

湿位涡在广西冰雹大风天气过程诊断分析中的应用

覃昌柳¹ 黎惠金¹ 董良森²

(1 广西来宾市气象台, 来宾 546100; 2 广西壮族自治区气象台, 南宁 530021)

摘要 应用湿位涡理论, 对 2006 年 4 月发生在广西的 3 次冰雹大风强对流天气过程进行了详细地诊断分析。结果表明: θ_{se} 线陡立密集区附近对流稳定度很小, 冷空气从高层沿等熵面下滑的过程中绝对涡度增加, 导致气旋性涡度的发展加强, 为冰雹、大风天气的易发地; 强对流天气发生前对流层高层有湿位涡高值中心向下传播, 强对流易在正压湿位涡等值线相对密集零线附近和 925 hPa 上斜压湿位涡负中心附近出现。

关键词 冰雹 大风 湿位涡 倾斜涡度 诊断分析

引言

强对流天气的发生发展与环境场的水汽条件、稳定度条件和抬升力条件有着非常密切的关系。但是强对流天气一般都是在有利的大尺度环境流场下, 由中、小尺度系统相互作用的结果, 形成机理比较复杂, 单一的诊断量如涡度、散度、垂直速度、水汽通量等均难以全面诊断强对流天气发生发展的物理机制。

湿位涡是同时表征大气动力、热力和水汽性质的综合物理量。1995 年, 吴国雄等^[1]从完整的原始方程出发, 导出了湿位涡方程, 证明了绝热无摩擦的饱和大气中湿位涡的守恒性, 并由此提出了湿位涡和倾斜涡度发展理论。近年来, 其概念和理论得到了深入的研究和应用。文献[3]~[10]依据倾斜涡度发展理论, 分别对我国锋面降水、台风、暴雨、冰雹等天气进行了湿位涡应用研究, 并得出很多有意义的结论。本文以广西中北部地区 2006 年 4 月出现的 3 次造成严重灾害的区域性冰雹大风天气过程为例, 应用 00:00 和 12:00 的 1000、925、850、700、500、400、300、200 hPa 高空观测资料, 以 25°N、110°E 为中心, 用最优客观分析方法内插到 1°×1°的网格点上, 计算各层次的湿位涡情况并对各分量进行特征分析, 探讨广西湿位涡与冰雹的关系, 以期对冰雹的短时预报提供一些有意义的启示。

1 湿位涡表达式

考虑大气垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多, 忽略 ω 的水平变化, p 坐标系下湿位涡(简称 M_{pv})守恒方程为:

$$M_{pv} = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} = \text{常数}$$

其中 M_{pv} 为湿位涡, ζ_p 是垂直方向涡度, f 是地转涡度, θ_{se} 是假相当位温。

可以将湿位涡分为正压项和斜压项:

$$\text{正压项: } M_{pv1} = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$$

$$\text{斜压项: } M_{pv2} = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}$$

表明在无摩擦、湿绝热大气中, 系统涡度的发展由大气层结稳定度、斜压性和水平风垂直切变等因素决定。文献[1]、[2]指出, 在湿位涡守恒的制约下, 由于 θ_{se} 面的倾斜, 大气水平风垂直切变或湿斜压性增加能够导致垂直涡度 ζ_p 显著发展, 倾斜越大, 气旋性涡度越剧烈, 这种涡度增长称为倾斜涡度发展, 垂直涡度增长的必要条件为: $M_{pv2} / \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$ 。因此, 垂直涡度的发展可在对流不稳定大气中发生, 也可在对流稳定大气中发生, θ_{se} 面的陡立是倾斜涡度发展的重要条件。

