

# 登陆热带气旋研究的进展<sup>\*</sup>

陈联寿

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

罗哲贤

(南京气象学院, 南京, 210044)

李 英

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘 要

随着大气探测技术的发展, 登陆热带气旋研究已经成为热带气旋研究中一个新的领域。新的探测技术能初步揭示出热带气旋登陆过程中发生的多种改变。近年来, 国内外科学家实施了一系列外场科学试验(Field scientific experiments), 对登陆热带气旋进行探测和研究, 旨在提高预报的准确率。登陆热带气旋研究内容包括: 海岸和内陆山脉地形影响, 结构和强度变化, 登陆热带气旋的暴雨强度和分布, 大风强度和分布, 风暴潮强度和范围, 登陆热带气旋在陆上的维持机制, 陆地涡旋的路径和入海加强, 边界层结构, 陆面过程和能量交换, 变性过程等。

研究采用外场科学试验与数值模拟相结合的方法。模拟或预报模式中使用同化资料尤其是卫星同化资料来构造初值场, 取得较好结果。登陆热带气旋的研究目前正在展开, 并取得了一些重要结果。研究表明, 潜热释放和斜压位能释放是近海或登陆热带气旋加强或维持的两种主要能源。这两种能量可分别从水汽输送和热带气旋与中纬度环流的相互作用中获得。另外, 陆面饱和湿地或水面的潜热输送、热带气旋与中尺度涡旋或热带云团的合并以及高空流出气流强辐散也对其加强和维持有利。世界气象组织的热带气象研究计划(TMRP)正在组织对这一领域的总结和下一步的研究计划。这项研究将对预报和减轻登陆台风(飓风)灾害起到积极作用。

关键词: 登陆热带气旋, 外场科学试验, 研究进展。

## 1 引 言

近年来, 热带气旋登陆(Landfall)问题的研究倍受重视。热带气旋登陆过程受到浅海区大陆架和海岸地形作用, 将使热带气旋结构发生突变, 从而也使与结构相关的强度、运动和风雨分布发生相应变化。热带气旋在海上时, 主要考虑海-气相互作用物理过程对其变化的影响。热带气旋趋近登陆时, 将出现海陆气三者相互作用的复杂局面, 这方面的研究几乎是空白。热带气旋登陆是其生命史中一个重要转折点。登陆以后要考虑陆面过程和降雨反馈对其维持的影响。台风下垫面是耸山峻岭还是水库湖面或饱和湿土对其能量耗散完全不同。另外, 登陆台风的环流与一定山脉地形的作用将会生成中小尺度强对流系统, 台风环流与这类中小尺度对流系统之间的相互作用对登陆热带气旋的强度变化有重要影响。上述过程

是登陆热带气旋能量消耗和补充以及在陆上衰减和维持的重要机制。

过去由于探测技术和资料的限制, 台风登陆的上述科学问题研究很少。如今由于探测手段、计算机能力和模式分辨率的提高, 世界上对热带气旋登陆的研究已成为热点。

热带气旋大灾都是在其登陆前后造成的。台风 12 级以上强风可以翻江倒海, 拔树倒屋, 其灾尤如一场地震。台风暴雨之灾往往超过其强风造成的灾害。中国 3 次破历史记录的特大暴雨都是台风造成的<sup>[1]</sup>, 6312 号台风(Gloria) 在中国台湾省百新 24 h 雨量达 1248 mm; 6718 号台风(Carla) 在台湾新寮 24 h 雨量达 1672 mm; 7503 号台风(Nina) 在河南省林庄 24 h 雨量达 1062 mm, 为中国大陆特大暴雨之最。如此暴雨使水库崩溃, 江河泛滥, 泥石流爆发, 灾害惨重。登陆热带气旋更为严重的灾害是风暴潮造成的。1991 年

<sup>\*</sup> 初稿时间: 2004 年 8 月 26 日; 修改稿时间: 2004 年 9 月 20 日。

资助课题: 国家自然科学基金(40175019, 40333028), 国家科技部公益项目(2001DIA20026)。

4月29日一个热带气旋在孟加拉湾国沿岸的脆弱(Vulnerable)地带登陆,强大的风暴潮竟夺走了13.9万人的生命。如此严重的灾害使热带气旋登陆过程的研究更引起人们的关注。

一个台风的登陆,并不意味着对它监测的结束,而是一个新阶段的开始,预报员更要进行严密监视和预报。登陆以后的台风会因摩擦耗损而趋于衰亡,但有的登陆台风衰减以后的剩余低压(Remnant low)在一定条件下又会复苏,并又重新加强,造成比登陆时更为严重的灾害。有的登陆台风会发生变性(Extratropical transition)而加强,有的会重新入海而再次加强,有的会在地形作用下产生次生中心,有的则会在山脉辐合作用下产生强辐合区并在辐合区中接连生成中尺度强对流系统或连续生成龙卷风,这些都是登陆台风监测和研究的重点。另外,登陆台风在陆上的风雨分布和强度及其陆地路径都是台风登陆以后预报的难点。

## 2 外场科学试验

研究登陆台风手段之一是实施外场科学试验。用先进探测仪器从目标登陆台风(Target landfalling typhoon)中获取资料,进行理论研究,目的在于提高预报准确率。目前开展的热带气旋外场科学试验有以下几种<sup>[2]</sup>。

