

高空急流对黄渤海登陆热带气旋 三维运动结构的影响

袁子鹏^{1,2} 王 元¹ 陈艳秋² 孙 欣²

(1. 南京大学大气科学系中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093;
2. 辽宁省气象台)

提 要: 为了研究高空急流对热带气旋水平和垂直运动结构的影响, 选择1980年代以来的10个黄渤海登陆热带气旋作为研究对象, 按其穿行黄渤海时的路径趋势分为北行和东北行两类, 并应用ECMWF的客观再分析资料进行合成分析, 发现: 热带气旋沿高空非纬向急流的右侧运动, 并呈现出明显向高空急流中心入口区的右侧移动的趋势。当气旋接近急流时, 与高空急流产生相互作用, 使气旋低层水平运动场产生附加的风速中心, 并出现对流偏心增长现象。进一步分析表明, 高空急流中心入口区右侧的辐散中心对应的垂直上升运动, 引起热带气旋内中低层的辐合增强, 进而改变了水平风场的分布。

关键词: 高空急流 热带气旋 相互作用 对流偏心增长

Effect of Upper-level Jet on 3D Structure of Landing Tropical Cyclones

Yuan Zipeng^{1,2} Wang Yuan¹ Chen Yanqiu² Sun Xin²

(1. The department of Atmosphere Sciences, Nanjing University, 210093
Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather, the Ministry of Education
2. Liaoning Meteorological Observatory, Shenyang)

Abstract: In order to find the effect of the upper-level jet on tropical cyclones (TCs), ten landing tropical cyclones from the Yellow Sea or the Bohai Sea are divided into the northern-

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973: 2004CB418301), 国家自然科学基金(批准号: 40333025)和江苏省自然科学基金项目(BK2005081)。

收稿日期: 2005年10月13日; 修定稿日期: 2005年12月28日

moving pattern and northeastern-moving pattern, and a set of composite analyses based on the data of ECMWF are conducted. The result shows that the TCs actually tend to move in the right side of the upper-level jets, and tend to be approaching up to the entrance of the maximum wind speed zones of the jets. In addition, when TCs approached to the jets, the lower-level motions around the TCs appeared a second-order maximum speed center of horizontal wind components and a centrifugal growth of convection in consequence. The upward motion caused by the divergence linked to the upper-level jet is regarded as the main reason of the changes of the horizontal and vertical motions of the TCs.

Key Words: upper-level jet tropical cyclone (TC) interaction centrifugal growth convection

引 言

热带气旋(以下简记为 TC)是对中国天气产生重要影响的一类热带天气系统。它的生消、移动及变化的多样性,能够造成形式不同的灾害性天气,其中以强降水和强风为主要代表。研究 TC 的灾害性天气问题实质上是研究 TC 的垂直运动场和水平运动场的结构变化。在对 TC 产生影响的诸多环境场因子中,高空急流的作用越来越受到关注。丁治英、张兴强等^[1]通过对非纬向高空急流与远距离台风暴雨的相关统计,得出 90% 的暴雨发生时,高空急流为东北—西南方向,在高空急流右后方有垂直对流增长。张兴强、丁治英等^[2]进一步研究西风槽前的急流与 TC 的相互作用时发现,高空急流入口区右侧的负涡度区引导产生次级垂直环流,从而诱生了 TC 西侧和北侧的对流增长。陈联寿、徐祥德等^[3]研究指出,当 TC 趋近于高空急流时可迅猛发展。发展的主要标志是水平风速的增大。以上相关研究主要针对 TC 的垂直或水平运动结构分别的变化,对两者进行的综合分析并不多见。

本文选择黄渤海登陆 TC 作为研究对象,对中高纬度环境场中高空急流和 TC 水平运动场和垂直运动场的结构进行综合分析,旨在找出高空急流对 TC 产生影响的机制并尝试建立概念模型。

1 研究对象和方法

根据中国台风年鉴^①,1949—2003 年 TC 在黄渤海沿岸登陆的仅有 37 个。虽然数量很少,但其中 36 个是在其生命史中达到台风(TY)强度级的,它们能够在海上北上到高纬度,并对华东、华北和东北地区天气产生重要的影响。如在辽宁发生的暴雨过程中,有 30% 与黄渤海登陆 TC 有着直接的关系^[4]。利用年鉴资料,对 37 个黄渤海登陆热带气旋进行研究,并以在黄渤海海区內气旋行进的主要方向为标准,将它们划分为 4 类:西北行、北行、东北行和东行^[5]。这其中以北行和东北行类所占比例最大,分别为 19 和 11 个。限于资料原因,从中选择 1980 年代以来的全部 6 个北行个例和 4 个东北行个例,对其从穿越 30°N 线至最后一次登陆后 12 小时的特点进行研究(见表 1)。

