

# 台风引起南海海表面降温的位置变化特征\*

杨晓霞<sup>1,2,3</sup>, 唐丹玲<sup>2,3,1</sup>

(1.中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2.中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 海洋生态环境遥感中心, 广东 广州 510301; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 台风过后通常会在上层海洋引起冷迹, 即路径附近的海表面温度(sea surface temperature, SST)降低。本文利用多种卫星数据分析了12年(1998—2009)内经过中国南海的92个台风所引起的海表降温位置的分布特征。通过分析逐日微波遥感SST数据发现, 64个台风(69.6%)引起了明显降温(降温 $>2^{\circ}\text{C}$ )。其中, 43个台风(46.7%)引起的最大降温位于台风路径右侧; 13个台风(14.1%)引起的降温出现在路径附近; 同时还有8个台风(8.7%)引起的最大降温明显位于路径左侧。台风引起的最大降温出现的位置主要集中在路径左右两侧100km范围内。统计分析表明台风之前存在于上层海洋环境的冷涡, 特别是强冷涡, 在台风引起的海表面降温和位置分布中可能起着重要的作用。

**关键词:** 台风冷迹; 海表温度; 冷涡; 南海

中图分类号: P731.11; P732.31 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)04-0026-06

## Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea

YANG Xiao-xia<sup>1,2,3</sup>, TANG Dan-ling<sup>2,3,1</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, China; 2. Research Center for Remote Sensing of Marine Ecology & Environment, Key Laboratory of Environment Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 3. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Typhoons can induce cooling wakes at the ocean surface, causing low sea surface temperature (SST) along their tracks. In this study, multi-satellite data are used to investigate the location of the cooling wake induced by 92 typhoons passing through the South China Sea (SCS) from 1998 to 2009. Analysis of the sequential merged microwave SST data revealed that, 64 typhoons (69.6%) induced SST cooling of more than  $2^{\circ}\text{C}$ , 43 typhoons (46.7%) generated SST cooling on the right-hand side of the track, 8 typhoons (8.7%) induced SST cooling on the left-hand side of their tracks, and 13 typhoons (14.1%) induced cooling wakes behind their tracks. Cooling wakes induced by typhoons mainly located within 100km along the side of typhoon tracks. It is showed that cold core eddies, particularly strong cold eddies, existed in the pre-typhoon oceanic environment, may play a significant role in setting the strength and location of SST cooling induced by typhoons.

**Key words:** cooling wake of typhoon; sea surface temperature; cold eddy; South China Sea

海表面温度(sea surface temperature, SST)对于台风的产生、演化和强度有重要的作用, 上层海洋与台风之间的相互作用在过去的几十年里备受关注<sup>[1-5]</sup>。台风形成后由于中心低气压和巨大的风应力,

在海洋上层引起强烈混合和流辐散。台风通过大风夹卷使混合层深度加深, 台风诱导的上升流强迫表层海水重新分布, 使得海表温度下降<sup>[1]</sup>。台风路径附近的海表面温度下降会导致海洋向大气输送的热通

收稿日期: 2010-03-28; 修订日期: 2010-05-18。卢冰编辑

基金项目: 国家自然科学基金(40976091, 31061160190); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-226); 广东省自然科学基金(8351030101000002); 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划(KZCX2-YW-T001)

作者简介: 杨晓霞(1981—), 女, 河北省石家庄市人, 硕士研究生, 目前从事海洋生态环境遥感研究。

通信作者: 唐丹玲, 主要从事海洋生态环境遥感方面的研究。E-mail: lingzistdl@126.com, http://lingzis.51.net/index.html

\* 感谢美国伍兹霍尔海洋研究所黄瑞新教授的建议和指导; 感谢中国科学院南海海洋研究所谢晓辉博士的建议和帮助。

量减少从而减弱台风的强度, 逐步形成一个负反馈的过程<sup>[6]</sup>。因此, 台风过程是一个伴随着强烈的海气相互作用的复杂过程。

台风引起的海洋上层强烈混合导致 SST 降低, 同时也将大量营养物质带到海洋表层, 促进浮游植物生长形成大面积藻华, 增加海洋初级生产力, 对海洋生态系统有极为重要作用<sup>[7-10]</sup>。研究台风引起海表面降温位置的变化特征, 对海洋生态和海洋环境动力等的研究都具有重要意义。

