

西风急流的季节转换特征: 希夏邦马峰达索普冰川 6900 m 处实地观测

李生海^{①③}, 姚檀栋^{①②*}, 田立德^①, 王朋岭^④

① 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100085;

② 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

④ 中国气象局, 国家气候中心, 北京 100081

* 联系人, E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

2011-02-24 收稿, 2011-04-06 接受

国家自然科学基金重点项目(40830638)、国家自然科学基金重大国际合作项目(40810019001)、第三极环境计划(GJHZ0906)和中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划资助

摘要 为了解极高海拔地区的气候特征和气候变化, 2005年8月4日, 在喜马拉雅山中段希夏邦马峰达索普冰川(28°23.04'N, 85°43.72'E, 海拔 6900 m)架设了一台自动气象站(AWS), 对极高海拔地区的气候进行了连续自动观测. 探讨了此 AWS 记录的一整年的观测结果, 分析了风向、风速、气温、气压和湿度等指标. 分析结果发现: 该区自 2005年10月10日至2006年4月21日期间受到西风急流的强烈影响, 而5~9月受到印度季风的影响. 西风急流的季节转换以各气象要素发生突变为特征. 受西风急流的影响, 研究区冬季风速极高, 风速波动剧烈, 多大风日. 气温和气压波动剧烈, 气温的日较差减小而气压的日较差增大. 相对湿度和比湿剧减, 空气干燥. 夏季受印度季风的影响, 相对湿度和比湿处于高值状态. 此外, 还分析了 AWS 所在位置的再分析资料, 结果证实 AWS 所在位置在 2005年10月10日至2006年4月21日期间受到西风急流的强烈影响, 西风急流的季节转换是以各气象要素发生突变为特征的观测事实.

关键词

希夏邦马峰
达索普冰川
气象观测
西风急流
ERA-Interim

横亘于青藏高原南缘的喜马拉雅山, 其独特的地理位置和地形地貌, 为研究西风急流、季风环流、山地气候及其变化提供了理想的试验场. 喜马拉雅山中段的气候, 冬季受西风急流的控制, 而夏季受印度季风的影响. 在这两种不同性质的大气环流影响下, 喜马拉雅山地区气候有何特征, 尤其在极高海拔地区, 一直备受关注.

对于印度季风, 喜马拉雅山南坡已有的观测研究发现: 金字塔实验室/观测站(海拔 5079 m)印度季风降水爆发和结束日期分别为6月12日和10月5日, 且季风期的降水具有周期性, 周期为5或8~10 d^[1]. 尼

泊尔的降水主要来源于季风期, 且其降水量的变化与南方涛动指数紧密相关^[2]. 最近的研究表明季风的爆发与孟加拉湾北部低压的形成和发展有关^[3], 季风的爆发以喜马拉雅山南坡不同海拔同时出现夜雨为特征, 且季风爆发前2周左右, 山地气候有突变现象^[4]. 而对于西风急流, Yeh^[5]最早发现冬季高原的阻挡使得北半球中高纬的西风急流产生分叉, 在高原的南北两侧各形成一支急流, 并指出东亚地区大气环流的季节转换具有突发性特点. 近期的研究发现东亚高空西风急流向北的跃迁发生在5月初, 早于南亚季风的爆发时间^[6,7]. 春、秋季西风急流在青藏高原

英文版见: Li S H, Yao T D, Tian L D, et al. Seasonal transition characteristics of the westerly jet: Study based on field observations at an altitude of 6900 m on the Mt. Xixiabangma Dasuopu glacier. Chinese Sci Bull, 2011, 56: 1912–1920, doi: 10.1007/s11434-011-4508-x

跃迁的中值日期分别为4月28日和10月12日^[8]。然而,由于地形崎岖、难以接近和恶劣的天气条件等,在喜马拉雅山极高海拔地区(>6000 m)开展山地气候研究仍然是一项非常艰辛的工作。因此,极高海拔地区的气候观测研究极其稀缺。尽管已有的气象研究增进了我们对高海拔地区气候特征的了解,但大部分观测仅仅开展了几天、几星期、数月或仅在冰川的消融期,而不是完整的一年^[9-15]。因此,印度季风和西风急流在极高海拔地区有何表现?极高海拔地区气候特征究竟如何仍然不是很清楚。

本文利用喜马拉雅山中段希夏邦马峰达索普冰川自动气象站(AWS),2005年8月5日至2006年8月19日一整年的实测资料,分析了西风急流在喜马拉雅山中段极高海拔区的季节转换特征。

1 观测位置

希夏邦马峰达索普冰川位于喜马拉雅山中段北坡,是一条ENE(垭口)-NE(山谷)向的山谷型冰川,面积21.67 km²,冰川长10.50 km。冰川从海拔7200 m延伸至5600 m,雪线超过6000 m。积累区最高一级大冰雪平台位于海拔6900 m以上,长约3 km,宽约1.5 km,地形较为平缓^[16,17]。自动气象站被架设在该冰雪平台上(图1)。

2 数据

2005年8月,中国科学院青藏高原研究所希夏邦马峰地区综合考察队在达索普冰川垭口安装了一台自动气象站,是目前世界上海拔最高的自动气象站之一。自动气象站系Campbell公司生产(自动气象站各传感器的规格见表1),具有CR10X数据采集系统。气象站运行时间为北京时间。仪器的记录方式为每隔30 min记录各气象要素的平均值,每24 h记录各气象要素的极值。2005年8月4日建立自动气象站时,辐射计和风向风速仪、温湿度计、气压计的距地高度分别为3.20,3.15和2.30 m。由于受冰雪下垫面影响,各传感器的探头距地高度随着冰雪的积累和消融而变化。2006年8月20日,收集数据时所有探头的距地高度均减少了1.05 m。因此,本文采用2005年8月5日至2006年8月19日期间记录的风向、风

