

阵风系数模型的研究与应用综述

景盼盼 岳彩军 沈其艳 季晓东

(上海海洋中心气象台, 上海 200030)

摘要: 阵风与日常生活和行业运作息息相关。阵风过强会带来严重危害,但目前依然缺乏精准的阵风预报方法。阵风系数模型是一种具有较高技巧、适用于特定地点最大阵风预报的统计学方法。全面系统回顾阵风系数模型的定义、建立以及国内外研究和应用进展发现,现有研究着重分析了阵风系数对气象和环境因素的敏感性以及模型性能评估,但模型与物理学方法或阵风客观预报产品的比较研究相对不足,并且用于建立阵风系数的观测资料分辨率较低;已有研究尝试利用阵风系数的敏感性改进阵风系数模型并取得了一些进展,但改进后的模型尚未在其他具有相似地形的地区得到检验和拓展。最后给出了未来有关阵风系数模型的研究重点和改进方向。

关键词: 阵风系数, 平均风预报, 最大阵风预报, 阵风系数模型

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.04.003

Review of Research and Application of Gust Factor Model

Jing Panpan, Yue Caijun, Shen Qiyan, Ji Xiaodong

(Shanghai Marine Meteorological Centre, Shanghai 200030)

Abstract: Gusts, closely related to daily life and industry operations, can pose severe dangers if excessive. However, there is still a lack of accurate gust forecasting methods at present. The gust factor model is a highly skilled statistical method suitable for predicting peak gusts at a specific location. Based on a comprehensive and systematic review of the definition, establishment, as well as the research and application progress of the gust factor model at home and abroad, it is found that the existing researches have focused on analyzing the sensitivity of gust factors to meteorological and environmental elements, as well as on evaluating the model performance. However, there are relatively insufficient comparative researches between the model and physical methods or objective gust prediction products, and the resolution of observations used to establish gust factors is relatively low. Previous studies have attempted to improve the gust factor model based on the sensitivity of gust factors and have made some progress, but the improved model has not yet been tested and expanded in other areas with similar terrains. Finally, future specific research priorities and improvement directions for the gust factor model are proposed.

Keywords: gust factor, average wind forecast, peak gust forecast, gust factor model

0 引言

阵风是由于高动量空气 (high momentum air) 被带到地面而出现的突然、短暂的风速增加,是湍流在近地面的表现,伴随着一系列对流和非对流现象^[1-2]。阵风与日常生活和行业运作息息相关,但值得注意的是,过强的阵风会带来严重危害,破坏电力设施、对各种建筑造成结构性损坏、导致水陆空交通失控以及减少农作物产量等^[3-6],造成巨大的经济损失甚至威胁生命安全,因此,准确的阵风信息对于有效评估风灾损害和生命财产安全风险至关重要^[7]。随着人类活动的多样化,阵风影响在持续扩大,阵风预报比以往任何时候都有价值^[8]。尽管作为短期预报服务、气候学

和风险研究的关注重点,阵风的特性特征得到了广泛研究,但是目前依然缺乏精准的阵风预报方法^[9]。究其原因,一方面由于阵风是一种复杂的小尺度天气现象,无论是阵风还是跟湍流相关的物理参数都无法通过标准的气象观测网络观测,也无法被中尺度模式完全解析^[10-11];另一方面由于阵风对多种气象和非气象因素的敏感性,如天气系统、大气稳定度、边界层湍流、地形以及测量仪器特性等^[12-15]都不同程度地影响阵风预报方法的建立和检验。

目前国内外现有的阵风预报技术可归为三类^[8, 16]: 1) 基于物理学的方法,根据有关边界层湍流的物理理解对数值天气预报 (NWP) 模式产品进行后处理,随着模式分辨率的不断提高,产生阵风的部分天气过程可以在模式场中被部分解析,但也随之带来了新挑战。2) 传统统计学方法,主要包括极值统计和基于风分布假设建模,但由于缺乏对物理过程的思考,导致对统计学方法的评估和改进难度增加。3) 机器学习

收稿日期: 2023年5月5日; 修回日期: 2023年11月9日

第一作者: 景盼盼(1992—), Email: unique_panda@163.com

资助信息: 上海市气象局科技研发项目(QM202315); 国家自然科学基金(41875059)

方法, 很适合模拟如强对流大风等无法用简单方法进行参数化的非线性现象, 但目前在阵风预报方面的应用相对不足。大多数阵风预报方法或者侧重于其中一类^[17-20], 或者是三类方法的部分耦合^[21-24]。

尽管数值模拟技术有其优越性, 但是为了更加准确地描述特定地区的风场特性, 通过实测资料建立经验模型和统计参数的方法依然是不可或缺的^[25]。阵风系数模型是一种统计学方法, 通过已知的阵风系数乘以平均风速预报值可以快速得到最大阵风预报。目前已有不少研究揭示了该方法在单个站点阵风特性捕捉和预报方面的技巧性。美国15个不同地点的阵风系数模型预报绝对误差在0.72~1.03 m/s^[9], 多个站点的预报误差均比预报员常用的差分法小1.9~2.3 m/s^[26], 并且相比Persistence和Climatology模型, 预报误差分别显著减少了0.32 m/s和1.76 m/s^[27]。此外有研究^[11]指出, 利用风速和风向改进的阵风系数模型非常适用于预测具有高度方向依赖性的沿海地区最大阵风。

我国近海风能资源丰富, 经贸发达, 但是大风灾害频繁发生且存在突发性, 严重影响港口运作、海上航运以及生命财产安全, 所以阵风系数模型对于我国海上安全生产和海洋经济具有重要的科学意义与应用价值。为此, 本文综述阵风系数模型的定义和建立方法, 以及国内外对阵风系数模型的研究和应用进展, 旨在探索基于阵风系数和平均风产品耦合建立的阵风系数模型在最大阵风预报方面的能力, 并给出未来的研究重点和改进方向。

1 阵风系数模型介绍

阵风系数模型是一种利用阵风系数从平均风速预报中得到最大阵风预报的统计学方法^[27], 定义如下:

$$G_{\text{fcst}} = F \times W_{\text{fcst}}, \quad (1)$$

式中, F 为阵风系数; G_{fcst} 、 W_{fcst} 分别为最大阵风风速和平均风速的预报值。利用阵风系数模型, 最大阵风的大小可以简单地通过已知的阵风系数乘以平均风速预报快速得到。在实际预报业务中, W_{fcst} 一般可以直接从NWP模式或模式释用产品中获取, 但是 F 需要事先基于研究地点长期、稳定的气候观测建立, 这是一个时间尺度和数据量都相当大的处理过程。

