

青藏高原各拉丹冬冰芯年积累量变化及其与大气环流的关系

张拥军 康世昌* 秦大河 GRIGHOLM Bjorn MAYEWSKI Paul A

(中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 中国科学院研究生院, 北京 100049; 中国科学院冰冻圈与环境联合重点实验室, 兰州 730000; Climate Change Institute, University of Maine, Orono, ME 04469, USA. * 联系人, E-mail: shichang.kang@itpcas.ac.cn)

摘要 根据各拉丹冬冰芯重建了该地区近 70 a 来积累量的时间序列。冰芯积累量与邻近区域气象台站的降水量存在显著的正相关性, 表明冰芯积累量可以作为该地区降水量的代用指标。1930s 中期至 1960s 初期, 各拉丹冬地区的降水量处于一个低值期, 并于 1950s 末期达到了极低值。自 1960s 开始, 降水量急剧上升, 进入 1990s 后, 降水量有下降趋势, 但仍然高于 1930s~1950s。利用 Mann-Kendall 方法检测出该地区降水量在 1967 年发生了一次突变, 即由低降水期转为高降水期。大气环流特征的分析表明, 高降水期的西南夏季风比低降水期北扩了约 2 个纬度, 且巴尔喀什湖槽在高降水期明显增强, 同时经向风和水汽输送在高降水期也显著增强。

关键词 各拉丹冬冰芯 积累量 大气环流 突变

气温和降水是气候变化研究中最主要的两个因子。对于气候变化响应比较敏感的青藏高原, 由于气象台站比较稀疏, 资料时间较短, 限制了对这一地区气候变化的深入的研究。近年来, 利用青藏高原冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录恢复过去的温度变化 [1~5] 和通过冰芯积累量恢复降水变化 [6~13] 等研究都取得了很大进展, 弥补了高原地区缺乏器测资料或器测资料较短对气候变化研究所造成的限制。已有的研究表明, 不论是高原南部的达索普冰芯 [6~9]、东绒布冰芯 [6, 10], 还是高原北部的古里雅冰芯 [5, 6, 11, 12]、敦德冰芯 [11~13], 其积累量都可以较好地反映当地的降水变化, 并且与大气环流的变化关系密切。其中, 高原南部冰芯的积累量与海陆温差的相关也较好 [7, 8]。

各拉丹冬地区作为青藏高原气候南北的分界带 [14, 15], 也是长江的发源地, 其地理位置十分特殊。因此, 深入研究该地区的气候变化不仅对当地的脆弱生态环境的未来变化, 而且对长江中、下游的经济和社会发展都有重要意义。由于高海拔恶劣的自然环境条件所限, 位于长江源头的各拉丹冬地区极度缺乏器测资料, 将冰芯中积累量序列作为研究过去降水量的替代资料, 是研究该地区气候变化的有益补充。本文根据从各拉丹冬冰芯中恢复的自 1935 年

以来的积累量, 分析了该地区近 70 a 来的降水变化趋势, 用 Mann-Kendall (M-K) 方法 [16~18] 检测了其突变点, 并讨论了其突变前后大气环流的特征。

1 各拉丹冬冰芯积累量的时间序列重建

各拉丹冬峰是唐古拉山脉的主峰, 位于青藏高原中部, 海拔 6621 m, 是长江的发源地。2005 年 10~11 月中美联合考察期间, 在各拉丹冬峰北部果曲冰川平坦的粒雪盆和垭口分别钻取 2 支深孔 (74 和 147 m) 和 1 支浅孔 (26 m) 冰芯 [3]。本研究对 74 m 冰芯 (33°34'37.8"N, 91°10'35.3"E, 5720 m a.s.l.) 进行了分析 (图 1)。冰芯的前期处理及主要阴、阳离子, β 活化度和 $\delta^{18}\text{O}$ 样品的分析见文献 [3]。根据高原中部大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和主要阴、阳离子的季节变化特征, 并参考冰芯中 β 活化度的峰值位置实施了定年, 详细的方法见康世昌等人 [3] 研究。由定年结果确定了冰芯每年的积累厚度, 并根据实测的冰芯密度, 通过冰芯上部 47 m 重建了 1935~2004 年各拉丹冬冰芯的年积累量 (水当量)。本文根据重建的近 70 a 来冰芯年积累量序列讨论了各拉丹冬地区降水的变化特征及其与大气环流的关系。

