

赵亮, 丁一汇. 2009. 东亚夏季风时期冷空气活动的位涡分析 [J]. 大气科学, 33 (2): 359–374. Zhao Liang, Ding Yihui. 2009. Potential vorticity analysis of cold air activities during the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 359–374.

东亚夏季风时期冷空气活动的位涡分析

赵亮^{1, 3} 丁一汇²

1 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 通过多时间尺度分析方法, 比较了夏季风时期表征冷空气活动的多种指标, 得到表征夏季风时期冷空气活动的最优指标——位涡。分析表明, 位涡 (potential vorticity, 简称 PV) 的低频振荡 (20~80 天和 40~80 天振荡) 在表征冷空气活动中效果最好。利用该指标对东亚夏季风中冷空气的来源和作用进行了研究, 重点分析了梅雨时期中高纬和中高层系统与夏季风系统相互作用的过程和机制。得出几点重要的结论: 中高纬平流层下部和对流层顶的高位涡库以及 60°N 附近的亚洲大陆东部低层的高位涡库是东亚夏季风系统中冷空气的主要来源。冷空气的侵入路径对不同的雨季表现出不同的特征: 华南前汛期, 有两次冷空气的侵入, 第一次来自东北方向低层, 第二次来自对流层高层的高位涡库; 梅雨期, 爆发时主要来自高层的高位涡库, 中后期鄂霍次克海附近 850 hPa 的高位涡库是冷空气加强和维持的主要来源; 华北雨季, 冷空气主要来自对流层高层。倾斜等熵面是垂直涡度最易发展的区域, 它也是高层冷空气侵入的路径。特定的位涡分布对应特定的降水类型, 位涡和降水的季节内振荡 (尤其是低频部分) 蕴含了中高纬系统与夏季风系统相互作用的关键信息。

关键词 位涡 东亚夏季风 冷空气 梅雨

文章编号 1006-9895 (2009) 02-0359-16

中图分类号 P462

文献标识码 A

Potential Vorticity Analysis of Cold Air Activities during the East Asian Summer Monsoon

ZHAO Liang^{1, 3} and DING Yihui²

1 Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Using multi-scale analysis, several indicators of cold air activities during the East Asian summer monsoon (EASM) are compared, and the results show that potential vorticity (PV) is the optimal indicator in tracing cold air activities during EASM. The further study shows that it is best that the low-frequency oscillations of PV (20–80 day and 40–80 day oscillations) represent cold air activities. Then, the source and role of cold air during EASM are studied by use of the indicator, and the process and mechanism of interactions between EASM system and extratropical and mid-upper level systems during the Meiyu period are analyzed in detail. The conclusions are as follows: the

收稿日期 2007-07-19, 2008-01-31 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 项目), 亚洲季风区水分循环和变异机制 (2006BAC403604)

作者简介 赵亮, 男, 1978 年出生, 博士, 主要从事东亚季风和 ENSO 循环方面的研究。E-mail: zl78127@126.com

two high PV pools are the main sources. One exists in the extratropical low stratosphere and tropopause, and the other exists in the low troposphere over the east of the Asian continent. To the intrusion paths, different rainy seasons show different features: during the pre-flood season in South China, the cold air intrudes twice respectively from the northeast at mid-lower levels and the high PV pool of the tropopause; during the Meiyu period, the cold air origins mainly from the high PV pool in the extratropical low stratosphere and tropopause during the onset of Meiyu, and from the high PV pool in the low troposphere over the Sea of Okhotsk during the mid-late period of Meiyu; during the rainy season in North China the cold air origins chiefly from the upper troposphere. Inclined isentropic surfaces are the areas where vertical vorticity grows quickly most easily, and the paths along which the upper cold air intrudes. Each rainy season over eastern China in summer is likely the reflection of the intraseasonal oscillations of the interactions between the EASM system and extratropics, especially the low-frequency part playing a more important role. Finally, the sources and characteristics are sketched.

Key words potential vorticity, the East Asian summer monsoon, cold air, Meiyu

1 引言

20 世纪下半叶,有关中高纬和对流层中高层环流异常对低纬或夏季风系统影响的研究(Erickson, 1967; Fett, 1968; 陈联寿等, 1979; Joung et al., 1982),强调了冷空气的重要作用,并提出和总结了前期条件和触发机制。1980 年代初,陶诗言等(1980)曾指出不少暴雨发生在中纬与低纬天气系统相互作用的时期,此时中纬度流型由纬向变为经向,中国大陆高空槽加深、冷空气南下。近些年的研究表明,东亚夏季风区别于印度季风的主要差异之一是其受中高纬系统的影响(张庆云等, 1998)。由于东亚季风区北侧缺乏大地形的阻挡,因此中高纬冷空气可以深入到东亚低纬地区和热带海区,这为中高纬系统与夏季风系统相互作用创造了条件。所以,研究东亚夏季风系统和季风降水时,除了要考虑副高、西南季风气流、ITCZ、ENSO 等诸多因素外,对于位于季风系统北侧的中高纬系统也必须给予足够的重视。目前,对东亚夏季风中的暴雨和其他一些灾害性天气的研究,我国学者已经取得了许多进展(高守亭等, 2002, 2007; 矫梅燕等, 2006; 张立生等, 2007; 潘婕等, 2008),但是,对冷空气在这些天气过程中所起作用方面的研究却很少见。尽管一些研究(陶诗言等, 1980; 张庆云等, 1998)指出了夏季风期间很多天气过程在一定程度上与中高纬系统及其冷空气活动有密切的关系,但并没有给出清晰的物理图像和系统的研究结果。在这方面,有几个问题尚待解决:在夏季风的推进过程中,冷空气是如何在中高纬和高层系统的作用下,逐步撤退却又时而加强的? 冷空气的

源地在哪里? 中高纬系统和夏季风系统是通过什么机制相互作用的? 为什么梅雨初期的低层并不一定存在经向温度梯度(谢义炳, 1956; 陶祖钰等, 2005)? 另一方面,怎样表征夏季风中的冷空气,是一个关键问题,但目前对于冷空气指标的研究还很少。

鉴于以上两点,本文试图比较并选择合适的冷空气指标,在气候平均意义下,揭示东亚夏季风期间冷空气的来源、活动特征及其作用(以梅雨时期为研究重点),更好地认识东亚夏季风爆发和演变过程及其与中高纬系统的关系。

2 资料和方法

本文所用再分析资料取自欧洲中心 ERA-40 逐日资料集(时段为 1958~2001 年,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)与中国气象局整编的 1951~2005 年中国 743 站逐日降水资料。在使用降水资料中:(1) 月内逐日资料缺测达 5 日的,将该月资料定为缺测;一年中有一个月缺测的,该年年值为缺测;(2) 资料要包括气候平均场(1971~2000 年)时间段,时间长度至少为 40 年;(3) 降水量不能出现负值,不符合上述要求的资料予以剔除。然后对以上两种资料做 30 年(1971~2000 年)气候平均,得到气候平均场。

本文所提到的正(负)相关是指 Pearson 相关系数为正(负),它是描述两个随机变量线性相关的统计量。滤波和功率谱分析使用 Morlet 小波,它的优点是比较适合奇异性信号的处理,可以明显地显示出信号的主要周期,能有效地重构出不受基波干扰的次谐波波形。结合 Morlet 小波分辨率高

的优点和相关分析等统计方法可以找到与降水相关最好的要素和周期。此外,考察位涡场和降水场的关系时,用到了奇异值分解 (Singular Value Decomposition, 简称 SVD)。

本文所取的区域和时间: 华南地区: ($22^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$), 其雨季取 4~6 月; 长江中下游地区: ($28^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$), 其雨季取 5~7 月; 华北地区: ($37^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$), 其雨季取 6~8 月。

3 冷空气指标的比较和选取

找出有效的冷空气指标是进行中高纬系统与夏季风系统相互作用研究的前提。尽管很多学者就夏季风系统中的冷空气有过研究,但对于冷空气指标的选取,并不一致,比如用北风或风矢 (Chan et al., 2002; 姚秀萍等, 2005)、流函数 (Yen et al., 2005)、假相当位温 (Ding et al., 2001; 柳艳菊等, 2005; 姚秀萍等, 2005)、位涡 (Shutts, 1983; Browning et al., 1995; 张庆云等, 1998; 高守亭等, 2002; Koutarou et al., 2005; 矫梅燕等, 2006; 徐忠峰等, 2006)、温度露点差 (姚秀萍等, 2005)、地面气温和积温 (钱永甫等, 2004), 但往往未给出充分的理由。

几种指标当中,位涡独具特性。它是绝对涡度和位温梯度的乘积。从定义上看,位温梯度可以表征大气的热力学性质,绝对涡度可以表征大气的动力学性质。位涡本身具有三大特性:守恒性、可反演性和“位涡物质”的不可穿越性。以前,学者们根据位涡的守恒性来示踪特定条件下的气团,表征复杂的非线性平流过程 (Rossby, 1940), 并取得了较好的结果。后来,自从 Hoskins (1985) 把位涡的前两大特性结合起来,加以系统发展,并提出“位涡思想 (potential vorticity thinking)”以来,许多复杂的天气系统演变和大尺度运动的机理得到很好的解释。那么,具有高位涡特性的干冷空气在某种条件下是否可以用干位涡来示踪? 在绝热无耗散的短期过程中,由高纬高层输送至中低纬低层的空气,当等熵面倾角不大时,保持位涡和位温的准守恒,其在携带正位涡平流的同时也携带冷平流 (胡伯威, 2003), 必然表现为高位涡和干冷的特性,这部分高位涡空气就是我们需要研究的有效冷空气。可见,对绝热的短期过程,如果知道了气团的来

