

风廓线雷达组网观测新型应用研究进展

郭建平¹ 刘博铭² 郭晓冉¹ 张颖³

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430019; 3 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 风廓线雷达具有高的时间和空间分辨率, 已经被广泛应用于大气探测、环境气象以及灾害性雷暴天气监测预警等领域。但风廓线雷达组网二次开发产品缺乏, 一定程度限制了其在天气气候领域的深度应用。简要介绍中国风廓线雷达网站点分布及其水平风廓线和谱宽等数据产品; 阐述基于风廓线雷达观测产生的高时间分辨率边界层高度、垂直风切变、湍流强度和散度等新产品特点, 并给出了相应的应用场景或案例。最后, 展望了风廓线雷达组网观测的不足及其未来应用前景。

关键词: 风廓线雷达, 边界层高度, 风切变, 湍流, 中国风廓线雷达网

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.02.002

0 引言

大气风廓线观测资料对于更好地理解频繁的极端降水事件、加剧的晴空湍流、复杂的气溶胶-云-降水相互作用和大气污染事件成因等至关重要^[1-5]。同时, 对于近地表边界层内风场, 由于地球自转和地表摩擦力, 边界层内湍流主导整个边界层内的物质和能量交换^[6-7]。此外, 在大尺度动力强迫和地面过程的影响下, 风速和风向会发生巨大变化, 这对模型准确地模拟或预报风的变化提出了很大的挑战^[8-9]。因此, 发展全天候的大气风场立体探测技术, 对我国天气数值预报研究, 灾害性天气和大气污染监测、防治与预警预报工作等具有重要的科学意义和应用价值。

现有的大气风场探测手段主要包括: 卫星和地基遥感监测^[10-11]。卫星遥感方式可以获取大尺度的全球大气风场变化, 如欧空局的Aeolus卫星等^[12]; 而地面监测, 如风廓线雷达和探空气球等, 则可以得到该站点高精度的大气风廓线^[13-14]。但随着研究的深入, 在提高全球数值天气预报模型精度以及满足大气污染防治工作需求的大背景下, 亟需获取高精度、高时空分辨率的区域大气风场信息^[15-16]。而卫星风廓线产品的时间分辨率较粗, 单站点地面监测的空间覆盖不大, 均无法满足这一需求。因此, 发展具有高精度和高时空分辨率的区域组网大气风场观测手段, 是当前大气遥感科学发展的重要方向。

另外, 对流层低层的垂直风切变(反映大气垂直混合的指标之一)对空气污染和对流触发影响显著, 然而由于缺乏时间连续的观测, 过去的相关研究一般

均基于再分析数据和模型模拟分析^[17-18]。近年来, 针对大气污染进行的垂直风切变观测研究逐渐增加, 其中大部分是基于多普勒激光雷达^[19-20]。然而多普勒激光雷达在极度清洁或多雾多云等大气条件下提供高分辨率的垂直风场观测的能力有限。风廓线雷达(Radar Wind Profiler, RWP)探测技术利用大气湍流多普勒效应, 理论上可提供秒级分辨率的垂直风廓线、后向散射强度和回波信号频散(谱宽)等观测, 且兼具晴空和云雨天(通过提高信噪比的方式实现)的大气廓线和状态观测能力。自1970年代晴空测风的首次应用以来^[21], 通过逐步应用于大气廓线观测等领域, 证实了该技术应用于全天候条件下风廓线的强大观测能力^[22-23], 并在美国科罗拉多州成功应用于第一个区域性风廓线雷达试验性网络的组建^[24]。目前, 已发展成为较为成熟且应用最为广泛的地基遥感设备和技术之一。

为了更好地服务天气监测预警, 全球主要经济体和国家都已经建设了风廓线雷达观测网。我国于2008年开始发展新一代L波段(1290 MHz)地基风廓线雷达观测网, 截止2020年底, 该网络已布设风廓线雷达134部^[16]。风廓线雷达良好的时空连续观测能力为我们提供绝佳机会来量化风矢量廓线、垂直风切变以及湍流垂直结构, 通过资料同化手段, 推动其在天气和大气污染等的广泛应用^[4,15]。早在20世纪90年代, 美国国家海洋大气管理局率先开始部署了风廓线雷达网(NPN), 运行频率为404 MHz^[25]。紧随其后, 欧洲科学和技术框架合作组织建立了欧洲风廓线雷达网络, 提供欧洲垂直风廓线的监测^[3]。此外, 日本气象厅于2011年建立了覆盖全日本的风廓线雷达网, 结果表明风资料对数值天气预报有显著的积极影响^[26]。2017年, 澳大利亚气象局完成了由19部风廓线雷达

收稿日期: 2021年3月26日; 修回日期: 2021年4月2日

第一作者: 郭建平(1978—), Email: jpnguo@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划(2017YFC1501401)

组成的澳大利亚风廓线雷达网络的安装工作，产生足够精确的风数据，并纳入全球数值天气预测模型^[27]。需要强调的是，美国NPN在2017年停止业务运行，可能由以下两个原因所致：1) 经过20余年的连续业务运行，风廓线雷达设备性能指标下降；2) 民用航空可提供高时空密度的温度、气压和水平风等气象廓线观测资料，且基本实现了与气象部门的无缝共享 (https://madis.ncep.noaa.gov/madis_npn.shtml, 访问时间：2021年3月25日)。

上述风廓线雷达观测数据在包括空气质量和天气预报等各领域得到了很好的应用，大大拓展了人们对灾害性天气的监测能力，展示了很好的应用前景^[28-31]。因此，充分利用地基风廓线雷达组网数据，实现高精度、高时空分辨率的区域大气风场获取，已成为国内外研究热点。本文将简要介绍我国风廓线雷达组网的发展和数据产品，同时对风廓线雷达组网数据的新型应用进行简单介绍。