变性过程(ET process)往往是热带气旋与中纬度环流系统相互作用的产物,代号为TOST(THORPEX Observational System Test)的试验在大西洋进行,它将对热带气旋变性过程中热带和中纬度系统的相互作用进行试验。目标观测区将由数值模式预报美国和加拿大东海岸的敏感性区域来确定。试验在美国东部沿海进行。

海气耦合边界层交换试验(CBLAST)。该试验采用先进仪器装备对目标台风进行观测,收集足够资料,研究强风背景下海-气间的交换(Transfer)和传输,其目的是要提高飓风强度预报的准确率。这项试验由美国海军研究院主持,美国飓风研究所(HRD)、空军研究中心(AFRC)和国家环境卫星情报局(NESDIS)参与合作,2003年已对3个飓风Fabian(2003年9月2~4日),Isabel(2003年9月12~14日)和Juan作了试验。

澳大利亚正在实施代号为ATCCIP的热带气

旋海岸影响计划,其科学目标是对热带气旋海岸影响进行量化,研究在全球变暖背景下热带气旋在海岸地区灾害的潜在变化趋势并发展防灾措施和技术方法。ATCCIP由澳大利亚国际减灾十年(IDNDR)委员会创立,政府有关部门和大学,企事业单位参与合作。研究热带气旋领域很广,包括温室效应影响下热带气旋灾害气候演变趋势、防灾减灾、热带气旋风场模拟和边界层研究、热带气旋降雨和洪水特征、灾害监测系统和平台等。

台湾是中国频受台风袭击的地区之一,台湾科学家也实施了名为台湾附近地区台风下掷式探空监测(DOTSTAR)的外场试验,其目标是提高台风路径的预报准确率。该试验选中目标台风以后将飞机飞到42000度台风的周围邻近地区,释放机载探空仪,能测到温度、气压、湿度和风向风速,收集到资料以后就在飞机上进行加工处理,准确及时地传给地面的数值预报模式以提高模式预报的准确性。

我们也于近年实施了中国登陆台风外场科学试验(CLATEX)。该试验是中国登陆台风研究项目<sup>①</sup>(以下简称“登陆项目”)的一部分,其目标是了解登陆台风在强风背景下边界层的结构特征以及海岸地形对台风结构、强度和近海路径偏折的影响。试验基地设在频受台风袭击的广东省阳江市的海陵岛,配备了先进的探测仪器装备包括多普勒雷达、风廓线仪(Wind Profiler)、多普勒声雷达、超声风速温度计、光学雨量计、卫星探测、自动气象站(AWS)及加密的高空地面常规观测。试验对目标台风设立了选取标准、监视海域和加密观测计划(Intensive Observation Program)等。2002年的14号台风黄蜂(Vongfong)被确定为目标试验台风并对其作了加密观测试验。黄蜂登陆地点相距海陵岛100 km,观测到超过40 m/s的阵风。这是中国首次对一个登陆台风的边界层实施了外场观测试验,也是中国首次对一个登陆台风获取了边界层结构资料。另外,与此同时,另有一流动观测车追踪Vongfong直到其登陆地点吴川,进行了追踪探测。

目前科研工作采取的技术思路往往是:外场科学试验——资料加工处理和分析——理论研究——成果转化——提高预报准确率。因此,外场科学试验对理论研究和提高业务能力都具有重要意义。

① 中国登陆台风监测及预报技术研究(2001D1A20026)

### 3 登陆热带气旋的研究

#### 3.1 登陆热带气旋的变化

热带气旋在登陆前后会产生一系列令人注目的变化。一个热带气旋在登陆前,一般都趋于减弱,个别会突然加强发展,导致预防措施不及。例如 8807 号台风在东海仅为一个 5~6 级风的热带低压,登陆前移到浙江北部沿海,突然之间加强到 12 级台风登陆。另有一类台风在外海很强,移到近海竟突然消亡。有的台风在靠近陆地时,地形作用会使其结构发生巨变,产生岛屿诱生低压或地形辐合性的中尺度飚线或雷暴。登陆前结构变化还会导致近海台风的强度变化和路径转折,形成突变性复杂路径而使预报误差增大。

台风登陆时,在浅海区大陆架、台风低压强风和天体引潮力共同作用下产生风暴潮以及地形作用下加剧大风和暴雨。风暴潮预报目前已有较高准确率,而台风大风和暴雨的强度和分布很复杂,其预报技术有待于进一步研究和改进。

台风登陆以后的变化仍很复杂,登陆后的台风在山脉地形作用下会形成地形辐合区,生成中尺度次生中心和小涡,有的会在台风的一定部位产生雷

暴、飚线、龙卷等中小尺度强对流系统,带来强烈天气(Extreme events)。登陆台风有的触及陆地便迅速(6~12 h)衰亡,有的可在陆上维持 3~5 d 不消,并在陆上再次加强,带来特大暴雨和巨灾。台风在陆上的维持和衰亡机制不仅与环境条件有关,还和陆面过程有密切关系。不同的下垫面(山脉、森林、湖面、饱和湿土)对台风内部的能量耗散和补充有完全不同的作用。登陆台风的重新入海或变性往往是其再加强的一种过程。这方面的研究正受到进一步的重视。

#### 3.2 结构和强度变化

引起近海台风增强的重要原因是台风与沿海地区发展起来的云团或中尺度小涡(MSV)的合并,云团或 MSV 可视为一个正涡度的载体,合并过程也是涡度输入的过程,从而使台风加强。用一个简单的二维准地转正压模式

$$\frac{\partial \nabla^2 \Psi}{\partial t} + J(\Psi, \nabla^2 \Psi) = 0$$

$\Psi$  是地转流函数。进行数值试验的结果表明<sup>[3]</sup>,合并以后增强的程度与热带气旋的强度或涡量有关,高涡量带热带气旋与中尺度小涡合并后的加强(图 1a)比低涡量带热带气旋的加强(图 1b)更为显著。

