

一种基于气象要素梯度观测分析海表特征的方法试验

蒋璐璐¹, 朱佳敏², 杜坤¹, 涂小萍^{1,3}

(1.宁波市气象局, 浙江 宁波 315012; 2.宁波市北仑区气象局, 浙江 宁波, 315826; 3.宁波大学 宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 利用常规气象观测、浙江省自动气象站及宁波凉帽山高塔梯度观测资料,对浙江近海2010年12月28日一次冷空气大风个例进行风、温等气象要素边界层特征分析,计算摩擦速度、粗糙度和粘性副层厚度等特征参数,探讨冷空气大风对浙江近海海面粗糙度的影响,进一步给出了摩擦速度、粗糙度与风速之间的定量关系,并对2010年12月29日21时—30日24时和2015年1月21日19—22日10时两次冷空气大风个例进行风廓线拟合检验,基于此推算这两次个例海面10 m风速,并与浮标站进行对比。结果表明:锋面逐渐靠近时风速随高度递增率明显大于锋面过境远离时段。摩擦速度与风速呈线性关系,粗糙度与风速呈二次多项式增长。光滑流时对数律风廓线对100 m以下高度风速拟合效果最好,当低层风速较小时,对数律拟合风速易偏小,反之则易偏大。

关键词: 风塔;冷空气;风速廓线;对数律

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)06-0066-11

1 引言

基于陆地风塔资料对强风过程的边界层风速廓线特征研究已有不少^[1-4]。国外的Drechsel等^[5]分析了欧洲不同地区气象塔风速观测资料,发现100 m高度以下对数风廓线模型最为有效和便捷。Walton等^[6]利用美国爱荷华州5座气象高塔资料分季节和昼夜进行分析,并对几个强风切变事件进行了重点探讨。Optis等^[7]利用荷兰213 m高塔10 a的观测资料,通过一种基于平衡的单列模型方法—SCM模型,研究了一种稳定层结下的近地面风速外推法。在国内,李秋胜等^[8]研究指出,大气近似中性条件时,风廓线近似服从指数函数和对数函数分布规律。宋丽莉等^[9]、刘敏等^[10]研究发现不同地形和下垫面对风速的垂直变化存在显著的影响。

上述研究多基于陆地观测。随着近海测风塔及海岛测站的建设,对于近海大风的特征研究也有了一定进展^[11-13]。Gryning等^[14]利用1 a的激光雷达

和气象高塔资料,对丹麦沿海地区边界层风廓线特性以及威布尔分布参数进行分析研究。黄继章等^[15]利用广东博贺离岸铁塔梯度资料,采用特征量分析方法,研究强冷空气过程海洋近地层强风的微观特征,发现冷锋过境时60 m附近存在近地层最大风层。许向春等^[16]利用琼州海峡南岸东西侧两部梯度测风塔2a实测资料开展研究,认为天气系统对海峡大风的阵风系数、风向风速演变趋势有一定影响,但对风随高度变化的幂指数影响较小。吴息等^[17]分析了海岸陆地和海面两种下垫面条件下风速、湍流等要素的日变化规律及廓线特征,探讨了这两种不同下垫面特征导致的风力特征差异,指出两种下垫面风廓线用对数律、指数律拟合效果相当。

浙江近海岛屿众多,近海和海岛自动站(包括两个海洋浮标站)建设已基本完成,为浙江沿海大风研究提供了很好的数据基础。但由于近海海岛站点的位置、海拔不同,导致对10 m风的参考性不同。2010年宁波凉帽山高塔建成并投入应用,高塔

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-03-20。

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY15D050001);浙江省气象科技计划项目(2014QN13);宁波市气象科技计划项目(NBQX2014003C)。

作者简介: 蒋璐璐(1987-),女,工程师,硕士,主要从事天气预报与海洋气象研究。E-mail: jianglulu87@126.com

通讯作者: 涂小萍(1968-),女,高级工程师,硕士,主要从事天气预报和研究。E-mail: txp_hk@aliyun.com

位于近海,南北开阔,最高能观测到300 m左右,探测高度与自动站点相当。风廓线研究可以为近海海岛资料对海面风订正提供依据^[18]。

大风对海面粗糙度会造成影响,海表粗糙度也是制约近地层风速垂直分布的主要因素之一^[19]。尤其是在冷空气系统影响下,风速显著增大,海浪波高也随之增大,这种情况下海面就不属于光滑流,而属于粗糙流^[20]。对光滑流和粗糙流分别进行风廓线的研究是必要的。据统计,风灾事故占渔船全损事故的52%,而冬半年突发性的冷空气大风是导致木质渔船出现风灾事故的主要原因^[21]。浙江北部沿海大风中冷空气大风占40.8%,中南部高达60.2%,但其中10级以上的冷空气大风分别只占29%和17%^[22],可见大部分冷空气只带来9级及以下大风。因此,利用气象梯度观测资料分析9级及以下冷空气大风对海面特征变化和风廓线的影响,对于了解冬季大部分中等及以下强度的冷空气可能导致的海表特征变化有参考意义,同时对保障航海安全、海洋防灾减灾、海上军事活动等有着重要的现实意义,也可以为开发海洋风能资源、研究海气相互作用和全球气候变化等提供重要参考价值^[23]。

本文利用宁波凉帽山高塔梯度观测资料,在对一次冬季冷空气大风过程风、温等要素特征分析的基础上,研究冷空气大风过程风速廓线变化规律,重点探讨了冷空气大风影响时浙江北部海面粗糙度的变化特征,以及由粗糙度推算海面10 m风的可靠性,以期为浙江沿海海岛测风资料高度订正提供方法参考。

2 资料说明

宁波凉帽山高塔地处浙江北部近海的凉帽山岛,位于122.024°E,29.911°N,距离海岸线2 km,四周开阔,地形影响小。塔基海拔为20 m,在相对塔基32 m、60 m、89 m、139 m、179 m、212 m、263 m和298 m的南北两个方向分别安装有气象观测仪,进行温、湿和风(二维超声风速仪)的观测^[24-25]。本文所用高塔观测资料来源于宁波市气象网络与装备保障中心。资料时段为2010年12月28—30日,包括8个高度层南北方位逐分钟的风向、风速、温度等要素资料,主要采用北方位资料,当北方位资料缺

测时,则以南方位资料替代。浙江省自动气象站(包括浮标站)资料来源于浙江省气象信息中心,时距为逐6 min,包括海平面10 m风向、风速等要素。天气图资料来源于宁波市气象网络与装备保障中心。所用数据均经过极值检查、时间一致性检查、内部一致性检查和人工审核等质量控制,对于缺测数据以及质量控制后可疑或错误数据予以剔除,以确保资料的准确性和可用性。本次过程没有产生降水,所以不考虑降水对超声风速仪测风的影响。