1 我国风廓线雷达网络观测

1.1 站点布设

我国风廓线雷达网的建设始于2008年，当时一共布设了5部风廓线雷达。截至2020年底，风廓线雷达站点的数量持续增加到134个^[16]。我国风廓线雷达组网仪器信息如表1所示，主要包含四种类型的风廓线雷达：高对流层风廓线雷达、低对流层风廓线雷达、增强边界层风廓线雷达和边界层风廓线雷达，主要来自中国航天科工集团公司 (China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, CASIC)、中国电子科技集团公司 (China Electronics Technology Group Corporation, CETC) 和中国华云气象科技集团公司 (China Huayun Group, CHG) 等生产厂家。大部分站点的雷达是L波段边界层型，少数站点是在P波段工作的对流层型。风廓线雷达的运行模式包括高、中、低探测模式，可以探测不同高度的风场信息。高探测模式通常用于探测离地5~10 km高度的风场。中低探测模式用于探测距离地面0~5 km高度的风场。图1显示了我国风廓线雷达网站点空间分布，可发现一个非常有趣的现象：如京津冀地区、长三角、珠三角和

表 1 中国风廓线雷达组网仪器信息

雷达类型	探测范围/km	工作波段/ MHz	生产厂家
高对流层	12	440~450	CASIC/CHG
低对流层	8	440~450	CASIC
增强边界层	6	1270~1295 1300~1375	CASIC/CETC/CHG
边界层	3	1270~1295 1300~1375	CASIC/CETC/CHG

注：CASIC为中国航天科工集团公司；CETC为中国电子科技集团公司；CHG为中国华云气象科技集团公司

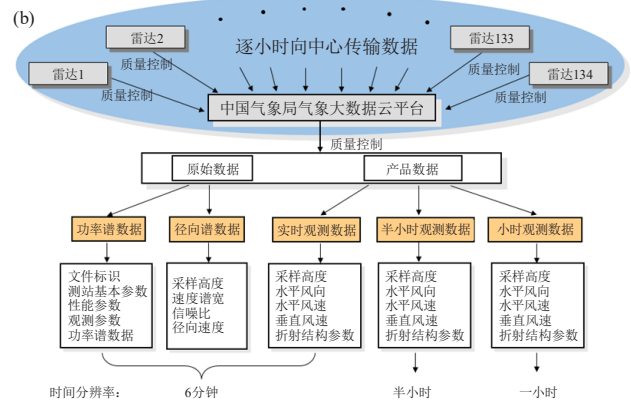


图1 中国L波段 (1290 MHz) 风廓线雷达组网的站点 (黄色圆点) 分布 (a), 以及中国气象局风廓线雷达网数据接收和产品处理框架 (b)

成都平原等经济发达地区的风廓线雷达站点往往更密集，而这些地区的气象业务监测和预报水平，以及专业气象服务能力也是比较强的，这可能与风廓线雷达区域组网和相关资料、产品的高质量应用高度相关。

1.2 数据产品

中国气象局国家气象信息中心负责收集和管理风廓线雷达组网的观测数据，其中从风廓线雷达站点到中国气象局气象大数据云平台的数据传输主要是通过互联网连接完成的 (图1)。为了有效地处理风廓线雷达的观测数据，由专门的数据中心负责数据接收和质量控制，并生产两种类型的数据：原始数据和产品数据。前者包括功率谱数据文件 (以FFT表示) 和径向数据文件 (以RAD表示)。功率谱数据文件由文件识别、台站基本参数、性能参数、观测参数和观测数据组成，它是根据需要实时动态生成的。径向数据文件分为两部分：一是参考信息，如台站基本参数、雷达性能参数、观测参数等；二是各采样高度下各波束的观测数据，包括采样高度、速度谱宽、信噪比和径

向速度。产品数据主要包括三种风廓线产品：1) 实时采样数据文件，时间分辨率为6 min，主要包括采样高度、水平风向、水平风速、垂直风速、水平可信度、垂直可信度、大气折射率结构参数等。每6 min生成一个单独的文件，并将其标记为ROBS。2) 半小时数据文件，时间分辨率是30 min，除每半小时生成48个文件外，与ROBS文件在数据内容和格式上基本一致，该文件被标记为HOBS。3) 小时数据文件，时间分辨率是1 h，每天24个文件，标记为OOBS。这些风廓线产品是由每个观测站点生成的，在大部分站点的垂直分辨率为120 m。然而，少数站点使用低层的探测模式，具有更高的垂直采样率，可以提供60 m的垂直分辨率数据产品^[16]。图2表示北京大兴站风廓线雷达在2018年6月10日观测到的水平风速、垂直风速和信噪比高度-时间剖面图。