应用 ECMWF 的全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料,并选取 40°N 、 120°E 为中心点,水平格距 30km,水平网格点数 139×131 ,垂直方向上分为 23 层,经过 Cressman 插值形成有限区域的客观分析场(水平 4140km

① 中国气象局上海台风研究所的光盘台风数据集中的 1949—1988 年台风年鉴和 1988—2003 的热带气旋年鉴。

表 1 黄渤海登陆热带气旋重点研究个例范围

类型	编号 (年序号)	名称	沿黄渤海登陆地	研究时段
北行	198508 (198514)	Lee	朝鲜北部	1985. 8. 13. 20—8. 14. 20
	198509 (198515)	Mamie	江苏启东	1985. 8. 18. 08—8. 19. 20
	(198523)		辽宁庄河	1985. 9. 02. 08—9. 03. 08
	199415 (199417)	Ellie	山东乳山	1994. 8. 15. 08—8. 16. 20
	199910 (199910)	Olga	朝鲜北部	1999. 8. 03. 08—8. 04. 08
	200108 (200108)	Toraji	山东青岛	2001. 8. 01. 08—8. 02. 20
东北行	198506 (198511)	Jeef	辽宁丹东	1985. 8. 01. 20—8. 03. 08
	198707 (198709)	Alex	辽宁丹东	1987. 7. 28. 20—7. 30. 20
	199216 (199217)	Polly	山东青岛	1992. 9. 01. 20—9. 02. 20
	199406 (199406)	Tim	辽宁锦州	1994. 7. 12. 20—7. 14. 20

×3900km, 垂直方向由海平面至 50hPa)。

2 高空急流的分布与 TC 路径的关系

本文所指的高空急流是发生在 200hPa 附近的中心风速大于 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强风速带^[6]。对每一类 TC 越过 30°N 后第一个常规观测整点时 200hPa 高空风速分别作合成分析, 将结果连同该类 TC 从这一时刻起在黄渤海及沿岸的移动路径绘于图 1。在本研究中, 为了更全面地表征急流的特征, 将风速大于 $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等值线的中轴线作为急流的轴线。由图 1a 可见, 北行类 TC 的路

径均在急流轴的右侧, 趋向于最大风速中心的入口区右侧。其环境场中合成的急流轴线主要是西南—东北方向, 地理区域从我国华北至俄罗斯的远东地区, 在 45°N 左右出现轻微的反气旋性弯曲。

由图 1b 可见, 东北行类的 TC 个例所处的环境场中高空急流由两部分组成, 位于 45°N 左右的近纬向主急流轴和从我国华中至东北地区中部的西南—东北向副急流轴。TC 均在副急流轴的右侧移动并趋向于主急流轴最大风速中心的右后侧, 即高空急流最大中心入口区的右侧。与北行类环境场相比较, 急流的最大中心风速差别不大, 但风速

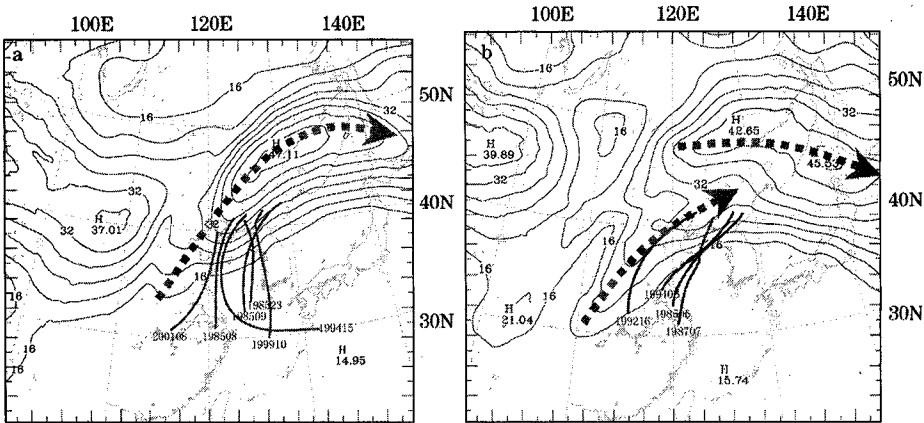


图 1 6 个北行 (a) 和 4 个东北行 (b) TC 个例在黄渤海及沿岸移动路径和 TC 越过 30°N 时 200hPa 高空急流合成分析

图中粗实线代表 TC 路径; 细实线代表大于 $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 间隔: $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 虚线箭头表示急流轴线。