1.1 阵风系数

1.1.1 阵风系数的定义

阵风系数(F)是描述风脉动强度的特征量, 通常定义为持续时距内最大阵风与平均风速之比^[28]。理论上, 阵风系数作为最大阵风和平均风速之间的转换系数, 可以直观地表现湍流运动的强弱, 在足够大时间尺度上的平均阵风系数可以作为脉动风特性的气候学

测量^[29]。

1.1.2 阵风系数对各种因素的敏感性

F 是由观测周期内的最大阵风观测和平均风速观测同时决定的, 因此风的测量对于 F 的建立至关重要, 但是迄今为止国内外对平均风速和最大阵风的定义和测量标准不一^[27, 30-31]。世界气象组织(WMO)关于两者定义的建议在气象行业、风电工程和国家建筑设计规范等中得到了广泛应用^[32-34], 但是并未被普遍采纳^[35-36]。由于确定 F 的时距标准不同, 导致 F 差异性较大: 最大阵风采样的时间越短, F 越大, 平均风速的采样平均时间越长, F 越大^[37-39], 从而导致 F 应用的评估难度增加^[40]。因此, 不少研究强调使用高分辨率的分钟数据确定 F 的必要性^[14, 41]。

F 对各种气象因素十分敏感。首先是风速, F 随风速的增加而降低的特性在许多研究中都有体现^[42-45], 并且平均风速较小时, F 的波动幅度通常较大^[1, 46], 随着风速增加, F 的波动范围减小, 当风速增大到一定阈值后, F 将基本保持为一个常数^[7, 25, 29, 33]。部分研究确定6级风力(10.8~13.8 m/s)是风速的临界值^[47-49], 但是Wang等^[39]发现当地表粗糙度和地形复杂度增加, 风速阈值将随之增大到14 m/s以上, 与Mitsuta等^[50]以及Nielsen等^[1]的研究结论相吻合。其次, 气流的来流方向是影响风脉动特性的重要因素^[51], 因此风向会对 F 产生重要影响^[36, 39, 52], 尤其是对于沿海和山脉附近等地表粗糙度不均一的地形。在沿海地区, 向岸风的 F 要明显小于离岸风的 F ^[11, 53-54]; 在山脉附近, 下坡方向的 F 明显偏大^[9, 44, 55]。再次, 由于阵风的主要物理成因与动量的垂直湍流输送有关, 因此边界层大气稳定度和 F 也密切相关^[56]。不少研究揭示了两者之间存在明显的负相关性^[15, 57-58], 但是, Harris等^[27]发现当稳定度由中性向稳定状态转变时, F 不减反增, 这可能与稳定度的分类方法有关。最后, 不同天气类型下的 F 也存在很大差异。大多数研究认为热带气旋型的 F 大于季风型的 F ^[28, 59-61], 但也有少数研究发现两者之间的差异并不显著^[38, 62]。针对这两种矛盾性的结论, Miller^[63]研究指出, 在大风(平均风速>10 m/s)条件下, F 与天气系统无关。相比热带气旋和季风, 对流阵风具有更小尺度和更强湍流^[32], 因此, 对流型的 F 通常大于其他天气类型^[64-66]。

F 还与测站的地形以及下垫面特性有关^[67]。位于海上、近海、内陆等不同位置的 F 存在明显差异^[68-69], 一般海面小于1.5, 陆地大于2, 山区可大于3^[13, 70-72]。这是因为海岛及开阔高地的地表粗糙度显著小于具有复杂地形地貌的内陆^[73], 许多研究揭示了下垫面粗糙

度增加对 F 的显著增强作用^[1, 39, 41, 74]。

除了气象观测来源、气象和下垫面等环境因素, F 还存在一定的时空变化特征。通常 F 在白天较大,早晚较小,这可能与白天近地层太阳辐射增温、边界层稳定度降低以及大气湍流增强有关^[15, 46]。但是,Harris等^[27]和Kramer等^[75]研究得出了相反的结论,这主要与当地风速的日变化特性有关。不同的季节会有不同的天气系统产生并影响阵风^[73],因此, F 还存在明显的季节或月变化,但具有明显的地方特性^[48, 58, 75]。此外,董双林^[67]将 F 定义为海拔的对数函数来描述 F 的空间变化特性。在一般情况下, F 随高度的增加而减小^[56, 76],

可能与随高度增加地面粗糙元的影响逐步降低有关^[48],但是在复杂地形条件下并不符合这一规律^[7, 77]。

1.1.3 阵风系数的建立

建立充分反映当地阵风特性的本地化阵风系数,是建立阵风系数模型的最关键部分。理论上,不同时间分辨率的气象观测都可以建立相应的 F ,但不少研究强调了使用高分辨率分钟数据的必要性,并且认为基于风速和风向的气象分层阵风系数(MSGF)模型具有最佳预报性能^[27],但建立方法较为复杂。接下来以分钟数据为例,基于Kahl^[9]提出的方法,详细回顾气象分层阵风系数的建立过程(图1)。

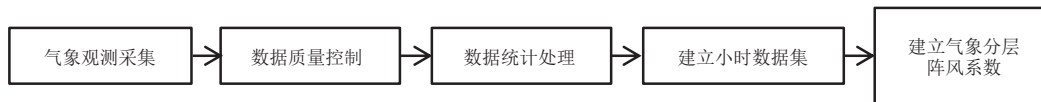


图1 气象分层阵风系数的建立流程

Fig. 1 The establishment process of meteorologically stratified gust factors

首先,根据选定位置的自动气象观测站采集平均风速、风向和阵风风速、风向的分钟数据,既要考虑观测数据的质量和完整度,也要确保时间尺度和数据量足够大。其次,对采集的原始观测数据进行质量控制,删除重复、混乱和无效数据,并剔除风速 <0 m/s、风向在 $0\sim 360^\circ$ 以外以及阵风风速 $<$ 平均风速的数据,保证观测数据集的精确性和可用性。最后,对质量控制后的分钟数据进行统计处理,分别将每小时内所有分钟风速和风向观测的平均值作为小时平均风速(W_{obs})和风向(X_{obs}),将每小时内所有分钟阵风观测的最大值及其对应的风向作为小时最大阵风风速(G_{obs})和风向(Y_{obs}),将 G_{obs} 和 W_{obs} 的比值作为小时 F ,从而整合建立包含平均风速、平均风向、最大阵风风速、最大阵风风向和阵风系数的小时数据集。在建立小时数据集的基础上,按不同的平均风速和风向对数据进行分层,然后对每个分层内的所有 F 进行算术平均,建立气象分层阵风系数,作为公式(1)的 F 项。

