

李国平, 赵福虎, 黄楚惠, 等. 2014. 基于 NCEP 资料的近 30 年夏季青藏高原低涡的气候特征 [J]. 大气科学, 38 (4): 756–769, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13235. Li Guoping, Zhao Fuhu, Huang Chuhui, et al. 2014. Analysis of 30-year climatology of the Tibetan Plateau vortex in summer with NCEP reanalysis data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 756–769.

基于 NCEP 资料的近 30 年夏季青藏高原低涡的气候特征

李国平¹ 赵福虎² 黄楚惠³ 牛金龙⁴

¹ 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

² 重庆市气象台, 重庆 401147

³ 四川省气象台, 成都 610072

⁴ 成都市气象局, 成都 610072

摘 要 基于 NCEP/NCAR 再分析资料并通过人工识别与天气图对比, 本文对 1981~2010 年夏季高原低涡的气候特征进行了统计分析, 对比研究了高原低涡高发年和低发年的大气环流场和低频分量场的特征, 主要结果有:

(1) 近 30 年来夏季高原低涡平均每年生成 32 个, 低涡发生频数呈现较明显的增多趋势, 并具有较强的年际变化特征, 低涡频数在 2000 年和 2005 年出现显著突变, 在 2000 年由增多趋势转为减少趋势, 在 2005 年又转为增多趋势, 同时低涡频数具有显著的准 5 年、准 9 年和准 15 年周期振荡, 6 月生成的高原低涡呈减少趋势, 而 7 月和 8 月生成的高原低涡均呈现增多趋势; (2) 夏季高原低涡生成源地主要集中在西藏双湖、那曲和青海扎仁克吾一带, 其中高原中部涡占 50.8%, 西部涡占 27.0%, 东部涡占 22.2%, 6 月、7 月和 8 月生成的高原低涡分别占夏季低涡总数的 44.7%、29.9%和 25.4%, 高原低涡生成时绝大多数为暖性涡, 占总数的 90.7%。近 30 年来平均每年夏季有 1.3 个高影响高原低涡移出高原并在下游大范围地区产生强降水天气; 移出的高原低涡以东移为主, 占移出高原低涡的 56.4%, 而东北移和东南移的分别占移出高原低涡的 20.1%和 20.5%; (3) 高原低涡高发年, 低层的大气环流场和低频大气环流分量场均表现出较强的水平辐合及偏南气流, 高层的青藏高原高压在高原主体范围内较气候态偏强; 高原低涡低发年的情况则与之相反, 伊朗高原上空的气旋、青藏高原低槽和高原南侧反气旋的配置对高原低涡的发生具有重要作用。

关键词 青藏高原 高原低涡 气候特征 低频振荡

文章编号 1006-9895(2014)04-0756-14

中图分类号 P443

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13235

Analysis of 30-Year Climatology of the Tibetan Plateau Vortex in Summer with NCEP Reanalysis Data

LI Guoping¹, ZHAO Fuhu², HUANG Chuhui³, and NIU Jinlong⁴

¹ College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

³ Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

⁴ Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610072

Abstract On the basis of National Centers for Environmental Prediction /National Center for Atmospheric Research

收稿日期 2013-08-02, 2013-12-21 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175045、91337215, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB417202, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206042

作者简介 李国平, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 主要从事天气动力学、高原气象研究。E-mail: liguoping@cuit.edu.cn

(NCEP/NCAR) reanalysis data, and through artificial identification and comparison of weather maps, the climatic characteristics of the Tibetan Plateau Vortex (TPV) in summers of 1981 to 2010 are analyzed in this paper, and the characteristics of the atmospheric circulation and low-frequency component field are comparative studied in high- and low-frequency years of the TPV, respectively. The main results are summarized in the following points:

(1) During the past 30 years, 32 TPVs were generated over the Tibetan Plateau in summer, and the occurrence frequency of the TPV presents an obvious increasing trend and a strong interannual variability. The vortex frequency appears as significant mutations in 2000 and 2005, shifts from an increasing trend to decreasing trend in 2002, and converts into a growing trend in 2005. Moreover, the vortex frequency has significant potential for quasi-periodic oscillations to occur in periods of approximately 5, 9, and 15 years. The TPV frequency generated in June shows a decreasing trend that increase in July and August.

(2) The generating sources of the TPV in summer appear mainly in the regions of Shuanghu and Nagqu in Tibet and Zarenkewu in Qinghai in the central, western, and eastern plateau respectively accounting for 50.8%, 27.0%, and 22.2% of the total. The TPVs in summer generated in June, July, and August respectively account for 44.7%, 29.9%, and 25.4% of the total. The warm TPVs in summer make up the vast majority, accounting for 90.7% of the total. About 1.3 TPVs could develop strongly and move out of the plateau every summer during the past 30 years, which produce heavy rainfall in a wide range of downstream areas. The TPVs moving out of the Tibetan Plateau with east, northeast, and southeast shifting accounted for 56.4%, 20.1%, and 20.5%, respectively.

(3) During the high-incidence years of TPV, the atmospheric circulation and low-frequency components of the atmospheric circulation at low levels show strong horizontal convergence and southerly airstream, and the Tibetan high is stronger than the climatology within the main body of the plateau at high levels. The opposite occurs in low-incidence years of the TPV. The configuration of cyclones over the Iranian Plateau, a trough over the Tibetan Plateau, and an anticyclone in the south side of the plateau have important roles in the occurrence of the TPV.

Keywords Tibetan Plateau, Vortex, Climatic characteristics, Low-frequency oscillation

1 引言

高原低涡是在特有的高原动力和热力背景下产生的高原地区低层(500 hPa)天气系统,同时也是影响高原主体及下游地区主要的天气样式之一,随之引发的暴雨、雷暴和大风等灾害性天气对人民生命财产安全可产生较大危害。有关高原低涡的研究成果及业务应用随着1979年第一次青藏高原气象科学试验(the Qinghai-Xizang Plateau Meteorological Experiment, 简称 QXPME X)的实施而逐渐增多(孙国武, 1987; 罗四维, 1992; 罗四维等, 1993),学者们从天气、气候、动力、数值模拟等方面对高原低涡的结构特征、时空变化规律、生成发展和东移机制展开了研究。早期的研究指出高原低涡的源地主要在羌塘、松潘、那曲和柴达木,其中认为那曲是主要的生成源地,并且高原低涡在生成期以暖涡为主(青藏高原低值系统研究协作组, 1978; 青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 1981)。同时期,也有学者提出高原低涡主要生成于那曲、申扎和改则一带(钱正安和单扶民, 1984; 钱正安等, 1984),或主要生成于30°N~35°N之间的那曲和班戈湖附近(罗四维和王玉佩, 1984)。

在20世纪80年代中期,基于高原气象协作研究和QXPME X的观测资料,陶诗言等(1984)、刘富明和濮梅娟(1986)分别对1975~1982年和1965~1982年的高原低涡生成、移动和影响进行了统计,但由于资料和年代所限,高原低涡气候(学)特征及长期变化趋势的研究几乎为空白。近年来,随着观测资料的逐渐丰富以及再分析资料的应用,高原低涡活动的气候特征开始引起人们的关注,郁淑华和高文良(2006)、高文良和郁淑华(2007)对1998~2004年移出高原低涡进行了统计分析,并给出了低涡多与少的月环流场特征。何光碧等(2009a)分析了2000~2007年夏季高原低涡、切变线的观测事实。王鑫等(2009)对1980~2004年5~9月的青藏高原低涡活动进行了统计研究。蒋艳蓉等(2009)研究了冬、春季青藏高原东侧涡旋特征及其对我国天气气候的影响。但目前我们对高原低涡气候特征的总体认知还很欠缺,特别是近年来在全球气候变化以及高原气候变化的背景下,高原低涡活动长期变化趋势的研究还不多见。因此,迫切需要加强青藏高原低涡活动的气候变化趋势及其对我国强降水影响的研究,这对于揭示高原地区天气系统活动及其气候特征的基本事实,进一

步认识高原低涡发生发展及影响机制,以及高原低涡与下游其他天气系统(如西南低涡、台风、江淮气旋、梅雨锋)的相互作用都有重要意义。由于5~9月是高原低涡主要活动时段,其中6~8月又是高原低涡最容易移出高原的月份(高文良和郁淑华, 2007),故本文利用近30年(1981~2010年)的NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Center for Atmospheric Research)逐日再分析数据对夏季(6~8月)高原低涡的时空分布特征进行气候统计分析,并对夏季高原低涡高发年和低发年的大气环流及低频变化特征开展对比研究。

2 资料与方法

近年来,NCEP/NCAR再分析资料已经在高原上广泛使用(高文良和郁淑华, 2007; 朱丽华等, 2011; 李永华等, 2011; 宇婧婧等, 2011a, 2011b; 华维等, 2012; 李斐等, 2012),在高原低涡的个例诊断分析和数值模拟中也已成功运用(何光碧等, 2009b; 黄楚惠和李国平, 2009; 宋雯雯等, 2012)。由于NCEP/NCAR再分析资料是基于多源资料的融合,相对于高原上探空站点“东多西少”的极不均匀分布,在整体上能比较客观地反映青藏高原上空的大气环流形势,有利于较为全面地识别高原低涡。因此,以再分析资料为主,结合探空资料的订正,在目前的技术、资料条件下,对于高原低涡的统计应是一种较好的现实选择。