2 假相当位温分布分析

2006年4月9日,地面滇、黔和桂北为强大的西南暖低压控制,高温高湿,北面无冷空气南下,黔、湘和桂北500~400 hPa上空为一干舌控制,华南南部盛行强盛的西南急流,9日下午到晚上,700~500 hPa华中冷温槽东南移,在天气尺度中触发了中尺度对流云团的发展,致使9日下午到晚上及10日凌晨贵州锦屏、丹寨以及广西南丹、凤山、资源、龙胜、全州等10余县市分别出现了冰雹、大风等强对流天气。12日和23日08:00,广西地面均为西南暖低压控制,12日地面冷锋位于27°N附近,锋后高压1037 hPa,低空华南南部有一支风速大于16 m/s的西南风急流存在,12日下午在南下地面强冷空气的抬升作用下,广西全州、兴安、桂林、宜州、忻城、合山、兴宾、象州等9县市区出现了大风或冰雹天气;23日08:00地面冷锋位于30°N,锋后高压1022 hPa,低空急流不明显,23日下午,地面冷空气快速南下,触发了强对流天气,导致广西融水、昭平、凤山、荔蒲、平乐等7县出现了雹灾。

2.1 等压面上假相当位温分布

从几次冰雹、大风过程850 hPa θ_{se} 分布逐日演变图上可以看到其共同的特点是(图略),在过程开始的前两日,在越南西北部沿海到湘、桂一带开始出现一由西南向东北伸展的 θ_{se} 高能舌,高值中心位于越南沿海到广西区内,等 θ_{se} 密集区位于高能舌的西北方(9、12日冰雹、大风过程)或北到东北方(23日强对流过程,冷空气从中偏东路径南下)。到了强对流天气爆发的当日,高能舌进一步南压,其中心数值也继续加大,其中12日和23日高能中心加大至352 K以上,9日也达到了344 K以上,密集区也南压至桂北附近,桂北区域湿斜压性增强,强对流天气就出现在高能舌北侧密集区内。强对流天气过后, θ_{se} 锋区和高能舌区明显南压,广西中北部的强对流天气结束。

2.2 假相当位温的垂直剖面图特征

由 M_{pv} 守恒方程可知,在湿位涡守恒的条件制约下,由于等 θ_{se} 面的倾斜,大气水平风垂直切变或湿斜压性的增加能够导致垂直涡度的显著发展,倾斜越大,气旋性涡度越强,越容易造成强对流天气。

图1给出了9日08:00、20:00和12日、23日08:00沿110°E的 θ_{se} 垂直剖面图。从图中可看到,

其共同特征是强对流区700~400 hPa上空为 θ_{se} 低能舌或低值区,低层强对流区则处在由南向北伸展的 θ_{se} 高能舌附近,上干冷下暖湿, $(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p})_{850-600 \text{ hPa}} >$

10 °C,中高空有强的对流不稳定($\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$),地面到850 hPa低空为 θ_{se} 陡峭密集区,对流稳定性很弱($\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \approx 0$ 或小于0),且 θ_{se} 线在近地层几乎垂直,其中9、12和23日08:00低空 θ_{se} 线略向北倾斜,表明低层暖湿气流较强,低空有西南气流向北输送暖湿空气,而9日20:00 925~850 hPa之间 θ_{se} 线略南倾,估计为9日下午黔南到桂北第1次强对流天气爆发后,850 hPa低空有弱冷空气入侵所致;高空除12日08:00外, θ_{se} 低值中心位于强对流区北部,说明高空有干冷空气从高纬向低纬入侵,致使强对流区高空不稳定性不断加大,至于12日08:00高空 θ_{se} 低值中心位于强对流区的南部,则主要由于高空高低纬环流较平直,冷空气活动不明显,而强对流区及其以南高空较干所致。 θ_{se} 陡峭密集区和高空强对流不稳定层结的出现,使得气旋性涡度急剧加强,中尺度对流云团发展,强对流天气于当日下午或晚上爆发。

3 冰雹、大风过程的湿位涡分布特征

3.1 垂直剖面图上的 M_{pv} 特征

通过对这几次冰雹、大风天气过程 M_{pv} 沿110°E的逐日的经向垂直剖面图(图略)分析发现,在强对流发生前一天到强对流发生当日08:00,强对流区500 hPa以上高空 M_{pv} 均为正值区,850~600 hPa中低层则为负值区,而到了925 hPa以下近地层 M_{pv} 又转为正值区,与强对流区不同的是,强对流以南地区近地层 M_{pv} 为负值。强对流发生前夕,受干冷空气影响,对流层高层有高位势涡度扰动向南发展和向下传播,使得强对流区低层斜压性增大,引起低层的对流稳定度减小,促使气旋性涡度发展,导致冰雹、大风等强对流天气的出现。

