

潘阳, 李建, 宇如聪. 2011. 东移西南低涡空间结构的气候学特征 [J]. 气候与环境研究, 16 (1): 60–70. Pan Yang, Li Jian, Yu Rucong. 2011. Climatic characteristics of the spatial structure of the eastward-moving southwest vortex [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 60–70.

东移西南低涡空间结构的气候学特征

潘阳^{1,2,3} 李建⁴ 宇如聪⁵

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 国家气象信息中心, 北京 100081

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

5 中国气象局, 北京 100081

摘要 对1991~2004年夏季(6~8月)西南四川盆地的低涡活动进行统计分类, 比较分析了移出型和停滞型两类西南低涡生成初期的合成环流场, 总结出影响低涡东移的三维环流结构的气候学特征: 东亚中纬度地区对流层中高层的冷空气入侵造成中高层气温偏低, 位势高度降低, 伴随冷偏差中心南侧 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 由对流层顶至850 hPa都出现偏强西风, 最大的西风偏差位于长江下游地区上空200 hPa。一方面, 高层风速差异的纬向梯度加强了长江中游地区的高空辐散, 在西南低涡东部形成有利于降水和气旋性环流发展的动力抬升机制。另一方面, 对流层低层的西风偏差在青藏高原南麓至我国东部长江以南形成一条异常的水汽输送带, 加强了低涡南侧的偏西风水汽输送作用, 为低涡东部的降水潜热反馈作用提供了充足的水汽。西南低涡在这样有利的环流形势和水汽条件下更容易移出盆地。

关键词 西南低涡 合成分析 环流背景 三维结构 水汽输送

文章编号 1006-9585 (2011) 01-0060-11 **中图分类号** P466 **文献标识码** A

Climatic Characteristics of the Spatial Structure of the Eastward-Moving Southwest Vortex

PAN Yang^{1,2,3}, LI Jian⁴, and YU Rucong⁵

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *National Meteorological Information Center, Beijing 100081*

3 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

4 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

5 *China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract Based on the statistical analyses, the vortices arising in summer (JJA) from 1991 to 2004 are divided into two categories, that is, the moving and stagnant ones. Based on the comparison of composite circulation in these two kinds of vortex cases, the three-dimensional structure of the background general circulation and the influence of the moisture condition on the development and movement of the southwest vortex are studied. The results

收稿日期 2009-06-15 收到, 2010-09-20 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2004CB418304, 国家自然科学基金 40625014、40705025

作者简介 潘阳, 女, 博士, 主要从事中尺度天气分析和数值模拟。E-mail: pany@coma.gov.cn

show that in the moving vortex cases, the atmosphere in the middle and upper troposphere around middle latitudes over the eastern part of the Tibetan Plateau is much colder than that in the stagnant vortex cases caused by the cold air invading. The colder air leads to the lower geopotential height, on the south side of which, the stronger westerly winds prevail from the tropopause to 850 hPa, with the maximum on 200 hPa. The great gradient of the west wind velocity difference at the upper levels enhances the divergence and upflows over the eastern part of the Sichuan Basin. And the stronger westerly winds at the lower levels result in the stronger moisture transport in the southwestern part of the Sichuan Basin. It benefits the eastward movement of the southwest vortex.

Key words southwest vortex, composite analysis, circulation background, three-dimensional structure, moisture transport

1 引言

西南低涡的发展东移常会造成长江及黄淮流域的暴雨和洪涝灾害。认识西南低涡的生成和移动规律对西南地区和长江流域的气象预报服务有重要意义,所以西南低涡活动及其对降水影响的研究一直广受关注。

西南低涡的移动与周围天气及气候系统的关系密切,此前研究普遍认为以“引导气流”为主的环境流场对其移动起重要作用(陈忠明, 1989, 1991)。陈忠明等(2003)指出,中纬度长波脊前的西北气流以及副热带高压西北的西南气流的引导作用是造成 1998 年夏季西南涡路径偏东的重要原因。刘国忠等(2007)通过西南涡个例的天气学合成分析,讨论了副热带高压和印度低槽对影响华南地区低涡的移动路径的影响。还有学者则针对高原涡(高文良和郁淑华, 2007; 郁淑华等, 2007),通过比较低涡移出频繁的 6~8 月和稀少的 5 月、9 月的平均环流场差异,总结出当孟加拉湾季风槽偏北、副热带高压西伸、南亚高压东伸,高原东部由西北气流控制时,高原低涡易向东移出高原。上述统计研究表明,与南亚高压和高纬冷空气活动有关的西北气流以及受副热带高压和季风槽控制的西南暖湿气流是影响西南地区低值系统东移的重要环流因子。但其影响机制还有待进一步研究和总结。

从天气个例分析角度看,西南涡东移过程中常伴随着中纬度短波槽的发展和东移,形成“北槽南涡”型,槽后冷空气入侵造成低涡斜压结构的发展,槽后的冷平流和槽前的暖平流能够增加非热成风涡度,从而有利于低涡的移动(朱乾根等, 1981; Ma and Bosart, 1987; 斯公望, 1989;

丁治英和吕君宁, 1991; 姜勇强等, 2004)。除了冷空气作用,还有研究表明,西南低空急流发展及低涡结构的非对称性、与高层强迫相联系的凝结潜热释放以及潜热加热与低涡动力结构的耦合均会对低涡的东移产生影响(陈忠明, 1998; Chang et al., 2000; Pan et al., 2008)。

上述研究或是针对某一特定活动路径的低涡对其整个天气过程的合成分析来总结低涡移动的天气形势,或是基于低涡移出频次多寡月份的平均环流比较间接讨论影响低涡移出的气候背景,又或是基于个例做诊断分析而具有特殊性,并没有系统地对移出和不移出低涡的环流形势进行比较分析。尽管西南低涡的移出频次存在季节差异,但移出的形式和原因复杂多样,人们需要更直接更具普遍性的环流影响因子来指导西南低涡东移的预报。