本文所用的资料为1981~2010年NCEP/NCAR逐日再分析资料(Kalnay et al., 1996),其中水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的再分析资料从1981到2010年,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的再分析资料从1999到2010年。首先,利用该资料绘制的天气图对近30年夏季高原低涡进行人工识别统计,高原低涡的识别标准为:500 hPa等压面上,高原地区形成闭合等高线的低压或有3个站点风向呈气旋性的低涡环流(青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 1981)。我们还参考MICAPS (Meteorological Information Combine Analysis and Process System)天气图以及中国气象局成都高原气象研究所(2010~2012年)出版的《青藏高原低涡切变线年鉴》对再分析资料人工识别结果进行了适当订正。在高原低涡整个统计过程中,我们主要是以分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的再分析资料为主,运用MICAPS资料和分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

的再分析资料进行适当的比较、订正。我们发现,单纯地用MICAPS资料来统计的话,西部的高原低涡会明显偏少,故我们以两种分辨率的再分析资料为主,对一些存疑的低涡过程再用MICAPS资料加以比较、验证。此外,我们分别采用小波分析和滑动 T 检验对高原低涡序列进行振荡周期分析和突变检验(Torrence and Compo, 1998),并使用Lanczos带通滤波器提取大气低频分量,该滤波器能有效地保留其窗口内的方差(Jones et al., 1998)。根据有关研究结果(姚菊香等, 2012),本文选择准双周和准30天Lanczos滤波器窗口函数 l 的临界值 l_0 分别为24和46,当 $l \geq l_0$ 时,Lanczos滤波器性能优于Butterworth滤波器。

3 结果分析

3.1 青藏高原低涡的气候学分析

3.1.1 夏季高原低涡的气候特征

图1给出了夏季高原低涡发生频数标准化距平的年际变化和小波分析。由图1a可以看出,自1981年以来夏季高原低涡发生频数整体呈增多趋势,30年高原低涡共出现965个,夏季生成的高原低涡年平均32.2个,1991年高原低涡出现频次最高,达51个;2003年出现频次最少,为18个;气候倾向率是每10年增加1.258个,标准差为8.5,具有较强的年际变化特征。夏季高原低涡频数在2000年和2005年发生显著突变,低涡频数序列在2000年由增多趋势转为减少趋势,而后在2005年又转为增多趋势。利用小波功率谱对图1a所示夏季高原低涡序列进行分析发现,夏季高原低涡序列的准5年、准9年和准15年周期振荡现象显著:4~7年的周期振荡在1981年与1995年间有较大的谱值,8~12年的周期振荡特征在1985年前后、1995年前后和1998年前后有较大的谱值,准15年的周期振荡特征自1981年以来呈现较大的谱值。

3.1.2 6月份高原低涡的气候特征

图2a显示,自1981年以来6月份出现的高原低涡频数整体呈减少趋势,气候倾向率为每10年减少1.144个,6月份年平均生成的高原低涡频数为14.4个,标准差为6.1,年际变化特征明显,低涡序列在2005年发生显著突变,在2005年由减少趋势转为增多趋势。利用小波功率谱对图1a中6月份生成的高原低涡序列进行分析得出,该月份高原低涡序列的准2年、准4年和准15年周期振荡

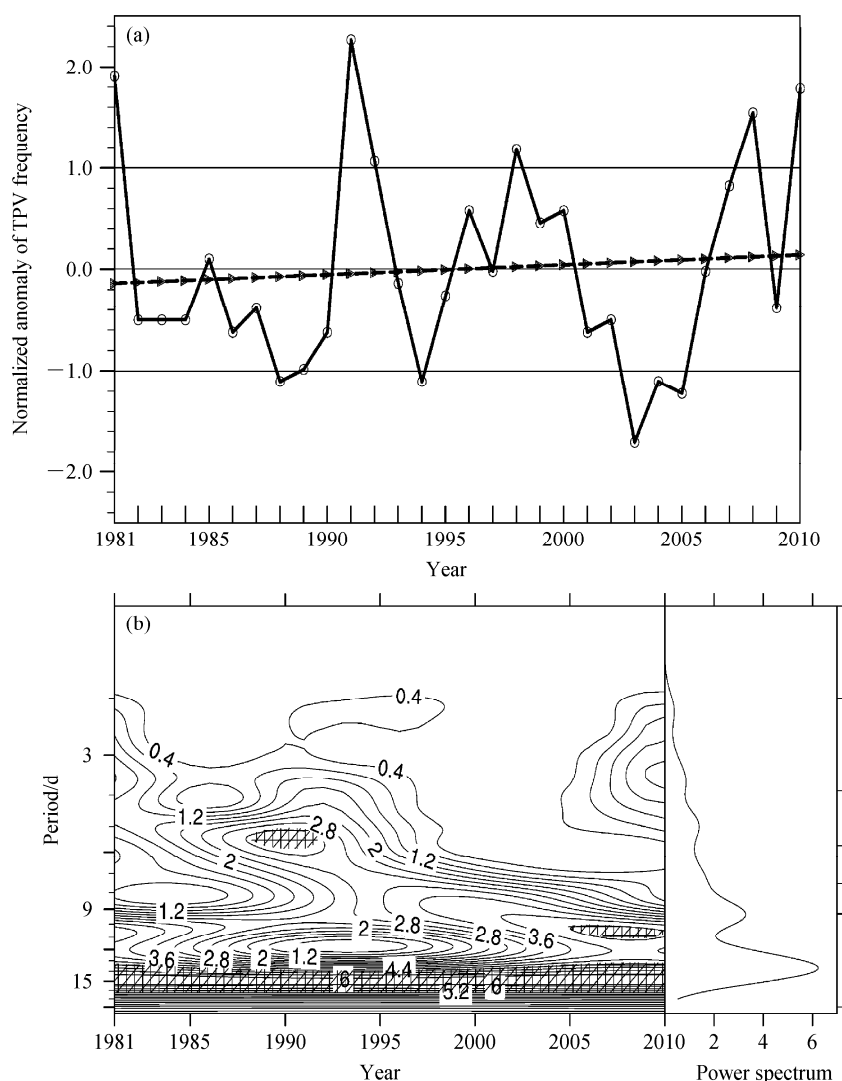


图1 夏季高原低涡频数标准化距平的 (a) 年际变化和 (b) 小波功率谱 (左列) 及其对应的方差 (右列) (采用 Morlet 小波, 阴影区通过 0.05 信度水平检验, 下同)

Fig. 1 (a) The interannual variability of normalized anomalies of TPV (Tibetan Plateau Vortex) occurrence frequency and (b) the analysis of wavelet power spectrum (left) and variance (right) in summer (Morlet wavelet is used, shadings indicate the 95% confidence level, the same below)

现象显著; 准 2 年的周期振荡在 1985 年前后、2000 年前后和 2010 年前后有较大的谱值, 准 4 年的周期振荡在 1995 年前后有较大的谱值, 准 15 年的周期振荡自 1981 年以来呈现出较大的谱值。

3.1.3 7 月份高原低涡的气候特征

图 3 给出了 7 月份生成的高原低涡频数标准化距平的年际变化和小波分析。由图 3a 可知, 自 1981 年以来该月份生成的高原低涡整体呈增多趋势, 气候倾向率为每 10 年增加 0.493 个, 7 月份年平均生成的高原低涡频数为 9.6 个, 标准差为 4.9, 也具有年际变化特征。7 月份生成的高原低涡频数在 1989 年和 1992 年有显著的突变, 该序列在 1989 年由减

少趋势转为增多趋势, 而后在 1992 年又转为减少趋势。小波功率谱对图 3a 中 7 月份生成的高原低涡序列的分析表明, 7 月份生成的高原低涡序列存在准 3 年、准 5 年和准 15 年的周期振荡现象, 2~4 年的周期振荡在 1985 年前后和 2000 年前后有较大的谱值, 准 5 年的周期振荡在 1993 年前后有较大的谱值, 准 15 年的周期振荡在 1981 年以后均有较大的谱值。

3.1.4 8 月份高原低涡的气候特征

由图 4a 可以看出, 自 1981 年以来 8 月份生成的高原低涡频数整体呈明显增多趋势, 气候倾向率每 10 年增加 1.4 个, 8 月份年平均生成的高原低