源,就基本可以判断它的热力性质。并且,位涡还具有第三个特性,即 Haynes et al. (1990) 提出的“位涡物质”不可穿越性:即使在非绝热、甚至有摩擦的情况下,除非等熵面与地面相交,否则位涡物质不会自我毁灭,但可以被稀释或浓缩。可见,用位涡来示踪冷空气,在一定条件下是可行的,并且具有不可替代的优点。

另外,我们也选取假相当位温和北风作为参考指标与之比较。它们分别反映大气的热力和动力学性质。本文首先用这三种指标分析比较其与夏季风降水的关系,而后选取其中的最优指标,研究冷空气在夏季风系统中所起的作用。

3.1 不同冷空气指标与降水的关系的比较

冷空气指标与降水的关系,是反映该指标表征效果的重要检验方式。图 1 给出了在不同地区各指标 (取 850 hPa) 与降水量的演变。从全年来看 (图 1a、c、e),除了华北的位涡 (PV) 与降水量是正相关外 (相关系数 0.69),华南和长江中下游地区位涡和降水都是负相关 (相关系数分别是一 0.30 和一 0.50)。三个地区的假相当位温 (θ_{sc}) 和经向风 (v) 与降水量都是正相关。

从夏季来看 (图 1b、d、f, 相关系数表略),华南:在前汛期时 (4~6 月),PV 与降水量的关系最好; θ_{sc} 几乎是一单调曲线,峰值日期也滞后于降水;南风的变化与降水的关系也不好,第 30 候左右的降水峰值期对应的基本是北风,而之前对应南风。长江中下游:在雨季 (5~7 月),除 PV 与降水的关系是正相关外,其他两个指标与降水的关系并不明显; θ_{sc} 和 v 几乎是单调曲线,峰值日期也滞后于降水,另外,在第 35 候左右北风转为南风,这个风向转变期正好对应降水的峰值期,而经向风的峰值期并不对应降水峰值期。华北:与华南和长江中下游不同,在雨季 (6~8 月),3 个指标与降水的关系都是正相关,指标的峰值期对应降水峰值期,孰好孰坏,难分伯仲。

综上所述,各地区雨季,无论华南、长江中下游、还是华北,PV 与降水都是正相关,而 θ_{sc} 和 v 除华北是正相关外,其他两个地区与降水相关都不明显。

图 2 给出了降水量 (图 2a) 和 850 hPa 的三个指标 (图 2b) 时间-纬度剖面图 (第 19~54 候)。可以看出,雨带的南北移动,与 PV [单位: PVU

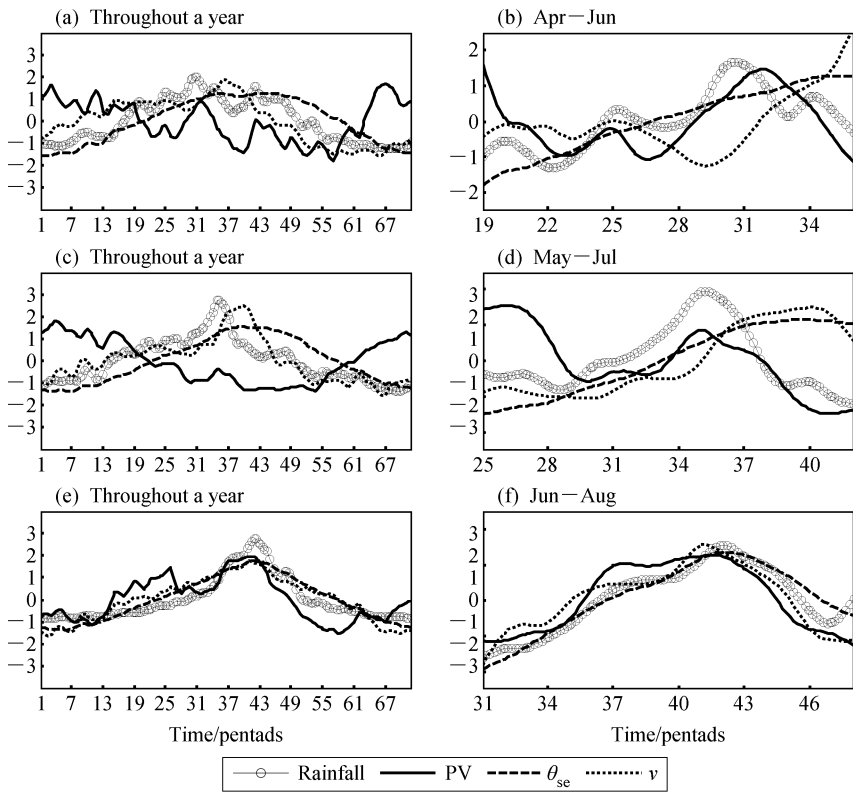


图 1 不同地区全年 (a、c、e) 和雨季 (b、d、f) 降水量与 850 hPa 各指标的演变 (各自经过标准化处理): (a、b) 华南; (c、d) 长江中下游; (e、f) 华北地区

Fig. 1 Evolutions of the standardized surface rainfall, potential vorticity (PV), pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se}) and meridional wind (v) at 850 hPa (a, c, e) throughout a year and (b, d, f) in rainy seasons; (a, b) South China; (c, d) the middle and lower reaches of the Yangtze River; (e, f) North China

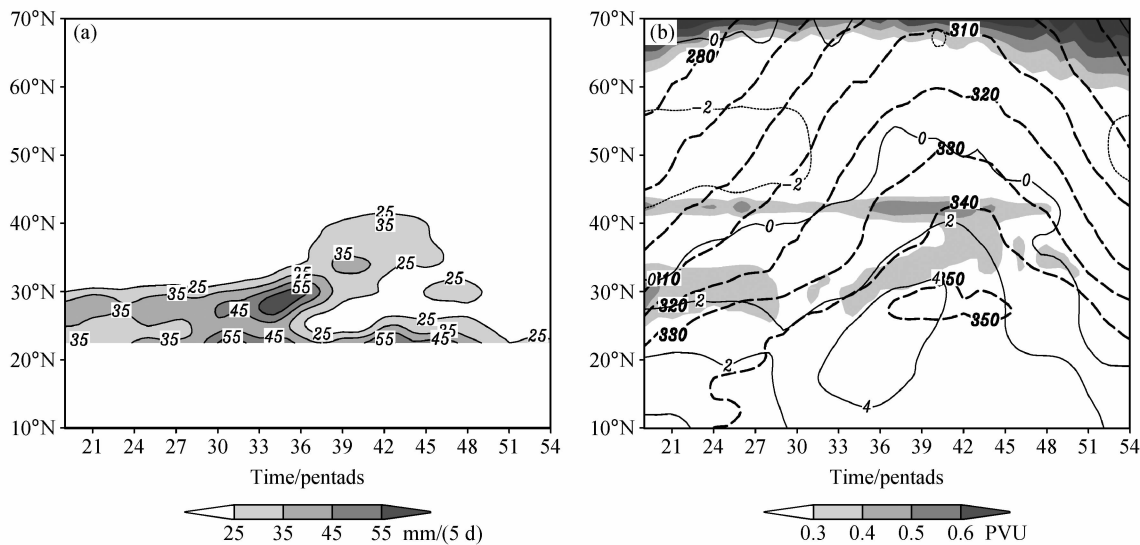


图 2 第 19~54 候 (115°E~120°E) 平均的 (a) 降水量和 (b) 850 hPa 的三个指标时间-纬度剖面图。(b) 粗长虚线: 假相当位温 (单位: K); 细实线和短虚线: 经向风 (单位: m/s)

Fig. 2 Time-latitude cross sections of (a) rainfall and (b) PV (shaded), θ_{se} (thick-dashed lines, units: K), v (thin-solid and short-dashed lines, units: m/s) at 850 hPa averaged between 115°E and 120°E from pentad 19 to pentad 54

($1\text{ PVU}=10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)]高值区的对应关系较好。而 θ_{se} 、 v 并不能直观地反映雨带的经向移动。

图 3 是三个指标在垂直方向上的变化与雨季的关系。各地区的雨季都对应对流层高 PV 值, 对流不稳定 ($\partial\theta_{\text{se}}/\partial p>0$) 和北风迅速减小的时段。而 θ_{se} 的小值区和北风 v 与降水并没有直接的对应关系, 只有 PV 的高值区与降水对应关系较好, 可以反映中高层冷空气下传和演变的过程。另外, 需要注意的是, 各雨季之前, 都有北风的下传过程。

图 4 是地面降水和 850 hPa 三个指标的逐候演变 (只给出第 35~38 候, 代表梅雨期)。降水量 $\geq 30\text{ mm/候}$ 画阴影代表雨带, 其他各图阴影区代表冷空气。对于雨带发展和移动的特征, θ_{se} 和 v 都没有取得好的效果, 唯有 PV 可以较为直观地反映季风雨带的发展和北进情况。

3.2 尺度分离后的冷空气指标与降水的关系

为了进一步检验冷空气指标和找出最优指标, 需要去除季节趋势和低频振荡的影响。我们首先对 3 个地区全年的气候平均降水量进行了 10~90 天带通滤波 (图 5a、c、e), 而后对所得序列进行小波功率谱分析 (所用小波为 Morlet 小波), 确定季节内尺度夏季风降水的主周期 (图 5b、d、f), 并据此考察不同时间尺度上, 几种指标 (850 hPa 的 PV、 θ_{se} 和 v) 与夏季降水的关系。

可见, 带通滤波后, 3 个地区的降水基本都存在显著周期: 13 天、30 天和 60 天, 即可将降水的季节内振荡分为 20 天以下、20~40 天和 40~80 天尺度。对三种指标采用同样的做法, 可发现, 也基本存在类似的周期 (图略)。