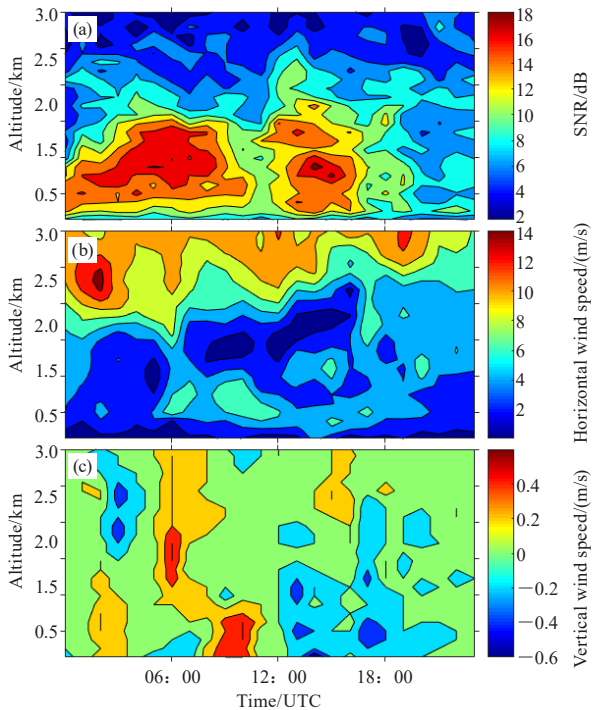


图2 2018年6月10日北京南郊观象台站风廓线雷达观测的信噪比(a)，水平风速(b)和垂直风速(c)高度-时间垂直剖面结果

2 风廓线雷达数据新型应用

2.1 区域风场探测

对于沿海和风廓线雷达站点布设密集的地区，以北京地区为例(图3)，一共布设了7部L波段对流层型风廓线雷达，上述站点同时还配备了毫米波云雷达，南郊观象台站点还配有L波段探空气球观测。通过区域组网联合观测，实现对区域大气风和云廓线，尤其是区域大气垂直运动、辐合辐散等参数进行高精

度和高时效观测。水平风廓线观测资料的累积，可以为区域风力资源和发电潜力提供重要数据支撑；而不同高度上的水平风随高度的变化反映了风切变信息，这些信息可为大气污染监测与预警、对流天气的触发提供重要前期信号。

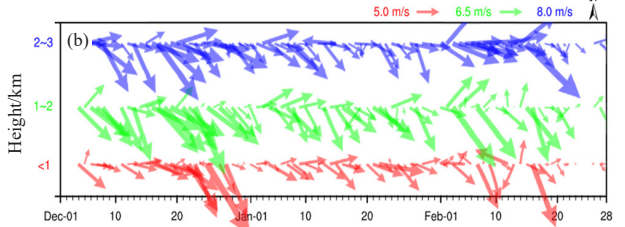


图3 (a) 北京地区风廓线雷达站点分布和 (b) 北京海淀区站2018年12月1日—2019年2月28日0~1 km (红色)，1~2 km (绿色)和2~3 km (蓝色)水平风矢量廓线时间序列

2.2 大气边界层高度

大气边界层高度一定程度上影响了大气环境容量，在对流边界层条件下，边界层高度与近地面非传输的气溶胶质量浓度之间存在显著的负相关，即边界层越高，气溶胶浓度越低，反之亦然。边界层与气溶胶之间存在复杂的反馈过程，湍流、边界层云、相对湿度、边界层热力稳定性和复杂的大气化学过程等均影响两者关系^[32-34]。传统的探空气球和星载激光雷达(如: CALIPSO)观测得到的边界层高度时间上缺乏连续性^[35-36]，激光雷达观测站网又缺乏足够的空间覆盖性。鉴于我国风廓线雷达观测网的高时空密度特点，亟需发展针对风廓线雷达的边界层高度估算算法，开发相应的边界层高度产品。

大气折射率结构常数和气象参数在边界层的顶部具有明显的特征。由于与夹卷过程有关的小规模浮力波动，大气折射率结构常数在边界层顶部处达到最大值^[11]。同时大气折射率结构常数与风廓线雷达的信噪比成正比^[16]。在这个理论基础上，可以通过风廓线雷达测得的上述相关大气参数来反演大气边界层高度。

目前各国学者针对风廓线雷达数据提出了一系

列的边界层高度反演算法^[30-31]。峰值法是最早的风廓线雷达边界层高度反演算法之一，该方法通过查找信噪比廓线上的最大值处来确定边界层高度^[37]。同时也有学者提出可以依靠查找大气折射率结构常数廓线的最大值来反演边界层高度^[31]。但是这类方法容易受到大气对流引起的嵌入结构的影响，产生剧烈振荡的结果^[38]。因此，相关学者提出模糊逻辑算法来克服多重最大值的影响，将峰值、梯度、多普勒频谱宽度和垂直速度变化等一系列参数结合使用，以消除边界层反演中杂波的影响^[39]。相关研究还表明：风廓线获取的垂直速度的标准偏差^[40]，风向的标准偏差^[41]和沿地面风向的水平动量分量的垂直通量^[42]等变量的局部最小值或最大值位于边界层的顶部，也可以用于反演边界层高度^[43]。此外，还有学者提出可以基于边界层内外地转风的差异，基于湍流模型来反演边界层高度^[44]。

近年来，小波变换和阈值方法已被用于风廓线雷达反演边界层高度^[45-47]。Compton等^[38]采用小波协方差变换来反演边界层高度。Singh等^[46]提出了基于固定阈值的方法（SNR=6 dB），从风雷达信噪比廓线中反演边界层高度。Liu等^[11]发展了改进阈值算法，提出基于归一化信噪比廓线反演边界层高度，极大提升了算法应用范围。这些方法加深了从风雷达反演边界层高度的认识。图4展示了基于改进阈值法反演得到的中国地区风廓线雷达网边界层高度初步产品。可以看到，相较于探空气球只能得到部分时刻的边界层高度结果^[14]，风廓线雷达组网可以更好地观测全天时的边界层高度演变。

