

环境场大尺度锋面系统与变性台风 结构特征及其暴雨的形成

徐祥德¹⁾ 陈联寿¹⁾ 解以扬²⁾ 程朝晖¹⁾

1) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

2) (天津市气象局, 天津 310074)

摘 要 本文将登陆台风环境大尺度锋面系统动力、热力结构作为台风变性发展的关键影响因子。本文的分析研究揭示了变性台风半冷半暖的热力非对称结构, 及其演变过程气压谷型、动能峰型、降水增幅特征形成的环境场影响因子。本文的数值试验表明, 台风环境场斜压结构(锋面特征)可以显著地影响台风变性过程, 并可导致台风中心气压呈“谷型”、动能“锋型”以及热力非对称结构特征。引起台风变性涡旋加强及其暴雨增幅现象或台风衰减、消亡。本文的数值试验证实了登陆台风变性发展的某些成因, 某种程度揭示了中低纬度系统的相互作用的机理问题。

关键词 锋面系统 变性台风 暴雨增幅 斜压结构

1 引言

台风变性问题在 50 年代已成为气象界十分关注的问题, Palmen^[1]分析了飓风 Hazel 的能量来源。Knox^[2]、Sekioka^[3~5]均详细探讨了有关台风变性为温带气旋机理问题, 并提出了台风系统在锋面上诱生新的温带气旋的辐合系统(complex system)的观点。Dimego 和 Bosart^[6]分析了热带风暴 Agnes 的变性过程, 认为在低层暖湿、高涡度区上空有较大气旋式温度平流(CVA)。CVA 与下层暖平流共同作用, 加强了上升运动, 促使对流增强, 潜热释放, 使得 Agnes 登陆后重新发展。陈联寿^[7]曾经分析了 7416 台风变性后结构, 他们认为斜压能量是台风得以变性的主要能源。张秋庆、丁一汇^[8]分析了 8012(Norris)台风变性时动能的制造源及热量收支。本文着眼于台风变性发展的锋面结构特征及其暴雨成因的分析研究与数值模拟试验, 强调了环境斜压结构对于台风变性发展的影响作用。

若考虑台风或低涡系统作为“开放”强涡旋系统, 即在理论模型中不仅引入下垫面(海、陆表面)潜热、感热的垂直输送, 而且可考虑台风、低涡侧边界动量、热量的非线性平流因素。徐祥德^[9]从非线性运动相路拓扑结构理论角度, 研究了涡旋能量平衡态问题, 研究结果表明, 涡旋系统的非线性运动动力学特征中的突变现象与系统下垫面潜热、感热的侧边界动量、热量及其水汽输送等因素相关, 其中侧边界动量、热量、水汽的平流输送亦可作为外源状态, 引起涡旋系统的发展。

本文研究的目标为变性台风演变问题。北上登陆台风相应的外源参数因子的状态

为：对于北方相对冷下垫面，而并非类似海上暖的下垫面，感热输送；中纬西风带斜压动量输入，且动能增加，中纬强锋面冷平流影响，即热量平流支出，且登陆台风摩擦耗散，由文献[7]可知，在上述外源参数条件下，涡旋系统亦可满足发展条件。

虽然根据“常规”的观测事实分析结果，可发现台风向暖区下垫面移动有利于台风的发展；反之则衰退。但台风登陆移向冷的下垫面若有强锋面冷平流的输入，同样可能造成台风变性发展。本文的数值试验强调了登陆北上台风锋面结构特征影响台风变性气压谷型演变特征形成，以及暴雨增幅发展的可能性，重点突出了环境强斜压锋面结构特征的差异对于台风变性发生的影响效应。