另外,受青藏高原影响,我国西南和东部地区梅雨期降水的水汽来源和输送条件十分复杂(徐祥德等, 2002; Xu et al., 2003)。不同类型的低涡过程,其水汽来源与输送形式有很大差异。2003 年梅雨期出现了 7 次西南涡和高原涡的东移,期间夏季印度季风和南海夏季风环流是向江淮流域输送水汽的主要通道(周玉淑等, 2005);而停滞西南低涡暴雨的水汽则主要来源于南海和西太平洋(Liang et al., 2005; 孙建华等, 2005; 于波和林永辉, 2008)。数值试验亦表明,降水的潜热释放对于低涡的发展有很大影响(Kuo et al., 1988; 赵平等, 1992)。上述研究都隐含着水汽条件对西南低涡的生成、活动和降水的重要影响。

基于前人的工作,本文对 1991~2004 年夏季(6~8 月)西南地区的低涡活动规律进行统计分类,通过比较西南地区移出型和停滞型低涡的三维环流结构差异,系统分析环流和水汽条件对西南低涡活动的影响,为指导西南低涡东移的预报

提供参考。

2 资料介绍

分析所用的环流资料是 1991~2004 年 6 月 1 日至 8 月 31 日每天 4 个时次, 分别为 02 时、08 时、14 时和 20 时(北京时间, 下同)的日本全球再分析资料 JRA-25 (Onogi et al., 2007)。该资料水平分辨率为 1.25° (纬度) $\times 1.25^{\circ}$ (经度), 垂直方向 23 层(1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10、7、5、3、2、1、0.4 hPa)。所用数据包括各标准等压面上的位势高度、温度、水平矢量风、垂直压力速度和比湿等常规气象要素。

3 1991~2004 年 6~8 月西南地区低涡活动的统计分析

本文定义西南低涡个例的统计规则是: 连续 2 个时次, 对流层中下层 850 hPa 或 700 hPa 等压面上, 风场出现闭合的气旋性环流或者至少具有一根闭合低值(间隔 5 hPa)等高线, 且闭合环流中心或低压中心生成时位于四川盆地 ($27^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $104^{\circ}\text{E}\sim 109^{\circ}\text{E}$) 范围内。根据这个标准, 1991~2004 年 6~8 月在上述区域共出现低涡 82 个, 其中有 44 个低涡生成后气旋性环流中心移出盆地, 将其归类为“移出型低涡”; 其余 38 个则在盆地内发展消亡, 归为“停滞型低涡”。图 1 给出分别

由 38 个停滞型和 44 个移出型低涡合成的低涡生成初期(由生成时刻起取头 3 个时次) 850 hPa 水平风场, 结果显示: 在西南四川盆地地区均有明显的闭合的气旋性环流中心, 盆地东部下游及我国南方地区均受西南气流控制, 两者低层的流场形态十分相似。

分别统计两类低涡在西南地区的维持时间, 即每次过程闭合气旋性环流中心或低压中心在四川盆地维持的时次个数, 再按照不同的维持时间统计两类低涡出现的次数(表 1)。在不移出的 38 个低涡中有 89% (34 个) 能够维持 1 d (4 个时次) 以上, 其中有 11 个在西南地区维持了 2 d (8 个时次) 以上。在移出的 44 个低涡中, 有 68% (30 个) 生成之后维持不到 1 d (1~3 个时次) 就移出四川盆地; 剩下的 32% (14 个) 1 d 后 (4 个时次以上) 才移出, 其中有 5 个低涡 2 d 后 (8 个时次以上) 才东移。上述统计结果表明, 大多数移出型低涡在西南地区的维持时间要比停滞型低涡短, 亦说明对于大多数低涡, 决定其移出与否的环流条件在它们生成初期即有表现。

表 1 低涡在西南地区不同维持时次(个) 情况下出现的次数
Table 1 The occurrence times of the southwest vortices in the southwestern part of China under different durations

	维持时次						
	≤ 3	4	5	6	7	8	≥ 9
停滞型低涡	4	5	5	7	6	3	8
移出型低涡	30	1	3	4	1	3	2
合计	34	6	8	11	7	6	10

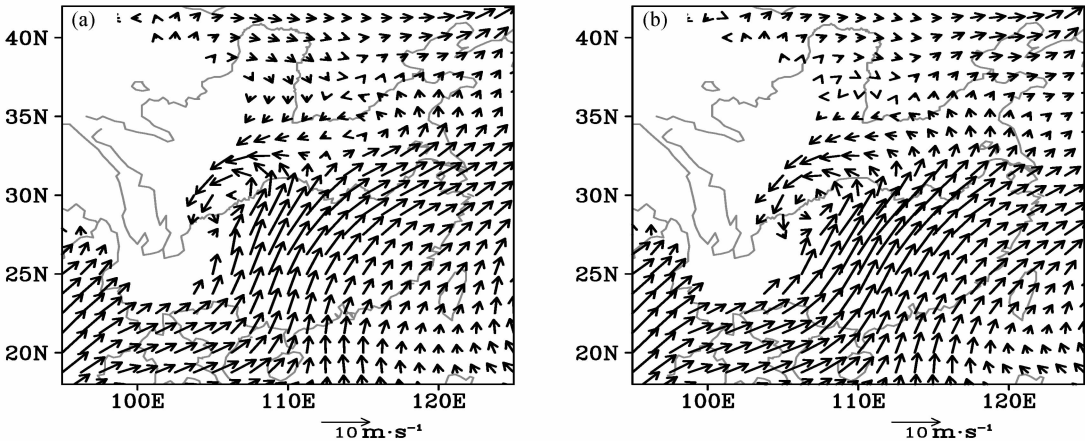


图 1 (a) 停滞型和 (b) 移出型低涡生成初期合成的 850 hPa 水平风场
Fig. 1 The composite 850-hPa horizontal wind vector with (a) stagnant vortex cases and (b) moving vortex cases

对两类低涡生成初期的平均环流进行合成分析以考察停滞型低涡和移出型低涡产生时的环流背景。考虑到绝大多数移出型低涡生成后不到 1 d 就移出四川盆地，这里分别取两类低涡由生成时刻起头 3 个时次的平均环流场的合成来说明两者的差异。文中所有差异均为移出型减停滞型的结果。