1.2 平均风速

理论上,任何类型的平均风预报产品都可以作为阵风系数模型中的 W_{fcst} 项。目前精细化的平均风预报

产品主要有两大类,一类是直接利用NWP模式输出的产品^[78-79],另一类是通过完全预报法(PP)或模式输出统计(MOS)等释用方法对NWP进行客观订正的产品^[80-81]。由于产品类型众多,预报准确度和精度存在差异,并且产品类型会影响模型的性能^[9],因此在实际应用时,需要先评估不同风指导产品与阵风系数的耦合在当地最大阵风预报中的适用性和可参考性,从而确定最佳平均风预报产品。

平均风预报产品的选取流程如图2所示。基于Harris等^[27]的方法,利用偏差(B)和绝对误差(A)两个检验指标进行评估,定义如下:

$$B = G_{\text{fcst}} - G_{\text{obs}}, \quad (2)$$

$$A = |G_{\text{fcst}} - G_{\text{obs}}|. \quad (3)$$

基于 F 和平均风预报产品得到小时阵风预测值,然后分别计算不同阵风系数模型的偏差和绝对误差,根据指标的数值大小比较模型间性能的差异,并利用符号检验比较所选模型的绝对误差分布,当在99%的置信水平下拒绝无差异假设时则认为两者的差异是显著的。当阵风系数模型之间的绝对误差分布显著不同时,则认为具有较小偏差和绝对误差的阵风系数模型性能最佳,可以为当地的最大阵风预报提供较好

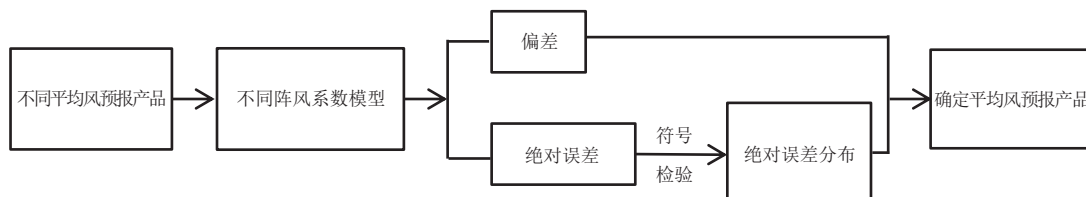


图2 平均风预报产品的选取流程

Fig. 2 The selection process of average wind forecast products

指导。

2 国内外对阵风系数模型的研究及应用进展

2.1 国内对阵风系数模型的研究及应用进展

利用阵风系数模型预测阵风的参数化方法在国内风工程、建筑设计和气象行业中有一定应用^[82-84]。目前多采用持续时距小于3 s的阵风和持续时距为10 min的平均风速定义 F ^[85]，并且常用经验平均 F 预报阵风，但是不少学者指出经验阵风系数模型存在很大的局限性^[70, 84, 86]。此外，近年对登陆热带气旋实测资料研究显示，现行建筑结构规范建议的参数值并不能完全适用于热带气旋影响的情况^[87-88]，并且由于地形地貌的差异，不同区域和国家登陆台风的阵风特性也可能存在差异，WMO关于热带气旋影响下的 F 推荐值不一定适用于中国地区^[33, 54]。

由于经验和推荐 F 的局限性，近年来国内学者重点关注了 F 在不同测风时距、风速风向、天气系统、大气稳定度以及湍流强度等条件下的特征，期望利用这些敏感性特征来建立不同分层的 F ，从而改进阵风系数模型在阵风预报方面的能力。宋丽莉等^[60]建立了适用于广东沿海地区台风和冷锋天气系统下的 F ，为我国南自广西、海南，北到辽宁的广大沿海地区的工程抗风设计和防灾减灾提供客观的借鉴依据；Wu等^[73]建立了香港不同地区夏季热带气旋和冬季季风下的 F ，替代常用于工程设计中的平均 F 来估算风荷载；周福等^[70]确定了浙江省不同天气系统下陆地和近海海面的平均 F ，提出在冷空气和热带气旋大风天气下风力预报要跨度2级，而对流大风下要适当再增大级别跨度；陈燕等^[48]确定了江苏沿海不同风向以及不同高度上各风速等级对应的 F ，为风能资源的开发和利用提供了安全保障。此外，少数研究利用 F 与各种因素之间的关系建立了 F 公式。董双林^[67]给出了 F 与稳定风速、平均时间、高度以及地表粗糙度的经验公式，并利用阵风系数模型确定了中国地面到300 m高空不同水平尺寸的设备工作的阵风极值，其结果已应用于国家军用标准的制定；周福等^[70]基于 F 与平均风速和海拔的相关性建立了冷空气和热带气旋大风天气的阵风系数预报模型，为风力数值产品释用和大风预报服务提供了重要参考。

需要注意的是，国内对气象分层阵风系数与平均风客观产品耦合的性能评估研究甚少。吕艺影等^[49]利用实测风检验发现，阵风系数模型的预报性能在3~5级效果最好，1~2级预报偏高，6级预报偏低；胡海川等^[84]将不同平均风速的阵风系数与ECMWF确定性模式中10 m风预报结合，同样发现模型在弱风下会高

估，强风下会低估，并将其解释为平均风预报产品的系统性误差。目前国内还没有阵风系数模型与阵风客观预报产品或其他模型方法的比较研究，并且缺乏利用风速和风向共同分层的MSGF模型在沿海或山区的适用性研究，可能由于特定地点气象分层阵风系数的建立是一个时间尺度和数据量都相当大的复杂过程，在一定程度上阻碍了MSGF模型的研究与应用^[11]。