为了分辨天气系统中正压性和斜压性对强对流天气的不同作用,分别计算了 M_{pv1} 和 M_{pv2} 。从 M_{pv1} 和 M_{pv2} 的数值来看,与暴雨天气过程的 M_{pv2} 值比 M_{pv1} 值小一个量级不同^[5],冰雹、大风区的 M_{pv2} 值与 M_{pv1} 值量级相当,只是数值略小,说明强对流天气过

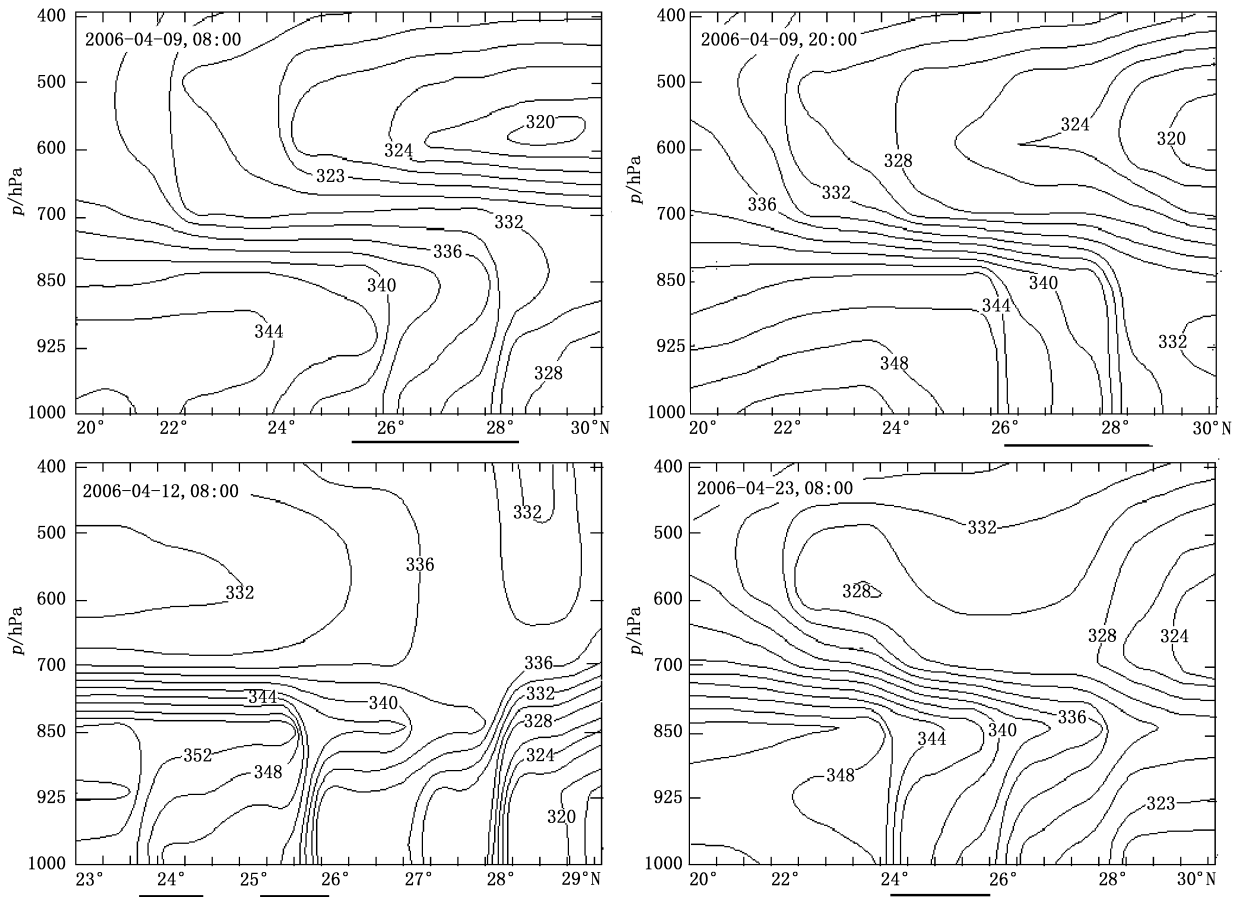


图 1 沿 110°E 剖面的 θ_{se} 垂直分布(单位:K,图下粗实线为冰雹、大风区的纬向跨度)