3 过程概况及高塔气象要素变化特征

3.1 天气过程概况

2010年12月27日20时(北京时,下同,见图1),500 hPa高度场中纬度地区为“一槽一脊”型,我国东北地区有一个深厚的低涡稳定存在,中心最低气压512 hPa,高空槽线从渤海经山东安徽一线,槽后西北气流较强,最强风速达42 m/s;槽前疏散,槽后汇合,意味着槽还将有所加深。高压脊附近对应一暖脊,暖脊发展到贝加尔湖北部,暖平流使高压脊发展,使低压槽加深,而在东北亦有冷中心相配合,中心最低温度达-40℃。700 hPa和850 hPa形势场与500 hPa基本相似,但中低层温度槽明显落后于高度槽,槽后有冷平流,风速大,等温线密集,有利于锋生。地面图上是“一高一低”的形势,大陆高压中心位于我国西北地区中部,中心气压为1 030 hPa,表现为一次强度偏弱的冷空气。28日08时,500 hPa高度场东北冷涡仍然维持,强度不变且静止少动。高空槽快速东移,此时槽线由东北经渤海、黄海延伸至华南地区,宁波正好处于槽线附近,温度槽超前于高度槽,而700 hPa上温度槽逐渐追上高度槽,850 hPa温度槽仍落后于高度槽。地面上黄海低压东移,引导冷空气南下,但黄海低压位置偏北,因此大风主要出现在浙江北部。另外,由于整层都是一致的槽后西北气流控制,没有水汽输送,因此本次冷空气过程以大风和弱降温为主,没有产生降水。自动站显示,受冷空气影响,2010年12月27—28日,浙江北部地区出现了大风和降温过程,北部沿海海面及内陆高山站普遍出现7—9级偏北大风,沿海23个站点风力超过8级,8级以上大风持续15 h。

3.2 风和温度廓线分析

图2显示了海拔52~318 m高度塔层水平风、全风速和温度的时空变化。28日00:00—03:30,整层盛行西南偏西风,除塔层中部短时出现5级风,塔

层风速一般小于4级。随着冷空气的渗透,03:30开始塔层风速自上而下逐渐增大,风向转为西北风,同时等温线下倾。06时前后塔顶开始出现6级大风。08—09时等风速线垂直于时间轴,等温线向下倾斜最陡,也最为密集,对应为冷锋过境前后,塔层

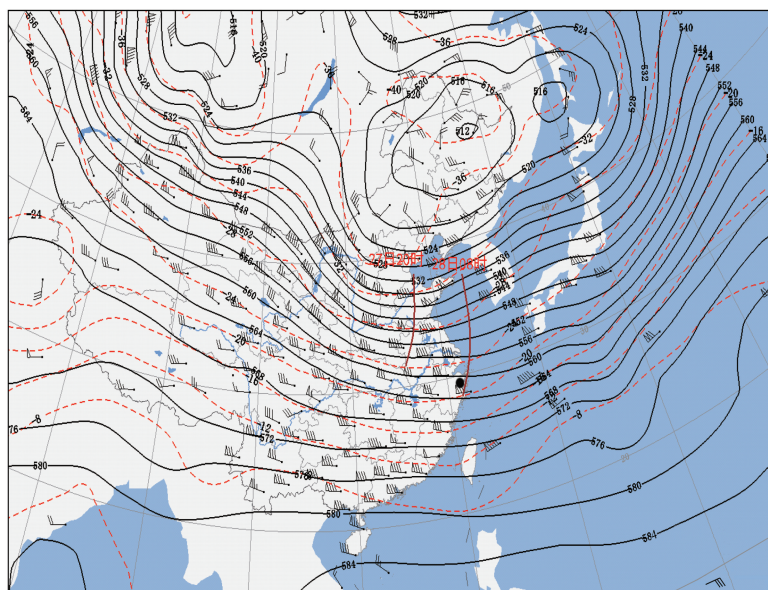


图1 2010年12月27日20时500 hPa天气图(黑线:等位势高度,单位:10 gpm;红线:等温线,单位:℃;实心圆点为宁波市位置;深红色线为27日20时和28日08时500 hPa槽线)

