

热带气旋强度变化研究进展^{*}

端义宏 余 晖

(南京大学大气科学系, 南京, 210008; 上海台风研究所, 上海, 200030)

伍荣生

(南京大学大气科学系, 南京, 210008)

摘 要

自 20 世纪 90 年代后期以来, 热带气旋强度变化研究越来越受到人们的重视, 随着研究的不断深入, 热带气旋强度变化研究取得了可喜的进展, 文中总结近年来热带气旋强度变化的主要研究成果, 主要包括 (1) 热带气旋的发生、发展和最大可能强度的研究; (2) 行星涡度梯度、环境均匀流、环境流场垂直切变以及热带气旋外流与环境流的相互作用对热带气旋强度的影响及物理机制; (3) 热带气旋结构与强度的变化关系, 着重总结环境流场导致的非对称结构变化而引起的气旋强度变化以及对涡旋倾斜发展理论验证, 分析了涡旋 Rossby 波的最新研究; (4) 海洋热状况变化以及海洋飞沫对热带气旋强度的影响研究成果。分析指出, 今后进一步开展用现代化卫星探测资料研究热带气旋强度变化外, 还应加强热带气旋外流与环境流场的相互作用, 海-气交界面的参数化问题, 热带气旋结构变化与 TC 强度变化关系以及这种关系的物理本质的研究, 通过深入研究, 认识热带气旋强度变化的物理机制, 提高热带气旋强度变化的预报能力。

关键词: 热带气旋, 强度变化, 研究进展。

1 引 言

近 10 a 来, 热带气旋 (以下简称 TC) 路径机理研究和预报技术取得了一定的进展, 特别是国家“八五”重点科技攻关项目“台风暴雨灾害性天气监测、预报技术研究”实施后, TC 路径的客观预报水平有了明显的提高。但相对于 TC 路径而言, 有关 TC 强度的研究和预报技术的发展明显滞后^[1]。尽管国家“八五”重点科技攻关项目中, 将 TC 强度突变理论作为一个专题来研究, 在台风强度突变的气候分析^[2,3]、下垫面特征对 TC 突变的影响^[4~7]以及 TC 的变性^[8]等方面得到了初步的成果。但由于受当时观测资料和计算机条件的限制, 加上 TC 强度变化本身的复杂性, 因而研究未能进一步深入。而其强度预报的业务方面也局限于经验和统计方法, 预报技巧评分低。随着中国沿海经济的发展, 由 TC 造成的灾害损失越来越大, 即使 TC 路径预报较正确,

但由于对其强度变化估计不足, 损失也难以减轻。因而准确的 TC 强度预报, 对做好预防措施, 减轻 TC 造成的灾害损失是必不可少的。

影响 TC 强度变化的因子大致可以分为 3 类: 即 TC 本身的内部结构变化 (如: TC 的眼壁特征、对流的非对称分布等), 二是环境气流 (如水平、垂直切变) 与台风环流的相互作用, 三是下垫面 (如海洋、地形) 与台风环流的相互作用。对于一个实际的 TC 强度变化, 其各影响因子的相对重要性是不确定的, 其强度变化可能是多个因子影响的综合结果。但一般说来, 当一个成熟的 TC 趋向登陆或是近海北上时, 它受下垫面的改变和环境场的影响就显得尤为重要。特别是在 TC 运动过程中, 环境场与 TC 的相互作用将影响它的路径和强度, 从现有的不太成熟的研究成果看, 这种环境场与 TC 相互作用对其强度的影响基本上归结为环境垂直切变对强度的影响。

本文将就 TC 强度变化若干研究进展进行分

^{*} 初稿时间: 2005 年 8 月 8 日; 修改稿时间: 2005 年 8 月 18 日。

资助课题: 国家自然科学基金 (49975014, 40275018, 40333075)。

作者简介: 端义宏, 男, 1963 年生, 江苏人, 博士, 研究员。主要从事台风研究, E-mail: duangyh@mail.typhoon.gov.cn。

析,最后提出 TC 强度变化研究中的若干问题。

2 TC 发生及最大可能强度

Charney 等^[9]提出热带扰动可以通过大尺度环境场和积云对流加热过程之间正反馈而自由发展。Ooyama^[10]后来称其为第二类条件不稳定机制(CISK)。尽管这个理论原来是用来解释台风的形成,但后来认为也是台风发展的一种物理机制。

Emanuel^[11]提出了热带气旋发展的另外一个理论,认为热带气旋的发展和维持是完全由来自海表面的湿熵异常而不需要有事先存在的可对流能量(CAPE)的释放。这种机制称作为“风引起表面热量交换”(wind-induced surface heat exchange),它不同于 CISK 机制,不需要有效位能的释放。

热带气旋强度变化的另一个令人可以接受的解释是涡旋 Rossby 波理论^[12,13],认为正位涡(PV)异常的获取能导致涡旋中心附近的总位涡增加,从而导致涡旋的增强。

以上 3 种机制均能使一个初始涡旋持续发展,在一定的海温和大气的热力环境下,热带气旋的强度有一个上限,即它的最大可能强度(MPI)^[14,15]。Demaria 等^[16]曾经指出,一个热带气旋的最大可能强度的估算对了解热带气旋强度的发展估计是非常有用的。然而,在实际情况中,只有很小部分的热带云团能发展到 MPI,而大多数的热带气旋不能加强到 MPI。换句话说,肯定存在一些外部的因素抑制了热带气旋的发展和加强。

3 环境气流对 TC 强度变化的影响

3.1 均匀流与行星涡度梯度的作用

数值研究结果表明,由环境流场与 TC 环流迭加或是 β -效应引起的 TC 周围的非对称流场也是热带气旋强度减弱的一个原因^[17]。而 Duan Yihong 等^[18]研究表明,行星涡度梯度和均匀流导致热带气旋强度变化的主要原因则是,由于水平均匀流和行星涡度梯度造成的非均匀性,使得积云对流加热不能集中在热带气旋暖心附近而是向外围扩展,因而使得热带气旋强度的减弱。