2 台风变性特征

本文选取造成北方暴雨的 8407 号台风为模拟试验实例。图 1 表明，8407 号台风登陆北上过程造成华北特大暴雨，最大过程降水量达 400 mm 以上，可达当地年降水量的 $1/2 \sim 1/3$ [10]。因此探讨这类变性台风降水成因亦是北方洪涝灾害形成的关键环节之一。本文从 8407 号台风变性阶段气压、动能以及温度场结构演变特征的诊断分析，可发现，环境场大尺度动力、热力结构变化与台风涡旋热力结构非对称特征的形成相关影响作用紧密相关，并揭示出登陆台风北上过程中低纬系统及其不同尺度系统的相互作用效应。

2.1 变性台风“谷型”特征

本文选取登陆北上变性的 1984 年 8407 号台风以及 1985 年的 8509 号台风这两个台风个例，并分析其结构变化过程，图 2a 的气压变化可以看出，登陆北上台风的强度大体经历了减弱-加强-再减弱 3 个阶段，8407 号台风登陆变性发展的中心气压“谷点”发生于 1984 年 8 月 10 日；8509 号台风登陆变性发展的中心气压“谷点”发生于 1985 年 8 月 20 日，这两个登陆台风反映变性发展的气压谷型特征均较为显著。

登陆台风北上，往往出现强度减弱的阶段，但某些台风在变性阶段还会发生加深，暴雨增幅的现象，而后再度减弱，由图 2b 可发现 8407 号台风气压演变过程（从 7 日至 11 日）呈显著的气压谷型，且“气压谷型”的低值与 6 h 最大降水过程存在明显的对应关系，即可能与变性台风暴雨灾害紧密联系。

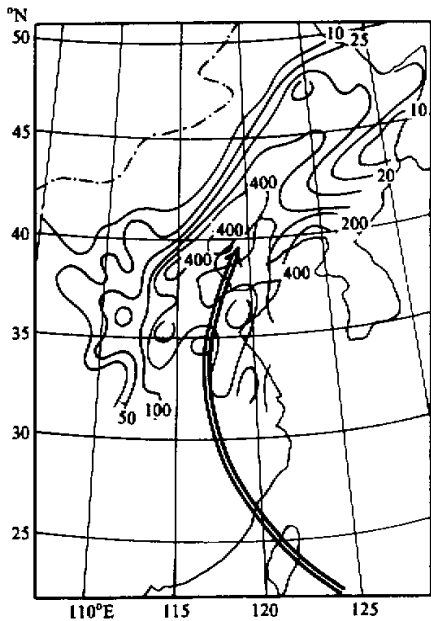


图 1 登陆北上热带气旋平均路径及最大过程降水量分布

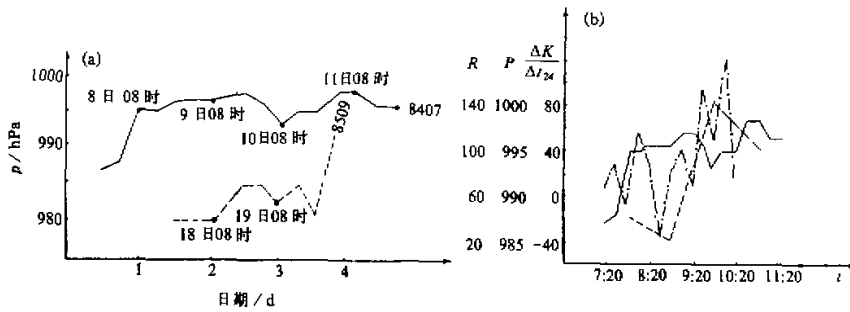


图 2 8407、8509 中心气压变化曲线 (a)

8407 号台风的气压 (实线), 6 h 降水量 (点划线), 500 hPa 24 h 动能变化 (虚线) (b)

2.2 变性台风“动能峰型”结构

登陆台风涡旋减弱, 而动能变化为负值, 但对于变性阶段重新发展的台风, 其动能变化则出现正值, 且呈显著峰值。由图 2b 亦可发现, 8407 号台风 500 hPa 动能变化呈明显“动能峰型”特征, 即台风登陆北上, 强度减弱, 中心气压缓升, 台风动能处于谷值; 当台风变性重新发展时, 中心气压则下降, 台风动能亦剧增, 且出现峰值。另外, 由图 2 亦可见, 台风动能的低谷与降水低谷处相对应, 台风动能的峰值则与降水峰值阶段相对应, 且有动能峰值超前现象由此可见, 变性台风的“气压谷型”、“动能峰型”均与台风降水峰型有较显著的相关关系。

