第 28 卷 第 1 期
2017 年 1 月

应 用 气 象 学 报
JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGICAL SCIENCE

Vol. 28, No. 1
January 2017

周福,蒋璐璐,涂小萍,等. 浙江省几种灾害性大风近地面阵风系数特征. 应用气象学报,2017,28(1):119-128.
DOI: 10.11898/1001-7313.20170111

浙江省几种灾害性大风近地面阵风系数特征

周　福[1)*]　蒋璐璐[1)]　涂小萍[1)2)3)]　申华羽[1)]　郑　铮[1)]

[1)](浙江省宁波市气象局, 宁波 315012)

[2)](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, 宁波 315211)

[3)](浙江省气象科学研究所, 杭州 310008)

摘　　要

阵风特性研究是大风预报和服务的基础。基于 2011—2013 年浙江省自动气象站逐日逐 10 min 测风资料,分析了浙江省陆地和近海海面冷空气、热带气旋和强对流大风的阵风系数特征。结果表明:冷空气和热带气旋大风阵风系数空间分布基本相同,大风主要发生在近海海面和沿海地区,海面阵风系数一般小于 1.5,等值线平行于海岸线且自西向东逐渐减小,陆地阵风系数一般大于 2.0,山区可超过 3.0,表现出地形对阵风系数的增强作用。强对流大风阵风系数明显高于业务规范平均值,发生地点遍及浙江省各地,但发生概率超过 10%的站点主要位于沿海地区和近海海面。风向基本不影响阵风系数空间分布。冷空气和热带气旋站点阵风系数与海拔高度有较高正相关性。模糊聚类分析发现:浙江省 400 m 以上山区站与 70 m 以下的低海拔站点在阵风系数特征上分属不同空间类型;基于逐步回归建立站点阵风系数预报模型,检验表明:模糊聚类可帮助提高模型阵风系数预报能力。

关键词: 阵风系数; 冷空气; 热带气旋; 强对流; 模糊聚类

引　言

深入了解近地面风场特性是保障交通、建筑物安全及空气污染预报等的需要[1-2]。风力达到一定等级可能造成风灾,风灾不仅是海难事故发生的主要原因[3],而且可能对民航、高速铁路甚至生命财产安全等造成严重影响。国内外列车倾覆分析发现,强横风对高速列车的最大危险不是平均风速,而是瞬时强阵风[4]。2015 年 6 月 1 日“东方之星”号客轮在湖北监利水域翻沉,就是由小尺度强对流天气瞬时特大强风造成[5]。研究强风条件下的阵风特性是气象和建筑行业一个重要课题,并且一直受到气象学者的关注。

早在 20 世纪 60—70 年代,国外就有强风条件下的阵风研究工作[6-7]。在假定阵风是由于边界层快速移动的扰动涡旋导致的前提下,Brasseur[8] 提出了一种估算地面阵风的方法。阵风与平均风速的关系常用阵风系数来表达,因此,阵风系数的研究对阵风预报有重要意义。Yu 等[9]分析发现:热带气旋近地面阵风系数较温带气旋高 10%～15%,而下垫面粗糙度增大会导致湍流强度和阵风系数的增大。Thorarinsdottir 等[10]利用非均一性高斯回归方法对阵风系数进行分析,并将分析结果用于模式阵风预报,取得了较好的效果,为模式风力产品解释应用提供了借鉴。为了检验美国国家气象中心(the National Weather Service)风灾潜势公众预警临界值的适用性,Miller 等[11]对气候数据集逐日测风与风暴数据集人工报告的大风事件进行对比分析,结果发现:约 92%的人工报告非强对流大风事件伴随的阵风小于其预警临界值(25.9 m·s^{-1}),在导致人员伤亡的风灾事件中 74%以上阵风低于预警临界值。

近年来,国内已有很多阵风系数的研究成果。董双林[12]对中国地面到300m高空阵风极值及阵

2016-05-20 收到, 2016-11-07 收到再改稿。

资助项目: 浙江省自然科学基金项目(LY15D050001),浙江省宁波市科技计划项目(2012C50044),浙江省气象科技计划项目(2014QN13)

* email: zhoufu0311@sohu.com

风因子进行统计，结果已应用于国家军用标准的制定。我国现行建筑结构规范给出了4类粗糙度条件下离地面5～300 m高度层的阵风系数[13]。宋丽莉等[14]通过对比分析广东沿海8级以上大风过程的阵性特征，发现不同天气系统大风的阵风系数明显不同，冷空气明显小于热带气旋，并指出相关国家规范中存在风参数误差。分析发现：给我国北方带来沙尘暴的春季冷空气大风常叠加有周期为3～6 min的阵风，且有明显的相干结构，阵风扰动以沿平均流的顺风方向分量为主，其本质是低频次声波和重力波的混合[15]，曾庆存等[16]还对阵风起沙增益进行了理论探讨。李亚春等[17]利用胶州湾北部海岸超声风梯度观测资料，分析了不同强风样本的湍流度、阵风因子、摩擦速度等参数，其结果对提高结构风工程中风参数计算具有科学意义。随着探测手段的多样化，热带气旋个例的阵风特征研究得到了加强。分析发现：热带气旋阵风特性随下垫面粗糙度的变化而改变显著，气旋中心经过前后不同来向风的阵风系数会因为其经过的下垫面不同而明显不同[18]。热带气旋的强风阵风系数不随风速大小产生趋势变化，但在粗糙下垫面上会产生很大变幅[19-21]，现行规范推荐的关于表征阵风特性的参数不一定完全适用于不同下垫面情况[22]。不同天气系统、不同下垫面大风的阵风系数不同，因此，不同地区强风阵风系数需更多实际观测资料进行验证。