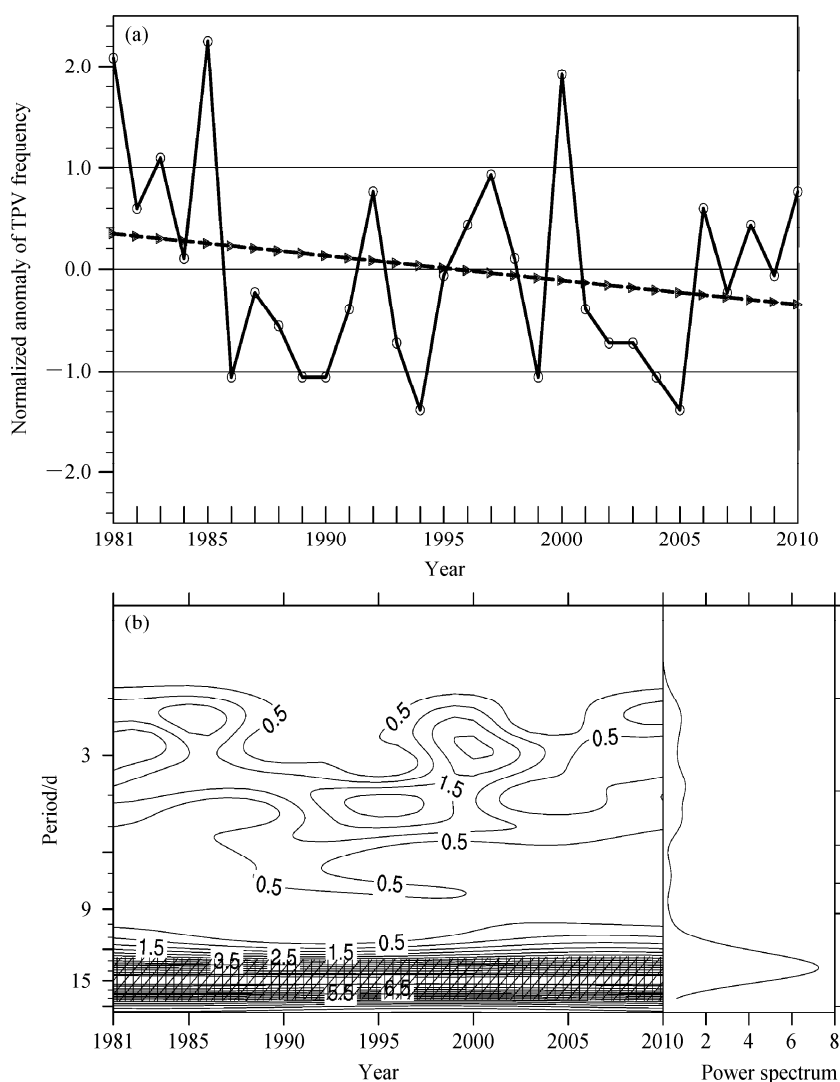


图2 同图1, 但为6月

Fig.2 Same as Fig.1, but for June

涡频数为 8.2 个, 标准差为 4.6, 年际变化显著。8 月生成的高原低涡频数在 1984 年和 1997 年有显著的突变发生, 在 1984 年由减少趋势转为增多趋势, 在 1997 年再次转为减少趋势。小波功率谱对图 4b 中 8 月高原低涡序列的分析表明, 该高原低涡序列的准 2 年、准 6 年、准 9 年和准 12 年周期振荡现象显著: 准 2 年的周期振荡在 1992 年前后有较大的谱值, 准 6 年的周期振荡在 1993 年前后、2002 年前后和 2008 年前后有较大的谱值, 准 9 年的周期振荡在 20 世纪 80 年代初和 2000 年到 2010 年间呈现出较大的谱值, 准 12 年的周期振荡特征在 1998 年前后较为明显。

3.1.5 夏季高原低涡的源地

图 5 反映了 1981~2010 年高原低涡生成源地

累积频数的空间分布。图 5a 为表明夏季高原低涡生成源地主要集中在西藏双湖、那曲和青海扎仁克吾一带。高原低涡的中部涡占 50.8%, 西部涡占 27.0%, 东部涡占 22.2%。从图 5b 可以看出, 6 月份, 高原低涡源地位置偏北, 主要分布在双湖—扎仁克吾以北地区; 而 7 月份高原低涡源地位置较 6 月份偏南, 主要分布在班戈—那曲一带; 8 月份高原低涡源地和 7 月份基本一致, 也分布于班戈—那曲一带, 但累积频数不及 7 月。6~8 月各月生成的高原低涡占夏季高原低涡总数的比例为: 6 月最多, 达 44.7%, 7 月份为 29.9%, 而 8 月最少, 占 25.4%。

3.1.6 夏季高原低涡的生命史和强度

图 6 给出了高原低涡持续时间和低涡中心位势

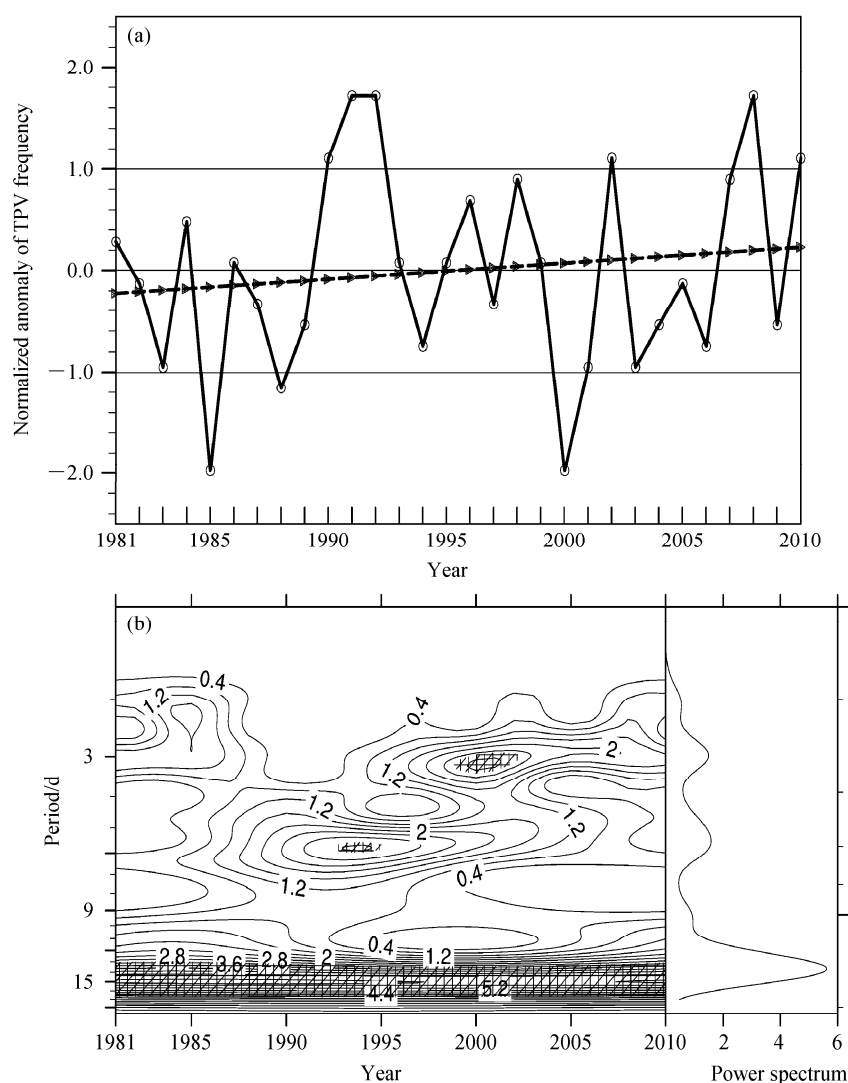


图 3 同图 1, 但为 7 月

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for July

高度值的情况。由图 6a 可见, 4 成以上的高原低涡持续时间能达到 6 小时, 持续 12 小时的低涡数占 2 成, 生命期超过 18 小时的高原低涡数不到 1 成。由图 6b 可以看出, 高原低涡中心的位势高度值近于正态分布, 均值为 582.12 dagpm, 低涡中心位势最高值和最低值分别为 591 dagpm 和 563 dagpm, 中心位势高度值位于 578~587 dagpm 之间的高原低涡占总数的 87.1%。

3.1.7 夏季高原低涡的热力性质和移动特征

统计结果还表明: 高原低涡初期以暖性涡为主, 占总数的 90.7%, 这与前人的研究结果一致(青藏高原低值系统研究协作组, 1978)。绝大多数高原低涡属于源地(不发展)型, 仅在高原地区活动, 移到高原东麓时即减弱消失, 这是高原低涡与背风

气旋明显不同之处。

对高原低涡的相关研究而言, 高原低涡的气候统计是一项工作量大但结果差异也可能较大的基础性工作, 即使在对高原低涡定义基本相同的条件下, 由于高原低涡尺度较小、属于边界层系统(刘富明和濮梅娟, 1986; Liu and Li, 2007), 加之高原上的探空资料稀疏, 用常规天气图方法识别确定的高原低涡常因统计年限不同、所用资料不同、在历史纸质天气图和 MICAPS 显示天气图上的反映状况不同(甚至手工绘制天气图时期, 中央气象台、省气象台、地市级气象台的预报员判定高原低涡的标准可能有所不同), 对移出高原的低涡也可能因移下临界海拔高度、移过临界经度以及是低涡移动还是新生等方面的判断差异, 不同研究者的低涡统

