0577-6619/2010/68(6)-0985-97 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

边界层流场和地形特征对青岛奥帆赛场午后海风影响的研究*

李庆宝[1] 苗世光[2] 刘学刚[1] 张苏平[3] 孙桂平[1] LIU Xiaochu[4]
LI Qingbao[1] MIAO Shiguang[2] LIU Xuegang[1] ZHANG Suping[3] SUN Guiping[1] LIU Xiaochu[4]

1. 青岛市气象台,青岛,266003
2. 中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089
3. 中国海洋大学海洋环境学院,青岛,266003
4. Department of Meteorology, University of Reading, UK
1. *Qingdao Meteorological Service*, *Qingdao* 266003, *China*
2. *Institute of Urban Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100089, *China*
3. *School of Oceanic Environment*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266003, *China*
4. *Department of Meteorology*, *University of Reading*, *UK*
2008-11-27 收稿,2009-06-29 改回.

Li Qingbao, Miao Shiguang, Liu Xuegang, Zhang Suping, Sun Guiping, Liu Xiaochu. 2010. On the impacts of boundary-layer flows and the terrain on the afternoon sea-breeze in the Qingdao Olympic sailing venue. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6): 985-997

Abstract The Olympic regatta is the only performance in the Olympic Games which is the natural wind-driven competition event. The wind in Qingdao in August (the Beijing 2008 Olympic Games period) is the weakest of the year, and the weak wind often impedes the sailing competition. However the weak wind in Qingdao is tied up with the development of land-sea breeze. The background conditions for the land-sea breeze development in the Qingdao Olympic sailing venue are analyzed, and simulated with a high-resolution numerical model. The results show that the background surface wind, the radial wind in the middle-upper planetary boundary layer (PBL), and the surrounding terrain and land-sea distribution, all affect the development of land-sea breeze in this area. Under clear sky, the surface conditions, including west wind, weak north wind, east wind and equable pressure field, as well as weak north wind in the middle-upper PBL, are all conducive to the development of sea breeze in the competition venue. However the surface conditions of south wind (either strong or weak) and strong north wind, the strong south wind and north wind in the middle-upper PBL, are all unfavorable to the development of sea breeze. However, when the surface wind is from the northeast, the blocking and decreasing of surface wind due to the upstream the Lao Mountain are favorable to the development of sea breeze. When the surface wind is southerly, the air flow in the area of sailing venue is bifurcated by the Lao Mountain and the Fu Mountain, and this effect is enhanced by the lateral sea breeze jet (southeast wind) developed in the Kiaochow Bay and the Lao Mountain Bay, resulting in the weak wind in the sailing venue. The above results have been successfully applied to the meteorological services for the Qingdao Olympic and Paralympic sailing competitions.
Key words Olympic sailing competition, Land-sea breeze, Boundary-Layer flow, Terrain, Bifurcation

摘 要 奥帆赛是奥运会唯一以自然风为动力的竞赛项目。而北京奥运会期间的8月,青岛的风速是一年中最小的,因风速过小致使帆船竞赛无法进行的情况时有发生。鉴于青岛的弱风与海陆风的发展状况关系密切,文中分析8、9月青岛奥帆赛和残奥帆赛期间竞赛海域海陆风的发展条件,并用高分辨率数值模式对相关个例进行了模拟试验研究。结果发现,地面背景气

* 资助课题:山东省青岛市气象局奥帆赛气象服务研发课题专项,国家自然科学基金项目(40505002、40775015)。
作者简介:李庆宝,主要从事气象洪水预报、暴雨预报、海陆风、地形气象影响等研究。E-mail:liqingbao0729@yahoo.com.cn

流、边界层中上部径向气流和周围地形、海陆分布等边界层特征,都对竞赛海域海陆风的发展产生影响。其中晴天时,地面西风、弱的北风和东风、均压场环境以及边界层中上部弱的北风条件等,都是竞赛海域海风发展的有利条件;而地面南风(无论大小)、强的北风以及边界层中上部较强的南风和很强的北风等,则是海风发展的不利条件。此外,当地面为东北风时,位于竞赛海域上游的崂山对地面风速有阻挡减弱的作用,从而有利于海风的发展;地面为南风时,崂山和浮山等地形强迫气流在竞赛海域附近向左右分为两支,胶州湾和崂山湾侧向海风(东南风)急流发展又加大了这种分流作用,导致竞赛海域常减小为弱风,使比赛无法进行。以上结论在2008年奥帆赛和残奥帆赛气象保障预报服务中得到运用。

关键词 奥帆赛,海陆风,边界层流场,地形,分流

中图法分类号 P457

1 引 言

第29届北京奥运会和残奥会中的海上帆船、帆板比赛项目分别于2008年8月和9月在中国山东省青岛市浮山湾至赤岛一带海域举行。“风是动力,水是路”,帆船比赛是在自然风的推动下进行的。因而,帆船比赛能否正常进行,主要取决于竞赛海域的风向、风速。而海岸线附近的风向、风速,除受天气系统、地形走向等因素影响外,还受海陆风的影响(常志清等,2002;王玉国等,2004;吴增茂等,1999;郝为锋等,2001;黄倩等,2007)。因此,研究海陆风的发展条件,对正确预报竞赛海域的风向、风速,保障奥帆赛正常进行有重要意义。关于青岛的海陆风,已有不少研究(薛德强等,1995;洪光等,2006;盛春岩等,2007;林行等,2004;李庆宝等,2008a,2008b),这为竞赛海域海陆风生消发展的深入研究提供了大量的参考依据。例如,薛德强等(1995)研究山东半岛的海陆风环流,发现该地区夏秋季海风多于冬春季,且常在半岛中部产生海风辐合线;洪光等(2006)对青岛陆地、沿海及海岛等地风的统计发现,8月各站白天海风发生频率都很大;盛春岩等(2007)利用激光雷达和多普勒雷达分析了竞赛海域附近的海陆风三维结构,发现温差不是决定海陆风的唯一因子;林行(2004)、王卫国(2004)、常志清(2002)等都对青岛地区的海陆风进行了数值模拟研究,发现由于青岛特殊的地形分布,导致该地区有多支海陆风相互作用的情况等。苗世光等(2009)建立了青岛奥帆赛高分辨率数值模式系统,数值试验分析表明:城市化引起城市热岛效应,增大了海陆温差,使海风加强;城市建筑物拖曳作用使风速减小,从而使海风推进速度减缓;精细下垫面资料的引入对海风等局地环流的高分辨率数值模拟至关重要。上述研究都为竞赛海域海陆风的继续深入研究打下了基础。

李庆宝(2008b)在青岛奥帆赛场弱风非弱风的统计分析中发现,在奥运会举办时段,青岛竞赛海域弱风的发生几率在1/3以上。而在弱风条件下,几乎所有的比赛项目都无法进行。由此可见,弱风的预报对奥帆赛的正常进行至关重要。进一步的分析还发现,竞赛海域弱风的形成,除与赛场周边地形及天气系统有关外,相当多的个例与竞赛海域海风的生、消发展关系密切。例如,有时早晨风速很小,午后甚至上午海风起来后,风速会明显加大,非常有利于帆船比赛;而在另外一些时候却相反,早晨风速本来很大,因海风的加入,午后风速反而变小,甚至减弱为弱风环境,致使比赛无法进行。还有一些情况是:早晨风速虽不大,但其地转风风向却不利于海风的发展,致使全天都处于弱风环境中。也就是说,不同背景环境条件下,发生弱风的几率大不相同。而造成这种差异的原因有两个:一是地形作用影响(李庆宝,2009);二是海陆风影响(李庆宝等,2008a)。换句话说,边界层背景特征可能影响或制约海风的生、消变化,而海风的发展情况又直接影响竞赛海域的风速和风向。这就提出一个十分重要的问题:不同的边界层特征,对海风的发展到底有什么样的影响?除地面背景流场外,边界层其他层次的风场对海风的影响如何?复杂地形和海陆分布对海风的发展又有怎样的影响?它们的作用机理是什么?可否通过分析研究,找出预报依据,只要根据早晨的边界层背景条件,就可推测和预报午后海风的可能发展状况,进而预报竞赛海域弱风、非弱风及风向的变化情况呢?以往的研究,大多只给出了海陆风的统计状况,或对某一两类特定条件下的典型海陆风个例进行模拟研究。本项研究的目的,就是在初步归类