2.2 国外对阵风系数模型的研究及应用进展

阵风系数模型的本质是利用本地化 F 对数值模式风产品进行释用，因此 F 的确定对模型的使用至关重要。众多国外学者对 F 进行了广泛且深入的研究。部分研究探讨了 F 对气象和环境因素的敏感性，包括测量特性^[89-91]、风速^[7, 62, 92]、天气系统^[64-65, 93]、边界层稳定度^[36, 56, 71]、地形^[44, 64, 68]以及时空因素^[15, 50, 75]等。还有部分研究尝试利用这些敏感性关系来建立 F 函数，期望改进阵风系数模型对最大阵风的预报能力。Sherlock^[29]首次尝试利用大量风速计对阵风空间结构进行试验研究，并确定了 F 的概念；Durst^[94]最早开发了“Durst曲线”来显示不同平均时距的阵风与小时风速之间的关系，这也是最有影响力的统计模型，被广泛应用于开阔地形上的阵风估计；也有学者尝试利用 F 将阵风与不同时间尺度上的平均风速联系起来^[95-96]；Wieringa^[71]根据湍流强度、粗糙度长度和高度建立了 F 的简单表达式；Greenway^[97]基于冯·卡门谱和高斯风速分布，建立了 F 的概率分布函数，但是公式比较复杂，Wood^[98]在此基础上对其进行了经验简化；还有研究将 F 描述为时距和风湍流强度的函数，并根据特定大气条件和平均时距采用不同的经验值来确定 F ^[28, 99]。

阵风系数模型与其他物理模型方法之间的比较研究虽然不多，但都证明了其预报性能相当^[35, 100]。Cook等^[26]研究发现相比预报员常用的差分法，阵风系数模型在阵风预测方面的能力更强，误差只有1.4 m/s，并且在具有相似气候特征的更广泛区域内， F 同样可以从持续风速中高精度地预测阵风速度，与Mitsuta等^[50]以及Paulsen等^[59]的研究结论一致。 F 对不同平均风模型和产品的释用也得到了系列研究。Cao等^[44]将恒定平均 F 应用于高性能的风预测组合模型(PX-ACM2)来预测下坡风暴，发现无论是对于单个台站，还是整个中尺度气象监测网，阵风系数模型在阵风预报方面几乎都是无偏的；丹麦气象研究所^[1]将当地适用的高分辨率区域有限模型(DMI-HIRLAM-E)与 F 进行耦合，很好地揭示了其在统计学和个例预报方面的潜力，同时证明了其在涉及温度、湿度和风速等具有较大水平梯度的地面锋情况下的适用性。

由于阵风影响因素的复杂性和多样性,以及基于观测和物理假设等各种统计学和物理学预报方法本身无法避免的一些不确定性,阵风预报必然存在不确定性^[101]。因此,Thorarinsdottir等^[102]探索了阵风系数模型在概率阵风预报中的可能性,将非齐次高斯回归(NGR)方法与 F 相结合,从风速集合预报中获得阵风的概率预报,检验发现NGR方法在性能上有了实质性改进,相比原始集合和气候参考预测,平均绝对误差分别减少了31%和17%,但是在较大的阵风概率下会高估阵风出现的概率,并且高阵风速下的预报不确定性更大。此外,阵风系数模型在平稳风和非平稳风过程中的适用性都得到了验证^[44, 89],但在强对流大风预报方面存在一定的局限性^[1, 44]。

上述对阵风系数模型性能的评估都是基于平均 F ,并没有考虑 F 对气象因素的敏感性。Harris等^[27]强调充分利用 F 对气象和环境因素的敏感性建立分层阵风系数模型来改进阵风预报的必要性。研究结果表明,相比平均阵风系数模型,基于风速、风向、大气稳定度以及不同时间尺度分别建立的分层阵风系数模型性能得到明显提升,并且基于风速和风向共同分层的阵风系数模型在预报最大阵风时性能最优,偏差仅为0.05 m/s。但是,Harris等^[27]对模型的性能评估是在假设风预报完全准确的情况下,在实际预报中,平均风预报引起的误差是不可忽略的,而且可能比 F 带来的误差大得多^[10]。因此,Kahl^[9]基于气象分层阵风系数与MOS常用风产品建立不同站点的MSGF模型,性能评估结果表明, F 与两个MOS产品的耦合都体现出高超的技巧,预报绝对误差在1.49~1.90 m/s,预报最长时效可达72 h,但是模型性能会受到MOS类型影响,与GFS MOS产品耦合的性能要强于与NAM MOS产品的耦合,并且站点特性和风特性也可能会限制模型的性能。

由于在任何已确定 F 的地点可以直接预报阵风,或者作为其他阵风预测方法的补充^[9],因此,阵风系数模型对阵风预报具有重要的指示意义,在风阻计算、输电线路设计、结构工程和天气预报等许多领域都有实际应用^[50, 75, 103-104],但几乎都没有考虑 F 对变化的气象环境的敏感性。因此,近年来不少学者利用 F 对气象和环境等因素的敏感性来改进阵风系数模型预报阵风的能力。Cvitan^[42]建立适用于当地不同风强的分层阵风系数模型,取代了欧洲输电线路设计标准建议的固定 F 值,为电力传输设备的建造提供了技术指导;WMO针对热带气旋特有的结构和湍流特性,制定了不同下垫面(包括海上、陆地、离岸和离海)各种

时距风速的转换系数,为热带气旋大风的影响预报提供了一定的指导^[13];Kramer等^[75]分析确定了适用于陆地、海上和沿海站点的 F ,为预报员的实际阵风预报业务提供了指导。

虽然 F 在阵风预报方面的能力得到了广泛肯定,但 F 的变化范围很大,甚至在同一个预报机构内也存在很大差异。因此,Blaes等^[69]研究确定了网格预报编辑(GFE)方法,使预报员可以有效地将边界层稳定性、摩擦和暴露程度等影响整合到预报过程中。为了进一步方便预报员对阵风系数模型的使用,Kahl^[9]开发了阵风网图(图3),预报员既可以从图上直观地把握当地阵风的气候态势,又可以通过简单计算快速得到最大阵风预报。比如,根据平均风产品得到NE方向的平均风速是12 kt(1 kt \approx 1.852 km/h),从阵风网图上找到该平均风速和风向对应的 F 为1.60,因此NE方向的最大阵风可以通过12乘以1.60快速得到,即19.20 kt。在此工作基础上,Kahl等^[11]建立了美国178个站点的气象分层阵风系数和相应的阵风网图。一些