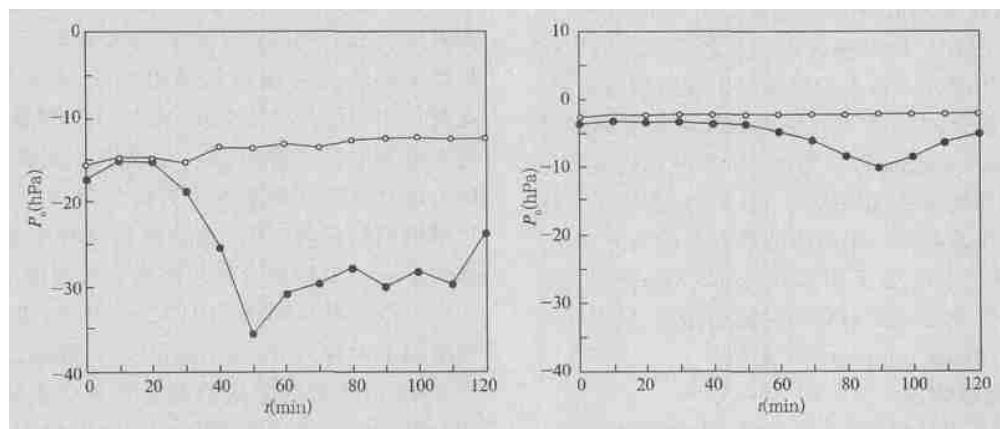


图 1 两类热带气旋与中尺度小涡(MSV)合并后的加强比较

(a. 高涡量带强热带气旋, b. 低涡量带热带气旋; ○: 无 MSV 合并, ●: 有 MSV 合并)

Fig. 1 Comparison of the central minimum pressure variation between two types of typhoon (a) typhoon with high vorticity zonal, (b) typhoon with low vorticity zonal (○: without MSV, ●: with MSV)

近海热带气旋随着趋近陆地,摩擦增加,将有减弱趋势,但有少数会在沿海加强。这与它获得新的潜热释放能量有关,也与水汽输送有密切关系。上

海台风研究所<sup>②</sup>对 6 个近海迅速加强的台风与 6 个近海减弱的台风进行合成资料分析。结果表明,这两类台风的主要差异是前者有较强的水汽输送通道

② “登陆项目”第二课题上海台风研究所分析结果。

与之联结,而后者不存在这样的水汽输送通道。用 MM5 对台风 Winnie(9711)进行数值试验,结果表明<sup>[4]</sup>,维持 Winnie 的水汽输送,其环流就能维持,如切断水汽输送,Winnie 在 24 h 后其环流就不再存在,可见水汽输送对一个热带气旋的维持起重要作用。

高空辐散和高层流出气流对近海热带气旋的加强也有重要作用。个例分析<sup>[5]</sup>指出,一个著名的近海加强台风 Bill(8807),其上空存在着很强的辐散场,与之有明显对比的减弱台风 Jelawat(0008),其上空不仅不存在强辐散场,并有辐合流场。另外,诊断分析结果还表明,垂直切变对台风强度也有明显影响。上述两个台风不仅高空辐散不同,垂直切变也有很大差异。台风 Bill(8807)上空的垂直切变很小,而台风 Jelawat(0008)的上空存在很强的垂直切变,使它不仅不能发展,而且趋于减弱。

海洋温度层结对近海热带气旋的强度变化也有重要影响。台风覆盖的洋面由于气压降低而引起深海上涌流。数值试验<sup>①</sup>结果表明,较强水温层结的海域将会使深海冷水涌升到海面,使热带气旋趋于衰亡。这种使热带气旋衰亡的原因往往在海平面上之上的大气层难以发现。

热带气旋登陆前后受海岸或山脉地形影响,其结构将发生改变。地形辐合往往在热带气旋的右前方生成一系列龙卷<sup>[6]</sup>或在台风前部生成飑线或雷暴。这类中小尺度强对流系统的生成往往会对台风的能量平衡(Energy budget)产生影响,加强台风强度。近年来对大西洋飓风的观测研究<sup>[7]</sup>显示,这类中小尺度对流系统不仅在其某一象限或前进方向的前方产生,还在螺旋雨带中产生了中尺度小涡(Mesoscale vortices)。这种结构变化将对热带气旋的强度、风雨分布和路径偏折(Track turning)产生影响。

### 3.3 近海路径偏折

当热带气旋趋近海岸,如在弱引导气流背景下,其移动可能会因地形或环流因子作用而发生偏折。图 2 给出了偏折的类型<sup>[8]</sup>。

第 1、3 类在近岸海域的路径转折或消亡都和冷空气南侵或冷的海面有关。第 1 类台风移向华南沿海与极锋遭遇,这时即使很强的台风也不会登陆,往往会突然减速并折向南移。待冷空气侵入后消失在近海海面。这种转折发生在冷空气可以入侵到华南的深秋或初冬季节。第 3 类台风路径虽无偏折,但在靠近海岸时突然衰亡,这和冷海面的作用或冷空