分析的基础上,通过对浮标站海风发展边界层背景条件的研究,寻找其规律性,为竞赛海域海风的预报提供参考依据。研究的方法主要是浮标站风随时间演变的分析,地面背景气流状况对海陆风影响的探讨,探空风(边界层内)垂直分布结构对海风环流作用的研究,地形、海陆分布对海陆风影响的分析,以及数值模拟结果对比等。其中因帆船比赛时间为12—17时,因而研究的重点主要是白天、特别是午后海风的发展条件问题。

2 帆船竞赛海域周边地形及海陆分布特征

第29届奥运会中的奥帆赛和残奥帆赛竞赛海域位于青岛市浮山湾至石老人湾以南约70余平方千米的海域,共分A、B、C、D、E 5个赛区(图1)。离岸边最远的D区,与海岸线垂直距离约10 km,其他赛区离海岸线3—7 km。西侧离岸较近的A、B二区主要承担帆板等轻量级帆船比赛任务,大量级的重要比赛都在中东侧的其他赛区。穿插于几个赛区之间的是5个水文气象浮标观测站。考虑到位置最重要、代表性最好、资料长度也较长,本文重点分析竞赛海域最南边的浮标站c资料,该站坐标为(36.0122°N,120.4405°E)。此外,分析资料所用时间均为北京时。

竞赛海域的东、南两个方向为黄海,海面上有一些面积很小的岛屿,其中南侧数千米内的最大岛屿为大公岛,面积0.17 km^2,海拔120 m。赛场的北面为青岛市区及崂山区,海岸线走向略呈东东北-西西南。竞赛海域的北部自东而西依次分布着崂山(海拔1133 m)、午山(海拔398 m)、浮山(海拔368 m)、太平山(海拔150 m)和伏龙山(海拔76 m),青岛探空站位于伏龙山山顶。以上山脉的海拔高度,自西而东渐次递增。竞赛海域的西北方向是胶州湾区域,在胶州湾口,即竞赛海域的正西偏南区域有地势不高的凤凰岛、竹岔岛等,胶州湾西、北、东三面均为陆地。竞赛海域的东北面为半岛最高山——崂山,崂山的东侧是崂山湾,崂山湾西、北二面为陆地。

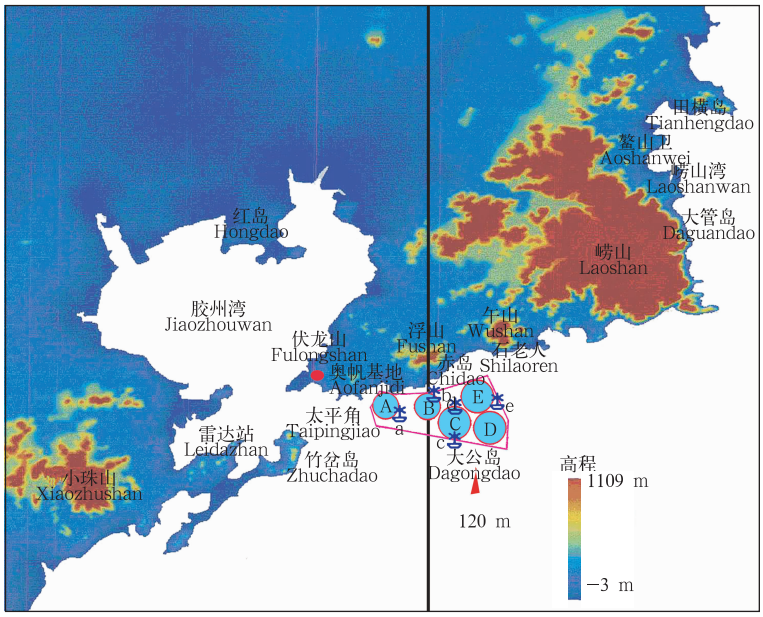


图1 青岛奥帆赛各赛区位置及周围地形高度示意图
(小写字母表示浮标站位置,大写字母表示赛区,
其中浮标站c位于C赛区南侧,黑色直线为垂直剖面位置)
Fig. 1 Locations of the Qingdao Olympic Sailing Venues and the distribution of surrounding terrain
(Capital letters denote the sailing venues; letters in lower case denote the location of buoys, where Buoy c is located on the southern side of Venue C. Black solid line denotes the location of vertical cross section)

3 方法与模式

本文采用天气学经验总结与数值模式模拟相结合的方式进行研究。所用的背景气流和海陆风概念均采取青岛市气象台业务预报中常用的方法,模式分析也采用奥帆赛期间使用的业务模式进行。

3.1 地面背景气流

地面背景气流应等于实际风减去海陆风,本文直接用地转风代替背景风。考虑到崂山等地形对竞赛海域风的影响,以东西向窄、南北向宽的原则将各向地面背景气流的分界方位分别取为 70°(北与东)、130°(东与南)、250°(南与西)和 300°(西与北)。其中均压场条件为:青岛至济南、成山头和连云港 3 站的等压线条数均不超过 1(0.5 hPa/条)。此外,地面背景气流强度用气压梯度(单位:hPa/100 km)表示。

3.2 海陆风

根据大气动力学原理,不考虑科氏力影响时运动方程(陆汉城等,2004)为

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}+KV=(T_{\mathrm{a}}-T_{\mathrm{b}})\frac{R}{L}\ln\frac{p_0}{p_1} \tag{1}$$

式(1)中,左侧第 1 项为沿海风路径上的平均加速度,K 为摩擦系数,T_{a} 为陆地上空的气温,T_{b} 为海洋上空的气温,p_0、p_1 分别为海风环流上下边界上的气压值,R 为气体常数,L 为海风环流总长度。由式(1)可见,海陆风主要是由海陆温差($T_{\mathrm{a}}-T_{\mathrm{b}}$)引起的,海陆风的方向则垂直于海岸线。在海岸线附近,实际风已包括了海陆风的贡献。

由图 1 可见,青岛奥帆赛竞赛海域附近的海岸线走向近似于东西向,因而在下面的分析中认为南风为海风,北风为陆风,分析中直接使用全风速。海陆风的影响程度分 3 种情况:(1)明显的海陆风。即夜间为北风,早晨北风减小,并逐渐转为南风,午后南风最大,傍晚又再次转为北风。(2)有海陆风影响,但不十分明显。例如白天北风减小或南风增大;或风速变化不大,风向虽由偏北转为偏南,但实际转角很小。(3)基本无海陆风影响,即风向风速变化都不大。海陆风的生成原因在于"海陆温差",浮标站 c 与浮山自动站(位于浮山南侧半山腰)白天的最大温差值

$$T_{\mathrm{d}}=\max(T_{\mathrm{a}}-T_{\mathrm{b}}) \tag{2}$$

其中 T_{d} 为白天海陆温差最大值,T_{a} 为浮山自动站气温,T_{b} 为浮标站 c 气温。

海陆风的最大特点是夜间为陆风,白天为海风,昼夜风向相反。由于天空的云量状况等存在差异,致使每天的海陆风变化幅度有所不同。为反映这种变化程度,本文特定义海陆风强度指数

$$H_1=V_{\max}-V_{\min} \tag{3}$$

式(3)中,H_1 为海陆风强度,单位为 m/s,$V_{\max}$ 为日间最大风速,$V_{\min}$ 为夜间最小风速(均以南风为正)。

海风强度与海风环流有关(盛春岩等,2007),即边界层中上部背景气流为离岸风时有利于海风的发展,而向岸风时则相反抑制海风发展,为此 700—1500 m 的平均径向风分量(北风为正)作为背景"回流强度"

$$H_2=(V_1+V_2+V_3)/3 \tag{4}$$

式中 H_2 为回流强度,单位为 m/s,V_1、V_2、V_3 分别为青岛伏龙山探空站(54857)当日 07 时 680、1000、1500 m 高度的径向风分量(北风为正)。