图 2 给出了重建的 1935~2004 年各拉丹冬冰芯年积累量 (水当量) 的时间变化序列。如图 2 所示, 1930s

2007-04-10 收稿, 2007-08-14 接受

国家自然科学基金项目 (批准号: 40401054, 40121101), 国家重点基础研究发展计划项目 (批准号: 2005CB422004), 中国科学院“百人计划”项目、中国科学院知识创新项目 (批准号: KZCX3-SW-339) 及院长基金资助

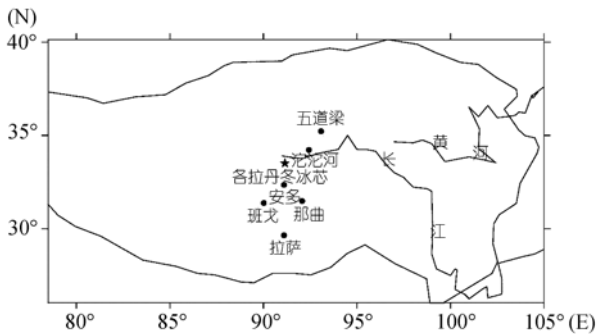


图1 各拉丹冬冰芯钻取点及邻近区域气象台站位置

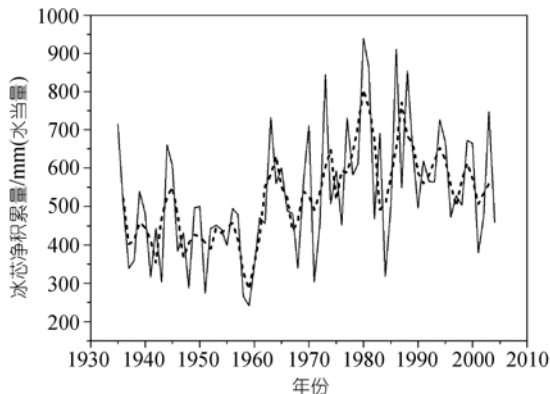


图2 1935~2004年各拉丹冬冰芯积累量(水当量)随时间的变化
图中虚线为3 a滑动平均值

中期至1960s初期,各拉丹冬的冰芯积累量处于一个低值期,并于1950s末期达到了极低值。自1960s开始,积累量急剧上升,1960s末期至1990s初期的年平均积累量比1960s以前要高1.5倍左右,但进入1990s后,积累量又开始持续下降。利用M-K趋势检验方法,对各拉丹冬冰芯积累量序列分析可知,在过去的70 a间,其增长率为29.3 mm/10 a(水当量),并且通过了95%的显著性检验,这表明1930s以来各拉丹冬冰芯积累量变化的主要趋势是增大。

将各拉丹冬冰芯积累量的时间序列与临近地区五道梁、沱沱河、安多、班戈以及那曲等5个地区气象台站观测的年降水序列逐一对比分析,发现其与班戈的降水序列相关性最好。这是由于各拉丹冬地区降水的水汽主要是由偏西南气流所带来,而班戈恰好处于各拉丹冬地区的西南部。图3给出了1957~2003年各拉丹冬冰芯积累量的变化与班戈气象站观测的年降水距平变化曲线对比。如图3所示,两者具有较为一致的变化趋势(图3中实线),相关系数为0.47 ($P < 0.001$)。考虑到冰芯在定年的过程中会产生 ± 1 a

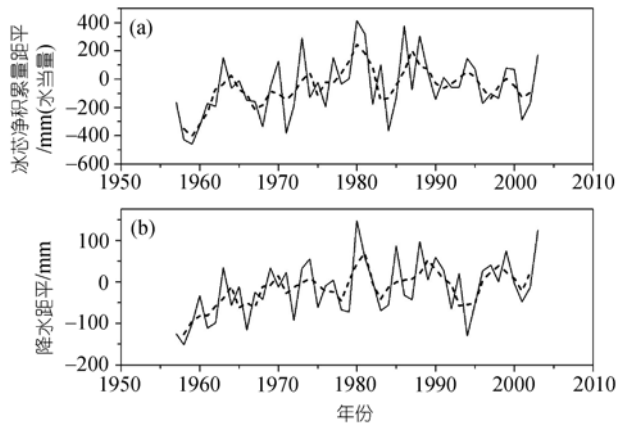


图3 1957~2003年各拉丹冬冰芯积累量与班戈气象站年降水量距平对比

的误差^[3],因此,我们对这两个序列的3 a滑动平均(图3中虚线)进行了进一步分析,发现3 a滑动平均的相关系数达到了0.66($P < 0.001$)。两个序列在1994年左右出现了一个反相位,但20世纪90年代后期至2004年二者的趋势又趋于一致。因此,总体上各拉丹冬冰芯记录重建的积累量较好地反映了本地区降水量的变化,可以作为本地区的降水量变化的指标。