表1 自动气象站各传感器探头的规格

型号	参数	精确度	测量范围
PTB210	气压	±0.5 hPa	50~1300 hPa
LI200X	辐射	±3%	400~1100 nm
HMP45C	气温	<0.5℃	-40~60℃
	相对湿度	±2%	0~100%
15103	风向	±3°	0~355°(5°开口)
	风速	±0.3 m/s	0~60 m/s(最大值为60 m/s)

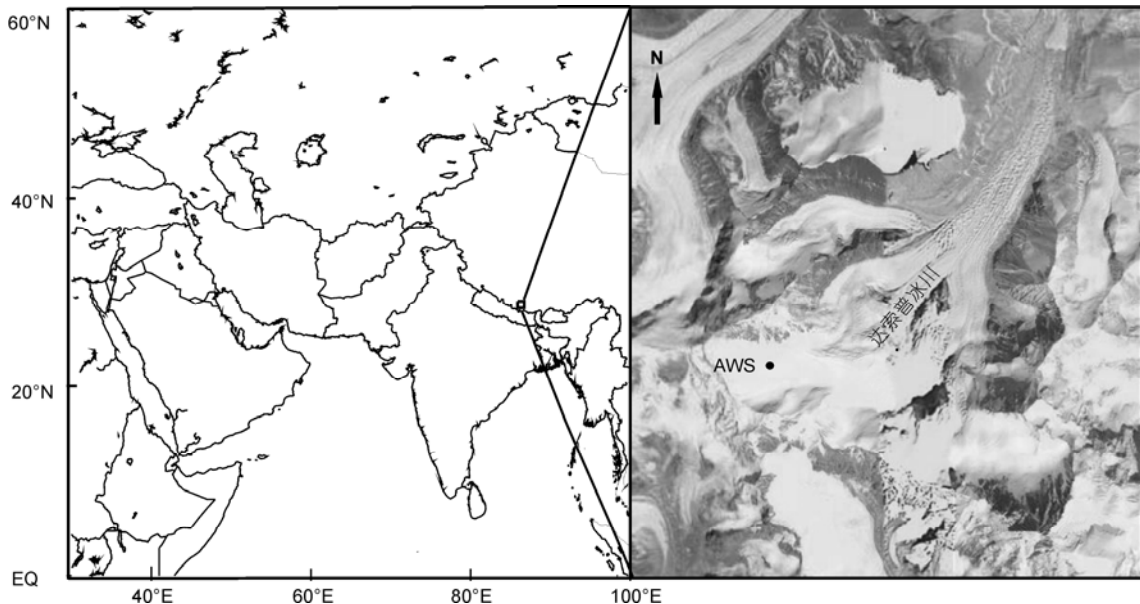


图1 达索普冰川垭口自动气象站的地理位置示意图
黑色圆点代表气象站

速、气温、气压和湿度等指标,初步探讨了西风急流在达索普冰川所在区域的季节转换特征。

3 结果与讨论

3.1 达索普高海拔自动气象站记录的西风急流的季节转换特征

(i) 风向与风速特征. 由于受到垭口和山谷两侧不开阔山体的挟持影响,冬、夏季主盛行风向偏差不大(图 2(a)). 夏季和冬季主盛行风向分别为 WSW 和 SW, 即平行于垭口方向和山谷谷向. 虽然主盛行风向偏差,但观测期内风向存在 2 次明显的突变. 第一次发生于 2005 年 10 月 10 日左右. 那天以后,主盛行风向由 WSW 变为 SW. 第二次突变发生于 2006 年 4 月 21 日,自那日起 WSW 又成为了主盛行风向. 2005 年 10 月 10 日至 2006 年 4 月 21 日期间,主盛行风向为 SW,其余时间盛行 WSW.

月平均风速夏季低冬季高. 年平均风速为 7.63 m/s,月平均风速的最小值为 3.83 m/s,出现于 7 月,月平均风速的最大值为 12.18 m/s,出现于 12 月,风速年变幅达 8.35 m/s. 观测期内,最大瞬时风速高达 37.85 m/s,出现于 2006 年 1 月 12 日. 月平均日最大风速的最大值同样出现于 1 月,风速高达 24.55 m/s. 大风日(瞬时风速大于等于 17.2 m/s(8 级)为大风,出现一次记为一个大风日)主要集中在秋、冬、春 3 季,全年大风日数共计 149 d. 12 月出现大风日最多,大风日数高达 28 d. 值得注意的是,观测期内风速具有与风向一致的突变(图 2(b)). 例如,以 2005 年 10 月 10 日为界,10 天的日平均风速从 5.01 m/s 增加到了 10.59 m/s,日最大风速的平均值从 10.62 m/s 增加到了 16.63 m/s,大风日数由每 10 天 0 d 增加到了每 10 天 3 d. 再以 2006 年 4 月 21 日为界限,10 天的日平均风速从 10.61 m/s 突然减小到 4.52 m/s,日最大风速的平均值从 20.04 m/s 减小到了 11.51 m/s,大风日数由每 10 天 10 d 剧减到每 10 天 0 d.