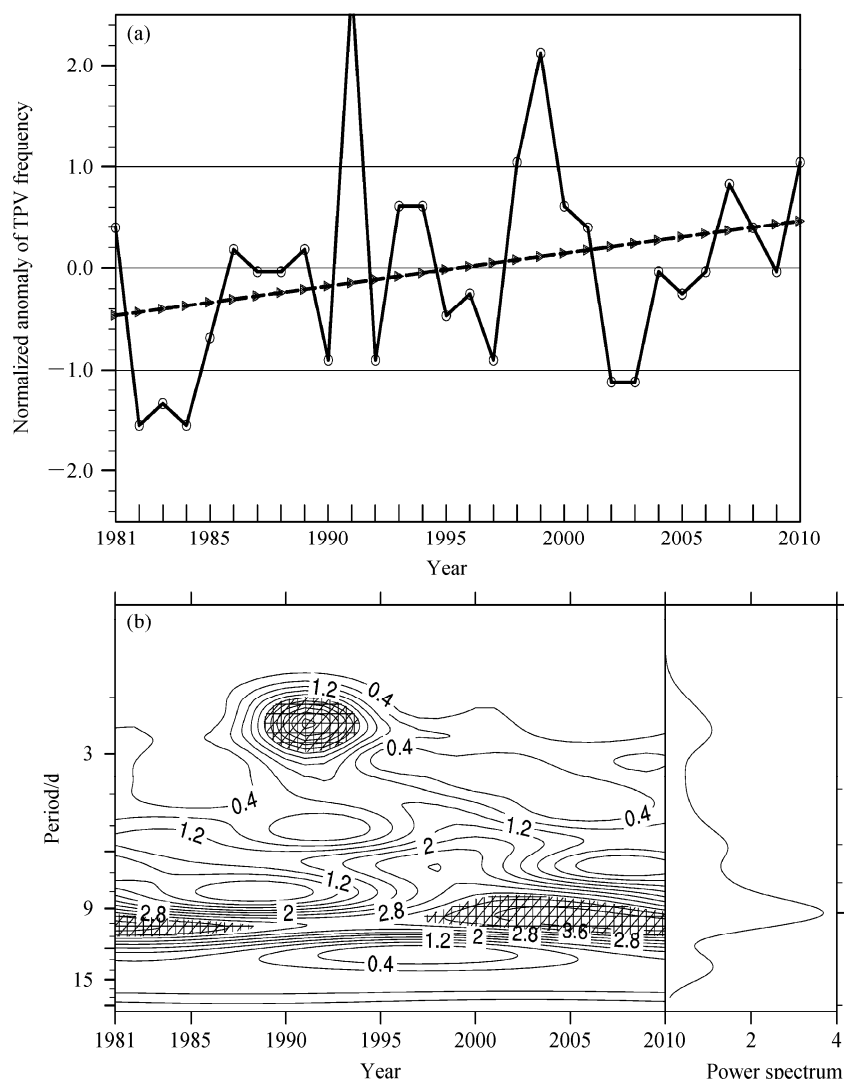


图4 同图1, 但为8月

Fig. 4 Same as Fig. 1, but for August

计结果存在差异 (有的还比较大)。例如, 平均每年夏季高原低涡生成数的统计结果为 6.1~9.1 个, 高原低涡移出高原的百分比为 8.7%~36.4% (陶诗言等, 1984; 刘富明和濮梅娟, 1986; 郁淑华和高文良, 2006; 郁淑华等, 2007, 2012; 黄楚惠, 2008; 王鑫等, 2009; 中国气象局成都高原气象研究所, 2010~2012; Feng et al., 2014)。

但对高原低涡移出高原的总体认识还是基本一致的, 即能够移出高原的高原低涡为数不多, 移出高原并发展为较强低涡而产生高影响天气的则更少。刘富明和濮梅娟 (1986) 认为移出高原的低涡确实较少, 6~8 月平均每年 3 次, 而触发四川盆地暴雨的只有 1.4 次。郁淑华等 (2012) 统计出每年有 1~3 次高原低涡会引发四川、重庆、贵州、

陕西、湖北等产生大雨以上的降水。本研究的统计结果表明, 近 30 年来平均每年夏季有 1.3 个高影响高原低涡移出高原并在下游大范围地区产生强降水天气, 这类能够移出高原的高影响高原低涡的年代际变化特征为: 1981~1990 年间平均每年移出 1.5 个, 1991~2000 年间平均每年移出 1.2 个, 2000~2010 年间平均每年移出 1.2 个。总体而言, 1980 年代后期及 1990 年代初期, 移出高原的高影响高原低涡次数较多。限于篇幅, 近 30 年来移出型高原低涡的全面统计和分析, 我们将另文论述。

需要注意的是, 为数不多的移出 (发展) 型高原低涡却常以与西南低涡耦合加强的方式给高原下游广大地区产生灾害性天气影响 (陈忠明等, 2004)。移出的高原低涡以东移为主, 占移出高原

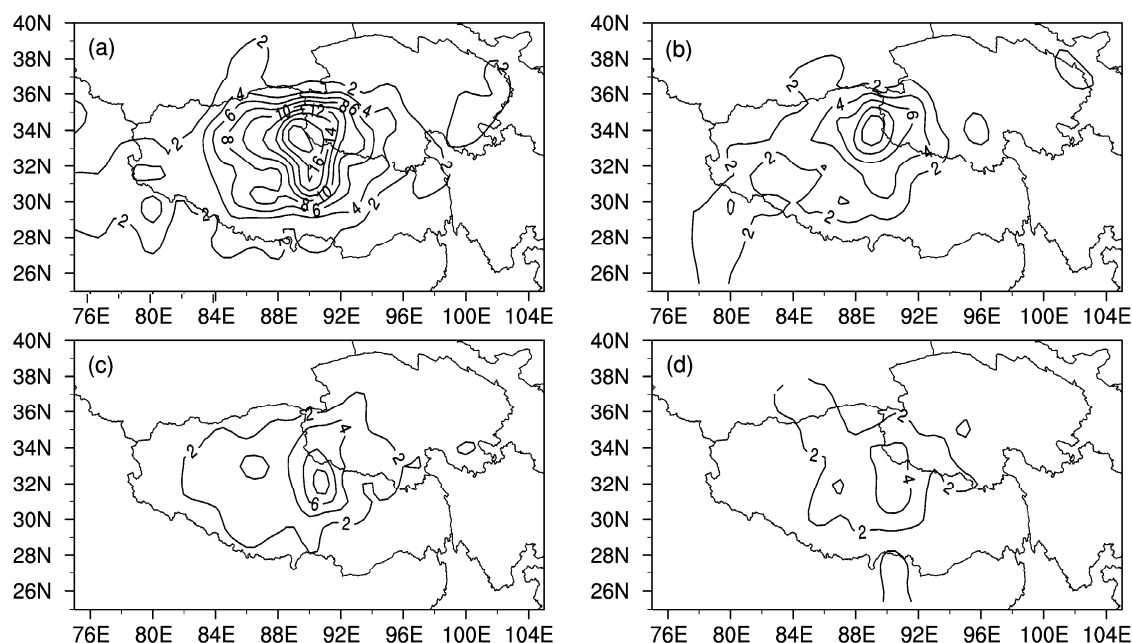


图 5 1981~2010 年高原低涡生成源地累积频数的空间分布: (a) 夏季 (6~8 月); (b) 6 月; (c) 7 月; (d) 8 月

Fig. 5 The spatial distribution of cumulative frequency for generating source of TPV from 1981 to 2010: (a) Summer; (b) June; (c) July; (d) August

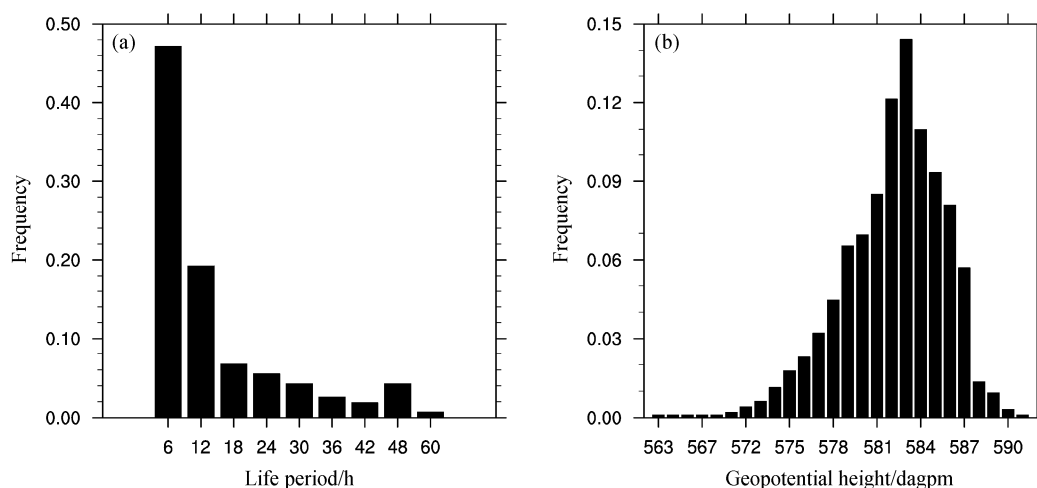


图 6 1981~2010 年高原低涡生命史和强度的统计分布: (a) 低涡持续时间; (b) 500 hPa 低涡中心位势高度

Fig. 6 The statistical distribution of the (a) life cycle and (b) strength of TPV from 1981 to 2010