程对层流低层湿斜压作用与正压作用相当。由于 $M_{pv1} > M_{pv2}$, M_{pv} 主要由 M_{pv1} 决定,因此 M_{pv1} 的分布与湿位涡 M_{pv} 的分布及演变特征相似。以 4 月 9~10 日冰雹过程为例分析 M_{pv1} 沿 110°E 垂直剖面特征演变情况(图略)。8 日 08:00, 30°N 上空有 M_{pv1} 高值中心从对流层高层朝强对流区对流层中层倾斜发展,说明强对流区以北高层开始有干冷空气向下向南入侵,到了 9 日 08:00,强对流区上空中高层 M_{pv1} 明显加大, $50 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等值线呈舌状向南向下伸展,位置由 8 日 08:00 在 200 hPa 高度向下扰动至 400 hPa 高度,而低层由于暖湿空气的抬升作用,强对流区 M_{pv1} 负值区的绝对值明显加大,9 日 08:00 M_{pv1} 负值中心由 8 日 08:00 的 $-10 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $-40 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$,由于高层 M_{pv1} 正值区与低层 M_{pv1} 负值区相互作用,即高层下滑的干冷空气与低层抬升的高温高湿空气交汇,容易贮存和释放湿对流不稳定能量,导致 9 日下午黔南到桂西北出现冰雹大风天气;

20:00, $50 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的等值线更是向下进一步伸展至 500 hPa 中层,低层 M_{pv1} 负中心则进一步降至 $-60 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$,9 日夜間到 10 日凌晨湘南到桂东北爆发了严重的冰雹大风等强对流天气。

图 2 是几次强对流天气发生当日沿 110°E 的 M_{pv2} 垂直剖面图,可以看到,9、12、23 日 08:00 以及 9 日 20:00 广西中北部上空 700 hPa 以下均为 M_{pv2} 负值区,最大负中心在 925~850 hPa 之间,且 M_{pv2} 负中心轴随高度向北部倾斜,700 hPa 以上大部为弱的正值区,而广西南部中低空一般都存在着一个 M_{pv2} 正值中心,强对流区就落在 925 hPa 高度上 M_{pv2} 负中心附近,在这里由于近地层 $M_{pv2} < 0$,且 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ 略小于 0, $M_{pv2} / \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$,倾斜涡度急剧发展。次日,冰雹、大风区从低空到高空 M_{pv2} 转为正值,表明高低空全转为一致的冷气团控制,强对流天气结束。