2.3 垂直风切变与PM_{2.5}

众所周知，垂直风切变（vertical wind shear，

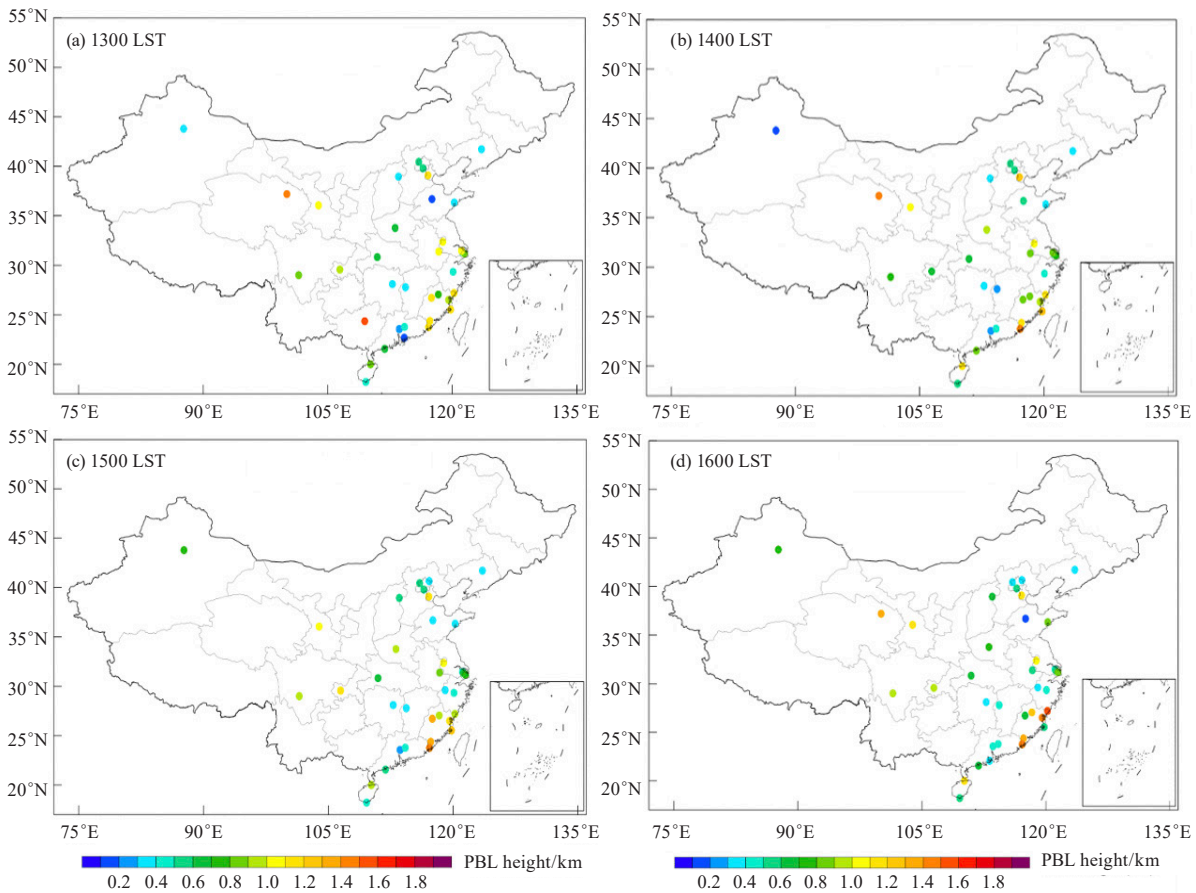


图4 基于全国风廓线雷达借助改进阈值法获取的2018年12月27日13—16时的小时分辨率边界层高度分布

VWS) 能够强烈影响边界层中气溶胶的垂直混合过程及其浓度变化。图5为污染和清洁条件下VWS的垂直分布。主对角线（右上角到左下角）表示每一层的局地VWS，而填色表示任意两个垂直高度间VWS值。注意，VWS分布不考虑切变方向。研究发现，

在污染条件下VWS的量级要比清洁条件下小得多，表明边界层中气溶胶浓度较高时垂直混合较弱，从而又导致了地表PM_{2.5}的进一步累积。普遍的，污染条件下的局地VWS为8.5 m·s⁻¹·km⁻¹，而清洁条件下的VWS高达11~12 m·s⁻¹·km⁻¹。图6为污染和清洁条件

下不同高度VWS与地表PM_{2.5}的相关分布，在两种情况下，它在边界层通常表现出明显的差异（相反的符号）。特别是在污染条件下，从地表到2.5 km的高度的相关系数基本为正（图6a），与图5中观测到的边界层的弱VWS有利于气溶胶的积累一致。而在清洁条件下，在几乎整个低层大气中，除了高度2.5 km以

上之外，VWS与地表PM_{2.5}之间普遍存在负相关（图6b）。VWS增加伴随的气溶胶垂直混合增强所导致的PM_{2.5}降低，则可以解释清洁条件下观测到的负相关。2.5 km以上高度的相关异常可能与气溶胶远距离传输相关^[48]，因为远距离跨界传输的高度通常高于2.5 km^[49-51]。

