

一个区域海-气耦合模式的建立: 模式验证及其对热带气旋“云娜”的模拟*

黄伟^{1,2} 郑运霞^{1,2} 沈淇³ 于润玲^{1,2}

(1. 中国气象局台风数值预报重点实验室 上海 200030; 2. 中国气象局上海台风研究所 上海 200030;
3. 上海河口海岸科学研究中心 上海 201201)

提要 本文以区域热带气旋模式(GRAPES-TCM)为基础, 引入海洋环流模式(Estuarine, Coastal and Ocean Model (semi-implicit), ECOM-si)和 Ocean Atmosphere Sea Ice Soil 3(OASIS3)耦合器, 建立了一个区域海-气耦合模式。利用该模式对 0414 号热带气旋“云娜”进行了数值模拟, 验证了模式的性能。结果表明, 耦合模式模拟的“云娜”强度相比单独的大气模式更接近观测, 单独大气模式模拟的近地面风场偏强, 而耦合模式模拟的近地面风场的强度和非对称结构均与观测更为接近。数值实验中, “云娜”热带气旋过境引起的海表面温度的下降与实况接近, 海表面温度下降引起的海-气热通量相比控制实验的结果明显下降, 分析资料表明这一下降是合理的。海洋模式的引入导致了热带气旋“云娜”结构的变化, 这种变化不但反应在径向风的减弱(强度下降), 还反应在对流强度和最强对流发生位置的变化, 并最终引起了热带气旋降水结构的改变。

关键词 海气耦合; 热带气旋; 海表面温度; 热通量

中图分类号 P444 **doi:** 10.11693/hyhz20130228001

热带气旋是在热带洋面上发展起来的剧烈的大气涡旋, 它可以产生破坏性的大风、风暴潮、暴雨和洪涝, 导致严重的生命财产损失。由于热带气旋在较暖的海洋上生成和发展, 海-气相互作用对热带气旋及其经过洋面的影响日益受到关注。热带气旋过境时的强风引起冷水上翻, 导致海表温度(SST)下降(Jordan *et al.*, 1964), 最大降温可超过 6°C(Bender *et al.*, 1993); 而海洋对热带气旋的影响主要表现为, 一方面, 大风条件下, 海表风应力增强, 海-气间热通量交换明显增强, 有助于热带气旋继续发展, 另一方面, SST 的降低, 又导致海洋为热带气旋提供的能量减少, 不利于热带气旋进一步增强。由于海洋观测资料的稀少和最近几十年数值模式的进步, 海-气耦合模式成为研究热带气旋条件下海-气相互作用的重要工具。最近几十年国内外已有大量的研究(Schade *et al.*,

1999; 黄立文等, 2005; Renet *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2006; 蒋小平等, 2009; 刘磊等, 2011)利用海-气耦合模式模拟动态 SST 对热带气旋的影响。

最近 20a, 热带气旋路径的预报水平稳步提高, 但与此同时, 对热带气旋强度的预报能力则鲜有进步。对于数值模式来说, 在热带气旋强度预报方面的一个明显的缺陷就是对热带气旋和海洋的相互作用的模拟仍然有很大的局限性。例如, 目前绝大多数的业务热带气旋模式仍假定 SST 是不变的。美国地球流体力学实验室(GFDL)的海-气耦合的飓风数值模式实验结果指出, 热带气旋引起的海洋冷却可改善其对热带气旋强度的预报。其对 1995—1998 年飓风季节的 163 个个例实验结果表明, 相比单独的飓风模式, 包括了海洋反馈的耦合模式可使强度预报误差降低 26%(Bender *et al.*, 2000), 最终考虑动态 SST 的海-气

* 国家重点基础研究计划, 2013CB430300 号和 2009CB421500 号; 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206011 号和 GYHY201106004 号。黄伟, 博士, 副研究员, email: huangw@mail.typhoon.gov.cn

收稿日期: 2013-02-28, 收修改稿日期: 2013-11-28

耦合模式在 2001 年投入业务运行(Bender *et al.*, 2007)。目前美国国家飓风中心(NHC)业务运行的 Hurricane Weather Research and Forecast System (HWRF)也包含了大洋环流模式(Gopalakrishnan *et al.*, 2012)。

自 2006 年 Global/Regional Assimilation and Prediction System-Tropical Cyclone Model (GRAPES-TCM) 正式投入业务运行以来, 初始涡旋方案不断改进, 路径预报明显改善, 但越来越受到重视的强度预报水平的改善并不明显(黄伟等, 2007)。图 1 是 GRAPES-TCM 对 2009 年热带气旋季的强度预报误差以及与实际强度的比较, 从图 1 中可见 GRAPES-TCM 对最大风速小于 30m/s 的热带气旋强度预报偏强, 而对最大风速大于 50m/s 的热带气旋强度预报明显偏弱。对较弱热带气旋预报偏强的一个重要原因是没有考虑海洋对大气的负反馈作用。基于此, 我们以 GRAPES-TCM 为基础, 发展了一个区域海-气耦合模式, 并选择 0414 号热带气旋“云娜”为个例, 对该区域海-气模式的模拟能力进行验证, 评估了海-气相互作用对热带气旋“云娜”的影响。

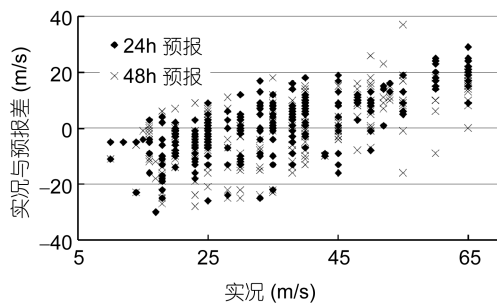


图 1 GRAPES-TCM 对 2009 年热带气旋季的强度预报误差和实际强度散点图

Fig.1 Intensity prediction error of typhoons in 2009 by GRAPES-TCM vs. observed typhoon intensity