浙江省是全国海岛自动气象站最多的省份，其中有2个浮标站，大部分测站资料积累已超过10年，对近海大风研究具有资料优势。导致浙江沿海海面大风的天气系统冬半年多为冷空气，夏季主要为热带气旋[23]，春、夏季中小尺度强对流也可能造成局地风灾。实际业务中风力预报基于数值产品，但数值预报没有阵风产品。按照浙江省气象部门风力预报检验的2级跨度原则①，业务规范平均阵风系数约1.4，这也是风电场常用的阵风系数[24]，短时强对流大风时这样的原则可能并不符合实际，尚待验证。本文基于2011—2013年浙江省自动气象站逐日逐10 min测风资料，以热带气旋、冷空气和强对流天气系统影响下浙江省陆地和近海海区阵风系数为研究对象，分析浙江省大风事件的阵风系数时空分布特征，以及阵风系数与地理要素和平均风力的相关关系，建立回归预报模型，更好地为浙江省风力数值产品释用和大风预报服务提供参考。

1 资料与方法

1.1 阵风系数定义

世界气象组织(WMO)给出阵风系数的定义为在时距 T_0 的时间段内持续时间为 τ 的最大风速与时距为 T_0 的平均风速之比[25]，即

$$G_{\tau,T_0}=\frac{V_{\tau,T_0}}{V_{T_0}}。\tag{1}$$

式(1)中，V_{τ,T_0} 为观测周期 T_0 中持续时间 τ 的风速最大值(阵风)，V_{T_0} 为观测周期 T_0 的风速平均值。阵风系数计算时，T_0 必须大于3 min才具有代表性[26]。观测和预报业务规定：1 h最大风速是指1 h内10 min平均风速的最大值，而阵风则是3 s最大风速。本文取 T_0 为10 min，τ 为3 s，与业务规定一致。

1.2 资料及处理方法

基于2011—2013年浙江省1820个自动气象站逐日逐10 min测风资料，根据导致大风的天气系统分别挑选冷空气、热带气旋和强对流个例。资料来自浙江省气象信息中心，包括10 min平均风速、风向和1 h极大风速、风向、极大风速出现时间。所用资料进入数据库保存前已进行过极值检查、要素逻辑关系检查、缺测资料处理等自动质量控制[27]，应用时进一步进行了人工审核。

计算阵风系数时，首先查询逐小时阵风 V_{τ,T_0} 及其出现时刻，该时刻对应10 min最大风速即为式(1)中的 V_{T_0}。如 V_{τ,T_0} 出现在10:53(北京时，下同)，则取10:51—11:00的10 min平均风速为 V_{T_0}。在静风或弱风条件下 $V_{\tau,T_0}=0$ 或很小，阵风系数计算意义不大，因此，平均风速 $V_{T_0}\leqslant 0.1\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 时的站点阵风系数不参与本文分析。

冷空气和热带气旋大风个例挑选以浙江近海和海岛131个测风站资料为参考，当逐12 h最大风力不低于6级或极大风力不低于8级的站点数超过其中30%时记为1次大风个例，2011—2013年共计167次，其中，冷空气个例为131次，热带气旋个例为36次，路径包含登陆浙江、沿浙江近海北上及登陆福建3种情况。6—8月由于强对流导致站点最

① 浙江省气象局.浙江省气象局气业函〔2003〕24号.2003.

大风力不低于 6 级或极大风力不低于 8 级时为强对流大风事件,不考虑降水等其他要素,强对流事件从发生到结束计为 1 次个例,2011—2013 年浙江省共计 57 次、847 个站出现过强对流大风。

2　阵风系数的空间分布

按照平均风向 8 个方位,即北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)、西(W)、西北(NW),对测风资料进行风向划分,分析冷空气、热带气旋系统影响时不同风向下阵风系数特征。强对流大风未考虑风向影响。

2.1　冷空气大风

冷空气大风主要为西北、偏北和东北大风,分析发现:以上 3 种风向时,浙江省陆地及近海海面平均等风速线和阵风系数空间分布基本相同。图 1a 和图 1b 为偏北风时等风速线和阵风系数空间分布,可见近海海面风速明显大于内陆,等风速线平行于海岸线自西向东逐渐增大。除宁波到温州沿海地区平均风速达到 4 级(5.5 m·s^{-1})外,内陆地区风力均在 3 级或以下,沿海地区及舟山群岛风力可达 5～6 级,7 级以上大风一般出现在距离海岸线 40 km 以上的海区,可见,冷空气大风事件易发生在沿海地区和近海海面。

分析阵风系数空间分布发现,浙江近海海区阵风系数一般小于 1.5,且平行于海岸线自西向东稍有减小,符合浙江省气象部门风力预报业务规范。陆地由于平均风速小,阵风系数均超过 2.0,宁波到台州的西部山区及西南部的金华、丽水和衢州山区阵风系数可超过 3.0,表现出山地地形对阵风系数的明显增强作用。