冬季和夏季,西风急流分别位于青藏高原的南部和北部. 春季,西风急流由南向北跃迁. 秋季,与之相反. 已有的研究表明东亚高空西风急流向北的跃迁发生在 5 月初,提前于南亚季风的爆发时间^[6,7]. 最近的研究表明:春、秋季西风急流跃迁的中值日期分别为 4 月 28 日和 10 月 12 日^[8]. 因此,推断观测期内风向风速的突变反映了西风急流的跃迁. 即观测

期内,2005 年 10 月 10 日至 2006 年 4 月 21 日期间,AWS 所在的纬度和高度受到了西风急流的强烈影响. 在此期间,风速高、风速波动剧烈、多大风日. 平均风速和日最大风速的平均值分别为 10.12 和 20.74 m/s,大风日数达 146 d,大风日的概率高达 75%.

从气象站记录的冬季和夏季风向的频率图 3(a)和(b),可以看出冬季和夏季风向不存在明显的日变化过程. 受下传西风急流的影响,冬季为平行于山谷谷向的 SW 风,而夏季则为平行于垭口的 WSW 风. 从气象站记录的风速日变化图 3(c)可以看出,冬季风速较高,日变化过程不明显,夏季风速较低,存在明显的日变化过程. 冬季和夏季的平均风速分别为 10.65 和 4.78 m/s,冬季平均风速是夏季的 2.23 倍. 夏季风速的日变化呈不对称的单峰型:午后(13:00)风速急剧增加,下午 18:00 左右风速达到日最高值,之后风速逐渐减弱,进入夜间后风速变化平缓,一直持续至第 2 天 13:00 左右.

(ii) 气温特征. 由于达索普冰川所处的纬度低而海拔极高,年内气温变化剧烈(图 2(c)). 最高月平均气温为 -3.88°C ,出现于 7 月,最低月平均气温为 -22.01°C ,出现在 12 月,气温的年较差达 18.13°C . 月平均最高、最低气温与月平均气温的变化一致,气温季节变化中升温幅度最大发生在 4~5 月,降温过程最大波动出现于 9~10 月,降温率略大于升温率. 年平均日最低气温为 -17.03°C ,年平均日最高气温为 -10.86°C ,年平均气温为 -14.19°C . 5~9 月,月平均气温高于年平均气温,10 月的平均气温最接近年平均气温. 月平均日最低气温的最大值和最小值分别为 -6.76°C 和 -24.02°C ,而对于月平均日最高气温,值分别为 1.22°C 和 -20.06°C . 月平均日最低气温和月平均日最高气温的年变幅分别为 17.26°C 和 21.29°C ,说明最高气温具有较大的年变幅. 气温的日较差具有明显的季节变化,冬季小而夏季大,日较差的年均值为 8.08°C (图 4(a)). 5~9 月气温的日较差大于其年均值,而 10~次年 4 月小于年均值. 气温的日较差与年较差的比值为 0.45,这表明该区气候具有日较差小而年较差大的气候特点. 尽管观测期内有 45 d 日最高气温(30 min 的平均值)高于 0°C ,然而日平均气温均在 0°C 以下. 最高气温出现于 2006 年 7 月 15 日,为 5.80°C . 最低温度出现于 2005 年 12 月 25 日,达 -32.18°C .