根据降水的振荡周期, 对地面降水和 850 hPa 的 PV、 θ_{se} 和 v 进行 20 天以下、20~40 天和 40~80 天带通滤波。另外, 也进行了 20~80 天的带通滤波, 这是因为从后面的相关分析可以看出, 20 天以下的时间尺度内, 各指标与降水的相关系数都没有通过信度检验。出于找出最优指标的目的, 又不损失过多的有效信息, 因此加入了包含两个显著周期 (30 和 60 天) 的新指标 (20~80 振荡) (结果如图 6), 衍生出 15 种指标 (PV、PV₂₈、PV₂、PV₂₄、PV₄₈、 θ_{se} 、 $\theta_{\text{se}28}$ 、 $\theta_{\text{se}2}$ 、 $\theta_{\text{se}24}$ 、 $\theta_{\text{se}48}$ 、 v 、 v_{28} 、 v_2 、 v_{24} 和 v_{48}) 和降水的多尺度滤波结果 (R 、 R_{28} 、 R_2 、 R_{24} 和 R_{48}), 其中的名称含义见表 1 注释, 而后对各指标

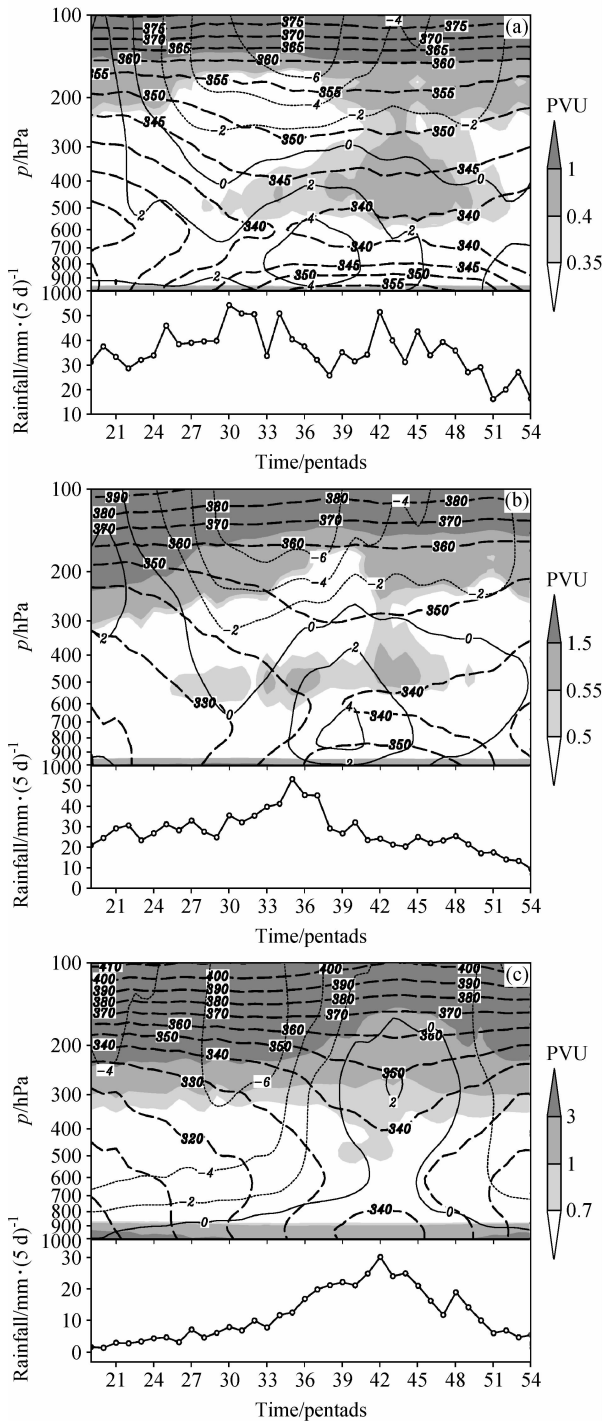


图 3 第 19~54 候各指标时间-气压剖面图 (上半部分, 填色区域为 PV; 粗长虚线代表 θ_{se} , 单位: K; 细实线和短虚线代表经向风 v , 单位: m/s) 和降水量演变图 (下半部分): (a) 华南; (b) 长江中下游地区; (c) 华北

Fig. 3 Time-pressure cross sections of PV (shaded), θ_{se} (thick-dashed lines, units: K), v (thin-solid and short-dashed lines, units: m/s) (top parts) and evolutions of the rainfall (bottom parts) from pentad 19 to pentad 54; (a) South China; (b) the middle and lower reaches of the Yangtze River; (c) North China

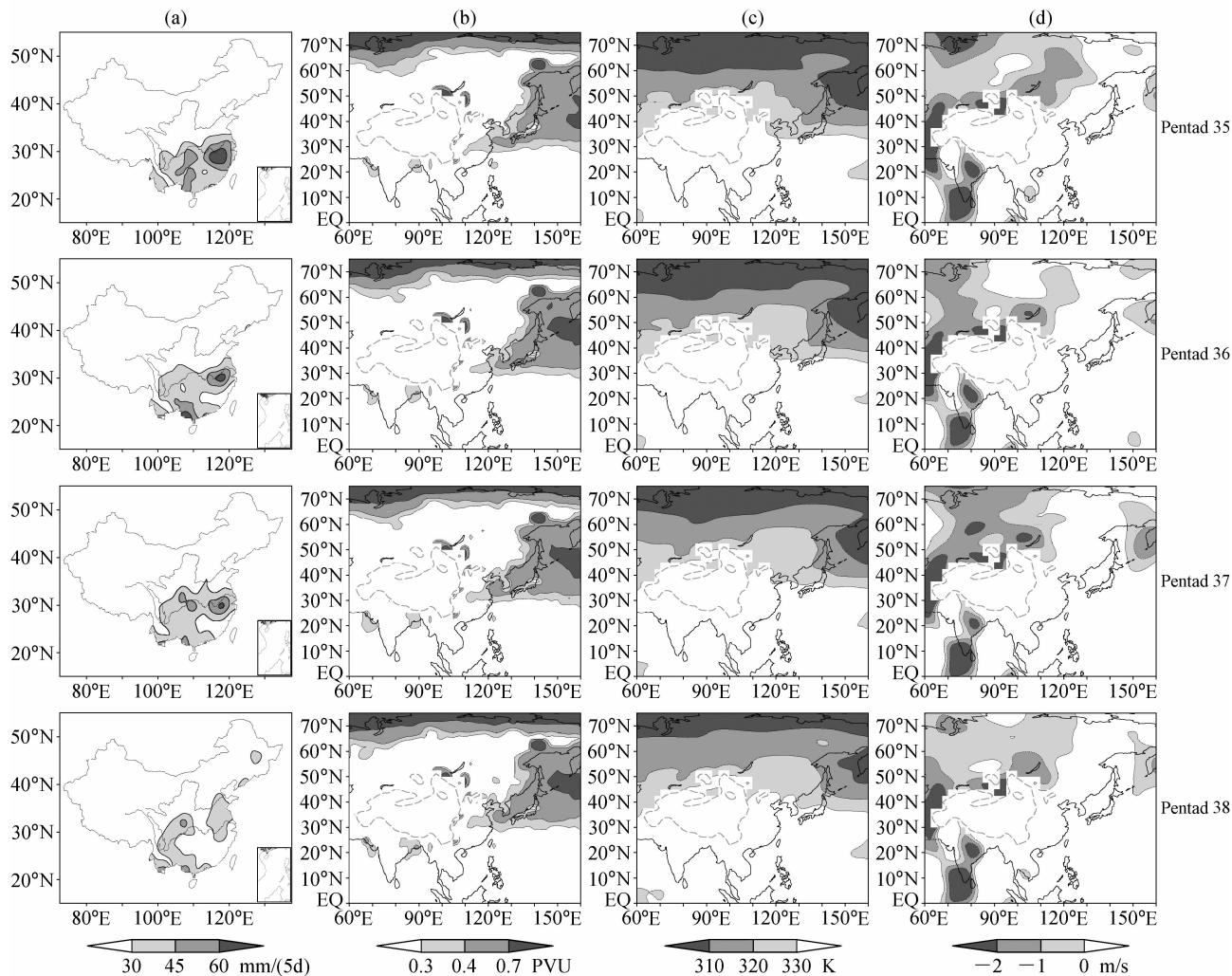


图4 地面降水与各指标(850 hPa)在第35~38候的逐候演变:(a) 降水量;(b) PV;(c) θ_{se} ;(d) v

Fig. 4 Evolutions of (a) the surface rainfall and (b) PV, (c) θ_{se} , (d) v at 850 hPa from pentad 35 to pentad 38

之间、各指标与降水之间求相关(表1,篇幅所限,只给出长江中下游地区的结果)。

从图6和表1可以看出,5~7月长江中下游地区,PV与降水的关系最好,尤其 PV_{28} 和 PV_{48} ,与 R 、 R_{28} 和 R_{48} 的相关都通过了95%信度检验,其他两个要素的衍生指标与降水的相关并不好。

华南地区(取4~6月)的滤波和相关分析结果(图表略),与长江中下游的有些相似, PV_{28} 和 PV_{48} 效果最好,华北(取6~8月)的结果略有不同(图表略)。

需要注意的是,各指标与原始降水量的相关中,只有 PV_{28} 和 PV_{48} 在三个地区都通过了95%的信度检验,而未滤波的PV与原始降水量的相关不能在三个地区都通过信度检验。这可能说明尺度分