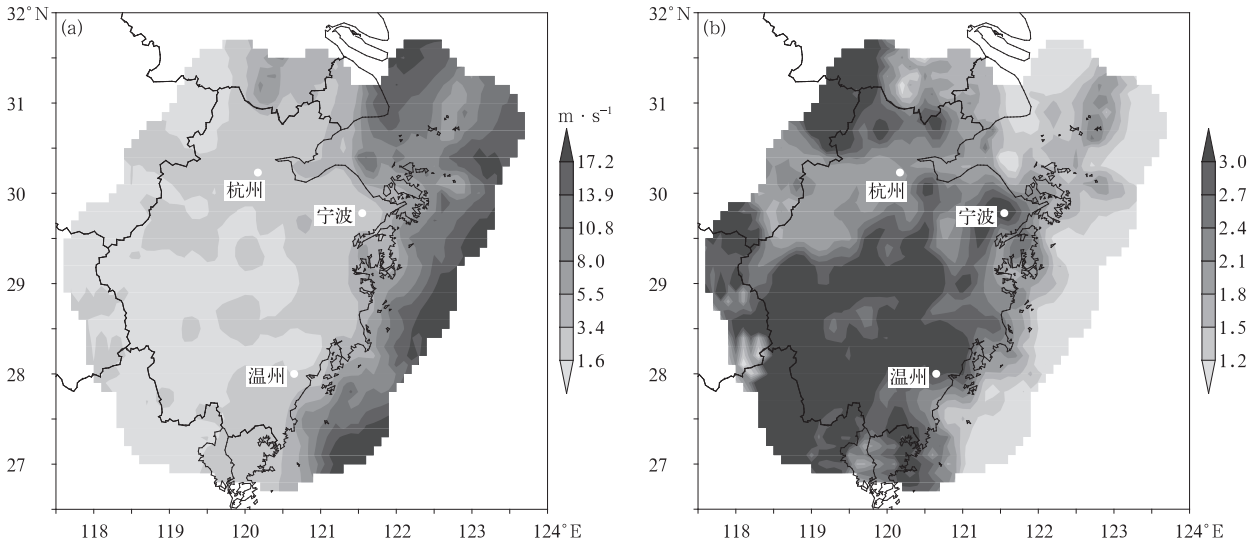


图 1　冷空气偏北大风时浙江省平均风速(a)和阵风系数(b)空间分布

Fig. 1　Spatial distributions of mean north wind speeds(a) and gust factors(b) under cold air masses in Zhejiang Province

2.2　热带气旋大风

热带气旋影响时不同风向均可能在浙江近海产生大风,且不同风向等风速线分布有所不同,但阵风系数空间分布差异不大。图 2 是热带气旋大风时偏北、偏东、偏南和偏西 4 种风向的等风速线及其相应的阵风系数空间分布,可见,不同风向阵风系数分布与冷空气基本相似,均表现出海面阵风系数小于陆地,且阵风系数平行于海岸线自西向东稍有减小,符合风力预报 2 级跨度的业务规范,而陆地阵风系数一般超过 2.0,山区可超过 3.0。风向基本不影响阵风系数空间分布,但不同风向时等风速线分布有所不同,偏北风时与冷空气大风相似,沿海海面等风速线平行于海岸线并自西向东逐渐增大,7 级以上大风一般出现在距离海岸线 40 km 以上的海区;偏东风时 7 级以上大风主要出现在浙江省南部近海和杭州湾附近海面;偏南大风范围最小,主要出现在舟山群岛东部海区;而偏西大风时浙江省北部海区都可能出现 7 级以上大风。上述风速分布特征与热带气

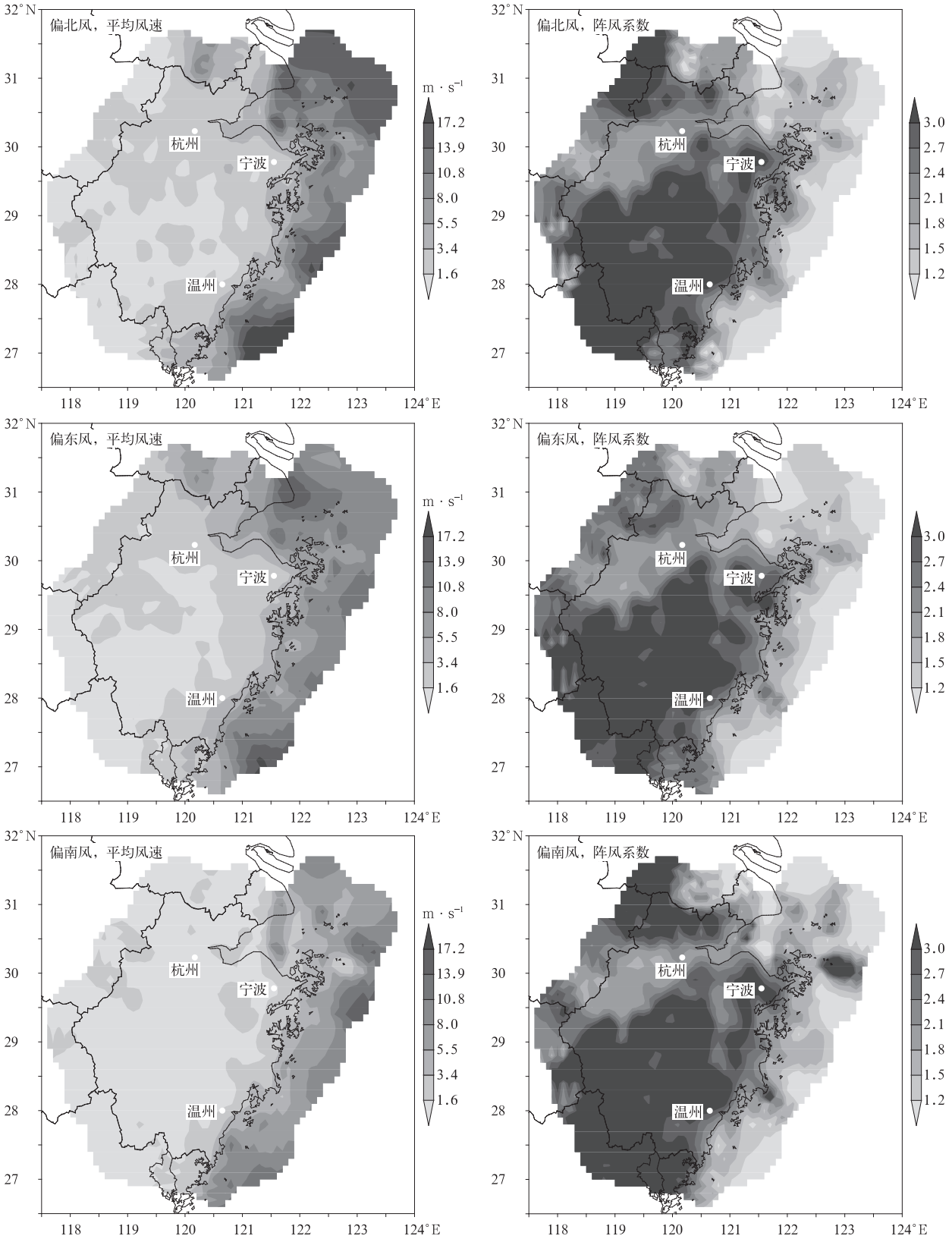
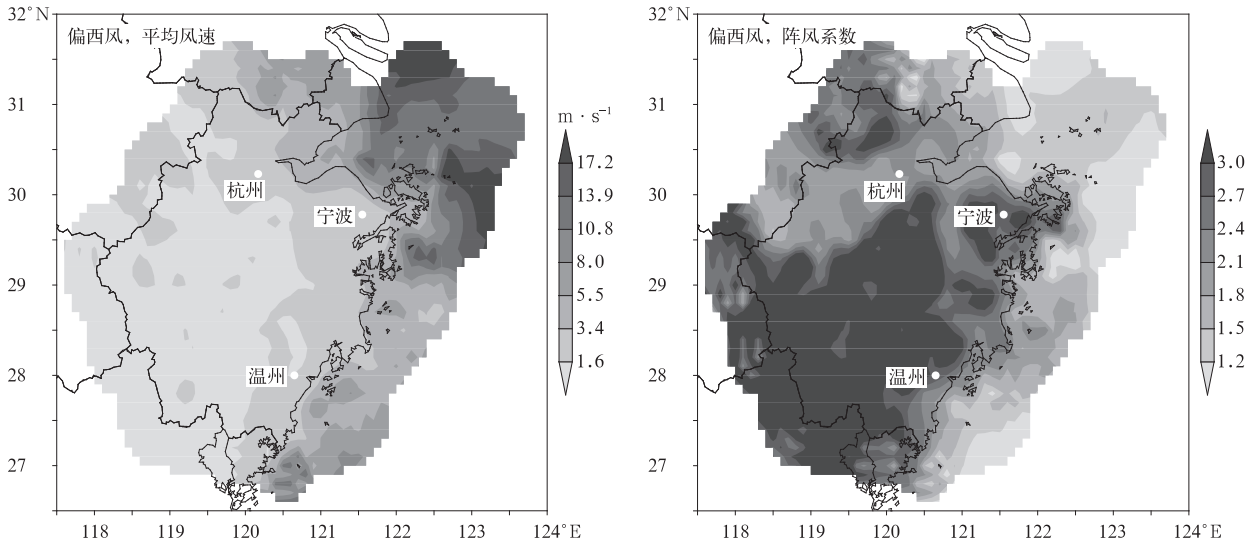