切变明显小于前者。

综合分析北行类和东北行类的黄渤海登陆 TC 的合成环境场可知：当高空为一致的非纬向高空急流型时，TC 的路径一般为偏北行并一直在高空急流轴的右侧，TC 有向急流中心入口区右侧靠近的趋势；当在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 之间有近纬向主急流，在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间有非纬向的副急流时，TC 的路径接近东北行并一直在高空副急流轴的右侧，TC 的路径有向主急流最大风速中心入口区右侧靠近的趋势。

3 高空急流与 TC 水平和垂直运动结构的变化

受环境场的影响，TC 的结构通常会具

有非对称的特征^[7]。在本研究中，近地面层水平风场的分布表现出较明显的非对称特性。如图 2 所示，北行类 TC 个例进入中高纬度后，强风速首先出现在 TC 中心的北部和东北部，在其中心附近及其西侧风速很小，这种结构的形成是因为在 TC 的东部是强盛的西太平洋副热带高压，它与 TC 中心之间有较强的气压梯度。其后，随着 TC 的北上，在靠近高空急流处逐渐出现一个强风速的次中心。这一次中心随着环境场的系统配置不同而有所区别，有的是原来已存在的风速中心加强而来，有的是在气旋北上过程中新生成的，而且水平尺度也从 4 个经距至 10 个经距以上不等。在东北行类的个例中（见图 2），这种双中心结构并不十分明显，

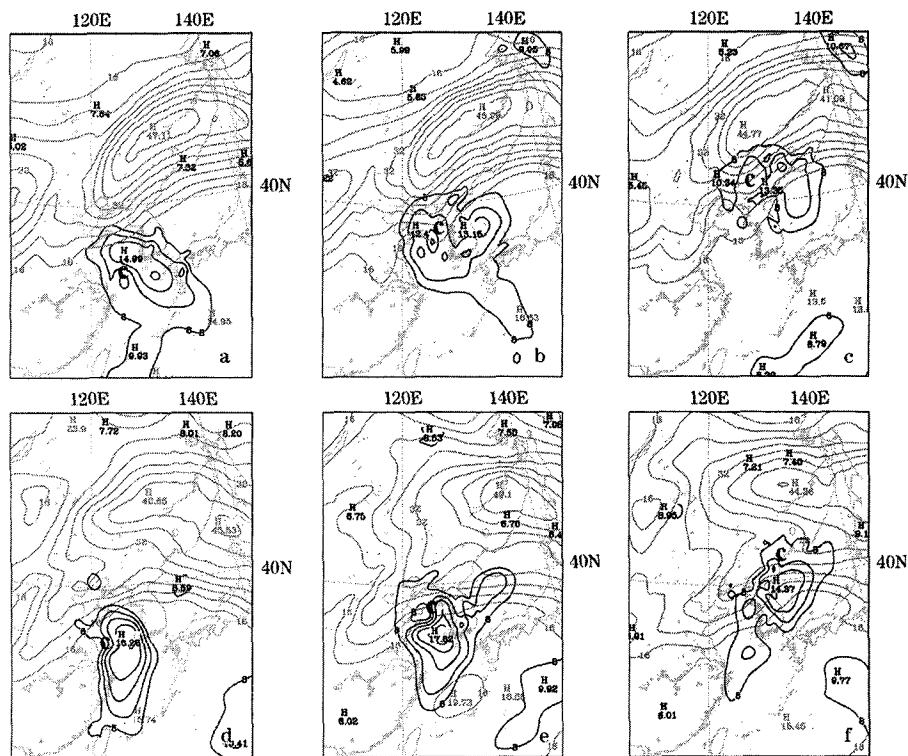


图2 北行类 TC (a~c) 和东北行类 TC (d~f) 北上过程中 200hPa 急流与 1000hPa 风速合成演变图
深色实线代表 1000hPa 合成风速等值线，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，间隔： $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；浅色实线代表 200hPa 合成风速等值线，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，间隔： $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；加粗“C”处代表合成的 TC 中心位置。a~c 和 d~f 的时间为 TC 越过 30°N 后的前 3 个常规观测时刻