离后的PV季节内振荡与降水的关系更密切。

为了综合考察不同地区不同时间尺度各指标与降水相关的显著性和指标自身的独立性,对上面的结果进行适当统计(见表2)。

从指标类型的角度来看,位涡的整体综合评分比其他两个指标都好。PV及其各尺度指标:16分; θ_{se} 及其各尺度指标:0分; v 及其各尺度指标:—3分。

从指标的时间尺度来看,20~80天和40~80天尺度的指标最好。40~80天:7分;20~80天:6分;20~40天:2分;原始:0分;20天以下:—2分。尺度分离后的指标与雨季降水的相关性要比原始指标好得多,尤其是40~80天和20~80天尺度的指标。

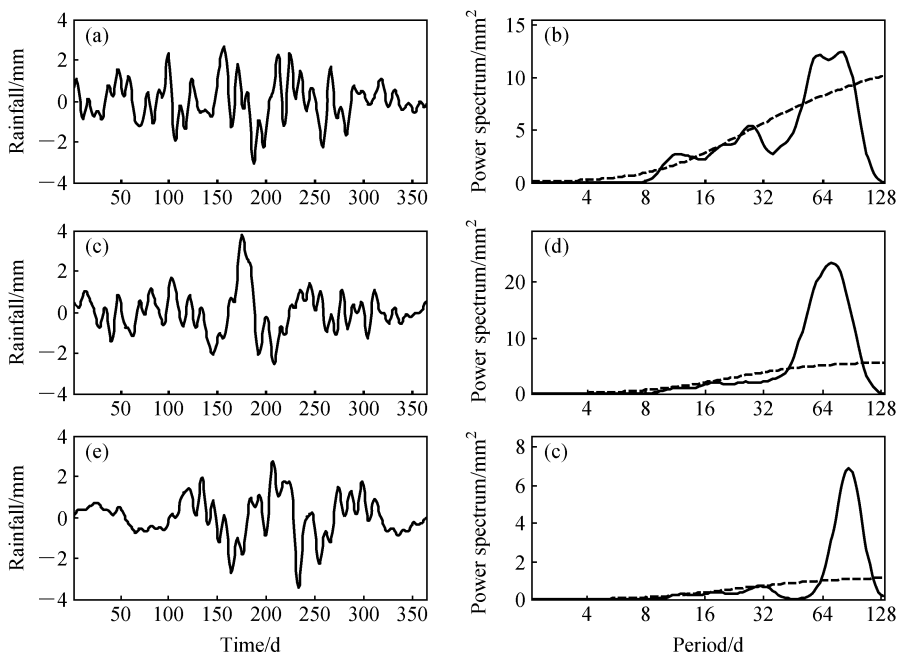


图 5 各地区 (a、c、e) 全年降水 10~90 天带通滤波和 (b、d、f) 全局小波功率谱: (a、b) 华南; (c、d) 长江中下游; (e、f) 华北
Fig. 5 (a, c, e) Rainfall by 10-90-day bandpass filter throughout a year and (b, d, f) their global wavelet power spectrums: (a, b) South China; (c, d) the middle and lower reaches of the Yangtze River; (e, f) North China

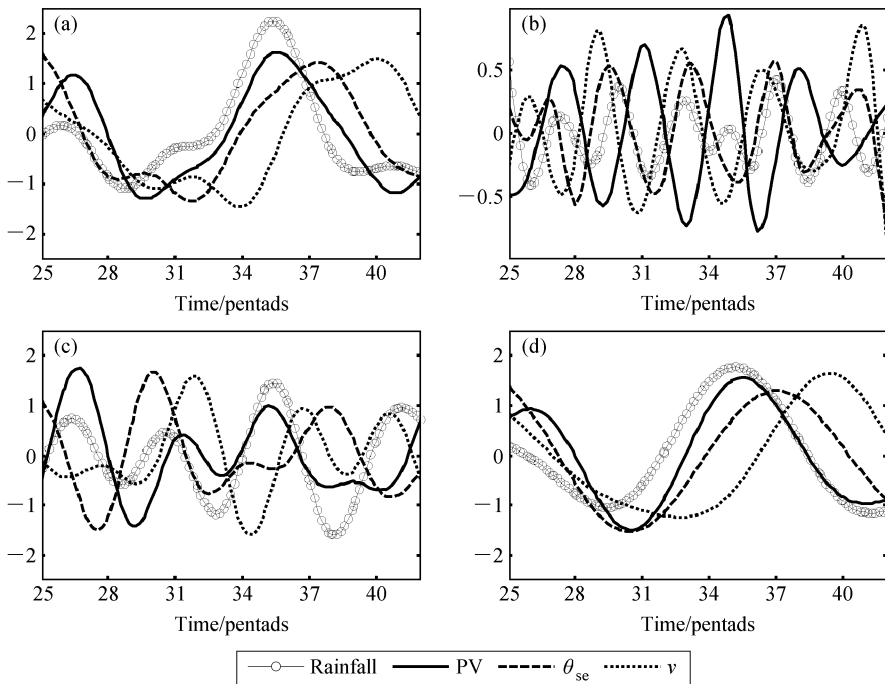


图 6 长江中下游地区 5~7 月降水量和 850 hPa 各指标多尺度滤波标准化结果: (a) 20~80 天带通; (b) 20 天高通; (c) 20~40 天带通; (d) 40~80 天带通
Fig. 6 The standardized rainfall and 850-hPa different indicators by multi-time scale filters over the middle and lower reaches of the Yangtze River from May to July: (a) 20-80-day bandpass; (b) 20-day highpass; (c) 20-40-day bandpass; (d) 40-80-day bandpass

综合评分结果为: $PV_{28} = PV_{48} > PV_{24} > PV > \theta_{se28} = \theta_{se48} = v_{48}$ 。值得注意的是:雨季时 PV 与降水是正相关,而全年两者是负相关(华北例外),这说明高位涡

表 1 长江中下游地区 5~7 月多时间尺度降水量与各指标 (850 hPa) 间的相关分析

Table 1 Multi-time scale correlation analysis between rainfall and some indicators (at 850 hPa) over the mid-lower Yangtze River basin from May to July

	R	R_{28}	R_2	R_{24}	R_{48}	PV	PV_{28}	PV_2	PV_{24}	PV_{48}	θ_{sc}	θ_{sc28}	θ_{sc24}	θ_{sc48}	v	v_{28}	v_2	v_{24}	v_{48}	
R	1.00	0.88	0.33	0.23	0.86	0.37	0.62*	0.10	0.24	0.61*	0.16	0.31	0.15	-0.01	0.31	-0.02	-0.36	-0.12	-0.04	-0.41
R_{28}		1.00	-0.02	0.45	0.89	0.46*	0.79*	0.05	0.45*	0.77*	0.18	0.47*	-0.00	-0.03	0.50*	0.07	-0.22	-0.04	-0.15	-0.26
R_2			1.00	-0.06	0.00	0.06	-0.04	0.18	-0.10	-0.00	-0.00	0.02	0.38	0.01	0.02	-0.07	0.03	-0.38	0.05	0.01
R_{24}				1.00	0.01	0.12	0.23	0.13	0.58*	0.13	0.00	-0.05	-0.08	-0.16	-0.03	-0.03	-0.03	-0.10	-0.08	-0.06
R_{48}					1.00	0.47*	0.78*	-0.01	0.24	0.82*	0.19	0.55*	0.03	0.01	0.58*	0.08	-0.24	0.01	-0.15	-0.26
PV						1.00	0.76*	0.26	0.50*	0.72*	-0.61*	0.47*	-0.05	-0.01	0.47*	-0.51*	-0.18	-0.20	-0.26	-0.19
PV_{28}							1.00	0.12	0.61*	0.95*	-0.03	0.68*	-0.07	-0.13	0.75*	0.03	0.03	-0.15	-0.25	0.01
PV_2								1.00	0.36	-0.02	0.03	-0.07	-0.27	-0.06	-0.05	-0.08	-0.10	-0.61*	-0.21	-0.04
PV_{24}									1.00	0.40	-0.15	0.05	-0.27	-0.36	0.15	-0.17	-0.11	-0.41	-0.14	-0.13
PV_{48}										1.00	-0.01	0.73*	0.02	-0.12	0.80*	0.05	0.05	-0.01	-0.30	0.04
θ_{sc}											1.00	0.18	0.00	-0.05	0.24	0.91*	0.44	0.02	0.10	0.45*
θ_{sc28}												1.00	0.08	0.38	0.94*	0.35	0.46*	-0.01	-0.25	0.52*
θ_{sc2}													1.00	0.14	0.04	-0.01	0.03	0.40	0.08	0.01
θ_{sc24}														1.00	0.07	-0.08	-0.09	-0.03	-0.27	0.04
θ_{sc48}															1.00	0.45*	0.56*	0.00	-0.13	0.58*
v																1.00	0.75*	0.15	0.25	0.73*
v_{28}																	1.00	0.10	0.32	0.96*
v_2																		1.00	0.32	0.01
v_{24}																			1.00	0.06
v_{48}																				1.00

注: 带“*”的数字 ≥ 0.45 , 即达到 0.05 显著性水平。“*R*”代表降水量; 下标中“28”、“24”、“48”分别代表 20~80 天、20 天以下、20~40 天、40~80 天滤波。例如, “*PV*₂₈”和“*R*₂₈”分别表示 850 hPa 位涡和地面降水量的 20~80 天滤波, 以此类推 (下同)。

表 2 在雨季几种指标与降水量相关的显著性和表征降水的独立性统计

Table 2 Statistics of significant correlations between the indicators and rainfall and independence representing rainfall during the rainy seasons