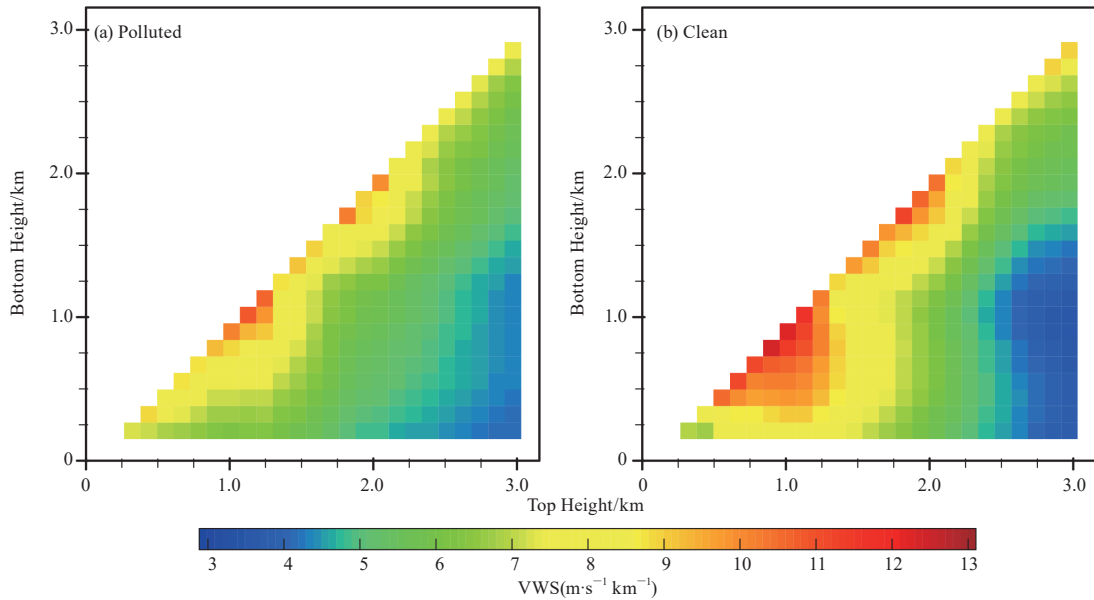


图5 不同高度日间平均（08—18时）垂直风切变（VWS）

(a) 污染条件；(b) 清洁条件

(基于北京2018年12月至2019年2月的风廓线雷达数据，X轴和Y轴分别代表VWS顶层与底层高度)

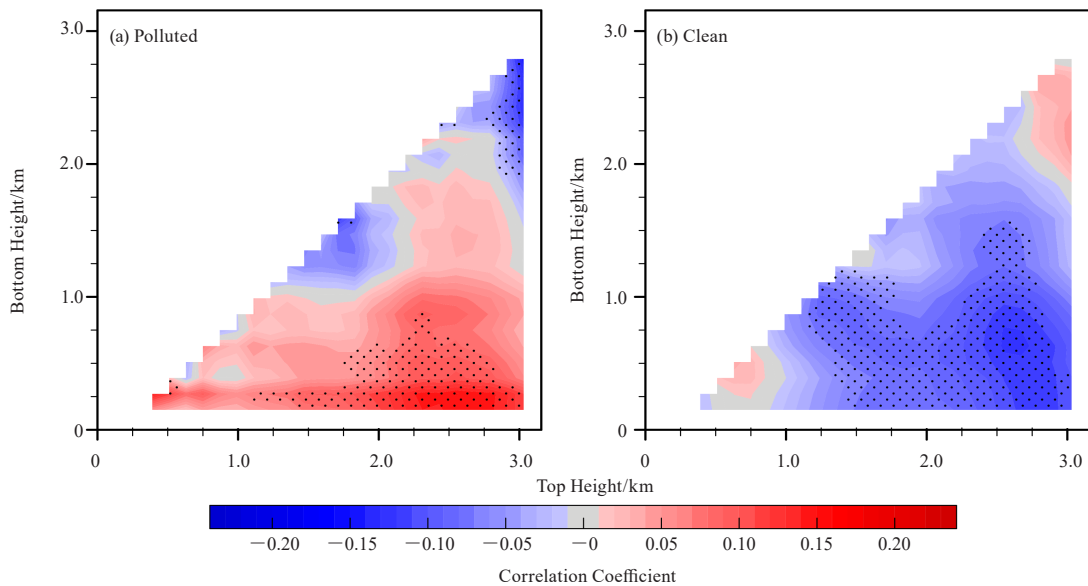


图6 不同高度间的VWS与标准化PM_{2.5}的相关系数分布 (a) 污染条件；(b) 清洁条件

(灰点表示统计显著性超过90%，X轴和Y轴分别代表VWS顶层与底层高度)

2.4 大气湍流探测

目前，北京地区区域尺度时空连续的边界层结构和湍流发展演变过程的观测十分缺乏，尤其人们是对湍流一边界层云相互作用机制仍不清楚。上述问题一

定程度上制约和影响北京地区天气预报模式边界层参数化方案的改进，对空气污染精细预报而言也是一个重大挑战，已成为大气边界层领域亟待解决的难点问题。同时，不同尺度环流可显著改变边界层结构，

单站的边界层观测已难以满足揭示复杂下垫面区域尺度边界层内湍流过程及其演变规律。涡流耗散率可以从能量的角度揭示边界层内不同尺度涡流演变规律，是湍流研究中的关键参数。高时空分辨率风廓线雷达组网可实时获取其多普勒谱宽数据，按照如下公式计算涡流耗散率 (ε)：

$$\varepsilon = \sigma_{\text{turb}}^3 (4\pi/A)^{3/2} J^{-3/2}, \quad (1)$$

其中， σ_{turb}^3 为多普勒谱宽 σ_{turb}^2 的3/2次方。在实际应用之前， σ_{turb}^2 需在直接观测值 σ_{obs}^2 的基础上进行校正：

$$\sigma_{\text{turb}}^2 = \sigma_{\text{obs}}^2 - \sigma_{\text{beam}}^2 - \sigma_{\text{shear}}^2 - \sigma_{\text{trans}}^2 - \sigma_{\text{residual}}^2, \quad (2)$$