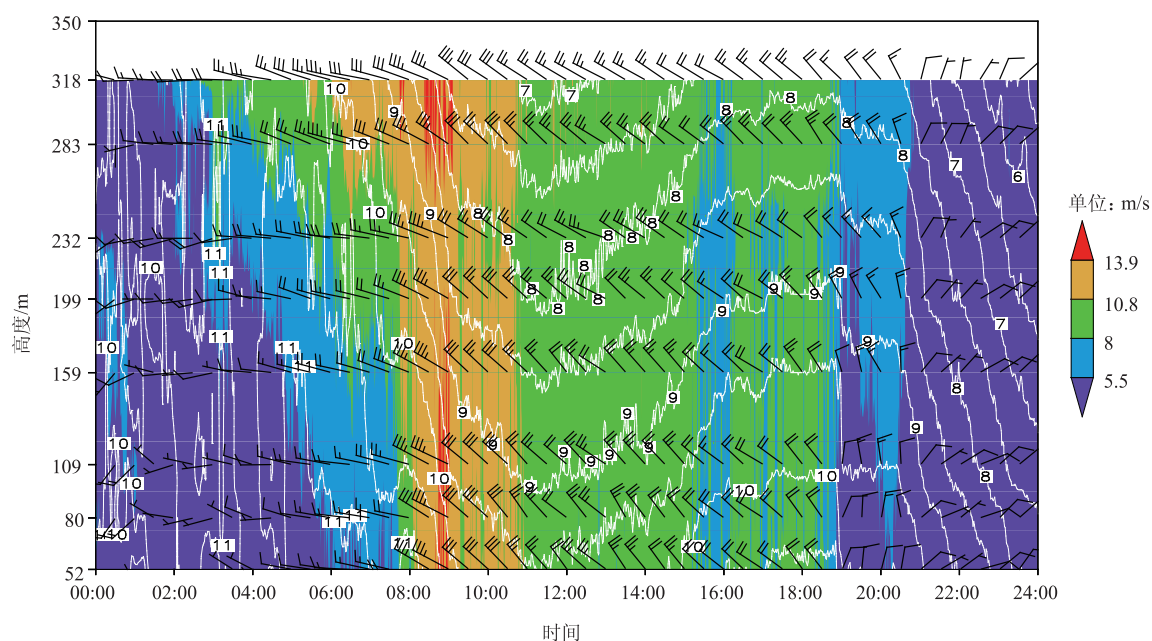


图2 2010年12月28日00—24时塔层水平风(风羽:风向风速)、全风速(填色区,单位:m/s)和温度(等值线,单位:℃)逐分钟时空变化

风速几乎同步变化,冷空气向下渗透最明显,也是风速增加最快的时段,09时前后出现本次过程最大风。之后随着锋面过境并远离,塔层受冷空气主体影响,气温继续缓慢下降,风速逐渐减弱,到19时大风影响基本结束,塔层风速表现出上下层同步变化的特征。可见锋面靠近和远离时高塔各层风速呈现出明显的差异。根据锋面靠近和远离时高塔风速的不同表现,将过程分为两个时段:即03:30—09:00随着锋面靠近塔层处于增风阶段,09:00—24:00随着锋面远离塔层处于减风阶段。锋面靠近过程中,风速随海拔由低到高呈现增大趋势,即海拔越高,风速越大;锋面过境后远离时段,各层风速基本相当。从图3a锋面靠近和远离时段的风速廓线图更能清楚看出,锋面靠近时段风速随高度的递增率要明显大于锋面远离时段。说明锋面靠近过程中,由于边界层动量自上而下传播,风速增大首先表现在高层,并向低层逐步扩散;锋面过境后受冷空气主体影响,边界层上下层湍流混合充分,风速大小趋于一致,故各层平均风速变化不明显。

温度的变化滞后于风速的变化,06时前温度虽有小幅波动,但总体变化不大,小幅的上升与温度日变化有关。06时后温度从318 m高度自上而下开始减小,地面降温延后2 h左右。08:00—8:20等温线向下倾斜最陡,说明冷空气已下渗至低层,至11时左右,气温下降至最低。11—19时由于日变化加之风速减小,气温有小幅回升。19时以后风速减

小,气温迅速下降,与冷高压主体控制下的辐射降温有关。对比锋面靠近和远离时段温度廓线(见图3b),前者温度直减率约为每百米下降0.38℃,而后者为每百米下降0.97℃,明显高于前者,主要由于锋面靠近过程中边界层垂直运动变化快,导致上下层气象要素更趋一致,锋面远离时边界层受冷空气主体影响,以下沉气流为主,降温首先表现在上层。

4 摩擦速度及粗糙度计算

4.1 计算方法

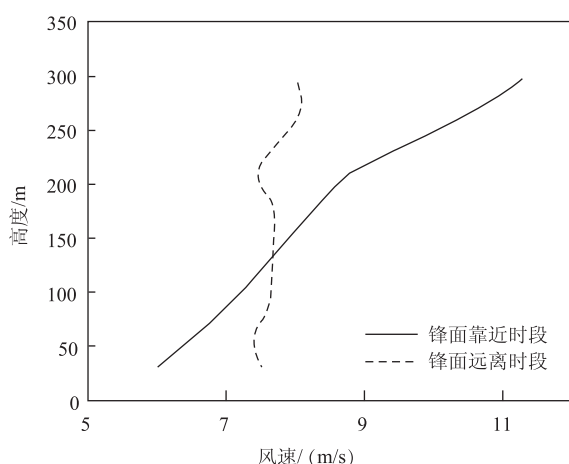
近地层风速随高度呈对数律变化在中性大气层结条件下才满足。因此,首先需要判断冷空气大风影响时是否满足中性层结。层结稳定性可由上下两层的风速和温度来确定^[26],计算方法为:

$$L_p = \frac{Ri_g}{1 - 5Ri_g} \quad (1)$$

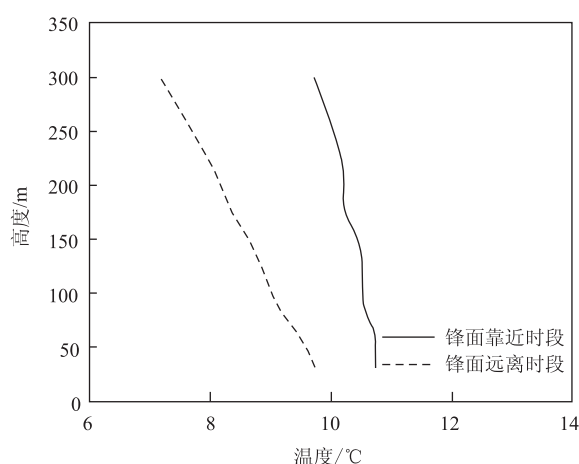
$$Ri_g = \frac{g}{\bar{T}} \frac{\partial T / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (2)$$

式中: g 是重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; $\bar{T}$ 是两层的平均温度; u 是风速; z 是高度。当 $|L_p| < 0.2$ 时即为中性层结。

假设近地层摩擦速度不随高度变化,在中性层结下风速廓线的典型形式为对数风速廓线公式^[27]:



a. 风速廓线



b. 温度廓线

图3 锋面逐渐靠近和锋面过境后远离时段的风速廓线和温度廓线

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

式中: $\bar{u}$ 为 z 高度处的平均风速; u_* 是摩擦速度; κ 是卡曼常数, 其值大约在 0.3~0.42 之间, 一般取 0.4; z_0 是地表粗糙度, 它是作为下边界出现的几何长度, 是平均风速为零的高度。各种下垫面的 z_0 值变化幅度很大, 山区或城市可达米数量级, 而平静的海面、冰面则只有十分之几甚至百分之几毫米。在光滑流的情况下, 风速廓线应表示为^[28]:

$$\frac{\bar{u}}{u_{*0}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{9u_{*0}z}{\nu} \quad (4)$$

因此在光滑流的状态下, 粗糙度是 u_{*0} 的函数, $z_0 = \nu/(9u_{*0})$, $\nu = 1.53 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。而粘性副层的厚度 $\delta = 5\nu/u_{*0}$ 。

凉帽山高塔位于沿海海岛, 四周海面开阔, 风速较小时可近似为光滑流。但冷空气影响时风速较大, 海浪也随之增大, z_0 的取值与海浪的起伏状况有关, 此时的流动就成为粗糙流。在粗糙流的情况下 z_0 和 u_{*0} 有如下关系^[29]:

$$z_0 = a_c \frac{u_{*0}^2}{g} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度; a_c 为系数, 取值一般在 0.012~0.015 之间, 本文取 0.014 m/s

按照式(4)和式(5), 只要知道地表摩擦速度 u_{*0} 或者粗糙度 z_0 , 就可以估算各高度层的水平风速; 反之通过某一高度层的水平风速就可以求得地表摩擦速度 u_{*0} 、地表粗糙度 z_0 以及粘性副层的厚度 δ 。