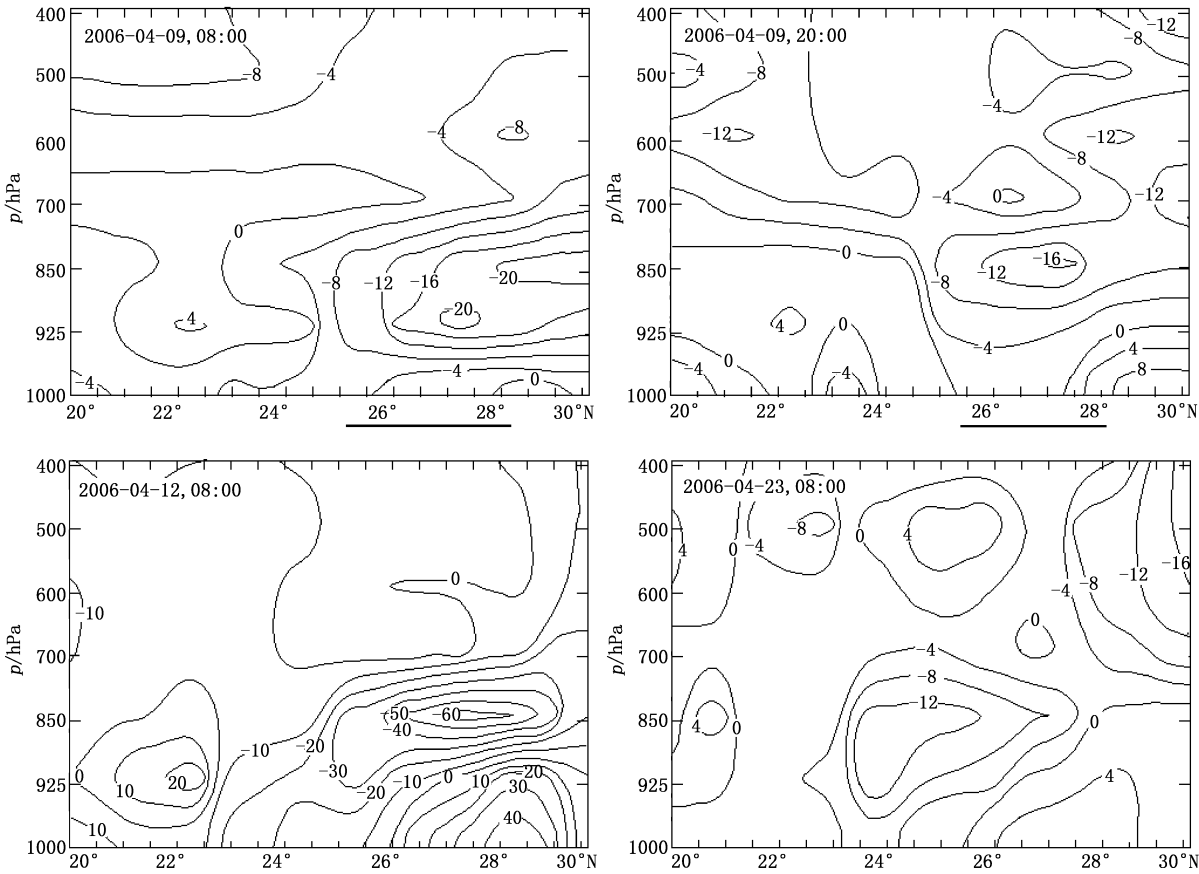


图 2 沿 110°E 的 M_{pv2} 垂直剖面图(单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 图下粗实线为冰雹、大风区的纬向跨度)

3.2 等压面上的湿位涡分布

3.2.1 等压面上 M_{pv1} 分布特征

有研究表明^[3],在 M_{pv1} 等值线相对密集的零线附近,是冷暖空气交汇而有利于辐合、垂直涡度剧烈发展的地带。

图 3 是 4 月 9 日、12 日和 23 日强对流发生当日 08:00 850 hPa 和 925 hPa 的 M_{pv1} 分布图。从图中可以看到,尽管由于影响系统不同或强弱存在差异,但在 M_{pv1} 图上却都有着共同的特征,即在 850 hPa 强对流发生区均位于负的 M_{pv1} 密集带接近于零线附近, M_{pv1} 负中心位于强对流区的南部,而在近地面 925 hPa 上,强对流区则位于由北向南伸展的 M_{pv1} 正中心舌尖附近密集带靠近零线一侧,这正是冷暖空气交汇、利于辐合、垂直涡度剧烈发展的地带;另外,还可看到,强对流区上空对流稳定层($M_{pv1} > 0$)仅到达近地面层高度,到了 850 hPa 已转为对流不稳定($M_{pv1} < 0$),这是强对流出现当日近地层有弱冷空气入侵把暖湿空气向上抬升的反映,这一点

也可从 θ_{se} 的垂直分布图上(图 1)得到说明。在 θ_{se} 的垂直廓线上,强对流区 850 hPa 低空存在着 θ_{se} 的相对高值区,这种结构反映大气稳定性质与 M_{pv1} 反映的情况是一致的,而到了 500 hPa 以上对流层高层(图略),由于有干冷空气存在,强对流区的 M_{pv1} 值由负转正,与低层一致,强对流也出现在高层 M_{pv1} 密集带近零线附近。随着冷暖空气的进一步交汇,强对流区上空的干冷空气增厚,850~500 hPa 之间的不稳定性减弱, M_{pv1} 值转正,强对流天气结束。

3.2.2 等压面上 M_{pv2} 分布特征

吴国雄等在对倾斜涡度发展理论的研究中发现,在对流不稳定(稳定)大气中,如湿位涡的水平分量为正(负)值时, θ_{se} 陡立处必有垂直涡度急剧发展,是暴雨、强对流天气的易发生地。