低涡的 56.4%，东北移的占 20.1%，东南移的占 20.5%，高原低涡主要以三种方式消亡：直接被填充，汇入高空低槽，蜕变为高原低槽或高原切变线。

3.2 高原低涡高、低发年夏季大气环流形势的差异

对我们统计的近 30 年夏季高原低涡发生频数序列进行标准化处理，采用高于或低于 1 个标准差来定义高发年或低发年。于是得出高原低涡高发年有：1981、1991、1992、1998、2008、2010 年；低发年有：1988、1994、2003、2004、2005 年。

下面分别对高原低涡高发年和低发年夏季的大气环流场进行合成，以及分别对气候平均态做差

值分析。图 7 给出了高原低涡高发年和低发年 500 hPa 大气环流合成场以及它们与气候态的差值分布。对高原低涡高发年和低发年与各自夏季气候态的差值环流场的分析表明，两者差异显著。高发年大气环流合成场与气候态大气环流场相比较而言（图 7c），青藏高原主体范围存在较明显的偏南气流和低压槽，青藏高原上游伊朗高原上空为气旋性环流控制，高原低压槽是该低压气旋向青藏高原伸展的分支，气旋南部的西南气流异常强盛，有较强的正涡度平流向高原低压槽输送正涡度，使得该低压槽得以维持，同时水汽供应充足，为高原低涡形

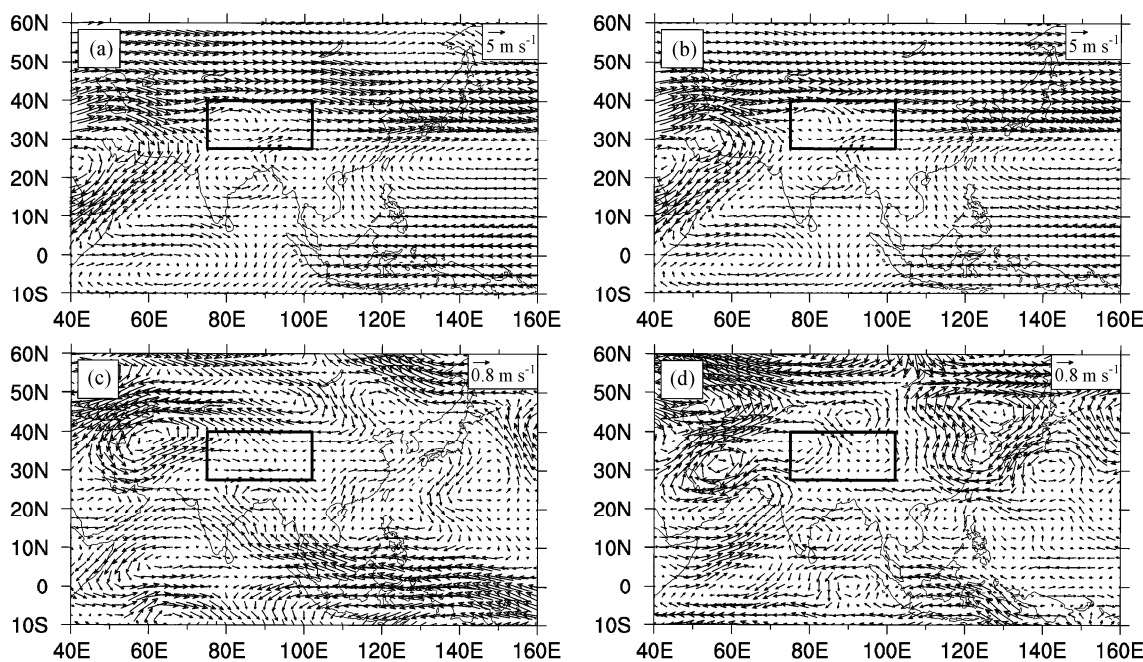


图7 高原低涡高发年(左列)、低发年(右列) 500 hPa (a、b) 环流合成场(6~8月平均,下同)以及(c、d)环流合成场与同期气候态的差值场。图中方框代表青藏高原主体区域,下同

Fig. 7 (a, b) The atmospheric circulation synthetic fields at 500 hPa during the high (left) and low (right)-incidence years of TPV and (c, d) the differences between the synthesis fields and the climatology at 500 hPa in the same period in (a, c) high and (c, d) low TPV occurrence years. The box in figures represents main area of the Tibetan Plateau, the same below

成提供了有利的背景条件。另外,印度洋北部被气旋性环流控制,印度洋高压比气候态偏弱,140°E以西的西太平洋被反气旋环流控制,140°E~160°E则被气旋性环流控制,说明西太平洋副热带高压在140°E以西较气候态偏强,而140°E~160°E西太副高较气候态偏弱,西太副高南部的偏东气流比气候态显著偏强。同样,将高原低涡低发年环流场与气候态大气环流场比较(图7d)可以发现,青藏高原主体存在较强的偏北气流和高压脊,伊朗高原上空被强盛的高压反气旋环流控制,高原高压脊是伊朗上空高压向青藏高原伸展所形成的分支,水汽供应偏弱,不利于高原低涡的生成。西太平洋被气旋性环流控制,说明西太副高较气候态偏弱。而印度洋被反气旋环流控制,印度洋高压较气候态偏强。

青藏高压是夏季亚洲对流层上层最为显著的环流系统(李跃清,1996),高原低涡高发年和低发年的青藏高压的分布和强度状态有何差别?这对于我们进一步揭示青藏高原环流系统影响高原低涡的机制有重要意义。为此我们给出了夏季100 hPa的大气环流场合成场以及它们与气候态的差值分布(图8)。高原低涡高发年大气环流场与气候态大气环流场相比可见(图8c),高原低涡高发年青

藏高压西部较气候态偏弱,而高原主体区域较气候态偏强。高原低涡低发年夏季大气环流合成场与气候态大气环流场相比可以看出(图8d),高原低涡低发年青藏高压西部较气候态偏强,高原主体地区则较气候态偏弱。因此,高原低涡高发年青藏高压西部的强度比低发年明显偏弱,而青藏高压在青藏高原主体范围内的强度则较低发年明显偏强,这有利于加强高原高层的水平辐散及整层上升运动,为低层高原低涡生成提供良好的动力条件。

为了探寻高原低涡与低层纬向风、经向风的关系,我们给出了1981~2010年高原低涡频数序列与同期500 hPa的 u 、 v 风场相关系数场及其由 u 、 v 风场相关系数构造的矢量场(图9)。从高原低涡序列与纬向风场的相关系数场可以看出(图9a),回归系数正值带由高原南部经伊朗高原向高原上游延伸至沙特阿拉伯,经我国华南向下游延伸至西太平洋,该正值带南北两侧均为宽阔的负值区。高原范围内呈“南正北负”的分布形态,纬向风在高原范围内呈气旋性切变,这对应高原低涡生成偏多。图9b示出高原低涡偏多时,高原北部、伊朗高原和印度半岛为显著的经向风正值区,所以高原低涡的偏多与以上正值区的偏南风密切相关。其原

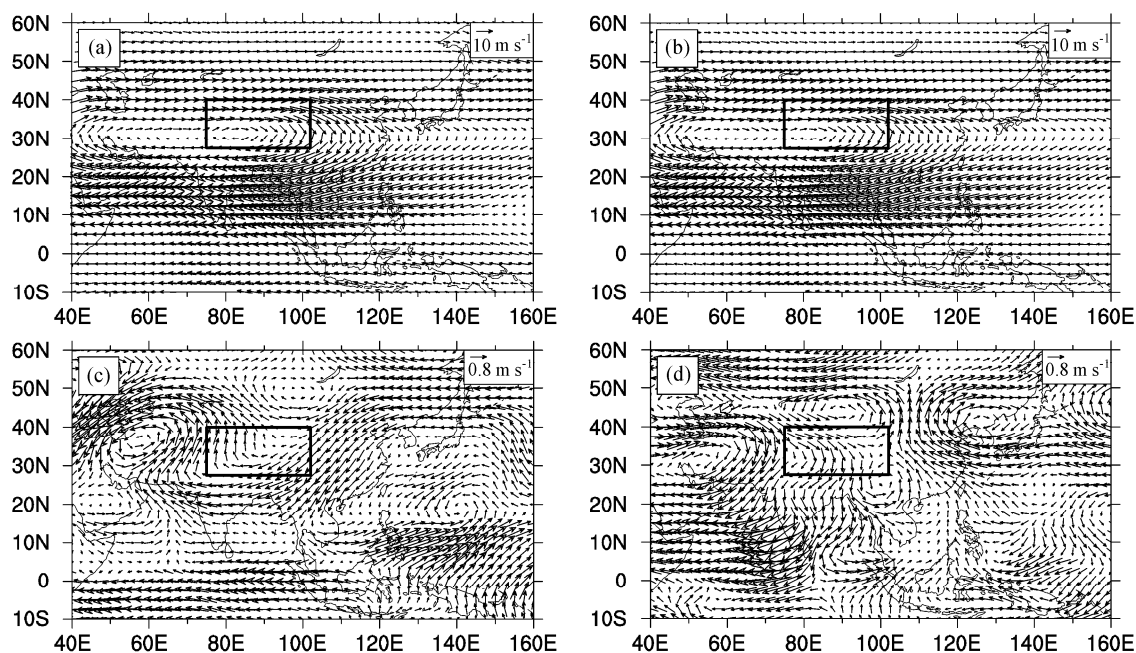


图 8 同图 7, 但为 100 hPa

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 100 hPa

因可以通过由高原低涡序列与 u 、 v 风场构造的相关系数的矢量场 (图 9c) 来说明: 伊朗高原上空被气旋性环流控制, 该气旋前部有一向青藏高原伸展的低压槽, 高原南侧有一反气旋, 有利于暖湿气流向高原地区输送, 这对高原低涡的生成具有重要贡献。这一形态与图 7c 中低涡高发年大气环流合成场与气候态大气环流场 (6~8 月平均) 的差值场分布极为相似, 说明伊朗高原上空的气旋、高原低槽和高原南侧反气旋的配置对高原低涡生成有重要作用。