4 影响低涡移出西南地区环流特征的合成分析

4.1 两类低涡活动的环流背景

在对流层中层（图略），两类低涡生成初期有着比较相似的环流特征：青藏高原东部四川盆地北部至河套地区有一个浅槽发展，高原北部至贝加尔湖为弱的高压脊，我国北方处在脊前西北气流的控制下，弱冷空气由高原北缘向南侵入四川盆地。冷空气能够加强盆地高空斜压不稳定发展，利于低层气旋性环流的发展与维持（Ma and Bosart, 1987）。西太平洋副热带高压 588 dagpm 脊线西伸至（23°N, 120°E）附近，我国南方对流层中低层处在脊线西北侧的西南风控制下，较强的南风分量利于南海的水汽向北输送。两者略有差异的是，在移出型低涡事件中，东亚东部中纬度地区还有一个明显的低槽发展，造成东亚大陆东岸东西向的位势梯度加大，偏北风分量增加，中高纬的冷空气向南的活动更强烈，青藏高原东部的低槽也发展得更深。与此同时，副热带高压 588 dagpm 脊线伸展到了（20°N, 117°E）附近，我国南方中低层西风分量明显增加，加强了西南地区的水汽向下游东部地区输送。

两类低涡环流型的显著差异出现在对流层中上层。在停滞型低涡事件中，青藏高原上空气温偏高，说明南亚高压中心主体偏强。高压脊线东伸至东亚大陆东部，其北侧副热带西风急流轴位于 40°N，四川盆地上空正好受急流出口右侧的辐散气流控制，有利于对流及降水的发展（图 2a），低涡易在盆地发展和维持。但在移出型低涡事件中，青藏高原东部至朝鲜半岛对流层中高层大气温度普遍偏低。图 2c 给出两类低涡生成初期合成的 500 hPa 与 200 hPa 平均温度的差异，可以看到，冷偏差占据了长江以北大部分地区，中心位

于华北地区（40°N, 120°E）附近，强度达 2.5 °C 以上。相应地，南亚高压脊线南压，华北上空等温线更密集，伴随西风急流轴的位置向东南伸展，将高层辐散控制在长江中游地区（图 2b），这样的环流形势则不利于低涡在盆地维持，反而有利于下游东部地区降水和低层气旋性环流的发展。

4.2 两类低涡位势高度和温度的差异

比较分析表明，两类低涡环流背景最显著的差异在于：移出型低涡中东亚地区中纬度对流层中高层的温度相对于停滞型低涡明显偏冷。为了更清楚地考察两类低涡环流背景三维空间结构的差

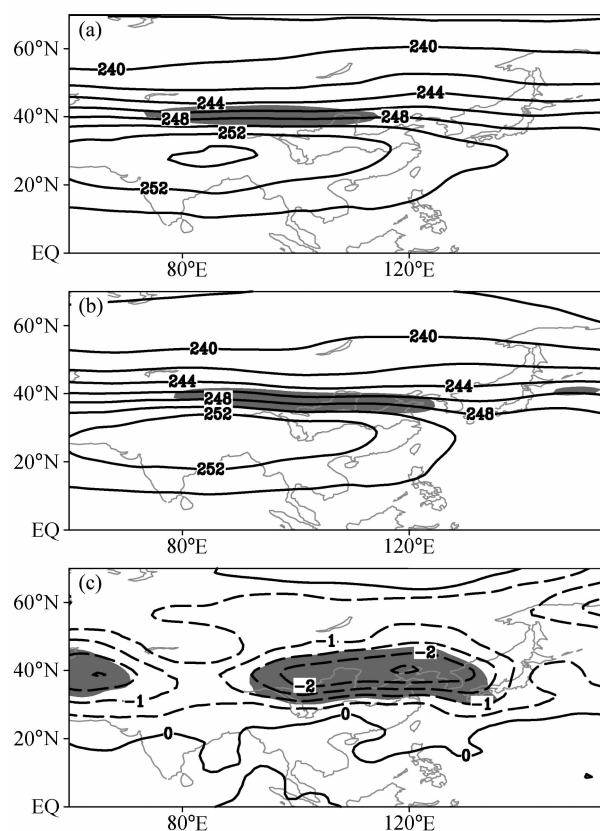


图 2 (a) 停滞型和 (b) 移出型低涡生成初期合成的 500~200 hPa 平均温度（单位：K，阴影表示 200 hPa 副热带西风急流的风速 $> 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），(c) 移出型低涡与停滞型低涡合成的 500~200 hPa 平均温度的差异（单位：K，阴影表示 t 检验达 0.05 的显著性水平）

Fig. 2 The composite temperature (K) averaged from 500 hPa for 200 hPa for (a) stagnant vortex cases and (b) moving vortex cases (shaded areas denote the composite velocity exceeds $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 200 hPa), and (c) difference between the moving and stagnant cases (shaded areas are above the 0.05 significance level according to the t -test)

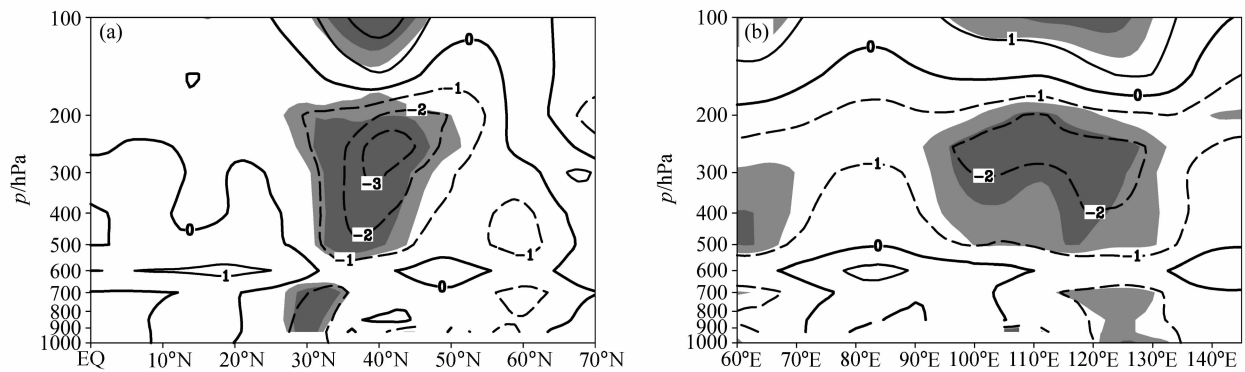


图3 移出型低涡与停滞型低涡温度差异(单位: K)的垂直结构: (a) 100°E~120°E 纬向平均的纬度—高度剖面; (b) 30°N~50°N 经向平均的经度—高度剖面。浅色和深色阴影分别表示 t 检验达 0.05 和 0.01 显著性水平