图 2 热带气旋大风时不同风向浙江省平均风速和阵风系数空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of mean wind speeds and gust factors at different wind directions caused by tropical cyclones in Zhejiang Province



续图 2

旋位置有关,浙江省近海盛行偏北风时,热带气旋中心位于海洋上,强度强,影响范围大,整个浙江省近海均受影响,表现出 7 级等风速线范围最大;偏东风时热带气旋中心多位于福建沿海,因此,浙南近海风力相对较大,而杭州湾沿岸因喇叭口的地形效应对偏东气流有增强作用,表现出了偏东风时的风速大值中心;偏南风时热带气旋中心多已登陆,强度减弱,海区灾害性风力范围偏小;当浙江省近海出现偏西大风时,热带气旋中心多位于长江口及其以北的海面,因此,北部近海风速明显大于南部近海。

2.3　强对流大风

2011—2013 年 6—8 月浙江省有 57 次、847 个站(共计 4185 站次)出现过最大风力不低于 6 级或极大风力不低于 8 级的强对流大风事件。图 3 为各站强对流大风发生概率。可见强对流大风发生站点遍布浙江全省,但 93.2%(789/847)的站点强对流大风发生概率都在 10%以下,5.8%(49/847)的站点大风概率为(10%,20%],这些站主要位于近海海区和靠近海岸线的陆地,仅有 1%(9/847)的强对流大风站发生概率超过 20%,这些站均分布在浙江近海海区。虽然强对流大风发生地遍及浙江全省,但发生概率超过 10%的站多位于沿海地区和近海海区,预报服务应当予以关注。

计算得到 4185 站次强对流大风事件的平均阵风系数约 1.8,与强热带风暴凤凰(1416)登陆浙江沿海后其中心附近观测到的近地层阵风系数相当,明显大于业务规定的平均值。可见强对流大风事件发生时,阵风系数大于业务规定值,预报和服务中应适当增大平均风与阵风的级别跨度。

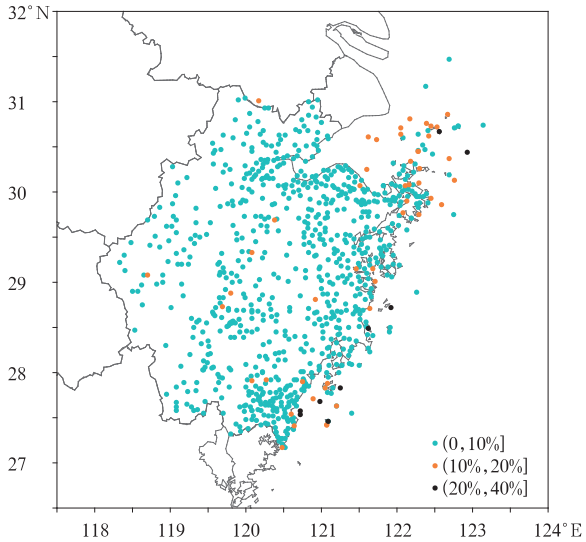


图 3　2011—2013 年 6—8 月浙江省站点及强对流大风事件概率分布

Fig. 3　Station and probability distributions of convective gale events from Jun to Aug in 2011—2013

