喜马拉雅山中段高过量氘与西风带水汽输送有关

田立德① 姚檀栋① J. W. C. White② 余武生③ 王宁练③

(①中国科学院青藏高原研究所冰芯与寒区环境实验室，北京 100085；②Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, USA；③中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境实验室，兰州 730000. E-mail: ldt@itpcas.ac.cn)

摘要　喜马拉雅山中段希夏邦马达索普冰芯及冰川融水中的过量氘显著异常，其值远远高于全球降水中过量氘均值及周围地区降水中过量氘值. 附近站点聂拉木连续一年以上降水中过量氘的变化揭示了这一异常现象. 研究发现这一异常与该地区降水的水汽来源地的季节变化有关. 发现在季风爆发期，该地区降水受西南季风影响，过量氘的值与其他受海洋水汽来源的地区一样，为低值；而在非季风月份，水汽以西风输送为主，降水中过量氘为高值. 而且在该地区冬春季降水占全年降水的比例较大，结果使得该地区整年平均降水中过量氘的值显著高于青藏高原南部其他地区. 这一结论对该地区的冰芯研究有重要意义，表明喜马拉雅山中段冰芯的水汽来源并非全部来源于西南季风的水汽输送，而西风水汽输送占有很大比例.

关键词　喜马拉雅山中段　降水　过量氘　冰芯记录

水中的氢与氧稳定同位素是古气候沉积记录，尤其是冰芯记录中反映气候环境变化的一项重要指标，其在青藏高原冰芯研究中占有重要的地位. 由于水在蒸发过程中的动力分馏作用，氢(D/H)比氧($^{18}O/^{16}O$)稳定同位素分馏的程度相对更强，结果使得在全球降水中氢氧稳定同位素比率呈线性变化之外，其线性关系还出现一差值，Craig[1]把这一关系定义为大气水线(Meteoric Water Line)，后来Dansgaard[2]又把这一关系的差值定义为过量氘(deuterium excess)，用d表示，即

$$d = \delta D - 8\delta^{18}O.$$

根据全球 219 个站点观测的长期降水中$\delta^{18}O$和δD的变化，发现其存在以下的关系[3]:

$$\delta D = 8.17\delta^{18}O + 11.27‰(VSMOW).$$

理论上，对于d的变化机理已有比较清楚的认识. 降水中过量氘的大小与水蒸发时的动力分馏过程有关[4~6]. 自然界有几个主要的过程影响降水中d的变化. 一个主要过程是与水汽来源地的温度与相对湿度状况有关的水体的蒸发，对于相对干燥的气候条件，水份蒸发的动力分馏作用也强，形成的降水的d值也越高，反之亦然. 从总的情况来看，全球降水的d在空间变化上有两个大的峰值中心，一个位于红海沿岸地区，一个位于亚欧大陆腹地. 第二个过程涉及到在干燥气候条件下形成的降雨，如果雨滴在降落过程中蒸发强烈，也会改变降水中d的值，会使其值偏低. 此外，在南极超低温条件下，由于云中超饱和水汽的存在，也会使得降雪中的d值偏高[7]. 因此，南极表层雪中的d也存在着大幅度的空间变化[8]. 由于d对气候变化响应的敏感性，冰芯中d的变化成为研究水汽来源地气候变化的一项重要指标[5].

1　青藏高原南部喜马拉雅山中段高 d

以前的研究发现，青藏高原降水与河水中d的空间变化很显著，在德令哈和沱沱河之间，降水及河水中d基本上维持在同一水平上，其值介于 11‰与 13‰之间，而介于唐古拉山与喜马拉雅山之间地区，由于受季风降水的影响，降水及河水中d偏低，介于 5‰~9‰之间[9]. 同期在喜马拉雅山中段达索普冰川几个雪坑剖面中的d高达 17.3‰，降水中d高达 17.5‰[10]，远高于青藏高原相临地区. 从达索普冰芯在过去的 1 ka来的稳定同位素来看，d在 10‰~17‰之间波动[11]，也远远高于周围地区降水中d.

揭示该地区降水及冰芯中的高 d 对于该地区冰芯记录及水汽输送过程研究具有重要意义.