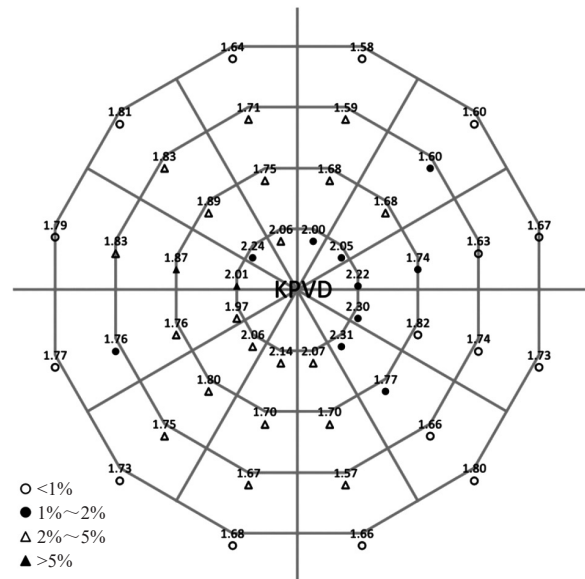


图3 阵风网图显示了KPVD (Providence, Rhode Island) 基于2010—2017年60467个小时风速、风向和最大阵风的气象分层阵风系数(同心环表示平均风速范围:0~5 kt(中心)、5~10 kt、10~15 kt和>15 kt(最外层);径向线代表30°风扇区的边界,根据气象惯例从北顺时针方向;符号代表平均风速和风向组合的出现频率)^[9]

Fig. 3 Gust web showing meteorologically stratified gust factors at KPVD (Providence, Rhode Island) based on 60467 hourly wind speeds, wind directions, and peak gusts during 2010—2017 (the concentric rings representing mean wind speed ranges: 0–5 kt(center), 5–10 kt, 10–15 kt, and >15 kt (outermost); the radial lines: the boundaries of 30° wind sectors, clockwise from north; the symbols: the occurrence frequencies of mean wind speed and direction combinations)^[9]

特殊站点的预报实例证明基于风速和风向共同分层的阵风系数模型非常适用于预测具有高度方向依赖性的沿海和山区的最大阵风。

3 总结与讨论

阵风系数模型是一种利用阵风系数从平均风速预测中得到最大阵风预测的统计学方法，其本质是利用本地化阵风系数对数值模式产品进行释用，将模式中的长持续时间平均风速转换为短持续时间阵风风速。相比复杂的物理学方法，阵风系数模型是一种更有效的方法，在任何已确定阵风系数的位置都可以直接使用，或作为其他阵风预测方法的补充，对实际阵风预报业务具有很好的指导意义。

作为阵风系数模型的最关键部分，阵风系数对气象、环境等因素的敏感性以及如何建立本地化阵风系数得到了广泛关注。在阵风系数的敏感性研究方面，国内外众多学者详细分析了阵风系数在风速、风向、天气系统、边界层稳定度、地形以及测风时距等多种因素下的变化特征，并利用这些敏感性关系建立阵风系数函数。在阵风系数的建立方面，由于观测系统的测量特性（如测风时距和记录标准）对阵风系数的影响不可忽视，可能会带来严重的误差。Harris等^[27]认为利用高分辨率的分钟观测数据建立的阵风系数能更好地反映当地的阵风特性，但目前大多数研究仍基于10 min或小时观测，可能由于观测系统水平有限以及基于高分辨率数据建立阵风系数方法的复杂性。

目前阵风系数模型在很多方面都取得了有意义的研究成果，包括模型的评估、改进和应用等。关于阵风系数模型的预报性能评估，许多基于不同平均风产品和阵风系数耦合建立的阵风系数模型都显示出较高技巧，但吕艺影等^[49]和胡海川等^[84]发现模型在弱风下会高估，强风下会低估，并且有研究认为模型在强对流大风预报方面存在一定的局限性^[1, 44]。另外需要指出的是，作为统计学方法之一的阵风系数模型与其他物理学方法或阵风客观预报产品的比较研究相对不足。近年来，阵风系数模型在风工程、建筑设计和天气预报等许多领域都有实际应用，但仔细分析发现，之前常参考的平均阵风系数或经验阵风系数存在很大局限性，由此建立的阵风系数模型性能受到很大影响，因此不少学者在模型的改进方面进行了大量尝试。根据阵风系数模型公式不难发现，模型预报能力同时受到阵风系数和平均风预报两方面的影响。因此，一部分研究着眼于阵风系数，利用特定地点的实测风资料和阵风系数对各种因素的敏感性建立本地化气象分层阵风系数，由此建立的MSGF模型可以明显

提高阵风预报水平。Kahl等^[11]发现基于风速和风向共同分层的MSGF模型的预报性能最佳，非常适用于具有高度方向依赖性的沿海和山区的最大阵风预测，但其性能可能会受到站点特性或当地风特性的限制，不过该结论目前并未在其他沿海或山区得到进一步检验和拓展。另一部分研究从平均风入手，发现产品类型会显著影响阵风系数模型的预报性能，因此可以通过减小平均风产品的预报误差来有效改进阵风系数模型，然而目前关于特定地点的阵风系数与不同平均风客观产品耦合的比较研究还比较缺乏。

综上所述，未来可尝试从以下几个方面进一步开展阵风系数模型的相关研究。

1) 在气象观测系统允许的条件下，尽量使用大量稳定的高分辨率资料，进行严谨的质量控制和统计处理后建立可以充分反映当地阵风特性的阵风系数。

2) 加强开展阵风系数模型与其他阵风客观预报产品或模型方法的比较研究，进一步确定其对阵风预报的可参考性，并加强评估特定地点不同类型风产品与阵风系数的耦合差异，减少平均风预报误差对阵风系数模型预报性能的影响，为实际阵风预报业务确定最佳阵风系数模型。

3) 拓展国内沿海地区基于风速和风向分层的MSGF模型的适用性研究将是未来的研究重点。分别建立单个沿海站点基于风向和风速分层的MSGF模型，并生成阵风网图进行业务化应用。在此基础上，填充生成包含这些站点的沿海区域阵风系数网格产品，然后与风速网格产品耦合，最终生成阵风网格产品，为近海阵风预报提供可靠参考。对于一些MSGF模型性能可能受到限制的特殊站点，可以考虑对气象因素进行更细分层来改进模型的预报性能。