3　统计学分析

3.1　相关性分析

研究发现:下垫面性质对热带气旋阵风系数有很大影响,而下垫面特征与地形地貌、水陆分布等密不可分[22]。表 1 给出了冷空气、热带气旋、强对流大风时站点阵风系数与纬度、经度、海拔高度及 10 min平均风速的相关系数。由表 1 可见,对于冷空气和热带气旋大风,不同风向时阵风系数与站点

纬度、经度、海拔高度、平均风速的相关系数差异不大，表明阵风系数与风向基本无关。阵风系数与站点纬度、经度呈负相关，与海拔高度呈正相关，意味着站点位置偏南、偏西，阵风系数易偏大；海拔越高，阵风系数越大。而强对流大风与冷空气和热带气旋有所不同，其阵风系数与纬度和海拔高度相关系数均很小，但与站点经度相关系数为－0.171，达到0.01显著性水平，表明位置越偏西的站点其阵风系数易偏大。

上述相关性在本质上体现了山区地形对阵风系数的增大作用。浙江省西部多山区，东部临海，海拔高度总体自西向东递减。由于山区下垫面相对复杂，地面粗糙度也相对大，而粗糙的下垫面对阵风系数有明显的增大作用[10-11,18-21]，因此，位置偏西的站点大风的阵风系数易偏大，而海拔高的站点往往位于山区，冷空气和热带气旋大风同时还表现出海拔高度与阵风系数的正相关性。

表1 浙江省自动气象站阵风系数与各要素的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between automatic weather station gust factors and elements in Zhejiang Province

天气系统	风向	纬度	经度	海拔高度	平均风速	样本量
冷空气	北	－0.234	－0.254	0.195	－0.585	1820
	东北	－0.203	－0.206	0.174	－0.582	1799
	东	－0.219	－0.166	0.181	－0.554	1754
	东南	－0.167	－0.115	0.115	－0.494	1605
	南	－0.175	－0.144	0.110	－0.458	1599
	西南	－0.251	－0.145	0.169	－0.468	1675
	西	－0.267	－0.222	0.209	－0.520	1754
	西北	－0.252	－0.297	0.232	－0.576	1808
热带气旋	北	－0.245	－0.272	0.187	－0.576	1720
	东北	－0.282	－0.291	0.230	－0.624	1715
	东	－0.288	－0.291	0.253	－0.630	1720
	东南	－0.246	－0.294	0.216	－0.573	1711
	南	－0.203	－0.264	0.217	－0.501	1657
	西南	－0.227	－0.236	0.228	－0.525	1672
	西	－0.284	－0.292	0.251	－0.543	1686
	西北	－0.251	－0.287	0.229	－0.542	1701
强对流		－0.010	－0.171	0.059	－0.418	4185

3.2 模糊聚类分析

空间模糊聚类可将不同属性的站点分离，同一类型的站点要素特征更为接近。为了分析浙江省山地和平原站阵风系数的共性，应用模糊聚类(fuzzy cluster mean，FCM)方法分别对冷空气和热带气旋大风时自动气象站进行空间聚类[28]。由于风向基本不影响阵风系数空间分布，聚类时以偏北风资料为代表，采用欧式距离为分型判断依据。参与聚类的因子包括海拔高度、站点平均阵风系数及10 min平均风速。

FCM算法需要两个参数：聚类组数 C 和柔性参数 m。一般来讲，C 要远远小于聚类样本量，同时要保证 $C>1$。m 是一个控制算法的柔性参数，m 过大聚类效果会很差，而 m 过小，则算法会接近硬聚类。高新波等[29]试验表明：模糊聚类目标函数对 m 的偏导数存在一个极小点，该点对应的 m 值确定为本文FCM算法中的柔性参数，得到冷空气和热带气旋大风 m 分别为2.0和1.9。在 m 确定的基础上引用模糊效果指数(fuzziness performance index，I_{fp})[30]进行分类组数 C 试验。I_{fp} 是表示不同类别间共享成员量的一个指数，用来度量 C 个类别之间的分离程度，介于0～1之间，I_{fp} 越小，表示不同分区间共享的成员越少。I_{fp} 按下式定义：

$$I_{fp} = 1 - \left(\frac{CF-1}{C-1}\right), \tag{2}$$

其中，$F = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{c}(\mu_{ij})^2/n$，$\mu_{ij}$ 构成模糊分类矩阵，n 为样本量，C 为分类数。

图4为冷空气和热带气旋大风时柔性参数分别为2.0和1.9时 I_{fp} 指数随聚类数 C 的变化趋势，可见分类数为2时，I_{fp} 指数最小，即将浙江省自动气象站进行2组空间聚类可得到最好的模糊聚类结果。

图5a和图5b分别为冷空气和热带气旋进行2组聚类后的空间站点分布，可见二者空间分布基本

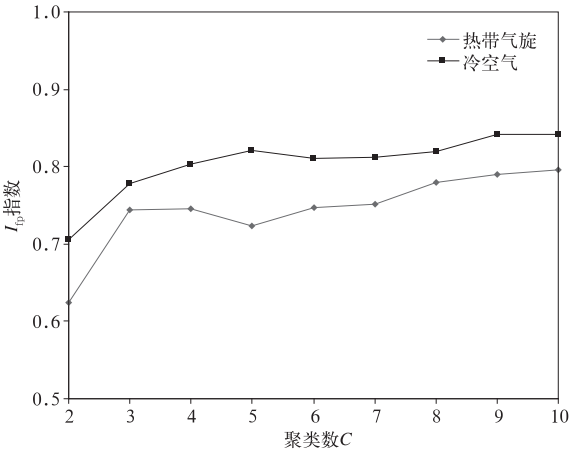


图 4　冷空气和热带气旋大风时 I_{fp} 指数随聚类数 C 变化趋势

Fig. 4　I_{fp} trend with cluster number C under cold air and tropical cyclone gales