2　聂拉木降水中 d 及其季节变化

我们在美国 Colorado 大学北极与高山研究所(INSTAAR)的同位素实验室测量了聂拉木站点连续 1 年以上降水水样的氢氧稳定同位素(图 1)，为研究该地区高 d 提供了新资料. 氧稳定同位素的测定是用 CO_2 平衡法进行的，测得的$\delta^{18}O$ 精度为 0.2‰；氢稳定同位素是用铀还原法测定的，测得的δD 精度为 0.5‰.

图 2 为测得的聂拉木从 1999 年 9 月到 2001 年 5 月历次降水中 d 及$\delta^{18}O$ 的季节变化，可以看出，聂拉

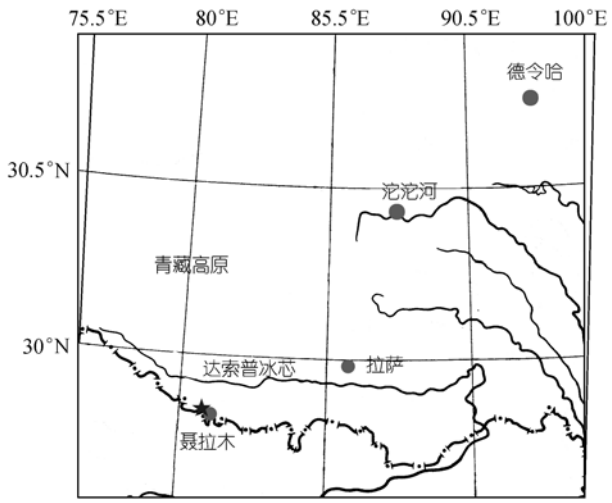

图 1 研究站点地理位置图

★号为达索普冰芯位置

木降水中d的季节变化十分显著. 在季风爆发之前时段, 降水以高d为主, 其值主要波动于 10‰~30‰之间; 从 6 月初开始, 伴随着季风爆发, 降水中δ^{18}O的迅速降低, d值也迅速降低至 0‰~10‰之间甚至更低. 到 9 月份随着季风降水的结束, 降水中d值又升到 10‰以上. 在季风活动阶段d值与以前测得的青藏高原南部唐古拉山与喜马拉雅山之间降水中d值处于同一水平上[10]. 这种d的季节变化还造成了该地区降水中大气水线的高斜率与高截距(图 3), 这种高斜率与高截距与测得的达索普冰川雪坑与降水中大气水线也十分相似.

从全年降水的季节分布来看, 聂拉木降水不同于青藏高原南部的其他季风降水区, 其降水的季节分布出现两个峰值. 除了夏季季风降水有一峰值外, 在春季还存在另一峰值, 冬春季节的降水在 1 年中所占的比例很高(图 4). 而在拉萨只有一个夏季季风降水的峰值. 因此, 总的平均来看, 聂拉木非季风时段对全年降水中 d 的权重所占比例很大, 而这一时段正好是降水中 d 很高的时段, 最终导致了该地区的高 d 值. 这也正是该地区冰芯中 d 很高的原因所在.

聂拉木降水中d的季节差异反映了季风前后水汽来源地的变化. 为了研究这一季节变化特征, 我们利用NCAR/NCEP数据对该地区季风爆发前后大气运动状态及水汽输送路径进行追踪分析[12]. 在季风爆发前, 水汽主要以西风带输送路径为主, 图 5 上图给出的个例为 2000 年 3 月 14 日聂拉木降水水汽输送路径图, 该图是一个典型反映非季风阶段大气输送路径图式. 而在季风活跃期, 水汽输送以洋面蒸发的水汽输送为主. 图 5 的下图给出的个例为 2000 年 7 月 12 日聂拉木的水汽输送路径, 可以明显看出大气下 2 层从洋面向高原的水汽输送. 由海面蒸发而来的水汽最后凝结形成的降水以低d为特征. 因此, 从水汽输送路径上来看, 季风活跃期水汽来源与非季风降水期水汽来源是不同的. 在非季风期, 形成聂拉木降水的水汽来源于西部, 这一部分水汽与来源于大西洋或地中海蒸发的水汽的特征十分一致. 图 6 给出了西风带水汽输送途中一个站点——喀布尔降水以及稳定同位素的季节变化特征. 喀布尔降水主要集中于冬春季, 月降水峰值对应于聂拉木冬春季的降