3.2 环境流场垂直切变的作用

大量的观测研究^[19~22]表明,环境垂直切变对 TC 强度的影响具有抑制作用,即垂直切变能阻止 TC 在环境切变气流中发生和发展。

在垂直切变场中,TC 的强度将减弱^[23,24],但也

有一些数值模拟结果表明^[25],在一定的垂直切变场中,如东风切变将有利于 TC 的产生和发展,这主要是因为当 TC 以整层平均速度移动时,低层的辐合和高层的暖核仍然保持同位相,因此有利于 TC 发展。Holland 等^[26]的数值研究则表明,垂直切变会使 TC 增强的速率减缓,但它并不影响 TC 达到它的最大可能强度。可见,观测研究与数值模拟结果并不一致,而同样是数值模拟其结果也不一样。由此可见,垂直切变对于 TC 强度变化的影响,并不是简单的阻止或有利于 TC 强度的发展,而且以上的研究忽视了它在 TC 发生、发展以及消亡的各个阶段的不同作用,这些问题有待于进一步的认识。

至于垂直切变对 TC 强度影响的物理机制,经不同的研究方案提出了某些不同的见解,例如基于观测结果给出的“通风流”(Ventilation)^[18]效应,即由于垂直切变,使上层释放潜热能量从 TC 中平流出去,因而导致 TC 强度减弱。基于数值模拟和数值试验结果提出了“二级环流效应”(Second circulation effect)^[24,25],认为非对称的相对流入和流出气流的发展,将影响对流加热的垂直分布从而影响 TC 的强度。另外基于一个简单二层模式的理论分析,提出了“倾斜和稳定性”(Tilting and stabilization)^[27]作用,即当有垂直切变时,导致位涡的倾斜,因此中层的温度扰动增加来响应位涡的倾斜以维持静力平衡,中层的增温增加了垂直稳定度从而使对流活动减弱,TC 不能发展。还有的学者^[28]从动力学角度提出了 Rossby 渗透(Penetration)理论,认为当有垂直切变时,上下层涡旋的速率依赖于 Rossby 渗透深度参数,而这与涡旋本身的强度、所处的纬度以及涡旋的大小有关系。

3.4 TC 外流与环境场的相互作用

在众多影响 TC 强度变化的环境因子中,TC 外流与对流层上部环境气流之间的相互作用也是颇受关注的一个^[29,30]。TC 外流层相对较浅,一般在 100 到 300 hPa,外流型的变化是预报员预报 TC 发展、增强以及变性的的重要依据^[31]。Holland 等^[32]1984 年曾指出,由于外流区惯性稳定度低,TC 内核与环境流场直接的相互作用最有可能发生在外流层,亦即 TC 外流与对流层上部环境气流之间的相互作用能够直接影响其强度变化。在中国近海活动的 TC,有时会突然加强(如 8807 号台风 Bill),有时会在转向进入中高纬度后维持不消(如 0012 号台风 Prapiroon),给中国沿海地区带来巨灾。余晖等^[33]

应用大尺度再分析资料对 8807 号台风登陆前的突然增强过程进行了研究,发现高空冷涡的存在是导致 8807 突然增强的一个重要环境因素。而对 0012 号台风转向后维持阶段的大尺度分析表明,西风急流增强了高空辐散和质量输送,对该 TC 的维持十分有利。可见,对流层上部环境流场与 TC 外流之间的相互作用在中国近海 TC 强度突变过程中可能起着重要的作用。

迄今为止,已有许多观测和理论研究将 TC 强度变化与对流层上部槽、脊的强度和位置联系在一起。但是,二者之间的关系并不是简单、直接的,有关的理论解释也不只一种。例如,角动量输送理论认为,在某些情况下高空槽的存在之所以能够促进 TC 发展,是因为外流层结构非对称导致涡动角动量通量辐合^[34,35]。Shi 等^[36]和 Hanley 等^[37]则提出了高空槽有利于 TC 发展的另一种可能情况:当暖的外流和冷槽靠近,温度梯度的增大使高空急流增强,如果 TC 中心恰好位于该急流入口区的右侧,在高空外流增强的同时,与该急流有关的次级环流还将有利于上升运动的发展,从而有利于 TC 增强。Molinari 等^[38]认为有一些 TC 的迅速发展要归因于从高空槽分裂出来的、与 TC 尺度相当的正位涡扰动和 TC 的叠加。陈联寿等^[39]认为,槽区的涡度下传、槽前高压对低层上升运动的激发等都会改变 TC 的结构,并使其强度发生变化。因此,基于这种现状,Ritchie^[40]在世界气象组织第五届热带气旋国际研讨会(IWTC-V)上指出,高空槽如何影响和在何种程度上影响 TC 强度变化的机制仍然不明,在进行强度预报时要判断高空槽对 TC 发展是否有利还很难,二者之间的相互作用伴随着相当复杂的动力和热力学过程。这些过程如何影响 TC 核心区物理过程从而影响 TC 强度变化仍有待进一步的研究。

4 TC 结构对其强度变化的影响

几乎每个 TC 的结构都存在非对称,这种非对称结构可能是热力因素造成的(如海表面温度、湿度的分布不均匀),也可以是动力因素造成的(如气流的水平或垂直切变,或是非对称的复合场),由于这些作用往往在 TC 中出现,因此,研究这些因素如何对 TC 强度变化产生作用是非常重要的。特别是这种非对称结构在何种情况下导致 TC 增强,又在何种情况下导致 TC 强度维持或减弱,所有这些都受到人们的重视。

4.1 对称模式中热带气旋发展

对流对称分布与 TC 强度方面,夏有龙等^[41]和郑祖光等^[42]指出非绝热加热是影响台风强度突变的重要因子。孙子平等^[43]的研究表明积云动量垂直混合是主要的动力强迫因子,在台风发展过程中可促进大尺度低空辐合。陈华^[44]用轴对称的平衡模式对 TC 发展过程中积云动量垂直混合作用进行了模拟研究,结果表明引入积云动量垂直混合作用之后,TC 的发展更为迅速。这些研究只是用对称模型讨论热带气旋的发生发展,而并没有涉及到结构对强度变化的影响。

