

刘赛赛, 张立凤, 赵艳玲. 2019. 不同定义的湿位涡分析及在台风中的诊断 [J]. 大气科学, 43(3): 565–576. Liu Saisai, Zhang Lifeng, Zhao Yanling. 2019. Analysis of various moist potential vorticities with different definitions and comparison of their diagnoses in a typhoon process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 565–576. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1806.18126

不同定义的湿位涡分析及在台风中的诊断

刘赛赛¹ 张立凤² 赵艳玲¹

1 中国人民解放军 31010 部队, 北京 100081

2 全军危险性天气监测预警研究中心/国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101

摘 要 本文对不同定义的湿位涡做了理论分析, 并利用 1522 号台风“彩虹”的数值模拟结果对各种湿位涡进行了诊断。主要结论有: 经典湿位涡、广义湿位涡和改进湿位涡的差异主要是由不同定义的位温造成的, 相当位温、广义位温和修改位温的构成均是在位温基础上添加一显含水汽的附加量; 经典湿位涡、广义湿位涡和改进湿位涡的构成均能分为干、湿分量两部分, 其干分量表达式相同, 都与 Ertel 干位涡的定义一样, 水物质相变潜热的影响隐含在位温中; 不同定义湿位涡的本质差异表现在不同的湿分量上, 湿分量的表达式中显含了水物质的作用。对台风的诊断分析发现, 改进湿位涡分布与 Ertel 干位涡非常相似, 呈现中空分布的位涡塔结构, 大值区对应眼墙内侧, 改进湿位涡湿分量与经典湿位涡的湿分量分布相似, 只是湿分量的绝对值更小, 这反映了改进湿位涡既能保持干位涡的分布特征, 其分布和演变可反映台风的结构和演变, 又能合理地体现水汽分布的影响, 所以在台风诊断中有更广泛的应用前景。经典湿位涡在低层表现为负值, 这与水汽梯度的分布关系很大, 但与垂直速度、潜热加热大值区等都没有很好的匹配关系, 用其分析台风结构和演变具有一定局限性; 广义湿位涡其形式较复杂, 仅在近饱和区域才能发挥其诊断优势。

关键词 湿位涡 位温 干湿分量 台风 诊断

文章编号 1006-9895(2019)03-0565-12

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1806.18126

Analysis of Various Moist Potential Vorticities with Different Definitions and Comparison of Their Diagnoses in a Typhoon Process

LIU Saisai¹, ZHANG Lifeng, and ZHAO Yanling¹

1 Unit 31010 of PLA, Beijing 100081

2 The PLA Research Center of Dangerous Weather Monitoring and Warning / College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

Abstract In this paper, various moist potential vorticities with different definitions are theoretically analyzed and numerically diagnosed based on the simulation of typhoon Mujigae (1522). The results show that the differences between the equivalent potential vorticity, the generalized moist potential vorticity and the modified moist potential vorticity are mainly caused by the potential temperature that is defined differently. An additional variable with explicit water vapor is added to the conventionally defined potential temperature. The equivalent potential vorticity, the generalized moist

收稿日期 2018-02-08; 网络预出版日期 2018-04-27

作者简介 刘赛赛, 女, 1992 年出生, 助理工程师, 主要从事热带气旋发生发展机理研究。E-mail: liusaisai_2014@sina.com

通讯作者 张立凤, E-mail: Zhanglif_qxy@sina.cn

资助项目 北极阁开放研究基金-南京大气科学联合研究中心 NJCAR2018ZD03, 国家自然科学基金项目 41775123、41705037

Found by the Beijing Open Research Fund for Nanjing Joint Center of Atmospheric Research Grant (NJCAR2018ZD03), National Natural Science Foundation of China (Grants 41775123, 41705037)

potential vorticity and the modified moist potential vorticity can be divided into two parts: the dry component and the moist component. The dry components of these moist potential vorticities are the same as the Ertel potential vorticity and implicitly contain the effect of latent heat in phase changes. The essential difference between these moist potential vorticities is reflected in their moist components, which can explicitly contain the effect of water vapor. Based on simulation results and diagnostic analysis of these vorticities in the typhoon process, it is found that the distribution of the modified moist potential vorticity is like a “hollow tower” and the high value area is located inside of the eye wall, which is very similar to that of the Ertel potential vorticity. And the distribution of the moist component of the modified moist potential vorticity is also very similar to that of the equivalent potential vorticity, but the absolute value of the former is smaller. These results indicate that the modified moist potential vorticity can maintain the characteristics of the original Ertel potential vorticity. It can not only reflect the structure and intensity changes of the typhoon but also reflect the influence of water vapor distribution reasonably. As shown above, the modified moist potential vorticity has a potential application for the diagnosis and forecast of typhoons. The value of the equivalent potential vorticity is negative in the low level, which is largely related to the distribution of water vapor gradient. Note that the equivalent potential vorticity doesn't have a good matching relationship with vertical velocity, latent heating and other factors, which limits its application in analyzing the typhoon structure and evolution. The generalized moist potential vorticity has a complex form and only has some diagnostic advantages in nearly saturated condition.

Keywords Moist potential vorticity, Potential temperature, Dry and moist component, Typhoon, Diagnosis

1 引言

位涡是综合表征大气热力和动力状态的物理量, 由于其在绝热无摩擦大气中具有保守性, 故位涡异常成为了诊断天气系统结构及演变的一个有效物理量。Eliassen and Kleinschmidt (1957) 首次用对流层上层的位涡异常解释了气旋的产生, Hoskins et al. (1985) 系统地分析了位涡的性质及其可反演性, 并提出了等熵位涡的概念, 这一开创性工作使位涡理论得到进一步发展。然而, 在伴有潜热释放等非绝热过程的大气中, 位涡失去了保守性。为了使其在湿绝热过程中仍具有保守性, Bennetts and Hoskins (1979) 利用在湿绝热过程中具有保守性的相当位温替换位温, 定义了相当位温(下称经典湿位温), 相当位温的引入推广了位涡的概念, 拓展了其作为诊断量的应用范围(王宏等, 2012; 李静楠等, 2016), 使其被广泛的应用到温带气旋、热带气旋、爬线、锋面雨带等系统的诊断分析中(蒙伟光等, 2004; Huang et al., 2016; 张晓红等, 2016)。经典湿位温应用于台风领域主要是诊断台风暴雨, 分析不稳定条件对暴雨发展的影响(黄亿等, 2009; 徐文慧等, 2010), 揭示湿位温对暴雨落区的指示意义(赖绍钧等, 2007)以及分析系统的湿斜压性(李英等, 2005)等。但是, 由于实际大气并不满足处处饱和, 即使是暴雨、台风等水汽含量丰富的系统, 相对湿度也不可能处处

达到100%。为了体现实际大气非均匀饱和的状态, Gao et al. (2004) 定义了广义的湿位温, 并将其应用于暴雨系统的诊断中, 取得了一些有意义的结果(高守亭等, 2007; 周玉淑, 2009; Liang et al., 2010; 王伏村等, 2013; 周泓等, 2013)。近年来, 在湿大气理论框架(Schubert et al., 2001)基础上, 基于修改位温, Peng et al. (2013) 定义了一种新的湿位温, 称为改进湿位温, 并揭示了其一些新性质, 为位温在湿大气中的应用提供了一种新视角。在文献(张立凤和彭军, 2017)中详细给出了改进湿位温方程的推导及其在华南前汛期暴雨中的应用。