4.2 结果分析

中性层结条件下对数风廓线规律一般可适用到 100 m 左右^[30]。本文使用高塔底部 3 层(即 52 m、80 m、109 m)的资料参与计算。资料选取 2010 年 12 月 28 日 00—24 时 52 m、80 m、109 m 3 个高度层每小时平均风速和温度等要素。

首先进行层结稳定度的计算, 判断该次冷空气大风过程的大气状态是否满足中性层结条件。选用 52 m 和 109 m 两层资料, 根据式(1)和(2)计算得到每小时的 $|Lp|$ 值, 结果见图 4(图中虚线为 $|Lp| = 0.2$)。可见, 从 05—24 时 $|Lp|$ 均小于 0.2。说明冷空气大风影响时近地层大气基本满足中性层结条件,

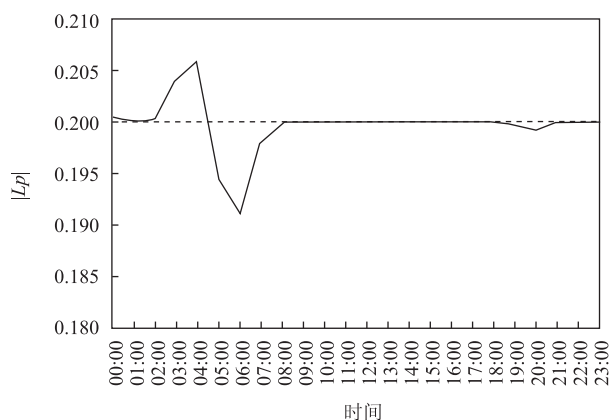


图4 2010年12月28日00—24时 $|Lp|$ 的演变情况

可以运用中性层结条件下的对数风速廓线公式进行拟合计算。

图5是分别利用最底层 52 m 高度以及底部 3 层平均值计算出的摩擦速度、地表粗糙度以及粘性副层厚度。可见, 基于 52 m 和 3 个高度层平均值计算的摩擦速度、粗糙度和粘性副层厚度差别不大, 但锋面靠近阶段稍有差别, 主要原因是由这一阶段各层风速增加速率差异明显导致, 风廓线此时不满足对数规律。在锋面过境后远离时, 湍流混合作用明显, 各高度层风速趋近一致, 由此算出的各参数也基本相同。下面的分析遂以高塔底部 3 层平均值计算结果为基础进行。

摩擦速度变化趋势分析, 02 时风速最小, 摩擦速度也相对较小, 仅为 0.05 m/s; 随着风速的增大, 摩擦速度迅速增大, 到 08 时达到最大 0.32 m/s; 风速减小后, 摩擦速度也随之减小。粘性副层厚度与摩擦速度成反比, 在风速较小时, 粘性副层厚度大约在 1 mm 左右, 风速较大时, 粘性副层厚度在 0.2~0.4 mm 之间, 并一直维持到大风影响结束。粗糙度的变化与摩擦速度类似, 但变化幅度相比摩擦速度更为明显。风速较小时, 粗糙度仅有 10^{-6} 数量级大小; 风速最大时, 其数量级达到 10^{-4} , 增大了两个数量级。当海面风速增大时, 粗糙度的大小体现了波浪的起伏程度, 即风浪越高, 粗糙度越大, 此时的流动不再属于光滑流, 而是粗糙流。因此按照光滑流情况下的风速廓线拟合公式已不能满足实际。