其中， σ_{beam}^2 和 σ_{shear}^2 分别为光束展宽谱宽和剪切展宽谱宽，均可由多普勒雷达直接获取。 σ_{trans}^2 可由 $\sigma_{\text{trans}}^2 = 0.04 \times \sigma_{\text{obs}}^2$ 获得。 $\sigma_{\text{residual}}^2$ 可由高于边界层高度的剪切校正光谱宽度测量值估算。 A 是3-D Kolmogorov 常数，范围介于1.53~1.68。 J 可由以下公式给出：

$$J = 12\Gamma \cdot \frac{2}{3} \iint (\sin^3 \varphi)(b^2 \cos \varphi + a^2 \sin^2 \varphi + \frac{L^2}{12} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi)^{1/3} d\varphi d\phi, \quad (3)$$

在球面坐标下对 φ 和 ϕ 在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 进行积分。 Γ 是 Gamma 函数， L 是平均风速和停留时间的乘积。基于公式 (1) 和 (2)，可以得到该时刻的涡流耗散率，进而获得北京市区域尺度的边界层精细湍流结构及日演变特征，可填补区域尺度湍流观测产品的不足。图7为基于北京海淀站的风廓线雷达谱宽数据反演得到的2019年7月12日、14日、23日和31日涡流耗散率廓线。

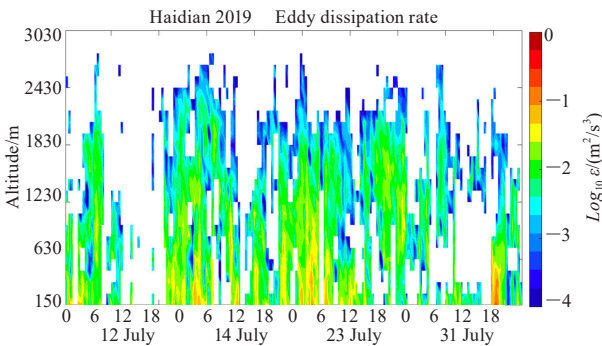


图7 基于北京海淀站的风廓线雷达谱宽数据反演计算得到的2019年7月12, 14, 23和31日的涡流耗散率廓线

湍流混合来源主要包括浮力、剪切和云辐射冷却^[52-53]，这些来源呈现出很大的时空变异性。近年来的研究表明：后向衰减系数、垂直速度偏度、湍流动能耗散率和垂直风切变等参数可被用来识别大气边界层内湍流来源^[54]。目前，相关方面的研究已经基于多

普勒激光雷达在不同地区迅速展开。例如，在湍流混合来源量化方面，Huang等^[55]借助香港天气台King's Park站点长期高分辨率测风激光雷达观测，初步揭示了该站大气边界层内精细的湍流结构及其演变特征，并量化了浮力（地面加热引起）、剪切和云辐射冷却效应对湍流的相对贡献率（图8）。这一研究为今后基于风廓线雷达进行相关研究提供了关键科学依据和重要参考。

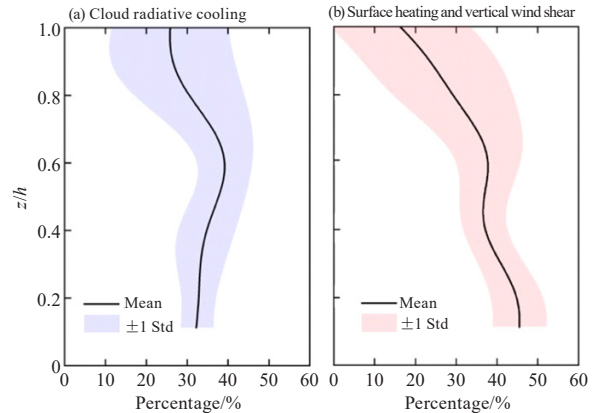


图8 浮力、剪切和云辐射冷却效应等三种不同湍流来源对香港King's Park站云下层湍流贡献率廓线^[55]

2.5 大气辐合辐散探测

动力抬升信号在强对流触发和随后的演变过程中起着十分重要的作用，而大气水平辐合辐散正与垂直运动紧密联系。Bellamy^[56]在1949年提出利用三个不共线站点上空的水平风观测计算其组成的三角形区域内的水平散度。20世纪80年代开始，国内学者引进了三角形法来计算我国各个探空站点间的涡度、散度等量，并提出了各种改进方案^[57-59]。近年来风廓线雷达在全国范围内广泛开展建设，多地相继建成站点密集、间距小的风廓线雷达中尺度网，可提供更高时空分辨率的实时三维风场观测，是提高对灾害性天气监测的能力和短期数值天气预报模式质量的重要手段。刘梦娟等^[60]将散度和涡度计算的三角形法应用到上海地区风廓线中尺度组网，即可以实时监测局地辐合辐散特征及其变化，进而捕捉强对流风暴的前期信号，为强降水精细预报提供参考。

以北京地区为例，利用位于北京主城区的6部风廓线雷达，可构建自西向东相邻的4个三角形组成的中尺度网。根据某一三角形3个顶点测站位置的经纬度(λ_i, φ_i) ($i=1,2,3$)和地球平均半径 R 计算该三角形三边的分量($\Delta x_i, \Delta y_i$) ($i=1,2,3$)，结合某一高度处3个测站的水平风数据(u_i, v_i) ($i=1,2,3$)计算该高度处此三角形内的水平散度 D 和相对涡度 ζ ，计算公式如下：

$$D = \frac{(u_2 - u_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (u_3 - u_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1) + (\Delta x_2 - \Delta x_1)(v_3 - v_1) - (\Delta x_3 - \Delta x_1)(v_2 - v_1)}{(\Delta x_2 - \Delta x_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (\Delta x_3 - \Delta x_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1)}, \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{(v_2 - v_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (v_3 - v_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1) - (\Delta x_2 - \Delta x_1)(u_3 - u_1) + (\Delta x_3 - \Delta x_1)(u_2 - u_1)}{(\Delta x_2 - \Delta x_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (\Delta x_3 - \Delta x_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1)}, \quad (5)$$

