

# 登陆台风与环境因子相互作用对暴雨的影响研究综述

程正泉

(广州中心气象台, 广东广州 510080)

**摘要:**综述登陆台风造成的暴雨强度和范围不仅受台风强度、范围及结构等的影响,还与环境场密切相关。对低空急流、中纬度西风槽及冷空气、季风、大陆高压、台风周围的残涡或小涡、下垫面以及边界层输送等环境因子,与登陆台风相互作用影响暴雨的机理进行了系统全面的综述,并对该领域内存在的问题作了初步讨论。

**关键词:**天气学;暴雨;登陆台风;综述

**中图分类号:** P44

**文献标识码:** A

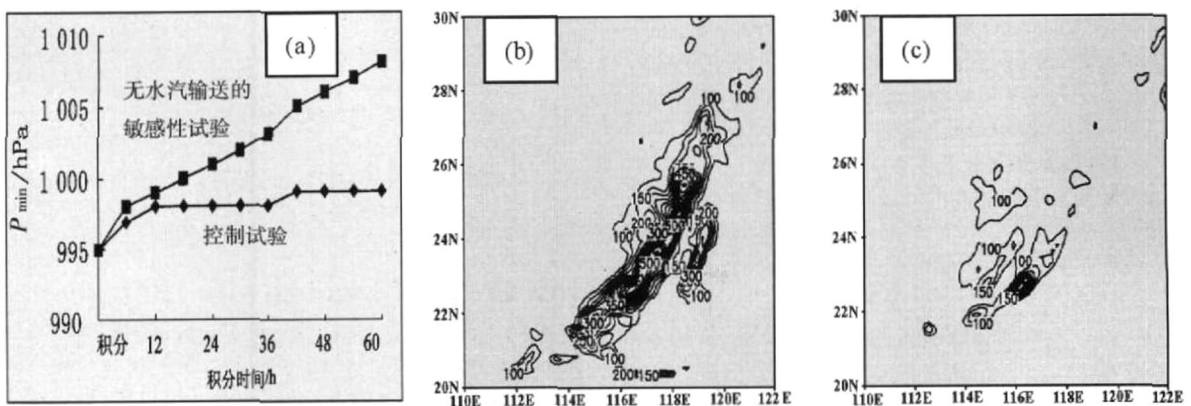
**文章编号:** 1007 - 6190(2008)05 - 0004 - 04

台风登陆后可造成暴雨、大风和风暴潮等灾害。受地表摩擦、海表潜热输送被截断等因素影响,台风登陆后强度会减弱,因此大风和风暴潮主要发生在台风登陆前后。而台风引发的暴雨不仅发生在登陆前后,甚至登陆数日后仍可产生大范围暴雨而导致巨灾。如 7503 号台风 Nina 登陆后其环流数日不消,创造了我国大陆 24 h 降水之最<sup>[1]</sup>。这种台风登陆后因连续暴雨往往导致更加严重的灾害,是台风业务预报中的难点。我国历史上多次受这种类型的台风影响,遭受重大损失。除 Nina(7503)外,还有 9711 号台风 Winnie、0604 号强热带风暴 Bilis 等。研究表明,台风本身的因素(强度、范围、台风内部气流、温、湿、稳定度等)对台风暴雨有重要影响<sup>[1]</sup>。统计表明,强度越强的台风,其产生的暴雨往往也越强,但也不尽然<sup>[2]</sup>。观测事实和研究均发现,除台风本身因子外,台风与环境场的相互作用对暴雨影响相当重要<sup>[3]</sup>。一个弱的残涡,在有利环境条件下,可产生远超过强台风的特大暴雨。本文对登陆台风与环境流场和下垫面相互作用对暴雨的影响研究作一综述,并对该