但在 TC 中心处有弱风速中心存在,具有形成次中心的趋势。最强风速中心位于 TC 的东和东南两个象限。

近地面层强风速中心的分布与高空急流的分布形式在现象上看具有走向相近性,而且由于位于两个不同层次,所以应当寻求立体结构上的联系从而探寻相互影响的规律。根据 Uccellini 的理论:高空急流入口区左侧辐合、右侧辐散,形成一垂直次级环流,左侧下沉、右侧上升^[8]。在本研究中,所有 TC 都在上升区中运行,而上升最强的中心应位于急流入口区的右侧。对两类个例的 200hPa 的散度场和风场进行合成分析可以发现(图略),在高空急流的右后侧风速梯度最大处和 TC 中心附近均有高层的强辐散中心,随着 TC 向急流轴的趋近,两个辐散中心逐渐接近并都有了一定程度的加强,其中北上类型表现得尤其明显,两个散度中心最终合并为一个。考察各层次的上升运动中心的演变发现,这些 TC 在刚进入黄海海域时,上升运动较弱且集中在 TC 中心附近,在 700hPa 和 500hPa 层表现明显。在北上过程中,TC 周围出现较多新生的上升运动中心,在边界层内主要还是以 TC 为中心分

布的,但到了 700hPa 以上,如 500hPa 层,新生的上升运动中心便偏离了 TC 中心,且有增强的趋势(图 3)。这种对流偏心增长现象与环境场的配置有明显的对应关系。北行类个例中的对流中心位于 TC 的西北部,东北行类个例的对流中心则局限于 TC 中心的东部。

沿着图 3 中“I”所在位置分别作上述两类个例的 25~55°N 经向剖面(图 4),可以看到,北行类个例中,由于急流的存在,在高层急流轴的南侧存在一个较强的上升运动区,其中心在 500hPa 左右。在这个上升运动区的南侧存在一个从 200hPa 到地面,中心为 $15.37\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的较强水平风速通道(图 4a)。随着 TC 向偏北移动靠近急流轴,原来的上升运动出现了较强的增长,位置仍在急流轴南侧,这与其处高层的辐散中心是相对应的,同时促进了急流的增强,而前述的水平风速通道略有减弱并北移(图 4b)。当对流减弱后,急流轴的形状南北向拉长,非纬向性增强,上升运动区分为两部分,偏南部分对应 TC 中心外围的上升对流运动中心,偏北部分对应于主急流轴南端的高层辐散区,水平风速通道得到增强(图 4c)。

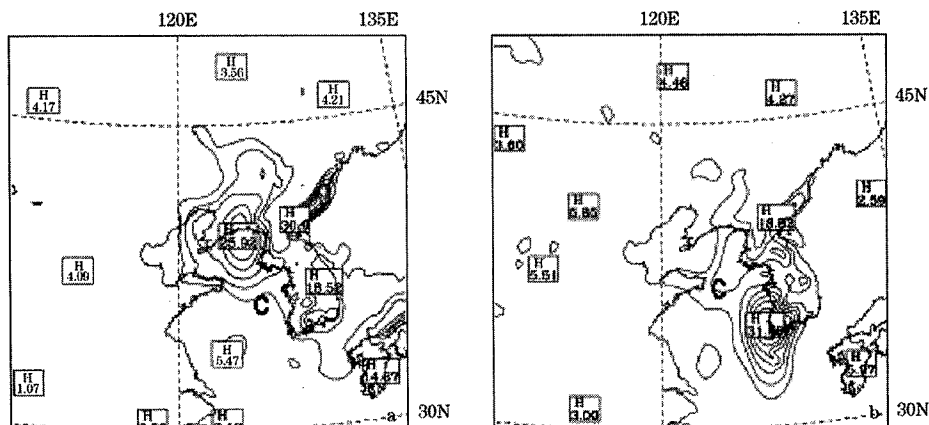


图 3 198508 号 TC (a) 和 198506 号 TC (b) 北上过程中 500hPa 垂直运动中心分布图

a. 1985 年 8 月 14 日 08 时; b. 1985 年 8 月 2 日 08 时

图中“C”处代表热带气旋中心位置,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 间隔: $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