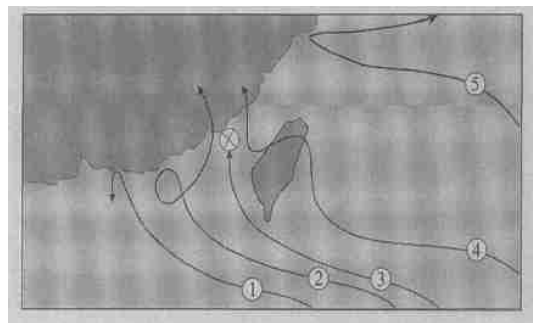


图 2 近海岸台风路径偏折的类型(⊙:消失)

Fig. 2 Tropical cyclone track turning when it approaching the coast(⊙:dissipation)。

气入侵有关。第 2 类路径与高空切断冷涡或其他涡旋系统相互作用有关。第 4 类是台风靠近中国台湾时,岛屿地形作用下有代表性的路径转折。台湾地形有使趋近其东海岸台风出现右偏趋势。当其向北移动地形影响减弱时恢复原来方向而形成路径转折,这一转折将使预报结论摆动而失去稳定正确性。第 5 类台风在近海出现尖锐转折,这和中纬度急流南移、台风前进方向均出现西风有关。近海台风路径的突然转折或台风消失均将导致预报失败。

### 3.4 风雨强度和分布

由于陆地山脉地形的强迫作用,登陆台风的降雨强度和分布与在海上时有较大差异。潮湿气流向岸地形辐合将会使台风暴雨增长,雨区范围扩大。这种作用将使华东登陆台风中心北侧雨量增强,并使大范围雨区主要出现在台风中心北侧,形成台风中心南北雨区和雨量的不对称分布。当台风具有倒 V 型倒槽结构时,将会显著增长这种南北不对称的暴雨分布。地形辐合作用同样会使登陆于华南的台风中心以东地区暴雨范围大、强度强,以西范围小、强度弱不对称分布。但也不尽然,数值试验<sup>[9]</sup>的结果表明,由于潜热通量的差异和来自大陆干空气和来自海洋湿空气垂直分布形成的不稳定结构,也会在台风路径左侧引起强降水。当这种不稳定层结作用超过地形作用时,路径左侧雨强将会超过右侧雨强。预报时应予以综合考虑。

台风暴雨的强度和分布还和台风结构有密切关系,登陆台风下垫面山脉地形辐合作用和台风环流内部的切变会在这些地区生成强烈对流运动和中小尺度涡旋系统,这种结构的生成将在相应地区产生强暴雨。

台风与中纬度环流系统的相互作用对台风降雨强度和分布将起重要作用。中纬度西风槽后的冷平

流与台风 V 型倒槽的相互作用将在倒槽区形成强烈对流不稳定层结, 这将显著加剧槽区的台风暴雨。登陆华东的台风往往伴有这种相互作用而引起台风倒槽区的暴雨。另一方面, 台风右侧来自海洋的低空潮湿东南气流也向中纬度槽前输送大量水汽。数值试验<sup>[10]</sup>的结果显示, 这种过程将显著增长中纬度槽前的暴雨。台风与中纬度环流系统的相互作用是一种很有趣的现象。当台风在南海趋近梅雨锋暴雨区时, 数值试验<sup>[11]</sup>的结果显示, 这一过程将会使暴雨中止。诊断分析表明, 这一华南沿海登陆台风将切断和夺取来自孟加拉湾和南海输向梅雨锋的水汽, 并“吸收”梅雨锋区的能量, 将西太平洋副热带高压西端脊线推向北移, 这是梅雨全线中止的主要原因。

登陆台风暴雨强度还和登陆台风在陆上的维持不消和停滞少动有关。停滞少动的台风其地形辐合线(区)也呈准静止状态。这一辐合区往往是对流性小涡生成的源。小涡不断地生成、移出, 随之产生的暴雨将积涝成灾。

登陆台风大风也与这种中小尺度对流系统的生成有关。登陆台风在地形和环流作用下生成的飊线、雷暴、龙卷和中尺度小涡、地形次生中心等都将在相应的局部地区产生强烈大风。冷锋与台风环流的相遇, 也会在台风北侧强梯度区形成强风。这类外围大风的风速往往超过台风中心风速。

登陆台风的风速分布还和大陆环流系统有关。当大陆存在大范围热低压时, 台风登陆前风速(东北风)有减弱趋势, 登陆后, 台风后部风速(西南风)很强。当大陆存在大范围高压时, 登陆台风前部风速(东北风)会突然增强。

目前对台风风雨监测和预报的手段有了很大提高, 卫星提供的亮温(TBB)资料在一定程度上可以反映出登陆热带气旋的雨强和雨区分布。TRMM 是第一个载有测雨雷达的卫星, 并装有可见光和红外扫描仪(VIRS)和 TRMM 的微波成像仪(TMI), 这能对台风雨暴有效监测。中国目前普遍布设的自动气象站(AWS)网和多普勒雷达对沿海或登陆台风的风场结构和暴雨强度分布均能提供详细资料。卫星遥感资料和数字化雷达回波对登陆台风暴雨雨强和分布(HRID)的监测起了重要作用。洋面上 QuikScat 高

分辨率资料对热带气旋风场结构给出了详细的描述, 提供了热带气旋结构和大风分布的重要信息。

中尺度模式 PSU/NCAR MM5 用于登陆台风暴雨预报有一定成效。尤其是将大量非常规资料包括像 QuikScat 这类遥感资料和雷达资料进行同化后形成的初值场或使用 Bogus 技术来构造台风涡旋将能明显提高模式的预报能力。