领域存在的问题进行初步讨论。

## 1 低空急流

台风环流往往在低空形成一条宽广的偏西南风或偏东南风急流带,并成为暴雨区的主要水汽通道和能量通道。Dimego 等<sup>[4]</sup>通过飓风 Agnes 登陆后水汽方程的计算得知,水平水汽通量辐合对于降水有重要影响。合成分析表明,台风登陆后若能维持输送水汽的急流与之联结,则对其在陆上的强度和暴雨的维持十分有利<sup>[5-6]</sup>。数值试验表明,低空急流输送的水汽通过影响热带气旋的结构来改变其强度,充沛的水汽供应有利于热带气旋暖心的维持,外界水汽输送有助于热带气旋雨带中的强对流活动,使雨量加强<sup>[7]</sup>。一旦切断外界水汽输送,台风中心最低气压明显上升、暴雨显著减弱(图 1)。陈久康和丁治英<sup>[8]</sup>研究了高低空急流与台风的中尺度暴雨之间的关系,认为 Wave - CISK 过程和斜压基流的对称不稳定可能是低空急流发展和倒槽形成的更切合实际的动力机制。



(b)控制试验中降水分布(有水汽输送);(c)敏感性试验中降水分布(无水汽输送)

图 1 控制试验及无水汽输送试验的台风中心最低气压(a)以及相应的降水对比(b~c)(引自文献[7])

## 2 中纬度西风槽、冷空气

台风登陆后一般因陆面摩擦会减弱。但有些台风在

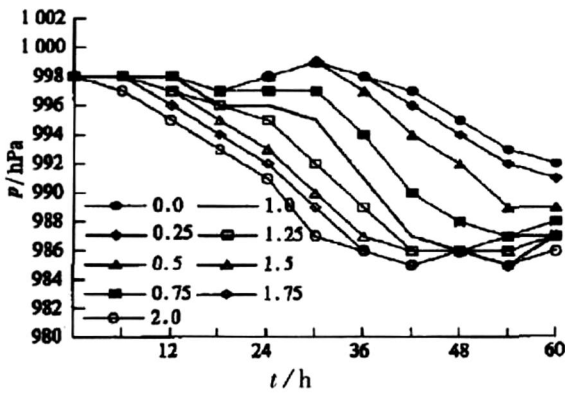
向高纬度运动过程中与中纬度斜压系统发生相互作用而加强,这种过程称之为变性(Extratropical Transition, ET)

收稿日期: 2008 - 09 - 09

基金项目: 广州市科技攻关计划——科技攻关重大项目(2007Z1—E0101)和上海台风研究基金课题(2008ST11)共同资助

作者简介: 程正泉(1975年生),男,高级工程师,博士,主要从事华南天气分析预报及热带气旋研究等工作。

过程。台风的变性和再发展过程使中高纬度地区遭受意外的风雨灾害而造成损失。统计表明,在登陆中国的热带气旋中,约有 12% 会发生变性<sup>[9]</sup>。Foley 和 Hanstrum<sup>[10]</sup> 的统计表明,热带气旋变性的关键因子是中纬度有明显的槽脊出现。李英等<sup>[11]</sup> 对变性加强的 Winnie (9711) 数值试验表明,登陆台风的变性加强与西风带高空槽的强度密切相关,深高空槽有利于台风的变性加强(图 2)。Bosart<sup>[12]</sup> 和 McTaggart<sup>[13]</sup> 还指出变性气旋和急流之间的相对位置也很重要。在北半球,暴雨中心一般会偏于变性热带气旋中心路径的左侧。有研究认为,北半球高空槽一般位于热带气旋左侧,变性热带气旋进入中纬度斜压环境场后,高层的流出气流与环境场中的气流形成高空急流,而低层热带气旋环流可能与环境场高值系统气流合并形成低空急流,这两支气流合并的地点一般都在变性热带气旋的向极一侧,高空急流入口区右侧为辐散区,如果与低空急流的辐合区耦合,则会产生大尺度强迫上升并造成暴雨<sup>[14]</sup>。陈联寿<sup>[3]</sup> 指出,冷空气可以使涡旋获得斜压能量,位能转化成动能而使涡旋得以迅速发展。研究发现,暴雨增幅时有效位能释放,冷空气处在台风外围时有效位能释放最多,增幅最大<sup>[15]</sup>。