台风引起的 SST 降低程度主要取决于台风自身的强度、大风半径、移动速度以及先于台风存在的局地海洋环境条件<sup>[11-15]</sup>。台风通常能够引起的海表降温幅度有 3—6<sup>[8-9,16]</sup>, 但在极端的条件下, 更大幅度的降温也时有发生。例如, 在西北太平洋的南海, 台风启德(Kai-Tak, 0004)和玲玲(Lingling, 0123)经过后所引起的降温幅度都高达 9<sup>[7,17]</sup>以上。由于台风路径右侧主导风应力的强迫作用, 强风夹卷引起路径右侧垂直混合更强, 台风过后往往造成其路径右侧出现最大的 SST 降低<sup>[18-19]</sup>。尽管如此, 也有少量关于最大降温出现在路径左侧的报道。Sadhuram<sup>[20]</sup>研究了 1999 年经过孟加拉湾的超级台风奥里萨(Orrisa), 发现该台风在海岸附近引起的最大降温中心出现在其路径的左侧。另外, 也有一些台风的最大降温出现在路径附近<sup>[21]</sup>。

南海是太平洋西部亚洲东岸最大的边缘海, 热带气旋活动频繁, 平均每年有 10.3 个经过<sup>[22]</sup>。南海上层海洋, 特别是 SST 对台风的响应在近年来一直是研究热点之一。朱建荣等<sup>[23-24]</sup>通过数值模拟研究了不同移动速度的台风, 以及不同的混合层深度和温跃层层结强度条件下海洋对台风的响应, 模拟结果显示了 SST 对台风响应的不对称性。Jiang 等<sup>[25]</sup>模拟了上层海洋对南海台风科罗旺(Krovanh, 0312)的响应, 发现最大降温出现在路径右侧大约 80km 的位置, 同样具有明显的右偏性。除了通过数值模拟研究 SST 对台风过程的响应, 有学者也利用卫星遥感数据对台风引起的 SST 变化做了许多观测研究<sup>[26-27]</sup>。

目前对南海台风所引起 SST 变化的观测和模拟已经很多, 但大多数都限于对一些个例的研究。为了对南海台风所引起的降温特征有一个更全面的了解, 在这篇文章中, 我们通过统计分析 1998—2009 年 12 年内的多种卫星数据来揭示经过南海的台风所引起的 SST 变化特征(图 1)。

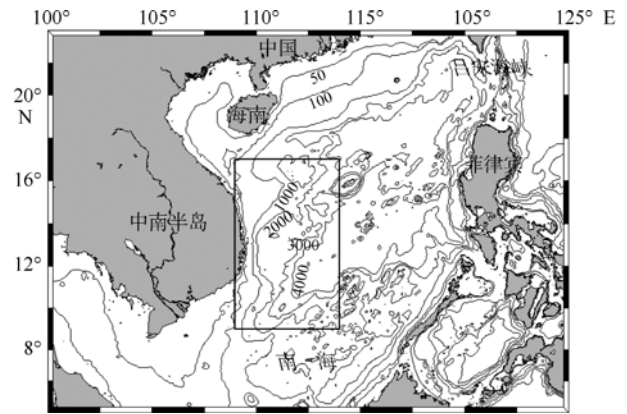


图 1 研究区域的位置和海洋环境

矩形框代表中国南海西部海域

Fig. 1 Location and marine environment of the study area; box indicates the western SCS