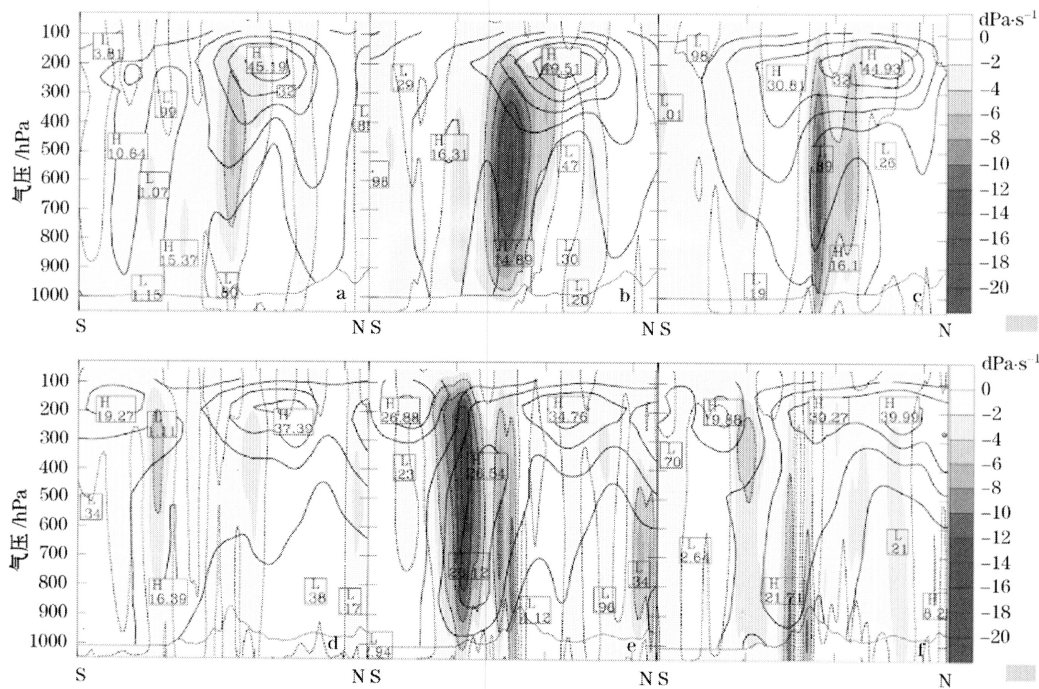


图4 198508号TC(a~c)和198506号TC(d~f)北上过程中沿强对流中心的水平风速(实线, 间隔: $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和垂直运动速度(虚线及色块填充, 间隔: $2\text{ dPa}\cdot\text{s}^{-1}$)经向剖面图
其中“S”为 25°N ，“N”为 55°N , 时次同图2

在东北行个例中(参见图1b), 急流的非纬向部分强度普遍较弱, 而纬向部分的中心位置又较偏东偏北。因此, 在TC的东象限, 由于与急流轴相距较远, 在初期并未产生直接的相互作用, 由于与副热带高压西侧的东南气流汇合而产生的上升运动和由于纬向急流存在产生的入口区右后侧(南侧)的高层辐散引起的上升运动各自存在, 其间存在一个类似于图4a中的较强水平风速通道(图4d)。当TC向东北方向行进时, 虽然同样产生了上升运动和急流轴的加强现象, 但上升运动并未合并成为一个强中心, 同时水平风速通道也出现了明显增强, 其中心增长了 $10.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图4e)。对流减弱后, 两个上升运动区的中心均下移, 其间出现了狭窄的下沉运动区域。纬向高空急流轴同样出现了向南的扩展(图4f)。归纳两类个例

的垂直运动演变情况可以看到, 较强的高空急流与TC的相互作用引起了TC外围对流的增强, 当急流与TC距离较近时, 会出现对流中心合并的现象, 同时高空动量借助于对流中心伴生的下沉运动区向近地面层传递, 使该层的水平风速出现加强的现象。

4 讨论

根据上述分析可以看到, 高空急流对于TC的水平风场变化和垂直运动中心分布有着明显的影响。为清晰可见, 上述关于高空急流背景下TC三维运动结构演变可以归纳为如图5的概念模型。如图5所示, 急流入口区右侧是高空辐散区, 近地面层相应具有气旋性环流; 当TC移向高空急流时, TC自身的近地面层气旋性环流与环境气流在急流右侧产生风向的辐合。随着TC趋向急流