图例中 1.0 表示原始强度,数值越大表示槽越深、越小表示槽越弱  
图 2 不同强度西风槽的数值试验中台风 Winnie 中心最低气压对比(引自文献 [11])

### 3 季风

台风和夏季风是两类热带系统,二者之间有密不可分的关系。季风的爆发和加强表现在输送水汽和不稳定能量的低空急流的增强。研究表明,在天气及季节时间尺度上,夏季风活动对台风生成频数及强度变化有显著影响<sup>[16-18]</sup>。统计结果表明,季风强的年份,影响广西的台风往往偏早、偏多,季风进入热带气旋内部,对台风的发展有正贡献<sup>[19]</sup>。台风与强盛夏季风均能造成暴雨,而当二者相结合时,降水往往明显增幅,这对内陆地区的影响尤为明显<sup>[20]</sup>。0604 号强热带风暴 Bilis 就是热带气旋与强盛西南季风相结合的典型例子,造成华南大范围连续特大暴雨并导致巨大灾害。Bilis 引起了对季风影响登陆台风强度及暴雨这一问题的极大关注。

### 4 大陆高压

西太平洋副高加强西伸在登陆台台北侧形成强高压

带时,高压南侧的东风急流会加强水汽输送和正涡度叠加,造成降雨增强。但由于高压阻止登陆台风从中高纬获得斜压能量,台风衰减较快,暴雨不易维持<sup>[3]</sup>。另外,夏季亚洲大陆上空受大尺度的南亚高压控制,当位于青藏高原的南亚高压中心东移离开高原时,其环流往往可以伸展至中低层<sup>[21]</sup>。登陆台风常常会与之发生相互作用。当台风登陆后受大陆高压阻挡时往往移动变慢、强度很快减弱,暴雨也难以维持。但也有一些不同的个例。Bilis (0604) 登陆后由于大陆高压的阻挡而移动缓慢,并维持长时间的强降水<sup>[22]</sup>。而登陆台风在陆上的维持和停滞,往往是产生特大暴雨的一个重要原因。

### 5 台风周围的残涡或小涡

台风环流邻近的中尺度系统与外部中尺度云团或小涡合并时,会使残涡加强,这对残涡暴雨的增幅有利。业务上这种例子并不少见。陈联寿<sup>[23]</sup>、罗哲贤<sup>[24]</sup> 的研究表明,在台风环境最大风速半径处,有时会出现一个或几个中尺度涡旋。通过涡旋 Rossby 波传播的途径,中尺度涡旋的涡量会向内核区输送,导致台风涡旋中心附近涡量增加,中心气压下降,台风增强(图 3)。于玉斌<sup>[25]</sup> 利用 MM5 模式模拟了台风“宝霞”的残涡被并入台风“桑美”环流的过程,认为这是“桑美”近海增强的重要原因。

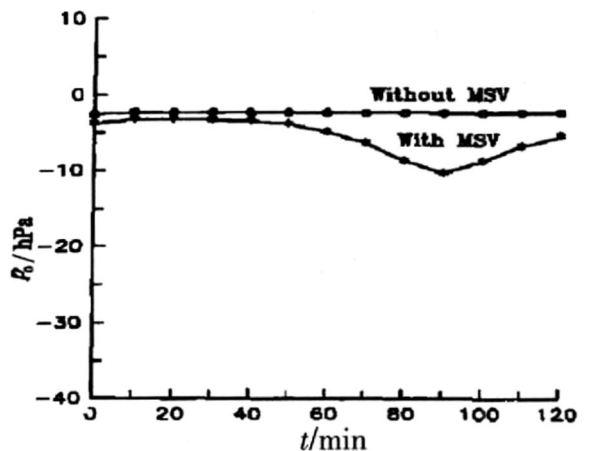


图 3 有无中尺度小涡卷入台风环流的数值试验中台风中心相对气压之比(引自文献 [23])