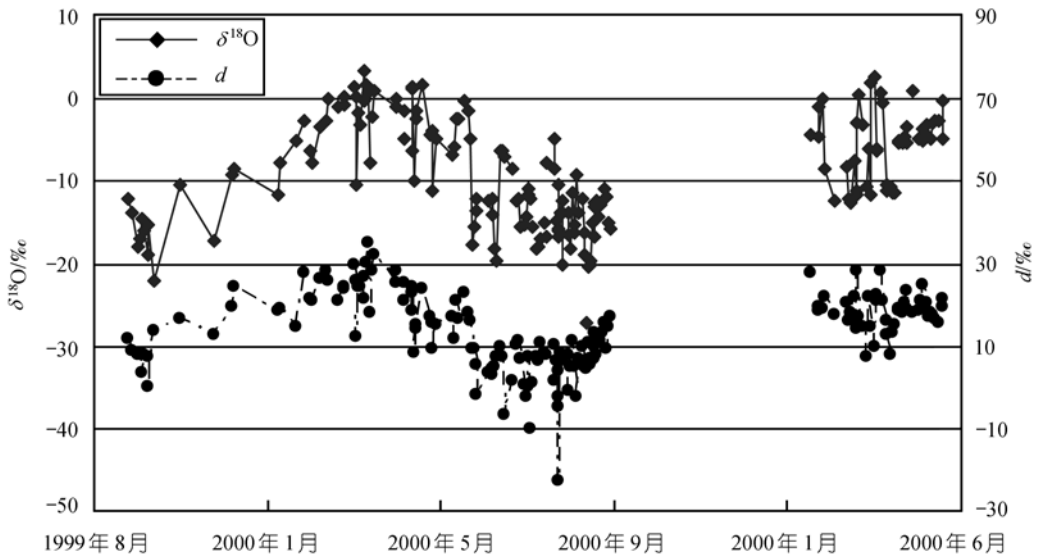

图 2 聂拉木 1999 年末至 2001 年 5 月历次降水中 d 与δ^{18}O 的季节变化

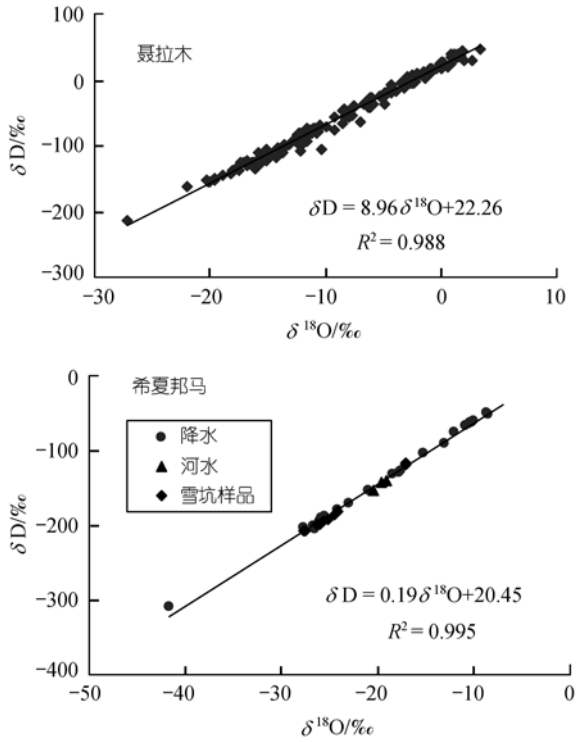

图 3　聂拉木降水与希夏邦马达索普冰川雪样中δ^{18}O 和 δD 的关系对比

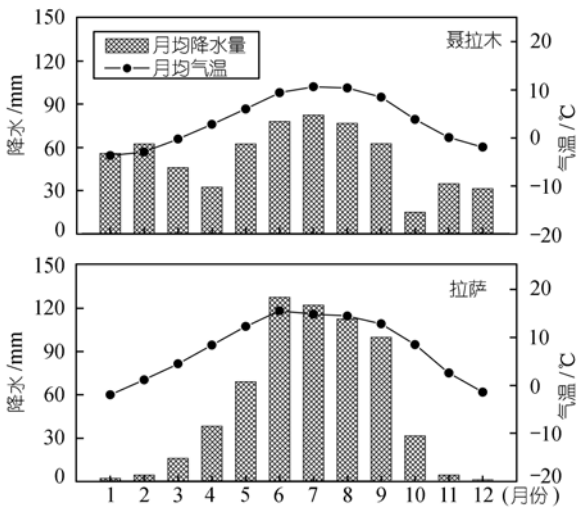

图 4　聂拉木与拉萨降水的季节分布对比

水峰值，且降水中δ^{18}O与d都很高[13]．冬季δ^{18}O介于−10‰与 0‰之间，d主要介于 10‰与 20‰之间．喀布尔降水季节变化以及降水中δ^{18}O与d值都与聂拉木非季风降水期的特征一致．这种高的d也出现在地中海东部降水中[14,15]．水汽的输送路径与同位素变