Fig. 3 The vertical structures of the temperature differences (K) between the moving and the stagnant vortex cases; (a) Latitude-height cross section averaged from 100°E to 120°E; (b) longitude-height cross section averaged from 30°N to 50°N. Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test, respectively

异, 图3给出这一冷偏差的垂直结构。冷偏差在对流层高层 250 hPa 最强, 中心主体位于 (30°N~50°N, 95°E~130°E)。随高度降低, 冷偏差中心轴逐渐向东和向南伸展, 在对流层低层影响至 30°N 附近长江中下游地区。温度场的差异说明, 在移出型低涡个例中, 东亚中纬度对流层中高层的冷空气入侵十分显著。

对流层中高层降温造成对流层气柱收缩, 位势高度降低, 所以东亚中纬度地区对流层中高层都出现了显著的位势高度负偏差, 水平方向覆盖了我国北方大部分地区, 中心位于华北至渤海湾地区, 强度达 100 gpm (图4)。从垂直结构上看, 位势负值偏差中心位于冷偏差中心上方 150 hPa (图5), 其中心轴线及影响范围与对流层的冷偏差中心一致, 随高度降低逐渐向南、向东倾斜, 一直向下延伸至对流层中层 600 hPa 左右, 到 500 hPa 低值中心已伸至 35°N 以南, 有利于加强高原东部的低槽。这一结果说明在移出型低涡事件中, 中高层冷空气活跃, 造成我国东部地区气温和位势高度降低, 大气的斜压性增强。统计分析结果亦表明, 与高纬冷空气活动相联系的斜压系统发展, 对上游低涡系统东移和发展十分有利 (郁淑华等, 2007)。

4.3 两类低涡风场及垂直环流的差异

对流层中高层大气的温度和位势高度的偏差结构势必会对东亚地区的风场产生重要影响。位势高度降低使得冷偏差南侧 (北侧) 向北的气压

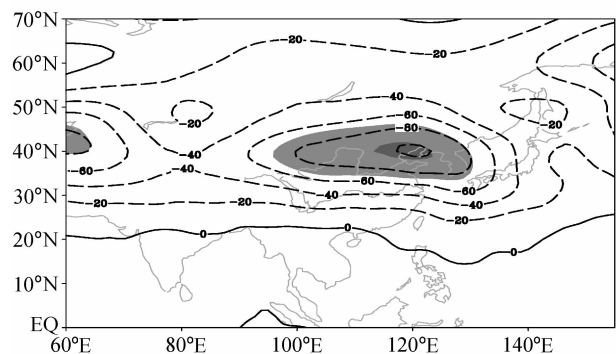


图4 移出型低涡和停滞型低涡 150 hPa 位势高度的差异 (单位: gpm), 浅色和深色阴影表示 t 检验达 0.05 和 0.01 的显著性水平

Fig. 4 The geopotential height difference (gpm) at 150 hPa between the moving and stagnant vortex cases. Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test, respectively

梯度加强 (减弱), 相应地西风会加强 (减弱) 以保持科里奥力和气压梯度力间的地转平衡。这样在对流层中高层冷偏差的上方出现了显著的气旋性环流差异 (图6), 伴随在冷偏差及位势负值偏差中心的南侧出现了显著的西风偏差, 北侧出现东风偏差 (图7), 纬向风偏差中心均位于 200 hPa, 强度分别超过了 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据热成风关系, 对流层顶的西风偏差中心与其北侧的冷偏差中心轴一样随高度降低向南倾斜, 一直向下延伸至低层 850 hPa 的 20°N~30°N 之间。正是这支偏强的西风对西南低涡的移出产生了重要影响。

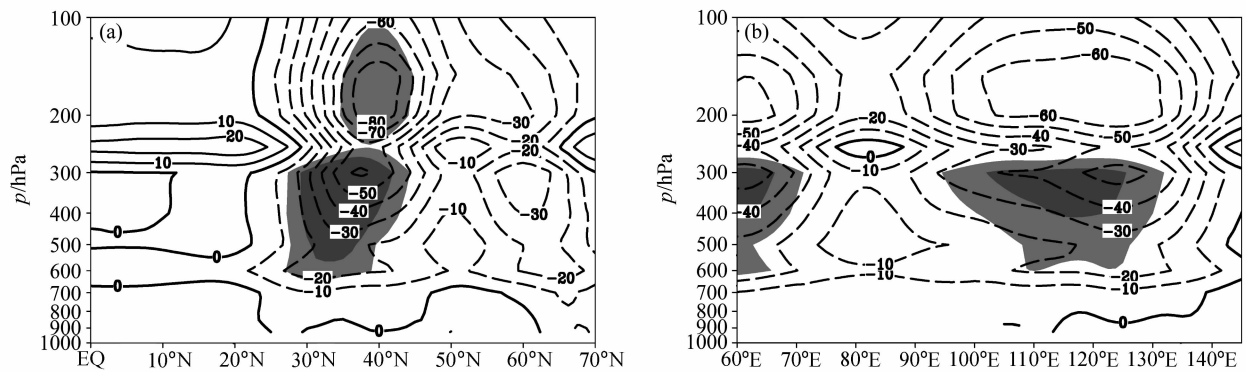


图5 移出型低涡和停滞型低涡位势高度差异(单位: gpm)的垂直结构: (a) 100°E~120°E 纬向平均的纬度-高度剖面; (b) 30°N~50°N 经向平均的经度-高度剖面。浅色和深色阴影分别表示 t 检验达 0.05 和 0.01 的显著性水平