1 耦合模式介绍

1.1 区域大气模式

GRAPES-TCM 是基于全球/区域同化和预报系统 (Global/Regional Assimilation and Prediction System, GRAPES(Chen *et al.*, 2008)) 发展起来的区域热带气旋预报系统。GRAPES 是一个完全可压缩的模式, 它采用三维半拉格朗日半隐式差分方案解原始欧拉方程, 垂直方向采用伴随地形的高度坐标。黄伟等(2007)利用 GRAPES 区域模式, 引进热带气旋的初始涡旋重定位技术(Kurihara *et al.*, 1993, 1995), 建立了 GRAPES-TCM 热带气旋数值预报业务系统; 进一步地, 利用

模式约束的 3 维变分 (MC-3DVAR) 技术(Liang *et al.*, 2007), 结合热带气旋涡旋重定位技术和 BOGUS 资料同化(BDA, Zou *et al.*, 2000), 发展了初始涡旋的循环同化技术。此技术在 GRAPES-TCM 中得到应用(黄伟等, 2010), 初步的实验结果显示, 新的 GRAPES-TCM 业务系统与原有业务系统相比, 不但路径预报性能有较大的改善, 对热带气旋强度也有了一定的预报能力。目前, GRAPES-TCM 的水平分辨率为 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$, 垂向分 31 层, 对流参数化过程采用 Kain-Fritsch 方案(Kain, 1993), 边界层过程则采用 Yongsei University (YSU) 边界层参数化方案(Hong *et al.*, 2006b), 用以诊断可识别降水的显式云方案是 WRF single moment 6-class (WSM6)(Hong *et al.*, 2006a) 方案。

1.2 区域海洋模式

ECOM-si (Estuarine, Coastal and Ocean Model (semi-implicit), Blumberg *et al.*, 1987) 是当今国内外应用较为广泛的河口海岸海洋模式, 是在普林斯顿海洋模式 (POM) 基础上发展起来的三维水动力模式, 该模式经改进后已成功应用到世界沿海各海区河口、海岸和海洋的动力学研究。模式嵌套了一个二阶湍流封闭模型; 垂向采用 σ 坐标; 动量方程中的正压梯度力采用隐式格式, 水平方向采用半隐式格式, 整个模式耦合了完整的热力学过程。众多学者对原 ECOM-si 不断改进, 使其更好地应用于河口近岸的水动力和物质运输研究。史峰岩等(2000)扣除局域平均密度层结, 提高了 σ 坐标系下斜压压强梯度力的计算精度。Chen 等(2001)将 ECOM-si 改成非正交曲线坐标系下的模式, 使其能拟合复杂的岸线。Zhu 等(2001)采用 Euler-Lagrange 方法改进物质运输方程中的平流项计算方法。朱建荣等(2003)应用预估修正法提高模式的稳定性。沈淇等(2011)把垂向 σ 坐标改进为 S 坐标, 使海洋上层趋于同一水深的物理平面, 同时底层拟合海底的变化。模式侧开边界条件包括流速、海温和盐度, 边界采用法向通量形式给出, 各月资料取自 Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 资料, 保证整个计算区域内的水体质量进出守恒。海温和盐度由美国国家海洋资料中心 (NOODC) 资料给出。

1.3 耦合器和耦合方案

GRAPES-TCM 和 ECOM-si 是通过 Ocean Atmosphere Sea Ice Soil 3 (OASIS3) 耦合器 (Valcke, 2006) 进行信息交换的。OASIS 由位于法国的“欧洲气候模拟和全球变化研究中心 (CERFACS)”开发, 目前已广泛应用于全球的各种海-气耦合模式和地球系统模式(周天军等,

2004); 在区域模式方面, 邹立维等(2012)利用 OASIS 构建了一个区域气候海气耦合模式, 并利用该模式进行了短期气候预测的尝试(Zouet *al*, 2013)。本文耦合过程中, 大气模式向海洋模式提供海表感热通量, 潜热通量, 入射短波辐射, 长波辐射和风应力; 而海洋模式向大气模式提供 SST。两个模式之间交换数据的时间间隔为 300s, 由于大气模式积分步长较短, 相当于大气模式积分 5 步(每步 60s), 海洋模式则是每 2 步交换一次信息。虽然两个模式设定的水平分辨率都是 0.15° , 但两者的网格并非完全一致, 因而在两个模式信息交换的过程中, 需要通过插值处理, 本文中采用的是 OASIS 耦合器中的 mosaic 方法。图 2 给出了大气模式、海洋模式和耦合器各分量组成的耦合模式示意图。

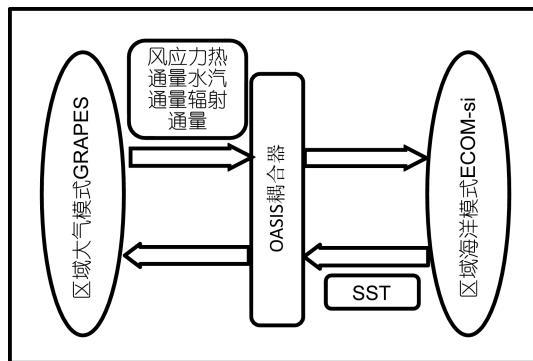


图 2 区域耦合模式的框架示意图

Fig.2 The framework of regional coupled model

2 实验设计

为了适应对西太平洋及南海区域热带气旋, 特别是近海热带气旋的模拟研究和预报实验的需要, 大气模式预报区域为 $100^\circ\text{—}150^\circ\text{E}$, $5^\circ\text{—}45^\circ\text{N}$, 水平分辨率为 $0.15^\circ\times 0.15^\circ$, 积分步长为 60s; 海洋模式预报区域为 $103.94^\circ\text{—}145.19^\circ\text{E}$, $7.85^\circ\text{—}43.45^\circ\text{N}$, 水平分辨率 $0.15^\circ\times 0.15^\circ$, 积分步长 150s。