4.2 与环境作用导致的非对称影响

从影响 TC 强度变化的外部因素看,一个重要的外部机制就是角动量的输送理论。自 Pfeffer^[45]工作后,许多研究人员^[34]发现低层的角动量输入和上层角动量的向外输出是 TC 增强的不可缺少的条件之一。最近,Titley 等^[46]发现中层的角动量输入与超级台风(Flo)的迅速减弱有密切的关系。这些是从动力学角度分析强度变化。

由环境流场与 TC 环流迭加或是 β -效应引起的 TC 周围的非对称流场也是 TC 强度减弱的一个原因^[21]。Wang 等^[47]用一个包含完全物理过程的模式,模拟了一个初始涡旋在 f -平面和均匀东风流中的发展,其数值试验的结果与 Peng 等^[21]类似,解释是由于螺旋云带的向外传播和对流过早消失造成热带气旋强度减弱,但是他的结果只是根据模拟的雷达回波定性判断得到,而缺乏更多物理量的定量诊断分析。不仅如此,Chow^[48]用一个简单的浅水模式,进行的数值试验结果也表明,螺旋云带以及它们的传播都将导致 TC 强度的变化,但是,这两个研究的物理机制却是完全不同的。端义宏等^[22]研究表明,行星涡度梯度和均匀流导致 TC 强度变化的主要原因是,由于水平均匀流和行星涡度梯度造成 TC 的非对称结构,使得积云对流加热不能集中在 TC 暖心附近而是向外围扩展,因而使得 TC 强度的减弱。虽然强度变化的结果与 Peng 等^[21]及 Wang 等^[47]相同。而与他们不同的是,这里的解释是从 TC 的上层,暖心的温度变化开始。究竟是什么物理过程在起作用还有待于进一步的研究。

在对流非对称分布对 TC 强度变化影响研究方面还存在两种不同的观点。其一是姚祖庆等^[49]认为,9417 号 TC(FRED)的对称结构有利于强度的维持,而 9414 号 TC(DOUG)在靠近华东沿海北上过

程中,其外围和内环云系结构由对称型向非对称型转变,使其强度发生两次迅速减弱。但是,陈联寿等^[50]指出弱冷空气入侵、台风内部中小尺度强对流运动的发展、地形的作用等均会有利于 TC 的增强,这些因素造成的强对流发展一般都应是不对称的。林元弼等^[6]发现内环境中部分地区的降水或潜热释放导致风速突然加大,是台风突然加强的重要及必要条件。

4.3 倾斜位涡发展理论的应用

Wu 和 Liu^[29]根据位涡守恒和湿位涡守恒原理,提出了倾斜涡度发展理论,指出垂直涡度的变化受静力稳定度、垂直切变以及湿斜压影响。因此静力对流稳定度的减少、垂直切变的增加或湿斜压的增加均可导致垂直涡度的发展。它不同于一般的涡度发展理论,这时的垂直涡度发展可以伴随水平涡度或湿斜压性共同发展。因此,倾斜涡度发展理论兼顾了涡旋的动力和热力过程。应用该理论,余晖等^[30]利用 Wu 等^[29]得出的非静力的中尺度模式(MM5)对 Andrew(1992)爆发性发展和登陆佛罗里达的过程(8月21日1200 UTC到24日1200 UTC)的数值模拟结果,分析了 TC 内部相当位温结构的演变与其强度突变的可能关系,结果表明,由于 TC 眼壁附近等相当位温面陡立,湿斜压性变化所激发的倾斜涡度发展是引起该区域垂直涡度突然增大或突然减小的主要原因。当 TC 中心附近大部分区域的垂直涡度显著增长时,TC 就会在整体上体现为爆发性或迅速发展。在 TC 强度突变过程中,确实存在倾斜涡度发展(SVD)过程。陆汉城等^[51,52]诊断分析了 Andrew 飓风眼壁处的中尺度特征,指出飓风眼区的强倾斜上升气流与外围的螺旋性雨带具有不同的发展机制,并进一步指出飓风眼壁区的上升运动发展可能是非线形对流对称不稳定。这从一个侧面涉及到结构与 TC 强度变化的物理机制。

当然,SVD 机制的一个重要前提是湿位涡守恒,对于 TC 而言,这一前提可近似得到满足。但是对于靠近海平面的低层大气,海-气相互作用是不容忽视的。另外,在更大的水平范围内,也往往难以满足大气处处饱和的前提条件。因此,还应进一步分析下垫面热通量的可能影响,以及凝结潜热空间分布的作用。

4.4 涡旋 Rossby 波理论

非对称结构的一个主要表现是螺旋雨带。余志

豪^[53]对螺旋雨带的形成及涡旋 Rossby 理论进行了比较全面的总结,这里只分析它与 TC 强度的关系。螺旋雨带的形成对 TC 发展的作用至今还有争论。一般认为由于雨带从眼墙附近带走潜能,阻碍 TC 的发展。但更多的研究表明雨带通过供应水汽促进 TC 的发展,眼墙区的高位涡证明了这一点。Willoughby^[54,55]对大西洋 19 个热带风暴分析表明,眼的收缩与 TC 强度加强密切相关,研究发现当 TC 的对流旺盛且对称时,最大风速半径收缩、风速加大,TC 快速加强;对流减弱时,对流环减弱或消失,此时风随半径的变化很小;不发展的 TC 往往对流分散,无对流环;如果 TC 中心附近存在非对称的对流,TC 往往不加强。但是,TC 结构变化和强度变化的物理机制究竟如何? MacDonald^[56]根据观测到的螺旋雨带,首先提出了类-Rossby(Rossby-like)概念。随着 TC 强度变化研究不断深入,人们试图从理论上理解 TC 结构与强度的变化关系。因此,几乎是 30 a 后,Montgomery 再次指出了涡旋 Rossby 概念,指出,湿对流强迫的涡旋 Rossby 波渐渐向外传播使得非对称的涡旋轴对称化,引起 TC 的加强。Wang^[57,58]用一个原始方程模式,在 f 平面上数值模拟了一个理想热带气旋的发展过程,并详细分析了 TC 内核区域位涡的演变,分析指出涡旋 Rossby 波沿 TC 的眼墙气旋性传播,TC 眼墙和眼区的位涡混合将导致最大风速半径处的切向风减弱,当眼墙受到螺旋雨带扰动时,如果该扰动增强并恰好与涡旋 Rossby 同位相时,那么 TC 眼墙就会经历一次破碎并通过轴对称过程进行恢复,因此,当 TC 眼墙破坏(建立)时,就会导致 TC 强度的减弱(增强)。当然,这只是高分辨率的数值模拟结果,虽然已经在 TC 眼墙中发现到涡旋 Rossby 的移动,但至今尚未发现类似形式的强度变化事实,因此,这种数值结果的解释有待进一步证实。