3.3 高原低涡高、低发年夏季大气低频环流形势的差异

使用 Lanczos 带通滤波器对低层 (500 hPa) 纬向风和经向风进行滤波, 可以得到低频大气环流场。图 10 给出了高原低涡高发年和低发年夏季低频大气环流场, 以及各自与气候态夏季低频大气环流场的低频差值场。可以看出, 高原低涡高发年低频大气环流场在青藏高原范围内有较强气旋性切变, 并且低频风明显偏弱。

图 11 分别给出了高原低涡高发年和低发年夏季 100 hPa 低频大气环流场, 以及各自与气候态夏季低频大气环流场的低频差值场。低涡高发年青藏高原被强盛的低频反气旋控制。而在低发年, 青藏高原范围内只有低频气流的扰动, 没有形成闭合系统。与气候态相比较 (图 11a、b), 低涡高发年高

原范围内的低频反气旋异常显著, 低发年高原上游伊朗高原被闭合低频气旋控制, 青藏高原则被该低频气旋东侧强的偏南气流控制 (图 11c、d)。所以, 青藏高原范围内低涡高发年的低频大气环流场及其高低层环流配置均为高原低涡生成提供了有利的环流条件。

4 结论和讨论

本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料对 1981~2010 年夏季高原低涡的气候特征进行了统计研究, 并对高原低涡高发年和低发年的大气环流场和低频环流场进行了对比分析, 得出以下结论:

(1) 近 30 年来夏季高原低涡共出现 965 个, 平均每年 32 个, 夏季高原低涡发生频数整体呈现出较为明显的增多趋势, 具有较强的年际变化特征。其中 6 月生成的高原低涡呈现出减少趋势, 而 7 月和 8 月生成的高原低涡呈现增多趋势。高原低涡频数在 2000 年和 2005 年存在显著的突变, 在 2000 年由增多趋势转为减少趋势, 在 2005 年又转为增多趋势, 同时低涡频数具有显著的准 5 年、准 9 年和准 15 年周期振荡。

(2) 夏季高原低涡生成源地主要集中在西藏双湖、那曲和青海扎仁克吾一带。按源地分类, 中部涡占 50.8%, 西部涡占 27.0%, 东部涡占 22.2%。4

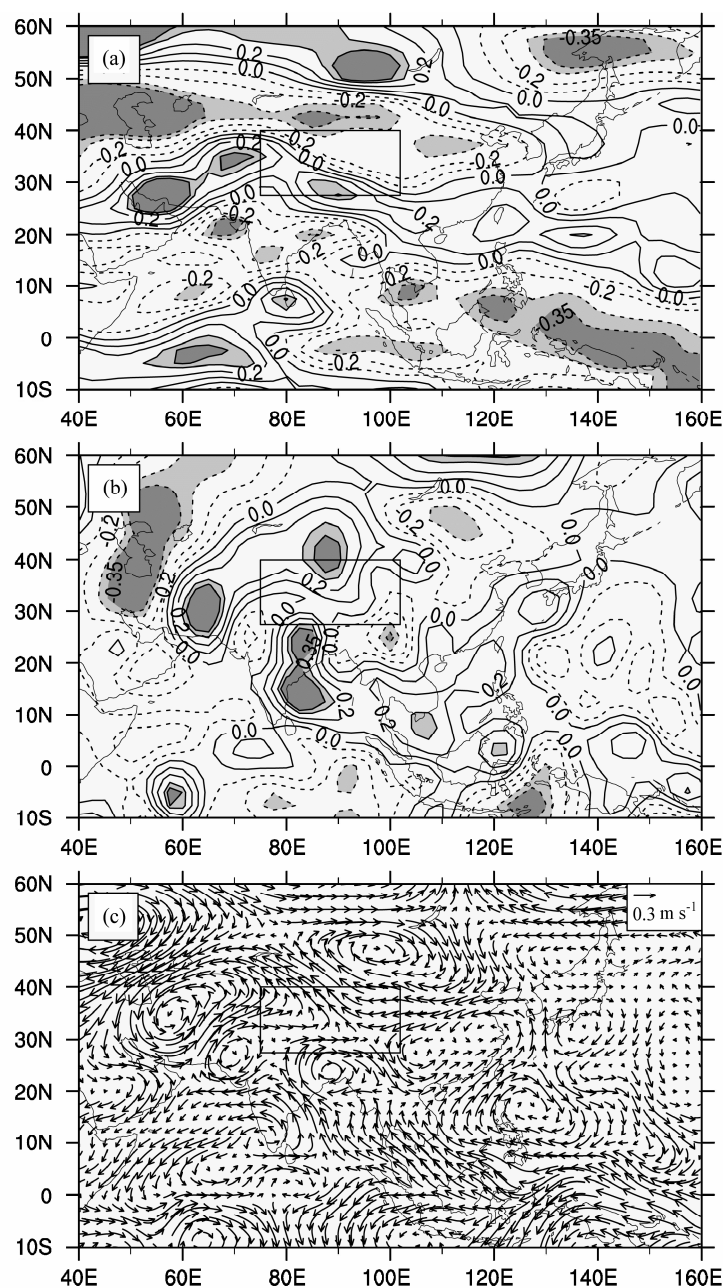


图9 1981~2010年高原低涡频数序列与同期500 hPa (a) u 、(b) v 风场的相关系数场及其 (c) 由 u 、 v 风场相关系数构造的矢量场, 深色和浅色阴影分别通过0.01和0.05显著性水平检验

Fig. 9 The correlation coefficient fields between TPV frequency sequence and (a) u wind and (b) v wind at 500 hPa, (c) the vector constituted by the correlation coefficients between TPV frequency sequence and u wind and v wind at 500 hPa. Light and dark shadows pass test at 0.05 and 0.01 significance levels, respectively

成以上的高原低涡持续时间能达到6小时, 持续12小时的低涡数仅占2成, 生命史超过18小时的高原低涡数不到1成。6月份生成的高原低涡占夏季低涡总数的44.7%, 7月份占夏季低涡总数的29.9%, 8月份占夏季低涡总数的25.4%; 高原低涡生成时以暖性涡为主, 占总数的90.7%。近30年来平均每年夏季有1.3个高影响高原低涡移出高原并在下游大范围地区产生强降水天气; 移出的高原低

涡以东移为主, 占移出高原低涡总数的56.4%, 东北移和东南移的比例相当, 分别占移出高原低涡总数的20.1%和20.5%。高原低涡的消亡方式主要有直接被填充、汇入高空低槽、蜕变为高原低槽或高原切变线。