与风向风速的突变相一致,观测期内气温也有突变(图 2(c)和 4(a)). 以 2005 年 10 月 10 日为界,10

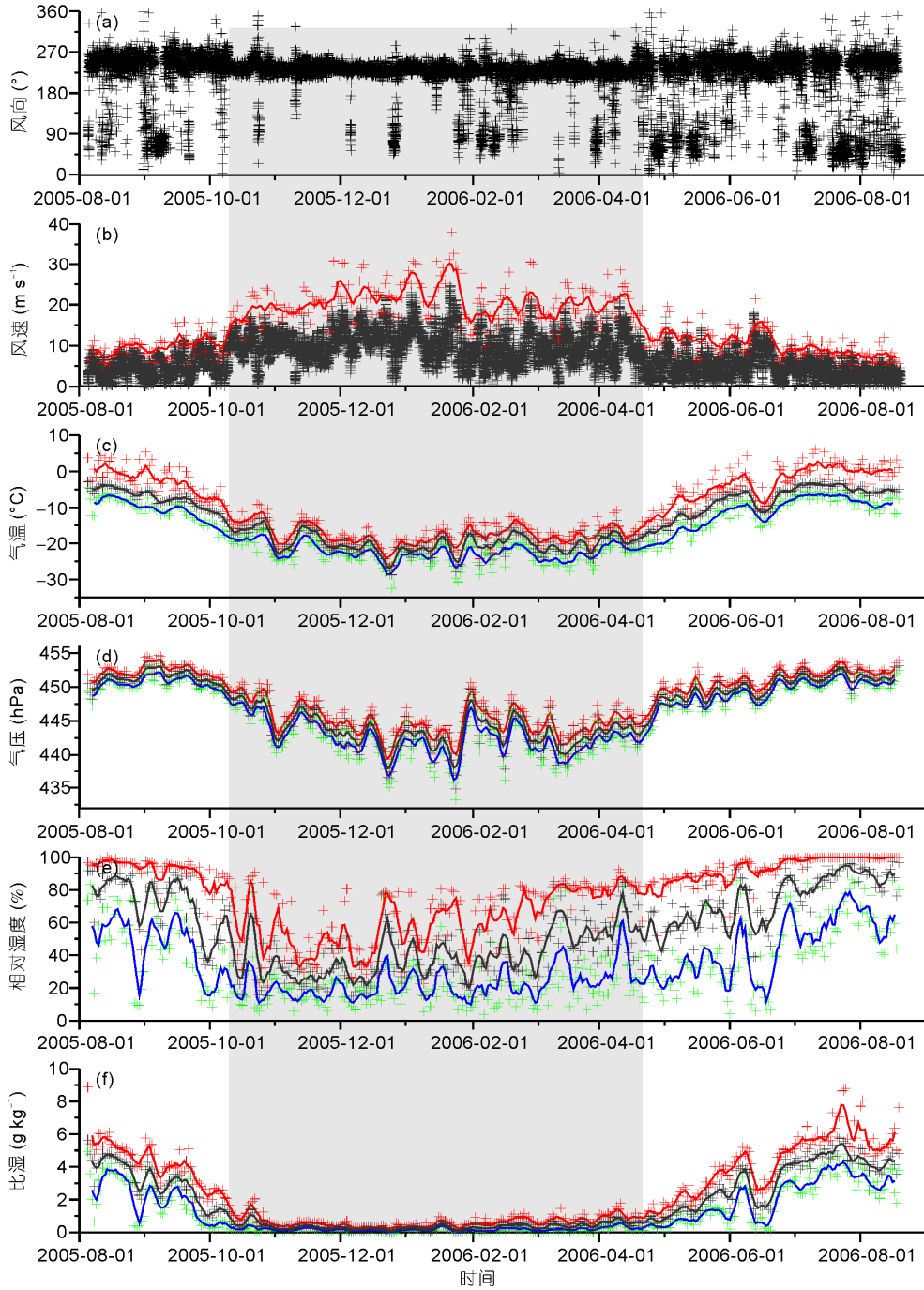


图 2 气象要素的季节变化

(a) 风向; (b) 风速, 其中红色“+”为日最大值, 黑色“+”为 30 min 平均值; (c) 气温; (d) 气压; (e) 相对湿度; (f) 比湿; (c)~(f)中, 红色“+”为日最大值, 黑色“+”为日均值, 绿色“+”为日最小值, 红色、蓝色和黑色实线分别为日最大值、最小值和平均值 7 d 的滑动平均

天的日最高气温的平均值减小了 5.97℃, 日最低气温减小了 3.53℃, 日较差减小了 2.44℃. 再以 2006 年 4 月 21 日为界限, 10 天的日最高气温、最低气温和日较差的平均值分别增加了 4.45, 1.08 和 3.57℃.

10 月 10 日和 4 月 21 日前后, 日最高气温的降温幅度和升温幅度均大于日最低气温的波动值, 这反映了高风速的西风对日最高气温的抑制作用. 这也是达索普冰川气温的日较差冬季小夏季大, 区别于喜马