罗哲贤和陈联寿^[59]对地形上空涡旋 Rossby 波的动力学特征进行了研究,发现地形涡旋 Rossby 波的传播速度,TC 中心位置及 TC 内压的非对称结构均构成影响,提出了涡旋 Rossby 波的新概念。罗哲贤^[60]进一步用旋转适应理论,研究了台风轴对称基流与其上叠加的非对称扰动的相互作用,探讨了线性与非线性相互作用的差异与相对重要性。

因此,TC 非对称结构对其强度变化的研究并不多,而且工作不太完善,其影响的物理机制更是不明确,有关 TC 强度变化的非对称因素影响的研究

结论仍有争议,因此 TC 结构对其自身强度变化影响的热力、动力作用有待于进一步揭示。

5 海洋对 TC 强度的影响

众所周知,海表面温度对 TC 强度变化起着重要作用。观测表明,TC 只能在大于 26.5°C 海面上形成(陈联寿等^[61])。Baik 等^[62]研究指出,87% 的西北太平洋风暴将在 $27\sim 29^{\circ}\text{C}$ 的 SST 时达到他们生命史中的最大强度。前面提到的 MPI 的一个关键的因子就是海表面温度。不仅如此,海洋的热状况,如海洋的温度层结变化等对热带气旋强度也有较为显著的影响,其研究的主要方面涉及到海洋的热含量(OHC),海洋混合层平衡(OML)、降水效应、混合参数化方案。当然,随着海洋对热带气旋的影响研究的不断深入,海-气交界面的过程也越来越受到人们的重视,这些包括,海表面过程、表面海浪场、表面风场、表面拖曳系数、热焓系数、海洋飞沫、风-浪耦合、边界层急流。限于文章的篇幅和对 TC 强度变化研究的重要性,本文将着重就上层海洋及海洋飞沫对热带气旋强度影响研究进行回顾。

5.1 上层海洋的作用

海洋对 TC 的影响研究由于受海上观测资料稀少的影响,其研究的主要手段依赖于海气耦合模式。早期的海洋-大气相互作用的耦合模式^[63~65]一般采用一个轴对称的 TC 模式和一个混合层的海洋模式进行耦合,研究结果表明模拟出的耦合作用很小,这可能是由于比较粗的模式分辨率造成的。

Ginis 等^[66]发展了一个三维的海洋-大气相互作用的模式,该耦合模式是 TC 与 5 层模式^[67],而海洋为 3 层的原始方程模式^[68],模式 TC 的移动与发展均造成海表面冷却,而且可以看出耦合作用对 TC 强度的影响。Duan 等^[4,5]用一个混合层海洋模式和一个 11 层的大气模式进行耦合,研究结果表明,由于 TC 的作用,海洋的下层冷水上翻,其反馈作用是减弱了 TC 的强度。同时,TC 过后的海洋上留下的“冷尾”对后续的 TC 强度减弱作用也可以通过数值试验进行模拟。

Bender 等^[69]应用地球物理流体动力实验室(GFDL)的高分辨率耦合模式,在理想情况下,研究 TC 与海洋的相互作用。结果表明,TC 引起的海表冷却使进入 TC 的总热通量减少,从而对最大风暴强度产生影响。Hodur^[70]用美国海军研究实验室的海气耦合中尺度预测系统也得到类似结果。

上述研究中,海洋对 TC 的反馈过程主要是分析 TC 强度与路径的变化。众所周知,海洋对 TC 强度与路径的影响是通过表面热通量来实现的。由于表面通量的分布不仅取决于 SST,而且它还受海洋混合层的深度和海洋的垂直结构影响。因此,Chan 等^[71]用一个海-气耦合模式研究了 TC 与海洋的相互作用问题。大气模式是改进的 MM4 而海洋为一个混合层模式。大气与海洋之间的耦合通过风应力来实现,将海洋模式计算出来的 SST 反馈到大气中。

研究结果表明,TC 强度对 SST 变化的响应几乎是同时的,其随 SST 的变化不是线性的。数值模拟证实 TC 增强的临界 SST 约为 27°C ,与已有观测研究结果一致。当 SST 在 27 和 30°C 之间时,TC 增强最快,当 SST 超过 30°C ,增强率则减慢。进一步研究表明,初始混合层(ML)深度的变化对 TC 强度也有显著影响。一般地说,当 TC 移速给定时,ML 越深,TC 越强。此外,无论是否存在东风流场,当 ML 深度 $< 50\text{ m}$ 时,TC 强度变化对 ML 深度变化比较敏感。但是,较强的东风会使增强速率减小,尤其当 ML 较深时。除 ML 深度外,与海洋垂直结构有关的其他参数的变化也能改变 TC 增强率。静止层垂直温度梯度的增加不利于 TC 的增强,尽管二者的关系并不是线性的。上、下层间温差的增大也会引起较弱的增强。

在 Chan 等^[71]研究中,还研究了局地的海洋要素扰动对热带气旋强度的影响,如,数值试验结果表明,当 TC 经过一个暖水核(warm core edge,简称 WCE)时,TC 在到达 WCE 中心之前增强。此外,只要 TC 位于 WCE 区,减弱过程不会立刻发生。尽管 WCE 中心附近的 SST 仅略有变化,而且 WCE 基本保持其原有特征,在 WCE 周围出现两个冷池,一个在 TC 经过之处,另一个在 TC 最大风速区的下面。当 TC 经过一个深混合层区,会发生类似的增强过程,但是增强程度较弱。当 TC 经过一个 SST 高梯度区,TC 强度变化与经过 WCE 的试验类似,但是在总表面热通量方面有一些差异。