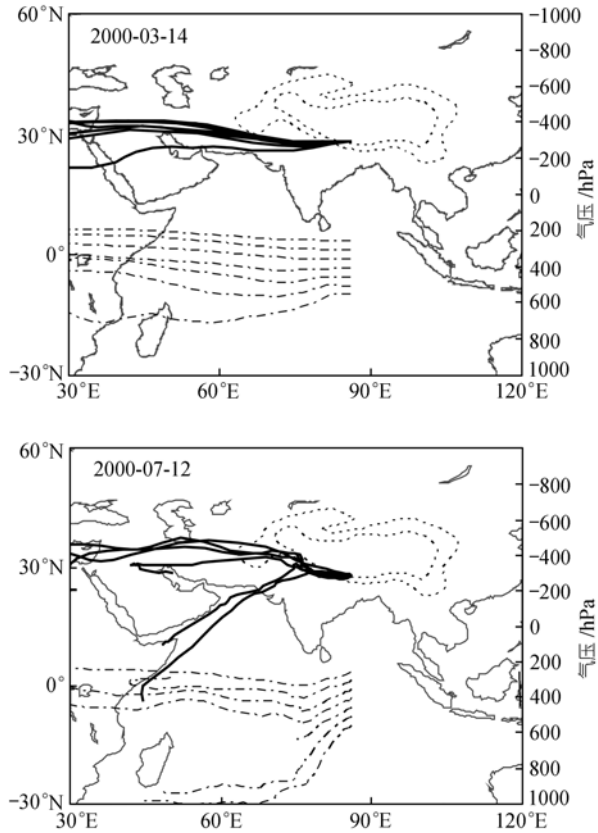

图 5　2000 年季风爆发前(上图)与季风爆发期(下图)聂拉木大气水汽追踪结果典型个例对比

模型结果给出了聂拉木站点从 550~250 hPa 间隔 50 hPa 共 7 层水汽的输送路径追踪结果，图中实线表示不同大气压层的追踪路径的水平分布，而下面的虚线则表示追踪路径的垂直方向上的变化．在季风爆发前，聂拉木以西风带水汽输送为主，上图为 2000 年 3 月 14 日水汽输送路径图；在季风爆发期，聂拉木的水汽输送以海洋蒸发水汽为主，下图为 2000 年 7 月 12 日聂拉木的水汽输送路径，可以看到下层洋面到青藏高原的水汽输送路径

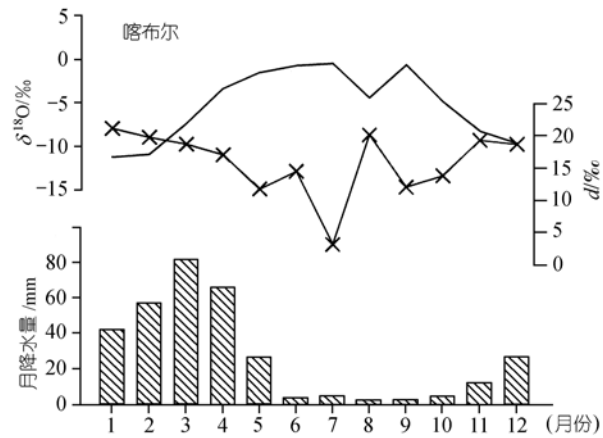

图 6　喀布尔降水及稳定同位素季节变化

化都显示聂拉木非季风降水期的水汽来源于大西洋与地中海水蒸发的水汽.

3 结果与讨论

青藏高原南部喜马拉雅山中段降水中 d 的研究说明该地区降水分成两个阶段: 在夏季的 6~9 月降水主要来源于季风活动, 由于水汽来源于洋面的水汽蒸发, 降水中δ^{18}O 与 d 都以低值为特征; 而在非季风降水时段(10 月到次年 5 月), 降水的水汽来源于西风带输送, 降水中高的δ^{18}O 与 d 说明水汽来源于比较干燥的区域. 由于该地区非季风降水在 1 年降水中所占例很大, 所以使得该地区全年降水中 d 远高于喜马拉雅山以北的其他季风降水区. 而与聂拉木十分接近的希夏邦马达索普冰芯及雪坑中高 d 也说明水汽来源的季节变化也同样影响了希夏邦马达索普冰芯中稳定同位素记录.