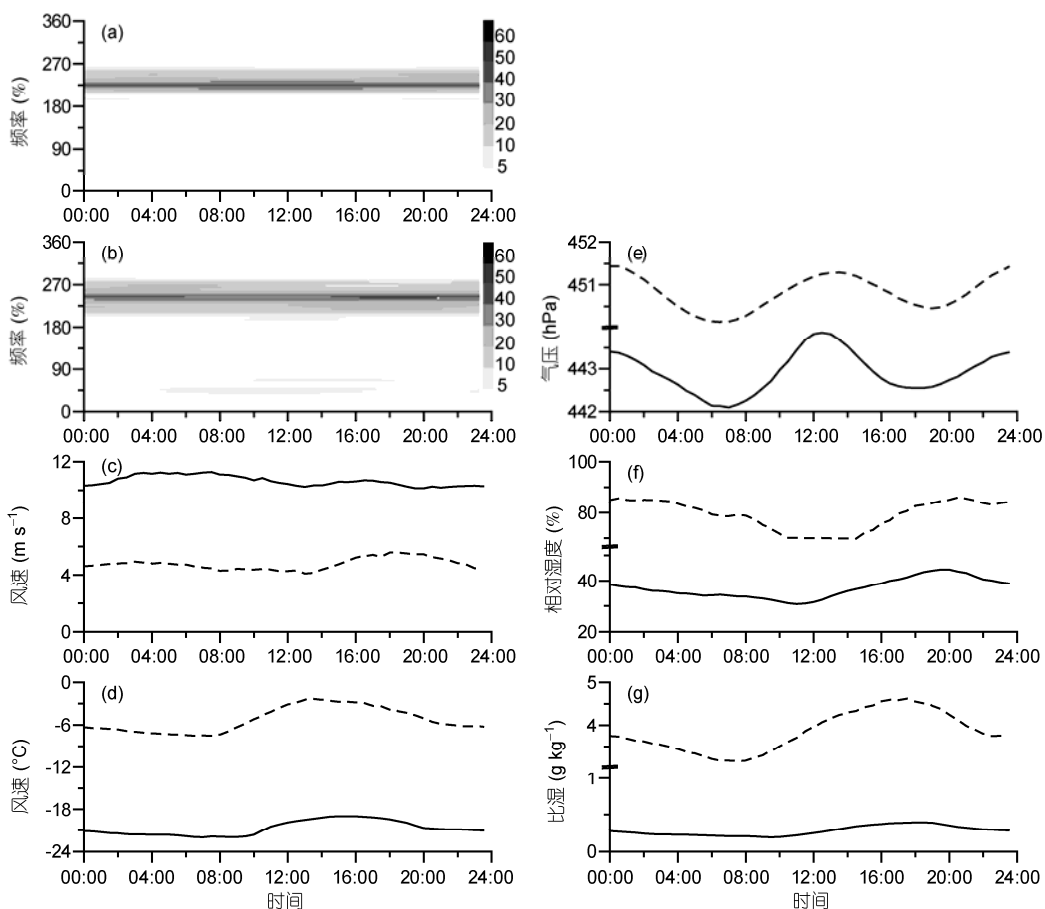


图3 各气象要素的夏季(6~8月)和冬季(12~次年2月)的平均日变化过程

(a) 冬季的风向频率; (b) 夏季的风向频率; (c) 风速; (d) 气温; (e) 气压; (f) 相对湿度; (g) 比湿. 黑色虚线和实线分别代表气象要素夏季和冬季的平均值

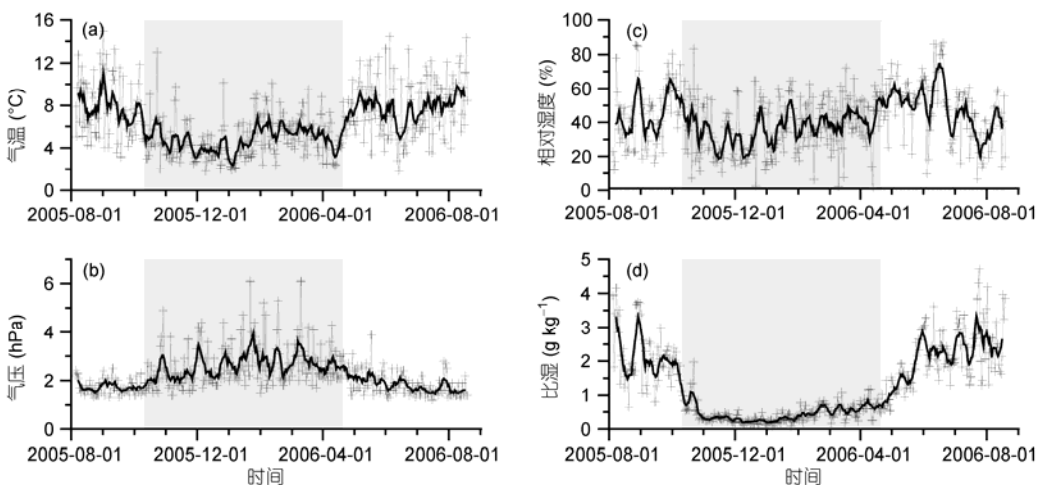


图4 各气象要素日较差的季节变化

(a) 气温; (b) 气压; (c) 相对湿度; (d) 比湿. 黑色实线为各气象要素日较差7d的滑动平均

拉雅山南坡低海拔冰川区气温观测结果的原因^[12]. 2005年10月10日至2006年4月21日期间,受西风强烈影响,气温波动剧烈,气温的日较差减小.

从气象站记录的冬季和夏季温度日变化图 3(d),可以看出冬季和夏季气温的日变化呈单峰单谷型,日变化过程趋势基本一致但不同步,升温率大于降温率.夏季气温的最低值和最高值分别出现于 8:00 和 13:00 左右,比冬季早 2 h.气温日较差夏季大而冬季小,夏季和冬季气温日较差的平均值分别为 7.68 和 4.68℃,夏季气温日较差是冬季的 1.64 倍.

(iii) 气压特征. 达索普冰川近地表气压冬季低夏季高(图 2(d)).年平均气压值为 446.78 hPa,月平均最低值为 442.00 hPa,出现于 12 月,最高值为 452.03 hPa,出现于 9 月,气压的年变幅达 10.03 hPa.如图 4(b)所示,气压的日较差具有明显的季节变化,夏季小而冬季大.气压的日较差同样在 10 月 10 日和 4 月 21 日存在突变(图 4(b)).在 2005 年 10 月 10 日前后,气压日较差 10 天的平均值增加了 0.30 hPa,而在 2006 年 4 月 21 日前后,气压日较差 10 天的平均值减小了 0.46 hPa.2005 年 10 月 10 日至 2006 年 4 月 21 日期间,受西风强烈影响,气压波动剧烈,气压的日较差增大.

从气压的平均日变化图 3(e),可以看出冬季和夏季气压日变化具有明显的双峰双谷型特征.中午(12:30~13:30)和凌晨(0:00)左右是气压的 2 个高峰值区,日出前(6:00~7:00)气压最低,日落前后(18:00~19:00)形成另一个低谷.夏季和冬季相比,2 个谷值的次序不存在变化,而 2 个峰值的次序略有变化.夏季最高峰值出现于午夜,而冬季最大峰值出现于中午.气压的日较差冬季大而夏季小,冬季和夏季气压日较差的平均值分别为 2.77 和 1.73 hPa,冬季气压的日较差是夏季的 1.60 倍.