为了进一步描述摩擦速度、粗糙度与风速之间的定量关系, 分别制作了二者与平均风速的散点图

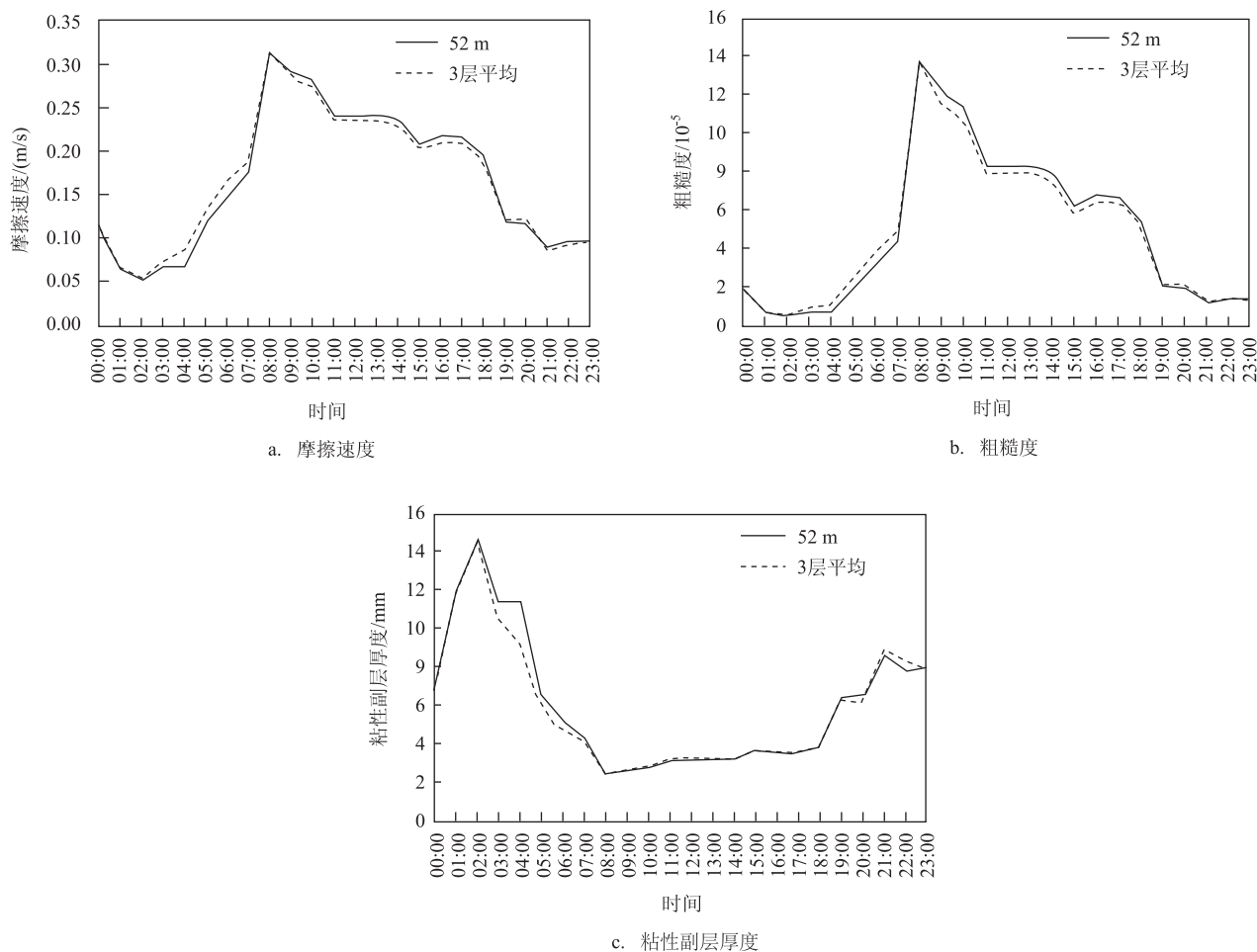


图5 2010年12月28日00—24时由52 m高度及52 m、80 m、109 m 3层平均值计算出的不同指标随时间的变化

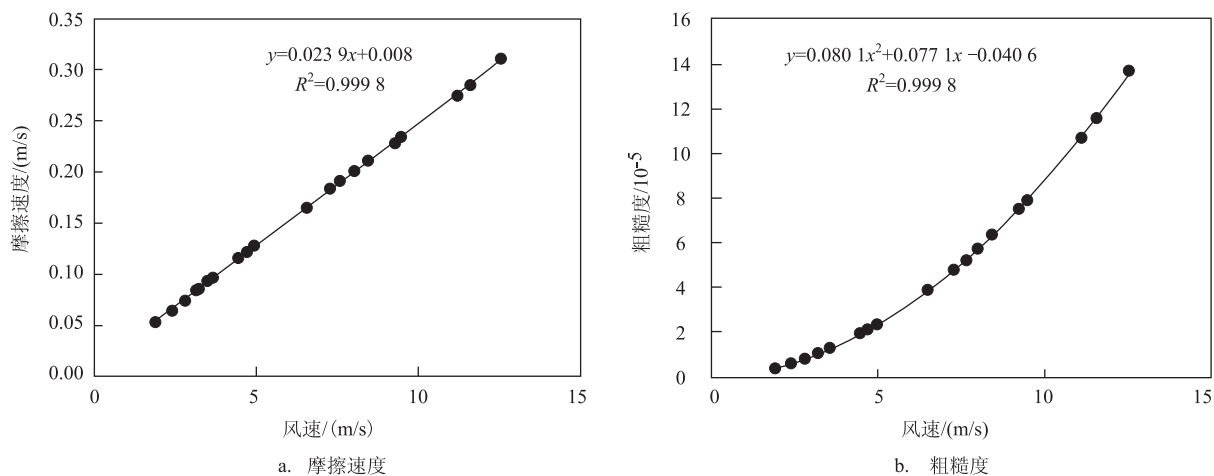


图6 52 m、80 m、109 m 3层平均值计算出的不同指标与平均风速的散点图

(见图6)。摩擦速度和粗糙度利用高塔52 m、80 m、109 m 3层风速逐小时平均值估算。由图可见,摩擦

速度与风速之间呈明显的线性关系,风速越大,摩擦速度越大,采用线性回归拟合, R^2 为0.999 8,接近

于1,拟合效果很好。而粗糙度与风速呈曲线增长,用二次多项式拟合效果最好。经显著性检验,二者的置信水平为99%。具体的拟合公式如下:

$$u_{*0} = 0.0239\bar{u} + 0.00816 \quad (6)$$

$$z_0 = 0.0801\bar{u}^2 + 0.0771\bar{u} - 0.0406 \quad (7)$$

5 拟合效果检验

5.1 个例检验

为了检验上述方法的可行性,对两次冷空气大风个例进行了检验分析。一次是较强冷空气过程,统计时段为2010年12月29日21时—30日24时,浙江北部沿海出现9—11级西北大风,50站风力超过10级,16站超过11级。另一次是一般性冷空气过程,统计时段为2015年1月21日19时—22日10时,浙江北部沿海出现8—9级西北大风,92站风力超过8级,1站超过10级。

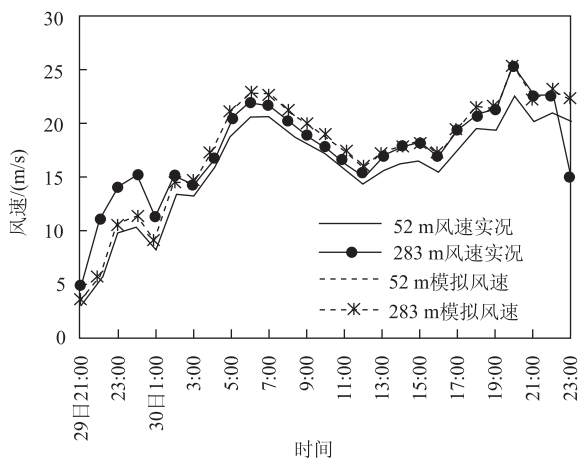
同样先进行层结稳定度的判断。按照式(1)和(2)计算 $|L_{pl}|$,结果显示,两次个例中仅29日21时一个时次的 $|L_{pl}| > 0.2$,其余时次均满足中性层结条件。取52 m、80 m、109 m 3层逐小时平均风速值,利用拟合式(6)估计地表摩擦速度,然后带入对数风速廓线式(4)计算出风塔对应各高度层的水平风速,再与真实风速进行对比。

图7分别是两次个例52 m和283 m高度的观测

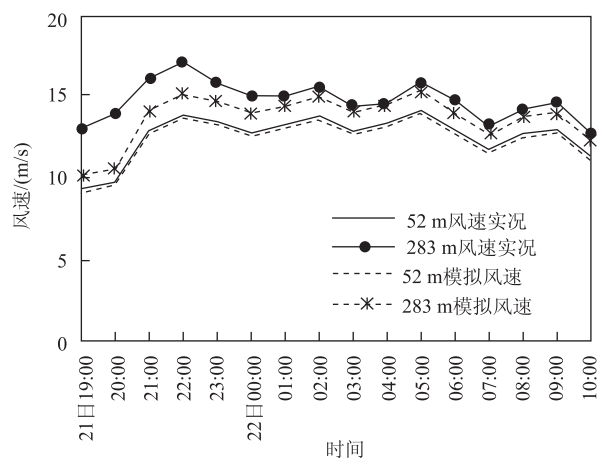
与拟合风速对比。经检验,各层风速真实值与模拟值之间的相关系数的置信水平为99%。两次个例中均表现为:52 m模拟风速与实况风速基本吻合,模拟值可以很好地表征各高度层水平风速的真实情况。但283 m处模拟值与真实值存在较大差距,难以满足对数廓线率,主要表现在锋面逐渐靠近过程中,风速增大首先表现在高层,此时低层风速尚较小,按对数律计算则高层水平风速容易被低估;当冷空气主体开始影响,风速明显增大以后,上层动量充分下传至地面,各层风速差减小,因此模拟的风速比真实情况要大。