由于位温理论在解释天气现象、预测天气系统变化方面具有重要作用, 目前针对不同的天气系统应用各种位温的诊断研究工作不少(Abdel-Basset et al., 2015; Galarneau et al., 2015; Deng et al., 2017), 特别是针对热带气旋的位温诊断也有一些工作, 研究发现热带气旋内部位温的分布反映了其内部的动力和热力过程, 与热带气旋的结构和强度演变有密切关系(Schubert and Alworth, 1987; Hendricks and Schubert, 2010), 故位温已成为研究热带气旋结构和发展机理的有效物理量(Schubert et al., 2016; Smith and Montgomery, 2016; Menelaou et al., 2013)。

从位温的定义及发展来看, 不同的位温形式各有其特点, 这使得不同位温在不同应用领域有不同

的优势和局限。正确应用位涡的前提是对这些不同形式的位涡从概念上有非常透彻的理解和认识。基于此目的，本文对不同形式的位涡从定义上做出归纳、分析和比较；并基于 2015 年的第 22 号台风“彩虹”对不同形式位涡进行了计算，对比其在台风中的不同表现，以期进一步理解不同形式位涡的优势和局限性。

2 不同定义的湿位涡分析

2.1 定义

经典的 Ertel 干位涡 (Ertel, 1942) 定义为

$$P_d = \alpha_d \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta, \quad (1.1)$$

$$\theta = T \left(\frac{p_{00}}{p} \right)^{R/c_p}, \quad (1.2)$$

在此， θ 为位温，在干绝热过程中具有守恒性； ζ_a 为绝对涡度矢量； α_d 为干空气比容； ∇_3 为三维梯度算子。

由于大气湿物质在天气系统形成和发展中有重要作用，Bennetts and Hoskins (1979) 根据在湿绝热过程中具有保守性的相当位温，提出了相当位涡即经典湿位涡的表达式：

$$P_e = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_e, \quad (2.1)$$

$$\theta_e = \theta \exp \left[\frac{Lq_s}{c_p T} \right], \quad (2.2)$$

在此， θ_e 为相当位温， α 为湿空气的比容， c_p 是干空气定压比容， L 是水汽凝结潜热率， q_s 是饱和比湿。在湿绝热过程中湿位涡具有保守性。

在相当位温的基础上，Gao et al. (2004) 通过引入凝结概率函数 $(q/q_s)^k$ ，定义了广义位温及对应的广义湿位涡：

$$P_g = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_g, \quad (3.1)$$

$$\theta_g = \theta \exp \left[\frac{Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right], \quad (3.2)$$

在此， θ_g 为广义位温， k 是气压、温度、比湿和凝结核密度的函数，王兴荣等 (1999) 通过理论分析和数值模拟发现，当 k 值取 9 时凝结概率函数能够较好地代表大气中的凝结过程，因此本文研究也取 $k=9$ 。

从湿空气状态方程出发，在定义修改湿位温的基础上，Peng et al. (2013) 定义了改进湿位涡：

$$P_m = \alpha_d \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_m, \quad (4.1)$$

表 1 标准大气压下干空气密度与饱和湿空气密度对照表
Table 1 Comparison of dry air density and saturated moist air density in standard atmospheric pressure

温度/°C	标准大气压下空气密度/kg m ⁻³	
	干空气密度	饱和湿空气密度
-20	1.396	1.395
-10	1.342	1.341
0	1.293	1.290
10	1.248	1.242
20	1.205	1.195
30	1.165	1.146
35	1.146	1.121
40	1.128	1.097
45	1.110	1.070
50	1.093	1.043
100	0.947	0.589

$$\theta_m = \theta \left(1 + \frac{R_v}{R_d} r_v \right) \approx \theta + 1.61 \theta r_v, \quad (4.2)$$

在此， θ_m 为修改位温， R_v 为水汽气体常数， R_d 为干空气气体常数， $r_v = m_v/m_d$ 为水汽混合比。

根据实际观测，在通常气象条件下，干空气比容 α_d 与湿空气比容 α 区别比较小 (见表 1, <https://wenku.baidu.com/view/e5a458d0b14e852458fb577f.html> [2011-12-02])，为了计算方便，在下面的分析中不再对二者进行区分。

2.2 分析

对比以上四种形式的位涡可见，无论是干位涡还是不同形式的湿位涡，其差异都表现在各种位温的定义上；基于不同的位温定义，构造了不同形式的位涡。为揭示不同形式位涡的本质差异，下面先对不同定义的位温进行分析。

分析公式 (1.2)、(2.2)、(3.2) 和 (4.2) 发现，由公式 (1.2) 定义的位温，虽然没有显示包含表达湿度的物理量，但由于系统中水汽凝结释放的潜热会使系统的温度升高，其可间接反映水汽的影响，只是其影响是隐含的，其在干绝热过程中为保守量。而由公式 (2.2)、(3.2) 和 (4.2) 定义的湿位温中，显式地考虑了大气湿物质的作用。由公式 (2.2) 定义的相当位温在湿绝热过程中也具有保守性。

比较公式 (2.2) 和 (3.2) 可知，相当位温和

广义位温在定义式中都包含了反映大气湿度的物理量；相当位温中包含了饱和比湿，广义位温中除了饱和比湿外，还包含了比湿。由于比湿仅是反映大气中水汽多少的变量，而饱和比湿除反映大气中水汽多少外，还反映了当水汽发生凝结现象时所需的温度。这是两种位温定义中的最大区别。这也反映了在经典湿位涡和广义湿位涡的定义中水汽的贡献是不同的。只有当大气饱和时，由于 $q = q_s$ ，即 $\theta_g = \theta_e$ ，二者才是等价的。然而实际大气中即使是强降水系统也很难完全达到饱和，故在实际大气中二者是有差异的，由于相当位温定义中只包含饱和比湿，故经典的湿位涡可能过高的估计了水汽的作用。

进一步分析公式 (3.2) 可知，当 k 取 9，相对湿度小于 70% 时， $(q/q_s)^9 < 0.04035$ 。已知凝结潜热率为 $L = 2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ，干空气定压比热为 $c_p = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，饱和比湿 $q_s < 0.04$ ，则 $Lq_s(q/q_s)^9 / (c_p T) \ll 1$ ，故 (3.2) 式可写为 $\theta_g \approx \theta$ ，即广义位温近似于干位温。这表明，当相对湿度小于 70% 时，相当于没有水汽凝结发生。由此可见，广义湿位涡更适用于接近饱和的区域 ($q/q_s > 0.7$)，且其使用效果取决于水汽含量和水汽的梯度；在水汽梯度大值区，广义湿位涡的效果更好 (Gao et al., 2004)，故而广义湿位涡主要应用于暴雨天气现象的研究，特别适合于暴雨落区和强度的诊断。

修改位温 θ_m 是在干空气比容不变的前提下，当干空气的气压等于给定的湿空气的气压时该干空气所具有的位温。从 (4.2) 式可见， θ_m 的定义有二方面好处：一是 θ_m 由两个独立的变量决定，水汽的作用完全包含在 θ_m 中；二是由于干空气质量具有保守性，以干空气比容 α_d 作为状态变量，将会使得大气运动基本方程组中预报方程的求解变得方便 (Peng et al., 2013)。值得注意的是，这种修改位温 θ_m 与虚温位温 θ_v 非常相似。虚温位温的定义为

$$\theta_v = T_v \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_d/c_p} \approx \theta + 0.61\theta q, \quad (5)$$

在此， $T_v \approx T(1 + 0.608q)$ 为虚温。对比公式 (4.2) 可知，修改位温保持了虚温位温的简洁表达形式，只在水汽混合比一项的比例系数上做了调整。