(iv) 湿度特征.年平均日最小相对湿度为 28.65%,年平均日最大相对湿度为 86.44%,年平均相对湿度为 55.11%.4~9 月,月平均相对湿度高于年均值,4 月的相对湿度与年均值最为接近(图 2(e)).与风向风速的突变相一致,相对湿度也有突变(图 4(c)).以 2005 年 10 月 10 日为界,10 天的日平均相对湿度的平均值减小了 11.63%,日最大、最小相对湿度和相对湿度的日较差分别减小了 15.06%,1.48%和 16.54%.2006 年 4 月 21 日前后,由于受 4 月 21 日前连续降水天气的影响(参考了聂拉木降水资料),相对湿度的突

变略异常.10 天的日平均相对湿度的平均值不但没有增加,反而减小了 11.60%,日最大、最小相对湿度也分别减小了 4.63%和 14.14%,而 10 天的相对湿度日较差的平均值增加了 9.44%.对于比湿而言,年平均比湿为 1.58 g/kg.比湿的最大值出现于 7 月(4.68 g/kg),而 12 月(0.19 g/kg)最小(图 2(f)).5~9 月,月平均比湿高于年均值,5 月的比湿最接近于年均值.同样,观测期内比湿也存在突变(图 4(d)).以 2005 年 10 月 10 日为界,10 天的日平均比湿、日最大、最小和比湿的日较差分别减小了 0.70,1.16,0.17 和 0.99 g/kg.再以 2006 年 4 月 21 日为界限,10 天的日平均比湿、日最大、最小比湿和比湿的日较差的平均值分别增加了 0.12,0.24,0.05 和 0.20 g/kg.2005 年 10 月 10 日至 2006 年 4 月 21 日,受西风急流的强烈影响期间,相对湿度和比湿处于低值状态,平均值分别为 40.37%和 0.36 g/kg,空气相对干燥.

湿度较高的天气总是与高温和降水天气相连.5 月之后,随着印度季风的到来,相对湿度和比湿都突然增加并保持高值状态^[13].随后,由于季风带来的水汽和降水,最大相对湿度达到最大,接近于饱和状态,日平均相对湿度很少低于 70%(图 2(e)).对于比湿而言,同样很少低于年平均值,直至 10 月初(图 2(f)).之后,该区受来自干旱半干旱地区高空西风急流的控制,湿度和比湿急剧下降并保持底值.3 月以后,受季风前期降水的影响(参考了聂拉木降水资料),相对湿度在波动中缓慢增加.

从图 3(f)可以看出,相对湿度的日变化呈单峰单谷型,冬季和夏季变化趋势基本一致但不同步.午后(夏季 13:00,冬季 11:00),相对湿度逐渐增加,20:00 左右相对湿度达到最大值,之后相对湿度逐渐减小.第二天中午前后达到最低值.相对湿度夏季高而冬季低,夏季和冬季相对湿度的平均值分别为 78.58%和 36.99%,夏季相对湿度是冬季的 2.12 倍.冬季和夏季相对湿度的日较差的平均值分别为 36.45%和 45.32%,冬季和夏季相对湿度的日较差相差不大.对于比湿,从图 3(g)可以看出其日变化也呈单峰单谷型,冬季和夏季变化趋势基本一致但不同步.日出后(夏季 8:00,冬季 10:00),比湿逐渐增加,18:00 左右达到最大值,之后比湿逐渐减小.第二天日出后达到最低值.夏季和冬季比湿的平均值分别为 3.85 和 0.28 g/kg,夏季是冬季的 13.85 倍.比湿和比湿的日较差都是夏季高而冬季低.夏季和冬季比湿日较差

的平均值分别为 2.43 和 0.34 g/kg, 夏季比湿的日较差是冬季的 7.25 倍.

(v) 季节转换特征的数学检验. 通过以上分析, 发现研究区各气象要素在春、秋季节转换期间都发生突变. 那么这种突变是否真实存在呢? 为此, 这里应用 Mann-Kendall 法、滑动 t 检验和 Yamamoto 3 种方法对 2005 年 8 月至 2006 年 8 月期间, 对最能体现季节转换的风速变化进行了突变的数学检验^[18]. 发现上述 3 种方法对平均风速突变点的检验结果与观测事实基本一致, 说明季节转换期间各气象要素的变化确实存在突变特征. 图 5 给出了对平均风速的 Mann-Kendall 检验结果.

3.2 再分析资料记录的西风急流的季节变化特征

再分析资料已被普遍的用于分析天气/气候事件, 气候变化等研究中, 其中尤以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析资料使用最为广泛. 已有的和现开展的研究表明 ECMWF 的再分析资料在青藏高原高海拔地区的实用性更好^[19]. 那么, 观测期内再分析资料在 AWS 所在的位置上是否也有如实地观测记录的西风急流的季节转换特征呢? 为此, 在此应用 ECMWF 的 ERA-Interim 再分析资料对 AWS 所在的位置上风向风速突变进行了检验^[20].

从实测资料来看, 未受西风强烈影响时, 风速很少大于 10 m/s, 平均风速仅 4.40 m/s, 而受西风急流影响时, 平均风速高达 10.12 m/s, 因此本文引入下面公式(1)来判断研究区 AWS 所在的纬度和高度是否受到了西风急流的影响.