Fig. 5 The vertical structures of the geopotential height differences (gpm) between the moving and stagnant vortex cases: (a) Latitude-height cross section averaged from 100°E to 120°E; (b) longitude-height cross section averaged from 30°N to 50°N. Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test, respectively

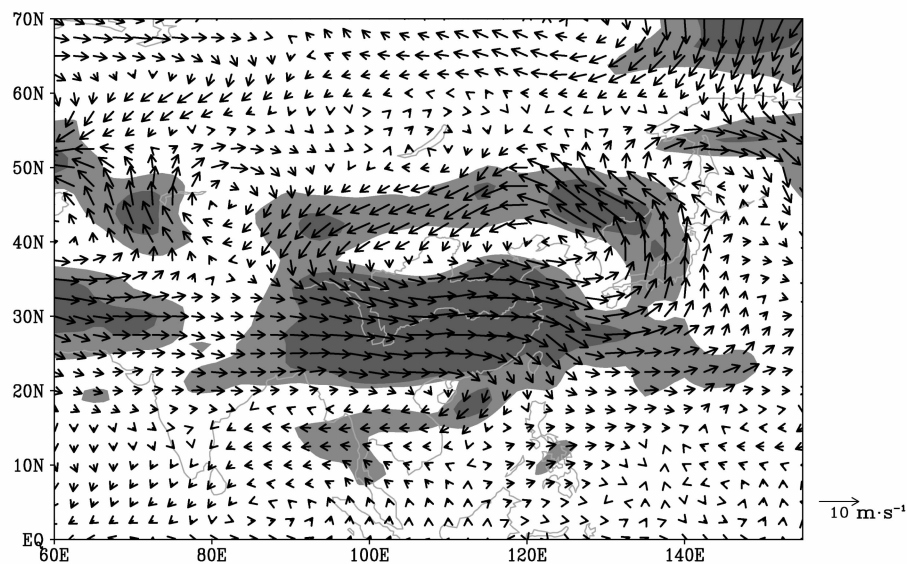


图6 移出型低涡和停滞型低涡 300~150 hPa 平均的水平风矢量差异。浅色和深色阴影分别表示 t 检验达 0.05 和 0.01 的显著性水平

Fig. 6 The wind vector differences averaged from 300 hPa to 150 hPa between the moving and stagnant vortex cases. Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test, respectively

考察对流层 200 hPa、500 hPa 和 700 hPa 上西风偏差的水平分布(图略),发现显著偏强的西风区呈带状位于冷偏差中心南侧,由孟加拉湾北部沿青藏高原南麓向东覆盖了整个中国长江流域及南方地区,并一直延伸到西太平洋上,大值中心从对流层高层 200 hPa 的 30°N、中层 500 hPa 的 25°N 到低层 700 hPa 的 25°N 以南,位置随高度降低不断南移。这种由高到低贯穿整个对流层的偏西风差异不仅有利于加强高原东部环境流场以及“引导气流”向下游地区的涡度平流输送作

用(陈忠明, 1989),更能够增强青藏高原南麓来自低纬印度洋的水汽输送,为低涡移出后发展所需要的水汽提供保障。两类低涡的水汽输送差异将在第 4 节详细讨论。

两类低涡对流层的西风差异对四川盆地及下游东部的垂直环流也造成了一定影响。对流层最大的西风偏差中心位于 112°E~122°E 之间 200 hPa 附近,在它上游方向 112°E 对流层中高层强烈的风速差梯度造成了较强的辐散作用,对应地在 (28°N~36°N, 109°E~115°E) 附近出现了一

支偏强的上升运动(图8),加强了四川盆地以东长江中游地区的动力抬升。Chang et al. (2000)的个例分析也表明,高层西风急流造成的辐散能够对低层西南低涡东部气旋性扰动的发展起到重要的触发作用。相反地,由于东部下游上升运动的强烈发展,在盆地地区对流层中低层则出现了较强的下沉补偿气流差(图8b),抑制降水与气旋性环流的发展。这种上升运动的差异更有利于低涡及降水在盆地以东的地区发展。此外,这种

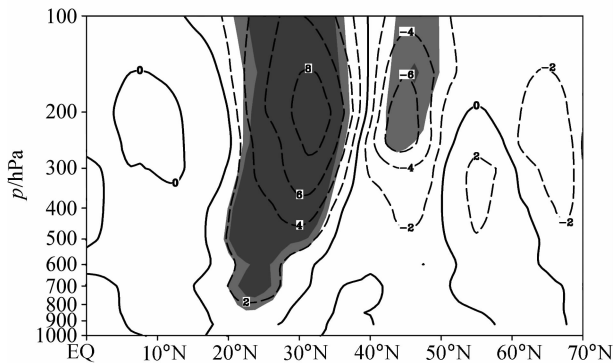
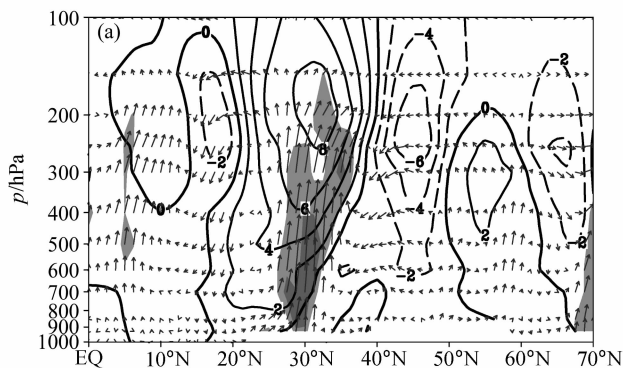


图7 移出型低涡和停滞型低涡 $100^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 纬向平均的纬向风差异(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的纬度-高度图。浅色和深色阴影分别表示 t 检验达 0.05 和 0.01 的显著性水平

Fig. 7 The latitude-height cross section of the zonal wind difference (units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) between the moving and stagnant vortex cases averaged from 100°E to 120°E . Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test, respectively



下游西风增强对上游的影响作用与 Li et al. (2005) 指出的高原东部下游西风增强导致四川盆地上空辐散增强,从而造成该地区层云偏多的动力作用也是类似的,只是辐散的层次更高,位置也偏东,以致影响到盆地以东的长江中游地区。