3 湿位涡的干湿分量分解

基于修改位温定义公式 (4.2)，改进湿位涡公式 (4.1) 还可写为

$$P_m = \alpha_d \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_m = P_{md} + P_{mq}, \quad (6)$$

其中， P_{md} 和 P_{mq} 分别为改进湿位涡的干分量和湿分量，具体表达式为

$$P_{md} = \alpha_d \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta, \quad (7.1)$$

$$P_{mq} = 1.61\alpha_d \zeta_a \cdot \nabla_3 (\theta r_v). \quad (7.2)$$

从公式 (6) 和 (7.1)、(7.2) 式可见，改进湿位涡本质上就是在经典 Ertel 位涡的基础上叠加了湿分量。这种改进湿位涡的定义不仅表达形式简洁，且物理意义明确，而基于相对位温和广义位温定义的湿位涡则不能直接给出湿位涡的干分量和湿分量。

进一步分析不同定义湿位涡发现，在忽略干湿空气比容差异的条件下，不同定义湿位涡的差异只体现在位温的不同定义上，故只需对相当位温和广义位温进行如下的数学处理，处理后也能得出各种湿位涡的干分量表达式和湿分量近似表达式。由前文数据可知，若取 $T=200 \text{ K}$ (该温度已接近对流层的最低气温)，则有 $Lq_s / (c_p T) < 0.498 < 1$ ，当 T 更高时该不等式更成立，且因 $k > 1$ ，故有 $Lq_s(q/q_s)^k / (c_p T) < Lq_s / (c_p T) < 0.498 < 1$ ，这样显然可将公式 (2.2) 和 (3.2) 对 θ_e 和 θ_g 做如下泰勒展开：

$$\theta_e = \theta \left[1 + \frac{Lq_s}{c_p T} + \frac{1}{2} \left(\frac{Lq_s}{c_p T} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{Lq_s}{c_p T} \right)^3 + \dots \right], \quad (8)$$

$$\theta_g = \theta \left[1 + \frac{Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k + \frac{1}{2} \left(\frac{Lq_s}{c_p T} \right)^2 \left(\frac{q}{q_s} \right)^{2k} + \dots \right]. \quad (9)$$

对上两式略去高阶项后有

$$\theta_e \approx \theta \left(1 + \frac{Lq_s}{c_p T} \right) = \theta + \theta \frac{Lq_s}{c_p T}, \quad (10)$$

$$\theta_g \approx \theta \left[1 + \frac{Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right] = \theta + \frac{\theta Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k. \quad (11)$$

由公式 (10)、(11)、(4.2) 和 (5) 可见，相当位温、广义位温、修改位温、虚位温都可通过两部分构成：一部分是位温，只与温度有关，包含了水物质相变的潜热加热/冷却等各种非绝热加热的作用；另一部分不仅与温度有关，还与水汽有直接关系，包含了水汽相变的减湿作用。

利用公式 (8)、(9) 易知，经典湿位涡和广义湿位涡都可写成如下形式：

$$P_e = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_e \approx \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \left(\theta + \frac{L}{c_p T} \theta q_s \right), \quad (12)$$

$$P_g = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_g \approx \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \left\{ \theta \left[1 + \frac{L q_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right] \right\}. \quad (13)$$

仿照公式 (6) 和 (7.1)、(7.2)，(12) 式也可写为

$$P_e = P_{ed} + P_{eq}, \quad (14)$$

其中， P_{ed} 和 P_{eq} 分别为经典湿位涡的干分量和湿分量，具体表达式为

$$P_{ed} = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta, \quad (15.1)$$

$$P_{eq} \approx \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \left(\frac{L \theta q_s}{c_p T} \right), \quad (15.2)$$

公式 (13) 也可写为

$$P_g = P_{gd} + P_{gq}, \quad (16)$$

其中 P_{gd} 和 P_{gq} 分别为广义湿位涡的干分量和湿分量，具体表达式为

$$P_{gd} = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta, \quad (17.1)$$

$$P_{gq} \approx \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \left[\theta \frac{L q_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right]. \quad (17.2)$$

若假设大气中水汽处于饱和状态，则有 $q = q_s$ ，这样有

$$P_{gq} \approx \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \left[\theta \frac{L q_s}{c_p T} \right], \quad (18)$$

这时广义湿位涡的湿分量退化为经典湿位涡的湿分量。

从公式 (6)、(14) 和 (16) 可见，无论用哪种位温定义湿位涡，对于实际大气的情况，都可以表达成干分量和湿分量之和，其干分量的形式是相同的，不同湿位涡的差异只体现在湿分量上。在此要指出的是，不同定义位涡的干分量中均包含水物质相变的潜热作用，只不过这种作用是隐含的，这里的湿分量只是显式表示出了大气湿物质的作用。

4 不同定义湿位涡在台风中的分布

4.1 数值模拟结果

选用 2015 年第 22 号台风“彩虹”为研究个例，为了得到精细的气象要素资料，首先利用中尺

度 WRF 模式对台风进行了数值模拟，模拟采用三重嵌套移动网格，网格距分别为 30、10 和 3.3 km，垂直分 35 层，模式层顶为 50 hPa；初始场为 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料，起始时间为 2 日 00 时（协调世界时，下同），积分了 72 小时。利用台风强度达到最强时即 10 月 4 日 00 时的模拟结果，对不同定义的湿位涡进行了诊断分析和比较。有关模拟的详细情况见刘赛赛 (2017) 的工作。

图 1 给出了 4 日 00 时的模拟结果。从雷达反射率 (图 1a) 可见，台风眼墙的直径约为 100 km，最大反射率分布在距离台风中心 50 km 附近，可达 50 dBZ 以上，分布整体较均匀。螺旋雨带的分布具有显著的不对称性，较强反射率出现在台风的东北象限。同时，从水平风矢分布来看，台风东北象限的风速相较其他象限要大。尽管在水平分布中，台风眼墙的结构看似较为对称，但在垂直方向上 (图 1b)，对流强度明显是台风东侧大于西侧，西侧最强回波发展到约 4 km 高度，而东侧则发展到约 7 km 高度。西侧垂直速度的大值中心约为 4 m s^{-1} ，出现在 6~11 km 高度上，东侧大值中心达 10 m s^{-1} ，出现在 10~13 km 高度上。

同时刻相对湿度的垂直剖面 (图 1c) 显示，在台风眼墙中，相对湿度大于 90% 的区域主要分布于 8 km 以下，2 km 以下相对湿度几乎均大于 98%，在 4~6 km 高度处也存在相对湿度大于 98% 的区域。台风眼中相对湿度较低。总的来看，即使像台风这样出现在海上水汽含量丰沛的系统，也很难处处达到饱和状态。

4.2 不同定义湿位涡的分布特征

4.2.1 垂直分布

图 2 给出了 4 日 00 时 Ertel 干位涡及其他三种湿位涡经过台风中心的垂直剖面。由图可见，Ertel 干位涡 (图 2a) 在台风主体区域主要表现为正值，在台风眼中垂直方向上存在三个大值中心，分别位于 14~17 km 的对流层高层，6~8 km 的对流层中层以及 2 km 以下的对流层低层。整体上台风主体区域 Ertel 干位涡呈中空的塔状分布特征，即两侧较大，中间较小，这与 Schubert and Alworth (1987) 和 Möller and Smith (1994) 的理想试验结果是一致的。与此时的雷达反射率 (图 1b) 对比可见，干位涡大值区主要分布在最强雷达反射率区域的内侧，即眼墙内侧。大约在 2 km 的高度上，高值位涡由眼墙内侧向台风眼延伸，产生一个“桥状