## 1 数据与方法

微波能够穿透云雾而衰减很小, 可以日夜观测, 成为一种对海洋表面进行连续观测的手段。相对于红外手段观测海表温度, 微波观测有着明显的优势<sup>[28]</sup>。微波成像仪不受云和气溶胶的影响, 能够很好地应用于恶劣天气条件下的海洋研究。本文结合微波 SST 数据, 海平面高度距平(sea surface height anomalies, SSHA)和台风数据来分析南海 SST 对台风的响应特征。1998 年 1 月到 2002 年 5 月采用热带测雨卫星上搭载的微波成像仪 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager (TMI) 获取的海表面温度数据, 2002 年 6 月到 2009 年 12 月采用微波成像仪和高级微波扫描辐射计 TMI-AMSRE 获取的海表面温度数据。其时间分辨率是 1d, 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 其中 TMI 数据资料的空间跨度为  $40^\circ\text{N}—40^\circ\text{S}$ , 数据偏差为 0.12<sup>°</sup>; TMI-AMSRE 数据资料的空间跨度为全球覆盖, 数据偏差为 0.01<sup>°</sup>。数据从 <http://www.remss.com/> 获得。

海平面高度距平资料为 1998 年 1 月到 2009 年 12 月的 TOPEX/Poseidon、Jason 和 ERS1/2 等高度计的融合产品, 其时间间隔为 7d, 空间分辨率为  $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ , 测量误差 2—3cm (<http://www.aviso.oceanobs.com/>)。台风数据由日本气象厅 Japan Meteorological Agency(JMA) 提供。数据包括台风的中心位置、最低气压、最大风速、平均移动速度、持续时间等(<http://agora.ex.nii.ac.jp/>)。

## 2 结果

### 2.1 台风位置

本文所考虑的台风风速  $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 据此, 1998

到 2009 年的 12 年内经过南海的台风总共有 92 个。其中, 在西太平洋生成的台风有 58 个; 南海海域生成的台风有 34 个(占到所研究台风总数的 1/3 以上)。另外, 92 个台风里面有 32 个经过了南海西部附近海域(图 1)。

## 2.2 最大降温位置

对微波 SST 逐日数据资料进行统计分析发现, 92 个台风中有 64 个台风经过南海后, 其路径附近海域的 SST 发生了明显的变化(降温  $2^{\circ}\text{C}$ )。其中有 43 个台风引起的最大降温位置出现在路径右侧; 13 个台风引起的降温位置没有明显倾向性(包括降温位置位于路径附近的台风和降温位置不易确定的较复杂的打转台风); 另外有 8 个台风引起的最大降温明显出现在台风路径的左侧, 这与更为普遍的最大降温出现在路径右侧相反。其余 28 个台风经过南海后并没有引起  $2^{\circ}\text{C}$  的明显降温。

对于出现在台风路径左侧的最大降温现象, 进一步分析发现这些降温大都出现在海岸附近, 水深超过 1000m 的海域。特别地, 在 8 个左侧降温的台风中, 除了台风天鹰(Washi, 降温出现在海南岛东南海岸附近海域)和康森(Conson, 降温出现在菲律宾西北部的附近海域)外, 其余 6 个最大降温出现在路径左侧的台风均集中在南海西部附近海域。8 个台风的生成海域, 中心最低气压、最大风速、平均

移动速度、最大降温幅度等信息见表 1。

## 2.3 台风引起的 SST 变化

按照最大降温相对于台风路径出现的 3 个不同位置选取了台风玲玲(Lingling, 0123, 最大降温在路径右侧)、启德(Kai-Tak, 0521, 最大降温在路径附近)、黄蜂(Vongfong, 0214, 最大降温在路径左侧)来分析台风通过研究区域后所引起的 SST 变化(表 2)。