(3) 高原低涡高发年, 低层的大气环流场和低频大气环流场均呈现出较强的水平辐合及强盛的偏南气流, 高层的青藏高压在高原主体范围内较气

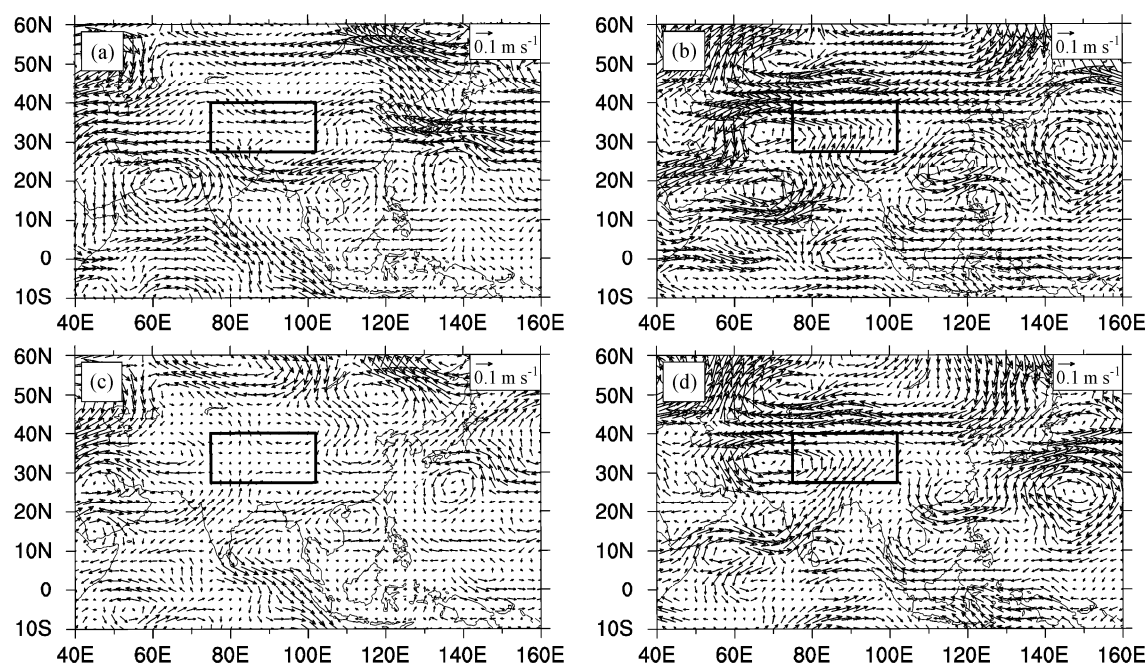


图 10 同图 7，但为低频大气环流场

Fig. 10 Same as Fig.7, but for low-frequency atmospheric circulation

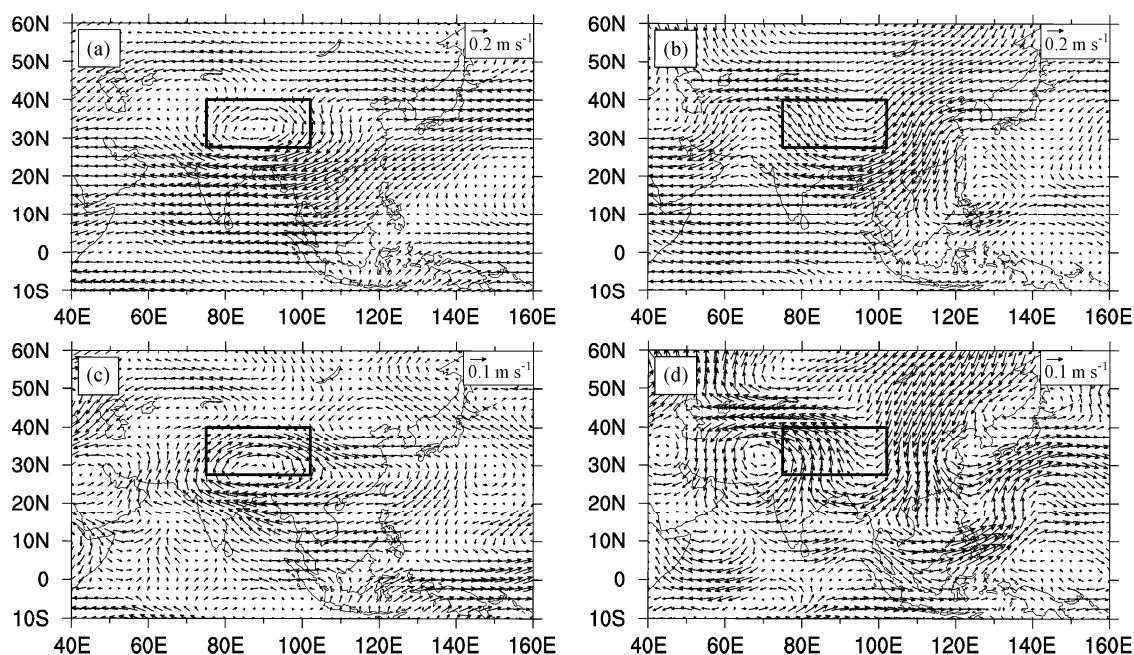


图 11 同图 7，但为 100 hPa 低频大气环流场

Fig. 11 As in Fig.7, but for low-frequency atmospheric circulation at 100 hPa

候态偏强；高原低涡低发年的情况则与之相反。伊朗高原上空的气旋、青藏高原低槽和高原南侧反气旋的配置对高原低涡的生成具有重要作用。

本文揭示了近 30 年来夏季高原低涡的基本气候事实，以及大气环流场在高原低涡高发年和低发年的差异，并初步分析了这些差异对高原低涡生成的可能影响。更加深入细致的气候分型和移出高原的

高原低涡的统计分析，高原低涡高、低发年高、低层环流合成场与同期气候态差值场的显著性检验，以及相关的物理机制分析，应是我们后继工作的重点。

最后，值得指出的是，在全球气候变暖的大背景下，地处高海拔的青藏高原在一定时期也呈现出明显的气候变化，升温效应比其他地区更为显著，地温及地气温差亦有所上升，但地面风速却显著减

小,使得高原地面感热通量变弱,高原加热效应减小(段安民和吴国雄,2005; Duan et al., 2006; Duan and Wu, 2008; Lau et al., 2010)。而高原(感热)加热对高原低涡的形成具有重要作用(李国平等, 2002),由此引申出一系有意思的问题:高原低涡与高原加热在气候变化尺度上究竟有何联系?高原感热减弱(增强)是否必然导致高原低涡的发生频数和强度也随之降低(升高)?对高原低涡的源地、移动路径以及移出高原的比例又有怎样的影响?可见,有关高原低涡与高原热源在气候变化方面的关联性以及高原低涡受气候变化影响的物理机制也是今后很有意义的研究课题。

致谢 感谢张虹、何钰、倪成诚、蒋璐君和母灵在统计高原低涡时的辛勤付出。

参考文献 (References)

- 陈忠明, 闵文彬, 缪强, 等. 2004. 高原涡与西南涡耦合作用的个例诊断 [J]. 高原气象, 23 (1): 75–80. Chen Zhongming, Min Wenbin, Miao Qiang, et al. 2004. A case study on coupling interaction between plateau and southwest vortexes [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (1): 75–80.
- 段安民, 吴国雄. 2005. 青藏高原气温的年际变率与大气环状波动模 [J]. 气象学报, 63 (5): 790–798. Duan Anmin, Wu Guoxiong. 2005. The relationship between the interannual variability of air temperature over the Tibetan Plateau and the northern hemispheric annular wave pattern [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63 (5): 790–798.
- Duan A M, Wu G X. 2008. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. Part I: Observations [J]. J. Climate, 21: 3149–3164.
- Duan A M, Wu G X, Zhang Q, et al. 2006. New proofs of the recent climate warming over the Tibetan Plateau as a result of the increasing greenhouse gases emissions [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (11): 1396–1400.
- Feng X Y, Liu C H, Rasmussen R, et al. 2014. A 10-year climatology of Tibetan Plateau vortices with NCEP climate forecast system reanalysis [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 53 (1): 34–46.
- 高文良, 郁淑华. 2007. 高原低涡东移出高原的平均环流场分析 [J]. 高原气象, 26 (1): 206–212. Gao Wenliang, Yu Shuhua. 2007. Analyses on mean circulation field of the plateau low vortex moving out of Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(1): 206–212.
- 华维, 范广洲, 王炳赞. 2012. 近几十年青藏高原夏季风变化趋势及其对中国东部降水的影响 [J]. 大气科学, 36 (4): 784–794. Hua Wei, Fan Guangzhou, Wang Bingyun. 2012. Variation of Tibetan Plateau summer monsoon and its effect on precipitation in East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 784–794.
- 何光碧, 高文良, 屠妮妮. 2009a. 2000~2007 年夏季青藏高原低涡、切变线观测事实分析 [J]. 高原气象, 28 (3): 549–555. He Guangbi, Gao Wenliang, Tu Nini. 2009a. The observational analysis of shear line and low vortex over the Tibetan Plateau in summer from 2000 to 2007 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 549–555.
- 何光碧, 高文良, 屠妮妮. 2009b. 两次高原低涡东移特征及发展机制动力诊断 [J]. 气象学报, 67 (4): 599–612. He Guangbi, Gao Wenliang, Tu Nini. 2009b. The dynamic diagnosis on eastwards moving characteristics and developing mechanism of two Tibetan Plateau vortex processes [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67 (4): 599–612.
- 黄楚惠. 2008. 基于天气动力学诊断分析的高原低涡发生发展机制的研究 [D]. 成都信息工程学院硕士学位论文, 122pp. Huang Chuhui. 2008. The analysis of the development mechanism for vortices formed over the Tibetan Plateau based on the synoptic and dynamic diagnosis [D]. M. D. thesis (in Chinese), Chengdu University of Information Technology, 122pp.
- 黄楚惠, 李国平. 2009. 基于螺旋度和非地转湿 Q 矢量的一次东移高原低涡强降水过程分析 [J]. 高原气象, 28 (2): 319–326. Huang Chuhui, Li Guoping. 2009. A case study of plateau vortex moving east ward with heavy rainfalls based on helicity and non-geostrophic wet Q -vector [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (2): 319–326.
- 蒋艳蓉, 何金海, 温敏, 等. 2009. 冬、春季青藏高原东侧涡旋对特征及其对我国天气气候的影响 [J]. 高原气象, 28 (5): 945–954. Jiang Yanrong, He Jinhai, Wen Min, et al. 2009. Characteristic of a couple of vortexes on the east side of Tibetan Plateau from winter to spring and their impact on the weather and climate in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (5): 945–954.
- Jones C, Duane E W, Catherine G. 1998. The Influence of the Madden-Julian oscillation on ocean surface heat fluxes and sea surface temperature [J]. J. Climate, 11 (5): 1057–1072.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–470.
- Lau W K M, Kim M K, Kim K M, et al. 2010. Enhanced surface warming and accelerated snow melt in the Himalayas and Tibetan Plateau induced by absorbing aerosols [J]. Environmental Research Letters, 5 (2): 025204.
- 李斐, 李建平, 李艳杰, 等. 2012. 青藏高原绕流和爬流的气候学特征 [J]. 大气科学, 36 (6): 1236–1252. Li Fei, Li Jiangping, Li Yanjie, et al. 2012. Climatological characteristics of flow around and flow over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1236–1252.
- 李国平, 赵邦杰, 杨锦青. 2002. 地面感热对青藏高原低涡流场结构及发展的作用 [J]. 大气科学, 26 (4): 519–525. Li, Guoping, Zhao Bangjie, Yang Jinqing. 2002. A dynamical study of the role of surface sensible heating in the structure and intensification of the Tibetan Plateau vortexes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(4): 519–525.
- 李永华, 卢楚涵, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系 [J]. 大气科学, 35 (3): 422–434. Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 422–434.
- 刘富明, 濮梅娟. 1986. 东移的青藏高原低涡的研究 [J]. 高原气象, 5 (2): 125–134. Liu Fuming, Fu Meijuan. 1986. A study on the moving eastward lows over Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 5 (2): 125–134.
- Liu Xiaoran, Li Guoping. 2007. Analytical solutions for thermal forcing vortexes in boundary layer and its applications [J]. Applied Mathematics