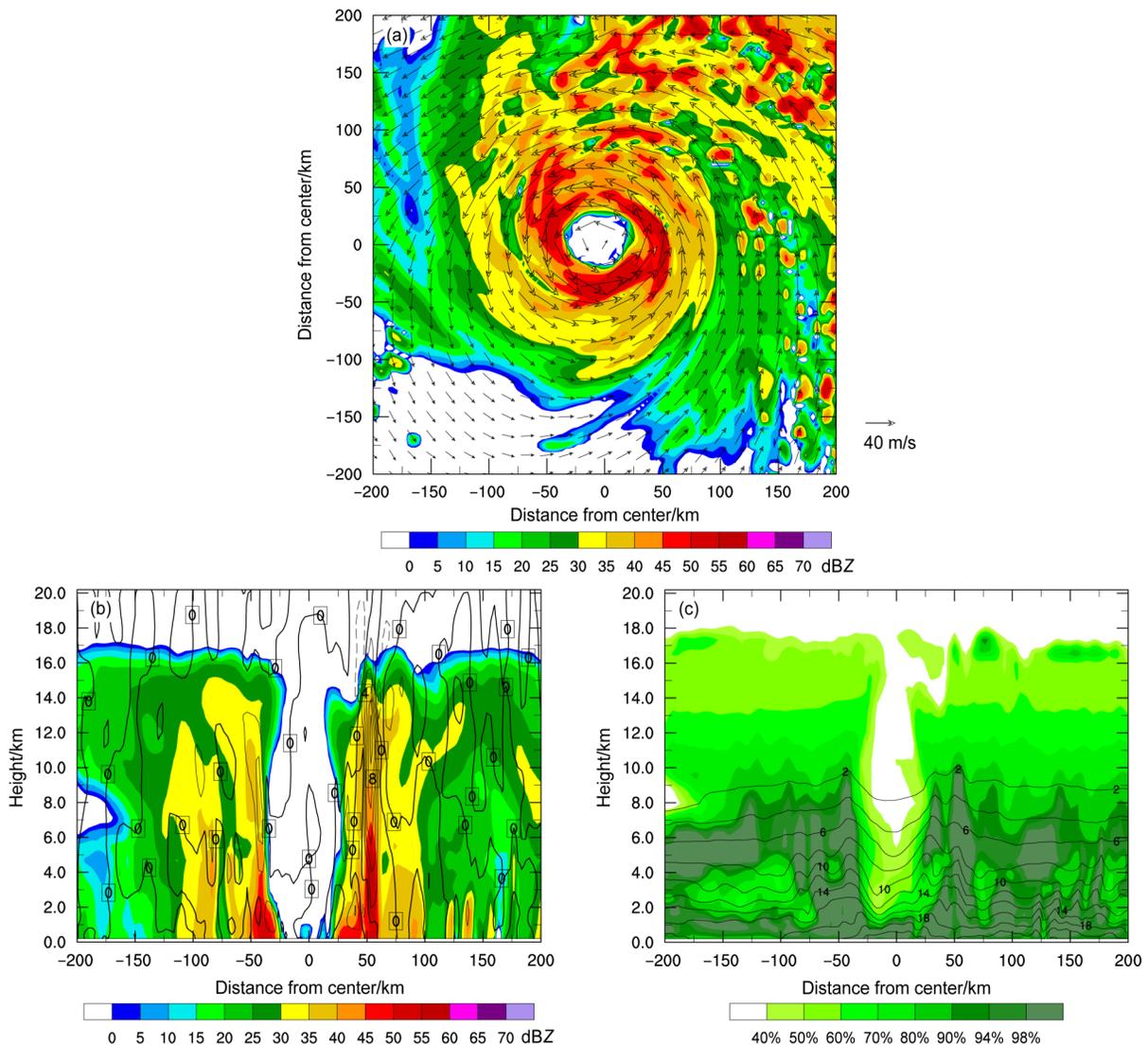


图1 2015年10月4日00时(协调世界时,下同)的模拟结果:(a)台风中心半径200 km范围内1.5 km高度上的雷达反射率(阴影,单位:dBZ)和水平风矢(箭头);(b)过台风中心东西方向雷达反射率(阴影,单位:dBZ)和垂直速度(等值线,单位: m s^{-1})的垂直剖面;(c)过台风中心东西方向相对湿度(阴影)和水汽混合比(等值线,单位: g kg^{-1})的垂直剖面

Fig. 1 The simulation results at 0000 UTC 4 October 2015: (a) Radar reflectivity (shaded, units: dBZ) and horizontal wind vectors (arrows) at 1.5 km height within 200 km radius of the typhoon center; (b) zonal-vertical cross section of radar reflectivity (shaded, units: dBZ) and vertical velocity (isolines, units: m s^{-1}) across the typhoon center; (c) zonal-vertical cross section across the typhoon center of relative humidity (shaded) and water vapor mixing ratio (isolines, units: g kg^{-1})

(bridge-like) ”结构,这与 Yau et al. (2004) 的发现类似。

由于修改位温与位温的垂直分布也相似,改进湿位涡的分布与 Ertel 干位涡相似(图 2b),大值区的位置与干位涡基本一致,但在数值上小于干位涡;从前文的公式来看,这种数值上的差异主要与水汽和水汽梯度的分布有关,其定量差异将在下文用湿分量给出。

分析经典湿位涡(图 2c)和广义湿位涡(图

2d)的分布发现,在 12 km 以上,经典湿位涡(图 2c)和广义湿位涡(图 2d)及其相应位温的分布与干位涡和改进湿位涡的分布几乎相同,都存在大值区,二者的区别主要是在 12 km 以下,这是由于在对流层高层至平流层水汽含量极少所致。经典湿位涡明显的负值区主要分布在 3 km 以下距离台风中心 50 km 范围内,台风眼内的负极值可达 -42 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) 以下。在 4~10 km 高度上台风眼内湿位涡近乎为 0。从该处相当位温的分

布可见，在此高度范围内，相当位温的梯度很小，这导致经典湿位涡的值很小。相当位温与干位温和修改位温的垂直分布有很大不同，其最大值分布在接近地面的台风眼区域中，在 2 km 以下其呈现由低到高减小的特征，即有 $\partial\theta_e/\partial z < 0$ ，存在位势不稳定的主要原因。在台风眼墙附近 3~12 km 高度上，经典湿位涡的绝对值近乎为 0，等相当位温面几乎呈垂直分布，相当位温垂直梯度很小，这是相当位温的分布特征，其它位温的等值面均未出现这种情况。该处可认为是假绝热状态，相当位温保守；2~8 km 高度上眼墙外侧存在弱负位涡区，相当位温值在该处明显大于干位温值 [见图 2 和公式 (10)]。

对比图 1c 的相对湿度分布可知，台风眼内

2 km 以上的高度相对湿度均小于 70%，从而使得广义湿位涡（图 2d）在该高度上表现为与干位涡相似的正值。广义湿位涡最大值出现在距离台风中心 30 km 左右的 3~6 km 处，这一区域广义位温分布密集，梯度较大。负的广义湿位涡主要分布在眼墙内侧，距离台风中心左右各 25 km 附近，呈现一条负湿位涡带，并由低处到高处向台风外侧倾斜。在台风眼内 0.5~2 km 高度附近，则有负湿位涡区，其值小于经典湿位涡。广义位温的分布具有干位温和相当位温的特征，在台风眼内 2 km 以上水汽含量较低的区域，其分布与干位温相似，其值由低层到高层逐渐增加，但在 2 km 以下由低层到高层广义位温则逐渐递减，广义位温线非常密集，故产生了较大的负广义湿位涡。在眼墙附近，广义位温等值线呈现向下凹的特征，在眼墙内侧分布密集，产