3 台风变性发展及其环境热力特征结构的影响

分析 8407 号台风登陆过程 500 hPa 温度场分布特征 (图 3a、b) 可发现, 8407 号台风登陆前后中纬 40°N (蒙古到中国北方区域) 附近存在东西向大尺度锋区, 且在台风移至中国东部中纬地区, 此东西向锋区显著加强。这可能是造成 8407 号台风变性发展的重要斜压条件。台风北上减弱阶段, 往往维持其对称暖心结构的“母体”。此阶段台风涡旋动力、热力对称结构显著, 与中低纬西风带弱斜压非对称动力、热力结构基本分离, 并未发生中低纬系统的多尺度相互作用。当中高纬西风带具备强斜压条件时, 台风系统由于中低系统的多尺度系统的相互作用, 已不再能维持原对称“母体”, 而发生对外部环境条件的明显响应现象, 即出现温带气旋所具有的非对称动力、热力的内部结构特征。

这类外部环境条件往往需要较强的大尺度斜压结构背景, 亦造成外界强动量、热量的平流输送。

台风登陆北上过程, 由于中高纬西风带强斜压环境热力结构的影响, 台风结构亦发生显著变化。对比图 4a、b 可见, 台风区域东西向垂直剖面图上, 台风变性前后经纬向滤波处理后, 温度距平场台风对称性特征变化显著, 尤其变性后台风区域较变性前呈显著的“半冷半暖”非对称特征 (图 4b)。此时, 8407 号台风强度发生显著变化, 且雨区亦呈非对称特征。上述台风区域非对称结构表现明显的斜压性, 即呈随高度增加,

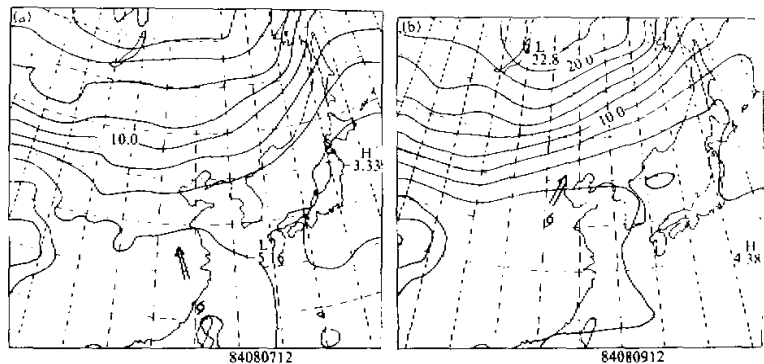


图3 1984年8月7日500 hPa 温度场 (a), 1984年8月9日500 hPa 温度场 (b)

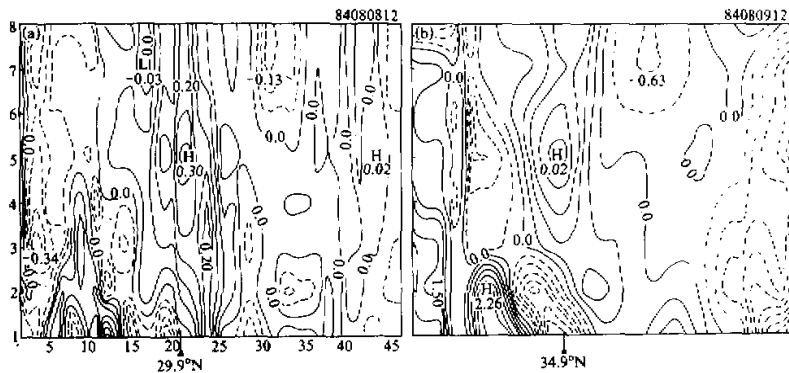


图4 1984年8月8日20时垂直剖面温度纬向距平滤波图(虚线为负,实线为正) (a)、
1984年8月9日20时垂直剖面温度纬向距平滤波图(虚线为负,实线为正) (b)