为了检验区域海-气耦合模式对热带气旋条件下海-气间相互作用的模拟能力以及海-气相互作用对热带气旋的路径、强度和结构的影响, 本文选取了 2004 年 14 号热带气旋“云娜”作为个例进行模拟实验(模拟时段: 2004 年 8 月 10 日 00 时(UTC)—2004 年 8 月 13 日 00 时(UTC))。实验分为 2 组, 一组为单独大气实验(CTL 实验), SST 采用 $1^\circ\times 1^\circ$ 的 NCEP 分析资料; 另一组为海-气耦合实验(ASC 实验)。

大气模式的初始场来自于 NCEP 全球模式(GFS) $1^\circ\times 1^\circ$ 分析场, 侧边界则采用了其 6h 一次的预报场。由于采用的分析场的水平分辨率较粗, 难以准确分辨当时“云娜”热带气旋的强度和位置, 所以实验中嵌入了实时报文中生成的 BOGUS 涡旋(黄伟等, 2010)。海洋模式的初始化则由两步组成, 首先由气候态的水位、流场、温度和盐度, 多年月平均的表面风应力、热通量、蒸发和降水、侧边界的大洋环流作为外强迫经过 5a 长期积分, 达到准平衡态, 之后以个例起报前一个月作为起始时间, 以 NCEP 最终分析资料(Stunder, 1997)每日 4 次的风应力, 短波辐射, 热通量和水通量作为外强迫继续驱动海洋模式 1 个月形成最终的海洋初始场。

“云娜”的路径和强度来自于中国气象局上海台风研究所(CMA-STI)整编的西北太平洋及南海海域热带气旋最佳路径资料(<http://www.typhoon.gov.cn/en/data/>)。为了检验耦合模式对热带气旋条件下海-气相互作用的模拟能力, 本文用到的观测和分析资料包括热带降雨观测卫星微波成像(TRMM/TMI)逐日 SST 资料(Wentz *et al*, 2000); 客观分析海气通量计划(OAflux)海-气通量资料(Jin *et al*, 2008); Quikscat 海表面风(Ebuchi, 2001)和分辨率约为 20km 的基于日本区域模式的再分析资料(Yeung *et al*, 2005); 另外, 本文还采用了 TRMM 反演的逐 3h 的瞬时降水率资料(Kummerow *et al*, 1998)。

3 结果与分析

3.1 对“云娜”路径和强度的模拟

图 3 给出的两个实验模拟的热带气旋“云娜”的路径和实况, 模式对“云娜”的路径模拟较为一致, 控制实验和耦合实验都略偏北, 距离误差最大均为 150km 左右(48h), 接近登陆时, 距离误差减小, 特别是耦合实验 72h 时距离误差 80km, 而控制实验后期西移速度偏快, 距离误差偏高。总体而言, 海-气相互作用的考虑, 对热带气旋“云娜”的路径影响不大, 这与之前很多相关工作的结论一致(Zhu *et al*, 2006; 蒋小平等, 2009)。

从对热带气旋“云娜”的强度模拟结果(图 4)来看, 两个实验都基本模拟出“云娜”增强, 成熟到登陆后衰减 3 个阶段。但动态海洋的引入对热带气旋“云娜”的强度模拟有很大的影响。单独大气实验在 18h 之后迅速增强, 直至 54h 达到最强, 近中心最大风速 65m/s ,

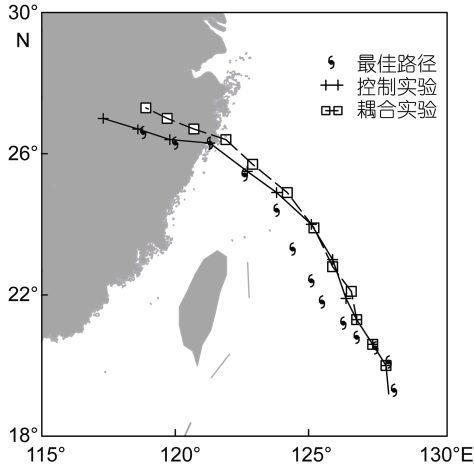


图3 模式模拟的2004年8月10日00时—2004年8月13日00时热带气旋“云娜”的路径和“最佳路径”
Fig.3 The simulated and best track to tropical cyclone Rananim from 00 UTC 10 Aug 2004 to 00 UTC 13 Aug 2004

海平面中心气压 905hPa, 大大强于同期实况; 而耦合实验模拟的“云娜”强度在 42h 达到峰值, 近中心最大风速 49m/s, 海平面中心气压 942hPa, 之后保持这一强度直到登陆后衰减, 这与实况十分接近。相比单独大气实验, 耦合实验模拟的“云娜”峰值强度低 32hPa, 最大风速相差 16m/s, 这一结果与 Zhu 等(2006)模拟的飓风“Bonnie”强度结果接近。

3.2 对海-气耦合合理性的验证

由于本文中所谓海-气耦合仅考虑了 SST 的变化对大气的影 响, 因而海洋热力状况的模拟, 特别是 SST 对热带气旋的响应是耦合模式中海-气相互作用是否合理的主要指标。图 5 给出了耦合实验模拟的 48h 的 SST 分布与 TMI 的 SST 比较。可以看到, 耦合实验模拟的 SST 分布与 TMI 的 SST 十分接近, 特别是对热带气旋经过附近区域的降温的模拟。实况中在热带气旋路径右侧有两个明显的降温大值区, 其

一位于 23.5°N, 128.5°E, 另一个位于 48h 热带气旋中心右侧, 最大降温均在 3°C 左右。在靠近浙江省沿海地区, 耦合模式模拟的降温偏大, 这可能是由海洋模式对近岸的浅水区域热力结构刻画不足所致(蒋小平等, 2009)。图 6 给出了图 5 中耦合实验模拟的“云娜”路径上各点 SST 与 TMI 的 SST 以及控制实验的 SST 的差异, 结果表明耦合实验模拟的 SST 无论绝对值还是降温峰值分布均与实况接近, 而控制实验的 SST 来自 NCEP 的初始场, 比实际 SST 明显偏高。