### 3.5 登陆热带气旋的边界层结构

登陆台风外场试验 CLATEX 计划对目标台风黄蜂(Vongfong0214)进行了边界层观测<sup>②</sup>。这是中国首次对一个登陆热带气旋的边界层进行了外场实时观测。观测点海陵岛位于登陆点吴川以东 100 余 KM, 接近台风中心。观测的结果表明<sup>[12]</sup>, 当黄蜂靠近陆地时, 海陵岛上空垂直运动猛烈增长。风廓线仪的探测显示, 在登陆前数小时, 其垂直运动高达 2.0 m/s, 登陆之后逐渐减弱。水平风矢呈不对称分布, 大范围强风出现在台风环流右侧的偏南风区, 并在边界层存在一支急流。登陆热带气旋中心东侧南风与地形之间形成强的地形辐合。最大阵风出现在登陆前数小时, 铁塔 10 m 处超过 40 m/s, 明显超过 4 和 2 m 处的风速。台风登陆后其风速很快减弱到 18 m/s 之下。登陆前 1 h 雨强达到 100 mm/h, 但在登陆后雨强迅速减小。登陆前 Vongfong 的右侧出现了较强的中尺度对流活动。风廓线仪的探测显示, 台风登陆前其信噪比(SNR)的高值区高度竟达 5 km 以上, 但在其登陆后数小时即回落到 1.0~1.5 km。表明其湍流活动和边界层高度登陆前和登陆时有明显升高, 登陆后不久即回落到正常高度。在 Vongfong 个例中, “登陆研究”项目第 5 课题的分析表明, 观测点(海陵岛)在强风背景下, 风速 3 个分量  $u$ ,  $v$ ,  $w$  的湍谱仍能满足各向同性湍流 2/3 理论。超声风速仪(Ultra sonic anemometer)的结果显示, Vongfong 登陆前显热通量很弱, 倒是有较强的潜热通量。Vongfong 在登陆之前出现过短时的加强<sup>[13]</sup>, <sup>③</sup>, 这一增强可能和登陆前加大的潜热通量有关。登陆前有一股冷空气扩散到台风所在地区形成不稳定层结, 以及台风中心东侧的地形辐合作用均有利于垂直运动和潜热通量的输送。这也可能是近海台风加强的一种机制。

目前对登陆台风边界层的结构有一定认识, 对

② 陈联寿. 国内外登陆热带气旋研究的进展. 见: 中国气象学会第 25 届天气与极地气象学委员会、台风委员会编. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集. 中国浙江岱山, 2004 年 4 月 10~14 日, 上海: 上海台风研究所, 2004.

飓风的了解远多于台风。一些分析<sup>[14]</sup>表明,热带气旋边界层急流几乎是普遍存在的。用风廓线仪和 RASS 系统对 2000 年 5 个靠近上海台风的风温结构探测分析<sup>[15]</sup>表明,这些台风也和飓风一样,低层普遍存在一支急流,热带气旋前部明显,后部不明显,急流中心的高度在不同热带气旋中不同,但分析认为与气旋强度的关系不大。离热带气旋中心远处,急流高度降低,强度减弱。热带气旋流入层分布不对称,前进方向左侧较低而右侧较高,要高出一倍多。在热带气旋环流影响期间,其中心的靠近(如有暴雨空隙)将局地出现异常增暖。

美国近年来开展了代号为 CBLAST 的飓风外场科学试验,从而使得人们对飓风边界层的结构和物理过程比台风有更多的了解。中国还应当多开展一定的台风外场试验,这对进一步了解台风边界层的结构特征、强度变化、陆上维持机理、台风暴雨强度和分布以及地形影响均十分必要。

### 3.6 陆上维持机制

台风登陆后最终将因海面水汽和潜热通量被切断、能量被摩擦耗散而最终消亡。但有的登陆台风剩余低压重返海洋又重新发展起来,而有的虽在陆上,但它又获得新的能量而在陆上久留不消,再度加强,甚至酿成巨灾。因此一个台风登陆以后,对其在陆上能维持多久,能否再次加强,引发特大暴雨,导致巨灾,这便是人们所关注的问题。一个登陆以后的热带气旋在陆面摩擦耗损下得以久留不消的能源主要有两种,一是潜热(Latent heat)释放,一是斜压位能(Baroclinic potential energy)释放。此外,动量和涡度收支对其维持也有一定作用。

潜热的能源是水汽。登陆热带气旋如与水汽输送通道的低空急流联结,并有垂直对流运动发展,登陆热带气旋就能以此获得潜热而在陆上维持。用登陆后长久维持(LTC > 60 h)和迅速消亡(STC < 24 h)两组台风合成资料(每组 7 个登陆台风)来进行诊断分析<sup>[16]</sup>,其结果显示(图 3),LTC 这组有高通量水汽输入,并有低空急流与之联结。而 STC 仅有低