接近,说明天气系统对站点阵风系数空间属性区划影响不大。聚类结果显示,沿海海岛站点和浙江北部平原地区大部分站点被划分为同一种类型(Ⅰ型),而浙江中南部站点和浙江北部山区站点多被聚为另一类(Ⅱ型),表明冷空气和热带气旋大风时浙江沿海海岛和北部大部分平原站点与中南部和北部山区站点在阵风系数特征上表现不同。

表 2 为冷空气和热带气旋大风事件的站点聚类统计。冷空气和热带气旋时Ⅰ型站点数分别为 1093 和 1119,平均海拔高度为 83 m 和 70 m,平均阵风系数为 2.4 和 2.3,均低于全部站点的平均值,而Ⅱ型站点数分别为 627 和 601,平均海拔高度为 347 m 和 400 m,阵风系数分别为 3.6 和 3.5,均明显高于全部站点平均值。在全部海拔高度不低于 400 m的站中,冷空气和热带气旋时分别有226个

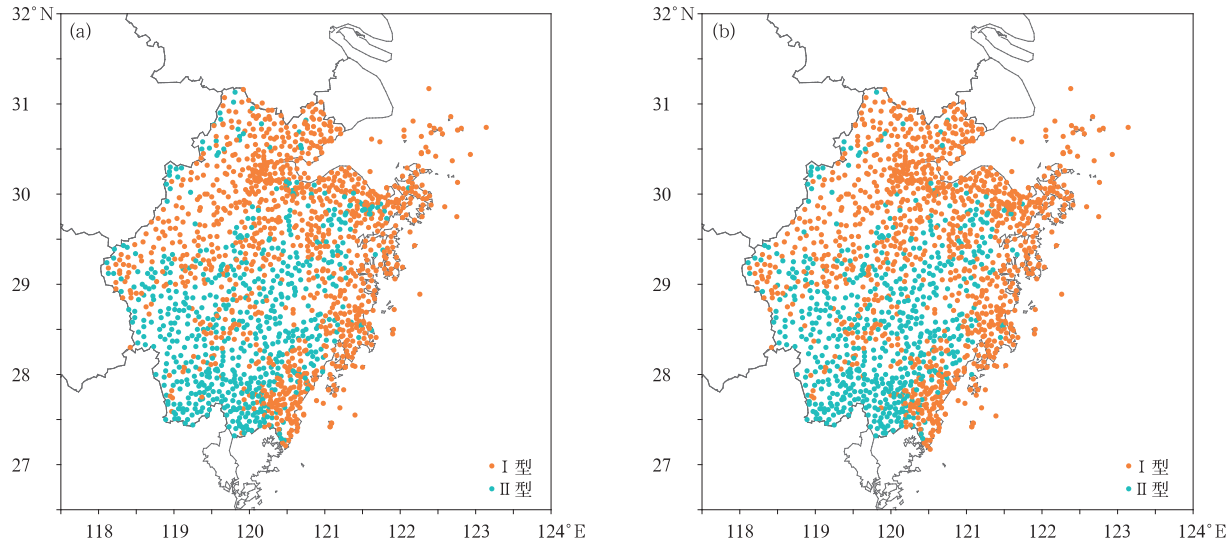


图 5　$C=2$ 时,冷空气和热带气旋大风模糊聚类站点空间分布　(a)冷空气,(b)热带气旋

Fig. 5　Station distributions of cold air and tropical cyclone gale events by FCM analysis with cluster number $C=2$　(a)cold air masses,(b)tropical cyclones

站(85%)和 260 个站(84%)属于Ⅱ型,而海拔不高于 70 m 的站点中,分别有 691 个站(87%)和 723 个站(98%)属于Ⅰ型。对于海拔高度为 70～400 m(不含 70 m 和 400 m)的站,冷空气和热带气旋大风时Ⅰ型、Ⅱ型站数量基本相当。

综上所述,天气系统类型(冷空气和热带气旋)对站点阵风系数所属空间类型的划分影响不大,但站点海拔高度对空间聚类有一定影响,聚类Ⅱ型站阵风系数明显高于Ⅰ型站。400 m 以上的高海拔站多属聚类Ⅱ型,而 70 m 以下的站则多属聚类Ⅰ型,前者阵风系数明显大于后者,体现出山地地形对站点阵风系数的增强作用。

3.3　阵风系数预报模型建立及检验

基于上述分析,对偏北风时冷空气和热带气旋大风个例,选择站点平均风速和海拔高度 2 个因子建立阵风系数预报方程并进行检验。将浙江省站点按照 7:3 的比例分为统计样本和回归样本,通过逐步回归方法分别建立冷空气和热带气旋大风聚类分

表2 浙江省自动气象站点模糊聚类统计

Table 2 FCM results of automatic weather stations in Zhejiang Province

天气系统	聚类型	平均海拔/m	平均阵风系数	站点数量			
				不低于400 m	不高于70 m	70～400 m	合计
冷空气	Ⅰ型	83	2.4	41	691	361	1093
	Ⅱ型	347	3.6	226	99	302	627
	全部站点	180	2.8	267	790	663	1720
热带气旋	Ⅰ型	70	2.3	51	723	345	1119
	Ⅱ型	400	3.5	260	13	328	601
	全部站点	185	2.7	311	736	673	1720

型前后的阵风系数回归模型，样本分类站点选择时尽可能考虑了空间分布和风速的均匀性。

冷空气影响下，阵风系数预报方程如下：

未分型：$Y = 3.360 - 0.263X_1 + 0.001X_2$，(3)

Ⅰ型：$Y = 2.836 - 0.163X_1 - 0.001X_2$，(4)

Ⅱ型：$Y = 4.284 - 0.356X_1 - 0.001X_2$。(5)

热带气旋影响下，阵风系数预报方程如下：

未分型：$Y = 3.141 - 0.173X_1 + 0.001X_2$，(6)

Ⅰ型：$Y = 2.580 - 0.082X_1 - 0.001X_2$，(7)

Ⅱ型：$Y = 4.477 - 0.348X_1 - 0.001X_2$。(8)

