

2004年云南秋季强降水位涡诊断分析

尤 红 曹中和

(云南省玉溪市气象局, 653100)

提 要: 利用 NCEP 格点资料和常规观测资料对 2004 年云南秋季强降水进行位涡诊断分析, 结果表明, 干湿位涡均能较好地反映天气系统的演变特征, 干位涡能很好地反映滇黔辐合强弱和地面冷空气的移动路径。湿位涡则能反映暖湿气流活动特征。强降水发生期间, 中高层强干湿位涡向低层传送, 低层负湿位涡向上伸展。对流层中高层的干湿位涡强中心向低层传送方向和强度变化与强降水雨带移动方向及雨强变化一致。此次强降水对流层中层的强干位涡源位于川东, 表明该过程与 9 月 2—6 日川东大暴雨有关。

关键词: 强降水 干湿位涡 辐合 切变

A Diagnostic Analysis of Potential Vorticity for Yunnan Heavy Rain in Autumn 2004

You Hong Cao Zhonghe

(Yuxi Meteorological Office, Yunnan Province 653100)

Abstract: Based on NCEP grid data and routine observational data, the characteristics of the potential vorticity (PV) of heavy rainfall occurring in Yunnan Province during autumn of 2004 are analyzed. The results show that both DPV and MPV can well present the features of the weather systems. The DPV reflects both convergence intensity between Yunnan Province and Guizhou Province and surface cold air moving activities more particularly. The MPV can reflect well cold and warm air flowing characteristics. During the heavy rainfall in the upper troposphere the strong DPV and MPV tend downwards to the low-level, and vice MPV in the lower troposphere stretch up. The direction and intensity changes of the big cen-

ter of DPV and MPV in the upper troposphere tend to downward the lower-levels are consistent with the moving direction of heavy rainfall belts and the variation of the rain intensity. The origin of the middle tropospheric strong DPV lies in the east of Sichuan Province in this rainfall process, which indicates some relation between the heavy rain in the eastern Sichuan Province during 2-6 September and the rainfall process in Yunnan Province.

Key Words: heavy rain dry and moist potential vorticity (DPV and MPV) convergence shear

引 言

位涡是“位势涡度”的简称,是综合热力、动力的物理量,有等压面、等熵面、干、湿位涡等多种形式。早在 20 世纪 30、40 年代 Rossby^[1]和 Ertel^[2]就提出位涡的概念并证明其具有守恒性,80 年代 Hoskins 等^[3]重新估价和阐明了位涡应用的重要意义,近年来位涡理论被广泛用于天气动力学研究,特别是中尺度暴雨、台风暴雨、爆发性气旋等研究中^[4-7],在暴雨形成的物理机制以及暴雨强度和落区方面得到了一些有意义的结论。范可等^[8]对云南夏季强降水的位涡分布特征作了诊断;段旭等^[9]应用湿位涡研究了滇中强降水对流层低层湿位涡特征。

云南地处低纬高原,地形复杂,具有独特的天气气候特征,全省性的强降水天气多集中在夏季 7、8 月,用位涡理论研究和诊断也多为夏季强降水,然而对云南秋季发生的全省性强降水研究还是空白。本文在文献^[8, 9]研究的基础上,对 2004 年 9 月 7 日发生的云南秋季全省性强降水个例作等压面上的位涡诊断,对比分析了干湿位涡的分布特征,进一步探讨了位涡理论在云南强降水预报和诊断分析中的应用前景。

1 资料和方法

本文用 2004 年 9 月 5 日 00 时—8 日 00

时(世界时,下同)每隔 6 小时的 NCEP 资料,选取经纬度网格区域的中心格点为 25°N、102°E,共有 20×20 个网格点,网格格距为 1°×1°,作等压面的干、湿位涡诊断。

位涡是由绝对涡度和位温梯度的乘积决定的。在 p 坐标下忽略 ω 水平变化,等压面上干位涡的表达式是:

$$PV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$$

干位涡 PV 是综合大气动力学和热力学的物理量,可分解成第一项与静力稳定度有关的正压项和第二项与风垂直切变、位温水平梯度有关的斜压项。

在 p 坐标下忽略 ω 水平变化,等压面上的湿位涡表达式是:

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_*}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_*}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_*}{\partial y} \right) = \text{const}$$

上式中第一项是湿位涡的垂直分量(其中 ζ_p 是垂直方向涡度, f 是地转涡度, θ_* 是相当位温),其值取决于空气气块绝对涡度的垂直分量和相当位温的垂直梯度的乘积;第二项是湿位涡的水平分量,其值由风的垂直切变(水平涡度)和水平梯度决定,表征大气的湿斜压性。干、湿位涡单位(PVU)是 $10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 降水概况与环流特征

2.1 降水概况

2004年9月6—7日,云南出现全省性秋季强降水过程,此次强降水范围广、强度大、持续时间短,大部地区12小时降水量达暴雨量级。整个强降雨带沿东北西南向快速移动,滇中、滇西和滇南大部地区出现大雨和暴雨。以位于云南省中部的玉溪市为例,全市强降水出现在6日18时—7日00时,强降水中心位于西部4县,其中新平县的磨盘山3小时(6日19—22时)降85.2mm特大暴雨,7日00时后玉溪市除元江县局部有强降水外,其它县区降水停止。

2.2 环流特征

2.2.1 500hPa环流特征

500hPa上的环流形势具有明显的经向特点(图略):①从暴雨开始前的9月5日至暴雨维持期间,滇缅间一直是闭合588高压控制,云南省上空为西北气流;②6日00时起在湘黔桂三省间对应有一588闭合高压环流生成,高压中心在贵州中部,随后此高压环流缓慢增强并西伸,逐步控制华中和华南大部,最后和副高合并;③6日12时两高间的滇黔辐合区在安顺、会泽、九龙一线生成,该滇黔辐合区于6日12时—7日12时迅速西南压并逐步减弱消失。

2.2.2 700hPa环流特征

700hPa上此次暴雨过程主要影响系统是川滇切变。5日00时—6日12时青藏高原至新疆为一闭合高压环流,且高度场不断升高,到6日12时达到最强,出现318高值中心,在昆明、丽江一线有川滇切变,北高南低形势明显,有利于川滇切变的南压;

7日00时后,青藏高原至新疆的高压环流继续增强,川滇切变南压到泸西、玉溪、甸一带,随后川滇切变越过哀牢山并减弱。

2.2.3 地形形势特征

与700hPa川滇切变南压相对应,地面上是一次弱冷空气自东北向西南压的过程。暴雨开始前冷空气堆积在滇东北到川南一线,从6日12时后冷空气开始向西南方向移动,到7日00时冷空气已影响了哀牢山以东地区,随后冷空气在西南压的过程中随川滇切变的减弱而相应减弱消失。

3 位涡分析

3.1 500hPa干湿位涡分析

强降水开始前的5日00时—6日06时,强的干位涡中心位于川东、重庆,与西南涡对应,弱干位涡位于滇西南。6日06时后云南省上空的干位涡开始逐步增大。图1是9月6日12时—7日00时500hPa上的干位涡和风场的分布图。由图可见,滇缅高压和湘黔桂三省间的高压环流对应PV相对低值区,滇黔辐合区对应PV高值区,滇缅高压东侧的西北气流不断将较高PV的冷平流向西南移动的滇黔辐合区中输送,6日12时在滇东北出现 $0.6 < PV < 0.65$ 的强中心,地面冷空气位于强PV中心西南侧的梯度大值区中,相应地面强降水开始,随后该干位涡强中心值增大并向西南快速移动到滇中,地面冷空气对应东北西南向移动,6日18时强中心值0.628PVU位于 25.4°N 、 102.7°E 。在此期间,西南暖湿气流从青藏高原南侧绕四川经滇东北向辐合区输送,水汽条件稍差,地面上降水强度较小。6日18时后,华南高压底部的东南暖湿气流源源不断地向辐合区推进,7日00时强PV中心值增大为0.691PVU并向西南移至 24.7°N 、