将该算法遍历三角形组网,可得每一个三角形上空任意高度处的水平散度和相对涡度数值,从而提供京津冀区域性的辐合、辐散实时产品。图9为基于三角形法反演计算得到的2018年7月16日18:12北京地区风廓线雷达组网上空各高度层水平散度的空间分布。

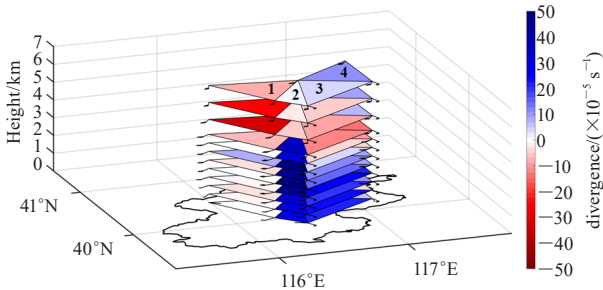


图9 基于三角形法反演计算得到的2018年7月16日18:12北京地区风廓线雷达组网上空各高度层水平散度的空间分布,红色(蓝色)阴影表示辐散(辐合)

根据地面自动站观测(图10),2018年7月16日18时后北京中、西部出现强降水,部分站点最大小时雨量可达50 mm,对流触发与其上空低层辐合、高层辐散的动力抬升作用密不可分。由此可见,根据风廓线雷达提供的三维风场反演辐合、辐散场,能够分析强对流天气触发前大气动力条件的变化特征,精密捕

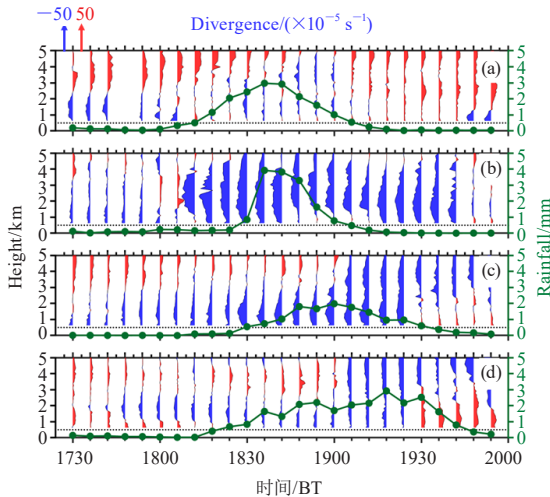


图10 2018年7月16日17:30—20:00(时间分辨率为6 min)四个三角形上空0.5~8 km水平散度垂直廓线的时间序列(阴影,单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)(红色(蓝色)阴影表示辐散(辐合),主次刻度之间间隔为 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;黑色虚线表示0.5 km高度,未计算此高度以下的散度;带实点的绿线表示每个三角形中的6 min累积面积平均降雨量)

捉中尺度组网内的上升运动,为判断中尺度对流系统的发生发展提供依据。

3 结论

风廓线雷达具有连续观测、自动化程度高等优势,可实时提供水平风风向、水平风风速、垂直速度、折射率结构常数等要素信息。利用风廓线雷达中尺度网观测,不仅可进行区域三维风场探测,而且长期风廓线观测资料的累积也可为区域风力资源和发电潜力提供重要数据支撑。尤其是利用不同高度处的水平风可反演出时空分辨率更高的散度、涡度、风切变和垂直速度等大气动力参数,若结合探空观测、静止卫星、多波长多普勒天气雷达、双偏振雷达、地面自动站观测等多源观测资料,可捕捉对流触发前大气垂直动力、热力、水汽变化特征,为强对流天气监测预警和短期临近预报提供重要参考。

在污染条件下垂直风切变的量级要比清洁条件下小得多,表明边界层中气溶胶浓度较高时垂直混合较弱,由此可见,风切变可显著影响边界层内气溶胶的垂直混合过程及其浓度变化,进而应用于大气污染物成因分析与预测预警。此外,由于大气边界层与气溶胶之间存在复杂的反馈过程,传统的业务探空气球一天两次观测难以捕捉大气边界层的日变化特征,借助高时间分辨率(6 min)风廓线雷达组网观测,可实现时间连续且全天候的大气边界层高度和垂直风切变等关键参数的反演,进而为大气污染监测与预警提供参考。同时,基于风廓线雷达多普勒谱宽数据可计算涡流耗散率,有助于探究区域尺度边界层内湍流混合特征和发展演变过程。若结合静止气象卫星和云雷达观测,可进一步开展边界层云过程研究,重点探索弱天气系统强迫背景下的晴空对流边界层、积云/层积云覆盖边界层和中小尺度局地环流影响下的边界层等三种不同边界层内湍流演变规律,进而深化对区域大气边界层内湍流-边界层云相互作用机制的科学理解,为区域天气气候模式的大气边界层方案改进提供重要科学依据。

由此可见,利用高时空分辨率的区域风廓线雷达组网观测资料一方面能够更加精细地捕捉强对流天气触发前的大气动力信号,另一方面可以全天时全天候地监测边界层内湍流结构特征和发展变化,为大气

污染监测与预警提供参考。数值天气实时预报模式,若能同化上述区域高分辨率风廓线雷达观测网得到的热动力和边界层结构参数,可获得较为精准大气分析场,有望提升短时临近天气预报技巧。此外,上述新产品也有助于揭示复杂的边界层气溶胶-云-降水相互作用,且有望在航空安全、可再生能源、灾害天气和气候变化等科学研究和应用中发挥重要的科技支撑和数据基础作用。考虑到在沙漠、海洋、极区、干旱半干旱及经济欠发达地区部署风廓线雷达的困难和挑战,如何发展基于星载的测风激光雷达风场反演算法和同化技术也是有待我们继续加强的领域。考虑到目前还缺乏时间连续的大气热力廓线观测,亟需大力发展我国微波辐射计组网或卫星观测,以弥补此类观测的不足。

