

热带海气边界层观测研究若干进展

刘春霞 廖菲 赵中阔

(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘要: 热带海洋大气边界层在各种尺度的海气相互作用过程中占有非常重要的地位, 随着海洋上观测系统的不断发展, 关于海洋大气边界层的研究取得了较大的进展。在对近10年来热带海气边界层观测研究调研的基础上, 介绍了热带气旋强风天气条件下通量交换特征、湍流谱特征和边界层急流的主要研究进展。近年来的研究结果显示: 在强风条件下, 海面拖曳系数在风速增大到某一数值后, 不再随风速增大而增大; 在热带气旋的边界层内存在低空急流, 但是不同的研究工作中低空急流高度不一致。同时介绍了我国低纬度地区两种常见的天气系统海雾和南海季风背景下湍流和边界层观测的研究成果, 海雾边界层研究结果显示: 南海海雾与我国高纬度地区东海、黄海的海雾在大气边界层结构方面有着明显的差异, 其生成机理也有所不同; 西南季风系统对我国的天气气候影响非常大, 研究表明季风爆发前后的通量和边界层结构有着自身的特点。由此可以发现, 不同的天气系统下, 海洋大气边界层的通量交换和边界层结构不同, 使得我们在研究海气相互作用时要分别对待, 同时海气耦合模式的边界层参数化研究要有一定的针对性。最后提出我国未来的热带海洋气象观测应以点(观测站点)面(卫星)观测相结合, 获取不同天气条件下的界面通量交换和大气边界层特征, 以改进和完善数值预报模式, 提高海洋气象预报服务能力。

关键词: 热带气旋, 海雾, 季风, 通量交换, 边界层

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.06.003

Advances in Tropical air-sea boundary layer observations

Liu Chunxia, Liao Fei, Zhao Zhongkuo

(The Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080)

Abstract: The tropical marine atmospheric boundary layer has a very important role to play in various scale air-sea interaction processes. With the development of ocean observing systems, the research on the air-sea boundary layer has made a great deal of progress. This paper reviews the main progress of the tropical air-sea boundary layer observational studies over the past decade, which is the research of flux exchange characteristics, turbulence spectrum characteristics and boundary layer jet under the tropical cyclone high wind conditions. The study results show that the value of the drag coefficient at sea surface is not magnifying with the wind speed increasing when the wind reaches the value in strong wind conditions. And the results also illustrate that there is a low-level jet in the tropical cyclone boundary layer, but the jet height is not consistent in different research work. Meanwhile, the observational studies on the turbulence and boundary layer structure are proposed in two common weather systems such as sea fog and the South China Sea Monsoon over the low latitudes areas of China. The results show that the South China Sea fog is different from the East China Sea fog and Yellow Sea fog over high latitude regions in the atmospheric boundary layer structure and the generation mechanism of sea fog. The summer monsoon system has a great impact on the weather and climate in China. Studies have shown that the flux and boundary layer structure before or after the monsoon onset have their own characteristics. It is found that the flux exchange and boundary layer structure of the marine atmospheric boundary layer are different under different weather systems, so that these characteristics should be treated separately in the study of air-sea interaction, and boundary layer parameterization of air-sea coupled model should be targeted. Finally, in order to improve and refine numerical prediction model, a proposal of tropical marine meteorological observations is put forward, which will be the point (observation site) combined with surface (satellite) observations to explore the air-sea interface flux exchange and atmospheric boundary layer characteristics in the various weather conditions. And then the marine weather forecasting service capabilities will be further improved by these studies.

Keywords: tropical cyclone, sea fog, monsoon, flux exchange, boundary layer

收稿日期: 2011年4月25日; 修回日期: 2012年5月19日
 第一作者: 刘春霞(1968—), Email: cxliu@gmc.gov.cn
 资助信息: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB421501); 国家自然科学基金面上基金(41075051); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106036)

1 引言

海气边界层的海洋气象要素变化及海气界面通量和物质交换, 在各种尺度的海气相互作用中扮演了非常重要的角色。对于天气系统, 诸如热带气旋和海雾, 其发生、发展和消亡与海气相互作用, 特别是海气之间的能量交换有着密切的关系。热带气旋从海洋

获得能量而发展起来，同时热带气旋引起海洋的剧烈变化，这种海气之间的剧烈变化主要发生在海气边界层内，并严重地影响了热带气旋的强度和结构变化。海雾是发生在大气边界层内的灾害性海洋天气，其发生、发展和消亡受到了海气相互作用的直接影响。另一方面，海气相互作用，特别是海气之间通量和物质的交换影响了气候系统的变化，如厄尔尼诺等现象在大气环流和气候变化中占有重要的地位。因此，海气界面能量和物质交换以及海洋大气边界层结构已经成为近十几年来海洋和气象学家非常关注的问题，同时也是大气科学和物理海洋学研究的难点。

近十几年来许多大型科学试验，如全球能量和水分循环研究试验核心计划（GEWEX）、世界天气研究计划（WWRP）、THORPEX 太平洋亚洲区计划（Pacific Asian Regional Campaign T-PARC）、澳大利亚气象局ATCCIP（Australia Tropical Cyclone Costal Impact Program）计划和国际登陆热带气旋计划（ITCLP, International Tropical Cyclone Land falling Program）等国际科学试验都与海气相互作用以及热带气旋有关；尤其是CBLAST（the Coupled Boundary Layers Air-Sea Transfer）试验特别针对极端低风速和高风速情况，利用海气相互作用观测平台、飞机探测等手段，探测研究飓风和极端低风速条件下海气界面通量交换、飓风大气边界层结构和变化^[1, 2]。我国在登陆热带气旋和海气相互作用方面也开展了科学调查和现场观测试验。如2002年在我国广东沿海开展中国登陆台风外场科学试验CLATEX（China Land falling Typhoon Experiment），首次进行登陆台风的边界层观测试验^[3]。2009—2010年973项目“台风登陆前后异常变化及机理研究”实施了“台风登陆过程外场科学试验”，进行登陆台风界面通量交换、海洋气象要素变化、大气边界层结构等方面的探测。在908专项开展的“我国近海海洋综合调查与评价”大型科学调查研究中，海洋气象和海气界面通量观测是非常重要的一个方面。我国相关单位和部门也开展了局地观测试验，如中国气象局广州热带海洋气象研究所开展的“海岸带边界层与珠江口海雾科学试验”（2006年），“华南海岸带海-陆-气相互作用的科学试验”（2007年），广东、上海、福建等省市气象局近年来开展“追风试验”等，都加强了海气界面通量交换和热带气旋观测试验。

近10年来，通过对已有现场观测试验数据的分析和研究，海洋大气边界层观测研究在以下两个方面取得了非常大的进展，一是在极端风速条件下海气界面通量和湍流特征研究，另一方面是关于海上飓风或者

台风影响下的大气边界层垂直结构的研究。季风是影响我国天气气候重要的天气系统之一，具有与其他天气系统不同的边界层特征，我国在20世纪末对季风背景下的界面湍流特征和通量交换进行了分析和研究，获得了一些有意义的成果。因此，本文主要目的是通过回顾近10年来热带海洋大气边界层观测事实研究，给出目前存在的问题和未来我国热带海洋气象观测研究的方向。

2 海气边界层特征观测事实研究

2.1 热带气旋边界层观测事实研究

2.1.1 强风速条件下海气界面通量交换

20世纪针对中等风速条件下的海气界面通量交换进行了比较深入的研究，提出了海面拖曳系数随风速增大而增大的理论。进入21世纪后，极端风速条件下特别是强风速条件下海气通量交换特征受到极大地关注。Powell等^[4]通过对1997—1999年GPS下投式探空资料分析，首次提出海面粗糙度和拖曳系数在高风速（>40m/s）情况下随风速增大而减小。Donelan等^[5]通过实验室数据分析得到类似结论。Moon等^[6, 7]、Makin^[8]、Bye等^[9]从理论上研究高风速条件下海面拖曳系数与海面风速的关系，指出假如高风速下海气之间的热交换主要是由飞沫的作用所导致，那么海气之间的热交换系数，也像拖曳系数一样在高风速时会存在一个极大值。通过对CBLAST观测试验获得的飞机直接探测飓风边界层内湍流资料的分析和研究^[1, 10, 11]，发现当风速增大到一定程度，达到32m/s左右时，海气之间动量和热量通量将不随风速增大而增大（见图1）。最近根据中国气象局广州热带海洋气象研究所茂名海洋气象平台梯度（水深14m）观测系统资料，发现当10m高度风速>24m/s时，台风“黑格比”强风速条件下的

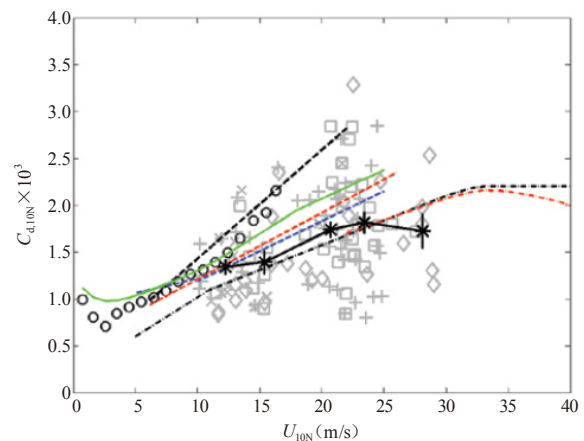


图1 CBLAST Hurricane 飞机探测飓风资料估计的拖曳系数（星号代表每隔2.5m/s平均值，柱状代表95%置信区间，方格表示风暴右前象限，加号表示代表风暴右后象限，菱形代表左前象限飞机观测）^[1]

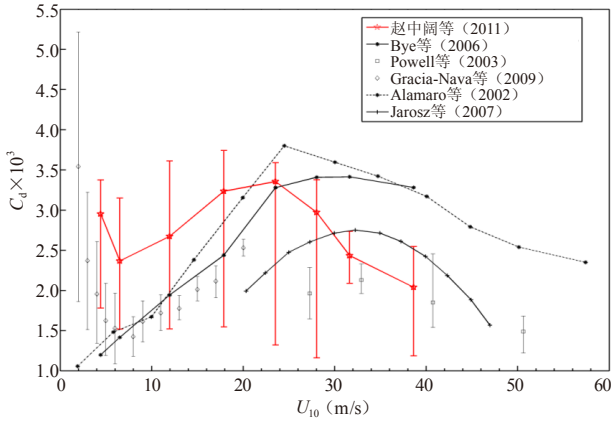


图2 强风条件下10m风速和拖曳系数 (星号代表观测数据中的中位数) [12]

海气动量交换参数达到极值后开始饱和 (见图2) [12]。表1给出了各种不同水深条件下, 不同研究者给出的拖曳系数不再增大时对应的风速大小, 可以看出浅水效应会影响拖曳系数达到饱和时的风速。

表1 不同研究者针对不同水深获得的拖曳系数饱和时对应的风速

作者	Powell等 ^[4]	Donelan等 ^[5]	Jarosz等 ^[13]	赵中阔等 ^[12]
风速 (m/s)	~40	~32	~32	24~28
水深 (m)	大西洋 中、东太平洋	风浪槽 (15m×1m×1m)	>50m	~14m

Zhang等^[14]利用CBLAST-Hurricane试验直接测得的飓风情况下感热和潜热通量资料, 分析发现当飓风发展时, 动量和焓之间的比率低于以前研究的最低值, C_k/C_d 平均值约为0.63, 低于Emanuel^[15]提出的 C_k/C_d 为0.75的临界值 (图3)。

2.1.2 热带气旋边界层湍流谱

湍流谱密度与频率关系一般来说满足-5/3规律, 对于热带气旋强风速条件下是否也满足这样的规律呢? Zhang等^[16]利用CBLAST飞机观测资料分析研究了飓风边界层外围雨带之间的湍流谱的特征 (见图4), 由图可以看出在台风外围雨带之间风速<30m/s时, 风速基本符合-5/3规律, 而位温和湿度在频率为

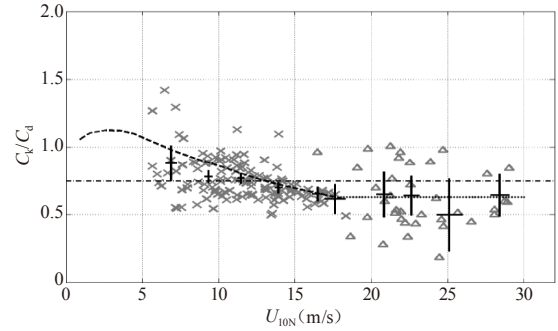


图3 C_k/C_d 与10m中性风速 (Δ 代表CBLAST资料、 \times 代表HEXOS资料, 实线表示HEXOS和CBLAST观测平均值 (95%置信区间), 点线表示CBLAST数据的平均值, 虚线表示COARE 3.0块体通量算法计算的 C_k/C_d , 点短线代表Emanuel建议的 C_k/C_d [14])

10Hz附近有明显偏差。宋丽莉等^[17]利用直接获得的超声风速仪资料分析研究了南海台风影响期间的湍流谱特征, 发现台风中心经过时, 在惯性子区内, u , v , w 三个方向湍流谱斜率均不能满足-5/3规律 (约1.67) 而且发生较大偏移, 其偏移幅度呈垂直向>侧风向>主风向, 即惯性子区内湍流谱斜率垂直风向在0.6~0.8, 侧风向在0.9~1.0, 主风向在1.0~1.4。上述两位研究者针对大西洋和南海台风的研究结果显示了不同的湍流谱特征, 但是由于样本数稀少, 这样的结论是否具有普适性还需要大量的科学试验和观测研究加以佐证。

2.1.3 热带气旋边界层急流

早在20世纪70年代末期, 通过对飞机探测资料的研究, 发现热带气旋边界层内存在急流。Franklin等^[18]利用GPS下投式探空资料, 发现台风眼墙最大风速出现在500m高度, 比700hPa的风速还大20%, 并指出这一现象主要是由于热带气旋暖心的作用, 眼墙外围区域的最大风速层接近1km。Powell等^[4]研究结果也显示出边界层存在急流, 最大风速出现在500m高度。Knupp等^[19]分析两个弱的登陆热带气旋雷达资料, 发现在海岸线5km范围内, 稳定层云降水背景下

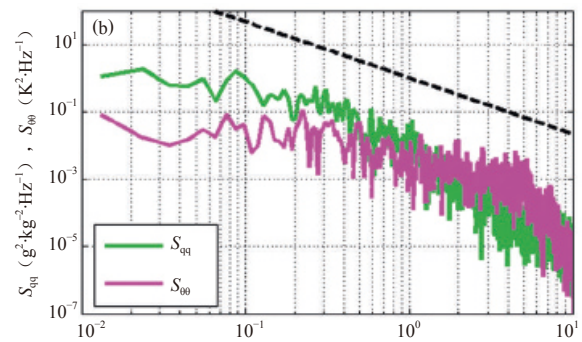
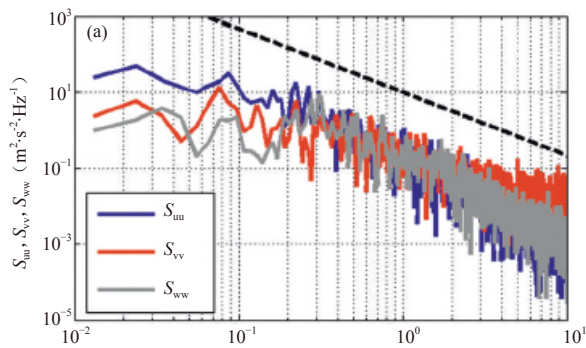


图4 风速三个方向 (a)、位温和湿度 (b) 湍流谱以及-5/3指数线 (黑色虚线) (横坐标是频率, 纵坐标是谱密度)

的离岸气流中存在明显的急流；且在眼区20km范围内，边界层内的急流高度从陆地下垫面的600m降低到水面300m。Giammanco等^[20]通过分析离台风中心5~200km范围内的GPS探空资料，指出60%的急流出现在200m以下，90%的急流出现在500m以下，出现在200m以下的急流中60%发生在距离台风中心50km半径内，只有7%急流出现在500m以上。Kepert^[21, 22]分析了飓风George和Mitch详细的风廓线，并给出了距离飓风中心不同区域的平均风廓线，在飓风Mitch眼区附近的中上边界层发现强的超梯度风气流，而飓风Georges边界层内没有超梯度风。近期973研究成果显示^[23]，对风廓线雷达资料分析可以看到台风中心近地层200~300m之间有明显的低空急流。由此可以看出，在热带气旋边界层存在低空急流，不同研究工作显示不同海域的热带气旋低空急流位置不同，但是，研究结果显示大多数的低空急流位于500m高度以下。

2.2 海雾边界层及湍流特征

海雾经常发生在稳定条件下，茂名海雾观测资料显示南海海雾可以在弱静力稳定度条件下发展和成熟，而不以逆温或强稳定层结为必要条件^[24]。海雾雾滴谱观测资料显示其含水量具有周期性振荡现象^[25]，其周期性振荡主要由于湍流对液态水的混合作用引起，且与高空海雾液态水大量生成阶段的雾顶长波辐射有关。液态含水量和大气稳定度关系显示^[26]，在雾的生成阶段，大气处于中性或弱不稳定状态；而雾的发展过程和维持阶段，含水量和大气稳定度处于波动状态，大气稳定度影响了含水量的增加和减少。

黄健等^[27]利用2007年一次暖海雾过程的湍流观测数据分析了暖海雾过程中湍流特征，提出在海雾的形成、消散阶段风切变湍流的热量输送起着主要作用；而在发展和维持阶段既有风切变湍流的热量输送，也有雾顶长波辐射冷却热力湍流的热量输送，在量级上雾顶长波辐射冷却导致的热量输送远大于风切变的输送热量。黄菲等^[28]利用珠江口春季海雾湍流观测数据，给出在极端低风速条件下的湍流特征，即海面动力空气粗糙度10m风速为3.0m/s附近达到最小，在观测区域内可将3.0m/s作为光滑海面和粗糙海面的分界点，中性条件下拖曳系数 C_d 的平均值为 1.180×10^{-3} ，在10m风为2.7m/s时， C_d 达到最小，在 $U_{10} < 4\text{m/s}$ 时， C_d 随风速先减小后增加，为二次曲线关系。

2.3 南海季风爆发前后通量及大气边界层特征

分析1998年南海夏季风试验资料显示^[29-31]，潜热通量具有明显日变化，中午较高、夜间较低，季风爆发期间潜热输送逐渐增加，季风爆发前期，夜间潜热通量比季风爆发后期大，季风爆发后期，白天潜热通

量明显大于爆发初期和中期；感热通量在季风爆发前由海面向大气输送，季风爆发后期由大气向海面输送；在季风爆发期间动量通量和摩擦速度随风速线性增加。闫俊岳等^[32]利用西沙铁塔涡动相关通量观测资料，分析研究了2002年南海季风爆发前后西沙海域海气通量交换及其变化，指出南海季风爆发前海气界面各通量与爆发后明显不同，季风爆发后通量随着季风加强和减弱变化幅度非常大，感热通量与海气温差呈正相关关系，与气温有明显的负相关关系；感热通量值较小时与风速的关系较弱；潜热通量与风速、海气温差及海面水温均有正相关关系，其中潜热通量与风速的关系最密切，并给出南海季风影响下的海气界面动量通量和风速可以采用二次函数拟合。利用西沙湍流资料研究发现，西南季风爆发后， C_d 数值增大，季风低压影响下的降水过程中出现小值；当平均风速大约为5m/s时， C_d 为最小值，当风速 $< 5\text{m/s}$ （光滑流）时，随着风速增大而迅速减小；当风速 $> 5\text{m/s}$ （粗糙流）时，随着风速增大（海面粗糙度增大）而缓慢增大^[33]，这和前面关于珠江口海雾过程的拖曳系数有一定差别，海雾湍流过程显示风速的临界值在2.7m/s^[28]，因此关于临界风速还需要针对不同海域和天气过程进一步深入研究。

南海季风爆发前后边界层结构在南海不同海域具有不同的特征，于晓丽等^[34]通过对1998年在南海南部（6°15'N，110°E）和南海北部（20°29'39"N，116°57'48"E）的南海季风试验中定点科考船释放一天四次的探空观测资料分析得出，季风爆发前海洋大气边界层高度存在规则的日变化，在中午达到深厚。季风爆发后南海北部大气边界层高度日变化不明显，南海南部依然明显；与大气边界层厚度日变化相对应，南海南部边界层内水汽日变化明显，而南海北部较不明显。

3 存在问题以及未来热带海洋气象观测发展方向

综上所述，利用新型观测手段和大型观测试验，已经揭示了一些比较一致的观测事实，如强风条件下当风速达到一定程度时，海气界面动量和热量交换系数达到饱和，动量和热焓之间的比率比以前的研究结果要偏小；通过对各种资料源获取的边界层风廓线资料分析，获知在热带气旋低层存在低空急流，且大多发生在500m高度以下。但是由于观测条件的限制，对于热带气旋拖曳系数达到饱和的风速，不同的资料显示出不同的临界值；对于热带气旋的湍流谱与频率的关系是否仍旧满足-5/3定律，不同的资料源也显示出不同的特征。这些结论的不一致性需要获取更多的热

带气旋个例观测资料来验证。

南海暖海雾和季风影响下的边界层特征已经进行了初步的研究,但是对于不同于中纬度冷海雾的南海暖海雾过程来讲,其边界层和界面湍流交换特征方面具有明显的特点,季风过程中界面湍流交换特征也具有其特点。如文献[28]采用珠江口海雾观测试验获取的低风速湍流资料,得到 C_d 最小值对应风速为2.7m/s;而文献[33]利用西沙资料,得到季风低压影响期间 C_d 最小值对应风速为5m/s,这两者不同是否是在误差范围内,还是两者代表了不同海域或者不同天气系统的 C_d 情况,这将直接影响数值天气预报模式边界层参数化,且这些结论仍需要更多的观测事实来验证。南海季风是影响我国天气气候的水汽输送带,仅仅靠一个观测点难以窥探整个季风系统的全貌,未来季风爆发过程的边界层观测应该是采用多个剖面的网状结构,至少也要有一个南北剖面的观测,针对季风过程的推进,研究季风边界层在季风加强、减弱和推进过程中边界层特征及其对我国天气气候的影响。

目前我国已经建立了海岸带海洋气象观测系统,按照“南海海洋气象发展规划”,以后的热带海洋气象观测系统势必覆盖整个南海区域,未来热带海洋气象观测试验,应该以已有观测系统为基础,针对不同的海洋天气系统,采用点(观测站点)面(卫星资料)结合方式,加强各种海洋气象灾害性天气系统下的海气界面交换、大气边界层结构的观测试验,获取不同天气条件下的海气界面通量参数和边界层结构特征,从而改进海气耦合模式,促进海洋气象预报服务的发展。

参考文献

- [1] Black P G, Coauthors. Air-sea exchange in hurricanes: Synthesis of observations from the Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer experiment. *Bull Amer Meteor Soc* 2007, 88: 357-384.
- [2] Edson J, Coauthors. The coupled boundary layers and air-sea transfer experiment in low winds. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 341-356.
- [3] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究进展. *气象学报*, 2004, 62(5): 541-549.
- [4] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 2003, 422: 279-283.
- [5] Donelan M A, Haus B K, et al. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L18306, doi:10.1029/2004GL019460.
- [6] Moon I J, Ginis I, Hara T. Effect of surface waves on Charnock coefficient under tropical cyclones. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L20302, doi:10.1029/2004GL020988.
- [7] Moon I J, Hara T, Ginis I, et al. Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part I: Effect of mature and growing seas. *J Atmos Sci*, 2004, 61: 2321-2333.
- [8] Makin V K. A note on the drag of the sea surface at hurricane winds. *Boundary-Layer Meteorol*, 2005, 115: 169-176.
- [9] Bye J A T, Jenkins A D. Drag coefficient reduction at very high wind speeds. *J Geophys Res*, 2006, C111, C03024, doi:10.1029/2005JC003114.
- [10] French J R, Drennan W M, Zhang J A, et al. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part I: Momentum flux. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 1089-1102.
- [11] Drennan W M, Zhang J A, French J R, et al. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part II: Latent heat fluxes. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 1103-1115.
- [12] 赵中阔, 梁建茵, 万齐林, 等. 强风天气条件下海气动量交换参数的观测分析. *热带气象学报*, 2011, 27(6): 899-904.
- [13] Jarosz E, Mitchell D A, Wang D W, et al. Bottom-up determination of air-sea momentum exchange under a major tropical cyclone. *Science*, 2007, 315(5819): 1707-1709.
- [14] Zhang, Black, French, et al. First direct measurements of enthalpy flux in the hurricane boundary layer: The CBLAST results. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L14813, doi:10.1029/2008GL034374.
- [15] Emanuel K A. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 3969-3976.
- [16] Zhang J A, Drennan W M, Black P G, et al. Turbulence structure in the hurricane boundary layer between the outer rainbands. *J Atmos Sci*, 2009, 66: 2455-2467.
- [17] 宋丽莉, 毛慧琴, 黄浩辉, 等. 登陆台风近地层湍流特征观测分析. *气象学报*, 2005, 63(6): 915-921.
- [18] Franklin J L, Black M L, Valde K. GPS dropwindsonde profiles in hurricanes and their operational implications. *Wea Forecasting*, 2003, 18, 32-44.
- [19] Knupp, Kevin R, Walters J, et al. Doppler Profiler and Radar Observations of Boundary Layer Variability during the Landfall of Tropical Storm Gabrielle. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 234-251.
- [20] Giammanco I M, Schroeder J L, Powell M D, et al. GPS dropwindsonde observations of tropical cyclone low-level wind maxima. 28th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 2008.
- [21] Kepert J D. Observed boundary layer wind structure and balance in the hurricane core. Part I: Hurricane Georges. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 2169-2193.
- [22] Kepert J D. Observed boundary layer wind structure and balance in the hurricane core. Part II: Hurricane Mitch. *J Atmos Sci*, 2006, 63, 2194-2211.
- [23] 周芯玉, 梁建茵, 廖菲. 风廓线仪多点观测网揭示的登陆台风“天鹅”、“巨爵”的边界层风场结构特征. *热带气象学报*, 2011, 已录用.
- [24] 屈凤秋, 刘寿东, 易燕明, 等. 一次南海海雾过程的观测分析. *热带气象学报*, 2008, 24(5): 490-496.
- [25] 沈忱, 黄健, 刘寿东. 海雾的准周期振荡特征. *热带气象学报*, 2010, 26(1): 71-78.
- [26] 李晓娜, 黄健, 申双和, 等. 一次高压型海雾中的液态含水量演变特征. *热带气象学报*, 2010, 26(1): 79-85.
- [27] 黄健, 王斌, 周发琇, 等. 华南沿海暖海雾过程中的湍流热量交换特征. *大气科学*, 2010, 34(4): 715-725.
- [28] 黄菲, 马应生, 黄健. 春季华南沿海海-气边界层动力参数的观测研究. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(7-8): 001-008.
- [29] 闫俊岳, 姚华栋, 李江龙, 等. 1998年南海季风爆发期间近海面层大气湍流结构和通量输送的观测研究. *气候与环境研究*, 2000, 5(4): 447-458.
- [30] 曲绍厚, 胡非, 李亚秋. 1998年SCSMEX期间南海夏季风海气交换的主要特征. *气候与环境研究*, 2000, 5(4): 434-446.
- [31] 姚华栋, 任雪娟, 马开玉. 1998年南海季风试验期间海-气通量的估算. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 87-92.
- [32] 闫俊岳, 唐志毅, 姚华栋, 等. 2002年南海季风爆发前后西沙海区海-气通量交换及其变化. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1000-1010.
- [33] 闫俊岳, 唐志毅, 姚华栋, 等. 南海西南季风爆发前后海-气通量交换系数研究. *气象学报*, 2006, 64(3): 335-344.
- [34] 于晓丽, 谢强, 王东晓. 1998年季风爆发期南海大气边界层的日变化. *热带海洋学报*, 2009, 28(2): 31-35.