图8是两次检验个例中几个特征时刻的高塔测风与拟合风速的垂直廓线对比图。2010年12月30日01时处于锋面靠近过程风力增大的阶段,低层风速在6级以下,此时在200 m高度以下,拟合值与真实差别不大,200 m以上拟合值明显偏小。06时、12时、20时都属于大风主体影响时段,其中06时、20时风速出现峰值。在大风主体影响时段,3个时刻在风速廓线上均表现出整层的模拟值均大于实况值,但100 m左右高度以内二者相差较小,此高度以上则差距较大。2015年1月21日22时、22日07时均为大风主体影响时段,同样也是在200 m高度以下,拟合效果最优。

将每一高度层风速的模拟值与真实值分别计算相关系数、相对误差和标准差,统计时段内所有时次均参与计算。结果显示,对于2010年12月



a. 2010年12月29日21时—30日24时



b. 2015年1月21日19时—22日10时

图7 两次个例塔层52 m和283 m实况风速与模拟风速对比

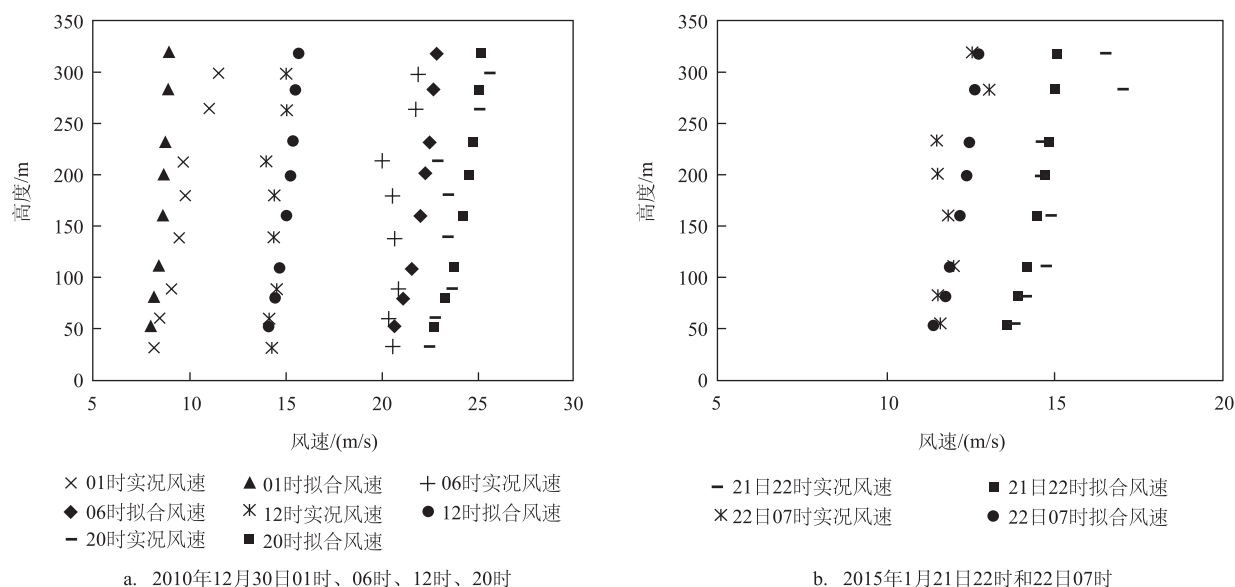


图8 两次个例不同时段塔层风速廓线实况与拟合对比

29—30日这次个例,拟合出的对数风速廓线,相关系数都在0.9以上,相关性很高。但从相对误差和标准差情况来看,高度越高,拟合精度越差,原因与对数风廓线一般适用到100 m左右有关^[30]。底部3层(52 m、80 m、109 m)模拟效果最好,相对误差在0.5 m/s以内,标准差在0.4以内;其他高度,尤其在高于200 m以后,模拟值与真实值差异较大。对于2015年1月21—22日这次过程,相关系数随高度降低,底部四层(52 m、80 m、109 m、159 m)相关系数大于0.9,上部4层(199 m、232 m、283 m、318 m)相关系数在0.9~0.7之间;相对误差最小高度是52 m和80 m,误差值在0.5 m/s以内;标准差随高度增高,底部3层(52 m、80 m、109 m)标准差小于0.4。

5.2 海洋浮标站检验

为了进一步验证高塔资料是否对推算海面10 m风速具有参考性,将舟山浮标站实际风速与利用高塔资料推算的风速进行对比。选取要素为舟山浮标站逐小时10 m平均风速以及由高塔资料计算出的逐小时粗糙度,资料时间段为2010年12月28日00—24时(个例1)、12月29日21时—30日24时(个例2)和2015年1月21日19时—22日10时(个例3)。检验时假设高塔处与舟山浮标站处粗糙度等海面特征参数接近,将基于高塔资料计算出的粗糙度带入式(5)和(4),推算出浮标站处海拔10 m高度

风速,并与浮标站实际测风进行对比。

图9是3次个例的检验对比。分析可见,个例2和个例3对风速的模拟效果较好,风速的增长趋势较为一致,而个例1拟合效果较差。将3次个例的模拟值与真实值分别计算相对误差、标准差以及相关系数。结果显示,个例2和个例3的平均相对误差在1.7~1.9 m/s之间,个例1的相对误差较大,为2.897 m/s;标准差分别为2.675(个例1)、2.292(个例2)和2.081(个例3)。相关系数分析显示,个例2模拟值与真实值相关系数最好,达到0.879;个例1的相关性最差,仅0.398,但模拟风速与实际测风的2~3 h滞后相关系数明显提高到0.74以上,说明实况表现比模拟值有一定的滞后。个例3拟合与实况基本一致,相关系数为0.745。另外,显著性检验结果也显示,个例2和个例3相关系数的置信水平均为99%,而个例1没有通过显著性检验,但其1~3 h滞后相关系数的置信水平同样达到99%。

上述表现与天气过程的移动和影响时间差异有关。个例1是弱冷空气自西向东逐步影响,槽线移动速度快,强风速影响时间较短,由于高塔与舟山浮标站所处位置有一定的距离,冷空气系统对两个站点影响有先后差异。从相关分析和滞后相关分析可以看出,个例1虽然相关系数较低,但2~3 h滞后相关系数提高到0.74,说明冷空气对高塔和舟山浮标站的影响时间相差2~3 h;而个例2和个例3