	与降水量各时间尺度的显著相关个数				与其他指标相应尺度的	综合评分(Nr-No)
	SC	CJ	NC	总数 (Nr)	显著相关个数 (No)	
PV	2	2	3	7	0+2+2=4	3
PV ₂₈ *	3	3	3	9	1+1+2=4	5
PV ₂	0	0	0	0	0+1+0=1	−1
PV ₂₄	1	2	1	4	0+0+0=0	4
PV ₄₈ *	3	3	3	9	2+1+1=4	5
θ_{se}	1	0	3	4	1+2+2=5	−1
θ_{se28}	1	2	3	6	1+2+2=5	1
θ_{se2}	0	0	0	0	0	0
θ_{se24}	0	0	2	2	1+0+2=3	−1
θ_{se48}	0	2	3	5	1+2+1=4	1
v	0	0	3	3	1+2+2=5	−2
v_{28}	2	0	3	5	1+2+2=5	0
v_2	0	0	0	0	0+1+0=1	−1
v_{24}	0	0	1	1	1+0+1=2	−1
v_{48}	2	0	3	5	1+1+2=4	1

注：SC：华南，CJ：长江中下游地区，NC：华北；Nr：某指标在三个地区与降水量各时间尺度呈显著相关的总数；No：某指标在三个地区与其他指标相应尺度呈显著相关的总数；综合评分第一、二名的指标用“*”标出。

空气对降水的作用在夏季更明显。

4 位涡与夏季风的季节内多时间尺度分析

由上面的分析可知，用干位涡来作为冷空气指标是最合适的。并且，20~80 天和 40~80 天滤波效果最好。那么，下面就以干位涡的 20~80 天振荡 (PV₂₈) 来研究冷空气在夏季风时期的演变过程 (篇幅有限，只以梅雨期的 PV₂₈ 为例)。

4.1 时空特征

以长江中下游地区为例，选取 PV₂₈ 作为冷空气指标，对照 4~9 月的降水量演变，得到时间-纬度 (图 7a)、经度-时间 (图 7b) 和时间-高度剖面图 (图 7c)。

如图 7a 所示，R₂₈ 的降水中心和 PV₂₈ 的中心比较吻合。夏季风雨季之前和期间，有 3 次冷空气的南下 (图 7a 中虚线圈所示)。它们对雨带的移动和雨季的演变起着重要作用：

第一次南下：5 月初到 5 月中下旬，冷空气南下输送到华南和南海，华南迎来前汛期的高峰期，而输送到南海的部分很可能对南海夏季风的爆发起

到重要作用。第二次南下：发生在 6 月下旬到 7 月初，与梅雨的后期和结束期对应。第三次南下：发生在 7 月下旬到 8 月初，与华北雨季对应。

需特别留意的是：梅雨发生前和发生初期，在低层并没有冷空气的低频振荡南下，但梅雨期间却有很强的高位涡空气——说明梅雨发生初期，低层不会有强的经向温度梯度，而应是强的湿度梯度，冷空气主要来源不在北方低层，而应在高层 (下文将有说明)。在梅雨的后期，850 hPa 北方干冷的高位涡空气和南方暖湿的高位涡空气才在低层交绥。

从图 7b 可以看出，长江中下游地区 R₂₈ 和 PV₂₈ 都有三次低频振荡过程，第一次较弱，第二次最强，第三次较强，而且第二、三次有明显的自东向西传播的趋势。

从图 7c 可以看出，长江中下游地区：在第 30 候之前，PV₂₈ 主要由低层往高层传播，而 33 候以后，情况相反，PV₂₈ 有两次向下的输送过程：第 33 候左右，PV₂₈ 由高层沿等熵面迅速向下输送，并在低层维持到 38 候左右；第 42~51 候，也有一次明显的下传过程，但在中高层是穿越等熵面的，这次过程对应夏末秋初的第一次雨峰。可以看出，这三

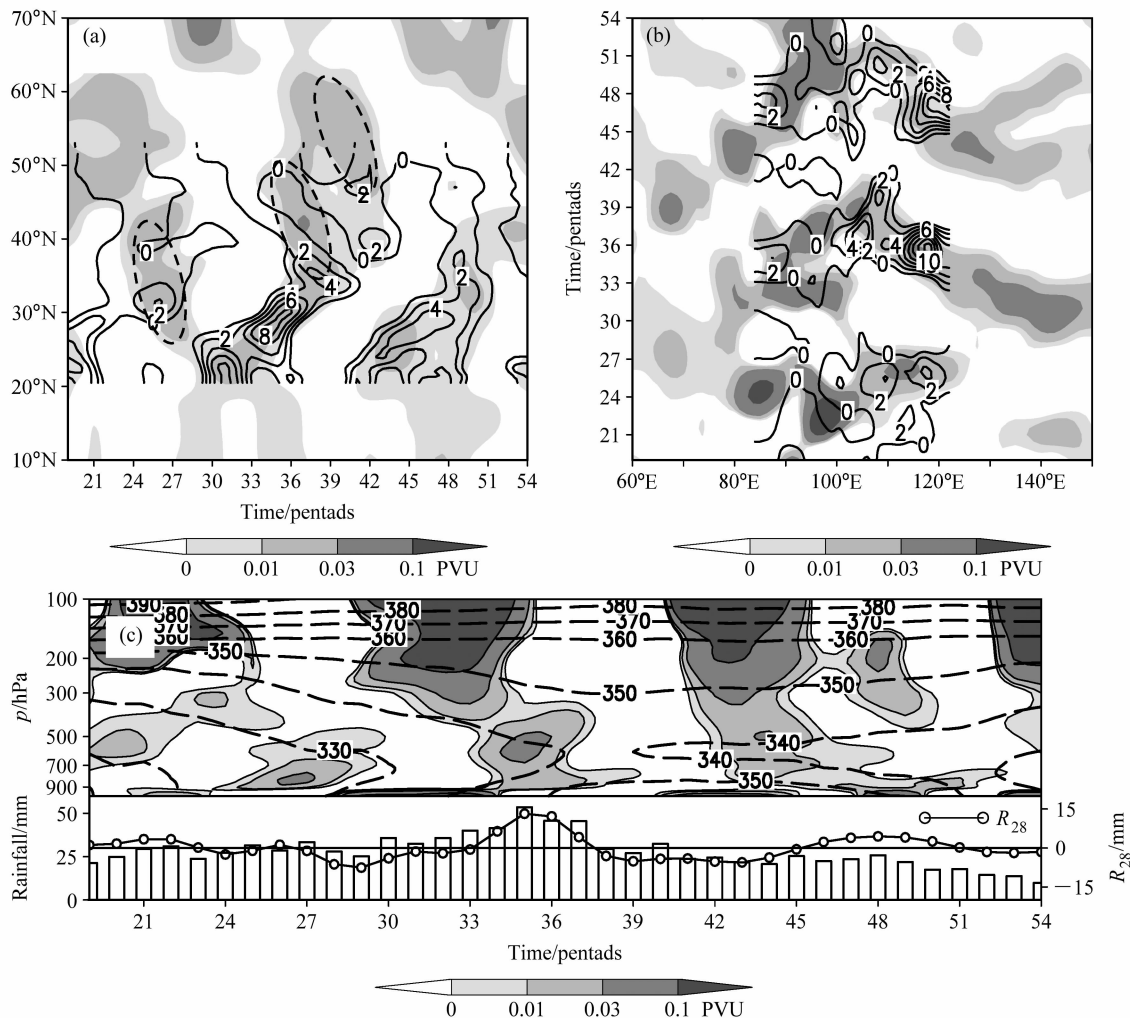


图 7 (a) 第 19~54 候 (110°E~120°E) 平均的降水量 (实线, 单位: mm) 和 850 hPa 位涡 (阴影) 20~80 天振荡的时间-纬度剖面图; (b) 同 a 图, 但为 (28°N~32°N) 平均的经度-时间剖面图; (c) 长江中下游地区平均的 PV_{28} (阴影) 和 θ_{se} (长虚线, 单位: K) 时间-气压剖面图 (上图) 以及原始降水量 (柱状图) 和 R_{28} 的时间演变图 (下图)

Fig. 7 (a) Time-latitude cross section of 20-80-day oscillations of rainfall (solid lines, units: mm) and 850-hPa PV (shaded) averaged between 110°E and 120°E; (b) same as (a), but for time-longitude cross section averaged between 28°N and 32°N; (c) time-pressure cross section of PV_{28} (shaded) and θ_{se} (long-dashed lines, units: K) (top part), and evolutions of rainfall (bars) and R_{28} (bottom part), averaged over the middle and lower reaches of the Yangtze River from pentad 19 to pentad 54

次传播过程对应长江中下游地区的三次雨峰 (王遵娅, 2007)。

图 8 给出了 (110°E~120°E) 平均的 PV 和位温 θ 的纬向-气压逐候演变图。第 35 候之前, 低层的高位涡空气在华南地区缓慢北移, 而对流层高层的高纬地区则有强的高位涡异常沿等熵面向南输送。第 35 候, 低层高位涡异常突然北跳, 并由南倾变为北倾, 趋向于与 340 K 等熵面平行 (这时的等熵面非常倾斜), 同时高层位涡异常向下伸展, 与低层打通, 高层高位涡空气在等熵面倾斜处急速

向下输送, 低层高位涡空气急剧加强。这时正对应梅雨发生的时间, 此时高层的梅雨锋属极锋性质。而后, 高低层高位涡空气断裂, 低层高位涡空气滞留于江淮地区上空, 缓慢北移。第 40 候左右, 江淮低层高位涡空气消失, 梅雨结束。