### 6 下垫面

当台风登陆后,山脉地形的摩擦作用将耗损登陆台风的能量而使其衰亡。但在作用过程中,同时也增强了山脉地形的辐合和迎风坡上升运动,继而在其衰亡之前,对残涡暴雨的增幅起了重要作用。0422 号台风 Meari 登陆日本九州,其外围气流与东侧 500 km 之远的山脉地形作用生成了一块暴雨区。数值试验的结果表明,当在模式中移去这块山脉地形后,这块雨区就不见了<sup>[26]</sup>。钮学新等<sup>[27]</sup> 对 0216 号台风的数值模拟试验表明,地形作用使迎风坡及降水中心增加雨量,背风坡雨量减少,从而使降水分布更不对称、更不均匀。同时,浙闽山地地形起伏增强了地面对大气的拖曳效应<sup>[28]</sup>,一方面使垂直运动加强,另一方面也改善了积云对流和大尺度降水条件,增加了

对流降水和大尺度降水,从而引起台风暴雨的增幅。大陆海岸线的分布可以使登陆台风结构发生突变从而影响到暴雨强度及落区的变化。9216号台风暴雨的模拟试验表明,暴雨中心随海岸线的扩展而移动,地形坡度削弱会引起地形性降水减少,从而使台风暴雨幅度有所减弱<sup>[29]</sup>。数值试验结果表明,台风与地形相互作用可激发出中尺度涡旋,当此涡旋与台风环流同向时会使局部环流增加,从而加剧暴雨,而反向时则局部环流减弱,暴雨也相应减弱<sup>[30-31]</sup>。

## 7 边界层输送

登陆台风暴雨常造成陆面近似饱和的湿地状况,这种饱和湿地对台风维持及暴雨增幅有重要影响。陈联寿<sup>[32]</sup>指出,如果登陆后的台风环流停滞在一块大的水面(湖泊、水库)上或一块被台风暴雨浇出的饱和湿土上,则能维持较长时间,同时台风暴雨下饱和土壤层和积水对台风产生水汽反馈,反过来加剧该地的暴雨。数值试验表明,陆地水面对减低登陆热带气旋的衰减率有利,并指出衰减率与陆地水体的深度有直接的关系<sup>[33]</sup>。7503号台风个例数值试验表明,湿地边界层通量尤其是潜热通量输送有利于登陆台风强度及暴雨的维持<sup>[34]</sup>。

## 8 结论

登陆台风造成的暴雨强度和范围不仅与台风本身强度、范围及结构有关,还与环境密切相关。近年对登陆台风与环境相互作用对暴雨影响的研究取得丰硕成果,这取决于目前观测手段的更新、观测网的密集分布、计算机条件的飞速进步、对物理过程认识的发展及数值模式分辨率的提高等。另外,国内外多个台风外场观测试验对这一领域的发展起到了重要的推动作用。基本上,中纬度西风带系统以及低纬度季风急流与登陆台风相互作用,是台风获得能量补充的两种主要方式,前者由斜压有效位能转化使台风获得动能,后者是台风从季风急流中获取大量潜热能,有利于台风在陆上的强度增强或维持,这对暴雨的维持十分重要。此外,台风外部残涡或小涡的卷入、下垫面潜热通量的向上输送也有利于暴雨的维持。而陆面地形则对暴雨分布以及局地增强或减弱有重要作用。环境系统使得登陆台风出现停滞,往往也是造成特大暴雨的一个重要原因。

尽管目前台风路径的业务预报水平取得显著进步<sup>[35-37]</sup>,但制作准确的登陆台风暴雨预报仍然比较困难,尤其是台风与环境的相互作用导致的暴雨增幅的精细预报难度更大<sup>[38-44]</sup>。首先,台风与环境系统相互作用的物理机制仍有待于进一步了解。尽管已有不少研究成果,该领域内仍存在大量的科学难题,如冷空气可导致台风变性增加暴雨增幅,但过强冷空气也可导致台风填塞,这个判据是什么?夏季风与登陆台风的相互作用对台风中的中尺度系统活动的影响机制是什么?地形的迎风坡效应可使得暴雨增强,随着台风移动在风场不断发生改变情况下这种迎风坡效应及对暴雨的影响有何改变?等等。同时,我们对台风细微结构的观测仍然不够,卫星、雷