4.4 两类低涡水汽输送的差异

低涡的发展需要充足的水汽,受大气环流控制的水汽输送形态必然会对低涡的发展和移动产生影响。为进一步考察两类低涡的水汽输送条件差异,图9给出沿 90°E 和 109°E 西风水汽通量的经向垂直剖面。可以发现,受对流层西风差异的影响,相对于停滞型低涡,移出型在 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间整个对流层来自西边界孟加拉湾地区的水汽输送都偏强,特别是在对流层的中低层(图9a)。由西南低涡南侧向下游东部地区输送的水汽也明显偏多(图9b)。偏强的西风水汽输送自 300 hPa 向下逐渐增强,最大输送层次位于对流层低层 700 hPa 和 850 hPa。

图10给出两类低涡对流层低层 700 hPa 和 850 hPa 水汽输送的差异。偏强的西风水汽输送在青藏高原南麓至我国东部江南地区 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间造成了一条异常的水汽输送带(图10a)。这条异常水汽通道很可能始于 80°E 孟加拉湾西部的洋面,在 850 hPa 的 $80^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 存在一支显著向北的水汽输送(图10b),它在青藏高原南麓折向东,当

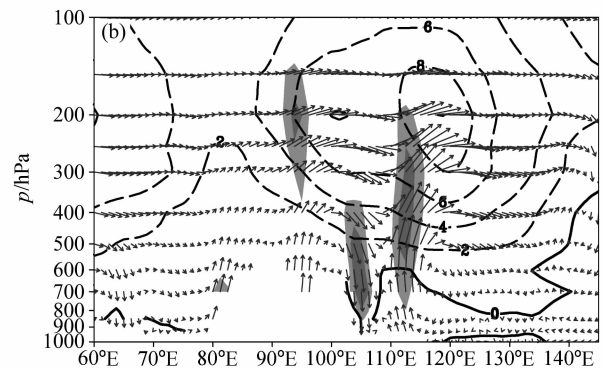


图8 移出型低涡与停滞型低涡 (a) $109^{\circ}\text{E}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 纬向平均的纬向风差异(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 等值线)和垂直环流差异(矢量箭头)的纬度-高度剖面 and (b) $28^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 经向平均的纬向风差异(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 等值线)和垂直环流差异(矢量箭头)的经度-高度剖面。浅色和深色阴影分别表示垂直速度(单位: $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)差值 t 检验达 0.05 和 0.01 的显著性水平

Fig. 8 (a) Latitude-height cross section of the zonal wind difference (units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, isolines) and vertical circulation difference (arrow) averaged from 109°E to 115°E , and (b) longitude-height cross section of the zonal wind difference (units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, isolines) and vertical circulation difference (arrow) averaged from 28°N to 36°N . Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test about the vertical velocity difference (units: $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)

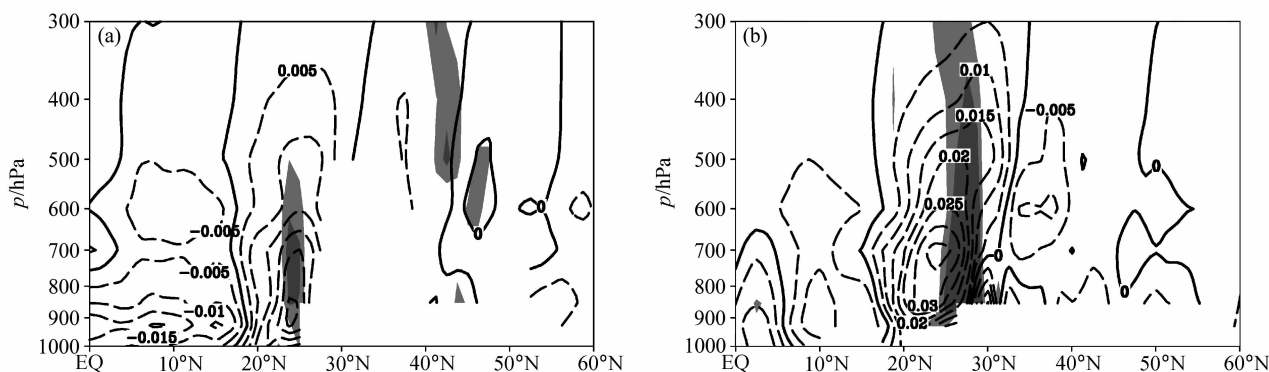


图9 移出型低涡与停滞型低涡沿 (a) 90°E 和 (b) 109°E 西边界水汽通量差异 (单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的纬向垂直剖面。浅色和深色阴影分别为 t 检验达 0.05 和 0.01 显著性水平

Fig. 9 The latitude-height cross section of the moist flux difference ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) from the west at (a) 90°E and (b) 109°E between the moving and stagnant vortex cases. Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test, respectively

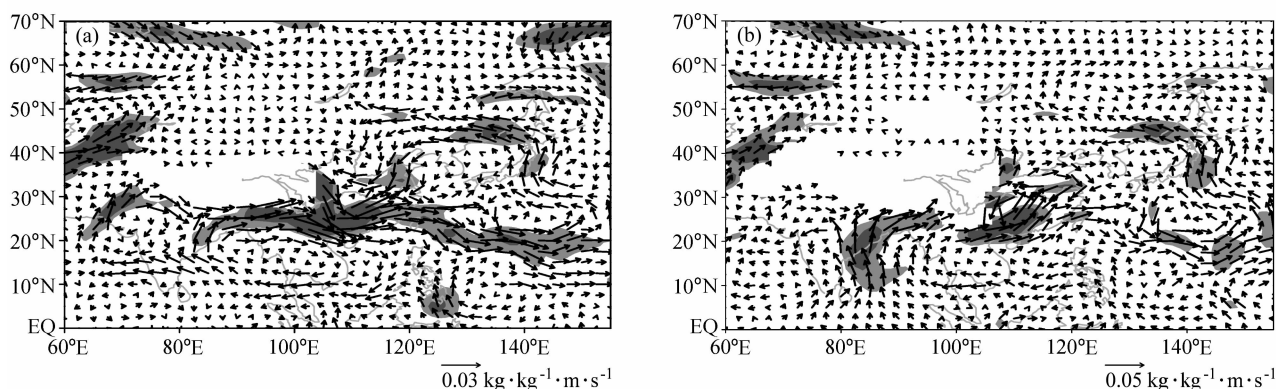


图10 移出型低涡和停滞型低涡 (a) 700 hPa 和 (b) 850 hPa 水汽输送差异。浅色和深色阴影分别表示 t 检验达 0.05 和 0.01 显著性水平