综上所述, 在垂直和经向方向上, 梅雨期的冷空气主要来自对流层高层和平流层的高位涡库。梅雨的发生受到高层系统的影响, 发生时间正好是高低层高位涡库打通后, 路径趋向于沿 340 K 等熵面陡峭区。这十分类似于 Browning 等 (1995) 利用

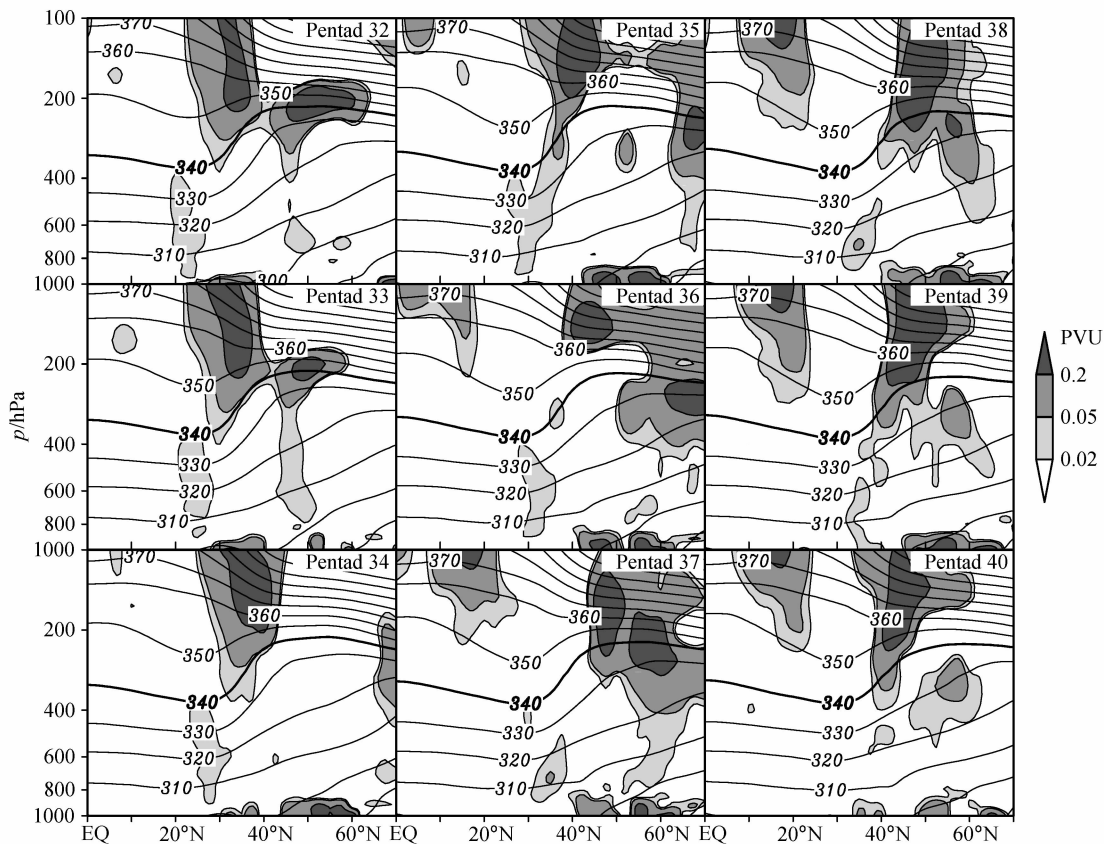


图 8 (110°E~120°E) 平均 PV_{28} (阴影) 和位温 θ (实线, 单位: K) 的纬度-气压逐候 (第 32~40 候) 剖面图

Fig. 8 Latitude-pressure cross sections of PV_{28} (shaded) and potential temperature θ (solid lines, units: K) averaged between 110°E and 120°E from pentad 32 to pentad 40

非静力平衡中尺度模式模拟干侵入在气旋快速发展中的重要作用的结果。另外, 高位涡空气在向下侵入之前, 主要向南输送, 时间主要在第 32~34 候, 向下侵入主要在第 35 候。

华南前汛期和华北雨季, 也有相似的基本特征 (图略)。所不同的是华南前汛期有两次冷空气的加强, 第一次 (第 29 候) 只来自北方低层, 而非高层, 这与图 7a 的结果一致; 第二次 (第 31 候左右), 高层两个高位涡空气打通后沿等熵面下滑侵入低层。这也解释了图 7a 中第 31 候左右华南地区位涡加强的直接原因。华北雨季时冷空气亦来自高层。

等熵面倾斜的区域是对流不稳定或稳定度弱的区域, 同时大斜压度和强垂直风切变使得这一区域位涡的斜压项较大, 在位涡守恒的条件下, 很容易导致气旋性涡度的快速增长 (吴国雄等, 1995)。

下面用位涡思想给出干绝热无摩擦条件下, 冷空气在中高层沿倾斜等熵面输送有利于涡度增长的物理解释。

在等压坐标系中, 假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多, 由此可得位涡 (用 P 表示) 的表达式,

$$P = -g(f\mathbf{k} + \nabla_p \times \mathbf{v}) \cdot \nabla_p \theta, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{v}$ 是三维风矢, 其他为气象常用符号。如果定义位涡的第一分量为垂直分量 (P_1), 第二分量为等压面上的水平分量 (P_2), 即

$$\begin{cases} P_1 = -g\zeta_p \frac{\partial \theta}{\partial p}, \\ P_2 = -g\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} \cdot \nabla_p \theta, \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\zeta_p = f + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_p$, 则等压坐标系中位涡守恒可表达为

$$P = P_1 + P_2 = \text{常数}. \quad (3)$$

当冷空气由等熵面较平的区域 (高纬的对流层顶) 被输送到倾斜的区域 (中纬度中高层) 时, $|\partial \theta / \partial y|$ 增大, 即 $|\nabla_p \theta|$ 增大, 但 $\partial \theta / \partial y$ 为负值, 而且, 冷空气会使得其周围的等熵面更加上凸, 倾斜

进一步加大。假设水平风垂直切变不变且水平风随高度增加($\partial v/\partial p = \text{常数} < 0$), 而且 $\partial v/\partial p$ 与 $\nabla_p \theta$ 的夹角不变, 那么 $|P_2|$ 增大(但因为 P_2 为负值, 所以实际上 P_2 在减小)。在位涡守恒的条件下, P_1 必然增大。如果在对流稳定且对流稳定度不变($\partial\theta/\partial p = \text{常数} < 0$)的情况下, 垂直涡度必然增长。实际上在这一输送过程中 $|\partial\theta/\partial p|$ 经常是减小的(如图8中第35候之前平流层下传的高位涡空气所经之处, $|\partial\theta/\partial p|$ 减小), 这时, ζ_p 会增长得更快。可见, 等熵面的倾斜和对流稳定度的减小是造成倾斜区域涡度增长的重要原因。实际上, 这一过程中经常存在高空急流, 如果高空急流加强, 在它下方, $|\partial v/\partial p|$ 增大, 同样使得 ζ_p 增长。

在逐候的经度-气压剖面演变图中(图略), 可以看出, 梅雨前期冷空气来自东边高层向下输送的高位涡空气, 其在第34候有一次明显的向西扩展。

图9是第32~40候850 hPa的 PV_{28} 逐候演变。可以看出, 高位涡空气在梅雨期前由东向西近乎纬向输送, 梅雨发生时, 变为东北-西南(NE-SW)向, 经向输送明显加强, 同时输送带的南支一直在向北移动。(60°N, 140°E)附近的大范围地区(鄂霍次克海附近)是一较为稳定少动的高位涡库, 梅雨期低层的高位涡空气就来自这里, 自东北向西南方向输送。这正符合陶诗言先生(1980)所述暴雨时冷空气南下的环流背景。35候之前, 长江以南一直有高低位涡的偶极子型配置, 高位涡空气在南, 低位涡空气在北, 第35候发生突变, 高位涡空气在北, 低位涡空气在南。异常场的经向位涡梯度突变可能代表着雨季的更替。