- and Mechanics, 28 (4): 429–439.
- 李跃清. 1996. 1981 和 1982 年夏半年高原地区低频振荡与南亚高压活动 [J]. 高原气象, 15 (3): 276–281. Li Yueqing. 1996. The low-frequency oscillation over the Qinghai–Xizang Plateau and the activities of the South Asia high during the summer half year in 1981 and 1982 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 15 (3): 276–281.
- 罗四维. 1992. 青藏高原及其邻近地区几类天气系统的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 7–13. Luo Siwei. 1992. The Researches of Several Synoptic Systems of Tibetan Plateau and Nearby Areas (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 7–13.
- 罗四维, 王玉佩. 1984. 1979 年 5–8 月青藏高原地区天气系统的统计分析 [C]// 青藏高原气象科学试验文集 (一). 北京: 科学出版社, 269–278. Luo Siwei, Wang Yubei. 1984. The statistical analysis of weather systems in Tibetan Plateau areas from May to August in 1979 [C]// The Tibetan Plateau Meteorological Experiment Corpus II. Beijing: Science Press, 269–278.
- 罗四维, 何梅兰, 刘晓东. 1993. 关于夏季青藏高原低涡的研究 [J]. 中国科学 B 辑, 23 (7): 778–784. Luo Siwei, He Meilan, Liu Xiaodong. 1993. Research on the Tibetan Plateau vortex [J]. Science in China, Ser.B (in Chinese), 23 (7): 778–784.
- 青藏高原低值系统协作组. 1978. 盛夏青藏高原低涡发生发展的初步研究 [J]. 中国科学, 8 (3): 341–350. Cooperative Research Group of the Tibetan Plateau Low Systems. 1978. The research on the development of the Tibetan Plateau vortex in midsummer [J]. Science in China (in Chinese), 8 (3): 341–350.
- 青藏高原气象科学拉萨会战组. 1981. 夏半年青藏高原 500 毫巴低涡切变线研究 [M]. 北京: 科学出版社, 120–155. Lhasa Group of Tibetan Plateau Meteorology Research. 1981. Research of 500 mb Vortex and Shear Lines over the Tibetan Plateau in Summer [M]. Beijing: Science Press, 120–155.
- 钱正安, 单扶民. 1984. 雨季中高原西部初生涡的分析 [C]// 青藏高原气象科学试验文集 (一). 北京: 科学出版社, 229–242. Qian Zheng'an, Shan Fumin. 1984. The analysis of newborn vortex over western plateau in rainy season [C]// The Tibetan Plateau Meteorological Experiment Corpus I (in Chinese). Beijing: Science Press, 229–242.
- 钱正安, 单扶民, 吕君宁, 等. 1984. 1979 年夏季青藏高原低涡的统计分析 & 低涡产生的气候因子探讨 [C]// 青藏高原气象科学试验文集 (二). 北京: 科学出版社, 182–194. Qian Zheng'an, Shan Fumin, Lü Junning, et al. 1984. The discuss on climate factors and statistic analysis of the Tibetan Plateau vortex in 1979 summer [C]// The Tibetan Plateau Meteorological Experiment Corpus II (in Chinese). Beijing: Science Press, 182–194.
- 孙国武. 1987. 青藏高原气象科学研究成果在天气预报工作中的应用 [C]// 夏半年青藏高原对我国天气的影响. 北京: 科学出版社, 1–11. Sun Guowu. 1987. The applications in weather forecast of Tibetan Plateau meteorological studies [C]// The Influence of Tibetan Plateau to China in Summer. Beijing: Science Press, 1–11.
- 宋雯雯, 李国平, 唐钱奎. 2012. 加热和水汽对两例高原低涡影响的数值试验 [J]. 大气科学, 36 (1): 117–129. Song Wenwen, Li Guoping, Tang Qiankui. 2012. Numerical simulation of the effect of heating and water vapor on two cases of plateau vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 117–129.
- 陶诗言, 罗四维, 张鸿材. 1984. 1979 年 5~8 月青藏高原气象科学实验及其观测系统 [J]. 气象, 10 (7): 2–5. Tao Shiyan, Luo Siwei, Zhang Hongcai. 1984. The Qinghai–Xizang Plateau meteorological science experiment from May to August in 1979 and its observation system [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 10 (7): 2–5.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (1): 61–78.
- 王鑫, 李跃清, 郁淑华, 等. 2009. 青藏高原低涡活动的统计研究 [J]. 高原气象, 28 (1): 64–71. Wang Xin, Li Yueqing, Yu Shuhua, et al. 2009. Statistical study on the plateau low vortex activities [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (1): 64–71.
- 姚菊香, 李丽平, 罗璇, 等. 2012. 提取准双周和准一月低频振荡的 Lanczos 滤波器及其应用 [J]. 大气科学学报, 35 (2): 221–228. Yao Juxiang, Li Liping, Luo Xuan, et al. 2012. Lanczos filter suitable for filtering quasi-two-week and quasi-one-month oscillations and its applications [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 35 (2): 221–228.
- 郁淑华, 高文良. 2006. 高原低涡移出高原的观测事实分析 [J]. 气象学报, 64 (3): 392–398. Yu Shuhua, Gao Wenliang. 2006. Observational analysis on the movement of vortices before/after moving out the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64 (3): 392–398.
- 郁淑华, 高文良, 顾清源. 2007. 近年来影响我国东部洪涝的高原东移涡环流场特征分析 [J]. 高原气象, 26 (3): 466–475. Yu Shuhua, Gao Wenliang, Gu Qingyuan. 2007. The middle-upper circulation analyses of the plateau vortex moving out of plateau and influencing flood in East China in recent years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (3): 466–475.
- 郁淑华, 高文良, 彭骏. 2012. 青藏高原低涡活动对降水影响的统计分析 [J]. 高原气象, 31 (3): 592–604. Yu Shuhua, Gao Wenliang, Peng Jun. 2012. Statistical analysis on influence of Qinghai–Xizang Plateau vortex activity on precipitation in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (3): 592–604.
- 宇婧婧, 刘屹岷, 吴国雄. 2011a. 冬季青藏高原大气热状况分析 I: 气候平均 [J]. 气象学报, 69 (1): 79–88. Yu Jingjing, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2011a. An analysis of the diabatic heating characteristic of atmosphere over the Tibetan Plateau in winter I: Climatology [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (1): 79–88.
- 宇婧婧, 刘屹岷, 吴国雄. 2011b. 冬季青藏高原大气热状况分析 II: 年际变化 [J]. 气象学报, 69 (1): 89–98. Yu Jingjing, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2011b. An analysis of the diabatic heating characteristic of atmosphere over the Tibetan Plateau in winter II: Interannual variation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (1): 89–98.
- 中国气象局成都高原气象研究所. 2010~2012. 青藏高原低涡、切变线年鉴 (1998~2005, 2007~2011) [M]. 北京: 科学出版社. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration. 2010–2012. Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbooks (1998–2005, 2007–2011) (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 朱丽华, 范广洲, 董一平, 等. 2011. 青藏高原夏季 500 hPa 纬向风的时空演变特征及其与我国降水的关系 [J]. 大气科学, 35 (1): 168–178. Zhu Lihua, Fan Guangzhou, Dong Yiping, et al. 2011. The spatial–temporal structure of 500-hPa zonal wind in summer in the Tibetan Plateau and its relationship to the precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 168–178.