以 925hPa 为例分析几次冰雹、大风过程 M_{pv2} 分布和演变情况。从 M_{pv2} 场分布图(图略)可以看到,在冰雹、大风出现当日 08:00,贵州、湖南南部到

广西中北部地区近地层均为大片的 M_{pv2} 负值区,冰雹、大风区就落在负值区的轴线附近,是 M_{pv2} 绝对值的相对大值区,配合对流层低层弱的对流稳定、 θ_{se} 陡峭密集区且 θ_{se} 线几乎垂直,有利于倾斜涡度的急剧发展。另外,从这几次过程前后一天的 M_{pv2} 的演变情况来看,强对流天气出现前夕,冰雹、大风区的

M_{pv2} 负大值区有一个数值增大的过程,强对流天气爆发后 M_{pv2} 负的大值区东南移出广西,表明在强对流天气过程发生前夕,大气斜压性加大,当风的垂直切变和位温水平配置达到最佳配置时,冰雹、大风等强对流天气出现。

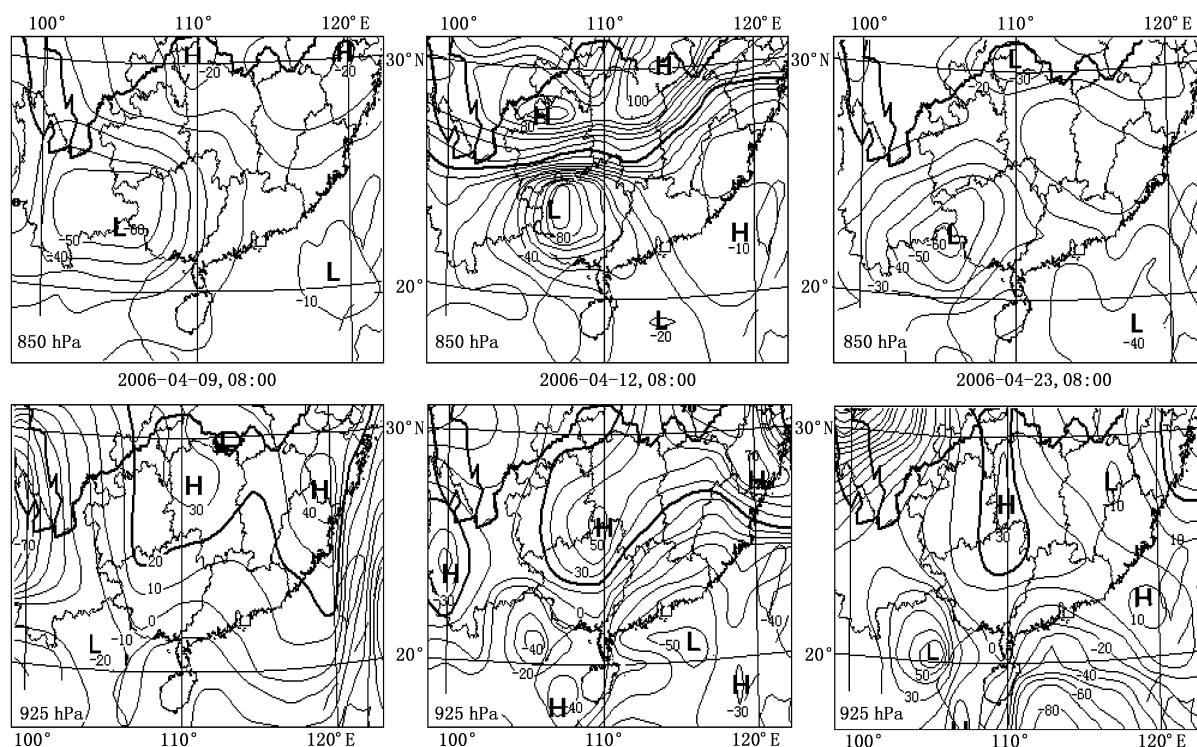


图 3 2006 年 4 月 9、12 和 23 日 08:00 850 hPa、925 hPa M_{pv1} 分布(单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)