SST 的改变主要是通过海表面热量通量的改变对大气产生影响。图 7 给出了控制实验和耦合实验模拟的 24—48h 平均的海表面潜热和感热通量与相同时段 OAF flux 分析的热量水平分布。与 OAF flux 的结果一致, 热带气旋中心附近为热量交换的大值区, 海表面的热交换主要以潜热通量为主, 且大值区在热带气旋路径的右侧。控制实验模拟的潜热通量最大值达到 400W/m², 耦合实验模拟的近热带气旋中心潜热通量约为 200W/m², 与 OAF flux 的分析结果更为一致; 感热通量也有类似的特征, 但两组实验模拟的感热通量相比 OAF flux 普遍偏弱。

控制实验模拟的海-气热通量明显强于耦合实验, 这一方面与耦合实验中海表面 SST 的下降有关, 但近地面的风速的差异也是决定海-气通量的重要因子。图 8 给出了 CTL 实验和 ASC 实验模拟的 10m 风和日本再分析资料的 10m 风以及 Quikscat 近地面风场的结果对比。CTL 实验模拟的 10m 风场强于 ASC, 8 级风区域明显偏大, 内核极端风速比 ASC 实验高 1 个等级(与图 4 的结果对应)。从与日本的再分析资料的对比来看, ASC 实验模拟的 10m 风的 8 级风区域和内核风速都更接近实况; 但 2 个实验的内核最强风的分布均与日本再分析资料的结果有很大差异, 模拟

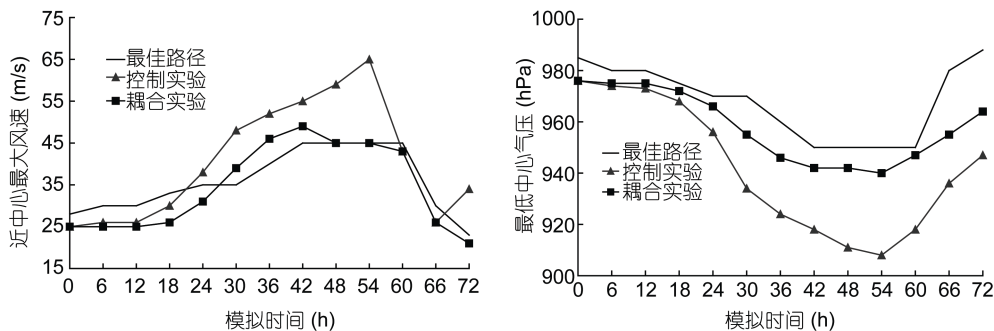


图4 两组实验对“云娜”强度的模拟
Fig.4 Observed and simulated intensity of Rananim over 72h

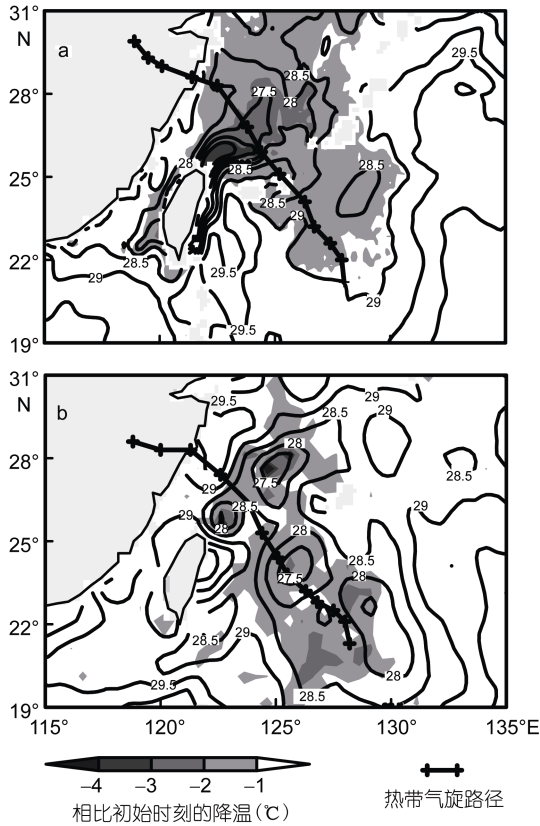


图 5 耦合实验模拟的 48h SST 分布(ASC, a)和实时的 SST(TMI, b)对比(°C)

Fig.5 Comparison in SST after 48 h between the simulated by ASC (a) and the observation (b)

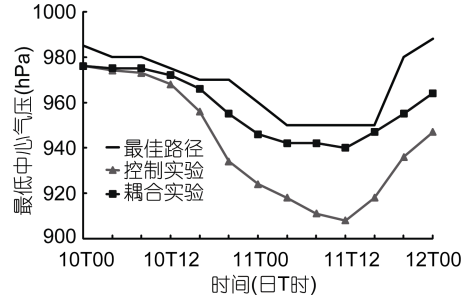


图 6 积分 48h 后, 耦合实验模拟的“云娜”路径各点 SST 与 TMI SST 和控制实验(初始 NCEP SST)的比较

Fig.6 Comparison in the simulation for SST after 48 h by ASC, TMI, and CTL (initial NCEP SST) at Rananim's path

的最大风速均出现在热带气旋北侧, 而日本再分析资料的最大风速出现在热带气旋东南侧。Quikscat 的风场要更弱一些, 这与这一资料本身的特点有关(Ma *et al*, 2010), 但从 Quikscat 风场反应的热带气旋近地面风场水平结构来看, 其最大风速正位于北侧, 表明 2 个实验模拟的热带气旋的不对称结构与观测接近, 而日本再分析资料可能因为模式分辨率等原因, 其风场结构与实况有一定差异。另外, 2 个实验模拟的 10m 风场结构也与图 7 给出的 OAFflux 通量的北高南低的水平分布有很好的对应关系, 这从另外一个角度说明模式模拟的热带气旋风场分布的可靠性。