已有的研究表明^[9],青藏高原南、北部其降水的控制机制有所不同。高原南部达索普冰芯的积累量变化与古里雅和敦德冰芯的积累量的变化趋势恰好相反。各拉丹冬冰芯积累量与达索普冰芯和古里雅冰芯积累量^[11]对比,发现各拉丹冬冰芯积累量的变化与这二者都不尽相同。各拉丹冬冰芯与古里雅冰芯的积累量都于1960s初期达到一个极低值,然后迅速上升;进入1990s后,各拉丹冬冰芯与达索普冰芯的积累量同时下降。从多年平均年积累量来看,古里雅冰芯的多年平均值为400 mm,各拉丹冬冰芯为600 mm,达索普冰芯为700 mm。这也是高原南、北部降水机制不尽相同的一个表现。由于各拉丹冬地区处在南亚季风影响的北缘,其降水量不但受到南亚季风强弱的影响,同时也与高原自身水汽来源的变化相关^[19]。为了认识各拉丹冬地区降水量的变化特征,我们分析了青藏高原大气环流特征的变化。

2 冰芯积累量的突变与大气环流的关系

图4给出了各拉丹冬冰芯积累量M-K统计量曲线。由UF曲线可见,自1960s以来,各拉丹冬冰芯积累量有一明显的增长趋势。1980s以后这种增长趋势超过了0.05临界线,在1980s中期以后甚至超过了

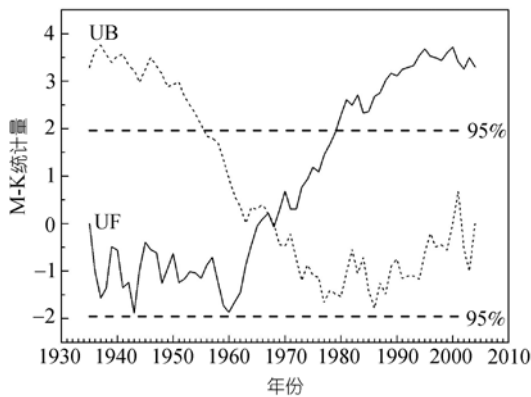


图 4 各拉丹冬冰芯积累量(水当量)M-K 统计量曲线
直线为 $\alpha = 0.05$ 显著性水平临界值

0.001 显著性水平 ($u_{0.001} = 2.56$), 表明各拉丹冬冰芯积累量的上升趋势是十分显著的。根据UF和UB曲线交点的位置, 确定各拉丹冬冰芯积累量 1960s 开始的增长是一种突变现象, 其突变从 1967 年开始。严中伟等人 [20] 根据全球的夏季月降水资料, 研究发现大致沿 $0\sim 30^{\circ}\text{N}$ 一带在 1960s 中期发生一次降水突变, 在此带状区域内一致性变干, 而在其南、北两侧呈反位相变化。各拉丹冬冰芯位于此带状区域的北部, 根据 M-K 方法检测其积累量在 1967 年发生的一次突变——湿突变, 与带状区域降水的干突变反位相。这表明各拉丹冬冰芯积累量的突变对大尺度变化也有所反映。

青藏高原的降水主要集中在每年的 6~9 月 [21,22], 为了认识各拉丹冬地区每年 6~9 月大气环流特征在

突变点 1967 年前后的差异, 根据 NCEP/ NCAR 再分析气候资料 [23], 图 5 给出了 1948~1967 年(图 5(a)) 和 1968~2004 年(图 5(b)) 500 hPa 的流场。在 1948~1967 年 6~9 月 500 hPa 平均流场图上, 各拉丹冬地区主要受西风控制(图 5(a)), 而在 1968~2004 年 6~9 月 500 hPa 平均流场图上, 各拉丹冬地区受西南风控制(图 5(b))。在高积累期的 1968~2004 年西南风要比低积累期的 1948~1967 北扩约 2 个纬度。由于青藏高原南部和中部夏季降水主要为南亚夏季风带来的水汽所致, 因此, 各拉丹冬地区 1968 年以来南亚夏季风的北扩是该阶段高降水的可能原因之一。