达等遥感资料的应用仍有限。此外,目前对台风暴雨的数值研究主要集中在模拟和诊断研究上,业务上使用数值模式进行登陆台风的暴雨预报仍需要大量的工作。台风降水的定量降水估测(QPE)和定量降水预报(QPF)离业务应用仍有相当远的距离。

正是由于以上困难的存在,制作登陆台风暴雨业务预报时,主要考虑的是台风本身环流的降水,对台风与环境系统相互作用对暴雨影响效果的判断比较困难,常造成降水落区及强度预报的失败。经验预报并不能从根本上解决这一预报难题。必须依靠数值预报水平的发展来提高登陆台风暴雨的精细化预报水平。这需要加强对台风细微结构的观测,对台风与环境系统相互作用机制的深入了解以及对参数化方案、同化技术和数值模式的改进。而科研成果的业务转化也是非常重要的一环。登陆台风暴雨预报水平的提高,需要科研和业务人员的共同努力。

## 参考文献:

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 147.
- [2] 程正泉, 陈联寿, 刘燕, 等. 1960 - 2003年我国热带气旋降水的时空分布特征 [J]. 应用气象学报, 2007, 18(4): 427 - 434.
- [3] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [4] Dimego G J, Bosart I F. The transformation of tropical storm agnes into an extratropical cyclone, part II: Moisture, vorticity and kinetic energy budgets [J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(5): 412 - 433.
- [5] 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征 [J]. 气象学报, 2004, 62(2): 167 - 179.
- [6] 程正泉. 登陆热带气旋特大暴雨机制研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008: 27 - 44.
- [7] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. 大气科学, 2005, 29(1): 91 - 98.
- [8] 陈久康, 丁治英. 高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统 [J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 271 - 281.
- [9] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 14 - 23.
- [10] Foley G R, Hanstrum B N. The capture of tropical cyclones by cold fronts off the west coast of Australia [J]. Weather and Forecasting, 1994, 9(4): 577 - 592.
- [11] 李英, 陈联寿, 雷小途. 高空槽对 9711 号台风变性加强影响的数值研究 [J]. 气象学报, 2006, 64(5): 552 - 563.
- [12] Bosart I F, Atallah F H. Extratropical transition: large - scale aspects [C] // 24th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Fort Lauderdale, FL, Amer Meteor Soc, 2000: 284 - 285.
- [13] McTaggart Cowan R J. Influence of the downstream state on extratropical transition hurricane earl (1998) case study [C] // 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego, CA, Amer Meteor Soc, 2002: 543 - 544.
- [14] Bosart L F, Dean D B. The agnes rainstorm of June 1972: Surface feature evolution culminating in inland storm redevelopment [J]. Weather and Forecasting, 1991, 6: 515 - 537.