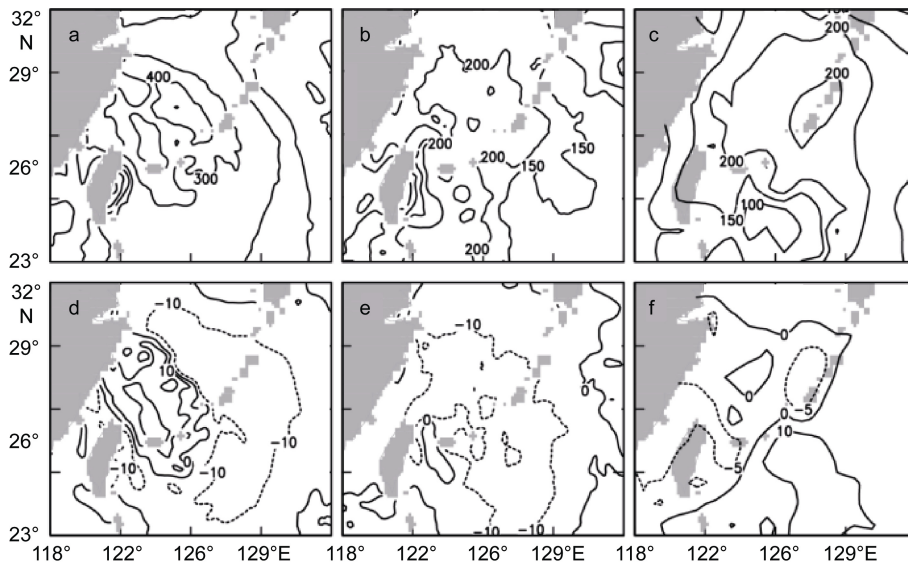


图 7 各实验模拟的日平均海表热通量和 OAFflux 的通量分布(W/m^2)

Fig.7 Comparison in the distribution of daily mean surface fluxes from CTL(a,d), ASC(b,e) and OAFflux(c,f), where a, b, c is latent heat flux and d, e, f is sensible heat flux (W/m^2), respectively

a: CTL 实验的潜热通量; b: ASC 实验的潜热通量; c: OAFflux 的潜热通量; d: CTL 实验的感热通量; e: ASC 实验的感热通量; f: OAFflux 的感热通量

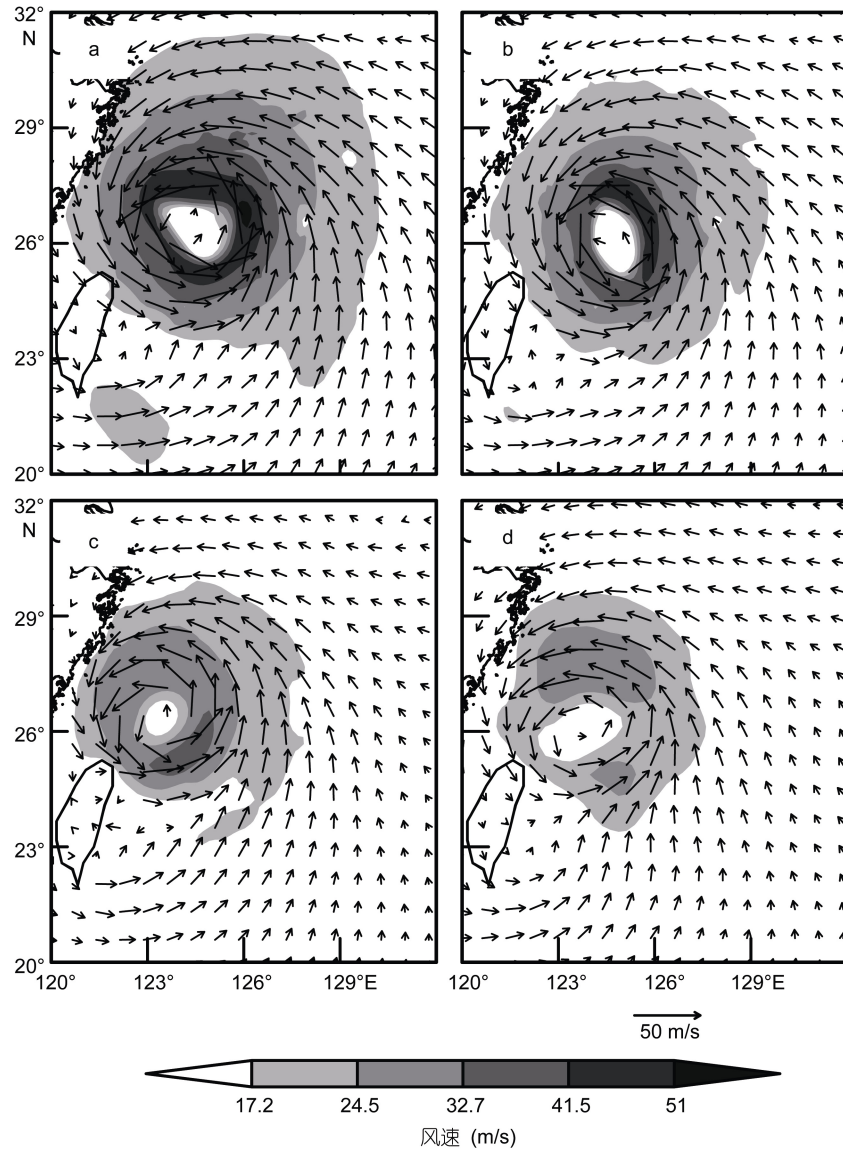


图 8 2004 年 8 月 12 日 00 时(UTC)的 10m 风场水平分布

Fig.8 Distribution of 10-m wind at 00 UTC 12 Aug 2004, where a, b is simulate by CTL and ASC, and c, d is from JRA and Quikscat, respectively