图 6 为 1968~2004 年与 1948~1967 年 6~9 月 500 hPa 位势高度差值分布。如图 6 所示, 全场皆为正差值, 正差值高值中心在巴尔喀什湖附近, 中心差值达 33 gPm 以上, 同时正差值中心与各拉丹冬地区的变高差接近 13 gPm。这表明, 在各拉丹冬地区高降水时期, 巴尔喀什湖上空的高空槽非常明显。时兴合等人 [24,25] 分析了夏季 5 个多雨年 500 hPa 高度场距平平均图, 结果显示极涡偏强, 主体偏向西半球, 乌拉尔山脊、巴尔喀什湖和贝加尔湖槽比较显著是青藏高原中部和北部多雨的主要环流特征, 其原因是冷空气受巴尔喀什湖槽的引导沿偏西路径进入高原, 在高原地区与南来的暖湿气流交汇, 使得高原北部和中部地区降水增多。

为了探讨经向风以及大气水汽输送对各拉丹冬地区降水在 1967 年前后突变的影响, 图 7 和 8 给出了 1968~2004 年与 1948~1967 年 6~9 月 500 hPa 经向

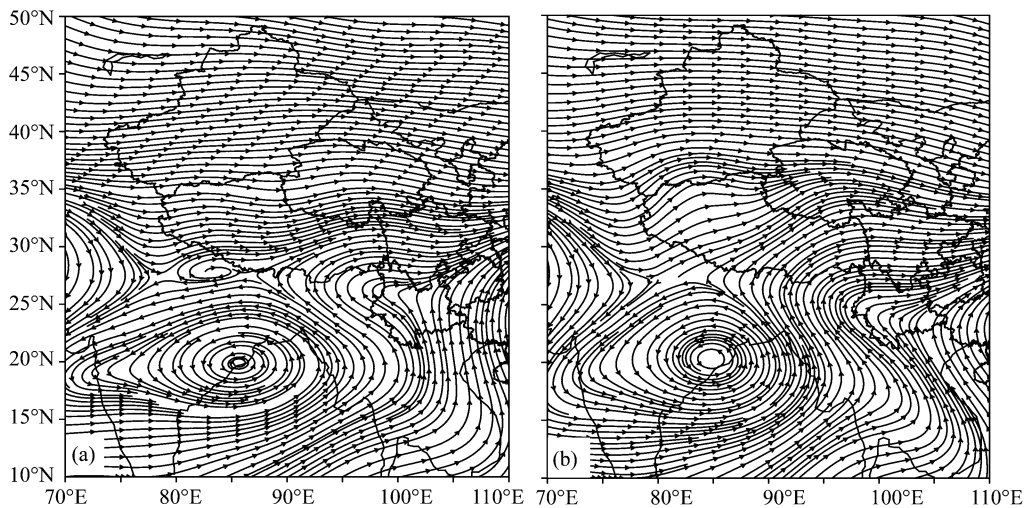


图 5 6~9 月 500 hPa 流场图
(a) 1948~1967 年; (b) 1968~2004 年

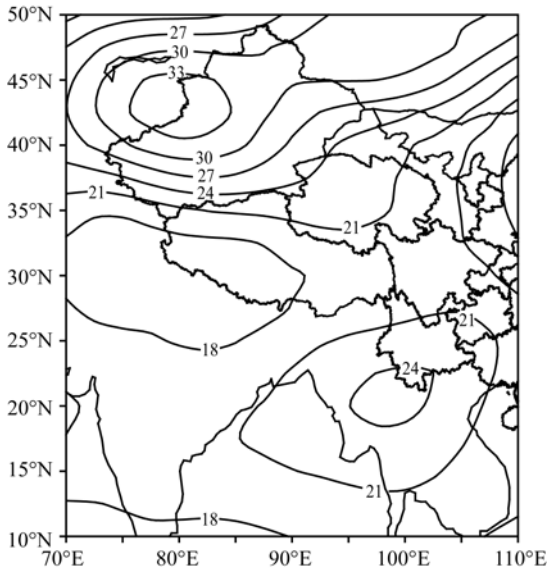


图6 1968~2004年与1948~1967年6~9月500 hPa高度差值场
单位: gPm

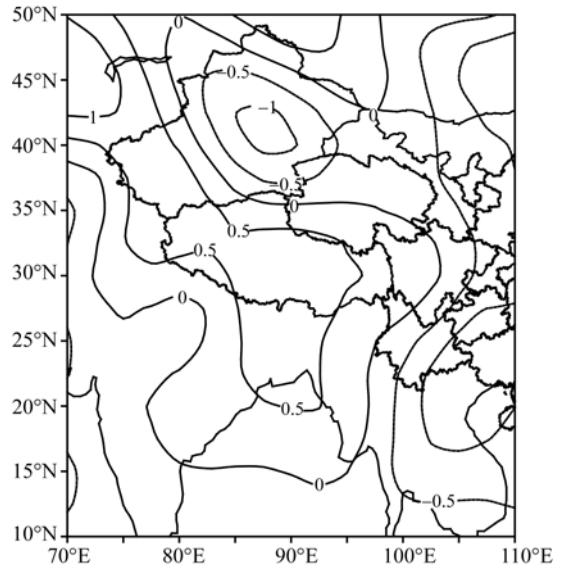


图7 1968~2004年与1948~1967年6~9月500 hPa经向风差值场
单位: m/s