Fig. 10 The moisture transport difference at (a) 700 hPa and (b) 850 hPa between the moving and stagnant vortex cases. Light and dark shaded areas are above the 0.05 and 0.01 significance levels according to the t -test, respectively

气流遇到高大地形后抬升,水汽就汇入 700 hPa 偏西气流继续向东输送,经青藏高原南麓和云贵高原由西边界进入我国 (图 10a)。这样的水汽输送差异有利于在云贵高原东部地区聚集较多的水汽 (图略),为低涡东部气旋性环流发展需要的潜热反馈提供了更有力的保障。

5 结论和讨论

本文对 1991~2004 年 6~8 月四川盆地的低涡活动进行统计分类,将低涡分为移出型和停滞型两类。基于对这两类低涡生成初期的平均环流的合成比较分析,总结了影响低涡移动的三维空

间结构的气候学特征,影响西南低涡东移环流背景的概念模型如图 11 所示。

移出型低涡在我国中纬度地区对流层中高层的温度相对于停滞型低涡显著偏冷,对流层中高层位势高度降低,在冷偏差南侧 20°N~30°N 之间出现了显著偏强的西风气流。一方面,最大的西风偏差位于大陆东部对流层上层 200 hPa,其上风方向风速差梯度造成中高层辐散增加,加强了长江中游地区的动力抬升。另一方面,影响至对流层中低层的西风偏差还加强了低纬孟加拉湾北侧沿高原南麓向我国境内的水汽输送,在云贵高原东部及巫山以南地区堆积了较多的水汽。基于西南低涡东移的个例分析表明 (Pan et al., 2008),

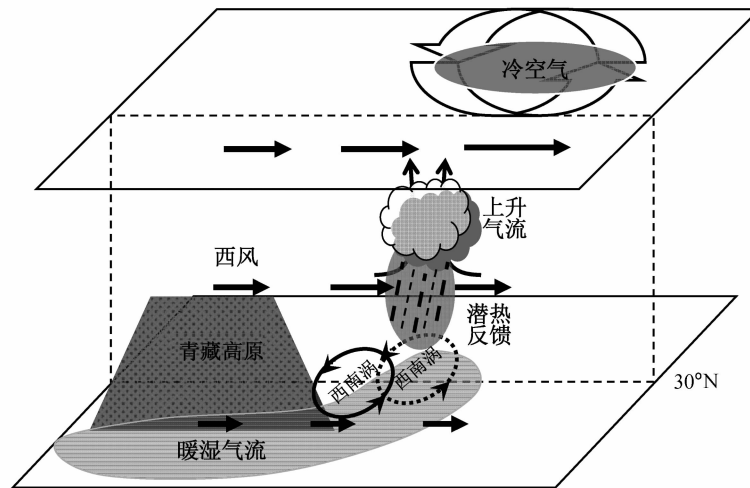


图 11 影响西南低涡东移环流背景的概念图

Fig. 11 The concept of the background influencing the movement of the southwest vortex

在充足水汽供应下，配合低涡东部强烈的气旋性辐合与上升运动，降水的凝结潜热释放能够与低层的气旋性环流形成一种正反馈作用，使低涡东部的位涡迅速增长，造成低涡系统向东传播。在本文的分析中，移出型低涡中低纬相对偏强的西风造成的动力抬升和水汽输送形势差异均有利于这种正反馈作用在四川盆地以东地区发展，因而对低涡的移出更为有利。

以往的研究表明，与偏西气流主导的环境流场对低涡系统的东移影响显著，由西北气流主导的中高纬冷空气和西南暖湿气流的相互作用对低涡的移出十分关键。本文的结果进一步印证了偏西气流对西南低涡东移的作用。两类低涡环流型的三维结构差异还表明，偏强的西风气流与东亚对流层中高层的冷空气活动关系密切，这也暗示着低涡的移出绝不仅仅是由局地的热动力条件或反馈作用造成，更受到大尺度环流形势的影响。从东亚地区的范围上看，它与夏季东亚大槽的位置偏西有关，因为东亚地区中高纬冷空气活跃与东亚大槽的发展有着紧密联系，而槽的加深必然会使其底部的西风加强。

对流层中高层冷空气活动的差异对 500 hPa 上影响系统的活动也造成了显著影响。比较两类低涡生成至发展阶段的合成环流场演变（图略），发现停滞型低涡由生成到发展阶段，青藏高原东侧由一个停滞发展的浅槽控制，而下游东部地区则无明显的低槽发展。但在移出型低涡中，大陆

东部的东亚大槽从低涡生成初期就一直很明显，槽后的冷空气南下加强了高原东部高空槽的发展和东移，引导低涡移出盆地，这与经典的“北槽南涡”型是一致的。这说明东部地区对流层中高层冷空气加强及斜压系统的发展对西南低涡的东移和发展起着十分重要的作用，一些个例分析也都支持这一结论（Chang et al., 2000；姜勇强等，2004），这对于西南低涡东移的预报具有非常重要的参考价值。

此外，文中影响西南地区低涡移出的对流层中高层的冷偏差中心的位置与 Yu et al. (2004) 提到的影响东亚年代际气候变化的东亚对流层中上层冷却中心的结构很相似。东亚对流层上层的冷却会造成副热带急流位置偏南，强度增大（Yu and Zhou, 2007），有利于加强冷却中心南侧上空的高层辐散和低层对流的发展，从而造成江淮流域地区夏季多雨的特征（Zhou and Yu, 2005）。赵平等（2007）针对夏季东亚对流层中上层扰动温度的经验正交函数（EOF）分解第一模态也分析出与冷偏差类似的垂直结构特征。这一环流特征与文中利于低涡移出的环流背景比较类似，并且与低涡的移出有利于下游江淮地区降水发展的结果也是一致的。这其中的联系还需要更细致的分析。