3.3 海-气相互作用对热带气旋结构的影响

在海-气耦合实验中, 由于下垫面受强风影响, SST 发生改变, 并通过改变海-气热通量影响热带气旋热力结构, 进而影响了热带气旋的动力结构。图 9 给出了 CTL 实验和 ASC 实验模拟的 48h 热带气旋“云娜”平均轴向风场结构。两组实验均模拟出一个强台风的典型风场结构, 最大风速半径均为 50km 左右, 从近地面到 850hPa 存在明显的入流(辐合)层, 而在 200hPa 左右, 则有明显的出流(辐散)层, 但两者的平均入流和出流差异并不明显; 2 组实验的主要差异表现为热带气旋眼区 CTL 实验模拟的切向风明显强于 ASC 实验。(刘磊等, 2011)利用热散度, 即 200hPa 和

850hPa 的散度差反应热带气旋对流发展的强弱, 正值代表上升气流, 而负值代表下沉气流。图10 给出了 2 组实验模拟的 12h 和 30h 热散度, 从 12h 的结果来看, 2 组实验差别不大, 热散度正、负值交替, 呈螺旋状分布, 总体分布较为零散; 到 30h, 无论正值还是负值, 均呈带状分布, CTL 实验热散度正值基本闭合, 相比 12h 有显著增强, 特别在热带气旋北部有大片的强上升气流存在, ASC 实验与 CTL 实验结果有很大差异, 主要表现为总体的对流上升较弱, 非对称性更强。2 组实验模拟的对流的不同分布反映到热带气旋降水上表现为降水强度和不对称结构的差异, 图 11 给出了两个实验模拟的 2004 年 8 月 11 日 06 时的小

时平均降水和 TRMM 资料反演的该时刻的平均降水率的比较。ASC 实验相比 CTL 实验的主要差异是热

带气旋眼区降水强度明显减弱, 特别是热带气旋前进的前方强降水区明显缩小, 这与图 10a, 图 10b

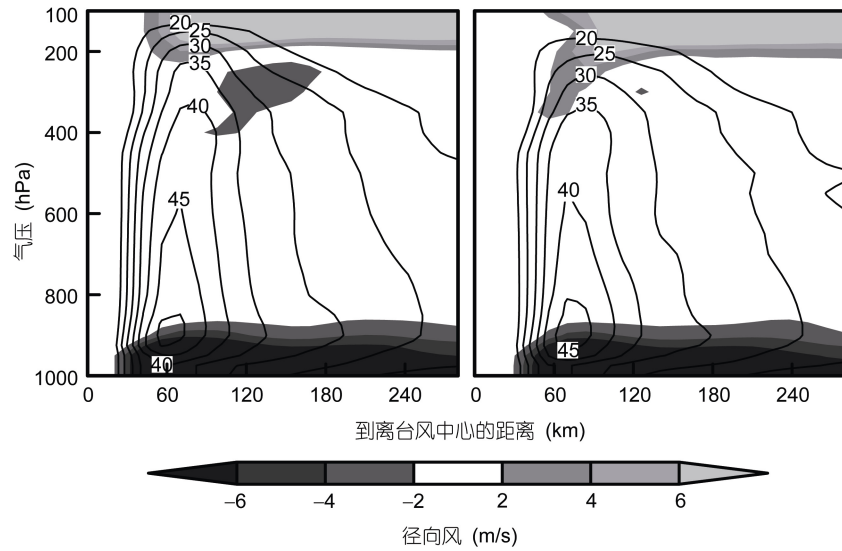


图 9 模拟的 2004 年 8 月 12 日 00 时(UTC)热带气旋“云娜”的轴对称风场
Fig.9 Simulated Axisymmetric wind of CTL and ASC at 00 UTC 12 Aug 2004

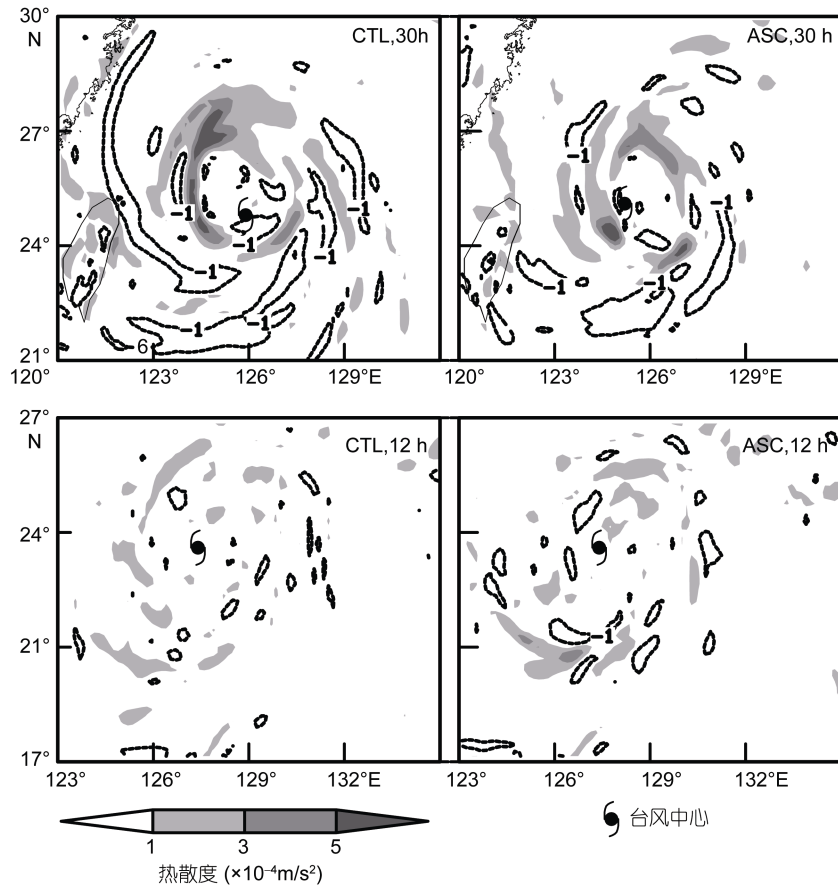


图 10 2 组实验不同的模拟时间得到的热散度($\times 10^{-4} \text{m/s}^2$)
Fig.10 Comparison of thermal divergence($\times 10^{-4} \text{m/s}^2$) simulate by CTL and ASC