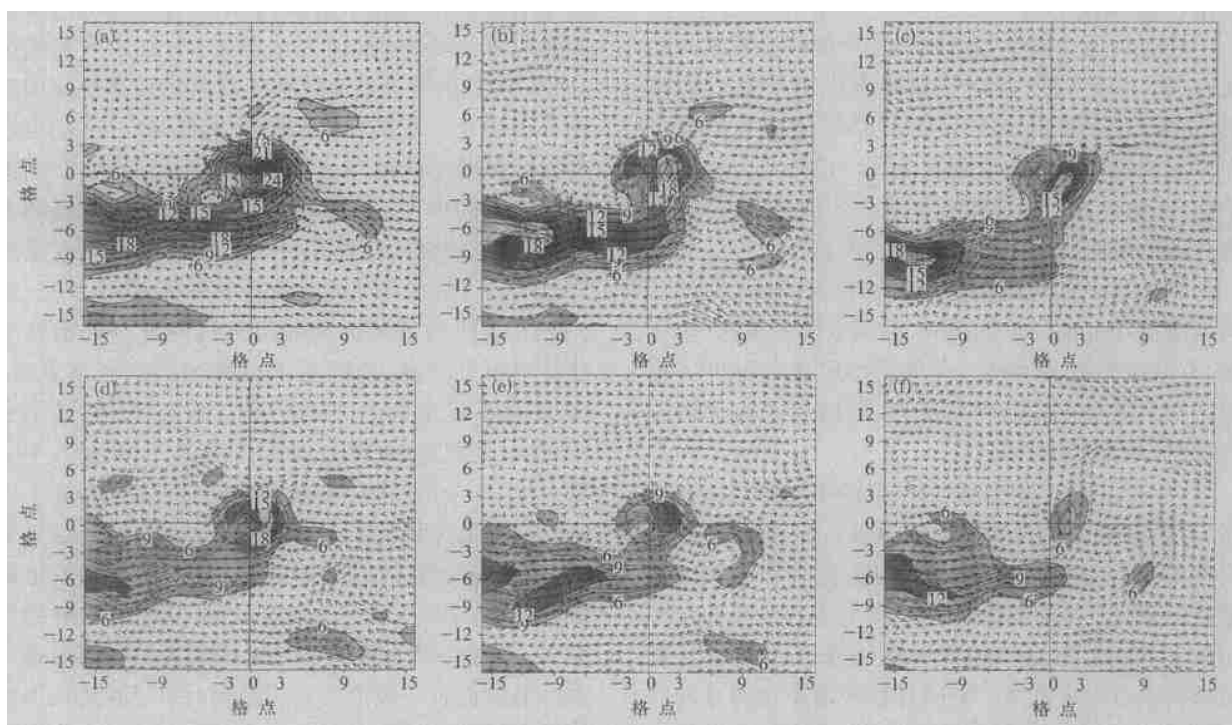


图 3 长久维持(LTC, a~c)和迅速消亡(STC, d~f)两组登陆台风的 850 hPa 合成风矢场及水汽通量场

(a, d 为登陆时; b, e 为登陆 24 h; c, f 为登陆 48 h。阴影为水汽通量  $\geq 6 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$  区域)

Fig. 3 LTC(a~c) and STC(d~f) composite data on 850 hPa wind vector and moisture flux field (isolines, only  $\geq 6 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$ ) on landfall, 24 and 48 h after landfall respectively

③ 阎敬华、丁伟钰、陈子通. 登陆热带气旋“黄蜂”(0214) 近海加强机理的模拟研究. 见: 中国气象学会第 25 届天气与极地气象学委员会、台风委员会编. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集. 中国浙江岱山, 2004 年 4 月 10~14 日, 上海: 上海台风研究所, 2004.

通量水汽输入, 并与低空急流脱开。可见水汽对登陆热带气旋的维持有重要作用。

中尺度或天气尺度云团(Cloud cluster)并入一个近海或登陆的热带气旋, 这种合并过程也是热带气旋获得水汽和潜热的方式, 这将会使热带气旋强度增强或寿命延长。

饱和湿土和内陆江面湖面水库等大型水体都是登陆热带气旋的潜热能源。登陆热带气旋在经过内陆水面时将会获得潜热而加强, 在弱环境引导气流背景下, 移速会减慢或停滞并会引起更大的降雨。登陆热带气旋的剩余低压在湿土或水面上的加强在中国和美国大陆都有出现。这种加强和登陆热带气旋边界层与饱和湿土或水面之间的热量(感热和潜热)和水汽交换有十分密切的关系。饱和湿土、水面与大气边界层之间的多种交换过程不仅会延长登陆热带气旋寿命, 而且会产生更强的暴雨。

2001 年 6 月在美国南部登陆的热带风暴 Allison 在陆上长久维持不消, 低压环流完整, 并在后期又有加强。暴雨引起洪水泛滥, 这一灾害性天气过程就和这种湿土效应有关<sup>[17]</sup>。用 GFDL 飓风模式研究陆面水体对登陆飓风的影响, 结果<sup>[18]</sup>表明, 登陆飓风会很快衰亡, 但遇到水面时, 其衰减率(Decaying rate)便会减慢。模拟的结果表明, 衰减率与下垫面积水的深度有密切关系, 越深衰减越缓慢, 越浅或越干衰减就越快。0.5 m 的积水就能明显延缓衰减。

Nina 台风(7503)登陆中国福建后移到河南滞留不消, 并再度加强, 也与饱和湿土效应有关。Nina 在 8 月 5~7 日停滞少动的 3 d 内连下大暴雨, 下层大气湿度已饱和, 土壤浅层也为饱和或近饱和状态。用 PSU/NCAR MM5V3 对 Nina 积分 60 h 的结果<sup>[19]</sup>显示(图 4), 积分 24 h 后, Nina 即出现加强。剔除潜热通量的敏感性试验结果显示, Nina 在积分的 60 h 内迅速衰亡。不同性质陆地下垫面对登陆热带气旋的维持或衰减率有十分明显的影响。