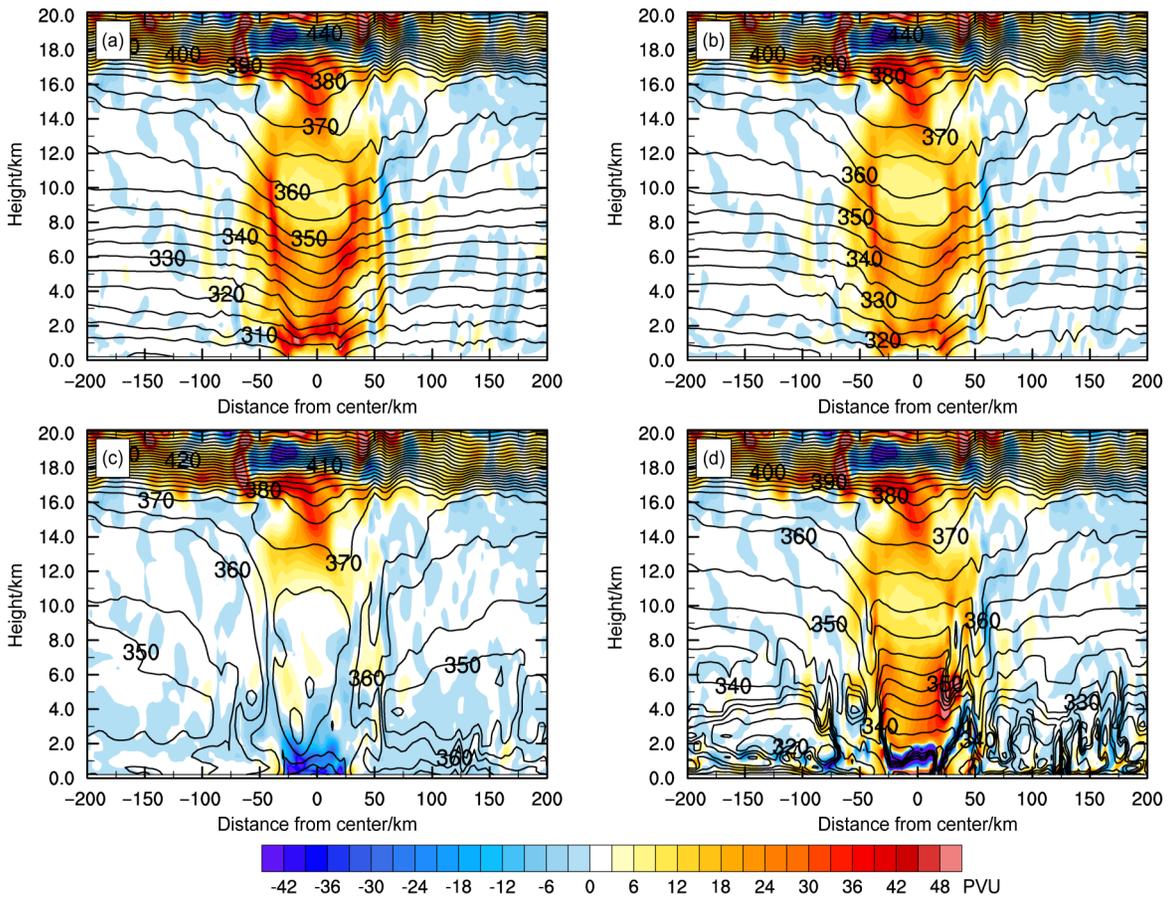


图2 过台风中心东西剖面上不同位涡（阴影，单位：PVU）及位温（等值线，单位：K）的垂直分布：(a) 位涡和位温；(b) 改进湿位涡和修改位温；(c) 经典湿位涡和相当位温；(d) 广义湿位涡和广义位温

Fig. 2 Zonal-vertical cross sections across the typhoon center for different potential vorticities (shaded, units: PVU) and potential temperatures (iso-lines, units: K): (a) Ertel potential vorticity and potential temprature; (b) modified moist potential vorticity and modified potential temprature; (c) equivalent potential vorticity and equivalent potential temprature; (d) generalized moist potential vorticity and generalized potential temprature

生了较大的广义位温梯度。在眼墙外侧则与相当位温类似，广义位温也存在相对的低值区。总的来说，广义位温的分布比相当位温更加密集，特别是在水汽含量大的区域。

4.2.2 水平分布

6 km 和 1.5 km 高度是台风中的重要水平层次，前者是对流凝结加热较大处，后者是边界层顶，涉及湿大气的非绝热加热和水气的输入，这与台风发展密切相关，故在此对这两层上的位涡水平分析进行分析。

6 km 高度上，Ertel 干位涡（图 3a）在水平方向上的分布呈“圆环状”结构，环的内径约为 30 km，外径约为 50 km，最大值约为 58 PVU。高值位涡圆环的外部区域存在许多（-6~12 PVU）正和负位涡块。这些位涡块呈“碎片状”，有顺着涡旋旋转的方向向台风眼辐合的趋势，并与台风的螺旋雨带相对应，这与 Schubert et al. (1999) 和 Yau et al. (2004) 的发现类似。位温的水平分布呈现以台风眼为中心近似同心圆的结构，越靠近眼心位温值越大，在位涡圆环附近位温分布十分密集。1.5 km 高度上（图 3e），由于位涡的径向混合（Martinez et al., 2017），这使得位涡大值向眼心延伸，并使位涡的环状结构不明显，位涡大值区的分布更靠近眼心，其最大值约为 49 PVU。

改进湿位涡（图 3b, f）在水平方向上的分布与 Ertel 干位涡相似，也表现为“圆环状”结构。但是，改进湿位涡正值小于干位涡，在 6 km 高度上最大仅能达到 51 PVU，1.5 km 高度上最大值约 38 PVU。改进湿位涡与 Ertel 干位涡结构的相似性说明，改进湿位涡除了具备和 Ertel 干位涡类似的水平分布外，还能显式地考虑水汽的影响。在水平分布上还明显可见，修改位温比位温要大 [见公式 (4.2)]。

6 km 高度上经典湿位涡（图 3c）的正值主要是在台风眼内，负值则与眼墙及螺旋雨带相对应，正负湿位涡值都比较小，绝对值小于 12 PVU。1.5 km 高度上（图 3g），经典湿位涡基本都为负值，极小值位于台风眼内。相当位温在眼墙附近的分布基本上呈同心圆结构；对比图 1a 雷达反射率的水平分布可见，其在螺旋雨带上分布十分密集，并表现为一些大值中心，这些大值中心与较强的雷达反射率相对应，说明相当位温能够反映强对流区域，对诊断暴雨落区具有应用价值。

广义湿位涡在 6 km 高度上（图 3d）的分布呈现与干位涡和改进湿位涡类似的“圆环状”结构，但“圆环”略小于前者，外径约为 40 km。1.5 km 高度上（图 3h），由台风眼心向外广义湿位涡呈现正负间隔分布的特征，眼心处为负值。广义位温在台风眼墙区的分布较前面三种位温更加密集（图 3d 中广义位温的间隔为 6 K），在 1.5 km 高度上则更能看出广义位温的这种分布特征，不仅垂直梯度大，水平梯度也非常大。与 1.5 km 上（图 1a）的雷达反射率对比可见，广义位温与强反射率的关系要比相当位温好，高广义位温的区域与强雷达反射率的区域基本对应，这说明对于台风这样的中尺度对流系统，广义位温能够较好的反映强雷达反射率的所在，即强对流区域，而这对强降水的预报更具指示意义。然而因广义位温大值区分布范围较广，如果用其诊断强降水落区，也会产生虚报现象。