的运动,高空散度逐渐增强,地面辐合也相应增强,根据质量守恒原理,该处的垂直上升运动也得到发展;另外,近地面层辐合的增强对应着气压的降低,根据柱坐标下梯度风平衡式, $v_\theta^2/r + fv_\theta = \partial\Phi/\partial r$, v_θ 为切向速度分量。当对流中心至外围环境气流 $\partial\Phi/\partial r$ 增大,水平切向速度 v_θ 增大,于是在 TC 中心至对流中心连线的向外延长线上,水平风速得到增长,有利于产生水平风速副中心或加强原有的风速中心。基于以上分析,可以认为高空急流入口区右侧的高层辐散及相应的上升运动区是 TC 上升运动得以加强的先期条件。上升运动的加强又导致了中低层的水平风场的变化。正是由于急流的存在而引起的对流运动的偏心增长,进而改变了 TC 水平运动场结构。

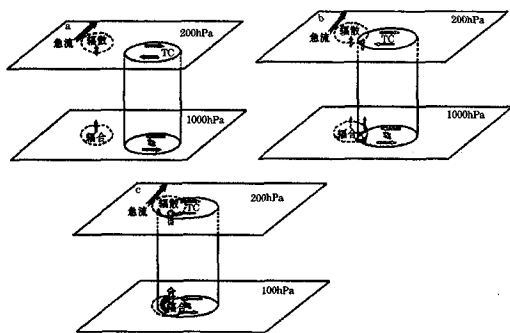


图5 高空急流对 TC 运动结构影响的概念模型

- 高空急流右侧为辐散区,通过垂直运动诱发地面辐合,TC 在近地面层为气旋性环流,高空流出层为反气旋环流;
- TC 移近高空急流右侧散度中心,其外围环流与环境气流在近地面层产生风向辐合和上升运动,在中层上升运动最强;
- TC 进一步移近高空急流,垂直运动中心合并增强,近地面层 TC 中心至垂直运动中心的延长线上水平风速增大

综上,黄渤海登陆 TC 可以按照其在黄渤海域的运动趋势进行分类。路径的趋势不同反映出不同的中高纬度环境场对 TC 运动的影响。非纬向高空急流可以作为环境场对 TC 施加作用的一个具体形式。(1) 高空急

流的非纬向性强弱与 TC 在北上过程中的路径趋势有直接的对应关系。当急流非纬向性强时,TC 的运动趋势是北行并向急流轴最大风速中心靠近;当急流纬向性强时,其运动趋势是东北行并向纬向急流轴最大风速中心靠近。(2) 北行类 TC 在北上过程中,近地面层水平风场出现强风速双中心结构;东北行类 TC 的近地面层水平风场出现强风速单中心非对称结构。(3) 强上升运动中心对应于两类 TC 中心有不同的分布,东北行类的位置偏东,北行类的位置偏北。(4) TC 水平运动结构的变化与 TC 与急流相互作用产生垂直运动的偏心增长有关。水平运动的风速中心出现在 TC 中心与上升运动中心线的延长线上。

高空急流与 TC 的相互作用,特别是 TC 向急流最大风速中心靠近的移动趋势,体现了高空急流的引导作用,具有明显的预报意义。在本例研究中未出现路径的突变和环境场的剧烈调整,因而结论可用于一般情况下黄渤海 TC 路径和三维运动结构的分析与预测。

参考文献

- 丁治英,张兴强,何金海等. 非纬向高空急流与远距台风中尺度暴雨的研究 [J]. 热带气象学报, 2001, 17 (2): 144-155.
- 张兴强,丁治英,王焱. 高空急流与中纬度系统影响下台风暴雨的研究现状 [J]. 气象, 2001, 27 (8): 47-50.
- 陈联寿,徐祥德,罗哲贤等. 热带气旋动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 2002: 3.
- 王达文. 北上热带气旋的分析与预报 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 23.
- 袁子鹏,张立祥. 黄渤海登陆热带气旋活动的统计分析 [J]. 气象, 2005, (6): 39-42.
- 《气象》编辑部. 急流 [J]. 气象, 1975, 1 (5): 4.
- 雷小途,陈联寿. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究 [J]. 热带气象学报, 2001, 59 (5): 602-615.
- Uccellini L W, Johnson D R. The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Stream and Implication for the Development of Severe Convective Storm [J]. Mon. Sea. Rev., 1979, (107): 682-703.