4) 在国内沿海地区的适用性研究基础上，探讨MSGF模型在产生阵风的特定天气系统下（如气旋、冷空气和雷暴等）的适用性将是模型未来的改进方向。先将阵风系数按天气系统分层，分别建立不同天气系统下基于风向和风速分层的阵风系数，然后与平均风客观产品耦合，检验模型在不同天气系统下的阵风预报能力，并确定不同天气系统下的最佳MSGF模型。

5) 相比确定性预报，概率预报在很多情况下的实际参考意义更大，不同用户可以根据自身对气象条件的依赖程度做出不同的决策。未来可以进一步探索非齐次高斯回归方法与阵风系数模型的耦合在概率阵风预报中的可能性。

参考文献

[1] Nielsen N W, Petersen C. Calculation of wind gusts in DMI-

- HIRLAM[R]. Copenhagen: Danish Meteorological Institute, 2001.
- [2] Letson F, Pryor S C, Barthelmie R J, et al. Observed gust wind speeds in the coterminous United States, and their relationship to local and regional drivers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 173: 199-209.
 - [3] Sinden G. Characteristics of the UK wind resource: long-term patterns and relationship to electricity demand[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 112-127.
 - [4] Changnon S A. Temporal and spatial distributions of wind storm damages in the United States[J]. *Climatic Change*, 2009, 94(3-4): 473-482.
 - [5] Adame J A, Lope L, Hidalgo P J, et al. Study of the exceptional meteorological conditions, trace gases and particulate matter measured during the 2017 forest fire in Doñana Natural Park, Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 710-720.
 - [6] Teoh Y E, Alipour A, Cancelli A. Probabilistic performance assessment of power distribution infrastructure under wind events[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109199.
 - [7] Suomi I, Vihma T. Wind gust measurement techniques—from traditional anemometry to new possibilities[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1300.
 - [8] Sheridan P. Current gust forecasting techniques, developments and challenges[J]. *Advances in Science and Research*, 2018, 15: 159-172.
 - [9] Kahl J D W. Forecasting peak wind gusts using meteorologically stratified gust factors and MOS guidance[J]. *Weather and Forecasting*, 2020, 35(3): 1129-1143.
 - [10] Fovell R G, Cao Y. Wind and gust forecasting in complex terrain[C]//15th WRF Users' Workshop. Boulder, CO: NCAR, 2014.
 - [11] Kahl J D W, Selbig B R, Harris A R. Meteorologically stratified gust factors for forecasting peak wind gusts across the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(9): E1665-E1671.
 - [12] Powell M D, Houston S H, Reinhold T A. Hurricane Andrew's landfall in South Florida. Part I: standardizing measurements for documentation of surface wind fields[J]. *Weather and Forecasting*, 1996, 11(3): 304-328.
 - [13] Harper B A, Kepert J D, Ginger J D. Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions[R]. Geneva: WMO, 2010.
 - [14] Masters F J, Vickery P J, Bacon P, et al. Toward objective, standardized intensity estimates from surface wind speed observations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(12): 1665-1682.
 - [15] Elemo E O, Ogobor E A, Alagbe G A, et al. Statistical analysis of the average wind speeds and maximum wind speed (gust winds) at a location in Abuja, Nigeria[J]. *Open Access Library Journal*, 2021, 8(12): e7935.
 - [16] Sheridan P. Review of techniques and research for gust forecasting and parameterisation[R]. Devon: Met Office, 2011.
 - [17] 毛绍荣, 林镇国, 梁健, 等. 广东沿海强东北季风的概率预报方法[J]. *热带气象学报*, 2003, 19(1): 94-100.
 - [18] Rudack D E. GFS-based MOS wind gust guidance for the United States, Puerto Rico, and the U.S. Virgin Islands[R]. Silver Spring: NOAA, 2006.
 - [19] Hofherr T, Kunz M. Extreme wind climatology of winter storms in Germany[J]. *Climate Research*, 2010, 41: 105-123.
 - [20] Schicker I, Papazek P, Kann A, et al. Short-range wind speed predictions for complex terrain using an interval-artificial neural network[J]. *Energy Procedia*, 2017, 125: 199-206.
 - [21] 刘还珠, 赵声蓉, 陆志善, 等. 国家气象中心气象要素的客观预报——MOS系统[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(2): 181-191.
 - [22] Chaudhuri S, Middey A. Adaptive neuro-fuzzy inference system to forecast peak gust speed during thunderstorms[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2011, 114(3-4): 139-149.
 - [23] Mercer A, Dyer J. A new scheme for daily peak wind gust prediction using machine learning[J]. *Procedia Computer Science*, 2014, 36: 593-598.
 - [24] Welker C, Martius O, Stucki P, et al. Modelling economic losses of historic and present-day high-impact winter windstorms in Switzerland[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2016, 68(1): 29546.
 - [25] 顾明, 匡军, 全涌, 等. 上海环球金融中心大楼顶部风速实测数据分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(12): 114-118, 122.
 - [26] Cook K R, Gruenbacher B. Assessment of methodologies to forecast wind gust speed[R]. Wichita, Kansas: National Weather Service, 2008.
 - [27] Harris A R, Kahl J D W. Gust factors: meteorologically stratified climatology, data artifacts, and utility in forecasting peak gusts[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(12): 3151-3166.
 - [28] Shu Z R, Li Q S, He Y C, et al. Gust factors for tropical cyclone, monsoon and thunderstorm winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 142: 1-14.
 - [29] Sherlock R H. Variation of wind velocity and gusts with height[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1953, 118(1): 463-488.
 - [30] Deese J H, Whisenant C C. The problem of low level wind distribution[R]. Tampa: NASA, 1964.
 - [31] Beljaars A C M. The measurement of gustiness at routine wind stations—a review[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 1987.
 - [32] Cramer H E. Use of power spectra and scales of turbulence in estimating wind loads[M]//Biggs J M, Vincent G S, Blackadar A K, et al. *Topics in Engineering Meteorology*. Boston: American Meteorological Society, 1960: 12-18.
 - [33] 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[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(11): 1449-1459.
 - [34] 胡波. 浙江沿海台风阵风系数的影响因子分析[J]. *热带气象学报*, 2017, 33(6): 841-849.
 - [35] Bresseur O, Gallée H, Boyen H, et al. Reply[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(7): 1936-1942.
 - [36] Ágústsson H, Ólafsson H. Mean gust factors in complex terrain[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2004, 13(2): 149-155.
 - [37] Mitsuta Y. Gust factor and analysis time of gust[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1962, 40(4): 242-244.
 - [38] Sparks P R, Huang Z. Gust factors and surface-to-gradient wind-speed ratios in tropical cyclones[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(11-12): 1047-1058.
 - [39] Wang B L, Hu F, Cheng X L. Wind gust and turbulence statistics of typhoons in South China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 25(1): 113-127.
 - [40] Friederichs P, Göber M, Bentzien S, et al. A probabilistic analysis of wind gusts using extreme value statistics[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009, 18(6): 615-629.
 - [41] Powell M, Bowman D, Gilhousen D, et al. Tropical cyclone winds at landfall: the ASOS-C-MAN wind exposure documentation project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(6): 845-852.
 - [42] Cvitan L. Determining wind gusts using mean hourly wind speed[J]. *Geofizika*, 2003, 20: 63-74.
 - [43] 许向春, 辛吉武, 梁国锋, 等. 琼州海峡海面风场特征的观测分析[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(1): 118-124.
 - [44] Cao Y, Fovell R G. Downslope windstorms of San Diego county. Part II: physics ensemble analyses and gust forecasting[J]. *Weather and Forecasting*, 2018, 33(2): 539-559.
 - [45] 陈伏彬, 翁兰溪, 肖雁, 等. 近海山地台风风场特性实测研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(8): 33-41.
 - [46] 胡波. 阵风因子与大气边界层要素的关系及预报试验[J]. *气象科技*, 2019, 47(2): 282-288.
 - [47] 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[J]. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 595-605.
 - [48] 陈燕, 张宇. 江苏沿海近地层风阵性及台风对其影响[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 177-190.
 - [49] 吕艺影, 牛海林, 郝团, 等. 基于ERA5再分析资料的余姚地区阵风预报模型探究[J]. *气象科学*, 2021, 41(4): 551-560.
 - [50] Mitsuta Y, Tsukamoto O. Studies on spatial structure of wind