3.3 模拟方案

为了解决本项分析研究中观测资料在空间分布密度方面的不足、进一步揭示海陆风特征,本文采用 WRF 模式进行了数值模拟研究。WRF 模式是为业务预报和大气科学研究而设计的新一代中尺度数值天气预报模式(Skamarock, et al, 2005)。本项研究中采用 5 重双向嵌套模拟区域,水平网格距(网格数)分别为:40.5 km (91×91), 13.5 km (91×91), 4.5 km (91×91), 1.5 km (91×91),0.5 km (151×121)。垂直方向分为 38 层,模式顶为 50 hPa,1 km 以下有 13 层,以便精细模拟边界层内部结构。采用的物理过程方案有:MYJ 边界层方案(Janjic 1990, 1994)、WSM6 微物理方案、Dudhia 短波辐射方案(Dudhia 1989)、RRTM 长波辐射方案、Noah 陆面模式(Chen, et al, 2001; Ek, et al, 2003),另外第 1、第 2 重区域还选用了 KF 积云方案。数值模拟初始和边界条件选用 NCEP 1°×1°再分析资料。2006—2007 年 8—9 月 19 个典型个例的检验分析表明(李庆宝等,2008b):该模式系统可以较好地模拟青岛地区陆地及海上温、湿、风的变化特征。

4 地面气象条件对海陆风发展的影响

实践证明,地面不同背景条件(气流方向、气压梯度、海陆温差和天空云量等)下,海陆风的发展情况有很大差异。以地面天气图上等压线不同走向和梯度为主(见3.1节介绍),分5类研究这些条件对海陆风发展的影响。所选11个个例的有关统计数据列于表1,其中风速正值为南风,W 为地面地转风向,T_d 为日间最大陆(浮山站)海(浮标站c)温差,G 为地面气压梯度(单位:hPa/100 km),H_1 为海陆风强度(单位为m/s),H_2 为回流强度(单位为m/s),D 为天空状况:晴或阴。

4.1 地面偏北气流对海陆风发展的影响

表1中3个北风个例的共同特点是都处于地面冷高压前部的辐散环境中,天气晴好;海陆风强度(H_1)相当(6.1—7.0 m/s),但海风风速却相差甚远。

表1 各种背景气流条件下浮标站c风速变化(单位:m/s)

Table 1 Changes in the surface-level wind speed (m/s) at Buoy c in the different background flow

	N_1	N_2	N_3	S_1	S_2	S_3	S_4	E_1	E_2	W_1	C_1
	20060918	20070904	20060929	20070808	20070809	20060811	20070815	20070822	20060824	20060910	20060912
02:00	-4.9	-3.9	-1.5	7.2	3.5	-1.2	4.3	-4.5	-0.8	-0.8	-0.5
05:00	-6.9	-4.5	0	4.2	1.8	-2.1	-1.2	-3.7	-2.2	-1.9	空
08:00	-8.6	空	-1.9	3.1	3.0	-2.0	-1.5	-6.9	-1.4	-2.5	-1.9
09:00	-4.6	-5.3	-3.0	2.1	1.6	-1.4	-0.7	-6.6	-1.1	-2.7	4.2
10:00	-7.3	-4.1	-1.8	0.7	2.5	-1.3	0.6	-8.9	2.8	空	4.8
11:00	-6.0	-4.5	2.1	1.0	2.6	-0.6	1.3	-8.9	-2.2	2.2	5.0
12:00	-6.0	-4.9	3.8	0.9	2.6	-0.5	1.3	-8.9	3.8	3.2	5.9
13:00	-5.2	-2.6	4.2	2.2	4.8	-1.1	1.2	-8.8	-4.8	3.8	6.2
14:00	-5.2	2.5	4.0	2.7	3.3	-1.9	1.8	9.2	-4.5	5.9	4.2
15:00	-4.1	2.0	3.2	1.7	3.7	0.9	2.1	9.2	4.1	5.5	4.7
16:00	-4.1	1.2	3.3	0.6	空	1.9	1.8	7.9	4.6	5.2	6.8
17:00	-2.7	1.4	2.5	0.0	空	0.0	1.7	6.9	4.6	5.5	5.5
18:00	-3.8	2.4	2.1	1.6	2.6	0.7	1.0	6.5	4.2	5.5	5.4
19:00	-3.3	0.5	1.1	0.8	3.5	1.4	1.2	空	3.5	6.2	4.8
20:00	-1.9	-3.8	0.2	1.6	4.1	1.3	1.1	6.5	-2.3	5.6	2.3
23:00	-5.6	空	-0.7	空	4.2	0.0	0.9	空	-5.5	6.0	-2.8
W(°)	350	40	50	250	230	190	140	95	130	270	110
T_d(℃)	2.3	4.6	2.8	1.6	1.7	4.4	1.7	3.5	3.1	2.5	2.6
G(hPa/100 km)	0.8	0.7	0.4	0.9	0.7	0.4	0.3	1.0	0.4	0.7	0.2
H_1(m/s)	6.7	7.0	6.1	1.1	3.0	4.0	3.6	16.5	10.1	8.7	9.6
H_2(m/s)	9.1	7.2	5.5	-5.2	-5.2	-5.1	3.2	2.9	-0.6	3.4	2.1
D	晴	晴	晴	晴	阴	晴	阴	晴	晴	晴	晴

注:N_x 为北风个例,S_x 为南风个例,E_x 为东风个例,W_1 为西风个例,C_1 为均压场个例。

N_1 无海风,只是白天北风逐渐减小。

N_2 在午后有短时弱海风,帆船比赛无法进行。由图2a可看出,崂山西南侧的实际海风区域太小,以致模式未计算出海风发展。由此可见,与对较大范围海风的模拟相比,该模式对此类特别小尺度的局地海风事件的模拟能力相对较弱,有待进一步改进。

N_3 是一次典型的海陆风过程。12时左右先从海上转为南风,而后逐渐向北推进到陆地(图2b),19时达最北部的胶州湾一线,夜间又快速南撤,22时海陆上空均被陆风占据。海风锋午后北进、夜间南撤的过程清晰可见。

结合地面背景气流强度分析可见,N_1、N_2 地面气压梯度大,对应的风速变化情况是:夜间风速大,午后风速减小,N_2 还一度转为较弱的南风,使比赛无法进行。这个例子(N_2)告诉我们,有时海风的出现反而会影响帆船比赛的正常进行。而 N_3 气压梯度远小于 N_1、N_2,风速的特点是夜间北风风速较小,白天转为南风,且在午后达最大,非常有利于比赛。可见,晴天条件下,弱北风气流条件最有利于海风的发展。