其中，Y 为阵风系数预测值，X_1 为10 min平均风速（单位：$m \cdot s^{-1}$），X_2 为海拔高度（单位：m）。

对各式进行显著性检验，计算的 F 值如表3所示，均远大于0.01显著性水平的 F 临界值。在参数估计中，两个变量的 T 检验均达到0.05的显著性水平，说明变量和回归方程是显著的，具有预测意义。表3还列出了聚类分型前后所建模型的预测检验指标，可见聚类分型后热带气旋大风无论是Ⅰ型还是Ⅱ型站点阵风系数预测模型均比未分型有提高，相关系数提高0.1以上，绝对偏差减小0.1以上，而冷空气Ⅰ型站点的阵风系数预报绝对偏差减小0.334，平均偏差仅－0.073，Ⅱ型站点阵风系数预测模型性能改善稍差，但减小了平均绝对偏差和均方根误差，预测模型的稳定性得到提升。

表3 浙江省自动气象站阵风系数逐步回归预报模型检验

Table 3 Verification of stepwise regression forecast models of station gust factors in Zhejiang Province

天气系统	聚类型	回归样本量	独立检验样本量	F 值	相关系数	平均偏差	绝对偏差	均方根误差
冷空气	未分型	1204	514	314.877	0.486	0.351	0.762	0.831
	Ⅰ型	765	327	84.327	0.456	－0.073	0.428	0.533
	Ⅱ型	439	187	88.913	0.556	－0.333	0.651	0.778
热带气旋	未分型	1200	515	292.090	0.433	0.237	0.761	0.887
	Ⅰ型	780	336	51.197	0.612	－0.291	0.468	0.557
	Ⅱ型	420	179	79.503	0.578	－0.150	0.644	0.783

独立检验样本统计发现：冷空气和热带气旋大风事件的聚类Ⅰ型模型对其中海拔偏高站的阵风系数预报偏小，而聚类Ⅱ型模型对海拔偏低站点的预报明显偏大。聚类Ⅰ型站点对近海海区和沿海岸陆地阵风系数预报误差不大，一般不超过0.5，而内陆站点普遍偏小0.5～1.0，误差偏小1.0以上的站海拔一般超过120 m。而对于聚类Ⅱ型站点，多数站点误差绝对值不超过0.5，但浙江北部和沿海少部分地区预报偏高1.0以上，这些站点海拔高度一般在120 m以下。分析原因，由于Ⅰ型站点海拔普遍较低，统计回归能更好地满足低海拔站点的特点，因此，对其中海拔相对高的站点误差易偏大，而聚类Ⅱ型站点正好相反，统计回归能更好地满足高海拔站点的特点，对其中海拔相对低的站点误差相对较大。

4 结论与讨论

以2011—2013年影响浙江省的冷空气、热带气旋和强对流大风事件为研究对象，探讨了这几类天气影响下浙江省陆地和近海海面平均风速和阵风系数分布特征，分析了阵风系数与站点海拔高度等地理要素的相关关系，并进行站点模糊聚类，建立了聚类分型前后冷空气和热带气旋大风天气的阵风系数预报模型。得到以下主要结论：

1）冷空气和热带气旋大风事件时，风向基本不影响阵风系数的空间分布特征。浙江近海海面阵风系数一般小于 1.5，且平行于海岸线自西向东稍有减小；陆地阵风系数一般大于 2，山区大于 3，表现出山地地形对阵风系数的增强作用。

2）强对流大风发生时阵风系数可达到 1.8 左右，明显大于预报业务规范平均值，地面粗糙度对强对流大风站点阵风系数影响很小。浙江省强对流大风发生地遍及全省，但约 93％的站点强对流大风发生概率不超过 10％，超过 10％的站点多位于浙江近海海区和靠近海岸线的陆地。

3）模糊聚类分析发现：造成大风的天气系统对浙江省自动气象站点阵风系数空间聚类结果影响不大，但海拔高度对站点聚类有影响。浙江近海海岛和北部大部分平原站点与浙江中南部站点一般分属不同类型。400 m 以上的山区站与 70 m 以下的低海拔站点在阵风系数特征上有较大不同。

4）回归分析表明：预先对站点进行模糊聚类后建立预测模型可以提高模型的阵风系数预报能力。聚类Ⅰ型模型对其中的高海拔站点预报易偏小，而聚类Ⅱ型模型对其中的低海拔站点预报易偏大。

本文所得出的分析结果主要针对近地面，对业务预报和服务具有一定参考意义。由于阵风系数受下垫面影响明显，不同下垫面、不同天气系统的近地层高度有所不同，因此，研究浙江省及其近海不同下垫面阵风系数随高度的变化特征是下一步研究重点。

参 考 文 献

[1] 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. 热带气象学报，2013，29(3)：481-488.

[2] 陈敏，马雷鸣，魏海萍，等. 气象条件对上海世博会期间空气质量影响. 应用气象学报，2013，24(2)：140-150.

[3] 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. 气象，2009，35(6)：90-95.

[4] 马淑红，马韫娟，程先东，等. 我国高速铁路沿线强风区间的确定方法及风险评估. 铁道工程学报，2011(3)：37-45.

[5] 郑永光，田付友，孟智勇，等. "东方之星"客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. 气象，2016，42(1)：1-13.

[6] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quart J Roy Meteor Soc*，1961，87：194-211.

[7] Shiotani M，Iwatani Y，Ruroha K. Magnitudes and horizontal correlations of vertical velocities in high winds. *J Meteor Soc Japan*，1978，56：35-42.

[8] Brasseur O. Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. *Mon Wea Rev*，2001，129(1)：5-25.

[9] Yu B，Chowdhury A G. Gust factors and turbulence intensities for the tropical cyclone environment. *J Appl Meteor Clim*，2009，48(3)：534-552.

[10] Thorarinsdottir T L，Johnson M S. Probabilistic wind gust forecasting using nonhomogeneous gaussian regression. *Mon Wea Rev*，2012，140(3)：889-897.