- [15] 励申申,寿绍文,王信. 登陆台风与其外围暴雨的相互作用[J]. 气象学报, 1992, 50(1): 33 - 40.
- [16] Tim Li, Bin Wang A review on the western north pacific Monsoon: Synoptic - to - interannual variabilities[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2005, 16(2): 285 - 314.
- [17] Mark A Lander Description of a monsoon gyre and its effects on the tropical cyclones in the western north pacific during august 1991[J]. Weather and Forecasting, 1994, 9(4): 640 - 654.
- [18] 孙秀荣, 端义宏. 对东亚夏季风与西北太平洋热带气旋频数关系的初步分析[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 67 - 74.
- [19] 吴恒强. 影响广西的热带气旋与热带季风的某些关系[J]. 气象, 2002, 28(9): 27 - 32.
- [20] 李丽, 郑勇. 1996 - 2006年韶关热带气旋暴雨统计分析[J]. 广东气象, 2008, 30(4): 37 - 38.
- [21] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 914.
- [22] 张东, 蔡安安, 林良勋. 强热带风暴“碧利斯”致洪暴雨的特征及成因[J]. 广东气象, 2007, 29(1): 22 - 24.
- [23] Chen Lianshou, Luo Zhexian Interaction of typhoon and mesoscale vortex[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(4): 515 - 528.
- [24] 罗哲贤, 徐祥德, 陈联寿. 涡旋合并过程的数值研究[J]. 大气科学, 2002, 26(6): 807 - 816.
- [25] 于玉斌. 我国近海热带气旋强度突变的机理研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007: 137 - 140.
- [26] AKihiko Murata A Cloud - resolution numerical simulation for characteristic rainfall induced by typhoon Meari(2004) [C] // Team member report on topic 0. 3 of Sixth International Workshop on Tropical Cyclones, 2006.
- [27] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216号台风降水及影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 57 - 68.
- [28] 郑庆林, 宋青丽. 一个台风暴雨模式和山地地面拖曳效应对登陆台风暴雨增幅影响的数值研究[M] // 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第4分册). 北京: 气象出版社, 1996: 215 - 221.
- [29] 郑庆林, 吴军, 蒋平. 我国东南海岸线分布对 9216号台风暴雨增幅影响的数值研究[J]. 热带气象学报, 1996, 12(4): 304 - 313.
- [30] 段丽, 陈联寿, 徐祥德. 山脉地形对热带风暴 Fitow结构和运动影响的数值试验[J]. 气象学报, 2006, 64(2): 186 - 193.
- [31] 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 233 - 244.
- [32] Chen Lianshou Decay after landfall[D]. WMO/TD, 1998, 875: 1. 6. 1 - 1. 6. 5.
- [33] Shen W, Ginis I A numerical investigation of surface water over land on landfalling hurricanes[J]. J. Atmos Sci, 2002, 59(4): 789 - 802.
- [34] 李英, 陈联寿. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 683 - 693.
- [35] 段朝霞, 苏百兴. 0601强台风“珍珠”北翘路径分析[J]. 广东气象, 2007, 29(2): 42 - 43.
- [36] 马红云, 何伟芬, 王咏青. 两类不同路径热带气旋登陆前后的总能量对比分析[J]. 广东气象, 2008, 30(1): 35 - 39.
- [37] 刘燕, 程正泉. 适用于热带气旋分析的动态合成方法[J]. 广东气象, 2007, 29(1): 16 - 18.
- [38] 刘燕, 林良勋. 登陆福建的热带气旋对广东降水的影响[J]. 广东气象, 2007, 29(2): 14 - 17.
- [39] 罗伯良, 张超. 登陆热带气旋影响湖南并造成强降水的气候特征[J]. 广东气象, 2008, 30(4): 12 - 14.
- [40] 盛文斌, 张瑞萍, 陆琛莉. SVM方法在热带气旋降水预报中的应用[J]. 广东气象, 2008, 30(3): 6 - 8.
- [41] 李彩玲, 杨宇声, 郑启康, 等. 一次台风暴雨中的龙卷风天气[J]. 广东气象, 2007, 29(3): 26 - 29.
- [42] 张加春, 饶灶鑫, 陈丽珍, 等. 1884 ~ 2006年西北太平洋热带气旋活动特征[J]. 广东气象, 2008, 30(2): 24 - 26.
- [43] 黄小丹, 周武. “派比安”在阳江不同地区的风场特征及防风问题[J]. 广东气象, 2007, 29(2): 26 - 28.
- [44] 张帆, 赵继业. 反演台风海平面气压场与 NCEP及报文资料的对比[J]. 广东气象, 2008, 30(1): 29 - 32.

## Evolution of Impact of Interactions between Landfalling Typhoon and Its Surroundings on Rainstorms

CHENG Zheng - quan

(Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Besides the intensity, coverage and structure of typhoon, the surrounding factors could also impact the intensity and range of the induced torrential rain, such as low - level jets, mid - latitude westerly trough and cold air, summer monsoon, continental high, vicinal remnant or vortex, underlying surface and boundary layer transfer and so on. The evolution of impact of interaction between landfalling tropical cyclones and its surroundings on rainstorms is summarized and some scientific issues in this field are preliminarily discussed.

**Key words:** synoptics; evolution; rainstorm; landfalling typhoon