台风玲玲是 2001 年 11 月 6 日 00 时(UTC 时, 下同)生成于菲律宾外海的热带低压, 11 月 6 日 18 时加强为台风。经过研究区域后, 在其路径右侧出现了明显的降温(图 2a), 降温中心距离台风路径大约 100km(图 2d)。台风启德是 2005 年 10 月 28 日 06 时南海生成的热带低压, 10 月 29 日 00 时加强为台风, 在南海活动了近 100h。台风启德在其路径附近造成了明显的降温(图 2b), 而降温的位置相对于路径没有明显的倾向性(图 2e)。台风黄蜂是 2002 年 8 月 15 日 06 时生成于南海的热带低压, 8 月 18 日 00 时加强为台风, 在南海活动了 102h 后于湛江登陆。台风黄蜂过后(8 月 19 日)在其路径的左侧出现了大面积的降温区域(图 2c)。在该台风的影响下, 降温持续了大约 10 天。通过比较台风形成前一天的 SST 和台风过程中或台风过后的最低温度, 从而得到台风经过研究区域前后的 SST 差异(图 2d, e, f)。

表 1 路径左侧降温的台风统计信息

Tab. 1 Statistics of typhoon-induced SST cooling on the left-hand side of the track

台风编号	台风名称	生成海域	降温位置	最低气压 hPa	最大风速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	平均移速 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	最大降温幅度
199812	奇普 Chip	南海	南海西部	994	20.6	11.2	2.4
200011	格美 Kaemi	南海	南海西部	985	20.6	18.9	4.8
200214	黄蜂 Vongfong	南海	南海西部	985	20.6	20.7	5.70
200404	康森 Conson	南海	菲律宾西北	960	41.2	23.4	4.05
200508	天鹰 Washi	南海	海南岛附近	985	23.1	17.2	3.9
200516	韦森特 Vicente	南海	南海西部	985	23.1	32.4	3
200816	米克拉 Mekkhala	南海	南海西部	990	23.1	26.6	2.4
200916	凯萨娜 Ketsana	西太平洋	南海西部	960	38.6	19.6	5.85

表 2 台风玲玲、启德和黄蜂引起的海表降温

Tab. 2 SST cooling induced by typhoon Lingling, Kai-Tak and Vongfong

台风编号	台风名称	生成时间	结束时间	最低气压 hPa	最大风速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	最低温度	最大降温幅度		降温位置	
		年/月/日/时	年/月/日/时				图	图		
200123	玲玲 Lingling	2001/11/06/00	2001/11/12/12	940	41.2	22.20	图 2a	6.90	图 2d	右
200521	启德 Kai-Tak	2005/10/28/06	2005/11/02/06	950	20.6	20.70	图 2b	7.35	图 2e	左
200214	黄蜂 Vongfong	2002/08/15/06	2002/08/20/00	985	41.2	23.55	图 2c	5.70	图 2f	路径附近