- gust[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(11): 1155-1160.
- [51] 赵小平, 朱晶晶, 樊晶, 等. 强台风海鸱登陆期间近地层风特性分析[J]. *气象*, 2016, 42(4): 415-423.
- [52] 魏晓琳, 王德立, 贺佳佳, 等. 深圳沿海地区阵风系数的特征[J]. *广东气象*, 2016, 38(5): 33-36, 41.
- [53] Suomi I, Vihma T, Gryning S E, et al. Wind-gust parametrizations at heights relevant for wind energy: a study based on mast observations[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(674): 1298-1310.
- [54] 林雯, 方平治, 雷小途, 等. 台风条件下不同时段最大平均风速之间的转换系数研究[J]. *热带气象学报*, 2016, 32(1): 42-50.
- [55] Glidden D E. Gust factors and characteristics of upslope vs downslope winds at the Alpine Visitors Center, Rocky Mountain National Park[EB/OL]. [2023-05-03]. <http://www.npshistory.com/publications/romo/wind-research/alpine-vc-gust-factors-2020.pdf>.
- [56] Bardal L M, Sætran L R. Wind gust factors in a coastal wind climate[J]. *Energy Procedia*, 2016, 94: 417-424.
- [57] Monahan H H, Armendariz M. Gust factor variations with height and atmospheric stability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(24): 5807-5818.
- [58] 胡波, 俞燎霓, 滕代高. 高斯过程回归方法在浙江沿海海岛冬春季阵风预报中的应用试验[J]. *热带气象学报*, 2019, 35(6): 767-779.
- [59] Paulsen B M, Schroeder J L. An examination of tropical and extratropical gust factors and the associated wind speed histograms[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(2): 270-280.
- [60] 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[J]. *热带气象学报*, 2004, 20(6): 731-736.
- [61] Yu B, Gan Chowdhury A. Gust factors and turbulence intensities for the tropical cyclone environment[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 534-552.
- [62] Vickery P J, Skerlj P F. Hurricane gust factors revisited[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(5): 825-832.
- [63] Miller C. Gust factors in hurricane and non-hurricane conditions[C]//27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Monterey: American Meteorological Society, 2006.
- [64] Choi E C C, Hidayat F A. Gust factors for thunderstorm and non-thunderstorm winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12-15): 1683-1696.
- [65] Chay M T, Wilson R, Albermani F. Gust occurrence in simulated non-stationary winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10-11): 2161-2172.
- [66] Lombardo F T, Smith D A, Schroeder J L, et al. Thunderstorm characteristics of importance to wind engineering[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 125: 121-132.
- [67] 董双林. 中国的阵风极值及其统计研究[J]. *气象学报*, 2001, 59(3): 327-333.
- [68] Holmes J D. *Wind Loading of Structures*[M]. London: CRC Press, 2001.
- [69] Blaes J L, Glenn D A, Hawkins D R, et al. Developing a dataset of wind gust factors to improve forecasts of wind gusts in tropical cyclones[C]//39th National Weather Association Annual Meeting. Salt Lake City: National Weather Association, 2014.
- [70] 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[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 119-128.
- [71] Wieringa J. Gust factors over open water and built-up country[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1973, 3(4): 424-441.
- [72] Naess A, Clausen P H, Sandvik R. Gust factors for locations downstream of steep mountain ridges[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 87(2-3): 131-146.
- [73] Wu M C, Mok H Y, Cheng C Y. Regional and seasonal variations of the characteristics of gust factor in Hong Kong and the observed long term trend[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 1768-1775.
- [74] 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[J]. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(2): 451-465.
- [75] Kramer R, Alsheimer F. Wind gust climatology for southern South Carolina and coastal north Georgia[R]. Silver Spring: NOAA, 2013.
- [76] 赵德山, 王立治, 洪钟祥. 冷锋过境时的边界层阵风结构分析[J]. *大气科学*, 1982, 6(3): 324-332.
- [77] 张容焱, 张秀芝, 杨校生, 等. 台风莫拉克(0908)影响期间近地层风特性[J]. *应用气象学报*, 2012, 23(2): 184-194.
- [78] Roebber P J, Gehring M G. Real-time prediction of the lake breeze on the western shore of Lake Michigan[J]. *Weather and Forecasting*, 2000, 15(3): 298-312.
- [79] 季晓阳, 吴辉璇, 杨学联. 海面风场数值预报的历史和现状[J]. *海洋预报*, 2005, 22(S1): 167-171.
- [80] Connor G J, Spark E, Dunsuir W T M. Statistical forecasting techniques to describe the surface winds in Sydney harbour[J]. *Australian Meteorological Magazine*, 2003, 52(2): 101-115.
- [81] 张铁军, 颜鹏程, 张正英, 等. 多种订正技术在风电场风速预报订正中的应用[J]. *干旱气象*, 2018, 36(5): 835-844.
- [82] 瞿伟康, 梁枢果, 项海帆, 等. 对我国建筑结构风荷载规范修改的几点建议[C]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集. 三亚: 中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会, 中国空气动力学会风工程与工业空气动力学专业委员会建筑与结构学组, 2003: 44-49.
- [83] 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[J]. *应用气象学报*, 2008, 19(1): 28-34.
- [84] 胡海川, 刘璐, 林建. 基于预报方程的我国近海阵风预报[J]. *气象*, 2022, 48(3): 334-344.
- [85] 中国气象局. *地面气象观测规范*[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [86] 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[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(1): 108-113.
- [87] 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[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(12): 1409-1419.
- [88] 潘晶晶, 赵林, 冀春晓, 等. 东南沿海登陆台风近地脉动特性分析[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(1): 85-90.
- [89] He J Y, Li Q S, Chan P W. Reduced gust factor for extreme tropical cyclone winds over ocean[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 208: 104445.
- [90] Kraye W R, Marshall R D. Gust factors applied to hurricane winds[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(5): 613-618.
- [91] Mohr S, Kunz M, Richter A, et al. Statistical characteristics of convective wind gusts in Germany[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17(6): 957-969.
- [92] Davis F K, Newstein H. The variation of gust factors with mean wind speed and with height[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1968, 7(3): 372-378.
- [93] Bradbury W M S, Deaves D M, Hunt J C R, et al. The importance of convective gusts[J]. *Meteorological Applications*, 1994, 1(4): 365-378.
- [94] Durst C S. Wind speeds over short periods of time[J]. *Meteorological Magazine*, 1960, 89: 181-187.
- [95] Weggel J R. Maximum daily wind gusts related to mean daily wind speed[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(4): 465-468.
- [96] Jungo P, Goyette S, Beniston M. Daily wind gust speed probabilities over Switzerland according to three types of synoptic circulation[J]. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(4): 485-499.
- [97] Greenway M E. An analytical approach to wind velocity gust factors[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1979, 5(1-2): 61-91.
- [98] Wood C J. A simplified calculation method for gust factors[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 12(3): 385-387.
- [99] Ishizaki H. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13(1-3): 55-66.
- [100] Goyette S, Brasseur O, Beniston M. Application of a new wind gust parameterization: multiscale case studies performed with the Canadian regional climate model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D13): 4374.