101.8°E, 7日06时强中心向西南移至22.8°N、100.6°E并达到最大值0.777PVU, 强冷暖空气交汇于强PV正值区对应的辐合区的西南侧, 使低压辐合区西南侧地面的降水增强。7日06时后, 强PV中心和辐合区继续向西南移动过程中, 较高PV的冷平流无补充南下, 较低PV的暖湿气流减弱, 辐合区内PV值减弱, 辐合区和地面冷空气减弱, 强降水相应减弱并消失。过程中地面

强降水区域随500hPa干位涡 $PV > 0.6$ 强中心移动, 由于该强干位涡中心向西南移动快, 造成地面上的强降水持续时间短、雨强大。同时500hPa干位涡 $PV > 0.6$ PVU强中心区域和滇黔辐合区位置基本重合, 且两者移动方向一致。以上表明500hPa干位涡能较好地表征冷空气和滇黔辐合区的强度与移动方向。

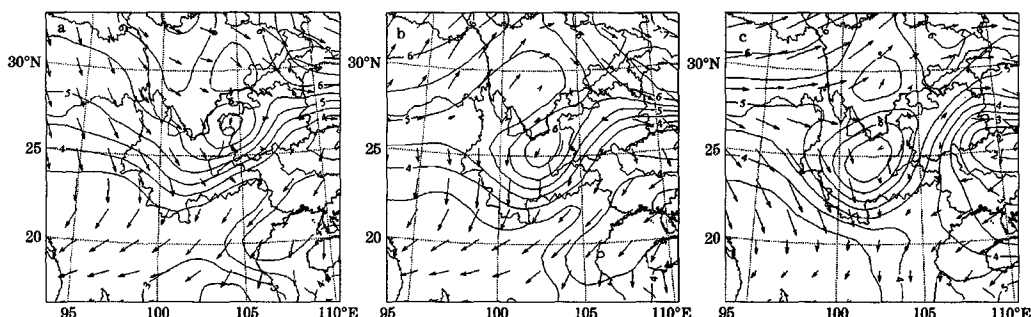


图1 2004年9月6日12时(a)、18时(b)及7日00时(c)、500hPa干位涡和风场分布

单位: 10^{-1} PVU, $m \cdot s^{-1}$

与干位涡相比, 强降水过程中500hPa湿位涡(图略)的反映能力虽较弱, 但也能较好表征暖湿气流的活动特征。在暴雨开始前全省湿位涡MPV值也是一个增大过程, 当 $MPV = 0.15$ PVU时, 地面对应有强降水, 当MPV值明显减小或增大时, 地面降水减弱并结束, 同时发现 $MPV = 0.15$ PVU线能较好地表示500hPa滇黔辐合区的风向辐合线所在位置。

3.2 700hPa干湿位涡分析

从700hPa干位涡和风场逐日分布图(图略)可见, 5日00时—6日06时 $0.5 < PV < 0.7$ 的强正值区首先出现在川东和川南, 随后向西南移动, 云南大部6日12时后PV值开始增大, 18时在滇中出现 $PV = 0.55$ 的强正值中心, 中心值0.563PVU位

于24.6°N、101.9°E, 强PV中心区内出现降水, 随后该强PV中心增强并西南压。青藏高原至新疆的高压和副高为PV低值区, 川滇切变则对应PV高值闭合中心, 四川南部存在PV低值中心, 该PV低值中心外围的东侧和南侧为PV等值线密集区, 区内盛行东北风, 冷空气活跃, 在强盛的东北气流引导下有高位涡强冷空气从中高纬向西南输送, 灌入川滇切变后与来自南海的东南暖湿气流结合, 使川滇切变加深, 并于7日00时在玉溪西南和思茅东北部间形成一闭合低环流, 相应PV中心值最强, 其中心位于23.8°N、101.6°E, 其值为0.743PVU。该强PV中心所处玉溪市西部4县在PV值迅速增大的6日18时至7日00时出现过程最强降水, 之后强PV中心减弱并西南压, 冷空气无补充南下, 冷暖空气相互作用减小,