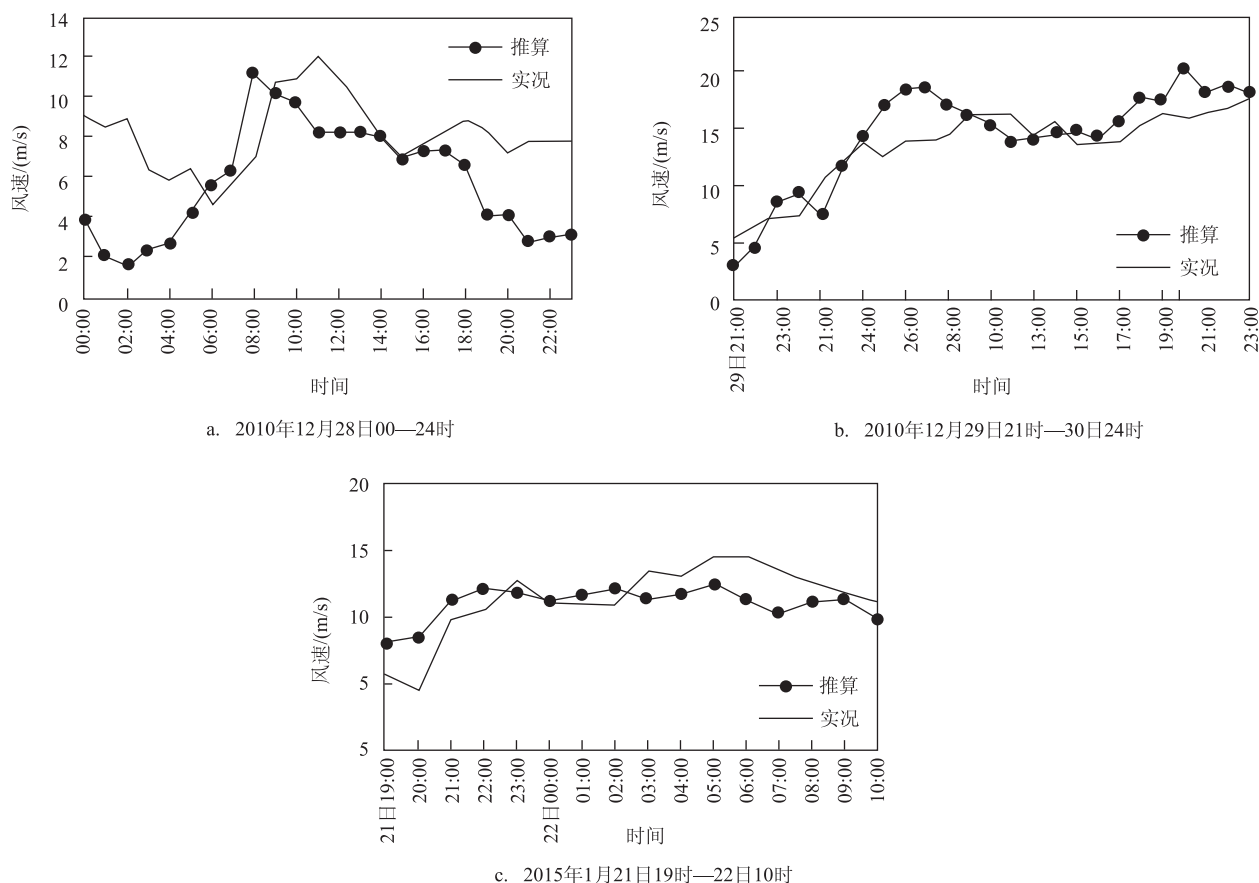


图9 3次个例10 m风速检验

的相关系数较高,分别为0.879和0.745,说明冷空气影响这两个站点的时间较为同步,因此模拟风速与实际测风变化基本一致。3次个例说明,拟合效果与天气系统影响站点的时间先后关系密切,通过计算滞后相关系数剔除该影响后,相关性可达0.74以上。个例检验表明:冷空气影响时,利用高塔梯度测风资料计算海表特征,并据此进行10 m风订正是可行性的。

6 结论

基于宁波凉帽山高塔梯度观测资料,对2010年12月28日00—24时浙江北部海面的一次冷空气大风影响时海面特征进行了分析方法试验,按照对数风速廓线公式计算了地表摩擦速度、粗糙度和粘性副层厚度等特征参数,并对2010年12月29日21时—30日24时和2015年1月21日19时—22日10时两次冷空气过程对数率风速廓线公式进行拟合检验,

同时推算海面10 m风速,与舟山浮标站进行对比分析,以验证高塔资料对海面10 m风的代表性。主要结论如下:

(1)对于2010年12月28日这次冷空气大风过程,风速随高度的变化不完全满足对数律,且在锋面靠近和远离阶段,风速随高度的变化呈现出明显差异。在锋面逐渐靠近阶段,风速随高度升高而显著增大;而在锋面过境后远离阶段,各层风速差异较小,即前者风速随高度的递增率要明显大于后者。说明在冷空气影响初期,由于动量下传作用,风速由高层向低层逐步扩散;当冷空气主体影响时,风速达到最大,此时上下层湍流混合充分,风速大小趋于一致,因此在锋面过境后远离阶段各层平均风速变化不明显;

(2)在2010年12月28日冷空气大风影响过程中,摩擦速度与风速之间呈明显线性关系,风速越大,摩擦速度越大。粗糙度与风速呈曲线增长,用二次多项式拟合效果最好。而粘性副层厚度与风

速呈反比关系;

(3)利用光滑流下的对数律公式模拟出2010年12月28日冷空气大风过程的风速廓线在100 m左右高度以内更接近实况,而该高度以上模拟值与真实值存在一定差距。在冷空气大风影响下,海表粗糙度增大,此时的流动不属于光滑流,而是粗糙流。在锋面逐渐靠近阶段初期,低层风速较小时,按对数律估计的水平风速就容易被低估;当冷空气主体开始影响,风速明显增大以后,上层动量充分下传至地面,各层风速差减小,按对数律估计的水平风速会被高估;

(4)通过3次冷空气个例分析检验,不管是滞后相关还是相关系数,都有较高相关性表现,基于高塔梯度风资料计算出的海表粗糙度推算海面10 m高度的风速方法是可行的,但需要考虑天气系统移动速度差异导致的滞后效应。

宁波凉帽山高塔位于无人海岛,由于设备维护和资料传输等相对困难,资料质量稳定性受到较大影响。本文选取的冷空气个例各层次资料相对较完整。在以后的研究工作中,仍需积累更多的有效数据,对多个个例进行统计检验,以取得普适性的规律。另外,如何更有效的将高塔观测资料与其他资料相结合,也需进一步进行研究。