(下转 52 页)

止气象卫星发表的论文的参与国家和地区占比前三位分别为德国(24.7%)、法国(18.1%)和美国(16.0%)。基于中国极轨和静止气象卫星发表的论文,本国参与度都极高,分别为93.7%和94.2%,其次为美国(14.8%和10.6%)。基于日本静止气象卫星发表的论文的首要参与国家和地区为中国,占比为44.7%,其次为日本(26.3%)和美国(26.2%)。

4 小结

中国在卫星气象领域研究论文增长较快,论文基数大,但平均质量有待提升。从科研竞争力来看,美国以绝对优势占据第一的位置,英国、中国分列第二、第三位。科研生产力方面,中国的论文总量仅次于美国,位列第二。美国的高被引论文数量位居世界第一,中国与英国、法国数量接近,位居第四。学术影响力方面,中国的学科规范化的引文影响力和高被引论文百分比均位列第八,Q1区期刊论文百分比位列第六,相对于论文总量的排名较为靠后,应在继续保持大量产出的基础上,着重提升学术质量。

从卫星气象研究论文的热点关键词可以看出,各国家和地区主要关注的研究热点较为一致,但仍有各自的特点。除遥感、降水和卫星观测等共同关注的热点外,中国还关注了青藏高原、蒸散和MODIS等主题。其他国家和地区关注的磁层物理、云、空间碎片和葵花-8等主题并未出现在中国的前十位热点关键词中。围绕冰川、海平面上升、地下水、水治理等开展

的水圈卫星监测研究,以及围绕蒸散、归一化植被指数、浮游植物、森林砍伐、微生物量、CO₂、地球化学的碳循环等交叉领域成为卫星气象研究热点。各国家和地区对小卫星的关注度也日益增高,其中立方体卫星的研究占据了主导地位。

从研究论文来看,与美国和欧洲的业务气象卫星在全球的广泛使用相比,中国的业务气象卫星以本国使用为主。从使用各国家和地区卫星所发表论文数量和论文的参与国家和地区量来看,美国均为最多,欧洲位居第二。美国极轨和静止业务气象卫星的论文参与国分别为108个和78个,中国为25个和20个。从论文本国作者占比来看,美国约占50.0%以上,中国为90.0%以上。中国卫星数据在国际上的应用程度还有待提升,其中的原因还有待继续挖掘。

深入阅读

- 方宗义, 2014. 气象卫星发展历程和启示[J]. 气象科技进展, 4(6): 27-34.
- 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等, 2020. 世界各国静止气象卫星发展综述[J]. 气象科技进展, 10(1): 22-29, 41.
- 李俊, 方宗义, 2012. 卫星气象的发展——机遇与挑战[J]. 气象, 38(2): 129-146.
- 卢乃锰, 谷松岩, 2016. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报, 20(5): 832-841.
- 中国农业科学院农业信息研究所, 中国农业科学院科技管理局, 中国农业科学院战略研究中心, 2021. 2021中国农业科技论文与专利全球竞争力分析[J]. 农学学报, 11(12): 10-12.

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)
(编辑: 卢冰)

(上接28页)

- [101] 洛伦兹E N. 混沌的本质[M]. 刘式达, 刘式适, 严中伟, 译. 北京: 气象出版社, 1997.
- [102] Thorarinsdottir T L, Johnson M S. Probabilistic wind gust forecasting using Nonhomogeneous Gaussian Regression[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(3): 889-897.
- [103] Davenport A G. Gust loading factors[J]. Journal of the Structural

- Division, 1967, 93(3): 11-34.
- [104] Lombardo F T, Main J A, Simiu E. Automated extraction and classification of thunderstorm and non-thunderstorm wind data for extreme-value analysis[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(3-4): 120-131.

(编辑: 郑秋红)