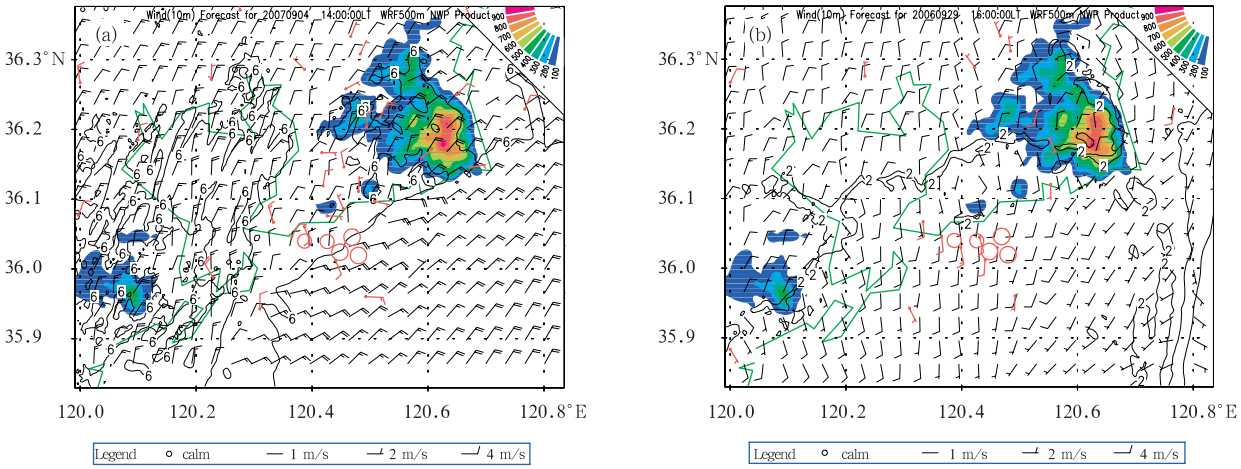


图 2 2007 年 9 月 4 日 14 时(a)和 2006 年 9 月 29 日 16 时(b)北风个例模拟及实况
(等值线为地面风速,阴影为海拔高度,红色风向杆表示自动站观测值,
红色圆圈为奥帆赛场位置)

Fig. 2 Simulations and observations for the case of northerly
(a. 14:00 BT 4 Sep, 2007 and b. 16:00 BT 29 Sep, 2006;
the isotaches are on surface level, shaded areas show
elevation, red wind vectors are the values obtained from auto-stations,
red circles mark the location of the sailing venues)

4.2 地面偏南气流对海陆风的影响

由表 1 可见,4 个南风个例的海陆风强度是所有个例中最小的,平均(3.2 m/s)不足北风(6.6 m/s)的一半。由表 1 中各时次的实际风看,4 个例子的海风也都很小。究其原因,这可能与海陆温差太小有关,S_1、S_2、S_4 的海陆温差分别只有 1.6、1.7 和 1.7℃,是所有个例中最小的 3 个。而海陆温差是海陆风产生的基本条件,温差小自然不利于海陆风发展。当然,温差并不是海陆风发展的唯一条件。S_3 的海陆温差高达 4.4℃,在所有个例中列第 2 位,但海陆风依然很小(原因在第 5、6 节中讨论)。南风个例海陆温差大多偏小的一个原因是,南风的平流作用使陆地上空的气温不易升高。当然,地面气压梯度越大(S_1、S_2),这种平流作用则越强,海陆温差也就越小。比较 S_3 和 S_4 可知,当气压梯度较小时,海陆温差则主要取决于天空状况:阴天小(S_4),晴天大(S_3)。

由上可见,地面为南风时,无论气压梯度大小、晴天阴天、海陆温差大小,均不利于海风的发展。

4.3 地面偏东气流对海陆风的影响

选择东风个例的原则是气压梯度较大(E_1)和较小(E_2)各 1 例。由表 1 可见,这两例海陆温差较大,海陆风强度也是所有个例中最强的。但实际上,E_1 并无明显的海风,只是该例风速特别大,且其风向上午东略偏北,下午东略偏南,造成了强海陆风的假象。E_2 夜间风速很小,午后风速最大,具备典型的海陆风特征。由模式计算的 10 m 高度上的风速可见(红色为实况),E_1 无论海洋陆地,风向均一致偏东,只有在崂山等山麓处风向才因地形阻挡而略有偏转(图 3a)。E_2 则不同,海洋上白天大多为持续的偏东风;海岸附近 10 时起风向开始向南偏转,午后为持续的东到东南风;而陆地上则白天大多数时间为南到东南风,是典型的海风特征(图 3b)。可见,东风+弱气压梯度有利于海陆风的发展。实际上,因地形和海陆分布特点所决定,东风时无论有否海陆风发展,午后的实际风速都不会太小(李庆宝等,2009),不会影响帆船比赛的正常进行。

4.4 地面偏西气流对海陆风的影响

8—9 月,地面西向背景气流场个例极少,表 1 只给出气压梯度较大(0.7 hPa/100 km)时的正西风个例 1 个。结合图 4 可看出,该个例具备典型的日间海风、夜间陆风的特点。说明西风晴天时,非常有利于海陆风的生消发展。

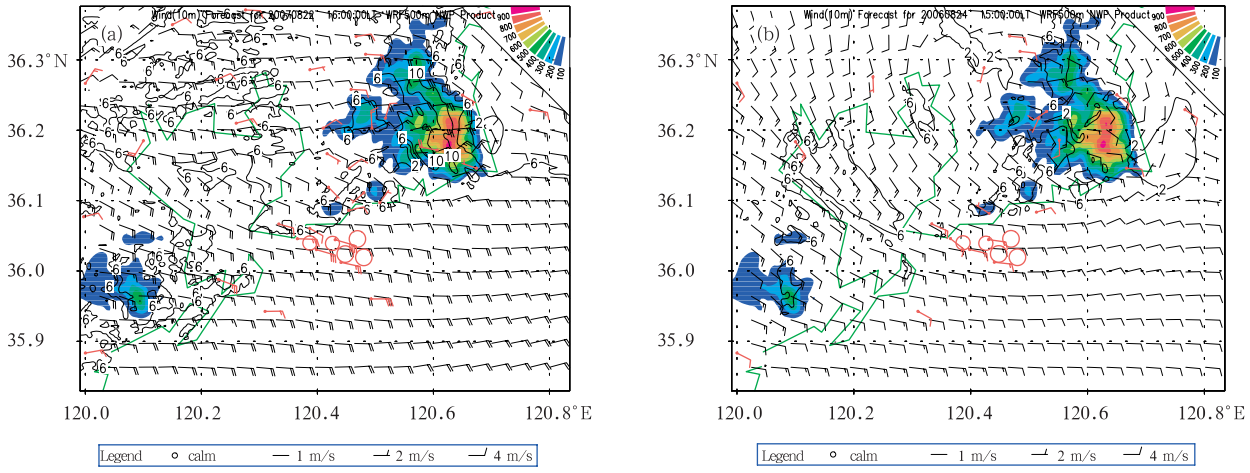


图 3 2007 年 8 月 22 日 16 时(a)和 24 日 15 时(b)东风个例模拟风场

(说明见图 2)

Fig. 3 The same as in Fig. 2 but for easterly

(a. 16:00 BT 22 Aug 2007 and b. 15:00 BT 24 Aug 2006)

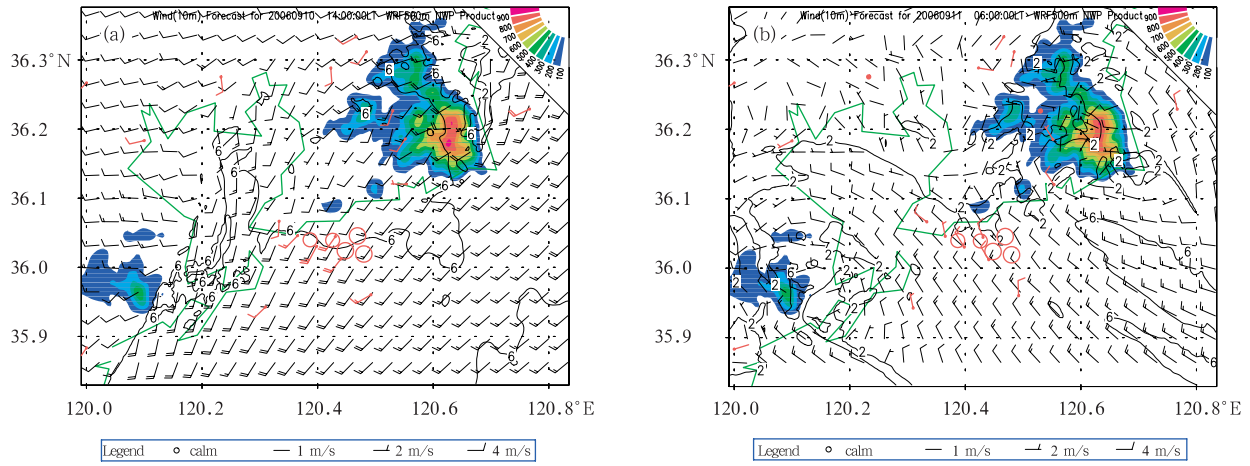


图 4 2006 年 9 月 10 日 14 时(a)和 11 日 06 时(b)西风个例模拟风场

(说明见图 2)