参考文献:

- [1] 刘学锋, 任国玉, 梁秀慧, 等. 河北地区边界层内不同高度风速变化特征[J]. 气象, 2009, 35(7): 46-53.
- [2] 秦剑, 赵刚, 蔡正信, 等. 金沙江下游局地大气边界层风场变化特征[J]. 气象, 2013, 39(6): 749-758.
- [3] 王海霞, 张宏升, 李云峰, 等. 上海浦东国际机场低层大气垂直风场特征研究[J]. 气象, 2013, 39(11): 1500-1506.
- [4] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征[J]. 气象, 2014, 40(10): 1165-1173.
- [5] Drechsel S, Mayr G J, Messner J W, et al. Wind speeds at heights crucial for wind energy: measurements and verification of forecasts [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(9): 1602-1617.
- [6] Walton R A, Takle E S, Gallus W A Jr. Characteristics of 50-200-m winds and temperatures derived from an Iowa tall-tower network [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(10): 2387-2393.
- [7] Optis M, Monahan A. The extrapolation of near-surface wind speeds under stable stratification using an equilibrium-based single-column model approach[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(4): 923-943.
- [8] 李秋胜, 郅伦海, 胡非. 沙尘暴天气下城市中心边界层风剖面观测及分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 83-90.
- [9] 宋丽莉, 吴战平, 秦鹏, 等. 复杂山地近地层强风特性分析[J]. 气象学报, 2009, 67(3): 452-460.
- [10] 刘敏, 孙杰, 杨宏青, 等. 湖北省不同地形条件下风随高度变化研究[J]. 气象, 2010, 36(4): 63-67.
- [11] 李银忠, 曲玉环, 吴鑫, 等. 东营港海洋站风要素特征分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 77-84.
- [12] 曾瑾瑜, 高聪晖, 叶冬云, 等. 闽东北沿海港湾岛屿测站风分布特征及预报指标站的选取[J]. 海洋预报, 2017, 34(4): 42-51.
- [13] 王畅, 刘倩, 龙强, 等. 唐山湾精细化海区大风特征初步分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(1): 11-18.
- [14] Gryning S E, Batchvarova E, Floors R. A Study on the effect of nudging on long-term boundary layer profiles of wind and Weibull distribution parameters in a rural coastal area[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(5): 1201-1207.
- [15] 黄继章, 范绍佳, 宋丽莉, 等. 广东博贺近海海面的一次冷空气过程强风特征分析[J]. 热带气象学报, 2009, 25(5): 635-640.
- [16] 许向春, 辛吉武, 邢旭煌, 等. 琼州海峡南岸近地面层大风观测分析[J]. 热带气象学报, 2013, 29(3): 481-488.
- [17] 吴息, 白龙, 崔方, 等. 海面与海岸陆面风速廓线特征[J]. 大气科学学报, 2014, 37(2): 138-145.
- [18] 孙莎莎, 吴炜, 郭俊建. 山东沿海测风高度对风速的影响和订正研究[J]. 海洋预报, 2015, 32(6): 34-39.
- [19] 郭凤霞, 朱文越, 饶瑞中. 非均一地形近地层风速廓线特点及粗糙度的研究[J]. 气象, 2010, 36(6): 90-94.
- [20] 刘春霞, 廖菲, 赵中阔. 热带海气边界层观测研究若干进展[J]. 气象科技进展, 2012, 2(6): 27-31.
- [21] 尹尽勇, 刘涛, 张增海, 等. 冬季黄渤海大风天气与渔船风损统计分析[J]. 气象, 2009, 35(6): 90-95.
- [22] 董加斌, 胡波. 浙江沿海大风的天气气候概况[J]. 台湾海峡, 2007, 26(4): 476-483.
- [23] 詹思珂, 齐琳琳, 卢伟. 基于CCMP资料和现场观测资料的西北太平洋海面风场特征分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(2): 10-20.
- [24] 涂小萍, 姚日升, 杨豪, 等. 一次入海温带气旋边界层气象要素观测分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 160-170.
- [25] 涂小萍, 姚日升, 漆梁波, 等. 浙江省北部一次灾害性大风多普勒雷达和边界层特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1687-1696.
- [26] 全利红, 袁春红, 王丙兰. 应用印痕函数研究测风塔资料代表性[J]. 气象学报, 2016, 74(3): 442-449.
- [27] 赵小平, 朱晶晶, 樊晶, 等. 强台风海鸥登陆期间近地层风特性分析[J]. 气象, 2016, 42(4): 415-423.
- [28] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [29] Edson J B, Jampana V, Weller R A, et al. On the exchange of

momentum over the open ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 2013, 43(8): 1589-1610.

[30] 黄锦林, 江洧. 海堤工程设计中风速的选用[J]. 水利技术监督, 2005, (3): 37-39, 51.

An experimental method of analyzing the sea surface characteristic based on the meteorological elements gradient observation data

JIANG Lu-lu¹, ZHU Jia-min², Du Kun¹, TU Xiao-ping^{1,3}

(1. Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315012 China; 2. Beilun Meteorological Bureau of Ningbo, Ningbo 315826 China; 3. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo 315211 China)

Abstract: Based on the conventional meteorological observation data, Zhejiang automatic weather stations data and Ningbo meteorological tower gradient observation data, characteristics of wind and temperature at the boundary layer during the winter cold weather process on 28 December 2010 in Zhejiang have been analyzed. Several characteristic parameters also have been calculated, such as the friction velocity, the roughness and the viscous layer thickness for discussing the change of the sea surface roughness when the cold wind effected. The quantitative relationship between wind speed with the friction velocity and the roughness has been given. Meanwhile, the simulated tests of two cold wind processes, which one from 21:00 BT 29 to 24:00 BT 30 December 2010 and another from 19:00 BT 21 to 10:00 BT 22 January 2015, have been investigated by the logarithmic wind profile formula. The 10m sea surface wind speeds have been calculated and compared with buoy data. The result shows that, for the cold wind weather, the wind velocity increases faster with height when the frontal surface comes close rather than when it leaves far away. Friction velocity has a linear relationship with the wind speed, and roughness is quadratic polynomial growth with that. The vertical mean wind profiles fit the logarithmic law of the Smooth flow with the height up to 100 m. When the lower wind speed is small, the mean wind speed estimated by the logarithmic law can easily be underestimated, but when the wind speed increases that will be overvalued.

Key words: meteorological tower; cold air; wind profiles; logarithmic law