切变和低环流减弱消失, 强降水过程结束。以上分析表明 700hPa 干位涡能较好地表征冷空气和川滇切变的活动, 并表明此次强降水过程中的冷空气是由东北向西南影响云南的。

700hPa 湿位涡演变特征 (图 2) 为: 强降水开始前云南大部地区的湿位涡 $MPV < -0.05$ PVU, 根据 Hoskins 位涡理论, 可以认为负的湿位涡代表不稳定的暖湿气流, 即云南存在对流不稳定。6 日 12 时后 MPV 值开始增大, MPV 正值区由滇东北向西南向扩展, 于 18 时控制云南中部和东

北部地区, 地面强降水开始并出现在 MPV 零线值附近, MPV 正值区域范围在 6 日 18 时—7 日 00 时达到最大, 此时冷暖空气相互作用最强, 湿斜压不稳定释放, 地面降水最强, 之后 MPV 正值区域向东收缩, MPV 零值收缩至云南东部, 地面冷空气减弱消失, 此时云南大部虽为 MPV 负值区控制, 因无冷空气交汇, 对应地面强降水结束。以上分析表明低层 MPV 负值区能表征不稳定的暖湿气流活动特征, MPV 零线能反映地面强降水的落区。

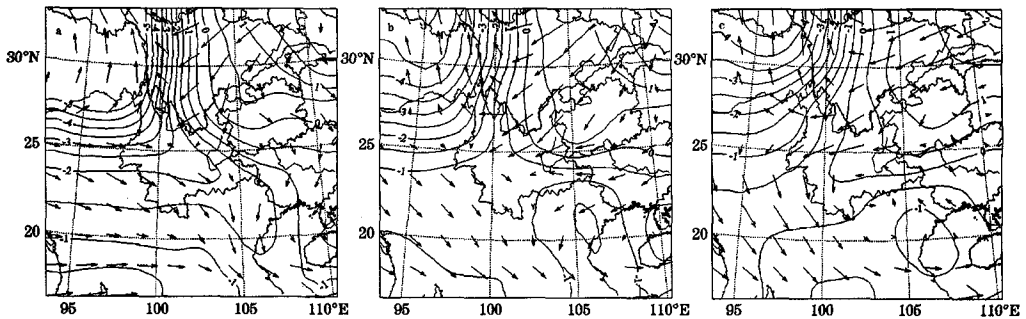


图 2 2004 年 9 月 6 日 12 时 (a)、18 时 (b) 及 7 日 00 时 (c) 700hPa 湿位涡和风场分布
单位: 10^{-1} PVU, $m \cdot s^{-1}$

3.3 干位涡垂直分布特征

云南此次强降水影响系统是从东北向西南移动的, 为研究强降水区域上空对流层干位涡相互作用及干位涡分布特点, 并分析该强降水与 9 月 2~6 日川东大暴雨的联系, 沿 $102.25^{\circ}E$ 作 $19^{\circ} \sim 30^{\circ}N$ 区域间 6 日 12 时—7 日 00 时的干位涡垂直剖面 (图 3)。从图 3 可见, 6 日 12 时—7 日 06 时对流层顶均为 PV 高值区, 当 200hPa $PV < 0.2$ PVU 时, 对流层顶与对流层中低层的联系阻断, 对流层顶 PV 高值不能向中低层传送, 相应地面无强降水; 当 200hPa 上 $0.2 < PV < 0.3$ 时, 对流层高层的高 PV 值向对流层中

低层传输通道打通, 高 PV 值向下传输, 500hPa 到 300hPa 间形成一个 $PV > 0.6$ 的闭合强正值中心, 地面相应产生强降水。过程中 500hPa 到 300hPa 间的强 PV 中心首先在川东出现, 相应 9 月 2—6 日川东有由西南涡引发的大暴雨过程。6 日 12 时—7 日 00 时强的 PV 正值中心从高纬度、高中层向低纬度、低层传送, 地面冷空气东北西南向影响云南, 相应强降水雨带自东北向西南移, 同时强降水雨带上空对流层中低层强 PV 中心是增大过程, 当 $PV = 0.6$ PVU 线伸展到 700hPa 以下时, 对流层高层对中低层的影响作用最强, 地面降水强度最大。7 日 00 时后强 PV 中心继续向低纬低层传送,