了解形成冰川的水汽来源地变化是冰芯研究中的前提之一. 达索普冰芯中氧稳定同位素具有鲜明的季节变化特征[16,17], 并且冰芯积累量的记录很好地反映了印度西北部季风降水的演变过程[18,19], 实际上这种季节变化特征也是水汽来源季节变化的表现. 喜马拉雅山中段降水中高d对于该地区冰芯研究具有重要意义. 首先, 高d表明该地区冰芯中的水汽相当量部分来源于西风带水汽输送, 而这是以前的冰芯研究所没有重视的; 其次, 聂拉木降水中d的季节变化也进一步证实了该地区冰芯中d的变化与季风活动的关系. 低的d反映强的季风降水与相对较弱的西风水汽输送时期, 而高的d对应弱的季风活动与强的西风输送时期[11]. 冰芯中d的变化, 也可以提供出历史时期该地区水汽来源变化的信息.

致谢 本工作受国家自然科学基金(批准号: 40271025)、中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-339)、国家自然科学基金群体创新项目(批准号: 40121101)、科学技术部项目(2001CCB00300)和国家留学基金委资助.

参 考 文 献

1 Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 1996, 1133: 1702～0703

2 Dansgaard W. Stable isotope in precipitation. Tellus, 1964, 14(4): 436～468

3 Rozanski K, Araguas-Araguas L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of Oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. Science, 1992, 258: 981～985

4 Merlivat L, Jouzel J. Global climate interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. J Geophys Res, 1979, 84: 5029～5033

5 Jouzel J, Merlivat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotope effects during snow formation. J Geophy Res, 1984, 89(D7): 11749～11757

6 Jouzel J, Froehkich K, Schotterer U. Deuterium and oxygen-18 in present-day precipitation: data and modeling. Hydrological Sciences, 1997, 42(5): 747～763

7 Jouzel J, Merlivat L, Lorius C. Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relative humidity at the oceanic surface during the last glacial maximum. Nature, 1982, 299(5885): 688～691[DOI]

8 秦大河. 南极冰盖表层雪内的物理过程和现代气候及环境记录. 北京: 科学出版社, 1995. 81～82

9 Tian L, Masson-Delmotte V, Stievenard M, et al. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes. J Geophys Res, 2001, 106(D22): 28,081～28,088[DOI]

10 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中δD和δ^{18}O关系及水汽循环. 中国科学, D辑, 2001, 31(3): 214～220[摘要] [PDF]

11 Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, et al. K A Henderson and P-N Lin. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores. Science, 2000, 289: 1916～1919[DOI]

12 田立德, 姚檀栋, Numagti A, 等. 青藏高原南部季风降水中稳定同位素波动与水汽输送过程有关. 中国科学, D 辑, 2001(增刊): 31(3): 214～220

13 Araguas-Araguas, L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia. J Geophys Res, 1998, 103(D22): 28721～28742[DOI]

14 Gat J R, Carmi I. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea Area, J Geophys Res, 1970, 75(15): 3039～3048

15 Gat J R, Klein B, Kushnir Y, et al. Isotope composition of air moisture over the Mediterranean Sea: an index of the air-sea interaction pattern. Tellus, 2003, 55B: 953～965

16 皇翠兰, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 青藏高原希夏邦马冰芯中的环境变化信. 科学通报, 1998, 43(17): 1902～1903

17 康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 等. 喜马拉雅山中段达索普粒雪芯中夏季风和尘埃记录的研究. 科学通报, 1999, 44(20): 2230～2235

18 Duan Keqin, Yao Tandong, Sun Weizhen. Indian monsoon variability in Himalayas since AD 1800. Annals of Glaciology, 2002, 35: 437～442

19 姚檀栋, 段克勤, 田立德, 等. 达索普冰芯积累量记录和过去 400 a来印度夏季风降水变化. 中国科学, D辑, 2000, 30(6): 619～627[摘要] [PDF]

(2004-10-08 收稿, 2004-12-28 收修改稿)