研究发现海洋条件的局域变化会导致 TC 强度变化。试验结果表明海洋的作用在 TC 到达局域扰动之前就会发生。总热通量(潜热和感热)似乎是最可能的机制,这被 Bender 等^[69]认为是 TC 与海洋耦合的主要物理过程。他们还发现感热输送方向是从大气到海洋,这意味着后者确实更冷。还需要将这

一机制的观测研究与数值研究结合起来对这些结果进行验证。

众所周知,除海洋条件外,大气也能够引起 TC 强度的变化,或者至少可以提供适合迅速增强过程发生的环境。Shay 等^[72]认为,当发生迅速增强过程时,在上部海洋作用与大气过程之间可能存在“位相锁定”,也就是说,海洋与大气因子可能不是彼此孤立的,我们必须注意海洋与大气间正负反馈的程度。因此,用耦合模式研究 TC 强度变化以理解大气与海洋之间的相互作用是很有必要的。

5.2 海洋飞沫(sea spray)作用

海洋飞沫对 TC 强度的作用是当前该领域研究的另一个方面,实验室研究^[73]、数值飞沫水滴模型^[74,75]以及外海的观测^[76]都表明海洋飞沫能够使边界层内的温度和湿度场之间热焓量发生变化。因此,这种作用在一定程度上将影响 TC 强度的变化。

海洋飞沫作用是通过参数化方案考虑到数值模式中的,因此,不同的参数化方案,海洋飞沫对 TC 强度影响的大小不一。如 Wang 等^[47]用 Fairall 等^[77]的飞沫参数化方案,数值研究飞沫对 TC 强度变化的影响,结果表明,当考虑海洋飞沫时 TC 强度仅增加 8%。而同样的 TC,如果用 Andreas 等^[78]的海洋飞沫参数化方案,由于与飞沫有关的感热和潜热通量的明显增加而导致 TC 的强度增加 28%。数值研究结果还表明,在 TC 内核处有一等温层形成,但这个结果还没有观测资料来验证。由此看来,飞沫对强度变化的影响取决于飞沫的参数化方式,因此,海洋飞沫对 TC 强度的影响以及海洋表面和大气边界层的低层之间的反馈作用还需进一步检验才能用来预报 TC 强度变化。

Andreas 等^[78]考虑了再次进入(re-entrant)的飞沫效应,认为再进入海洋的飞沫会造成海洋冷却,因而导致传输到大气中的热焓量减少,因而会导致热带气旋强度的变化。同时,Andreas 等^[79]首先将飞沫效应考虑边界层内的动量传输中,并认为,它将会使飞沫的效应更加显著。为此,他们发展了一个新的在强风情况下的海-气通量的参数化方案,数值模拟的结果表明,TC 的模拟对于这个参数化方案非常敏感。Bao 等^[80]的数值模拟的结果也表明,飞沫的再进入效应将会影响 TC 的强度。根据 Andreas 等^[79]的推论,如果不考虑耦合海洋飞沫等一些详细的海洋表面过程,准确预报 TC 强度变化是不可能的。但是,这与 Emanuel^[81]的研究发现又是

矛盾的,因为他用一个简单的海-气耦合模式,并且用一个相等的交换系数的热焓和动量参数化方案,可以后报大多数的 TC 强度变化。

实际上到目前为止,研究海洋和 TC 的相互作用基本上是基于理想情景下进行的,之所以这样做是因为目前还没有完整的观测资料来进行对耦合模式的结果进行检验。耦合模式下,由于耦合作用而使 TC 强度减弱,这是公认的,但数值模拟的结果表明,其耦合作用对 TC 强度减弱的程度因不同的模式而不同。因此,怎样用耦合的海洋-大气模式进行实际的 TC 模拟是目前该领域研究的主攻方向。

6 TC 强度变化研究中的若干问题

从前面的分析可以看出,尽管近年来在 TC 强度变化研究方面取得了一定的进展,但仍然存在许多没有解决的问题,这在今后的研究中应该加以重视。这些问题主要包括:

(1) TC 强度变化的观测研究。从前面的分析看,TC 观测研究存在薄弱环节。但现在大气探测科学发展迅速,特别是卫星探测技术的发展,提供了生成在海上的 TC 更多的有效的探测信息,而且国际上 TC 研究正逐步向探测研究转移。如,在 2002 年 12 月在澳大利亚的 Cairns 召开的 IWTC-V(The 5th International Workshop on Tropical Cyclone)中,开辟了应用现代卫星探测资料研究 TC 专门话题。这方面应该引起人们足够的重视;这不仅能够进一步认识 TC 强度变化规律,同时一些量化的探测资料可以同化到 TC 的数值预报模式中,解决 TC 强度预报的初始场问题,提高强度的预报精度;

(2) 在环境流场对 TC 强度变化的影响研究中,应该注意 TC 环流与环境流场的相互作用,虽然以往的重点放在环境流场的垂直切变上,但对于向均匀流场等对 TC 强度变化影响的基本的物理机制应进一步深入了解,与此同时,还应注意 TC 外流与环境流场的相互作用对强度变化的影响,这是 TC 强度变化的动力过程的最主要方面;

(3) 在海洋对 TC 强度变化影响研究方面,应着重研究如何建立有效的海-气耦合模式,来提高 TC 强度变化业务预报能力,这里的关键问题是模式的初始场以及模式的物理过程,海气交界面的参数化问题,如海洋飞沫,与海洋飞沫有关的海浪破碎问题,这些都有待于进一步研究;

(4) 热带气旋结构与其强度变化是目前强度变

化研究的热门话题,但从前面的分析看,它是影响热带气旋强度变化因子中,人们认识比较少,一些研究成果还不成熟,在今后一段时间内,其研究的重点建议放在结构变化与 TC 强度变化关系以及这种关系的物理本质。