4 小结

(1)湿位涡是一种综合表示大气动力状态、热力状态及水汽状况的物理量,倾斜涡度的发展是强对流发生发展的重要因素。尽管 2006 年以来严重影响广西的几次区域性冰雹、大风等强对流过程或影响系统或系统强弱、配置不同,利用湿位涡理论却均可以得到相似的解释。在 p 坐标中, θ_{se} 陡峭和密集区附近对流稳定度很小,冷空气从高层沿等熵面下滑的过程中绝对涡度增加,导致气旋性涡度的发展加强,为强对流的易发生地。

(2)在冰雹、大风出现前,对流层高层有 M_{pv} 高值中心下传使得低层斜压性增大,引起低层的对流稳定度减小,促使气旋性涡度发展,导致冰雹、大风等强对流天气的出现。

(3)分析发现冰雹、大风天气过程 M_{pv2} 值与

M_{pv1} 值量级相当,只是数值略小,说明强对流天气过程湿斜压作用与正压作用相当。

(4)当对流层高层 M_{pv1} 正值区与低层 M_{pv1} 负值区相互作用,即高层下滑的干冷空气与低层抬升的高温高湿空气交汇,容易贮存和释放湿对流不稳定能量,有利于强对流发生。

(5)在冰雹、大风区低层为对流稳定的层结下($M_{pv1} > 0$),有 $M_{pv2} < 0$,使湿斜压不稳定增强,倾斜涡度容易得以发展;在 M_{pv1} 等值线相对密集的零线附近,是冷暖空气交汇而有利于辐合、垂直涡度剧烈发展的地带。

(6)从预报角度来看,垂直剖面图中 θ_{se} 等值线倾斜度加大、大气的对流稳定度减弱、湿斜压性增强等,可以作为预报冰雹、大风天气的线索,且强对流易在 M_{pv1} 等值线相对密集的零线和 925 hPa 上 M_{pv2} 负中心附近出现。

参考文献

[1] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓蕾. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387-404.

[2] 吴国雄,蔡雅萍. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展[J]. 大气科学,1997,21(3):273-282.

[3] 范可,琚建华,范学峰. 湿位涡诊断分析在东南亚强降水中的应用[J]. 气象科技,2003,31(1):23-28.

[4] 郭荣芬,鲁亚斌,李自顺. “99. 5. 7”昆明大暴雨分析[J]. 气象科技,2004,32(2):90-96.

[5] 张迎新,胡欣,张守保. 湿位涡在“96. 8”特大暴雨过程中的应用

分析[J]. 气象科技,2004,32(增刊):25-28.

[6] 井喜,胡春娟. 位涡诊断在黄土高原强对流风暴预报中的应用[J]. 气象科技,2007,35(1):20-25

[7] 刘还珠,张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构[J]. 应用气象学报,1996,7(3):275-283.

[8] 王建中,马淑芬,丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用[J]. 应用气象学报,1996,7(1):19-27.

[9] 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):15-19.

[10] 杨莲梅,杨涛. 阿克苏北部暴雨和冰雹湿位涡对比诊断分析[J]. 气象. 2005,31(9):13-18.

Application of Moist Potential Vorticity to Hail and Gale Diagnostic Analysis in Guangxi

Qin Changliu¹ Li Huijin¹ Dong Liangmiao²

(1 Laibin Meteorological Bereau, Laibin 546100; 2 Guangxi Meteorological Bereau, Nanning 530021)

Abstract: According to the moist potential vorticity theory, three hail-gale events occurred in Guangxi in April 2006 are diagnosed and analyzed in detail. The results show that the convective stability was very small around the area with dense moist potential temperature isopleths; the absolute vorticity increased during the process of cold air moving downward along the isoentrope surface, leading to the increasing of cyclonic vorticity, which is favorable to the occurrence of hail and gale weather. It is found that there is high MPV (moist potential vorticity) descending downward from the upper troposphere before the hail and gale events; and in the areas with dense barotropic MPV isopleths (around the zero line) and around baroclinic MPV negative centers on the 925 hPa level, heavy convection occurs at a higher probability.

Key words: hail, gale, moist potential vorticity, slantwise vorticity, diagnostic analysis