Fig. 4 The same as in Fig. 2 but for westerly

(a. 14:00 BT 10 Sep, 2006 and b. 06:00 BT 11 Sep 2006)

4.5 地面均压场环境对海陆风的影响

纯粹的均压场条件并不存在,表 1 给出了一个地面气压梯度较小(0.2 hPa/100 km),风向偏东且晴天的个例。可见,该个例为典型的海陆风过程:夜间为弱北风,白天南风加强,13 时和 16 时(均为 6.2 m/s)有两个风速极大值。模拟起始时刻,整个模拟区域为东风。9 时起,离岸较远的海洋风向未变,但海岸线附近的风向顺转,至 13 时,竞赛海域模拟和实况均为东南风,16 时海风范围达最大,强度也达最强(图 5a)。实况(12 时 2 m 高度 8 m/s)比模拟的 10 m 高度风速(4 m/s 左右)要来得大(表 1 为 2 m 高度风速,图 5a 中 10 m 风为订正值)。到夜间,模拟(21 时)和实况(03 时)先后转为东北风。均压场环境下的垂直海陆风环流也很明显,下午逐渐北推到陆地上空(图 5b)。

由上可见,均压场环境,同样有利于竞赛海域海风的发展,对比赛非常有利。

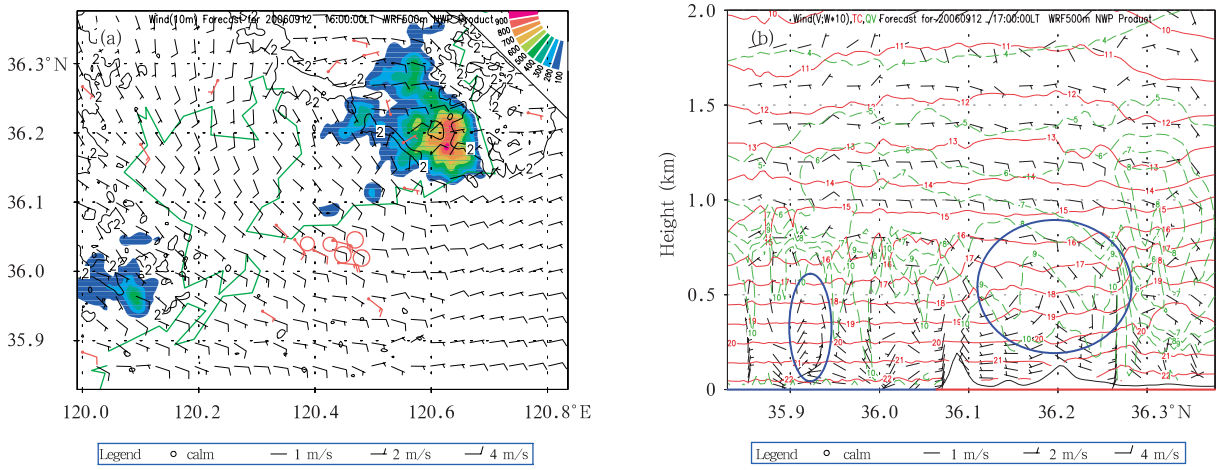


图 5 2006 年 9 月 12 日 16 时静风个例模拟风场平面(a)及 17 时剖面(b)

(图 5b 中红色等值线为温度,绿色等值线为比湿,X 轴蓝色部分代表海洋,红色部分代表陆地,其他说明同图 2)

Fig. 5 Simulative results for the case of calm wind

(a. the horizontal field at 16:00 BT 12 Sep 2006 and b. the vertical cross section at 17:00 BT 12 Sep 2006; in Fig. 5b, isotherms are in red and specific humidity lines are in green. In the axis *X*, blue part marks the sea while red part marks the land. Blue circled area indicates the scope of sea breeze circulation. The other caption is the same as in Fig. 2)

4.6 各种地面背景气流条件对海陆风影响的综合分析

结合前面的分析,将 11 个个例分为 3 组加以讨论(图 6)。

(1) 北风组(N_1、N_2、N_3)。晴天时海陆风强度较强,组内海陆风强度相差不大。但组内海风风速(表 1)却相差很大:N_1 气压梯度大,背景风太强,白天只是风速减小,风向未变,因而无海风,但能比赛;N_2 气压梯度虽大,但竞赛海域附近的实际背景风较小,起海风后风速更小,无法比赛;N_3 气压梯度小,实际背景风风速很小,但午后海风最强,有利于比赛进行。

(2) 南风组(S_1、S_2、S_3、S_4)。南风组海陆风强度最小。无论气压梯度强弱,无论天气晴阴,无论海陆温差大小,竞赛海域风速大多很小,或基本无海风,致使多数情况下比赛无法进行。

(3) 混合组(E_1、E_2、C_1、W_1)。该组包括了东风、西风和静风 3 种背景情况。由表 1 和图 6 可见,晴天时该组海陆风强度和实际风速均为各组中最大,对比赛最为有利。

综合以上各小节分析可见,晴天条件下,地面西风、弱的北风和东风、均压场环境都有利于海风的发展;强的北风不利于海风的发展;南风无论强弱,均不利于海风发展。

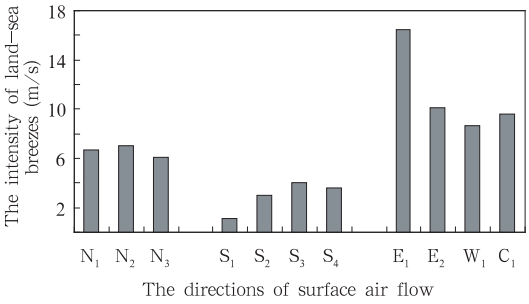


图 6 地面气流方向与海陆风强度分组显示

Fig. 6 Relationship between the directions of surface air flow and the intensity of land-sea breezes for the different groups

5 边界层中上部径向气流对海陆风发展的影响

在经典的海陆风环流理论(陆汉城等,2004)中,完整的海风环流是:近地面吹向岸风,在数百米上空则相反,吹离岸风。而且,进一步的研究发现,海风能否持续发展,往往与上层离岸风(也叫回流)的发展状况关系密切(盛春岩等,2007);回流越明显,海风环流越完整,近地面的海风越强,持续时间也越长。同时,回流高度上的背景气流对海风环流也会产生影响,适当的同向气流(离岸风)有利于海风环流的发展;而反向气流(向岸风)则可能会抑制海风环流的发展。为了研究回流高度背景气流方向和强度对竞赛海域海