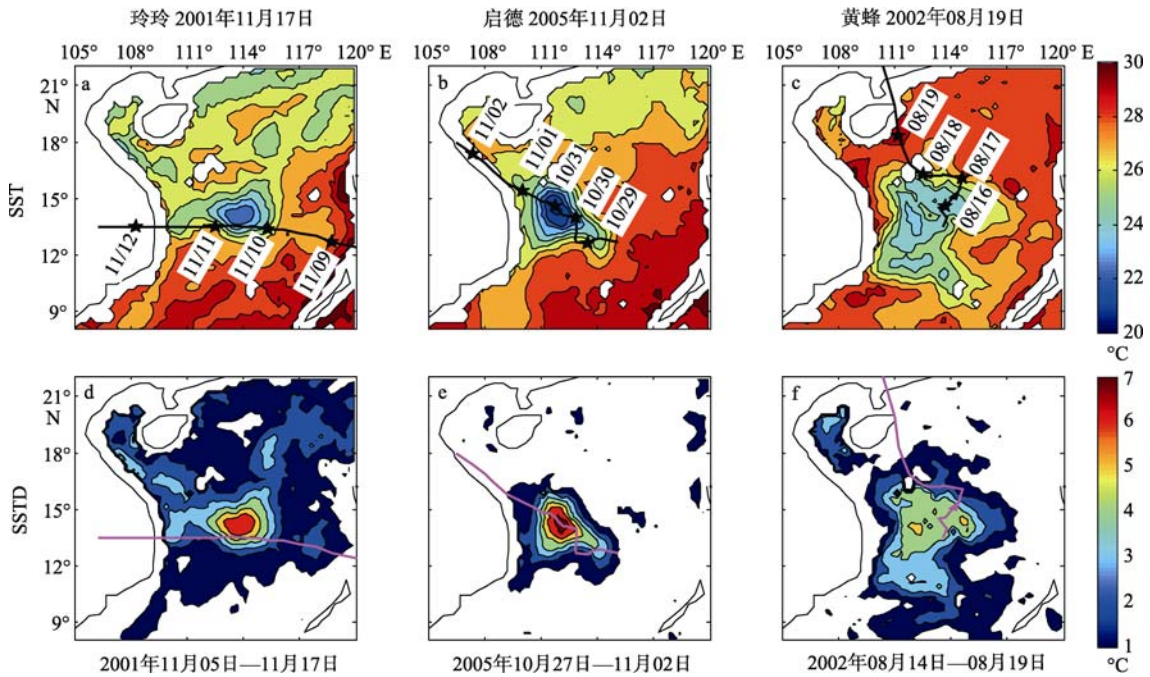


图 2 台风玲玲、启德和黄蜂引起的海表降温

a, b, c 为台风经过研究区域后的 SST; d, e, f 为台风经过研究区域前后的 SST 差异

Fig. 2 SST cooling induced by typhoon Lingling, Kai-Tak and Vongfong

a, b, c: SST after typhoon passing through the study area; d, e, f: Differences of SST (SSTD) before and after typhoon passing through the study area

### 2.4 台风前后的海洋环境条件

在海表面高度距平图上负值代表气旋性涡，即冷涡。为了能够说明这些冷涡是台风形成前就存在的，本研究比较台风形成一周前与台风过后的 SSHA 数据。

台风玲玲形成前的一周(2001年10月31日)，已

经有一个明显的冷涡存在(图 3a)，冷涡中心(115°E, 14.5°N)附近的 SSHA 为-18cm，台风在其左侧大约 100km 处经过。台风过后(11月14日)，冷涡范围扩大，强度得到大幅加强，冷涡中心附近的 SSHA 达到-50cm(图 3d)，并且冷涡中心有向台风路径靠近的趋势(114.5°E, 14°N)，而位于其路径左侧的暖涡