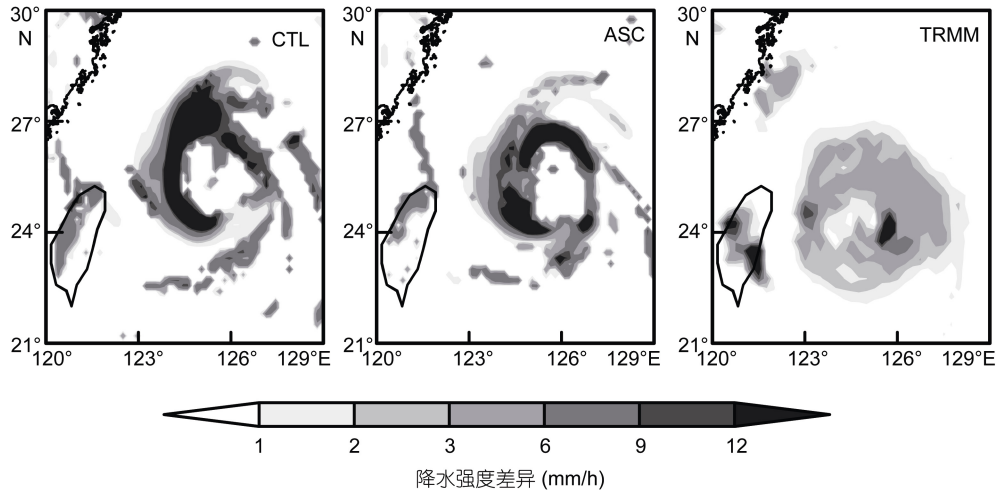


图 11 2 组实验模拟的和 TRMM 反演的 2004 年 8 月 11 日 06 时(UTC)瞬时降水强度的差异

Fig.11 Comparison of instantaneous precipitation intensity from CTL, ASC and TRMM at 06 UTC 11 Aug 2004

的结果一致,也与 TRMM 资料反演的降水率的结果更为接近。需要指出的是,由于模式的水平分辨率的局限等原因,无论是 CTL 实验还是 ASC 实验,对热带气旋“云娜”的降水的模拟与实况有较大差异。

4 结论和讨论

本文基于 1 个业务运行的区域热带气旋模式 GRAPES-TCM,引入 OASIS 耦合器和 1 个成熟的海洋环流模式 ECOM-si,初步建立了一个可进行热带气旋数值模拟的区域海-气耦合模式。以 0414 热带气旋“云娜”作为研究个例,对热带气旋条件下耦合模式的性能进行了检验,初步评估了耦合模式的引入对热带气旋“云娜”的强度和结构模拟的影响,主要结论包括:

1)相比控制实验,耦合实验对热带气旋“云娜”的路径影响不大,但可显著改善对“云娜”强度的模拟;通过控制实验和耦合实验模拟的 10m 风场与实况的对比,发现耦合实验不但改善了对 10m 风速强度的模拟,而且对其非对称结构的模拟也有改进。

2)在耦合实验中,热带气旋“云娜”过境导致附近海区最高达 3°C 的降温,这与 TMI 反演的 SST 的结果一致;SST 的下降,引起了海-气间潜热通量和感热通量的减弱,与控制实验相比,耦合实验模拟的海-气热通量与 OAFflux 的分析结果更为接近。

3)耦合实验模拟的热带气旋“云娜”的切向风明显弱于控制实验,另一方面,受下层入流和上层出流的控制,耦合实验模拟的台风眼壁的对流活动也明显弱于控制实验,且有更明显的不对称性;2 个实验

对“云娜”降水结构的模拟均比实况偏强,但耦合实验削弱了热带气旋运动前方的虚假强降水,相比控制实验,模拟的降水结构更接近实况。

需要指出的是,虽然这一区域海气耦合模式是基于业务的区域热带气旋模式发展起来的,上述的模式验证和评估工作也为日后海-气耦合模式的业务化做了一些初步的尝试,但要将该模式应用于日常热带气旋数值预报仍有很多工作需要开展。首先,由于缺少可用的海洋环流资料,目前海洋的初始化仍然是初步的和粗糙的;其次,为了进一步评估该模式对热带气旋预报能力,有必要针对过往大样本热带气旋进行批量实验,综合检验动态 SST 的引入该模式预报水平的影响;另外,海-气相互作用事实上并不限于 SST 的变化对海-气热通量的改变,热带气旋条件下海洋粗糙度的改变也会影响海-气通量交换,而海洋飞沫进入大气,则会从另一方面影响海-气间能量的传输,这也是目前热带气旋条件下海-气耦合数值模拟研究的前沿问题。

参 考 文 献

- 史峰岩,朱首贤,朱建荣等,2000. 杭州湾、长江口余流及其物质净输运作用的模拟研究, I. 杭州湾、长江口三维联合模型. 海洋学报, 22(5): 1—12
- 朱建荣,朱首贤,2003. ECOM 模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用. 海洋与湖沼, 34(4): 364—374
- 沈 淇,朱建荣,端义宏等,2011. 西北太平洋环流和海温数值模拟. 华东师范大学学报(自然科学版), 6: 26—35
- 周天军,俞永强,宇如聪等,2004. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题. 大气科学, 28(6): 993—1007