风发展的影响,表1中给出了青岛探空站07时700—1500 m的平均径向风速值(H_2)。

5.1 边界层太强的北风并不利于海风的发展

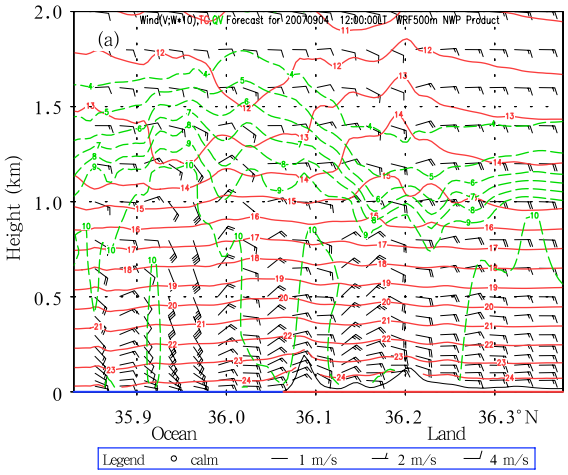
表1中3个北风个例中N_1最大,回流强度N_3的最小,而海风的发展则恰恰相反。这说明回流高度上太强的北风并不利于海风的发展,而且当北风大到一定数值后,其值越大,海风反而越小。分析07时青岛探空资料(表2)可知,N_1和N_2边界层最大风高度明显低于N_3,说明偏北气流时,边界层最大风高度太低也不利于海风的发展。由表2可见,N_3边界层中下部的全风速值均大于N_2,只是北风分量(H_2)明显小于N_2,最终N_3的海风却大于N_2。这说明,竞赛海域海风的发展主要与径向风分量关系密切,而与纬向风分量关系不大。其原因是,气温等物理量的海陆交换主要决定于径向风分量,而与纬向风无关。对比图7a、7b,就可以说明这一结论。强北

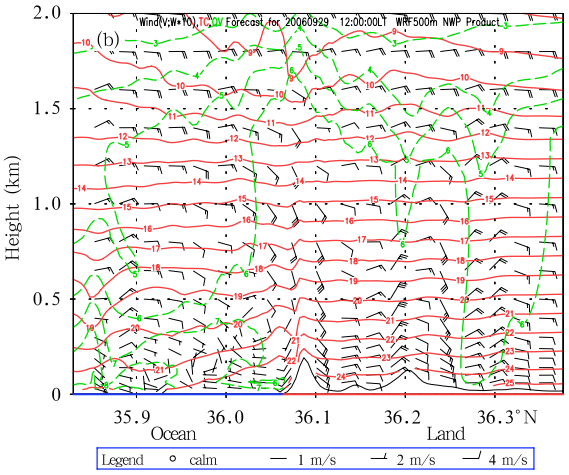
表2 部分晴天个例当日07时青岛伏龙山边界层探空风资料(单位:风向°,风速 m/s)

Table 2 The data of boundary layer wind at 07:00 BT of some clear days in Fulongshan, Qingdao

(Unit: wind direction: degree, wind speed: m/s)

高度	N_1		N_2		N_3		S_1		S_3		E_1		E_2		W_1		C_1	
(km)	风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速
3.00	19	9	36	8	310	5	242	10	215	7	73	4	244	5	296	14	101	3
2.00	5	8	26	6	359	6	230	10	202	4	81	8	99	3	336	13	70	6
1.50	338	8	32	5	19	7	223	10	226	4	76	7	87	3	312	12	71	7
1.00	338	10	27	8	39	10	224	7	198	7	52	7	101	4	286	7	68	6
0.98	340	10	27	8	41	11	223	6	198	7	61	7	101	4	286	7	69	5
0.68	347	11	17	9	44	10	228	5	194	6	59	5	114	3	274	5	65	4
0.50	347	10	11	9	42	9	231	4	185	5	55	5	111	2	274	5	101	3
0.38	344	8	6	8	37	8	226	4	176	4	52	6	100	2	276	5	70	6
0.08	360	5	360	4	360	4	180	4	C	0	45	4	C	0	315	3	71	7





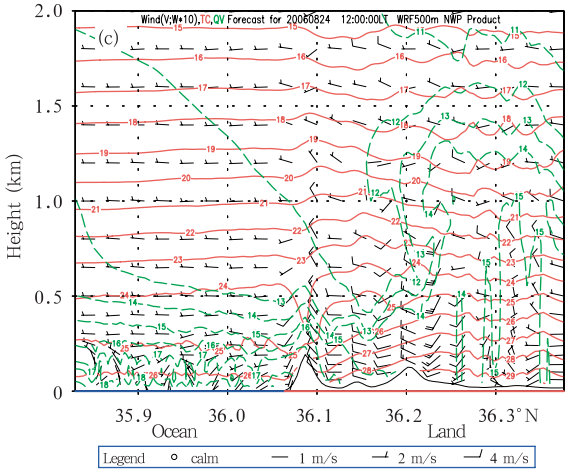


图7 2007年9月4日12时(a)、2006年9月29日12时(b)、2006年8月24日12时(c)北风、东风个例的12时模拟垂直剖面(说明同图5)

Fig. 7 Vertical cross-section of the simulations at 12:00 BT of the three cases of northerly and easterly wind

(a. 4 Sep 2007, b. 29 Sep 2006 and c. 24 Aug 2006. The other caption is the same as in Fig. 5)

风弱海风、弱北风强海风的原因:北风太强(N_2)时,空气的温度平流也强,海陆上空经过充分交换,气温趋于一致,海陆温差小,剖面图上的等温线平直,因而不易产生海风(图 7a);而弱的北风(N_3),温度平流也弱,海陆上空的热量交换弱,白天晴天时陆地气温快速上升,海陆温差加大,等温线在海岸线附近发生倾斜(北高南低),从而有利于海风的发展(图 7b)。

5.2 边界层中上部较强的南风抑制海风发展

边界层中上部南风为向岸风,与该高度上海风环流的回流支(离岸风)风向相对,自然对海风环流的形成有抑制作用,不利于海风的发展。这正是 S_3 虽有较大温差,但仍没有明显海风发展的根本原因之一(H_2 = −5.1 m/s)。

由表 1 可见,边界层中上部径向气流(H_2)为不太强的北风、静风或很弱的南风时,最有利于海风的发展。太强的北风和较强的南风分量,均不利于海风的发展。而该高度的纬向风分量,似乎与海风发展情况关系不大。

6 周边复杂海陆、地形分布对海陆风发展的影响

6.1 崂山削弱东北风利于竞赛海域海风发展

表 3 给出了北风、东风 2 个个例 150 m 高度浮山以北 5—11 km 与竞赛海域以南 0—6 km 平均气温差,其中 N_{22} 为 N_2 个例浮山南约 1 km 与竞赛海域以南 0—6 km 气温差。

表 3 北风、东风个例模式预报浮山北南两侧 150 m 高度温差表(单位:℃)

Table 3 The difference of the simulated temperature at the height of 150 m between the northern and southern side of the Fu Mountain for the cases of northerly and easterly wind (Unit: ℃)

时间	N_1	N_2	N_3	N_{22}	E_1	E_2
08:00	0.1	0.0	0.0	−0.1	0.0	−0.2
09:00	0.3	−0.2	0.0	0.0	1.2	1.4
10:00	0.5	0.0	0.7	0.0	1.5	1.0
11:00	0.7	0.0	1.1	0.3	1.8	1.2
12:00	0.9	0.3	1.3	0.6	1.9	2.4
13:00	0.3	0.1	2.3	0.2	1.9	2.6
14:00	−0.1	0.6	2.6	0.7	1.4	2.6
15:00	−0.2	0.6	2.0	0.9	1.2	2.9
16:00	−0.6	0.0	1.4	0.4	1.0	3.3
17:00	−0.2	0	0.3	0.2	0.6	1.2
18:00	−0.4	−0.2	0.1	0.1	0.4	1.0
19:00	−0.5	−0.6	0.1	−0.5	0.4	0.7
20:00	−0.6	−0.5	−0.1	−0.3	0.3	0.4

由表 1 可见,N_1(0.8)与 N_2(0.7)地面气压梯度相差不大,风速理应相当。但浮标站实际风速却有明显差异:前者夜间(02—05 时)的平均风速(5.9 m/s)远比后者(4.2 m/s)大,白天则 N_2 有弱海风,N_1 却无海风。原因主要是后者为东北风(风向 40°),竞赛海域位于崂山下游的"死水区"(李庆宝等,2009)中,实际风速明显小于周围区域(图 2a),使竞赛海域局部海陆温差增大,并产生弱的海风。实际上 N_3 也是东北风,因气压梯度小,在崂山作用下背景风速更小,海陆温差更大(表 3),所以其海风也就更强。可见,背风坡地形确实有利于海风的发展。