向西倾斜的特点,且对应于强降水区台风外围低层还有一强不稳定区。这表明,变性发展的登陆台风内部热力结构既表现出非对称特征,又表现出较强的斜压性结构。

4 台风变性机理的数值模拟试验

4.1 数值模式及资料简介

本文数值试验采用 NCAR—PSU 的 MM4 中尺度模式,δ 坐标垂直分辨率为 10 层,水平格距为 100 km,水平格点数 41×46 模式物理过程包括积云对流参数化,次网格水平扩散,边界层方案等。本文选取北上登陆台风变性个例 8407,数值试验的初始资料取自 T42 客观分析场,资料垂直层次为 1000、850、700、500、400、300、200、100 hPa,选取侧边界条件为 24 小时倾向边界嵌套方案。

本文将上述台风变性暴雨发生阶段作为数值模拟试验的重点时段,数值模拟取

1984 年 8 月 9 日 20 时 (8407) 作为模式初始时段, 积分时段为 24 h.

4.2 台风变性阶段路径及暴雨落区数值预报结果

讨论变性过程中模拟结果需考虑其模拟路径的客观状况。因为涉及到台风模拟路径的环境场背景的客观性, 所以需检验此模拟台风路径的可靠程度, 否则会影响变性台风与环境场相互作用的研究结论的可信度。

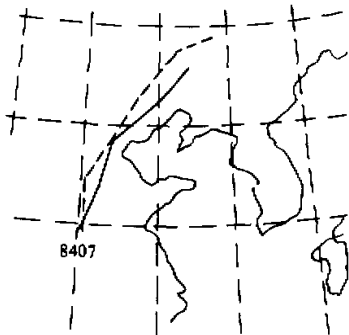


图 5 8407 台风的实际路径与模拟路径
实线为实际路径, 虚线为模拟路径

图 5 为上述台风个例的模拟与实况路径。由图 5 可见, 模拟的台风个例, 8407 号台风路径预报结果较为理想, 即模拟和与实际路径相近。

图 6a、b 为 8407 号台风变性阶段间隔 6 h 雨团位移模拟结果与实况图。由图 6 可发现, 8407 号台风雨团移动方向、暴雨落区与实况相近。另外, 由表 1 可见, 8407 台风变性过程间隔 12 h 降水量模拟结果亦与实况相近, 即有预报的客观效应, 模拟 24 h 总体偏差占日降水量 17%。

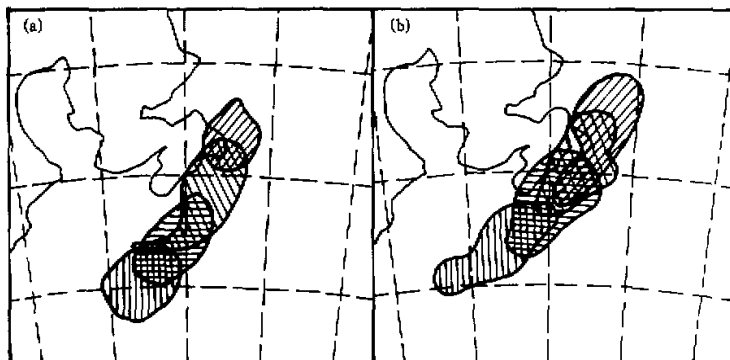


图 6 8407 号台风 8 月 9 日 20 时~8 月 10 日 12 时 6 h 雨团的实况 (a) 与模拟 (b)

表 1 8407 降水量的实况与模拟对比 (单位: mm)