不同定义湿位涡在其他层次上的水平分布，从其垂直分布上并结合 6 km 和 1.5 km 上的水平分布，已知其大概，为此就不再分析了。

4.3 湿分量

图 4 给出了不同定义的湿位涡湿分量的垂直分布。改进湿位涡的湿分量（图 4a）和经典湿位涡的湿分量（图 4b）的分布在形态上十分相似，都表现为负值，不同的是经典湿位涡湿分量要比改进湿位涡湿分量的绝对值大很多。与前文干位涡的分布对比可见，台风中改进湿位涡和经典湿位涡的湿分量的负值区与干位涡的正值区相对应；干位涡正值越大，改进湿位涡和经典湿位涡的湿分量的负值则越大。这表明水汽梯度的作用使这两种湿位涡的正值减小，负值增大，但改进湿位涡的湿分量的绝对值较小，所以改进湿位涡仍能保持干位涡的分布特征，而经典湿位涡湿分量绝对值较大，这导致经典湿位涡的分布与干位涡有较大差异，特别是在水汽含量丰富的对流层中低层，经典湿位涡直接表现为负值（参见图 2b, c）。

广义湿位涡的湿分量（图 4c）则与前面两种湿分量的分布有较大不同，只在 0.5~2 km 高度上距离台风中心 25 km 附近表现为绝对值较大的负值，其值可达 -120 PVU 以下，这与广义湿位涡的负值区相对应（参见图 2d）。在 3~6 km 高度上，与前两种湿分量不同，在台风眼墙内侧广义湿位涡的湿分量则表现为正值，说明该处广义湿位涡的值比

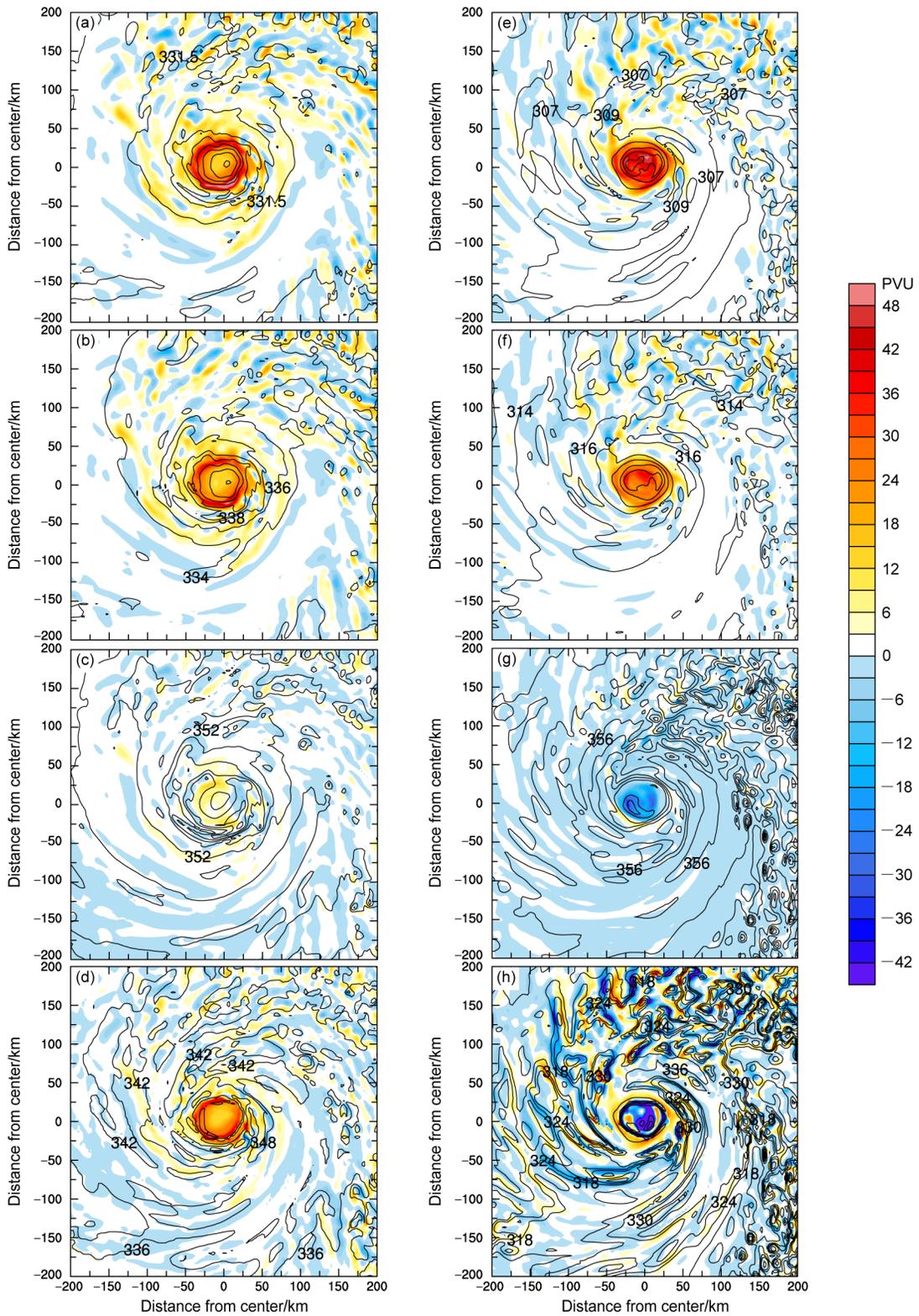


图3 台风中心半径200 km范围内 (a, b, c, d) 6 km和 (e, f, g, h) 1.5 km高度上不同位涡 (阴影, 单位: PVU) 及位温 (等值线, 单位: K) 的水平分布: (a, e) 位涡和位温; (b, f) 改进湿位涡和修改位温; (c, g) 经典湿位涡和相当位温; (d, h) 广义湿位涡和广义位温
Fig. 3 (a, e) Ertel potential vorticity (shaded, units: PVU) and potential temperature (isolines, units: K), (b, f) modified moist potential vorticity (shaded, units: PVU) and modified potential temperature (isolines, units: K), (c, g) equivalent potential vorticity (shaded, units: PVU) and equivalent potential temperature (isolines, units: K) and (d, h) generalized moist potential vorticity (shaded, units: PVU) and generalized potential temperature (isolines, units: K) at (a, b, c, d) 6 km height and (e, f, g, h) 1.5 km height within 200 km radius of the typhoon center