$$|V| \geq 10 \text{ m s}^{-1}, u \geq 0 \text{ m s}^{-1}. \quad (1)$$

从 450 hPa(接近于 AWS 实测气压年均值 446.78 hPa 的高度)的风场图 6(a)可以看出, 2005 年 10 月 10

日, 西风急流南跃至 AWS 所在纬度, 4 月 21 日之后, 西风急流较 AWS 所在纬度北移, 风速减弱, 西风急流对 AWS 影响减弱消失. 再从邻近 AWS 的 ERA-Interim 格点(28.5°N, 85.5°E)的风场图 6(b)可以清楚的看出, 在 2005 年 10 月 10 日至 2006 年 4 月 21 日期间, 450 hPa 受到了西风急流的强烈影响, 风向和风速均在 2005 年 10 月 10 日和 2006 年 4 月 21 日存在突变, 尤以风速的突变最为明显. 例如, 以 2005 年 10 月 10 日为界限, ERA-Interim 再分析资料 450 hPa 日平均风速 10 天的平均值从 5.15 m/s 增加到了 12.43 m/s, 日最大风速从 6.73 m/s 增加到了 13.39 m/s. 再以 2006 年 4 月 21 日为界限, 日平均风速 10 天的平均值从 14.34 m/s 突然减小到了 5.95 m/s, 日最大风速 10 天的平均值从 16.51 m/s 减小到了 8.25 m/s. 4 月 21 日后, 由于西风急流轴的北移和风速的减弱(图 6(a)), 西风急流的影响高度上升(图 6(b)), 西风急流对 AWS 的影响减弱消失. 再分析资料证实了我们的推断, 即观测期内, 2005 年 10 月 10 日至 2006 年 4 月 21 日期间, AWS 所在的纬度和高度确实受到了西风急流的强烈影响, 西风急流的季节转换以各气象要素发生突变为特征的观测事实.

4 结论

本文通过分析喜马拉雅山中段希夏邦马峰达索普冰川海拔近 7000 m 处取得的完整一年的实地观测资料, 初步揭示了极高海拔地区西风急流的季节转换特征.

观测期内, 2005 年 10 月 10 日至 2006 年 4 月 21 日期间, 研究区受到西风急流的强烈影响, 而 2006 年 5 月之后该区逐渐由印度季风控制. 印度季风变为西风急流控制的季节转换以各气象要素发生突变为特征. 对最能体现季节转换的风速变化进行了突变