- 邹立维, 周天军, 2012: 一个区域海气耦合模式的发展及其在西北太平洋季风区的性能检验: 不同大气分量的影响. 中国科学: 地球科学, 42(4): 614—628
- 刘 磊, 费建芳, 林霄沛等, 2011. 海气相互作用对“格美”台风发展的影响研究. 大气科学, 35(3): 444—456
- 蒋小平, 刘春霞, 莫海涛等, 2009. 利用一个海气耦合模式对台风 Krovanh 的模拟. 大气科学, 33(1): 99—108
- 黄立文, 吴国雄, 宇如聪, 2005. 中尺度海气相互作用对台风暴雨过程的影响. 气象学报, 63(4): 455—467
- 黄 伟, 梁旭东, 2010. 台风涡旋循环初始化方法及其在 GRAPES-TCM 中的应用. 气象学报, (3): 365—375
- 黄 伟, 端义宏, 薛纪善等, 2007. 热带气旋路径数值模式业务试验性能分析. 气象学报, 65(4): 578—587
- Bender M A, Ginis I, 2000. Real-case simulations of hurricane-ocean interaction using a high-resolution coupled model: Effects on hurricane intensity. Monthly Weather Review, 128(4): 917—946
- Bender M A, Ginis I, Kurihara Y, 1993. Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 98 (D12): 23245—23263
- Bender M A, Ginis I, Tuleya R *et al*, 2007. The Operational GFDL Coupled Hurricane–Ocean Prediction System and a Summary of Its Performance. Monthly Weather Review, 135(12): 3965—3989
- Blumberg A F, Mellor G L, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-dimensional coastal ocean models, 4: 1—16
- Chen C, Zhu J, Ralph E *et al*, 2001. Prognostic modeling studies of the Keweenaw current in Lake Superior. Part I: Formation and evolution. Journal of Physical Oceanography, 31(2): 379—395
- Chen D H, Xue J S, Yang X S *et al*, 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): general scientific design. Chinese Science Bulletin, 53(22): 3433—3445
- Ebuchi N, Graber H C, Caruso M J, 2002. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 19: 2049—2062
- Gopalakrishnan S, Liu Q, Marchok T *et al*, 2012. Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model: 2011 Scientific Documentation. In: Bernardet L ed. Developmental Testbed Center. NOAA Earth System Research Laboratory, and CIRES/University of Colorado, Boulder, CO: 36—42
- Hong S Y, Lim J O J, 2006a. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). J Korean Meteor Soc, 42(2): 129—151
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J, 2006b. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly Weather Review, 134(9): 2318—2341
- Jin X, Weller R A, 2008. Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and Sensible Heat Fluxes, Ocean Evaporation, and Related Surface Meteorological Variables Lisan Yu. OAFlux Project Tech Rep OA-2008-01
- Jordan C, Frank N L, 1964. On the influence of tropical cyclones on the sea surface temperature field. Florida State University: 614—622
- Kain J, 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, Meteor Monogr, 46: 165—170
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T *et al*, 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 15(3): 809—817
- Kurihara Y, Bender M A, Ross R J, 1993. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. Mon Wea Rev, 121: 2030—2045
- Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E *et al*, 1995. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. Mon Wea Rev, 123(9): 2791—2801
- Liang X, Wang B, Chan J C L *et al*, 2007. Tropical cyclone forecasting with model - constrained 3D - Var. I: Description. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133(622): 147—153
- Ma LM, Tan Z M, 2010. Tropical cyclone initialization with dynamical retrieval from a modified UWPBL model. Journal of the Meteorological Society of Japan, 88(5): 827—846
- Ren X, Perrie W, 2006. Air-sea interaction of typhoon Sinlaku (2002) simulated by the Canadian MC2 model. Advances in Atmospheric Sciences, 23(4): 521—530
- Schade L R, Emanuel K A, 1999. The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a simple coupled atmosphere-ocean model. Journal of the Atmospheric Sciences, 56(4): 642—651
- Stunder B J B, 1997. NCEP Model Output–FNL Archive Data. TD-6141, National Climatic Data Center. <http://www.arl.noaa.gov/fnl.php>
- Valcke S, 2006. OASIS3 user guide (prism_2-5). PRISM support initiative report, 3: 1—64
- Wentz F J, Gentemann C, Smith D *et al*, 2000. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds. Science, 288(5467): 847—850
- Yeung L, Chan H P, Lai E, 2005. Impact of radar rainfall data assimilation on short-range quantitative precipitation forecasts using four-dimensional variational analysis technique. In: The 11th AMS Conference on Mesoscale Processes. Albuquerque, New Mexico, USA: 1—7
- Zhu J, Chen C, Ralph E *et al*, 2001. Prognostic modeling studies of the Keweenaw current in Lake Superior. Part II: simulation. Journal of Physical Oceanography, 31(2): 396—410
- Zhu T, Zhang D L, 2006. The impact of the storm-induced SST cooling on hurricane intensity. Advances in Atmospheric Sciences, 23(1): 14—22
- Zou L W, Zhou T J, 2013. Can a regional ocean–atmosphere coupled model improve the simulation of the interannual variability of the western north pacific summer monsoon? J Climate, 26: 2353—2367
- Zou X, Xiao Q, 2000. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. Journal of the Atmospheric Sciences, 57(6): 836—860

A REGIONAL AIR-SEA COUPLED MODEL: VERIFICATION AND SIMULATION ON TYPHOON RANANIM

HUANG Wei^{1,2}, ZHENG Yun-Xia^{1,2}, SHEN Qi³, YU Run-Ling^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclone, CMA, Shanghai 200030, China*; 2. *Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030, China*; 3. *Shanghai Estuarine Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China*)

Abstract Based on a regional tropical cyclone model GRAPES-TCM, ECOM-si ocean circulation model and OASIS coupler, a regional air-sea coupled model is constructed. Using the model's simulation results on the tropical cyclone Rananim, the performance of air-sea coupled model was verified. The results show that intensity of Rananim simulated by coupled model is more accurate than that by single atmospheric model. The single atmospheric model simulates more intense surface wind while the intense and asymmetric structure of surface wind field is much close to the observation. In the coupled experiment, the decreasing of sea surface temperature caused by tropical cyclone Rananim is very close to the observation. The decline of SST weakens the air-sea heat flux than that of atmospheric model that is much close to analysis heat flux. The adoption of the ocean model causes the change of the structure of Rananim including the weakening of tangential wind and the location of most intense convection that leads to the change of precipitation structure of typhoon.

Key words air-sea couple; tropical cyclone; sea surface temperature; heat flux