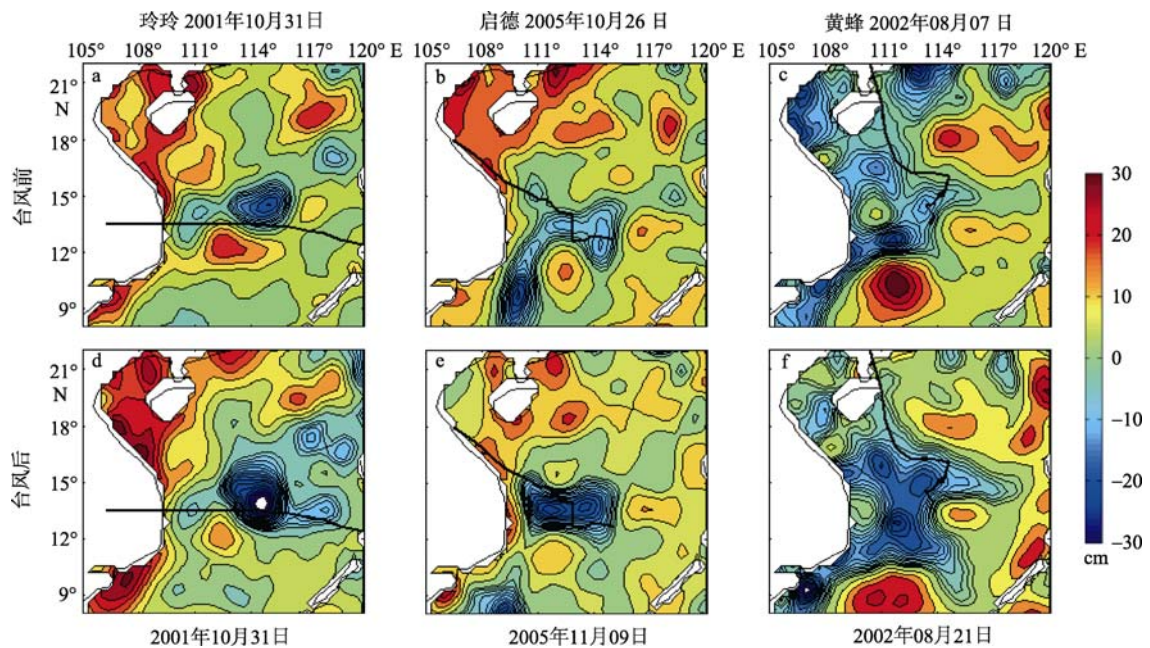


图 3 台风玲玲、启德和黄蜂经过研究区域前后的海面高度异常特征

a, b, c 为台风经过研究区域前的 SSHA; d, e, f 为台风经过研究区域后的 SSHA

Fig. 3 Characteristics of SSHA before and after typhoon Lingling, Kai-Tak and Vongfong passing through the study area

a, b, c: SSHA before typhoon passing through the study area; d, e, f: SSHA after typhoon passing through the study area

在台风经过后有所减弱。

台风启德经过研究区域前的一周(2005年10月26日),在其将经过的路径附近有弱冷涡存在,冷涡中心附近海域SSHA低于 $-10\text{cm}$ (图3b),台风从冷涡中心附近穿过后(11月9日),路径两侧冷涡均明显得到加强,暖涡有所减弱(图3e)。

同样,台风黄蜂形成一周前(2002年8月7日),在其将经过的路径左侧海域有大面积的冷涡存在,两个冷涡中心靠近路径,中心附近的SSHA低于 $-12\text{cm}$ (图3c)。台风经过后(8月21日),冷涡得到明显加强,其中心附近海域的SSHA达到 $-20\text{cm}$ ,路径右侧的暖涡稍有减弱(图3f)。另外7个最大降温出现在路径左侧的台风,通过对比它们发生前后的SSHA,同样可以发现在台风到来前均有不同强度的冷涡存在于路径左侧,台风过后冷涡得到不同程度的加强(图略)。

### 3 讨论

#### 3.1 台风前的海洋环境作用

SSHA的观测结果表明台风引起的最大降温位置与先于台风存在于上层海洋的中尺度冷涡有关。为了明确先于台风存在的冷涡与最大降温出现的位置关系,从92个台风里面选取降温 $2^{\circ}\text{C}$ ,并且与其路径附近的冷涡发生明显相互作用的31个台风,分别计算了冷涡中心区域和最大降温中心区域到台风路径的最近距离,定义在路径左侧为负,右侧为正,其结果见图4。当冷涡中心位于台风路径右侧(图4的右侧),台风引起的最大降温通常会出现在路径的右侧(图4第1象限),一般不会出现路径的左侧(图4第4象限,31个台风中没有出现这样的案例)。而当冷涡中心位于路径左侧时(图4的左侧),大部分的最大降温出现在了路径左侧(图4第3象限),也有少数台风引起的最大降温出现在路径附近或者偏右(图4第2象限)。当冷涡中心出现在台风路径上时,也就是台风穿过冷涡中心区域时,最大降温出现的位置就与台风的强度和移动速度有很大的关系,3种位置均可能存在。很明显,中尺度冷涡在台风引起海表面降温位置的分布中起着非常重要的作用。可能的原因分析如下:由于冷涡所在区域的混合层相对周围海域较浅,海洋的热力学结构不稳定,经过台风的作用后,冷涡得到进一步加强,不稳定性就更明显,混合层以下的冷水就更容易被带到海面上来,从而引起海表面温度的下降。特别地,当存在于路径左侧的冷涡作用超过右侧主导风应力对海表