参考文献

- [1] Elsberry R L, Holland G J, Gerrish H, et al. Is there any hope for tropical cyclone intensity prediction? —A panel discussion. *Bull Amer Meteor Soc*, 1992, 73: 264—275
- [2] 王继志, 杨元琴. 9216(Polly)台风中尺度结构变化与深入内陆低压环流的维持. 见: 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究, 第三分册. 北京: 气象出版社, 1995. 95—103
Wang Jizhi, Yang Yuanqun. Mesoscale structure of typhoon 9216(Polly) and the maintenance of its circulation long after landfall. In: *Typhoon Science, Operation Experiments and Synoptic Dynamics (The 3rd fascicule)*. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 95—103
- [3] 王继志, 杨元琴. 9417 号台风积云对流结构与强度变化关系的数值试验. 见: 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究, 第三分册. 北京: 气象出版社, 1995. 112—117
Wang Jizhi, Yang Yuanqun. Numerical study on the relationship between cumulus convective structure of typhoon 9417 and its intensity change. In: *Typhoon Science, Operation Experiments and Synoptic Dynamics (The 3rd fascicule)*. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 112—117
- [4] Duan Yihong, Qin Zenghao, Gu Jianfeng, et al. Numerical study on the effect of sea surface temperature on tropical cyclone intensity, Part I: Numerical experiment of the tropical cyclone intensity Related to SST. *Acta Meteor Sinica*, 1998, 12: 142—148
- [5] Duan Yihong, Qin Zenghao, Gu Jianfeng, et al. Numerical study on the effect of sea surface temperature on tropical cyclone intensity, Part II: The result of coupled model. *Acta Meteor Sinica*, 2000, 14: 193—199
- [6] 林元弼, 陈蓉, 谭锐志. 环境场对近海台风强度突变影响的数值试验. 见: 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究, 第三分册. 北京: 气象出版社, 1995. 31—38
Lin Yuanbi, Chen Rong, Tan Ruizhi. Numerical study on the effect of environmental circulation on abrupt intensity change of typhoons near shore. In: *Typhoon Science, Operation Experiments and Synoptic Dynamics (The 3rd fascicule)*. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 31—38
- [7] 林元弼, 谭锐志, 陈蓉. 数值模式中近海台风强度突变的物理机制. 见: 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究, 第三分册. 北京: 气象出版社, 1995. 39—43
Lin Yuanbi, Tan Ruizhi, Chen Rong. Mechanism of abrupt intensity change of simulated typhoons. In: *Typhoon Science, Operation Experiments and Synoptic Dynamics (The 3rd fascicule)*. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 39—43
- [8] 徐祥德, 陈联寿, 解以扬等. 台风变性过程的锋面结构特征及其对暴雨形成影响的初步分析与数值模拟试验. 见: 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究, 第三分册. 北京: 气象出版社, 1995. 67—70
Xu Xiangde, Chen Lianshou, Xie Yi yang, et al. Typhoon transition and its impact on heavy rain. In: *Typhoon Science, Operation Experiments and Synoptic Dynamics (The 3rd fascicule)*. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 67—70
- [9] Charney J G, Eliassen A. On the growth of the hurricane depression. *J Atmos Sci*, 1964, 21: 68—75
- [10] Ooyama K. Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. *J Atmos Sci*, 1969, 26: 3—40
- [11] Emanuel K A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. I. Steady-state maintenance. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 585—604
- [12] Montgomery M T, Kallenbach R J. A theory for vortex Rossby waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1997, 123: 535—565
- [13] Montgomery M T, Enagonio J. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a three-dimensional quasi-geostrophic model. *J Atmos Sci*, 1998, 55: 3176—3207
- [14] Emanuel K A. The maximum intensity of hurricanes. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1143—1155
- [15] Holland G J. The maximum potential intensity of tropical cyclones. *J Atmos Sci*, 1997, 54: 2519—2541
- [16] Demaria M, Baik J-J, Kaplan J. Upper-level eddy angular momentum fluxes and tropical cyclone intensity change. *J Atmos Sci*, 1993, 50: 1133—1147
- [17] Peng M S, Jeng B-F, Williams R T. A numerical study on tropical cyclone intensification, Part I: Beta effect and mean-flow effect. *J Atmos Sci*, 1999, 56: 1404—1423
- [18] Duan Yihong, Wu Rongsheng, Yu Hui, et al. The role of β -effect of planetary vorticity gradient and uniform current on the change in tropical cyclone intensity. *Adv Atmospheric Sci*, 2004, 21: 75—86
- [19] Ramage C S. Hurricane development. *J Meteor*, 1959, 16: 227—237
- [20] Gray W M. Global view of origin of tropical disturbances and storms. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 669—700
- [21] Merrill R T. Environmental influences on hurricane intensification. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1678—1687
- [22] Zehr R. Tropical cyclogenesis in the western North Pacific. NOAA Tech. Report NESDIS 61, US Dept. of Commerce, 1992. 181pp
- [23] Madala R V, Piacsek S A. Numerical simulation of asymmetric hurricanes on a β -plane with vertical shear. *Tellus*, 1975, 27: 453—468
- [24] Bender M A. The effect of relative flow in the asymmetric

