

陈淑琴,黄辉,周丽琴,等. 对流单体在杭州湾入海时的强度变化分析[J]. 气象,2011,37(7):889-896.

对流单体在杭州湾入海时的强度变化分析^{*}

陈淑琴 黄 辉 周丽琴 陈佩佩

浙江省舟山市气象局,舟山 316021

提 要: 为了研究对流单体在杭州湾入海时的强度变化情况,更好地预报对流单体的变化趋势,统计了 2007 年 1 月到 2010 年 6 月舟山雷达观测到的 148 个对流单体,以组合反射率因子、顶高、垂直液态含水量、径向速度、冰雹指数等条件来判断对流单体是加强还是维持或减弱。发现对流单体在海岸线附近加强或维持的几率比较大,在北岸入海后加强以及在南岸入海后减弱的几率较大,在傍晚到凌晨加强或维持的几率较大。对三个加强的典型个例,分别分析了海岸线附近的温湿特性、地面风的辐合、大气的层结稳定性等情况。对 148 个单体所处时刻的气温和相对湿度资料用 GRADS 进行插值,绘出等值线,然后统计整个杭州湾海域的最大气温差和相对湿度差以及水平风切变情况。统计结果:加强的单体,其环境温度、湿度梯度、风切变明显比减弱的大。最后得出结论,判断一个对流单体在杭州湾入海时是加强还是减弱,应从海岸线附近的温湿特性、地面风的辐合情况、大气的层结稳定性三方面的条件综合考虑。

关键词: 对流单体, 杭州湾, 入海, 强度变化

Analysis on the Intensity Changes of Convective Cells in the Hangzhou Bay When Entering the Sea

CHEN Shuqin HUANG Hui ZHOU Liqin CHEN Peipei

Zhoushan Meteorological Office of Zhejiang Province, Zhoushan 316021

Abstract: Intensity changes of convective cells in the Hangzhou Bay observed by Zhoushan radar from January 2007 to June 2010 when entering the sea are studied, and they depend on the combined reflectivity factor, ET, VIL, radial velocity, hail index and so on. The results show that the possibility of convective cell strengthening or its maintenance nearby the coastline is quite big. Meantime, the possibility of convective cell strengthening nearby the north coastline is big, while the possibility of convective cell weakening nearby the south coastline is also big. The possibility of convective cell strengthening or maintaining from evening to dawn is still big. The temperature and humidity characteristics in the coastline, the surface wind convergence, and atmospheric stability are analyzed from three typical cases. And the mean values of the temperature, relative humidity gradients and horizontal wind shears in the Hangzhou Bay concerning various cell changes are calculated. The result shows that the three factors above of the strengthening cells are bigger than the weakening cells. In conclusion, the above three conditions should be considered when judging a convective cell in the Hangzhou Bay is strengthening or weakening.

Key words: convective cell, the Hangzhou Bay, entering the sea, intensity changes

引 言

强对流天气是突发性的灾害性天气,具有极大

的危害性。新一代多普勒天气雷达为强对流天气的探测和预警创造了有利条件,也使得有关的科研工作顺利开展起来,国内外已做过许多对陆地上强对流风暴的雷达资料分析^[1-14],得出了一些强对流风

* 浙江省舟山市科技局科研项目“舟山市雷电预警信息系统研制”(081059)资助

2010 年 9 月 2 日收稿; 2010 年 12 月 31 日收修定稿

第一作者: 陈淑琴,主要从事短期及短时天气预报工作. Email:charrie163@163.com

暴的雷达产品特征。但有关对流单体强度变化趋势的研究还比较少,尤其是在海岸线附近的强度变化的分析就更少。影响浙江东面海岛地区的强对流系统一般是从杭州湾东移过来的,对流单体入海时,是加强还是减弱,对下游的预报非常重要,是个值得研究的课题。在观测舟山 CINRAD-SB 雷达回波资料时发现对流单体在杭州湾入海时,有沿着海岸线发展加强的情况。于是对历史个例进行统计,了解对流单体在入海时的强度变化情况,分析不同变化产生的原因,以便更好地对对流系统的发展变化做出判断,进行准确的预警。

1 海岸线附近对流单体的雷达回波变化

在观测中发现,对流单体在杭州湾海岸线附近发生、发展的例子非常多。例如,2008 年 7 月 24 日舟山雷达探测到一次对流单体在杭州湾北岸发生发展的过程(图 1)。21:31(图 1a)在杭州湾北岸发现一小块弱回波,21:40(图 1b)略有发展,21:52(图 1c)进一步加强,达 45 dBz,在半个小时内位置基本上没有移动。同时在其附近的海岸线上也有一些回波生成,22:10(图 1d)沿着海岸线形成了一条回波带,并且进一步发展加强,中心达 50 dBz。最后形成一个强的对流风暴,东移出去。此对流单体在海岸线附近产生、发展,走向基本上与海岸线一致。

2 对流单体在杭州湾入海时强度变化统计情况

统计了舟山 CINRAD-SB 气象雷达探测到的 2007 年 1 月至 2010 年 6 月在杭州湾入海的对流单体共 148 个(都由雷达观测到并在组合反射率产品中进行编号的单体),以下列五个指标判断对流单体是否加强。

在海岸线附近或入海后半个小时内,(1) 组合反射率因子产品的反射率因子加大。如图 2 所示,18:11 单体 A2 从杭州湾北岸入海时,组合反射率因子最大为 40 dBz,18:17 达到 45 dBz,18:30 达到 50 dBz。(2) 组合反射率因子产品 45 dBz 以上的强回波的面积加大。如图 2 所示,18:17 中心组合反射率因子已达 45 dBz,但范围较小,大约为 14 km²,18:30 45 dBz 以上的面积大约为 25 km²。(3) 回波

顶高增高。如图 3 所示,18:11 单体 A2 顶高最大为 8 km,到 18:30 达 11 km,18:36 达 11 km 的范围加大。(4) 垂直液态含水量增大。如图 4 所示,18:11 单体 A2 垂直液态含水量最大为 5 kg · m⁻²,到 18:23 达 10 kg · m⁻²,18:30 达 15 kg · m⁻²。(5) 速度产品风速增大,或出现冰雹指数、中气旋(MESO)、龙卷涡旋信号(Tornadic Vortex Signature, TVS),或冰雹指数强度加大。如图 5 所示,20:01 单体 J7 的径向风速为 10~15 m · s⁻¹,20:07 到达海岸线,径向风速为 15~20 m · s⁻¹,20:19 入海以后,径向风速达 20 m · s⁻¹ 以上,很明显速度产品风速在增大。并且在 20:07 出现冰雹指数,是一个空心的小三角形,表示出现冰雹的概率是 30%,到 20:19 出现实心的三角形,冰雹概率提高到 50%,从 20:07—20:19 可以说冰雹指数强度加大。有时出现 MESO 和 TVS,这也可以认为强度增大,但出现的概率比较小。

若满足以上五个条件中的任意两个,就认为对流单体加强,只满足其中一个,或以上五个产品均无明显变化的,则认为是强度维持,其余的为减弱。

根据上述标准对这 148 个对流单体进行统计结果见表 1。在杭州湾入海后加强的有 63 个,强度维持的 33 个,减弱的 52 个,各占总数的 43%,22%和 35%,这说明在海岸线附近对流单体加强或维持的几率比较大。在北岸入海的对流单体,加强的几率最大,达 49%,在南岸入海的减弱的几率最大,达 42%,而在喇叭口入海的对流单体,加强、维持、减弱的几率差不多。入海后加强的对流单体维持的平均时间是 4.1 个体扫(每 6 分钟一个个体扫)。在北岸、南岸入海的单体维持的平均时间分别是 4.3 个体扫和 3.7 个体扫。

对流单体的发生、发展与下垫面情况关系密切,而下垫面有较大的日变化,海陆的日变化又有所不同,在杭州湾海岸线附近的日变化情况比较复杂,对一天中各时段对流单体在杭州湾入海时变化情况进行统计,结果见表 2。一天当中,只有 23 时到 01 时(北京时,下同)在杭州湾海岸线没有对流单体产生,其他各时段基本上都有发生,较多的时段集中在 15—21 时。01—04 时,加强的几率比较大,达到 78%。04—14 时减弱的几率较大,15 至 04 时,减弱的几率比较小,占总的对流单体的 33%。也就是说傍晚到凌晨对流单体在杭州湾入海时加强或维持的几率比较大。这与下垫面的日变化是一致的,因为

海水的比热大,夏季白天大陆气温应高于海上的气温,夜里应低于海上的气温,傍晚到凌晨,对流单体

从陆上移到海上,下垫面气温升高,有利于对流的发展。

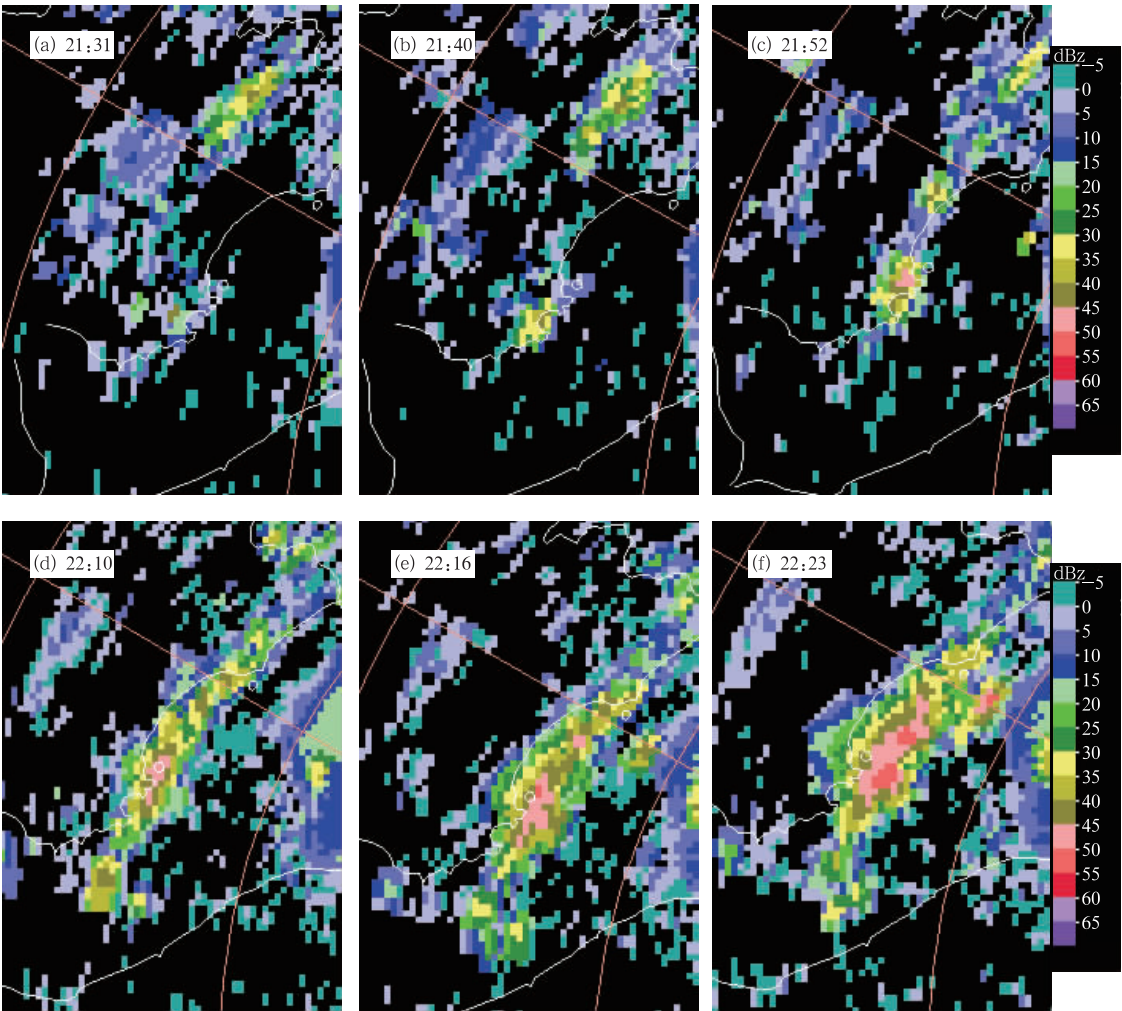


图 1 2008 年 7 月 24 日舟山雷达站 0.5°仰角反射率因子
Fig. 1 Reflectivity factors at 0.5° elevation of Zhoushan Radar Station on July 24, 2008

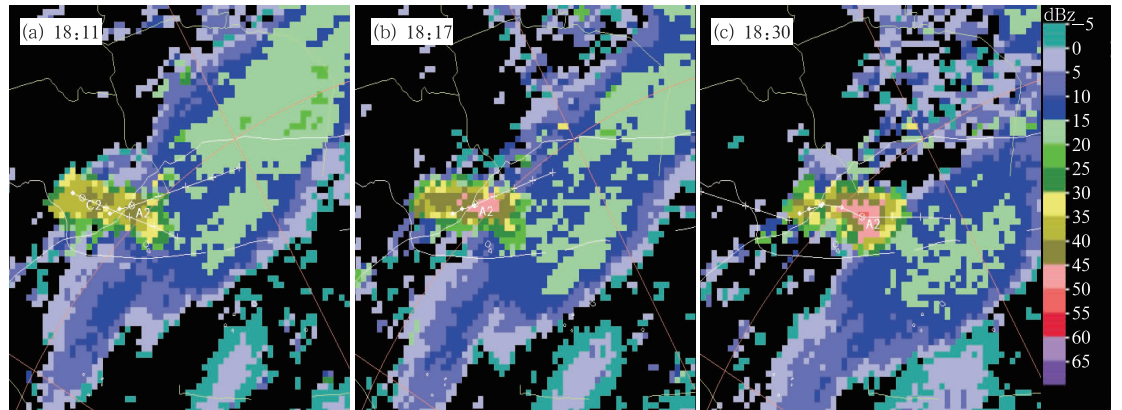


图 2 2009 年 7 月 21 日舟山雷达站组合反射率因子
Fig. 2 Combined reflectivity factors at Zhoushan Radar Station on July 21, 2009

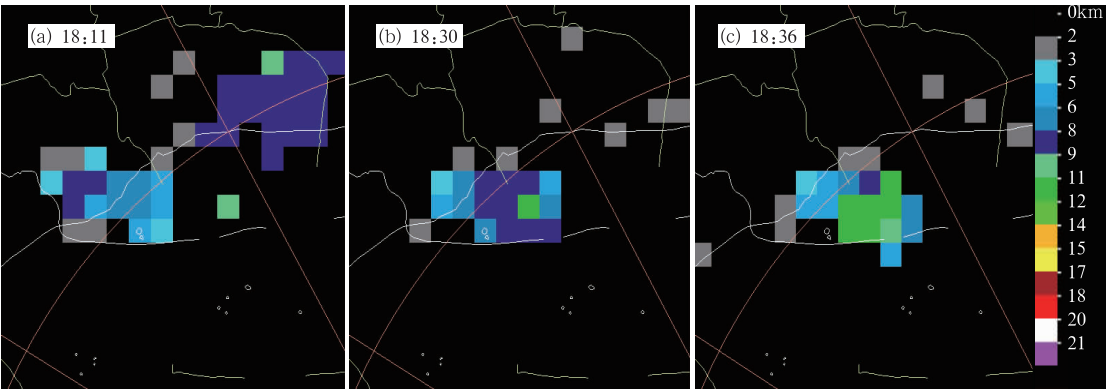


图 3 2009 年 7 月 21 日舟山雷达站顶高产品
Fig. 3 Echo top images at Zhoushan Radar Station on July 21, 2009

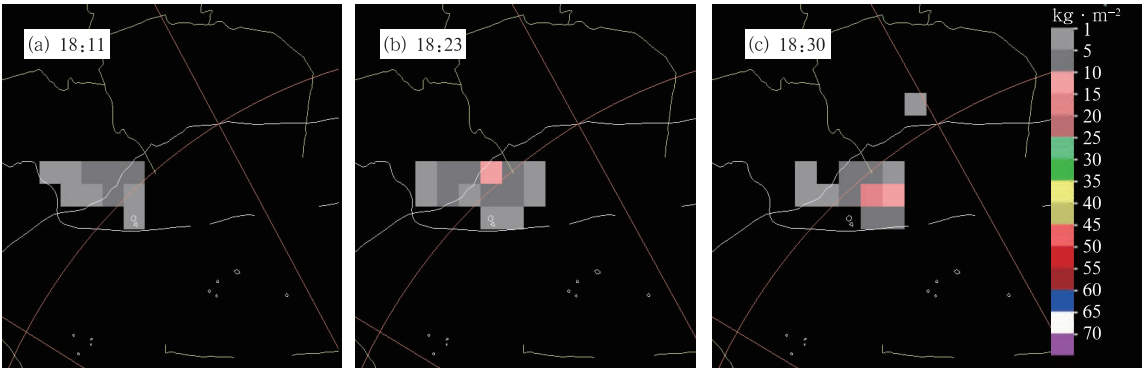


图 4 2009 年 7 月 21 日舟山雷达站垂直液态含水量产品
Fig. 4 Vertically integrated liquid products at Zhoushan Radar Station on July 21, 2009

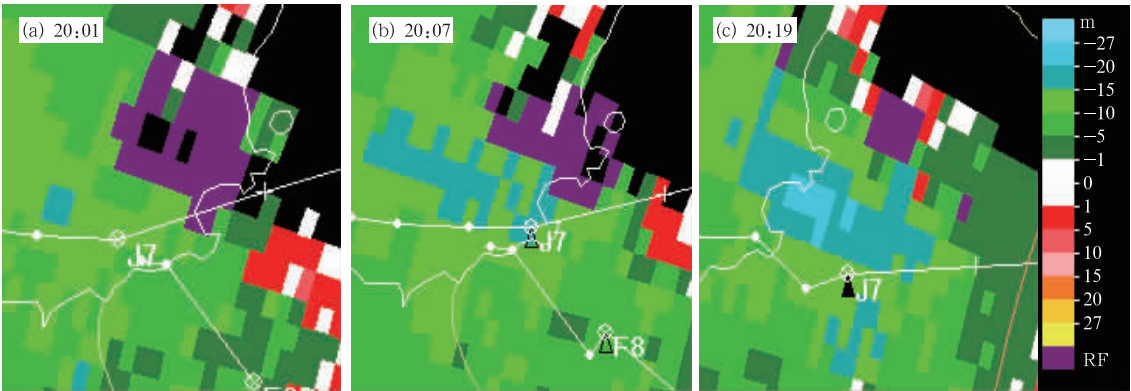


图 5 2008 年 8 月 2 日舟山雷达站 0.5°仰角径向速度产品
Fig. 5 Radial velocity products at 0.5° elevation of Zhoushan Radar Station on July 21, 2009

表 1 对流单体在杭州湾入海时的强度变化(2007 年 1 月至 2010 年 6 月)

Table 1 The intensity changes of convective cells when entering the sea in Hangzhou Bay

入海位置	单体个数/个	加强个数 (占总单体数的百分比)	强度维持个数 (占总单体数的百分比)	减弱个数 (占总单体数的百分比)
杭州湾北岸	71	35(49%)	15(21%)	21(30%)
杭州湾南岸	59	21(36%)	13(22%)	25(42%)
喇叭口	18	7(39%)	5(28%)	6(33%)
总计	148	63(43%)	33(22%)	52(35%)

表 2 一天中各时段的对流单体在杭州湾入海时的强度变化(2007 年 1 月至 2010 年 6 月)

Table 2 The intensity changes of convective cells when entering the sea in Hangzhou Bay at various time periods of a day

时段(北京时)	时段内对流单体个数	加强的个数 (占时段总数的百分比)	减弱的个数 (占时段总数的百分比)	维持不变的个数 (占时段总数的百分比)
0—01	0	0	0	0
01—02	8	6(75%)	2(25%)	0
02—03	0	0	0	0
03—04	1	1(100%)	0	0
04—05	4	2(50%)	2(50%)	0
05—06	9	2(22%)	6(67%)	1(11%)
06—07	2	1(50%)	0	1(50%)
07—08	6	3(50%)	2(33%)	1(17%)
08—09	5	1(20%)	1(20%)	3(60%)
09—10	3	1(33%)	0	2(67%)
10—11	9	2(22%)	5(56%)	2(22%)
11—12	1	0	1(100%)	0
12—13	5	3(60%)	1(20%)	1(20%)
13—14	5	1(20%)	3(60%)	1(20%)
14—15	5	3(60%)	0	2(40%)
15—16	8	3(38%)	3(38%)	2(25%)
16—17	11	5(45%)	4(36%)	2(18%)
17—18	18	7(39%)	9(50%)	2(11%)
18—19	5	4(80%)	1(20%)	0
19—20	23	9(39%)	6(26%)	8(35%)
20—21	17	8(47%)	5(29%)	4(24%)
21—22	1	0	0	1(100%)
22—23	2	1(50%)	1(50%)	0
23—0	0	0	0	0

3 对流单体在海岸线附近加强的原因分析

3.1 海岸附近温度、湿度特征

从表 1 可以看出,在杭州湾北岸入海的对流单体加强的几率最大,而在杭州湾南岸入海的对流单体,减弱的几率最大。从北岸入海的单体,一般是向南移动,从杭州湾南岸入海的对流单体,一般是向北

运动,通常情况下,南方气温比北方高,北岸的对流单体是从冷区向暖区运动,所以加强的可能性比较大,而南岸的情况相反。

前文提到 2008 年 7 月 24 日 21 时有一次对流单体在杭州湾北岸发生发展的过程。根据浙江省、上海市的中尺度气象站观测资料,用逐步订正法进行内插,大概地分析出杭州湾海上的气温和相对湿度分布(图 6)。从图 6a 可以看出,在杭州湾北岸线附近,气温有一定的梯度,陆上气温处于 30~31℃,而海上接近或大于 31℃ 在杭州湾喇叭型的中部

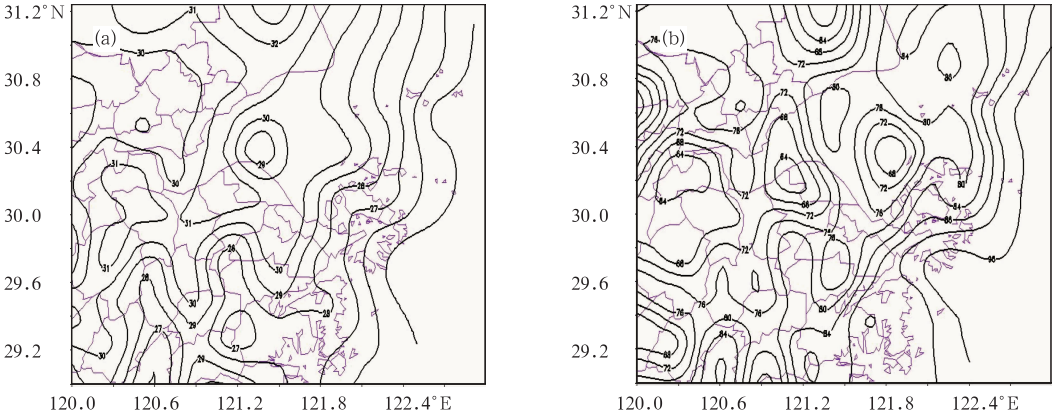


图 6 2008 年 7 月 24 日 21 时杭州湾地区地面气温(a,单位:℃)和相对湿度(b,单位:%)分布
Fig. 6 Distributions of temperature (a, unit; ℃) and relativity humidity (b, unit; %)
at 21:00 BT July 24, 2008

(图 6b),有明显的湿度梯度,杭州湾东部最大的相对湿度为 80%,西部为 64%,相对湿度差达 16%。这些为对流的发展提供了热力条件和水汽条件。海上水汽充沛,尤其是在海风的作用下,带来更多的水汽输送。

3.2 地面风的辐合

文献[15]指出在海岸线附近,由于海陆摩擦的差别,沿海岸线造成了辐合带。在 2008 年 7 月 24 日 21 时地面平均风分布图(图略)上,可以看到在杭州湾北岸沿海的平湖、金山等站是东南风,而离海岸线稍远一点的海宁、嘉兴、桐乡等站是西北风,形成很明显的风向辐合。周钦华等[16]对浙江沿海海陆风环流进行了统计,发现海风(陆风)盛行时,在奉化、宁海、临海、绍兴、杭州湾中部一带存在一条辐合(辐散)线,主要辐合(辐散)中心也都在这一带。这些为对流单体的发生提供了动力条件。

2007 年 6 月 28 日下午在宁波的慈溪境内有一些较强的雷雨回波发展,朝东北方向移动,18:48 回波开始入海,在大陆上的回波逐渐减弱,而入海的回

波单体继续加强,逐渐形成了一个结构紧密的强中心,19:54 在海上的强中心达 60 dBz,有明显的后侧入流槽口,然后继续发展成为一个弓形回波。这是一个回波入海后强烈发展的典型个例。

海岸线附近的地形作用能使对流单体发展,但一般地形作用并不能使对流系统发展到非常强烈的程度,应该还有其他的原因。通过分析地面中尺度自动站的平均风资料,可以发现 28 日 19 时(图 7a),在宁波北岸,有比较强的风切变,西面盛行西北风,东面盛行东南风,而且东南风的风速特别大,有多个站达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,甚至有的达 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,单体西面附近西北风为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,东面是东南风 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水平风切变达 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。切变线的走向也与对流回波的走向一致,都是南北走向。强的切变,不仅提供了对流的触发条件,而且有利于强对流系统中上升气流和下沉气流的共同维持,从而有助于强对流的发展。由于海上的风速比陆地上大,因而切变也比较大,所以海上的那部分强烈发展,而陆地上的减弱了。

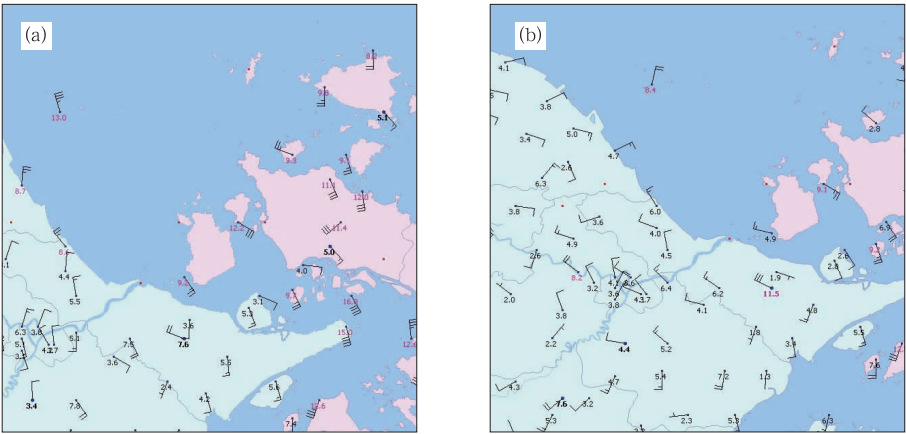


图 7 2007 年 6 月 28 日浙江自动站 1 小时最大风向风速(a) 19 时; (b) 20 时
Fig. 7 The 1 h maximum winds at Zhejiang Automatic Observation Stations
on June 28, 2007 (a) 19:00 BT, and (b) 20:00 BT

采用上海市和浙江省的中尺度气象站观测资料,对上述统计的 148 个单体所处时刻的气温和相对湿度资料利用 GRADS 进行插值,绘出等值线,然后统计整个杭州湾海域的最大气温差和相对湿度差。比如图 6a 中,整个杭州湾海域的最大气温差是 2°C 。图 6b 中,整个杭州湾海域的最大相对湿度差是 16%。利用平均风资料,计算单体附近的水平风切变。比如图 7a 中,水平风切变大约是 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。然后对三种不同变化趋势的单体,分别计算平均值,

可得到表 3。148 个单体中,减弱的有 52 个,杭州湾海域平均最大气温差是 2.02°C ,平均最大相对湿度差是 7.15%,平均水平风切变是 $4.17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。加强的单体有 63 个,平均最大气温差是 2.82°C ,平均最大相对湿度差是 7.89%,平均水平风切变是 $5.13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。加强的单体,其环境温度、湿度梯度都比较大,风切变也明显比减弱的大。强度维持的单体其温度、水平风切变等条件都介于减弱和加强的单体之间。大的温度和湿度梯度,在水平风切变

的作用下就产生了锋生作用,有利于对流单体的加强。

表 3 各种强度变化的对流单体对应的
杭州湾气象要素平均值

Table 3 Mean values of Hangzhou Bay meteorological
elements of convective cells with various changes

变化趋势	平均最大 气温差/℃	平均最大相对 湿度差/%	平均水平风 切变/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
减弱	2.02	7.15	4.17
维持	2.56	8.82	4.45
加强	2.82	7.89	5.13

3.3 大气层结稳定性的影响

2006 年 6 月 10 日上午从安徽到浙江发生了一次强烈的飚线过程,强风暴在安徽产生,进入浙江,形成一条弓形飚线,一路上都产生雷雨大风,在舟山海域产生 10~11 级大风。2007 年 7 月 10 日上午在杭州附近也产生了一条弓形飚线,从杭州湾入海,在杭州湾北岸的嘉兴也产生了 10 级的大风,但飚线

入海后很快减弱,进入舟山海域没有产生大风。这两个过程前期非常相似,发生的时间、地点相近,分别都在上午、浙北,回波的形状、结构、范围大小都相似,但入海后变化很不一样,前者仍维持很长时间,后者很快减弱消失。

这两个过程都发生在上午,在杭州附近,所以 08 时杭州的探空资料能够反映这两个风暴的环境特点。可以看到这两个风暴所处的大气状态有很大的不同(图 8)。2006 年 6 月 10 日的 CAPE 明显大于 2007 年 7 月 10 日,也就是说前者能够提供的不稳定能量更多,这才能使强风暴长时间维持。同时这两个过程还有一个明显的区别,就是前者的大气中层以上都比较干燥,露点曲线与层结曲线下部紧靠、上部分离,呈“喇叭状”配置,有利于形成雷暴大风^[15]。天气形势对天气的影响非常重要,地形作用天天都有,但不是每天都有强对流单体产生,只有在合适的天气形势下,在海岸线附近才能产生对流单体,并发展加强。

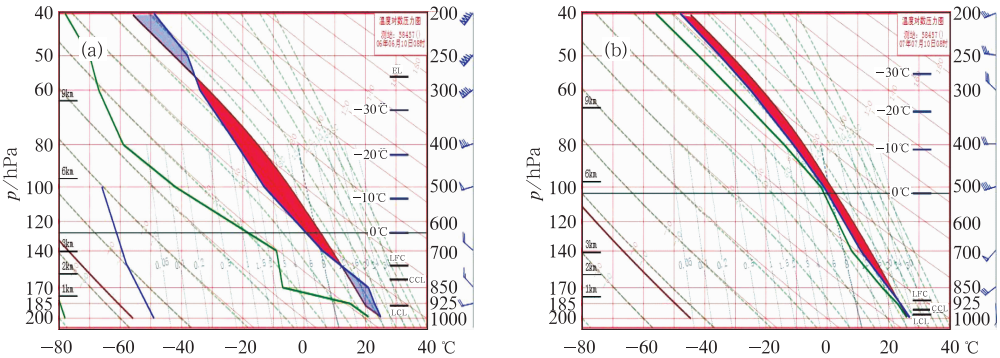


图 8 2006 年 6 月 10 日(a)和 2007 年 7 月 10 日(b)08:00 的 $T\text{-log } p$
Fig. 8 The $T\text{-log } p$ diagrams at (a) 08:00 BT 10 June 2006 and (b) 08:00 BT 10 July 2007

4 总 结

在分析舟山 CINRAD-SB 雷达回波资料时发现对流单体在杭州湾入海时,经常会有沿着海岸线发展加强的情况。通过统计 2007 年 1 月到 2010 年 6 月历史个例中对流单体入海时的强度变化情况,发现对流单体在北岸入海时加强或维持的几率较大,南岸入海时减弱的几率较大,在傍晚到凌晨加强或维持的几率较大。通过对 3 个加强个例的分析和对 148 个例的统计分析,找出了对流单体在入海时加强或维持的 3 个原因:

(1) 海岸线附近因为海陆性质的差异,单体入海时下垫面气温升高、水汽含量加大,为对流单体的

发生发展提供了热力条件和水汽条件。
(2) 海岸线附近地形摩擦不同形成的辐合、海陆风作用以及地面风的强烈切变为对流单体发展提供了动力条件,同时加上大的温度和湿度梯度,产生锋生作用,有利于单体的加强。
(3) 大气的层结稳定性是决定对流单体发展强度的重要影响因子。
判断一个对流单体在杭州湾入海时是加强还是减弱,应从以上各方面的条件综合考虑,另外还要注意对流单体是处于发展阶段还是消亡阶段,对流的发展有一定的延续性。

参考文献

[1] Roberts R D, Wilson W J. A proposed microburst nowcast-

ing procedure using single Doppler radar[J]. J Appl Meteor, 1989, 28:285-303.

[2] Schmocker G K, Przybylinski R W, Lin Y J. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the midaltitude radial convergence (MARC) signature[R]. Preprints, 15 the Conf on weather analysis and forecasting, Norfolk, VA, Amer, Meteor Soc, 1996, 306-311.

[3] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报,2004,62:317-328.

[4] 廖玉芳,俞小鼎,郭庆. 一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析[J]. 应用气象学报,2003,14:656-662.

[5] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报,2006,17:385-393.

[6] 牛淑贞,鲍向东,乔春贵,等. 强对流风暴新一代雷达产品特征分析[J]. 气象,2008,34(7):92-100.

[7] 朱君鉴,刁秀广,曲军,等. 4. 28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J]. 气象,2008,34(12):21-26.

[8] 王彦,唐熠,赵金霞,等. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象,2009,35(5):91-96.

[9] 李淑玲,刁秀广,朱敏,等. 一次飑线过程多普勒雷达资料分析[J]. 气象,2009,35(3):59-65.

[10] 张一平,王新敏,牛淑贞,等. 河南省强雷暴地闪活动与雷达回波的关系探析[J]. 气象,2010,(2):54-61.

[11] 张德林,马雷鸣.“0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J]. 气象,2010,36(3):62-69.

[12] 郑永光,张小玲,周庆亮,等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,2010,36(7):33-42.

[13] 岳治国,梁谷,李燕,等. 陕西渭北带状中尺度对流雷达回波统计特征[J]. 气象,2010,36(6):66-72.

[14] 黄忠,张东,蔡安安,等. 台风远外围大范围强对流天气成因综合分析[J]. 气象,2007,33(1):25-31.

[15] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2007:342-449.

[16] 周钦华,刘小根,戚优华,等. 浙江沿海涨陆风环流特征研究[J]. 浙江大学学报(理学版),1987(01):110-119.