结合上面对地形作用的分析,还可解释为什么表 1 中 N_2 的海陆温差最大,而海风却较小的原因:由于陆地测站选的是浮山南侧半山腰上的测站,北风时测站位于背风坡死水区中,测站周围风速小,温度平流量小,造成日间局部气温陡升,并由此产生了局部弱海风。只不过,离山脉稍远一点,风速就很大,强平流使大部区域海陆温差极小,不利于海风的发展。这就使得海风的发展局限在山脉背风坡处极小的范围内。表 3 和图 7 证明这一判断是正确的。表 3 给出了模式计算的远离浮山的空中 150 m 高度上浮山北、南各 3 个点(距浮山顶各约 5—11 km)的平均气温差。可见,N_2 与 N_1 一样,海陆温差很小,最大时也不超过 1℃。而 N_3 14 时的海陆温差高达 2.6℃,是这 3 个北风个例中最大的。该个例产生大范围海风是合理的。表 3 中第 5 列还给出了 N_2 个例浮山南约 1 km 处(单点)150 m 高度气温与竞赛海域以南 0—6 km(3 点)同高度平均气温的差(N_{22}),可见,其值要稍高于山脉两侧远距离处(N_2 列)的温差。这说明,山脉背风坡死水区确实有利于日间升温。但风速较大时,离山脉稍远一点,这种影响就很快减小。由此可见,预报业务中,一定要考虑地形分布造成的测站气象要素代表性的局限性,以及由此而引发的局部弱海风等问题。

6.2 地形绕流分支及胶州湾和崂山湾侧向海风急流抑制竞赛海域海风的发展

气流遇山分支绕流,迎风坡风速自然会减小,叶笃正(1957)称之为山前死水区。南风时,受崂山、浮山等的阻挡,气流常在竞赛海域附近分支绕流,风速减小,进而使比赛难以进行。有时,从竞赛海域南侧分支的气流经过绕流分别进入胶州湾和崂山湾,与

该区域的侧向海风叠加（该两处西侧海岸的走向为近南北向，偏东向海风发展不受边界层中上部南风回流抑制的影响），变成两支东南风急流，更加大了竞赛海域气流的分支减弱作用，使海风不能发展和维持，从而影响比赛的正常进行（图 8）。

气流分支抑制竞赛海域海风发展的机制是：若竞赛海域产生正的海陆温差（陆地高于海洋），必然会产生向岸风，空气自海洋流向陆地的同时，该海域的空气密度减小。若此时周围空气向竞赛海域汇集补充，则海风气流将得以持续和发展。可恰恰相反，此时，该海域的气流却因地形而出现分支（李庆宝等，2009），流向两侧（图 8）。这使竞赛海域的空气入不敷出，因而抑制海风的发展。两侧分支气流越强，分离作用越明显，竞赛海域的海风也就越难以发展。胶州湾和崂山湾的海风急流，分别与这两支分支气流相联系，所以，它们的加强，也就起到了抑制竞赛海域海风发展的作用。表 1 中 S_3 的海陆温差高达 4.4℃，午后却无海风发展，除了上一节介绍的回流抑制作用外，地形分支及两侧海湾中侧向海风急流的分流作用也不可忽视。

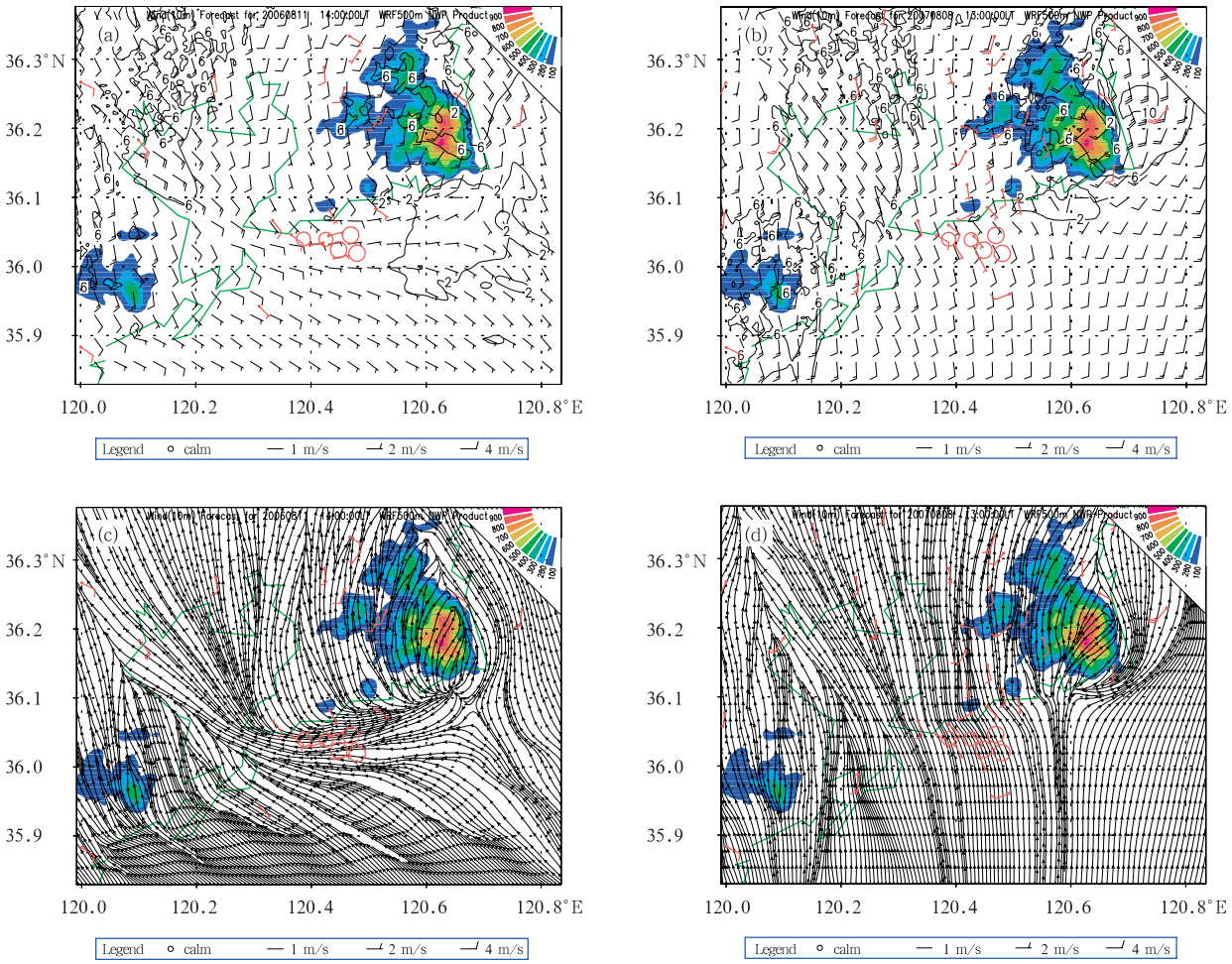


图 8　2006 年 8 月 11 日 14 时（a、c）和 2007 年 8 月 8 日 13 时（b、d）南风个例模拟

（水平风场（a、b）与风场流线（c、d），其他说明同图 2）

Fig. 8　Simulative results for the simulation cases of southerly wind

(a. and b. the horizontal wind field and, c. and d. the streamline of wind field. a, c. 14:00 BT 11 Aug 2006 and b, d. 13:00 BT 8 Aug 2007. The other caption is the same as in Fig. 2)