传送过程中高层、中低层的 PV 值逐渐减弱, 两者相互作用逐渐减小, 导致向西南压的滇黔辐合区和川滇切变填塞, 冷暖空气相互作用减弱, 地面强降水结束。

从以上的干位涡剖面分析可以看出, 强降水过程中, 高层干位涡有向对流层中低层延伸的特征; 同一等压面上强干位涡中心从

高纬向低纬的传输轴呈东北西南走向, 而同一经度上强 PV 中心从高纬、高中层向低纬、中低层的传输轴呈西北东南走向; 地面强降水对应的中低层 PV 临界值是 $0.6PVU$, PV 大于 0.6 时强降水开始, 降水最强时 $0.6PVU$ 值线会伸展到 $700hPa$ 以下。

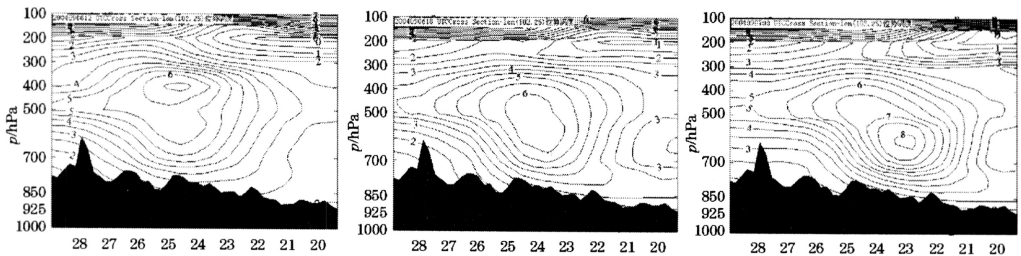


图3 2004年9月6日12时(a)、18时(b)及7日00时(c)沿 $102.25^{\circ}E$ 的干位涡剖面
单位: $10^{-1}PVU$

3.4 湿位涡垂直分布特征

图4是沿 $102.25^{\circ}E$ 作的 $19^{\circ}\sim 30^{\circ}N$ 区域间6日12时—7日00时的湿位涡垂直剖面, 从图4可以看出, 在强降水发生区域上空, 对流层高层的 MPV 强正值是向低层输送的; 对流层高层和中低层打通的高度在 $200hPa$ 至 $250hPa$ 之间, 在 $500hPa$ 以上到 $300hPa$ 间对应有 $0.1 < MPV < 0.2$ 的强湿位涡中心; $400hPa$ 到 $500hPa$ 附近的 MPV 在 $0.15PVU$ 左右, $MPV=0.1PVU$ 的线在

$600hPa$ 附近; $700hPa$ 以下层为负 MPV 区, 低层有不稳定的暖湿气流供应, 表明此次强降水过程中的暖湿气流主要来自低层; 强降水发生、维持期间低层的负湿位涡有明显向上伸展的特点, 伸展方向是从低纬低层向高纬中层伸展, 代表暖湿气流向北向高层推进特征。随着强 MPV 正值中心向低纬传送, 强降水带由中高纬向低纬移动, 当强 MPV 正中心移动过程中增强和低层的负湿位涡向上伸展时, 低纬低层向北输送的不稳定暖湿气流与南下冷空气汇合, 加上川滇切变的辐