斜压能量使登陆热带气旋剩余低压在陆上维持不消的另一种能量。斜压能量是在热带气旋与中纬度环流系统相互作用过程中获得的, 这种相互作用常引起热带气旋的变性过程(ET process), 其特点是热带气旋或其剩余低压呈现出西冷东暖这种半冷半暖的温度结构, 并与热带气旋等压线交割, 形成力管场(Solenoid field)。变性过程中由于冷空气侵入并下沉, 从而使斜压位能释放转化为动能, 这两种作用均使气旋的环流加剧。大气适应过程使气旋中心最

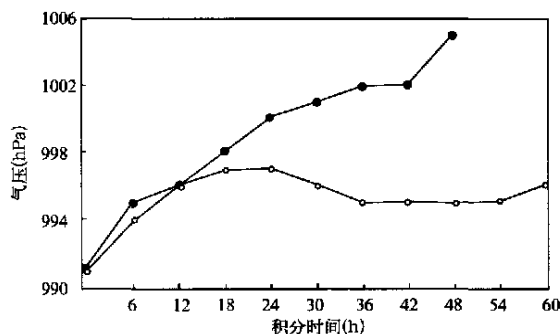


图 4 数值试验中台风 Nina 中心最低气压的变化 (○: 控制试验, ●: 无潜热通量的敏感性试验)

Fig. 4 The variation of MSP in the period of 60 hour integral of the landfalling typhoon Nina (○: Control experiment, ●: without latent heat flux sensitive experiment)

低气压下降从而使这个剩余低压再度加强发展。变性过程不仅使气旋加强, 并将相应地产生大暴雨或雷雨天等灾害性天气(High impact weather)。另一方面, 在热带气旋与中纬度环流系统相互作用过程中如引发了较强冷空气的侵入, 就会加速这个热带气旋的填塞和消亡。

另有一些条件也会延迟登陆热带气旋消亡, 对其维持有利。当登陆热带气旋或其剩余低压移至高空强辐散区之下, 或与高层强流出气流相联结, 这就有可能激发(Triple)这个剩余低压重新启动和运作起来。另外, 当登陆热带气旋与中尺度涡旋(MSV)或热带云团合并, 或在一定山脉地形和下垫面条件作用下也会在其内部生成中尺度强对流系统, 这样都会使其获得涡度和动量, 延长其在陆面上维持的时间。

## 4 结 论

热带气旋登陆过程的研究是热带气旋研究中开辟的一个新领域。涉及到海陆气之间的相互作用, 不同尺度环流系统之间的相互作用和不同纬度环流系统之间的相互作用。这项研究能得以实施与观测手段的发展、资料处理能力、模式性能和计算机能力的提高有关。

实施近海和登陆台风外场科学试验来研究登陆台风, 这就开辟了一条新的研究途径。即采用外场实验技术, 获取加密高分辨非常规资料, 来揭示热带气旋活动的机理, 这比使用低分辨非常规资料进行传统的台风研究有了新的发展。

登陆台风研究取得了一些新的认识和进展:



(1) 对登陆台风的边界层结构有了初步认识, 台风边界层存在一支低空急流, 急流与地形的辐合区会产生活跃的中尺度强对流活动。登陆前边界层有较强的垂直运动, 达到  $2 \text{ m/s}$ 。台风登陆过程边界层有显著抬高。在强风背景下, 风速三个分量  $u$ 、 $v$ 、 $w$  的湍谱仍能满足各向同性  $2/3$  理论。

(2) 潜热释放、输送和斜压位能释放是近海或登陆热带气旋加强和维持的两类主要能源。诊断分析和数值试验的结果均表明, 水汽输送是近海台风加强和登陆台风维持的重要条件。同样还表明, 中低纬度相互作用引起的变性过程也对风暴的加强和维持有利。

(3) 内陆大范围水面和饱和湿土的潜热通量输送对登陆热带气旋在陆地维持有利。GFDL 的飓风模式试验结果表明, 登陆台风的衰减率和陆地水体的深度有关。0.5 m 深的水面对减缓登陆台风衰减

就有显著作用。

(4) 近海或登陆台风与中尺度涡旋(MSV) 的合并将会使台风加强。具有高涡量带的台风合并以后的加深将比低涡量带台风更为猛烈。台风与大尺度热带云团的合并也会使其加强。