4.2 季节内尺度(20~80天)位涡场(850 hPa)与降水场的奇异值分解

利用位涡的低频振荡与降水场的相关性, 可以

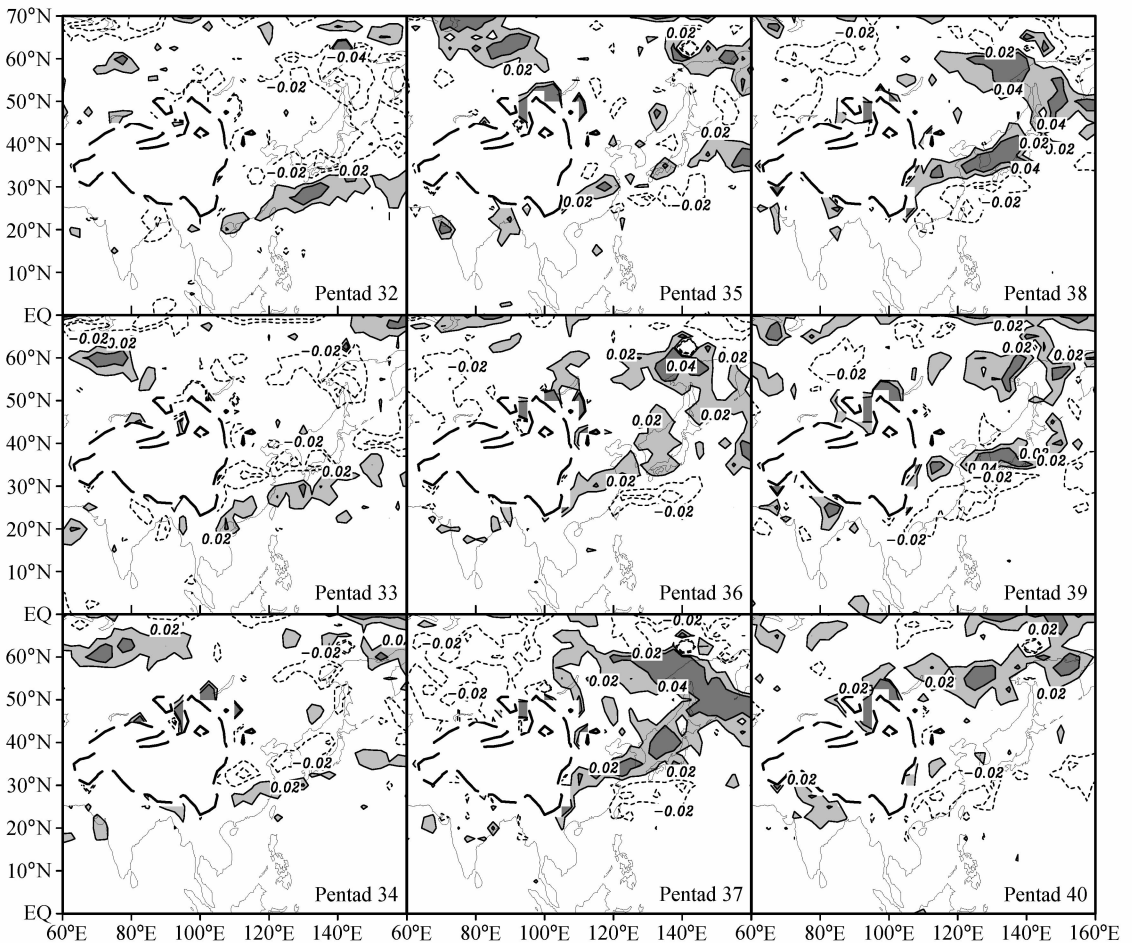


图9 第32~40候850 hPa的 PV_{28} 逐候演变(单位: PVU)。阴影: ≥ 0.02 PVU; 加粗长虚线: 1500 m 青藏高原地形

Fig. 9 Evolutions of PV_{28} (PVU) at 850 hPa from pentad 32 to pentad 40. Shaded areas; $PV_{28} \geq 0.02$ PVU; thick-dashed lines; the Tibetan Plateau with the altitude ≥ 1500 m

考察中高纬系统对夏季风系统的影响方式，为此，我们对降水量和位涡（850 hPa）的 20~80 天振荡作奇异值分解分析（如图 10）。

第一模态（方差贡献 36.8%）的空间型表明，华南降水增多黄淮降水减少时，对应 850 hPa 华南及其东部和缅甸地区位涡较大，黄淮及其东部和印度东部位涡较小；反之亦成立。两场的时间系数显著正相关，夏季两个峰值期一个谷值期，分别发生在第 32、42、39 候左右。显然，这一模态恰好反映了华南雨季和黄淮雨季的情况，值得注意的是，这两个雨季的降水与当地及其东北和西南方向的 850 hPa 位涡有明显的正相关。这样的分布特征说明中高纬系统和低纬系统共同对这两个雨季的降水起到了重要作用。

第二模态（方差贡献 17.8%），恰好反映长江中下游梅雨期和东北雨季的情况。同样，梅雨期，

长江中下游的降水与当地及其东北方向的位涡有明显的正相关，说明中高纬系统对梅雨期的降水起到了重要作用。

第三模态（方差贡献 10.6%），主要反映华北雨季的情况，也可以看到这一地区的降水与其东北方向的位涡有明显的正相关关系。

三个模态时间系数相关都很高，分别为 0.88、0.89、0.70，都通过了 99% 的信度检验。

综上所述，降水的 20~80 天振荡的三个模态恰好可以反映夏季我国东部的大部分雨季：包括华南雨季、梅雨季、黄淮雨季、华北和东北雨季。更重要的是，各雨季降水与当地及其东北方向的 PV₂₈ 的良好正相关进一步证明中高纬系统对各个雨季的形成确实有重要作用。

另外，我们也作了其他时间尺度（20 天以下、20~40 天和 40~80 天）的位涡场（850 hPa）与降

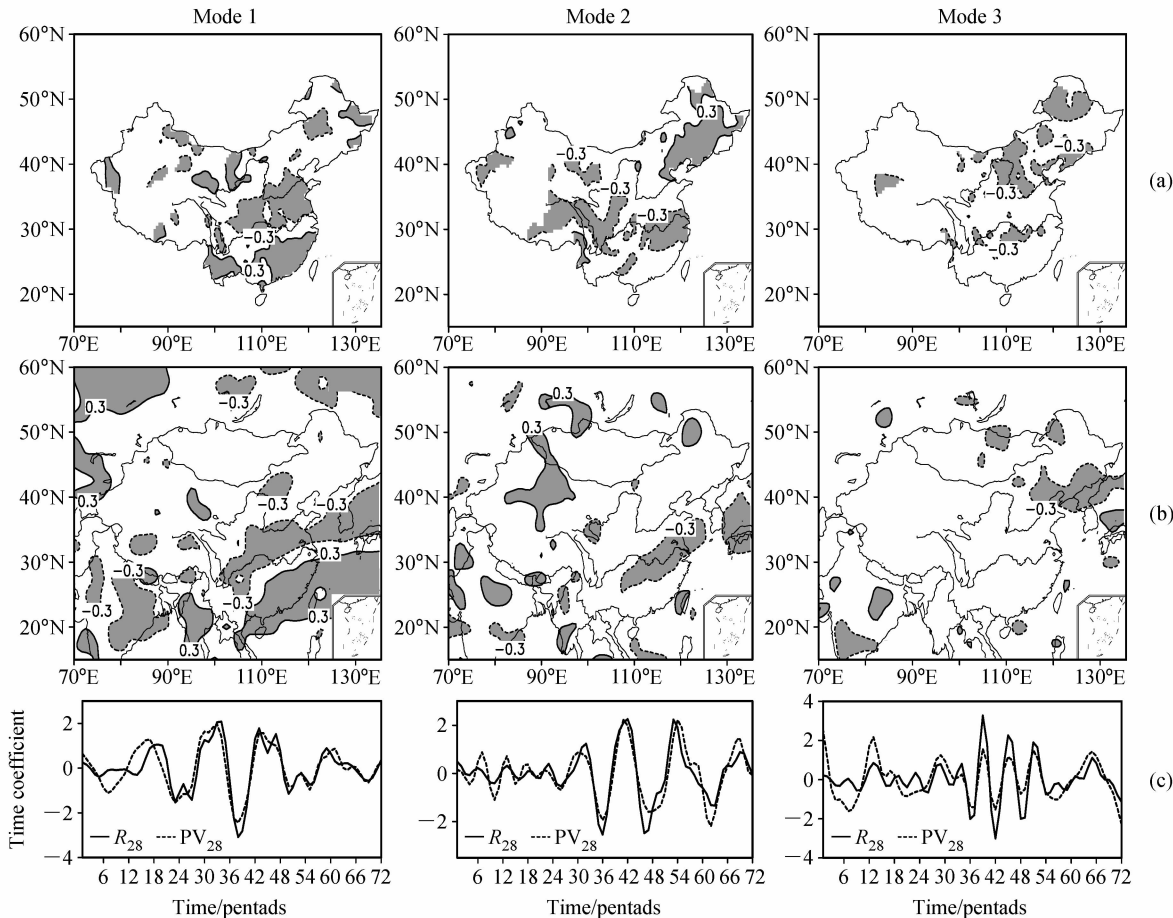


图 10 全年 R_{28} 和 850 hPa PV_{28} 的 SVD 分析：(a) R_{28} 和 (b) PV_{28} 的异性相关系数分布；(c) 时间系数。阴影：相关系数 $|r| \geq 0.3$ ，达到 0.01 的显著性水平

Fig. 10 SVD analysis of R_{28} and 850-hPa PV_{28} throughout the whole year: The heterogeneous correlations of (a) R_{28} and (b) PV_{28} ; (c) time coefficients. The shaded areas; the correlation coefficient $|r| \geq 0.3$, with the significance level < 0.01

水场的奇异值分解(图略),其中40~80天的SVD与以上结果有些相似,而其他两个时间尺度的SVD结果并不能明显反映我国东部的不同雨季。

5 结论

本文根据东亚夏季风的季节内振荡周期,利用位涡与夏季风降水良好的相关关系和位涡自身的特性,对东亚夏季风的不同发展阶段进行了多时间尺度分析,考察了冷空气的来源,得到以下结论:

(1) 位涡是研究夏季风中冷空气的较好指标,其季节内振荡 PV_{28} (PV的20~80天振荡)和 PV_{48} (准60天振荡)与降水有着最好的相关关系,而且具有一定独立性。

(2) 中高纬平流层下部和对流层顶的高位涡库是侵入夏季风系统的冷空气之主要来源,这里的大气对流稳定度非常大。另外,(60°N, 140°E)附近低层的大范围区域是一较为稳定少动的高位涡库(这里的牵连涡度较大),梅雨盛期这一地区是低层

冷空气的重要来源。

(3) 冷空气的侵入路径对不同雨季表现出不同的特征。

对华南前汛期:第一次(第29候左右)冷空气来自东北方向中低层,这部分高位涡空气在影响华南地区以前已与高层位涡库断裂。第二次(第31候左右),高层两个高位涡空气打通后沿等熵面下滑侵入低层。

对梅雨期:冷空气主要来自高层,高低层冷空气输送的路径是向西北倾斜的,趋向平行于等熵面,但其低层冷空气呈扇面状自东北向西南方向输送(梅雨中后期较明显),同时这个NE-SW向的高位涡带在缓慢北移。