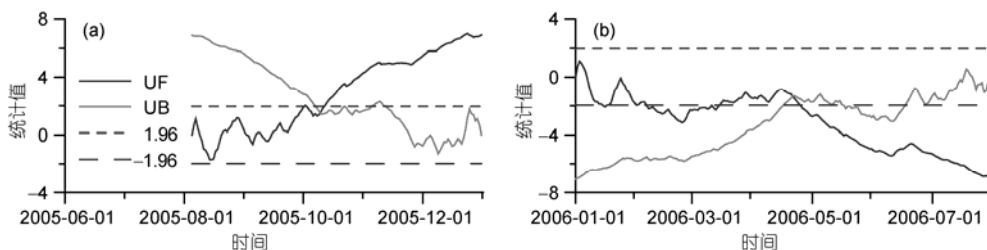


图 5 平均风速的 Mann-Kendall 检验结果

(a) 2005 年 8 月 5 日~12 月 31 日; (b) 2006 年 1 月 1 日~8 月 19 日

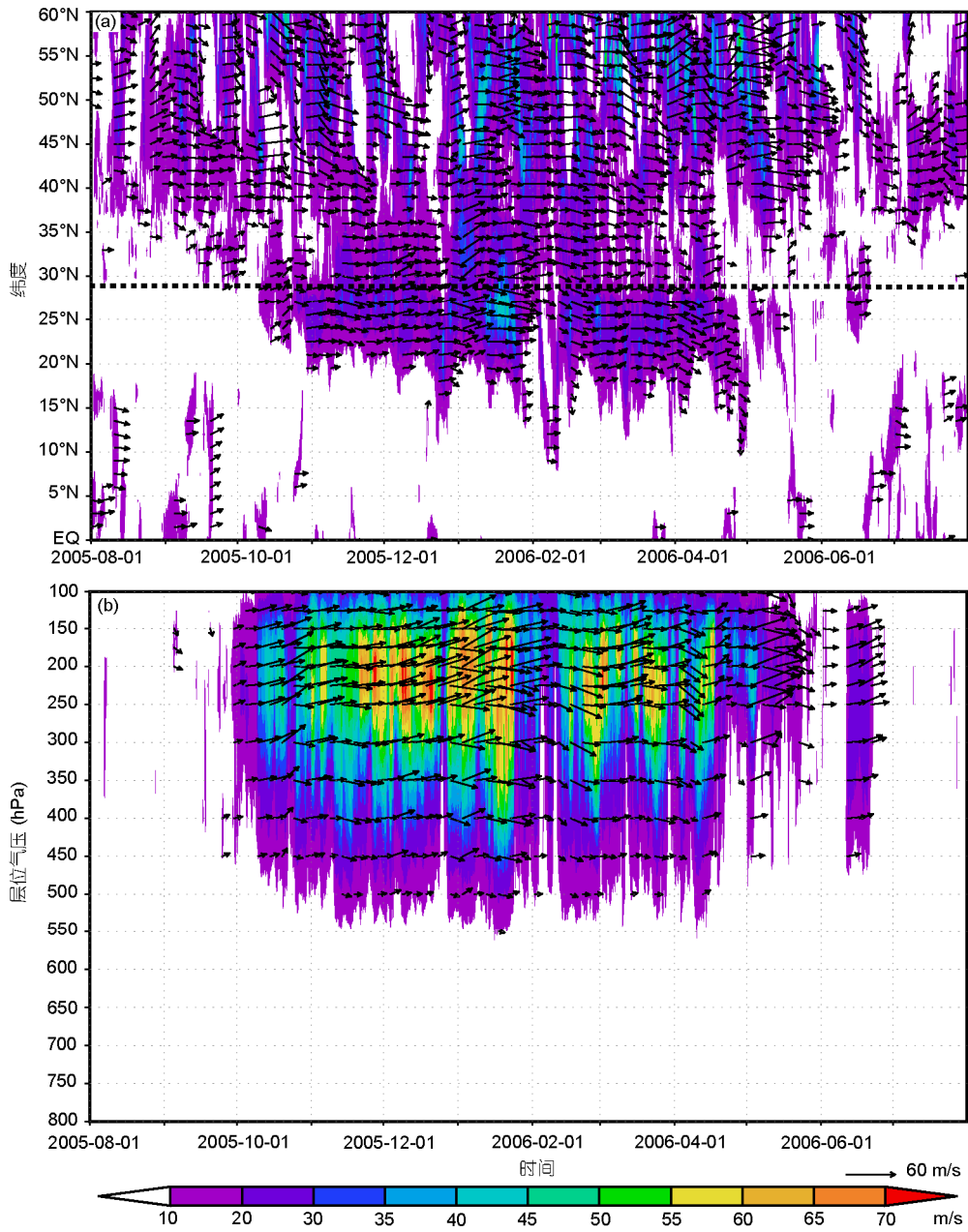


图 6 再分析资料记录的西风急流的季节变化

(a) 沿 85.5°E, 0°~60°N, 450 hPa 的风速和风向矢量图; (b) ERA-Interim 格点(28.5°N, 85.5°E) 800~100 hPa 的风向和风速矢量图. 黑色虚线指示了自动气象站所在纬度

的数学检验, 结果说明季节转换期间各气象要素的变化确实具有突变特征.

此外, 通过分析 AWS 所在位置的再分析资料, 证实 AWS 所在位置在 2006 年 4 月 21 日之前受西风急流的强烈影响, 此后逐渐受印度季风控制的事实.

在冬季受西风急流的强烈影响下, 研究区风速极高, 风速波动剧烈, 多大风日. 西风气流控制期间, 气温和气压波动剧烈, 气温的日较差减小而气压的日较差增大, 同时相对湿度和比湿剧减, 空气干燥. 季节转换以后, 代之出现的是完全相反的特征.

参考文献

- 1 Bollasina M, Bertolani L, Tartari G. Meteorological observations at high altitude in the Khumbu Valley, Nepal Himalayas, 1994–1999. *Bull Glaciol Res*, 2002, 19: 1–12
- 2 Shrestha M L. Interannual variation of summer monsoon rainfall over Nepal and its relation to Southern Oscillation Index. *Meteorol Atmos Phys*, 2000, 75: 21–28
- 3 Lang T J, Barros A P. An investigation of the onsets of the 1999 and 2000 monsoons in central Nepal. *Mon Weather Rev*, 2002, 130: 1299–1316
- 4 Ueno K, Toyotsu K, Bertolani L, et al. Stepwise onset of monsoon weather observed in the Nepal Himalaya. *Mon Weather Rev*, 2008, 136: 2507–2522
- 5 Yeh T C. The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945–1946. *Tellus*, 1950, 2: 173–183
- 6 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究. *大气科学*, 2004, 28: 641–658
- 7 Li C Y, Pan J. Atmospheric circulation characteristics associated with the onset of Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2006, 23: 925–939
- 8 Schiemann R, Luthi D, Schar C. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region. *J Clim*, 2009, 22: 2940–2957
- 9 Ludecke C, Kuhle M. Comparison of meteorological observations at Mt Everest and K2: Examples of the 1984 and 1986 expedition. *Meteorol Atmos Phys*, 1991, 47: 55–60
- 10 Aizen V B, Aizen E M, Nikitin S A. Glacier regime on the northern slope of the Himalaya (Xixibangma glaciers). *Quat Int*, 2002, 97–98: 27–39
- 11 Pratap S, Haritashya U K, Ramasastri K S, et al. Prevailing weather conditions during summer seasons around Gangotri Glacier. *Curr Sci India*, 2005, 88: 753–760
- 12 Singh P, Haritashya U K, Kumar N. Meteorological study for Gangotri Glacier and its comparison with other high altitude meteorological stations in central Himalayan region. *Nord Hydrol*, 2007, 38: 59–77
- 13 Bonasoni P, Laj P, Angelini F, et al. The ABC-Pyramid Atmospheric Research Observatory in Himalaya for aerosol, ozone and halocarbon measurements. *Sci Tot Environ*, 2008, 391: 252–261
- 14 Xie A H, Qin D H, Ren J W, et al. Meteorological observations on Mount Everest in 2005. *Prog Nat Sci*, 2007, 17: 828–837
- 15 Moore G W K, Semple J L. High Himalayan meteorology: Weather at the south col of Mount Everest. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L18029, doi:10.1029/2004GL020621
- 16 姚檀栋. 1997年中国十大科技进展之一——青藏高原海拔7000米冰芯的钻取及其意义. *冰川冻土*, 1998, 20: 1–2
- 17 姚檀栋, 蒲建成, 王宁练, 等. 中国境内又一种新成冰作用的发现. *科学通报*, 1998, 43: 94–97
- 18 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 2007. 58–63
- 19 You Q L, Kang S C, Pepin N, et al. Relationship between temperature trend magnitude, elevation and mean temperature in the Tibetan Plateau from homogenized surface stations and reanalysis data. *Glob Planet Change*, 2010, 71: 124–133
- 20 Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newslett*, 2007, 110: 25–35