参考文献 (References)

Chang C, Li Y, Chen G. 2000. A numerical simulation of vortex

- development during the 1992 East Asian summer monsoon onset using the Navy's Regional Model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 1064–1631.
- 陈忠明. 1989. 环境作用与西南低涡移动的初步研究 [J]. *高原气象*, 8 (4): 301–312. Chen Zhongming. 1989. The preliminary study of effect of environment flow fields on movement of southwest vortex [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 8 (4): 301–312.
- 陈忠明. 1991. 大尺度环境场影响中低层次天气尺度系统发展和移动的初步研究 [J]. *气象学报*, 49 (4): 574–580. Chen Zhongmin. 1991. A preliminary study of the effect of environment flow fields on development and movement of subsynoptic scale systems [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 49 (4): 574–580.
- 陈忠明. 1998. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析 [J]. *应用气象学报*, 9 (3): 273–282. Chen Zhongmin. 1998. A case analysis on mesoscale structure of severe southwest vortex [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 9 (3): 273–282.
- 陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 等. 2003. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨 [J]. *高原气象*, 22 (2): 162–167. Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Wenbing, et al. 2003. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 22 (2): 162–167.
- 丁治英, 吕君宁. 1991. 西南低涡动态的合成诊断 [J]. *高原气象*, 10 (2): 156–165. Ding Zhiying, Lü Junning. 1991. Composite diagnoses of the SW China vortexes [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 10 (2): 156–165.
- 高文良, 郁淑华. 2007. 高原低涡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.
- 姜勇强, 张维桓, 周祖刚, 等. 2004. 2000 年 7 月西南涡暴雨过程的分析和数值模拟 [J]. *高原气象*, 23 (1): 55–61. Jiang Yongqiang, Zhang Weihuan, Zhou Zugang, et al. 2004. Analyses and numerical simulations of southwest vortex rainstorm processes in July 2000 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (1): 55–61.
- Kuo Y, Cheng L, Bao J W. 1988. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Part I: Evolution of a mesoscale southwest vortex [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116: 2481–2504.
- Li J, Yu R, Zhou T, et al. 2005. Why is there a early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau? [J]. *J. Climate*, 18: 4660–4668.
- Liang P, Li W, Chen L, et al. 2005. Features and sources of the anomalous moisture transport for the severe summer rainfall over the upper reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 19 (4): 202–215.
- 刘国忠, 丁治英, 贾显锋, 等. 2007. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究 [J]. *气象*, 33: 45–50. Liu Guozhong, Ding Zhiying, Jia Xianfeng, et al. 2007. The statistical research on activity of southwest vortex and flood-producing vortex influencing south China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33: 45–50.
- Ma K, Bosart L F. 1987. A synoptic overview of a heavy rain event in Southern China [J]. *Wea. Forecasting*, 2: 89–112.
- Onogi K, Junichi T, Hiroshi K, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85 (3): 369–432.
- Pan Y, Yu R, Li J, et al. 2008. A case study on the role of water vapor from Southwest China in downstream heavy rainfall [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (4): 563–576.
- 斯公望. 1989. 论东亚梅雨锋的大尺度环流及其天气尺度扰动 [J]. *气象学报*, 47 (3): 312–323. Si Gongwang. 1989. On the large-scale circulation of Mei-Yu system over East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 47 (3): 312–323.
- 孙建华, 卫捷, 张小玲, 等. 2005. 2004 年夏季的天气及预测试验 [J]. *气候与环境研究*, 10 (1): 1–18. Sun Jianhua, Wei Jie, Zhang Xiaoling, et al. Weather system analysis and its real-time prediction in summer 2004 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (1): 1–18.
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 2002. 青藏高原一季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系 [J]. *气象学报*, 60 (3): 258–264. Xu Xiangde, Tao Shiyang, Wang Jizhi, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau – monsoon “Large Triganle” affecting region and drought – flood abnormality of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (3): 258–264.
- Xu X, Miao Q, Wang J, et al. 2003. The water vapor transport model at the regional boundary during Meiyu period [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (2): 333–342.
- 于波, 林永辉. 2008. 引发川东暴雨个例的西南低涡演变特征个例分析 [J]. *大气科学*, 32 (1): 141–154. Yu Bo, Lin Yonghui. 2008. A case study of southwest vortex causing heavy rainfall in eastern Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 141–154.
- 郁淑华, 肖玉华, 高文良. 2007. 冷空气对高原低涡移出青藏高原的影响 [J]. *应用气象学报*, 18 (6): 737–747. Yu Shuhua, Xiao Yuhua, Gao Wenliang. 2007. Cold air influence on the Tibetan Plateau vortex moving out of the Plateau [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 18 (6): 737–747.
- Yu R, Bin W, Zhou T. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L22212. doi: 10.1029/2004GL021270.
- Yu R, Zhou T. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon [J]. *J. Climate*, 20: 5344–5355.
- 赵平, 胡昌琼, 孙淑清. 1992. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断 (二) [J]. *大气科学*, 16 (2): 263–271. Zhao Ping,

- Hu Changqiong, Sun Shuqing. 1992. Numerical simulation and diagnosis of the formation process of SW vortex II: The diagnosis of vorticity equation and energy conversion function [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (2): 263 - 271.
- 赵平, 陈军明, 肖栋, 等. 2007. 夏季亚洲-太平洋涛动与大气环流和季风降水 [J]. 气象学报, 66 (5): 716 - 729. Zhao Ping, Chen Junming, Xiao Dong, et al. 2007. Summer Asian-Pacific oscillation and its relationship with atmospheric circulation and monsoon rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 716 - 729.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 29 (2): 195 - 204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River Basins in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 195 - 204.
- Zhou T, Yu R. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. Geophys. Res. Lett., 110, D08104. doi: 10.1029/2004GL005413.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 1981. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 236 - 238. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen. 1981. Principles and Methods of Synoptic Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 236 - 238.