	0~12 h	12~24 h	0~24 h
实况	153	255	508
模拟	119	373	592

4.3 非对称动力、热力结构的模拟特征

图 7 为 8407 号台风 12 h 模拟的温度距平滤波垂直剖面图。图 7 表明, 数值模拟结果能较清晰地揭示出台风变性发展的热力结构特征, 即台风北上过程, 温度垂直剖面场上半冷半暖非对称结构显著, 这类强斜压特征为台风变性发展, 暴雨发生提供了关键的动力、热力因素, 且图 7 模拟的非对称热力结构亦与实况 (图略) 相近。

与上述“半冷半暖”热力结构相适应的动力特征亦表现出非对称特征。由对比图 8a、b、c 可发现，伴随着台风变性发展，模式积分 12 h 前后，8407 号台风垂直运动流场呈显著差异，即积分 12 h 后，台风中心东西两侧垂直剖面图上表现出动力非对称性，台风中心东侧为上升区，西侧为下沉区，且积分 24 h 后台风中心东西两侧仍维持动力非对称结构。此类垂直运动的非对称结构与图 7 所示的热力结构非对称特征相配置。另外，台风变性个例 24 h 模拟的能量场变化亦与实况有类似之处，即如表 2 所示，台风变性发展过程，850 hPa、500 hPa 层次动能变化实况与大部分模拟结果相近，且均呈动能增加的趋势特征。但台风变性动能增加幅度并非与中心气压降低振幅成正比，这可能还与原涡旋动力结构特征发生变化等因素相关。

4.4 促使台风变性发展的环境动力、热力结构

台风是典型的深厚高能系统，登陆台风北上过程能量发生变化。由于陆地下垫面及环境的影响，登陆后台风能量衰减，但在某些特定的环境动力、热力条件下，台风变性重新发展，维持了非对称温、湿状况，并具备高能、高潜热结构。

上述分析已揭示出，登陆台风北上过程虽经过相对冷的陆地下垫面，但在某些中纬强锋面冷平流作用下，即存在可能激发气旋波的环境条件，引起已衰减的台风系统的重新变性发展的现象。

表 3 为 8407 号台风有关改变环境斜压结构试验（A、B、C）的模拟台风中心气压演变曲线。对比模拟台风个例中心气压的变化，可发现，加强与削弱大尺度环境场锋面结构，可得到完全相反的台风强度变化趋势。加强锋区，可促使台风变性发展，台风旋涡中心气压显著下降，反之，填塞或气压变化呈反位相。由表 3 可知，中高纬度大尺度

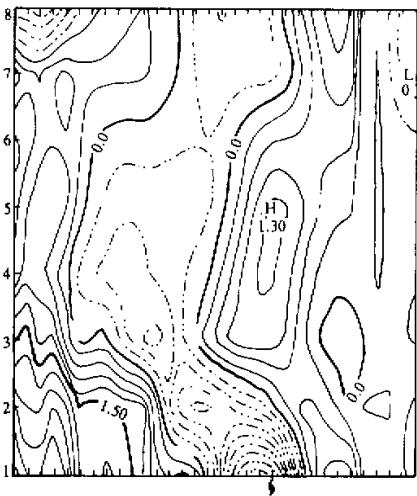


图 7 8407 号台风 12 h 模拟的距平温度滤波垂直剖面图

表 2 8407 号台风 24 h 动能变化的实况与模拟

动能的 24 h 变化	实况	模拟
850 hPa	80	200
700 hPa	80	100
500 hPa	80	60

表 3 8407 台风有关改变环境斜压结构试验模拟台风中心气压的变化

	0 H	6 H	12 H	18 H	24 H
实况	997	996	993	995	995
模拟（T 不变）	1003	1004	1005	998	994
模拟（加强锋区）	1003	1003	1002	994	993
模拟（T 平滑 5 次）	1003	1005	1008	1006	1000
模拟（T 平滑 15 次）	1003	1004	1008	1005	997