风差值场和水汽输送的差值分布. 由图7可以看出, 以1967年为界前后两个时段的经向风差值为正, 其中心差值超过0.5 m/s(包括各拉丹冬地区), 这表明1968年以来经向风有增大的趋势, 使得经向的水汽输送更加强, 为各拉丹冬地区的降水增加提供了水汽输送的动力条件. 水汽输送差值场(图8)表现为全场一致为正, 且各拉丹冬地区的水汽输送差值将近 $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 这是降水显著增加的水汽条件.

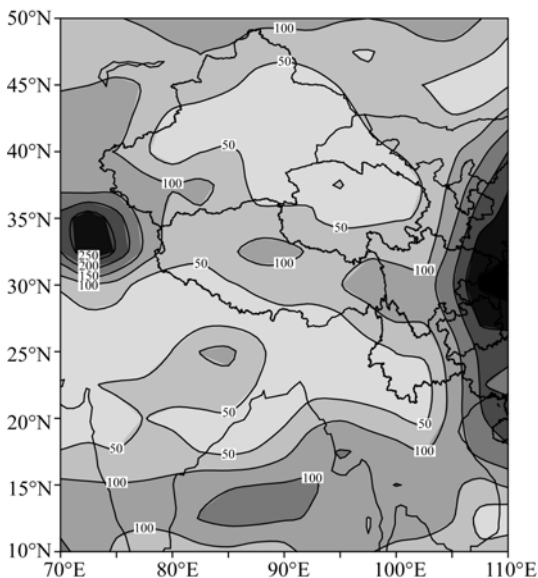


图8 1968~2004年与1948~1967年6~9月水汽输送差值场
单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

3 结论与讨论

本文利用各拉丹冬冰芯恢复的积累量时间序列, 探讨了过去近70年来各拉丹冬地区降水的变化趋势. 结果表明, 70年来各拉丹冬冰芯积累量经历了从低积累期到高积累期的转变. 具体表现为: 1930s中期至1960s初期, 各拉丹冬的冰芯积累量处于一个低值期, 并于1950s末期达到了极低值. 自1960s开始, 积累量急剧上升, 进入1990s后, 其积累量又出现下降趋势. 各拉丹冬冰芯积累量的变化与临近的班戈气象站降水量变化具有较好的一致性. 根据青藏高原已有的冰芯记录研究表明, 青藏高原南部和北部其降水的控制机制有所不同. 高原南部达索普冰芯的积累量变化与古里雅和敦德冰芯的积累量的变化趋势恰好相反. 各拉丹冬冰芯积累量与达索普冰芯和古里雅冰芯积累量^[11]对比, 发现各拉丹冬冰芯积累量的变化与这二者都不尽相同, 说明影响高原中部各拉丹冬地区降水的因素与高原南部和西北、东北部有差异.