- structure in the interior of hurricanes. *J Atmos Sci*, 1997, 54, 703–724
- [25] Tuleya R E, Kurihara Y. A numerical study of the effect of environmental flow on tropical storm genesis. *Mon Wea Rev*, 1981, 109, 2487–2506
- [26] Holland G, Wang Y-Q. What limits tropical cyclone intensity? Preprint, 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 10–15 January, 1999, Dallas, Texas, 955–958
- [27] DeMaria M. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *J Atmos Sci*, 1996, 53, 2076–2087
- [28] Jone S C. The evolution of vortices in vertical shear. I: Initially barotropic vortices. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1995, 121, 821–851
- [29] Wu G X, Liu H Z. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface. *Dyn Atmos Oceans*, 1997, 27, 715–743
- [30] 余晖, 吴国雄. 湿斜压性与热带气旋强度突变. *气象学报*, 2001, 59(4): 440–449
Yu Hui, Wu Guoxiong. Moist baroclinity and abrupt intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2001, 59(4): 440–449
- [31] Klein P M, Harr P A, Elsberry R L. Extratropical transition of western north Pacific tropical cyclones: Midlatitude contributions to intensification. 25th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology (Preprint). 2002, 541–542
- [32] Holland G J, Merrill R T. On the dynamics of tropical cyclone structural changes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1984, 110, 723–745
- [33] 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
Yu Hui, Fei Liang, Duan Yihong. Favorable large-scale conditions for rapid intensification of typhoon “Bill” and “Jelawat” before their landfall. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*. 2002, 60(Suppl): 78–87
- [34] Molinari J, Vollaro D. External influences on hurricane intensity. Part I: Outflow layer eddy angular momentum fluxes. *J Atmos Sci*, 1989, 46, 1093–1105
- [35] Bosart L F, et al. Environmental influences on the rapid intensification of Hurricane Opal (1995) over the Gulf of Mexico. *Mon Wea Rev*, 2000, 128, 322–352
- [36] Shi, Jaijn Jong, Chang, et al. Interaction between Hurricane Florence (1988) and an upper-tropospheric westerly trough. *J Atmos Sci*, 1997, 54, 1231–1247
- [37] Hanley D E, Molinari J, Keyser D. A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper-tropospheric troughs. *Mon Wea Rev*, 2001, 129, 2570–2584
- [38] Molinari, John, Skubis, et al. Potential vorticity analysis of tropical cyclone intensification. *J Atmos Sci*, 1998, 55, 2632–2644
- [39] 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 3pp
Chen Liangshou, Xu Xiangde, Luo Zhexian, et al. *Tropical Cyclone Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 3pp
- [40] Ritchie E A. Environmental effects. Topic Chairman and Rapporteur Reports of the Fifth WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-V). Tropical Meteorology Research Programme Report Series, Report No. 67, Cairns, Australia, 3–12 Dec. 2002
- [41] 夏有龙, 郑祖光, 刘适达. 台风内核与外围加热对其强度突变的影响. *气象学报*, 1995, 53(4): 423–430
Xia Youlong, Zheng Zuguang, Liu Shida. The effects of heating in the inner core and the external part of typhoon on their intensity abrupt changes. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 1995, 53(4): 423–430
- [42] 郑祖光, 夏有龙, 刘适达. 台风内核与外围的强度突变. *气象学报*, 1996, 54(3): 294–302
Zheng Zuguang, Xia Youlong, Liu Shida. The intensity abrupt changing in the inner core and external part of typhoon. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 1996, 54(3): 294–302
- [43] 孙子平, 丁一汇. 动力强迫对台风次级环流的作用. *大气科学*, 1990, 14(3): 293–305
Sun Ziping, Ding Yihui. The effect of dynamic forcing on the secondary circulation of typhoons. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 1990, 14(3): 293–305
- [44] 陈华. 用轴对称的平衡模式对热带气旋发展过程中积云动量垂直混合作用的模拟. *大气科学*, 2000, 24(4): 403–411
Chen Hua. A study of cumulus momentum vertical mix in tropical cyclogenesis using an axisymmetrically balanced model. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 2000, 24(4): 403–411
- [45] Pfeffer R L. Concerning the mechanics of hurricanes. *J Meteor*, 1958, 15, 113–120
- [46] Titley D W, Elsberry R L. Large intensity changes in tropical cyclones: A case study of supertyphoon Flo during TCM-90. *Mon Wea Rev*, 2000, 128, 3556–3573
- [47] Wang Y, Yang B, Wang B. Asymmetric structure and tropical cyclone intensity. Proceedings, Intl Conf. Mesoscale Meteor and Typhoon in East Asia, National Taiwan Univ, 2001, 26–28 Sept: 139–144
- [48] Chow K C. Moving Spiral Structure in Tropical Cyclones. [Ph D. Thesis]: Hong Kong University of Science and Technology, 2001. 92pp
- [49] 姚祖庆, 丁金才, 唐新章. 9414 号和 9417 号热带气旋强度突变和维持的研究. 见: 国家科技攻关 85-906 项目. 台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究, 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究. 1996, 71–75
Yao Zuqing, Ding Jincai, Tang Xinzhang. The abrupt intensity change and maintenance of typhoons 9414 and 9417. *Typhoon Science, Operation Experiments and Synoptic Dynamics (The 1st fascicule)*. Beijing: China Meteorological Press,