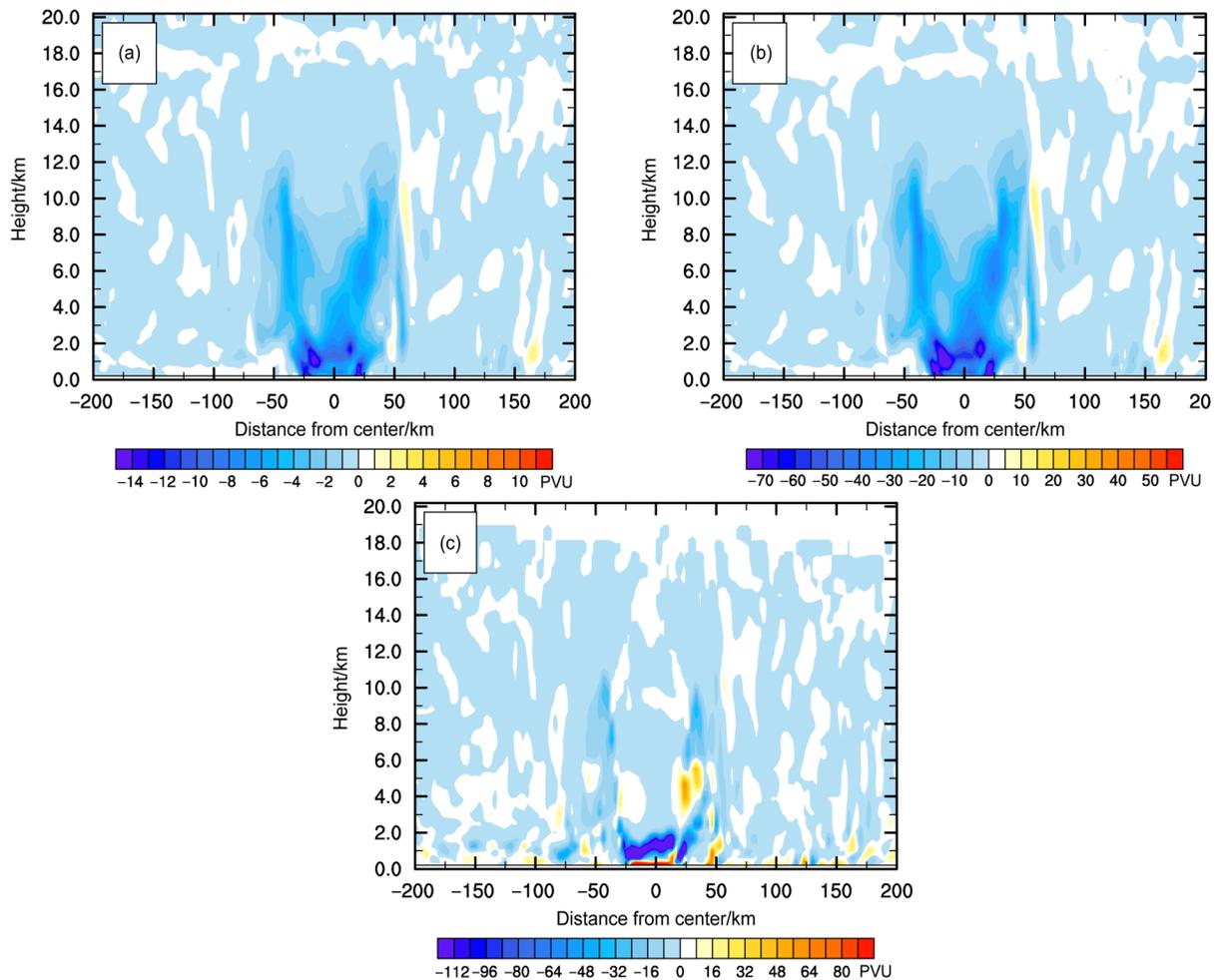


图4 过台风中心东西剖面上不同定义湿位涡的湿分量(阴影, 单位: PVU)垂直分布: (a) 改进湿位涡; (b) 经典湿位涡; (c) 广义湿位涡
Fig. 4 Zonal-vertical cross sections across the typhoon center for the moist components (shaded, units: PVU) of (a) modified moist potential vorticity, (b) equivalent potential vorticity, and (c) generalized moist potential vorticity

干位涡的要大。结合图1c相对湿度的分布, 对比广义湿位涡与经典湿位涡的湿分量可见, 即使在相对湿度接近饱和的地方, 这两种湿分量的分布仍存在差异, 这与公式(17.2)中 $(q/q_s)^{\theta}$ 项有关。考虑接近饱和的状态, 假设 $95\% < q/q_s < 100\%$, 则有 $0.63 < (q/q_s)^{\theta} < 1$, 这就造成广义湿位涡湿分量与经典湿位涡湿分量在实际分布上的差异。

从各种湿位涡湿分量的水平分布(图略)中也能得到与以上类似的结论, 这里不再赘述。

5 结语

本文在总结湿位涡研究成果的基础上, 对不同定义的湿位涡进行了理论分析, 发现经典湿位涡、广义湿位涡和改进湿位涡的差异主要是由不同定义的位温造成的, 通过对大气参数分析, 将不同定义

的位温进行泰勒展开后发现, 相当位温、广义位温、修改位温的构成均是在位温基础上再添加一显含水汽的附加量。利用不同定义的位温的展开式, 可将不同定义的湿位涡分解成干、湿分量两部分, 其干分量与Ertel位涡相同, 其水物质相变潜热的影响是隐含在位温中, 不同定义湿位涡的本质差异体现在不同形式的湿分量上, 湿分量的表达式中显含水物质的作用。

基于台风“彩虹”的数值模拟结果, 对不同湿位涡进行了诊断, 比较了干位涡和各种湿位涡及其湿分量之间的关系和差异。对比发现, 改进湿位涡分布与Ertel干位涡相似, 呈现中空分布的位涡塔结构, 大值区对应眼墙内侧, 但数值更小, 这反映了其既可如干位涡一样反映台风的结构和演变, 又能较为合理地反映水汽的影响, 故在台风诊断和预

报中更具有应用前景；经典湿位涡在低层表现为负值，这与水汽梯度分布关系很大，但与垂直速度、潜热加热大值区都没有很好的匹配关系，显然用其分析台风结构和演变具有局限性；广义湿位涡其形式较复杂，仅在近饱和区域才能发挥其诊断优势。

诊断比较还发现，改进湿位涡的湿分量与经典湿位涡的湿分量分布具有相似性，但改进湿位涡湿分量的绝对值更小，这使得改进湿位涡既能保持干位涡的分布特征，又能体现水汽分布的影响；广义湿位涡的湿分量则与以上两者湿分量的分布有较大不同，即使是在相对湿度很大接近饱和的区域，差异依然明显。

参考文献 (References)

Abdel-Basset H, Al-Khalaf A K, Albar A. 2015. Diabatic processes and the generation of the low-level potential vorticity anomaly of a rainstorm in Saudi Arabia [J]. *Atmospheric and Climate Sciences*, 5(3): 57887. doi:10.4236/acs.2015.53021

Bennetts D A, Hoskins B J. 1979. Conditional symmetric instability—A possible explanation for frontal rainbands [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 105(446): 945–962. doi:10.1002/qj.49710544615

Deng D F, Davidson N E, Hu L, et al. 2017. Potential vorticity perspective of vortex structure changes of tropical cyclone Bilis (2006) during a heavy rain event following landfall [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145(5): 1875–1895. doi:10.1175/MWR-D-16-0276.1

Eliassen A, Kleinschmidt E. 1957. *Dynamic Meteorology [M]*//Bartels J. *Geophysik II/ Geophysics II. Handbuch der Physik/ Encyclopedia of Physics*, vol10 / 48: 112–129

Ertel H. 1942. Ein Neuer Hydrodynamischer Wirbelsatz [J]. *Meteorology Zeitschr Braunschweigs(in German)*, 59: 271–281

Galarneau T J Jr , McTaggart-Cowan R, Bosart L F, et al. 2015. Development of North Atlantic tropical disturbances near upper-level potential vorticity streamers [J]. *J. Atmos. Sci.*, 72(2): 572–597. doi:10.1175/JAS-D-14-0106.1

Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31(12): L12113. doi:10.1029/2003GL019152