(5) 强的高空辐散场和流出气流以及小的风速垂直切变也对近海台风加强有利。但较强的海温层结或强的极锋将可能使台风填塞。

(6) 岛屿地形、极锋、高空切断冷涡, 中纬度急流和热带低值系统与近海台风的遭遇, 往往使台风路径发生转折。

(7) 近海或登陆台风与地形、西风带槽和梅雨锋的相互作用将对暴雨强度、分布产生重要影响。

登陆热带气旋的研究还有很多空白和未知领域, 尚有待于进一步实验和研究去加深了解。

## 参考文献

- 1 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
- 2 Chen Lianshou. Tropical cyclone research activities with TMRP. Report to the sixth session of WWRP science steering committee. Oslo, Norway
- 3 Chen Lianshou and Luo Zhexian. Interaction of typhoon and mesoscale vortex. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(4): 515~ 528
- 4 曾静. 登陆台风衰减的数值模拟研究: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2000
- 5 余晖, 费亮, 端义宏. 8807 和 0008 登陆前的大尺度环境特征与强度变化. *气象学报*, 2002, 60(增刊): 78~ 87
- 6 沈树勤. 台风前部的龙卷. 见: 台风项目组编. 热带气旋科学讨论会文集. 北京: 气象出版社, 1990. 109~ 111
- 7 Peter D Dodge, Spratt S M, Marks F D, et al. Dual-doppler analysis of mesovortices in a hurricane rain band. 24th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology. 29 May- 2 June, Fort Lauderdale. Amer Meteor Soc, 2000. 302~ 303
- 8 Chen Lianshou. The research activities of landfalling tropical cyclones. In Second Regional Technical Conference on Tropical Cyclones, Storm Surges and Floods, Brisbane, Australia, 1- 3 Jul, 2004. 17~ 18
- 9 梁旭东, 端义宏, 陈仲良. 登陆台风对流和非对称结构. *气象学报*, 2002, 60(增刊): 26~ 35
- 10 朱宏岩. 台风与中纬度相互作用形成槽前大暴雨的数值研究. *大气科学*, 2000, 24(5): 669~ 675
- 11 Cheng Zhaohui, Kang Di, Chen Lianshou et al. Interaction between tropical cyclone and Meiyu front, *Acta Meteor Sinica*, 1998, 13(1): 35~ 46
- 12 Chen Lianshou, Zhou Mingyu, Xu Xiangde. A tropical cyclone landfall research program (CLATEX) in China. 26th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, 3~ 7 May 2004, Miami, Florida, Amer Meteor Soc, 2004. 485~ 486
- 13 梁建茵, 陈子通, 万齐林等. 热带气旋“黄蜂”登陆过程诊断分析. *热带气象学报*, 2003, 19(增刊): 45~ 55
- 14 Peter G Black, Shay L K. Air sea interaction processes relevant to tropical cyclone intensity change. Preprints, Symp. On Tropical Cyclone Intensity Change, Phoenix, AZ, Amer Meteor Soc, 1998. 161~ 168
- 15 漆梁波, 余晖. 利用风廓线仪及 RASS 系统对热带气旋边界层风温结构的初步分析. *气象学报*, 2002, 60(增刊): 127~ 135
- 16 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持的迅速消亡的大尺度环流特征. *气象学报*, 2004, 62(2): 167~ 179
- 17 Kwan- Yin Kong. Anomalous intensification of the remnants of tropical storm Allison over land. 25th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Diego CA, Amer Meteor Soc, 2002. 9~ 10
- 18 Shen W, Ginis I. A numerical investigation of land surface water on landfalling hurricane. *J Atmos Sci*, 2002. 789~ 802
- 19 李英, 陈联寿. 湿地边界层通量对登陆台风维持机制影响的数值试验. 见: 中国气象学会与台风委员会编. 新世纪气象科技创新与大气科学发展(5). 北京: 气象出版社, 2003. 313pp



# RESEARCH ADVANCES ON TROPICAL CYCLONE LANDFALL PROCESS

Chen Lianshou

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

Luo Zhexian

(*Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*)

Li Ying

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

## Abstract

Most prominent structure change of a tropical cyclone in its life span would appear in the period of its landfall process. Topographic forcing plays an important role for the tropical cyclone structure change when it's making landfall. Apart from the topographic forcing, structure change of a landfalling tropical cyclone also can arise from the interaction between the cyclone itself and some peripheral mesoscale vortices or a mid-latitude westerly trough. The structure change of a tropical cyclone often give rise to its intensity change, track turning and rainfall enhancement etc. On the other hand, the occurrence of most severe damages is due to those high impact weather such as high winds, heavy rainfall and strong storm surges associated with the landfalling tropical cyclones. Research community around the world attach more importance to the area of tropical cyclone landfall process in last ten years.

Several scientific field experiments related to those tropical cyclones in the coastal water or over land are being implemented in the different region of the world. The title and its acronyms are as follows: TOST (THORPEX Observational System Test) in the eastern coast of U S, CBLAST (Coupled Boundary Layer Air Sea Transfer) – U S, ATCCIP (Australia Tropical Cyclone Coastal Impacts Program), DOTSTAR (Dropsonde Observation for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region), CLATEX (China Landfalling Typhoon Experiment). One of the common scientific objectives of those field experiments is to improve the tropical cyclone forecasting accuracy.

Research programs are being carried out on the tropical cyclone landfall process. Some observational studies indicated that some tornadoes spawned in the right front quadrant of the typhoon after its landfall. Others find some mesovortices generated in the rainband of a tropical cyclone. Those structure changes would affect the behavior of the tropical cyclone including its high winds and rainfall intensity and distribution. Numerical simulation indicates that the moisture transportation is a favorable condition for the intensification of a tropical cyclone in the region of coastal water. Moisture transportation and latent heat transfer from the inland water surface or saturated wet ground are also favorable to landfalling tropical cyclone sustaining over land. Upper level strong divergence field or out-flow channel and small vertical shear or merger with some peripheral meso vortices (MSV) would be helpful to tropical cyclone intensifying in the off shore water or sustaining over land. Those processes provide latent heat energy to tropical cyclone which are also helpful to increase heavy rainfall of a landfalling typhoon. On the other hand, strong cold wave and oceanic stratification would be helpful to fill up or decay the typhoon.

Extratropical transition process is another channel for storm to gain the new energy – baroclinic potential energy from the mid-latitude which is the result of the interaction between the tropical cyclone and the mid-latitude systems. ET process will convert the baroclinic potential energy into the kinetic energy to strengthen the circulation of the remnant low of the landfalling typhoon.

**Key words:** Landfalling tropical cyclone, Field scientific experiment, Research advances.