对华北雨季:随着等熵面陡峭区北移至40°N附近,高低层冷空气的输送通道也相应北移,第42、43候30°N和50°N附近上空同时出现两个高低层冷空气的输送带,这时我国也对应南北两个雨带。

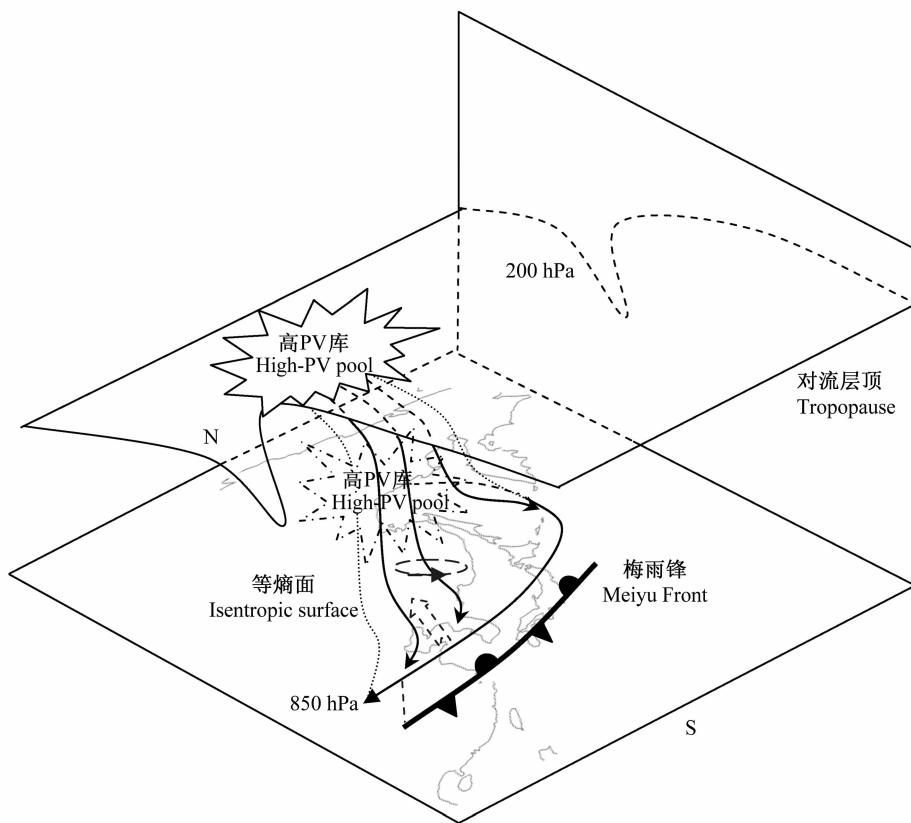


图 11 梅雨期冷空气的来源和活动特征示意图。带箭头实线为冷空气的侵入路径

Fig. 11 Sketch of sources and activities features of cold air during the Meiyu period. The solid lines with arrows are the paths along which the cold air intrudes

(4) 倾斜等熵面是垂直涡度最易发展的区域, 它也是高层冷空气侵入的路径。

(5) 位涡和降水的季节内振荡 (尤其是低频部分) 蕴含了中高纬系统与夏季风系统相互作用的关键信息, PV 的特定分布对应特定的降水类型, 可见, PV 的季节内振荡是导致中国夏季风降水变化的重要因素之一。

最后, 我们总结了东亚夏季风时期冷空气的来源和活动特征 (以梅雨期为例, 如图 11)。东亚夏季风时期, 最主要的冷空气来源是中高纬平流层下部和对流层顶的高位涡库。在某种触发机制的作用下, 这里干冷的高位涡空气以季节内振荡的形式 (主要是准 60 天和 30 天左右的低频振荡) 沿等熵面最陡峭的区域急速下滑, 造成对流层顶折叠, 侵入对流层中低层的东亚夏季风系统, 同时, 等熵面陡峭处的大斜压度和小的对流稳定度使得这里的垂直涡度迅速增长, 诱发低层气旋的快速发展。在梅雨的爆发时期这种发生机制最为典型。梅雨的后期, 冷空气主要来自东北方向低层, 即鄂霍次克海附近的高位涡库, 它在梅雨的中后期变得非常强大, 很可能也与高层的高位涡空气侵入有关 (它们的关系有待进一步研究), 它的存在使冷暖空气在长江中下游地区的交绥得以维持。伴随着等熵面陡峭区的北移, 高位涡空气的侵入路径也相应北移, 雨季随之更替。

参考文献 (References)

Browning K A, Golding B W. 1995. Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121 (523): 465–493.

Chan J C L, Ai W, Xu J. 2002. Mechanism responsible for the maintenance of the 1998 South China Sea summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (5): 1103–1113.

陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to Typhoon over the West Pacific Ocean (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.

Ding Yihui, Liu Yanju. 2001. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during SCSMEX field experiment in 1998 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79 (1B): 255–276.

Erickson C O. 1967. Some aspects of the development of hurricane Dorothy [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 95 (3): 121–130.

Fett R W. 1968. Typhoon formation within the zone of the inter-

tropical convergence [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 96 (2): 106–117.

高守亭, 雷霆, 周玉淑. 2002. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析 [J]. *应用气象学报*, 13 (6): 662–670. Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu. 2002. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (6): 662–670.

高守亭, 崔春光. 2007. 广义湿位涡理论及其应用研究 [J]. *暴雨灾害*, 26 (1): 3–8. Gao Shouting, Cui Chunguang. 2007. The theory of generalized moist potential vorticity and its applicative study [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 26 (1): 3–8.

Haynes P H, McIntyre M E. 1990. On the conservation and impermeability theorems for potential vorticity [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2021–2031.

Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111 (470): 877–946.

胡伯威. 2003. 关于位涡理论及其应用的几点看法 [J]. *南京气象学院学报*, 26 (1): 111–115. Hu Bowei. 2003. Some opinions about the “Potential Vorticity Thinking” and its applications [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 26 (1): 111–115.

矫梅燕, 毕宝贵, 鲍媛媛, 等. 2006. 2003 年 7 月 3~4 日淮河流域大暴雨结构和维持机制分析 [J]. *大气科学*, 30 (3): 475–490. Jiao Meiyun, Bi Baogui, Bao Yuanyuan, et al. 2006. Thermal and dynamical structure of heavy rainstorm in the Huaihe River basin during 3–4 July 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (3): 475–490.

Joung C H, Hitchman M H. 1982. On the role of successive downstream development in East Asian polar air outbreaks [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (9): 1224–1237.

Koutarou Takaya, Hisashi Nakamura. 2005. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (12): 4423–4440.

柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 2005. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件 [J]. *气象学报*, 63 (4): 431–442. Liu Yanju, Ding Yihui, Zhao Nan. 2005. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the South China Sea in 1998. I: Analysis of large-scale fields for occurrence and development of meso-scale convective systems [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (4): 431–442.

潘婕, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2008. 夏季欧亚中高纬环流持续异常事件的 Rossby 波传播特征 [J]. *大气科学*, 32 (3): 615–628. Pan Jie, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2008. Characteristics of Rossby wave propagation associated with the summertime persistent anomaly events of mid- and high-latitude Eurasia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 615–628.

钱永甫, 江静, 张艳, 等. 2004. 亚洲热带夏季风的首发地区和机理研究 [J]. *气象学报*, 62 (2): 129–139. Qian Yongfu, Jiang

- Jing, Zhang Yan, et al. 2004. The earliest onset area of the tropical Asian summer monsoon and its mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (2): 129–139.
- Rossby C G. 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 66 (Suppl.): 68–87.
- Shutts G J. 1983. The propagation of eddies in diffluent jetstream: Eddy vorticity forcing of blocking flow fields [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109: 737–761.
- 陶诗言, 等. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 41–43.
- Tao Shiyan, et al. 1980. The Heavy Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 41–43.
- 陶祖钰, 刘伟. 2005. 关于暴雨和湿急流的讨论 [J]. *气象学报*, 63 (5): 825–833.
- Tao Zuyu, Liu Wei. 2005. Discussion on heavy rainfall and moist jet stream [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (5): 825–833.
- 王遵娅. 2007. 中国夏季降水的气候变率及其可能机制研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 21–34.
- Wang Zunya. 2007. Climate variability of summer rainfalls in China and the possible mechanism [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 21–34.
- 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展 [J]. *气象学报*, 53 (4): 387–405.
- Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 53 (4): 387–405.
- 谢义炳. 1956. 中国夏半年几种降水天气系统分析研究 [J]. *气象学报*, 29 (1): 1–23.
- Xie Yibing. 1956. A preliminary survey of certain rain-bearing systems over China in spring and summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 29 (1): 1–23.
- 徐忠峰, 钱永甫. 2006. 用湿位涡定义的印度夏季风指数及其与中国气候的关系 [J]. *气象学报*, 64 (6): 760–769.
- Xu Zhongfeng, Qian Yongfu. 2006. Moist potential vorticity index of Indian monsoon and its relationship with climate in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64 (6): 760–769.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用 [J]. *大气科学*, 29 (6): 973–985.
- Yao Xiuping, Yu Yubin. 2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (6): 973–985.
- Yen M C, Chen T C. 2002. A revisit of the tropical-midlatitude interaction in East Asia caused by cold surges [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (5): 1115–1128.
- 张立生, 孙建华, 赵思雄, 等. 2007. 长江中游暖切变型暴雨的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 12 (2): 165–180.
- Zhang Lisheng, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2007. A study on heavy rainfall associated with warm shear line in the middle reaches of the Yangtze River in summer [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (2): 165–180.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. *气象学报*, 56 (2): 199–211.
- Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 56 (2): 199–211.