高守亨, 崔春光. 2007. 广义湿位涡理论及其应用研究[J]. *暴雨灾害*, 26(1): 5–10. 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): 5–10. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2007.01.002

Hendricks E A, Schubert W H. 2010. Adiabatic rearrangement of hollow PV towers [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2(4): 8. doi:10.3894/JAMES.2010.2.8

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. doi:10.1002/qj.49711147002

黄亿, 寿绍文, 傅灵艳. 2009. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析 [J]. *气象*, 35(1): 65–73. Huang Yi, Shou Shaowen, Fu Lingyan. 2009. A diagnostic analysis of PV and MPV on the heavy rain caused by typhoon Khanun [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 35(1): 65–73. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.1.008

Huang Z Y, Wang J Y, Lee C. 2016. Landfall tropical cyclone rainstorms on the north slope of the Dabie Mountains [J] *Conference Series: Earth and Environmental Science*, 39(1): 012047. doi: 10.1088/1755-1315/39/1/012047

赖绍钧, 何芬, 赵汝汀, 等. 2007. “龙王” (LONGWANG) 台风过程湿位涡的诊断分析 [J]. *气象科学*, 27(3): 266–271. Lai Shaojun, He Fen, Zhao Ruting, et al. 2007. The diagnostic analysis of “Long Wang” typhoon [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 27(3): 266–271. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2007.03.005

李静楠, 潘晓滨, 臧增亮, 等. 2016. 一次华北暴雨过程的湿位涡诊断分析 [J]. *暴雨灾害*, 35(2): 158–165. Li Jingnan, Pan Xiaobin, Zang Zengliang, et al. 2016. Diagnostic analysis of moist potential vorticity for a rainstorm in North China [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 35(2): 158–165. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.02.008

李英, 陈联寿, 雷小途. 2005. Winnie (1997) 和 Bilis (2000) 变性过程的湿位涡分析 [J]. *热带气象学报*, 21(2): 142–152. Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2005. Moisture potential vorticity analysis on the extratropical transition processes of Winnie (1997) and Bilis (2000) [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21(2): 142–152. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.02.004

Liang Z M, Lu C G, Tollerud E I. 2010. Diagnostic study of generalized moist potential vorticity in a non-uniformly saturated atmosphere with heavy precipitation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136(650): 1275–1288. doi:10.1002/qj.636

刘赛赛. 2017. 台风“彩虹”近海急剧加强的数值模拟及诊断分析 [D]. 解放军理工大学硕士学位论文. Liu Saisai. 2017. Numerical simulation and diagnostic analysis on the rapid intensification of typhoon Mujigae (1522) over the offshore area of China [D]. M. S. thesis (in Chinese), PLA University of Science and Technology

Martinez J, Bell M M, Vigh J L, et al. 2017. Examining tropical cyclone structure and intensification with the FLIGHT+ dataset from 1999 to 2012 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145(11): 4401–4421. doi:10.1175/MWR-D-17-0011.1

Menelaou K, Yau M K, Martinez Y. 2013. On the origin and impact of a polygonal eyewall in the rapid intensification of hurricane Wilma (2005) [J]. *J. Atmos. Sci.*, 70(12): 3839–3858. doi:10.1175/JAS-D-13-091.1

蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等. 2004. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析 [J]. *大气科学*, 28(3): 330–341. Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan, et al. 2004. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale convective systems in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28(3): 330–341. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.02

Möller J D, Smith R K. 1994. The development of potential vorticity in

- a hurricane-like vortex [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120(519): 1255–1265. doi:10.1002/qj.49712051907
- Peng J, Zhang L F, Zhang Y, et al. 2013. A modified moist potential vorticity, its properties, and application [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (23): 12999–13007. doi:10.1002/2013JD020204
- Schubert W H, Alworth B T. 1987. Evolution of potential vorticity in tropical cyclones [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 113(475): 147–162. doi:10.1002/qj.49711347509
- Schubert W H, Hausman S A, Garcia M, et al. 2001. Potential vorticity in a moist atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58(21): 3148–3157. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<3148:PVIAMA>2.0.CO;2
- Schubert W H, Montgomery M T, Taft R K, et al. 1999. Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56(9): 1197–1223. doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<1197:PEAECA>2.0.CO;2
- Schubert W H, Slocum C J, Taft R K. 2016. Forced, balanced model of tropical cyclone intensification [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 94(2): 119–135. doi:10.2151/jmsj.2016-007
- Smith R K, Montgomery M T. 2016. The efficiency of diabatic heating and tropical cyclone [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142(698): 2081–2086. doi:10.1002/qj.2804
- 王伏村, 许东蓓, 王宝鉴, 等. 2013. 敦煌致洪暴雨的广义湿位涡分析 [J]. *高原气象*, 32 (1): 145–155. Wang Fucun, Xu Dongbei, Wang Baojian, et al. 2013. Diagnostic analysis on generalized moist potential vorticity of a torrential rainstorm caused flood in Dunhuang, Gansu [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32(1): 145–155. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00015
- 王宏, 王万筠, 余锦华, 等. 2012. 河北东北部暴雪天气过程的湿位涡分析 [J]. *高原气象*, 31(5): 1302–1308. Wang Hong, Wang Wanjun, Yu Jinhua, et al. 2012. Analysis on moist potential vorticity for snowstorm process in the northeast of Hebei Province [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31(5): 1302–1308
- 王兴荣, 吴可军, 石春娥. 1999. 凝结几率函数的引进和非均匀饱和湿空气动力学方程组 [J]. *热带气象学报*, 15(1): 64–70. Wang Xingrong, Wu Kejun, Shi Chun'e. 1999. The introduction of condensation probability function and the dynamic equations on non-uniform saturated moist air [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 15(1): 64–70
- 徐文慧, 倪允琪, 汪小康, 等. 2010. 登陆台风内中尺度强对流系统演变机制的湿位涡分析 [J]. *气象学报*, 68(1): 88–101. Xu Wenhui, Ni Yunqi, Wang Xiaokang, et al. 2010. Moist potential vorticity analysis of the evolution mechanism of a strong mesoscale convective system in a landing typhoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68(1): 88–101. doi:10.11676/qxxb2010.010
- Yau M K, Liu Y B, Zhang D L, et al. 2004. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part VI: Small-scale inner-core structures and wind streaks [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132(6): 1410–1433. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1410:AMNSOH>2.0.CO;2
- 张立凤, 彭军. 2017. 湿大气中尺度能量谱理论和应用 [M]. 气象出版社, 19–23. Zhang Lifeng, Peng Jun. 2017. *Theory and Applications of Mesoscale Energy Spectrum in Moist Atmosphere (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 19–23
- 张晓红, 罗静, 陈兴, 等. 2016. 一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析 [J]. *气象*, 42 (6): 716–723. Zhang Xiaohong, Luo Jing, Chen Xing, et al. 2016. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang–Huaihe River basin and diagnostic analysis of rainstorm [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(6): 716–723. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.007
- 周玉淑. 2009. 广义湿位涡在江淮流域暴雨分析和预报中的应用 [J]. *大气科学*, 33(5): 1101–1110. Zhou Yushu. 2009. Application of generalized moist potential vorticity to analysis and forecast of the torrential rain over the Changjiang–Huaihe River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(5): 1101–1110. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.19
- 周泓, 尤红, 李璠, 等. 2013. 2012年初夏滇中首场暴雨过程诊断分析 [J]. *应用气象学报*, (6): 741–752. Zhou Hong, You Hong, Li Fan, et al. 2013. Diagnostic analysis on the first summer rainstorm process of central Yunnan in 2012 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 24(6): 741–752. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.06.011