面的强迫时,就容易造成左侧降温明显大于右侧,而两者作用均衡时,最大降温就可能出现在路径附近。

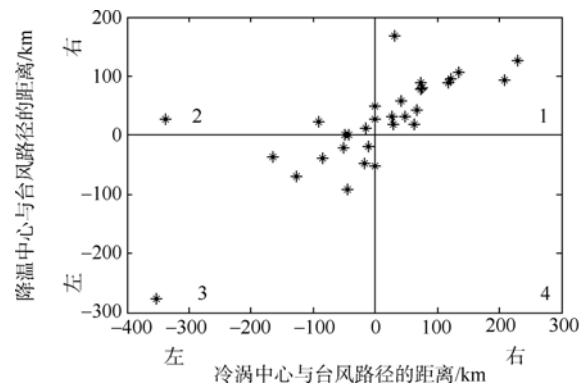


图4 冷涡中心位置与台风最大降温的位置关系

Fig. 4 Relationship between the center location of cold eddy and the largest SST cooling

另外,台风所引起的最大降温出现的位置主要集中在路径左右两侧 $100\text{km}$ 范围内,而对台风降温起着明显作用的冷涡也集中该范围之内。冷涡中心越靠近台风路径,最大降温出现的位置也越靠近路径,冷涡中心距离台风路径越远,对台风的降温影响越弱。

#### 3.2 台风自身条件对降温位置的作用

上层海洋对台风的响应除了受台风前的海洋环境条件的影响外,还受其他诸如台风的强度、移动速度以及大风半径等自身条件的作用<sup>[1,5,11]</sup>。有学者指出台风通常会引起路径右侧海表降温是由于路径右侧主导风应力的强迫作用<sup>[1,29]</sup>。本文的统计结果也显示92个台风里面有43个(46.7%)引起的降温出现在路径的右侧,而其中一部分台风在引起海表降温过程中并没有受到中尺度涡的作用。

台风引起的海表温度降低受到多种因素的影响,是一个极为复杂的过程,对于台风自身条件与先于台风存在的海洋环境条件对台风引起降温位置分布的作用,亟待深入分析。

### 4 总结

本文利用微波遥感SST数据分析了12年(1998—2009)内经过南海的92个台风所引起的海表降温空间分布特征。统计结果发现有46.7%的台风引起的降温出现在路径右侧,14.1%的台风引起的降温出现在路径附近,8.7%台风引起的降温在左侧,其他台风没有造成 $2^{\circ}\text{C}$ 以上的明显降温。

台风所引起的海表温度降低与台风的强度、移动速度以及台风形成前的海洋环境条件有关。本研究发现,先于台风存在于上层海洋的中尺度冷涡在

台风引起海表面降温的幅度和位置的分布中起着重要的作用。当冷涡位于路径右侧时, 在大风夹卷和冷涡的作用下, 台风引起的降温将会出现在路径右侧; 当台风穿过冷涡时, 同时受台风自身条件的影

响, 3种降温位置均有可能出现; 特别地, 当存在于路径左侧的冷涡很强时, 其作用可以超过右侧主导风应力的强迫作用, 在这种情况下, 最大降温就可能出现在台风路径的左侧或路径附近偏左。

## 参考文献

- [1] PRICE J F. Upper ocean response to a hurricane [J]. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11: 153–175.
- [2] SHAY L K, BLACK P G, MARIANO A J, et al. Upper ocean response to hurricane Gilbert [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(C12): 20227–20248.
- [3] EMANUEL K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686–688.
- [4] MANDAL M, MOHANTY U C, SINHA P, et al. Impact of sea surface temperature in modulating movement and intensity of tropical cyclones [J]. *Nat Hazards*, 2007, 41(3): 413–427.
- [5] BLACK W J, DICKEY T D. Observations and analyses of upper ocean responses to tropical storms and hurricanes in the vicinity of Bermuda [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, C08009, doi: 10.1029/2007JC004358.
- [6] CIONE J J, UHLHORN E W. Sea surface temperature variability in hurricanes: Implications with respect to intensity change [J]. *Mon Weather Rev*, 2003, 131(8): 1783–1796.
- [7] LIN I, LIU W T, WU C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone [J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(13), 1718, doi: 10.1029/2003GL017141.
- [8] ZHENG G M, TANG D L. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater runoff [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2007, 333: 61–74.
- [9] ZHAO H, TANG D L, WANG Y Q. Comparison of phytoplankton blooms triggered by two typhoons with different intensities and translation speeds in the South China Sea [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2008, 365: 57–65.
- [10] ZHAO H, TANG D L, WANG D X. Phytoplankton blooms near the Pearl River Estuary induced by Typhoon Nuri [J]. *J Geophys Res-Oceans*, 2009: 114.
- [11] BENDER M A, GINIS I, KURIHARA Y. Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model [J]. *J Geophys Res*, 1993, 98: 23245–23263.
- [12] SAKAIDA F, KAWAMURA H, TOBA Y. Sea surface cooling caused by typhoons in the Tohoku Area in August 1989 [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(C1): 1053–1065.
- [13] JAIME B, SHAY L K. Mixed layer cooling in mesoscale oceanic eddies during hurricanes Katrina and Rita [J]. *Mon Weather Rev*, 2009, doi: 10.1175/2009MWR2849.1.
- [14] ZHENG Z W, HO C R, KUO N J. Importance of pre-existing oceanic conditions to upper ocean response induced by Super Typhoon Hai-Tang [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L20603, doi: 10.1029/2008GL035524.
- [15] 刘广平, 胡建宇. 南海中尺度涡旋对热带气旋的响应: 个例研究[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(3): 308–315.
- [16] CHANG Y, LIAO H T, LEE M A, et al. Multisatellite observation on upwelling after the passage of Typhoon Hai-Tang in the southern East China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L03612, doi: 10.1029/2007GL032858.
- [17] SHANG S, LI L, SUN F, et al. Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to Typhoon Lingling, 2001 [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L10602, doi: 10.1029/2008GL033502.
- [18] BLACK P G. Ocean temperature changes induced by tropical cyclones [D]. Pa State Univ, 1983.
- [19] WADA A. Numerical simulations of sea surface cooling by a mixed layer model during the passage of Typhoon Rex [J]. *J Oceanog*, 2005, 61(1): 41–57.
- [20] SADHURAM Y. Record decrease of sea surface temperature following the passage of a super cyclone over the Bay of Bengal [J]. *Curr Sci*, 2004, 86: 383–384.
- [21] 蒋小平, 钟中, 赵思楠, 等. 南海热带气旋引起的海表面温度变化特征分析[J]. *气象科学*, 2008, 28(6): 614–618.
- [22] WANG G H, SU J L, DING Y H, et al. Tropical cyclone genesis over the South China Sea [J]. *J Mar Syst*, 2007, 68: 318–326.
- [23] 朱建荣, 秦曾灏. 海洋对热带气旋的响应研究: I 海洋对静止、移速不同的热带气旋响应[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(2): 146–153.
- [24] 朱建荣, 秦曾灏. 海洋对热带气旋的响应研究: 不同海洋热力结构下的情形[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 455–459.
- [25] JIANG X P, ZHONG Z, JIANG J. Upper ocean response of the South China Sea to Typhoon Krovanh (2003) [J]. *Dynam Atmos Oceans*, 2009, 47(1-3): 165–175.
- [26] WALKER N D, LEBEN R R, BALASUBRAMANIAN S. Hurricane-forced upwelling and chlorophyll a enhancement within cold-core cyclones in the Gulf of Mexico [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(18), doi: 10.1029/2005GL023716, 2005.
- [27] LIN I I, LIU W T, WU C C, et al. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling [J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(3), 1131, doi: 10.1029/2002GL015674.
- [28] WENTZ F J, GENTEMANN C, SMITH D, et al. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds [J]. *Science*, 2000, 288(5467): 847–850.
- [29] MAHAPATRA D K, RAO A D, BABU S V, et al. Influence of coastline on upper ocean's response to the tropical cyclone [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L17603, doi: 10.1029/2007GL030410.