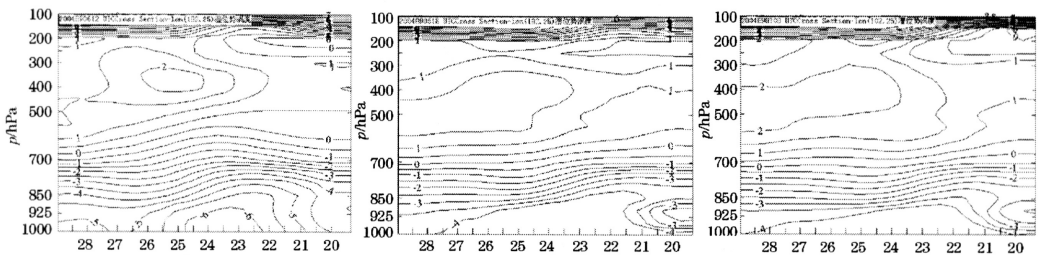


图4 2004年9月6日12时(a)、18时(b)及7日00时(c)沿 $102.25^{\circ}E$ 的湿位涡剖面
单位: $10^{-1}PVU$

合机制, 地面降水增强; 而当强 MPV 正中心在向西南移动中减弱时, 低纬低层的负 MPV 暖湿气流无向上伸展, 暖湿气流输送中断, 地面强降水结束。

从以上湿位涡剖面分析得出: 强降水过程中, 强正湿位涡也有从高层向对流层中低层延伸的特征; 同一等压面上的强湿位涡从中高纬向低纬传送的传输轴呈东北西南走向; 当高层与低层的 MPV 相互作用减弱, 中高层的强正湿位涡中心值明显减小, 低纬低层负湿位涡不向上伸展时, 地面强降水结束。文献 [8] 中云南夏季强降水位涡诊断分析中发现低层干位涡有向上伸展的特点, 且其表征的是暖湿气流, 而此次秋季强降水干湿位涡诊断分析中发现低纬低层的负湿位涡也有明显向高纬中层伸展的特点, 它对应了由东南向西北推进的东南暖湿气流。

4 结论

通过诊断分析, 发现位涡理论对 2004 年云南秋季强降水有较好解释, 且发现此次强降水过程与引起 9 月 2—6 日川东大暴雨的西南涡是相关联的。强降水期间, 干湿位涡都能较好地反映天气系统的演变特征, 相比较而言, 干位涡能更好地反映滇黔辐合区、川滇切变及地面冷空气的移动路径, 湿位涡则能表征出低层不稳定暖湿气流的变化和输送特征。强降水发生期间, 中高层强干湿位涡均向低层输送, 对流层中高层的干湿位涡强中心向低层传送方向与强降水雨带移动方向一致, 传送期间中低层干湿位涡中心

值增大时, 地面降水强度增大, 传送过程中中低层强干湿位涡中心值减小时地面降水减弱, 当对流层高层对中低层位涡传送消失时, 中低层位涡值明显减小, 地面强降水结束。云南秋季强降水过程中, 低层负湿位涡有从低纬低层向高纬中层上空伸展的特点, 700hPa 上湿位涡零线能反映地面强降水落区。此外, 500hPa 上 MPV=0.15 线能较好地表征 500hPa 滇黔辐合区的风向辐合线位置。

参考文献

- 1 Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action [J]. J Marine Rev, 1939, 2 (1): 38-55.
- 2 Ertel H. Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz [J]. Met Z, 1942, 59: 277-281.
- 3 Hoskins B J, McIntyre M E and Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy Meteorol Soc., 1985, 111: 877-946.
- 4 王川, 寿绍文. 一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析 [J]. 气象, 2003, 29 (7): 7-12.
- 5 郑传新, 周军. 盛夏影响广西的两类台风暴雨对比分析 [J]. 气象, 2003, 29 (10): 13-16.
- 6 赵宇, 杨晓霞, 孙兴池. 影响山东的台风暴雨天气的湿位涡诊断分析 [J]. 气象, 2004, 30 (4): 15-20.
- 7 王丛梅, 丁治英, 张金艳. 西北涡暴雨的湿位涡诊断分析 [J]. 气象, 2005, 31 (11): 28-33.
- 8 范可, 琚建华. 位涡诊断在云南夏季强降水预报中的应用 [J]. 高原气象, 2004, 237 (3): 387-393.
- 9 段旭, 李英. 滇中暴雨的湿位涡诊断 [J]. 高原气象, 2000, 19 (2): 253-259.