- 1996, 71—75
- [50] 陈联寿等. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应. 大气科学, 1997, 21(1): 83—90
- Chen Lianshou, Xu Xiangde, Xie Yiyang, Li Wenzhong. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 1997, 21(1): 83—90
- [51] 陆汉城, 钟科, 张大林等. 1992 年 Andrew 飓风的中尺度特征. 大气科学, 2001, 25(6): 827—836
- Lu Hancheng, Zhong Ke, Zhang Dalin et al. Mesoscale characters of the 1992 Hurricane Andrew. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 2001, 25(6): 827—836
- [52] 陆汉城, 钟科, 张大林. 1992 年 Andrew 飓风眼壁区倾斜上升运动发展的可能机制——非线性对流对称不稳定. 大气科学, 2002, 26(1): 83—90
- Lu Hancheng, Zhong Ke, Zhang Dalin. A possible developing mechanism of the slantwise updraft in the eyewall of the 1992 Hurricane Andrew—nonlinear convective and symmetrical instability. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 2002, 26(1): 83—90
- [53] 余志豪. 台风螺旋雨带—涡旋 Rossby 波. 气象学报, 2002, 60(5): 502—507
- Yu Zhihao. The spiral rain bands of tropical cyclone and vortex Rossby waves. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2002, 60(5): 502—507
- [54] Willoughby H E, Clos J A, Shoreibah M G. Concentric eyewalls secondary wind maxima and the evolution of the hurricane vortex. J Atmos Sci, 1982, 39: 395—411
- [55] Willoughby H E. Temporal changes of the primary circulation in tropical cyclones. J Atmos Sci, 1990, 47: 242—264
- [56] MacDonald N J. The evidence for the existence of Rossby-like waves in the hurricane vortex. Tellus, 1968, 20: 138—150
- [57] Wang Yuqing. Vortex Rossby wave in a numerically simulated tropical cyclone. Part I: Overall structure, potential vorticity, and kinetic energy budgets. J Atmos Sci, 2001, 59: 1213—1238
- [58] Wang Yuqing. Vortex Rossby wave in a numerically simulated tropical cyclone, Part II: The role in tropical cyclone structure and intensity change. J Atmos Sci, 2001, 59: 1239—1262
- [59] 罗哲贤, 陈联寿. 地形对涡旋 Rossby 波影响的研究. 自然科学进展, 2003, 13: 372—377
- Luo Zhexian, Chen Lianshou. The effect of topography on vortex Rossby wave. Progress in Natural Science, 2003, 13: 372—377
- [60] 罗哲贤. 台风轴对称环流和非轴称扰动非线性相互作用的研究. 中国科学(D), 2003, 33: 686—694
- Luo Zhexian. The nonlinear interaction between the axisymmetric and non-axisymmetric circulation of typhoon. Science in China(D) (in Chinese), 2003, 33: 686—694
- [61] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 403pp
- Chen Lianshou, Ding Yihui. Generality of western North Pacific Typhoons. Beijing: Chinese Science Press, 1979. 403pp
- [62] Baik J-J, Paek J-S. A climatology of sea surface temperature and the maximum intensity of Western North Pacific tropical cyclone. J Meteor Soc Japan, 1998, 76: 129—137
- [63] Elsberry R L, Fraim T, Trapnell R. A mixed layer model of the ocean thermal response to hurricanes. J Geophys Res, 1976, 81: 1153—1162
- [64] Chang S W, Anthes R A. Numerical simulation of ocean's nonlinear, baroclinic response to translating hurricanes. J Phys Oceanogr, 1978, 8: 468—480
- [65] Sutyrin G G, Khain A P. Interaction of ocean and the atmosphere in the area of moving tropical cyclone. Dokl Akad Nauk USSR, 1979, 249: 467—470
- [66] Ginis I, Dikinson Kh Zh, Khain A P. A three dimensional model of the atmosphere and the ocean in the zone of a typhoon. Dokl Akad Nauk USSR, 1989, 307: 333—337
- [67] Khain A P. Three-dimensional numerical model of a tropical cyclone including β -drift. Atmos Ocean Phys, 1988, 24: 359—366.
- [68] Ginis I, Dikinson Kh Zh. Modeling of the Typhoon Virginia (1978) forcing on the ocean. Sov Meteorol and Hydrol Engl Transl, 1989, 7: 53—60
- [69] Bender M A, Ginis I, Kurihara Y. Numerical simulation of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model. J Geophys Res, 1993, 98: 23245—23263
- [70] Hodur R. The Naval Research Laboratory's coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system (COAMPS). Mon Wea Rev, 1997, 125: 1414—1430
- [71] Chan J C L, Duan Y H, Shay L K. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model. J Atmos Sci, 2001, 58: 154—172
- [72] Shay L K, Goni G J, Marks F D, et al. Role of warm ocean features on intensity change. Mon Wea Rev, 2000, 128: 1366—1383
- [73] Mestayer P G, Lefauconnier C. Spray droplet generation, transport, and evaporation in a wind wave tunnel during the Humidity Exchange over the sea Experiments in the Simulation Tunnel. J Geophys Res, 1998, 93: 572—586
- [74] Rouault M P, Mestayer P G, Schiestel R. A model of evaporating spray droplet dispersion. J Geophys Res, 1991, 96: 7181—7200
- [75] Edson J B, Anquetin S, Mestayer P G, et al. Spray droplet modeling: 2. An interactive Eulerian-Lagrangian model of evaporating spray droplet. J Geophys Res, 1996, 101: 1279—1293
- [76] Korolev V S, Petrichenko S A, Pudov V D. Heat and moisture exchange between the ocean and atmosphere in tropical storms Tess and Skip. Sov Meteor Hydro, 1990, 3: 92—94
- [77] Fairall C W, Kepert J D, Holland G J. The effect of sea spray on

- surface energy transport over the ocean. *Global Atmos Ocean Sys*, 1994, 2: 121—142
- [78] Andreas E L, DeCosmo J. Sea spray production and influence on air-sea heat and moisture fluxes over the open ocean. In: Geernaert G L, Ed. *Air-Sea Exchange Physics, Chemistry and Dynamics*. Kluwer, 1999. 327—362
- [79] Andreas E L, Emanuel K. Effects of sea spray on tropical cyclone intensity. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 3741—3751
- [80] Bao J-W, Wilczak J M, Choi J K, et al. Numerical simulations of air-sea interaction under high wind conditions using a coupled model: A study of hurricane development. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 2190—2210
- [81] Emanuel K A. Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, 1999, 401: 665—669

REVIEW OF THE RESEARCH IN THE INTENSITY CHANGE OF TROPICAL CYCLONE

Duan Yihong Yu Hui

(*Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210008;
Shanghai Typhoon Institute/CMA, Shanghai 200030*)

Wu Rongsheng

(*Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210008*)

Abstract

The study on the change in tropical cyclone intensity has attracted more attention. Significant progresses have been made in the subject since 1995. This paper summarizes the achievement of research in the change in intensity of tropical cyclone made in recent years. It mainly include (1) the achievements of tropical cyclone genesis and its maximum potential intensity; (2) the effects of gradient of planetary vorticity, environmental uniform flow, vertical shear of environmental flow and the interaction between the outflow of tropical cyclone and environmental flow on the change in intensity of tropical cyclone; (3) the relationship between the change in the structure of tropical cyclone and its intensity variation, particularly in the field of asymmetric structure induced by the environment flow, the application of verifying of the theory of the slant vorticity development and theory of vorticity Rossby wave in the change in tropical cyclone intensity; (4) summarizing the the role of the thermal regime of ocean and sea spray on the change in intensity of tropical cyclone.

It is concluded that although the obvious progress has been made in recent years, there are many challenges in the field of the change intensity of tropical cyclone. The application of satellite data such as AMSU, Quik SCAT and cloud track retrieved wind in the research of the change in tropical cyclone intensity should be strengthened. Besides, more attention has been paid to the interaction between the outflow of tropical cyclone and the trough of mid-latitude, the initial field of the ocean-atmosphere coupled model, the parameterizations of interface of ocean and atmosphere, and the mechanism of the effect of structure change of tropical cyclone on its intensity. It is expected that the results of researches may promote understanding of the change in tropical cyclone intensity and improve the intensity forecast skill.

Key words: Tropical cyclone, Intensity change, Research progress.