利用M-K方法, 检测出各拉丹冬冰芯记录在1967 a发生了一次由低积累量期向高积累量期的突变. 对500 hPa流场和高度场差值图的分析表明, 在高积累期的1968~2004年西南风要比低积累期的1948~1967北扩约2个纬度, 且高积累期的巴尔喀什湖槽比低积累期要显著一些, 同时这两个时段经向

风差值和水汽输送的差值均为正值。因此, 1968 a 以来南亚季风的北扩, 巴尔喀什湖槽的增强, 经向风以及水汽输送的增强, 是导致该阶段降水量增大的直接原因。

Ye 等人^[26]的研究结果表明, 1969~2002 年间各拉丹冬地区的冰川处于退缩状态, 而 1990 a 以来冰川退缩有加速趋势。康世昌等人^[3]认为冰川的加速退缩与该地区气温的急剧上升有很好的对应关系。从本文的分析来看, 冰川的退缩不仅与气温的升高有关, 该地区自 1990 年代以来的降水减少也加剧了冰川的退缩。但气温的升高与降水的减少对冰川面积的减少各有多大的影响, 以及哪个因素是主要的影响因素, 都需要做进一步的研究。

致谢 感谢 2005 年中美各拉丹冬联合考察的所有队员, 特别感谢张强弓, 丛志远, 陈锋, 叶庆华, Susan Kaspari, Sharon Sneed, 曲冬梅等人在冰芯钻取和实验室分析中的帮助。

参 考 文 献

- 1 姚檀栋, 郭学军, Thompson L G, 等. 青藏高原冰芯过去 100 年 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与温度变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(1): 1—8
- 2 Yao T D, Li Z X, Thompson L G, et al. $\delta^{18}\text{O}$ records from Tibetan ice cores reveal differences in climatic change. Ann Glaciol, 2006, 43: 1—7
- 3 康世昌, 张拥军, 秦大河, 等. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰芯证据. 科学通报, 2007, 52(4): 457—462
- 4 王宁练, 姚檀栋, 蒲建辰, 等. 青藏高原马兰冰芯记录的近百年来气温变化. 科学通报, 2003, 48(11): 1219—1223
- 5 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2 ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(4): 348—353
- 6 任贾文, 秦大河, 康世昌, 等. 喜马拉雅山中段冰川变化及气候暖干化特征. 科学通报, 2003, 48(23): 2478—2482
- 7 段克勤, 王宁练, 蒲建辰. 达索普冰芯记录的印度季风突变. 科学通报, 2001, 46(24): 2069—2073
- 8 Duan K Q, Yao T D, Sun W Z, et al. India monsoon variability in the Himalaya since AD 1800. Ann Glaciol, 2002, 35: 437—442

- 9 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: 地球科学, 2000, 30(6): 619—627
- 10 Qin D H, Hou S G, Zhang D Q, et al. Preliminary results from the chemical records of an 80 m ice core recovered from the East Rongbuk Glacier, Mt. Qomolangm (Everest). Ann Glaciol, 2002, 35: 278—284
- 11 侯书贵, 秦大河, 姚檀栋, 等. 青藏高原冰芯积累量的近期变化. 科学通报, 2002, 47(20): 1588—1591
- 12 侯书贵, 秦大河, Wake C P, 等. 珠穆朗玛峰地区冰川净积累量变化的冰芯记录及其气候意义. 科学通报, 1999, 44(21): 2336—2341
- 13 Yao T D, Thompson L G. Trends and features of climatic changes in the past 5000 years by the Dunde ice core. Ann Glaciol, 1992, 25: 16—21
- 14 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(3): 215—220
- 15 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. 大气科学, 2003, 27(2): 157—170
- 16 Kendall M G, Gibbons J D. Rank Correlation Methods. 5th ed. London, UK: Edward Arnold, 1981
- 17 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16(4): 482—493
- 18 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 69—72
- 19 姚檀栋, 蒲建臣, 刘景寿. 唐古拉冰芯气候学研究. 见: 青藏高原冰川气候与环境. 北京: 科学出版社, 1993. 16—20
- 20 严中伟, 季劲钧, 叶笃正. 60 年代北半球夏季气候跃变: 降水和温度变化. 中国科学 B 辑, 1990, (1): 97—103
- 21 戴加洗. 青藏高原气候. 北京: 气象出版社, 1990. 171—197
- 22 王可丽, 程国栋, 丁永建, 等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征. 冰川冻土, 2006, 28(1): 8—14
- 23 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40 years reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77: 437—471
- 24 时兴和, 秦宁生, 马元仓, 等. 1999 年夏季青海省多雨形势分析. 高原气象, 2002, 21(2): 222—224
- 25 王江山. 青海天气气候. 北京: 气象出版社, 2004. 137—342
- 26 Ye Q H, Kang S C, Chen F, et al. Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies. J Glaciol, 2006, 52(179): 537—545