至此，可以总结南风条件下竞赛海域的风力情况。

S_1，大梯度＋晴天：地面背景风虽大，但回流抑制和侧向海风急流的减弱作用亦很大，实际风很小，

无法比赛。

S_2,大梯度+阴天:地面背景风大,无侧向海风减弱作用,实际风较大,可以比赛。

S_3,小梯度+晴天:地面背景风小,回流抑制和侧向海风减弱作用使实际风更小,无法比赛。

S_4,小梯度+阴天:地面背景风小,无回流抑制和侧向海风影响,但阴天条件下无海陆温差,竞赛海域亦无海风发展,比赛无法进行。

由上分析可见,南风时唯有大的地面气压梯度+阴天的条件才可以进行比赛。南风时晴好天气反而是竞赛海域弱风的成因,预报业务中需特别注意。

6.3 东风时海陆地形分布最有利于竞赛海域海风的发展

由于海岸线走向接近东西向,东风时气流与海岸线走向一致,垂直于海岸线的风速分量几乎为零,因而海陆之间的热力交换最小。这使得日间陆地气温得以持续升高,海陆间的温差明显加大。崂山西侧死水区作用,使竞赛海域附近陆地侧风速极小,更加大了海陆温差(图 7c),最有利于海风的形成。结合表 1 和表 3 可见,实况和模拟的东风个例的海陆温差均较大(E1 风速太大,模拟的温差稍小)。这正是地形和海陆分布共同作用的结果。再加上东风时竞赛海域上游为海面,摩擦力较小,流至竞赛海域上空的气流未经历明显的摩擦减弱过程,所以其实际风速都较大(表 1,图 3)。由表 2 还可看出,E1、E2 的边界层风远远小于 N1、N2 和 N3,几乎是所有个例中最小的,但午后风速却是最大的。主要原因就是上游摩擦小造成的。所以,地面和边界层内为东风时竞赛海域风速最大,最有利于帆船比赛的正常进行。

7 结论及成果应用情况

(1) 晴天时,地面背景气流为西风、弱的北风和东风,以及均压场条件时,有利于北京奥运会青岛帆船竞赛海域海风的发展。地面强的北风和所有的南风条件,均不利于海风的发展。

(2) 边界层中上部(700—1500 m)适当的北风有利于海风环流的发展。但北风太大时,会因强温度平流导致海陆气温趋于一致而抑制海风的发展。较强的南风,则因与海风环流的回流支反向而抑制海风的发展。

(3) 地面背景风为东北风时,因崂山下游"死水区"作用,使背风坡风速减小,易使海陆温差加大,从而有利于海风的发展。东风时,海陆热力交换最小,海陆温差大,最有利于海风发展。再加上地形、海陆分布使风的摩擦减弱最小,东风时风速都较大,最有利于比赛正常进行。

(4) 地面背景风为南向时,因竞赛海域处于地形引起的气流分支点上,使海风发展受到抑制。此外,胶州湾和崂山湾的侧向海风急流,还会加大这种抑制作用,使风速较小,大多无法比赛。

通过对比奥帆赛前后的两个预报实例说明本文结论的应用情况。

①测试赛期间一次失败的预报案例:

在北京奥运会之前,曾连续两年(2006 年 8 月 18—31 日和 2007 年 8 月 15—24 日)在青岛举办国际帆船测试赛。当时,由于对竞赛海域海风的发生规律缺乏认识,误以为地面背景气流为南风时与海风风向正叠加,午后风速会加大,有利于比赛的正常进行。2007 年测试赛期间的一个早晨,南风风速较小,预报午后叠加海风后风速将增大,可以比赛。而实际情况是,竞赛船队出海后苦等了数小时也未见风速增大,最后只得取消当天的比赛,运动员无功而返。

②奥运会期间唯一一次风力过小不适合帆船竞赛条件的预报服务情况:

2008 年 8 月 13 日下午,根据本文研究的结论,结合模式分析结果,认为第 2 天(14 日)地面气压梯度小、背景流场为南风、天空云量较多,不利于午后海风的发展,遂作出 14 日有可能为弱风日的预报,并建议将该日调整为机动日(原机动日为 8 月 22 和 23 日)。14 日早晨,预报员仍坚持上述预报意见。当天的风速实况与预报结论完全一致。成功的预报,避免了各国运动员无谓的劳顿,也提高了奥帆赛气象服务的信誉,受到奥帆委和各国运动员的好评(王晓云等,2009)。而正确预报的决策依据,正是本文关于边界层南向背景气流不利于海风发展、易产生弱风的结论。十分有趣的是,当天的风速一旦接近 2 m/s 左右,值班预报员就会接到咨询电话:可以出海了吧?而预报员始终坚持:风速难以达到比赛要求,无法比赛,建议取消比赛。直至该日 16 时(北京时),竞赛指挥室正式取消当天的所有比赛。奥帆赛和残奥帆赛其他竞赛日再未出现弱风。实际预报情况为:对弱风、非弱风既未空报,也未漏报,只是各

时次风速和风向的预报数据有一些误差,预报结论总体上满足了竞赛要求,受到国际奥帆委和各国运动员的好评。本文结论则是以上成功预报的主要基础之一。

由上述可见,地面背景气流、边界层中上部径向气流和周围地形、海陆分布等,都对青岛奥帆赛竞赛海域海陆风的发展产生非常显著的影响。

参考文献

常志清,吴增茂,高山红. 2002. 青岛海陆风三维结构的数值模拟. 青岛海洋大学学报,32(6):877-883

郝为锋,苏晓冰,王庆安等. 2001. 山地边界层急流的观测特性及其成因分析. 气象学报,59(1): 120-128

洪光,徐晓亮. 2006. 青岛奥帆赛期间天气气候背景分析. 应用气象学报,17(8):54-59

黄倩,田文寿,王文等. 2007. 复杂山区上空垂直速度场和热力对流活动的理想数值模拟. 气象学报,65(3): 341-352

李庆宝,苗世光,孙桂平等. 2008a. 青岛奥帆赛场不同背景条件下的海陆风特征. 气象,34(专刊): 54-63

李庆宝,孙桂平,张苏平等. 2008b. 青岛奥帆赛场浮标站弱风成因分析. 气象,34(专刊): 64-73

李庆宝,苗世光,孙桂平等. 2009. 青岛奥帆赛海域风场的地形作用研究. //2008 年奥帆赛及残奥帆赛气象服务论文集. 北京:气象出版社,18-30

林行,吴增茂,高山红. 2004. 青岛近海地区海陆风数值模拟和三维结构研究//奥运气象保障技术研究 2004 年度论文汇编. 北京:气象出版社,250-256

陆汉城,杨国祥. 2004. 中尺度天气原理和预报. 北京:气象出版社,92pp

苗世光,孙桂平,马艳等. 2009. 青岛奥帆赛高分辨率数值模式系统研制与应用. 应用气象学报,20(3): 370-379

盛春岩,王建林,刁秀广. 2007. 2006 年 8 月青岛国际帆船赛期间海陆风特征及三维结构分析. 中国海洋大学学报,37(4):609-614

王晓云,左克进,杨育强等. 2009. 海上杨帆,气象护航. 北京:气象出版社,134pp

王玉国,吴增茂,常志清. 2004. 辽东湾西岸海陆风特征分析. 海洋预报,21(3):57-63

吴增茂,盛立芳. 1999. 海岸气象学的研究进展. 青岛海洋大学学报,29(4):543-548

薛德强,郑全岭,钱喜镇等. 1995. 山东半岛的海陆风环流及影响. 南京气象学院学报, 18(2): 293-299

叶笃正,罗四维,朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡. 气象学报,28(2): 108-121

Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advance land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Mon Wea Rev, 129: 569-585

Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J Atmos Sci, 46: 3077-3107

Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. J Geophys Res, 108: 8851, doi:10.1029/2002JD003296

Janjic Z I. 1990. The step-mountain coordinate: physical package. Mon Wea Rev, 118: 1429-1443

Janjic Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. Mon Wea Rev, 122: 927-945

Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note TN-475+STR, 113pp