[11] Miller P W，Black A W，Williams C A，et al. Maximum wind gusts associated with human-reported nonconvective wind events and a comparison to current warning issuance criteria. *Wea Forecasting*，2016，31(2)：451-465.

[12] 董双林. 中国的阵风极值及其统计研究. 气象学报，2001，59(3)：327-333.

[13] 中华人民共和国建设部. 建筑结构荷载规范(GB50009－2001). 北京：中国建筑工业出版社，2002：47-48.

[14] 宋丽莉，毛慧琴，汤海燕，等. 广东沿海近地层大风特性的观测分析. 热带气象学报，2004，20(6)：731-736.

[15] 程雪玲，曾庆存，胡非，等. 大气边界层强风的阵性和相干结构. 气候与环境研究，2007，12(3)：227-243.

[16] 曾庆存，程雪玲，胡非. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理. 气候与环境研究，2007，12(3)：244-250.

[17] 李亚春，武金岗，谢志清，等. 不同强风样本湍流特性参数的计算分析. 应用气象学报，2008，19(1)：28-34.

[18] Powell M D，Vickery P J，Reinhold T A. Reduced drag coefficients for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*，2003，422：279-283.

[19] 宋丽莉，庞加斌，蒋承霖，等. 澳门友谊大桥"鹦鹉"台风的湍流特性实测和分析. 中国科学(技术科学)，2010，40(12)：1409-1419.

[20] 王志春，植石群，丁凌云. 强台风纳沙(1117)近地层风特性观测分析. 应用气象学报，2013，24(5)：595-605.

[21] 张荣焱，张秀芝，杨校生，等. 台风莫拉克(0908)影响期间近地层风特性. 应用气象学报，2012，23(2)：184-194.

[22] 陈雯超，宋丽莉，植石群，等. 不同下垫面的热带气旋强风阵风系数研究. 中国科学(技术科学)，2011，41(11)：1449-1459.

[23] 卢美，朱业. 浙江沿海大风的天气气候特征. 杭州师范大学学报(自然科学版)，2011，10(5)：474-480.

[24] 呼津华，王相明. 风电场不同高度的 50 年一遇最大和极大风速估算. 应用气象学报，2009，20(1)：108-113.

[25] Harper B A，Kepert J D，Ginger J D. Guidelines for Converting Between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Conditions. Sixth Tropical Cyclone RSMCs/WCs Technical Coordination Meeting Technical Document，Brisbane，2009.

[26] 刘小红，洪钟祥. 北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究. 大气科学，1996，20(2)：223-228.

[27] 李铁，邹立尧，国世友. 东北地区低温气象资料数据集及其质量控制. 应用气象学报，2004，15(增刊Ⅰ)：164-167.

[28] 李艳，史舟，吴次芳，等. 基于模糊聚类分析的田间精确管理分区研究. 中国农业科学，2007，40(1)：114-122.

[29] 高新波,裴继红,谢维信.模糊c-均值聚类算法中加权指数m的研究.电子学报,2000,28(4):80-83.

[30] 陈彦,吕新.基于FCM的绿洲农田养分管理分区研究.中国农业科学,2008,41(7):2016-2024.

Near-surface Gust Factor Characteristics in Several Disastrous Winds over Zhejiang Province

Zhou Fu[1)] Jiang Lulu[1)] Tu Xiaoping[1)2)3)] Shen Huayu[1)] Zheng Zheng[1)]

[1)] (*Ningbo Meteorological Bureau of Zhejiang Province*, *Ningbo* 315012)

[2)] (*Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere*, *Ningbo* 315211)

[3)] (*Zhejiang Institute of Meteorological Sciences*, *Hangzhou* 310008)

Abstract

Studies on near-surface gust characteristics in high winds are necessary for weather services. Using the daily 10 min data from automatic weather stations in Zhejiang Province during 2011—2013, characteristics of near-surface gust factors in several kinds of high winds caused by cold air masses, tropical cyclones and abruptly severe convections, are investigated over the offshore and in-land areas of Zhejiang Province. Spatial distributions of wind velocities and gust factors are especially considered, as well as the relationship among gust factors, geographical elements and mean wind speeds. The fuzzy cluster mean (FCM) and stepwise regression methods are applied as well to do the weather station clusters under different weather patterns and set up gust factor forecast models. Result shows that the gust factor distribution displays similarly both in cold air and tropical cyclone strong winds although spatial speed distributions might be different from each other, and wind directions show no effects on gust factor distributions. Disastrous winds usually happen over the offshore seas and coastal areas, with gust factors less than 1.5 and the isolines paralleling to the coastline and descending eastwards. However, over in-land areas of Zhejiang Province, gust factors are generally greater than 2.0 and even more than 3.0 over the hilly regions with gentle wind speeds, indicating enhancing effects of hilly terrain. The average gust factor is more than 1.8 under severe convective systems, which is greater than operational regulations. The convective gale events could occur at any locations within Zhejiang Province, but stations with occurring probabilities more than 10% mainly lay in the coastal and offshore Zhejiang Province, and the terrain roughness doesn't show much influence. Gust factors perform well related to 10 min mean wind speeds and altitudes in high winds by cold air masses and tropical cyclones. FCM analysis indicates that there are few differences in station distributions between clod air mass and tropical cyclone gale events, stations located in the northern and coastal regions often differ from those in the middle and southern areas in Zhejiang Province, and stations with altitudes more than 400 m are different from those with altitudes lower than 70 m. Stepwise regression is carried out to set up forecasting models between gust factors and mean winds and station altitudes before and after FCM clusters, verifications imply that FCM could help improve forecast ability of the models. The regression model for type Ⅰ tends to overestimate gust factors at stations with relative high altitudes, on the contrary, the model for type Ⅱ tends to underestimate gust factors at stations with relative low altitudes.

Key words: gust factors; cold air masses; tropical cyclones; severe convections; fuzzy cluster mean