环境场锋面的加强亦有利由低纬北上的台风变性发展。

蒋尚城^[11]认为半热带气旋北部的半热带锋面上升运动很强,是中国北方暴雨形成的一个重要原因,其能量来源是潜热和斜压能量的释放。本文数值试验结果亦发现,登陆台风变性发展与大尺度锋面斜压能量状态密切相关。如上所述,台风变性加深的程度明显的依赖于台风环境锋区强度。本文数值模拟进一步揭示出,台风变性发展形成的台风暴雨的强弱程度亦与环境斜压锋区结构相关。图 8 为 8407 号台风模拟试验过程各类

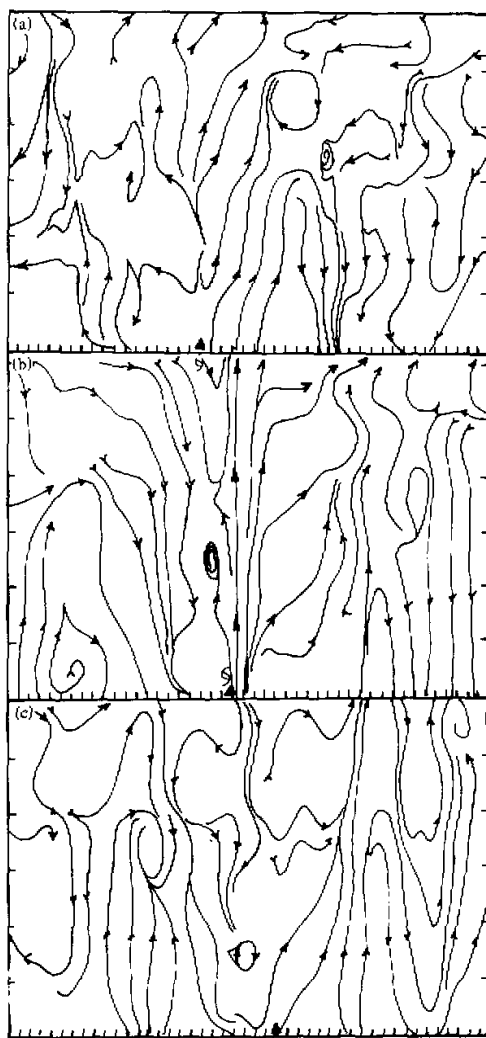


图 8 8407 号台风的垂直流场剖面

(a) 为初始场, (b)、(c) 分别为 12 h、24 h 积分; ▲ 为台风所在位置

试验模拟降水量的差异及其变化特征。由于考虑到模拟初期模式积分 6 h 前的初始场计算调整过程, 因此图 9 选取 6~12、12~18、18~24 时为模拟降水量间隔时段。由图 9 可知, 环境锋区结构的变化可明显地影响台风变性发展形成的降水强弱, 即初始场由于“平滑处理”而引起锋区斜压强度及其结构的减弱与台风暴雨强度变弱呈正相关, 而本文还采用改变台风东侧高压中心强度或台风暖心结构作为其他影响因子试验(图略), 试验结果表明, 台风变性暴雨强度变化对于台风环境斜压锋面结构的改变最为敏感, 试验结果通过模拟试验某种程度上可描述出大尺度环境斜压热力结构特征对于台风变性暴雨增幅的重要影响效应。

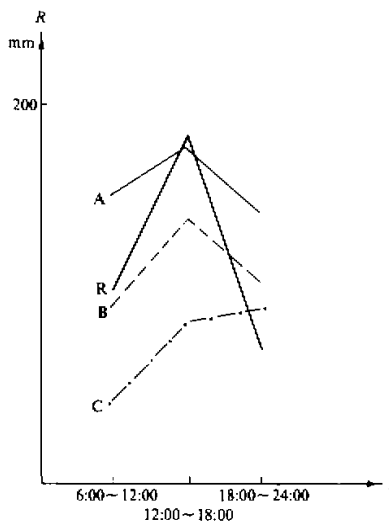


图 9 实况与各类锋区状况模拟试验降水过程

R: 降水过程实况, A: 加强锋区模拟降水过程, B: 锋区不变模拟降水过程, C: 减弱锋区模拟降水过程

5 结论

本文研究了登陆台风环境大尺度锋面结构特征对于台风变性发展影响问题, 由本文有关台风变性的诊断分析与数值模拟试验可得到如下结论:

(1) 台风变性过程由于大尺度锋面系统的影响, 台风区域经滤波处理的温度垂直结构表现出显著的“半冷半暖”热力非对称特征, 其“半冷半暖”的界面随高度呈倾斜状, 且低层区域构成不稳定层结。

(2) 锋面条件下台风变性动力发展过程中, 动能呈增强趋势, 且台风区域流场垂直结构亦趋于非对称分布与其热力结构特征相配置, 两者呈相互适应关系。

(3) 台风环境场锋面斜压结构特征可能作为台风变性发展的关键促发条件之一, 且锋面斜压结构及其强度与台风变性暴雨增幅呈显著正相关特征。

以上模拟结果进一步证实中高纬环境场大尺度锋面系统对于北上台风低纬系统的影响作用, 某种程度上揭示了中低纬度系统相互作用的现象及其机理。

参 考 文 献

- 1 Palmen, E., 1958, Vertical circulation and release of kinetic energy during the development of hurricane Hazel into an extratropical cyclone, *Tellus*, **10**, 1~23.
- 2 Knox, J. L., 1955, The storm "Hazel", synoptic resume of its development as it approached Southern Ontario, *Meteor. Soc.*, **36**, 528~533.
- 3 Sekioda, M., 1956, A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the midlatitude, *J. Meteor. Soc. Japan*, **34**, 276~287.
- 4 Sekioda, M., 1956, A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the

- middlelatitude, *J. Meteor. Soc. Japan*, **34**, 336~345.
- 5 Sekioka, M., 1959, A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the middlelatitude, *J. Meteor. Soc. Japan*, **37**, 111~114.
- 6 Dimego, G. J. and L. F. Bosart, 1982, The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part I: The observed fields and vertical motion computations; Part II: moisture vorticity and kinetic energy budgets, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 385~441.
- 7 陈联寿、丁一汇, 1979, 西太平洋台风概论, 北京: 科学出版社.
- 8 张秋庆、丁一汇, 1990, 登陆台风变性与温带气旋过程的物理过程机制和初步分析, *海洋学报*, **12**, 704~713.
- 9 徐祥德, 1991, 轴对称涡旋非线性运动平衡态、失稳和突变影响因子的研究, *大气科学*, **15**(2), 63~72.
- 10 曹钢锋等, 1992, 登陆北上热带气旋倒槽造成的北方特大暴雨, *大气科学研究与应用*, ???~???
- 11 蒋尚城、张谭等, 1981, 登陆北上减弱台风所导致的暴雨-半热带系统暴雨, *气象学报*, **39**, 18~27.

Typhoon Transition and Its Impact on Heavy Rain

Xu Xiangde¹⁾, Chen Lianshou¹⁾, Xie Yiyang²⁾ and Cheng Zhaohui¹⁾

1) (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

2) (Meteorological Bureau of Tianjin, Tianjin 310074)

Abstract The key factors that affect the development and transition of typhoons are the dynamical and thermal structures of large-scale fronts with the background of landing typhoons. The analyses of this paper demonstrate typhoon's thermal asymmetric structures: the half cold and half warm, the surface pressure valley pattern, kinetic energy peak pattern and the character of the precipitation amplification during the typhoon's transition. According to numerical experiments, the baroclinic structure of typhoon's environment can obviously affect the transition process of typhoon, leading to the formation of the pressure valley, kinetic energy peak pattern and thermal asymmetric structure in typhoon center. Sometimes the transition typhoon vortex may strengthen and precipitation may reinforce, and sometimes typhoon may weaken or dissipate. The numerical results in this paper explain the transition and development of the landing typhoon and show the mechanism of the interactions between mid- and low-latitudes.

Key words front system transition typhoon heavy rainfall amplification baroclinic structure