative “Elevation Effects” occur in the eastern and northern exposure of the Dasuopu Glacier, respectively.

Key words: Mt. Xixiabangma, summer monsoon season, variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation