

青岛地区 8 月一次海风环流 实例分析和 WRF 模拟

孙 贞¹ 高荣珍¹ 张 进² 徐晓亮¹ 盛春岩³

(1. 山东省青岛市气象局, 266003; 2. 国家气象中心; 3. 山东省气象台)

提 要: 根据青岛地区 2006 年 8 月份浮标站、岸基站和陆地站观测资料及探空加密测风资料, 分析了 8 月 21 日到 22 日一次典型的海、陆风环流过程, 并进行了 WRF 数值模拟和检验分析。观测数据分析表明: 海、陆风环流在垂直方向分别具有闭合环流, 海风环流发展高度远高于陆风环流, 海风环流午后发展最强盛, 海风在底层最先发展并在底层最先消失, 风速大小随高度减小, 发生海风环流时青岛站与浮标站的海陆气温差在 4℃ 以上, 海风环流向内陆推进大约 40 多千米; WRF 模式较好地模拟了海风环流发生发展的完整过程, 并揭示了海风环流与半岛北部相向风场的相互作用, 在半岛中部地区存在辐合上升区。

关键词: 海风环流 垂直结构 WRF 数值模拟

An Analysis and WRF Simulation of a Case of Sea-Breeze Circulation in August at Qingdao

Sun Zhen¹ Gao Rongzhen¹ Zhang Jin² Xu Xiaoliang¹ Sheng Chunyan³

(1. Qingdao Meteorological Office, Shandong Province, Qingdao 266003; 2. National Meteorological Center;
3. Shandong Provincial Meteorological Observatory)

Abstract: Based on the observational data in August 2006 obtained by buoys, automatic weather stations and radio sounding in Qingdao Region, a typical land-sea breeze case is studied in detail, and verified by WRF modeling results. The results indicate that both sea breeze circulation and land breeze circulation in the vertical direction are closed, and the thickness of sea-breeze circulation is much thicker than land breeze circulation. Sea-breeze appears and disappears firstly in the lower level, which is strongest in the afternoon. The wind force decreases with height. When the land-sea temperature difference between

资助项目: 国家自然科学基金“山东东南沿海夏季海风精细特征的观测分析及数值模拟研究”(编号: 40705017)

收稿日期: 2008 年 8 月 23 日; 修定稿日期: 2009 年 3 月 10 日

Qingdao Station and buoy station reaches to 4°C , sea breeze occurs, which can extend to inland about more than 40km. The WRF model successfully captures the sea breeze circulation, and reveals the interaction between sea breezes on both sides of the peninsula, which results in the convergence and ascending in the middle part of the peninsula.

Key Words: sea-breeze circulations vertical structure WRF simulation

引 言

2006 年国际帆船赛在青岛近海浮山湾海域举行,天气情况尤其是海上赛区的风速情况,不但直接影响到运动员的比赛成绩,对比赛赛程设置和安排也非常重要^[1]。海风作为沿海地区特有的中小尺度天气系统,是风速预报中的重点和难点^[2]。为便于研究结果在实际中应用,本文讨论的是在保留天气尺度系统即有背景风的情况下而实际发生的海风环流的详细特征。

国外对海风的研究工作起步较早,20 世纪初国外气象学者就开始了海陆风理论的研究^[3],近代随着数值预报方法的进一步发展,数值预报模式 MM5、WRF 等模式中由于包含的物理过程较多、参数化复杂,成为目前描述中小尺度天气现象的有力工具^[4]。在我国,对海陆风的探讨和研究主要集中珠江三角洲地区、山东半岛、福建沿海、江苏沿海以及辽东半岛等地区^[5-10],但受采集资料所限,对海风环流的细致研究具有一定的局限性,而专门针对青岛地区的海风进行精细分析的研究尚不多见,利用 WRF 数值方法针对海风进行精细模拟和对比分析的研究也较为少见。

本文利用加密观测采集到的地面和探空资料,针对 2006 年 8 月国际帆船赛期间青岛地区一次典型的海、陆风环流实际观测个例进行详细分析,找出实际发生的海风风场的主要特征,然后利用 WRF 数值模拟结果进行对比分析,揭示完整的海风环流的时空发展演变过程。

1 地理位置、资料情况

1.1 地理位置

青岛位于山东半岛南部,地处黄海之滨,沿海岸线大致呈东西向分布,因此南风为向岸风,北风为离岸风。青岛地区 8 月属于夏季海洋性季风气候,大尺度的风场以显著的偏南风为主,从历史资料来看,偏南风的风向频率占气候平均的 60%以上^[8]。

1.2 资料情况

由于海风环流属于大气热内边界层中的中小尺度系统,为使海风环流从天气系统中显现出来,需要有精细、密集的探空和地面观测资料。2006 年 8 月,青岛站在每天 08 时、20 时(北京时,下同)的 L 波段雷达探空基础上,增加了 02 时、14 时的小球测风,利用小球测风与 L 波段雷达探空资料 4 个时次的风场数据,可以用来分析每天青岛站垂直方向上不同高度的风场,结合天气背景,判断是否在测站上空存在海风闭合环流,以确定是否为海风日。受探空条件所限,这种情况很有可能漏掉仅在海岸线附近维持发展的微弱的海风个例。

研究中使用了青岛站加密探空资料、地面逐分钟风场资料,同时为了研究海风环流的时空演变特征,还选取了一些地面测站的逐时加密观测资料,这些测站离海岸线距离远近不同,由南到北有海上的浮标 B 站、海岸附近的太平角站以及青岛站、即墨站、平度站,共 5 个站,各站的经纬度信息如表 1。

表 1 各观测站的经纬度坐标和海拔

站名	纬度/N	经度/E	海拔高度/m
浮标 B	36°02'	120°25'	0
太平角	36°02'45"	120°21'55"	25
青岛	36°04'	120°20'	77.2
即墨	36°23'	120°28'	26.2
平度	36°46'	119°56'	48.7

2 实际观测到的海风环流

2.1 实测海风环流

2006 年 8 月 19—22 日天气系统来看,这几天高空都为西北气流控制(天气图略),地面为华北高压前部,大气层结稳定,华北高压向东南方向移动缓慢,23 日对山东半岛的影响基本结束。天空状况以晴间多云为主,白天青岛站最高气温都达到 31℃ 以上,中午前后沿海附近地区转为南风,内陆仍维持北风,昼夜温差较大。海水温度在 24~28℃ 之间。

根据这几天天气系统演变情况,利用青岛站小球测风与 L 波段雷达探空采集到的每日 02、08、14、20 时 4 个时次的高空风场数据,得到青岛站垂直方向上高度间隔为 100m 的水平风场(u, v)分布情况。

8 月 18 日 02 时至 22 日 20 时探空资料风场的 v 分量如图 1(见彩页)所示(u 分量图略),8 月 18 日的高空风场全天都是北风,南风没有出现,海风环流没有发生,地面站也没观测到海风出现,但中午 14 时前后北风风速明显减弱,由早晨 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右减弱到 14 时的 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。其后 19—22 日都出现了海风环流。从天气尺度的背景风场来看,19 日和 20 日的风速较大,19 日夜间到 20 日凌晨,青岛站上空北风最大达到了 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于受到背景风的抑制,19 日和 20 日白天海风环流发展的较低,海风厚度(即海风环流中向岸流部分的南风高度)最高在 600m 以下,19 日夜间到 20 日凌晨以及 20 日夜间到

21 日凌晨都没有形成陆风环流。21 日中午前后上层背景风明显减弱到 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,海风环流得到较充分发展,海风厚度最高达到了 1400m,21 日夜间到 22 日凌晨,底层出现了较弱的陆风环流。

以上分析表明,21 日发生的过程是较为典型的海风环流、陆风环流先后出现的一个个例,针对这次典型过程(图 1 黑框中所示)作进一步分析研究,可以看出青岛站上空海、陆风环流在垂直方向上具有如下特征:

(1) 海风环流、陆风环流上部,即向岸风、离岸风之上都存在弱的反向流,表明海、陆风环流在垂直方向是一个闭合环流这一固有特性。图中可以看出,21 日 20 时,南风厚度达到 900m,其上方的回流中心在 1600m 附近,大小在 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,整个海风环流的高度可以达到 1700m 左右,且以海风厚度为主,上层回流部分势力明显较弱。22 日凌晨海风环流被陆风环流代替,底层转为北风,08 时左右,陆风的厚度最高达到 400m,而在 500m 高度上,同样存在一个范围较小的反向流,风速大小在 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,整个陆风环流的高度可达到 600m 左右,且以陆风厚度为主,上层向岸流部分较下层离岸流势力明显偏弱。以上分析可以看出,这次海、陆风过程中,海风环流的发展高度远高于陆风环流。海风厚度最高达到 1400m,而陆风厚度在 400m 以下。

(2) 海风环流发生在中午 14 时前,14 时到 20 时为发展最强盛时期,底层风速最大,20 时后,底层海风逐渐减弱消失,02 时前被北风代替;而 20 时后由于背景风减弱,上层的海风继续伸展维持直至夜间 02 时,可见海风在底层最先发展并在底层最先消失。陆风环流在 22 日 08 时完整发展,中午前消失,维持时间较短。

(3) 从海、陆风风速来看,海风风速在近地层可以达到 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,风速大小随高

度减小,上层回流部分风速较小;而陆风风速在近地层较弱,风速随高度增大之后又减小,存在离开地面的风速中心,上层回流的风速也小于低层;在底层北风风速明显小于海风。

2.2 海岸线附近海、陆温度差异

为了解海岸线附近海风发生发展过程中测站的温度变化情况,把 18 日到 22 日测站逐时加密温度资料,包括浮标 B 站气温、浮标 B 站水温和青岛站气温,随时间变化作逐时对比(图略)发现:青岛站这几天的最高气温都升到了 30℃ 以上,其中 19 日到 22 日都超过 31℃,而海温最高在 26℃ 到 27℃ 之间。19 日到 22 日海、陆气温差最大分别为 4.8℃、4.9℃、4.1℃、3.9℃,表明了发生海风环流这几天内海、陆之间的热力差异量度都接近 4℃ 或达到 4℃ 以上。从青岛站与浮标 B 站气温温差随时间的变化来看,21 日最大温差出现在 12 时附近。

18 日凌晨由于较强冷空气的影响,气温、海温下降明显,白天海温回升缓慢,最高不到 24℃,而青岛站和浮标 B 站白天的气温明显回升,但中午前后两者气温差最大不到 2℃,18 日青岛站没有发生海风现象,一方面由于背景场较强,抑制了底层热湍流的向上发展,也造成海、陆间热力梯度减小,结果没有形成海风现象。数据结果也表明海陆之间温度梯度主要取决于海上气温和陆上气温,海温并不具有决定作用。

2.3 地面风场演变

2.3.1 青岛站逐分钟风速变化

为了更清楚地找出海风过程发生发展的特征,研究其经过测站的准确时间、风速风向变化、维持时段、转向方式等方面的特征,针对 21 日海风过程,把青岛站逐分钟风场资料按时间顺序显示出 24 小时内每分钟的变化,如图 2。

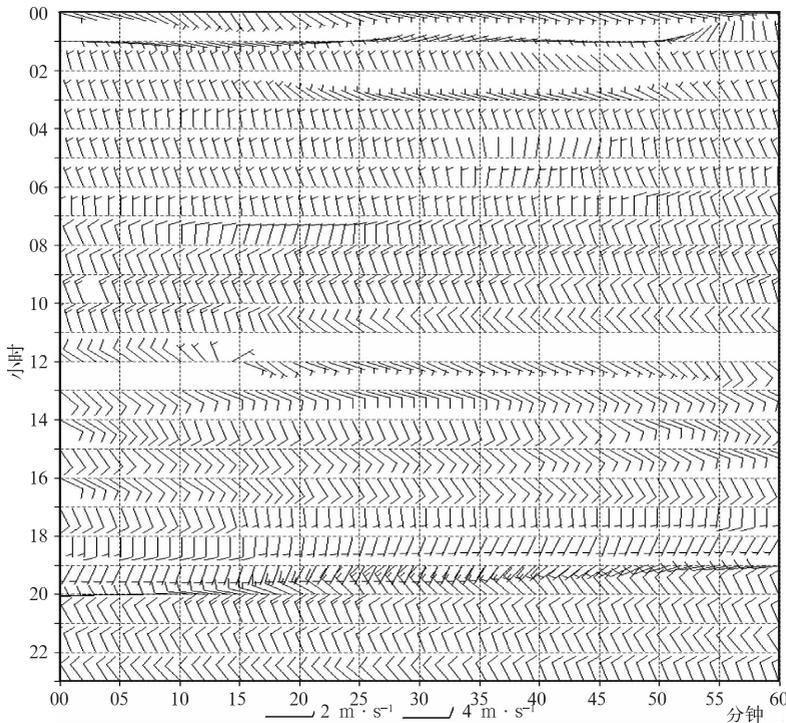


图 2 2006 年 8 月 21 日青岛站每分钟风速序列
横坐标为 01 分到 60 分,纵坐标为 00 时到 23 时

从图 2 可以看出,8 月 21 日青岛站北风时段从半夜持续到中午 12:15,夜间至早晨北风很弱,不到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;早上北风风速增大,最大的达到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,转海风前减弱到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,中午 12:13 到 12:17 是风向转换时间,几分钟内以顺时针方向转为东南风;开始东南风较弱不到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,半小时后加大到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,到 17:15 风速重新减弱到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下;东南风持续到 20 时后又转为北风,北风风速较大在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。

对 21 日中午到夜间青岛站的这次海风过程,有如下特点:1)风向转换时间较短,不到 5 分钟就由偏北风转为偏南风;2)偏转方式为顺时针转向;3)海风风速最大达到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但持续时间不是很长,大部分时间为弱风,在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下;4)日落后海风风速明显减弱,夜间到次日上午重新被北风代替。海风向内陆推进时造成风向在短时间内逆转突变的现象,卢焕珍等利用新一代多普勒雷

达观测到了同样的事实^[9]。

2.3.2 多测站地面风场演变

为分析 21 日海风水平方向上向内陆推进和影响程度,选取了一些离海岸线距离远近不同测站的地面加密资料,由南到北有浮标 B 站、太平角站、青岛站、即墨站、平度站,共 5 个站,各站的经纬度信息如表 1。将 21 日各站每小时加密风场观测数据随时间变化作对比(如图 3)。

从图 3 中可以明显看出,海风首先在 11 时到 12 时出现在岸基站太平角,在 12 时到 13 时到达青岛站,即墨站在 16 时到 17 时风场由偏北风转为偏南风。各站在 20 时之后以偏北风为主。平度站一直维持偏北风,说明海风没有到达平度站,海风向内陆推进的距离大约在 40km。沿海地区风场偏转得较明显,海风影响程度大,而内陆地区各站风主要受天气尺度背景风和局地因素影响,受海风影响较小。

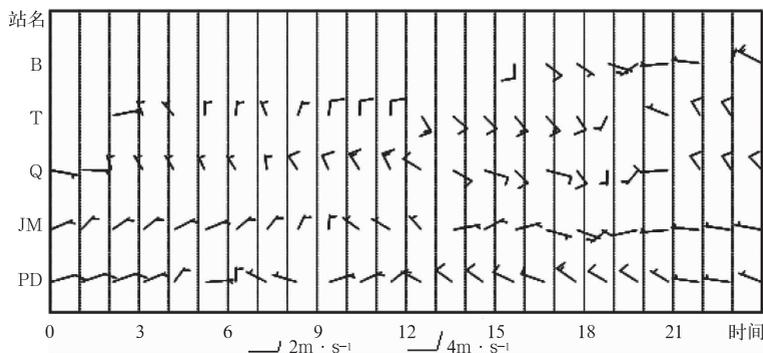


图 3 2006 年 8 月 21 日多测站风速随时间的变化
B 为浮标 B 站, T 为太平角站, Q 为青岛站, JM 为即墨站, PD 为平度站

3 WRF 数值模拟的海风垂直环流、时空演变及检验分析

3.1 模拟方案

为探讨海风环流的时空演变特性,采用 WRF 三层嵌套模式对 8 月 21 日的海风环流过程进行了高时空分辨率的数值模拟。嵌套

区域格距为 15km、5km 和 1.67km,垂直方向分为 35 层,在低层划分更细致一些。采用的地形场分辨率为 30s,中心在青岛站附近 (36°N , 120°E)。采用 NCEP AVN 实况分析资料和预报场资料(分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)作为初值化的背景场和边界场,模拟中加入了常规的高空地面资料。由于大气环流背景相对稳定,没有剧烈的对流不稳定,采用显式水汽方

案 WSM 6-class graupel microphysics, 积云参数化方案 Kain-Fritsch (new Eta) cumulus physics, 边界层采用 YSU PBL 方案, 辐射参数 RRTM longwave radiation, Dudhia shortwave radiation^[4]。

3.2 海风环流垂直结构分析

将模拟数据结果中垂直方向上风场的 v 、 w 分量(w 放大了 8 倍), 沿 $120^{\circ}25'E$ (青岛站) 做剖面, 得到海风环流垂直剖面图。图 4 为 21 日 17 时海风发展最强时的剖面图, 图中黑色实线和箭头标明了海风环流的轮廓。

从图 4 中可以看出, 21 日 17 时完整的海风环流的空间特征: 海风环流具有非对称结构, 底层是向岸风的大值区, 上层有微弱的

回流下沉区, 风速随高度减小; 海风环流右侧为海风的锋区位置, 风速等值线密集, 锋区两侧南、北风辐合, 上升气流非常明显; 海风环流伸展高度达 940hPa 左右, 大约是 550m 附近。

3.3 海风环流时空演变

为了研究海风环流的时空演变过程, 根据模拟结果, 把海风环流发生、发展及消失各阶段的剖面图, 截取各时次的完整海风环流部分, 按时间顺序进行合成, 同时图中标注了离海岸不同纬度位置的测站: 浮标 B 站、太平角站、青岛站、即墨站、平度站等五个站, 用以考察海风环流向内陆推进的时空演变情况。

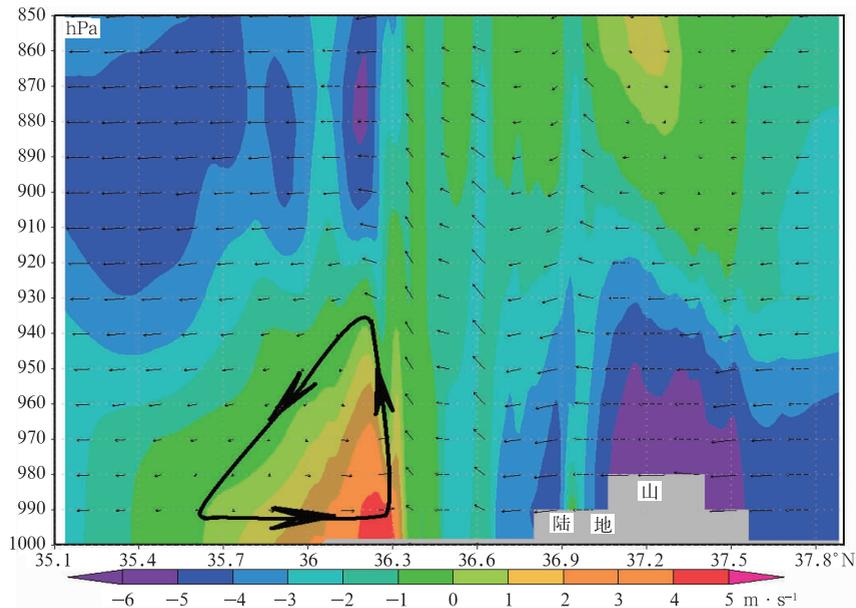


图 4 2006 年 8 月 21 日 17 时海风垂直环流

图 5 中可以看出 8 月 21 日完整的海风环流时空演变过程。

从时间来看, 海风环流在中午 14 时以前发生, 17 时前后较为强盛, 到夜间 20 时后减弱, 23 时基本为北风控制。14 时前, 海风环流在海岸线附近逐渐发展起来, 开始向内陆

推进, 14 时海风经过了青岛站, 继续向内陆发展, 17 时环流最强, 但未到达即墨站, 之后环流随日落而逐渐减弱, 到 20 时经过了即墨站继续向北推进, 遇到山东半岛北部较大偏北气流的阻挡, 到 23 时环流基本消散时最终没有到达平度站。考查 14 时到 20 时内海风

的推进速度,前进了约 0.45 个纬度,约为每小时 6~10km。从海风环流发展高度来看,21 日 14 时青岛站的海风厚度在 950hPa,约为 450m。从海风环流风速分布来看,海风锋区附近速度最大,达到 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,发展最强时锋区风速在 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上;风速随着海风锋的加强(减弱),风速也随之加强(减弱);锋区后部风速在 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下;海风风速随高度减小;上层是弱的北风回流下沉区。

图 5 中明显存在南风 and 北风的两个大值区,南风向北推进时,北风也向南推进,最终在半岛中部相遇;由于半岛北部的北风相当

于北岸(半岛临渤海的海岸)的向岸风,北风大值区可认为是北部的向岸海风与天气尺度系统向岸的背景风场的叠加结果,因而也呈现一定的海风周期特性。这两股相向的底层气流在山东半岛中部造成辐合上升区,引发底层明显的上升气流。薛德强等对此也进行了研究,指出山东半岛有海风生成时,半岛中部常存在一条辐合线,夏秋季节常伴随阵雨与雷暴的生成,有时可诱发强对流天气^[5-10]。

从模式结果来看,海风在海域的水平伸展范围能达到 30 多千米,海风最强盛时范围最大;海区的风速随离海风锋的距离增大而减小。

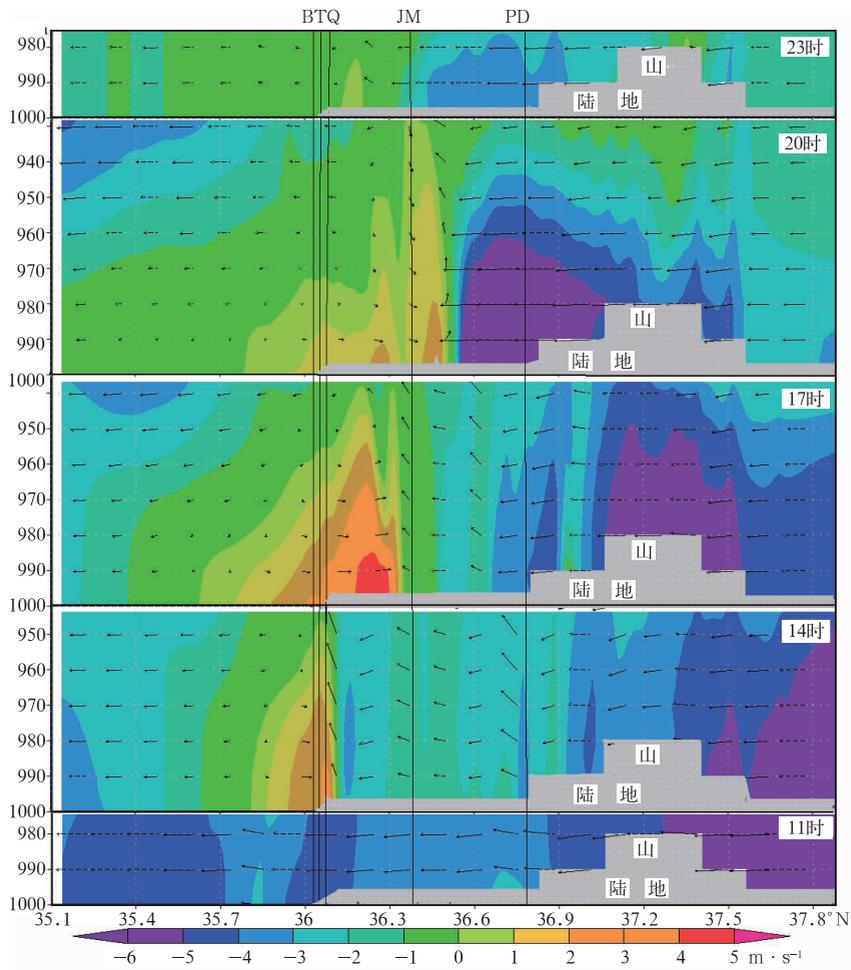


图 5 2006 年 8 月 21 日 11 时至 23 时海风环流时空演变图

B 为浮标 B 站, T 为太平角站, Q 为青岛站, JM 为即墨站, PD 为平度站, 细实线为各站所在的纬度

3.4 模拟结果检验分析

由于模式定时定点定量的精细预报结果差异很大,实际风场又受复杂因素的影响,因此从模拟海风环流的影响时间、最大速度和维持时间三个方面与实况作对照,作为检验指标进行分析检验。

由表 2 中可以看出,21 日浮标 B、太平角、

青岛、即墨 4 个站发生了海风,平度没有发生,表明从海风是否发生及向内陆推进的空间尺度来看,模式预报结果与测站实况一致;从海风发生时间来看,浮标 B、太平角、青岛站海风影响开始时间的模拟效果良好,误差在 2 小时以下,陆地站时间误差稍大;从风速来看,海风最大风速存在一定误差,沿海附近风速误差较小,内陆站即墨、平度的误差较大。

表 2 8 月 21 日模拟结果与实况检验对比

	浮标 B 实况	模拟	太平角实况	模拟	青岛实况	模拟	即墨实况	模拟	平度实况	模拟
海风开始时间/h	11	11	12	11	13	11	16	18	//	//
海风最大速度/(m·s ⁻¹)	4	3	4.9	3	4.5	4	1.9	2	//	//
维持时间/h	9	10	8	10	8	10	5	3	//	//

注://表示没有海风发生

另将 21 日 08 时至 22 日 08 时模拟结果中青岛站数据(图 6)与青岛站加密探空实测数据(图 1)作验证对比,可以看出:WRF 模拟的这次海风环流的发生时间、风速大小、海风厚度、维持时间等都比较接近,但存在一定的误差,模拟的海风最大风速比实际稍偏大了 1m·s⁻¹,各时段的海风厚度也比实况探测出的海风厚度偏低。

想,较好地模拟了海风环流的发生发展的时空演变过程,补充了实际探测数据的不足,但精确度上仍有一定程度的误差。

4 小结

通过对青岛地区 2006 年 8 月 21 日一次实际观测到的海风环流个例及其 WRF 模拟结果的详细分析,得出本次海风环流过程有如下特征:

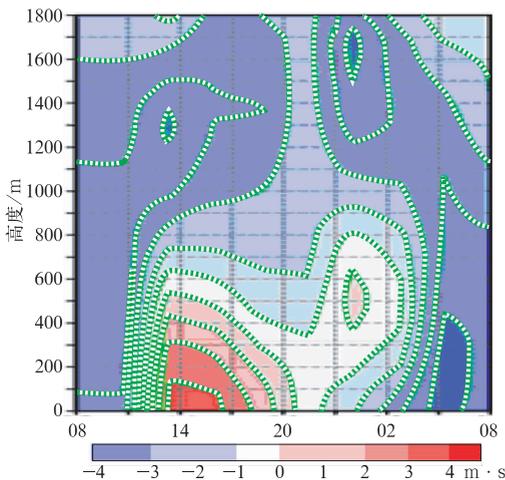


图 6 2006 年 8 月 21 日 08 时至 22 日 08 时青岛站海风环流 WRF 模拟结果

从以上检验可以看出,对于 8 月 21 日这次海风过程的精细数值模拟结果总体较为理

(1) 加密探空观测显示,海、陆风环流在垂直方向分别具有闭合环流,海风环流发展高度远高于陆风环流,这次过程海风厚度最高达到 1400m,而陆风厚度在 400m 以下。

(2) 青岛站地面观测表明,海风环流发生时间在中午 12 时,下午为发展最强盛时期,海风在底层最先发展并在底层最先消失,海风风速在近地层可以达到 3m·s⁻¹ 以上,风速大小随高度减小;海风环流发生时青岛站与浮标 B 站的海陆气温差在 4℃ 以上。

(3) 多测站观测数据表明海风环流向内陆推进大约 40 多千米。

(4) 青岛站加密风场观测资料显示,这次海风过程中青岛站逐分钟风速有如下特

点:由陆风转为海风风向转换时间在 5 分钟以下,时间较短;偏转方式为顺时针转向;风速最大达到 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且时间不长,大部分时间为 $2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下弱风。

(5) WRF 数值模拟检验结果表明 WRF 模式较为成功地模拟了本次海风环流发生发展的完整过程及结构特征,揭示了海风环流与半岛北岸相向风场的相互作用,结果造成半岛中部地区存在明显的辐合上升,WRF 数值模拟具有较好的模拟效果。

参考文献

- [1] 张清. 帆船 帆板(中国体育教练员岗位培训教材)[M]. 北京人民体育出版社,2000:358-359,516.
- [2] 李杰,吴增茂,何敏. 奥运青岛帆船赛的有碍天气的基本特征分析[J]. 海岸工程,2002,4:26-32.
- [3] 陆汉城,杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2004:90-100.
- [4] 常志清,吴增茂. 青岛海陆风三维结构的数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报,2002,32:877-883.
- [5] 薛德强,郑全岭,钱喜镇,等. 山东半岛海陆风环流及其影响[J]. 南京气象学院学报,1995,18:293-299.
- [6] 邢秀琴. 胶东半岛地区海陆风特征[J]. 气象,1997,23:55-57.
- [7] 庄子善,郑美琴,王继秀,等. 日照沿海海陆风的气候特点及其对天气的影响[J]. 气象,2005,31(9):66-70.
- [8] 洪光,徐晓亮. 青岛奥帆赛期间天气气候背景分析[J]. 应用气象学报,2006,17(增刊):54-59.
- [9] 卢焕珍,赵玉洁,俞小鼎,等. 雷达观测的渤海湾海陆风辐合线与自动站资料的对比分析[J]. 气象,2008,34(9):57-64.
- [10] 刘正奇,谢巨伦. 东西向海岸线对局地性降水的作用[J]. 气象,2003,29(12):41-44.

孙贞等：青岛地区8月一次海风环流实例分析和WRF模拟

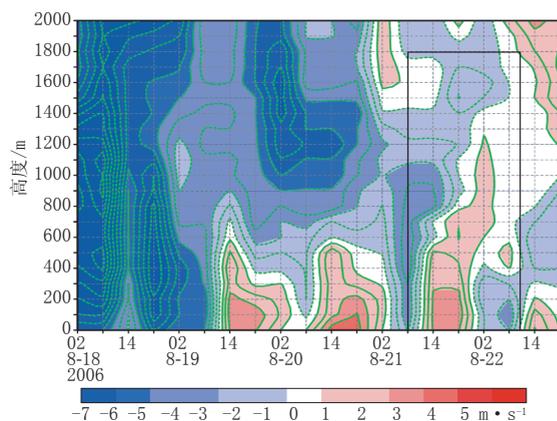


图 1 2006年8月18日02时至22日20时
青岛站探空垂直风场v分量图
蓝色为离岸北风，红色为向岸南风，
黑色框中为21日发生的海、陆风环流