参考文献

- [1] Williams P D, Joshi M M. Intensification of winter transatlantic aviation turbulence in response to climate change. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 644-648.
- [2] Benjamin S G, Schwartz B E, Szoke E J, et al. The value of wind profiler data in the U.S. weather forecasting. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 2004, 85: 1871-1884.
- [3] Nash J, Oakley T J. Development of COST 76 wind profiler network in Europe. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, 2001, 3(26): 193-199.
- [4] Zhang Y, Guo J, Yang Y, et al. Vertical wind shear modulates particulate matter pollutions: a perspective from radar wind profiler observations in Beijing, China. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 546.
- [5] Yang Y, Yim S H, Haywood J, et al. Characteristics of heavy particulate matter pollution events over Hong Kong and their relationships with vertical wind profiles using high-time-resolution Doppler lidar measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124: 9609-9623.
- [6] LeMone M A, Angevine W M, Bretherton C S, et al. 100 Years of progress in boundary layer meteorology. *Meteorological Monographs*, 2018, 59: 9.1-9.85.
- [7] Liu B, Guo J, Gong W, et al. Boundary layer height as estimated from radar wind profilers in four cities in China: relative contributions from aerosols and surface features. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1657.
- [8] Constantinescu E M, Zavala V M, Rocklin M, et al. Unit commitment with wind power generation: integrating wind forecast uncertainty and stochastic programming (No. ANL/MCS-TM-309). Argonne: Argonne National Lab, 2009.
- [9] Guo J, He J, Liu H, et al. Impact of various emission control schemes on air quality using WRF-Chem during APEC China 2014. *Atmospheric Environment*, 2016, 140: 311-319.
- [10] Guo J, Liu B, Gong W, et al. First comparison of wind observations from ESA's satellite mission Aeolus and ground-based radar wind profiler network of China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(4): 2945-2958.
- [11] Liu B, Ma Y, Guo J, et al. Boundary layer heights as derived from ground-based radar wind profiler in Beijing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(10): 8095-8104.
- [12] Reitebuch O. The Spaceborne Wind Lidar Mission ADM-Aeolus. In: Schumann U. *Atmospheric Physics*. Heidelberg: Springer Berlin, 2012: 487-507.
- [13] Yim S H, Fung J C, Lau A K, et al. Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112: D05106.
- [14] Guo J, Miao Y, Zhang Y, et al. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(20): 13309.
- [15] Wang C, Chen Y, Chen M, et al. Data assimilation of a dense wind profiler network and its impact on convective forecasting. *Atmospheric Research*, 2020, 238, doi:10.1016/j.atmosres.2020.104880.
- [16] Liu B, Guo J, Gong W, et al. Characteristics and performance of wind profiles as observed by the radar wind profiler network of China. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(8): 4589-4600.
- [17] Tie X, Zhang Q, He H, et al. A budget analysis of the formation of haze in Beijing. *Atmosphere Environment*, 2015, 100: 25-36.
- [18] Liu X, Li J, Qu Y, et al. Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13: 4501-4514.
- [19] Chen Y, An J, Lin J, et al. Observation of nocturnal low-level wind shear and particulate matter in urban Beijing using a Doppler wind lidar. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2017, 10: 411-417.
- [20] Yang Y, Yim S H, Haywood J, et al. Characteristics of heavy particulate matter pollution events over Hong Kong and their relationships with vertical wind profiles using high-time-resolution Doppler lidar measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124: 9609-9623.
- [21] Woodman R F, Guillen A. Radar observation of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere. *J Atmos Sci*, 1974, 31: 493-505.
- [22] Larsen M, Röttger J. VHF and UHF Doppler radars as tools for synoptic research. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 1982, 63: 996-1008.
- [23] Hogg D, Decker M, Guiraud F, et al. An automatic profiler of the temperature, wind and humidity in the troposphere. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 807-831.
- [24] Strauch R G, Merritt D A, Moran K P, et al. The Colorado wind profiling network. *J Atmos Oceanic Technol*, 1984, 1, 37-49.
- [25] Molod A, Salmun H, Dempsey M. Estimating planetary boundary layer heights from NOAA profiler network wind profiler data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(9): 1545-1561.
- [26] Ishihara M, Kato Y, Abo T, Tingwell C. Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2006, 84(6): 1085-1096.
- [27] Dolman B K, Reid I M, Tingwell C. Stratospheric tropospheric wind profiling radars in the Australian network. *Earth, Planets and Space*, 2018, 70(1): 170.
- [28] Liao F, Deng H, Gao Z, et al. The research on boundary layer evolution characteristics of Typhoon Usagi based on observations by wind profilers. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(9): 39-44.
- [29] 魏浩. 小波变换在风廓线雷达探测边界层顶中的应用. *中国气象学会年会*, 2014.
- [30] 廖菲, 邓华, 李旭. 基于风廓线雷达的广东登陆台风边界层高度特征研究. *大气科学*, 2017, 41(5): 949-959.
- [31] 张哲, 师宇, 王咏薇, 等. 基于风廓线雷达的对流边界层高度的确定. *气象科学*, 2019, (3): 359-367.
- [32] Zhang W, Guo J, Miao Y, et al. On the summertime planetary boundary layer with different thermodynamic stability in China: A radiosonde perspective. *Journal of Climate*, 2018, 31(4): 1451-1465.
- [33] Li Z, Guo J, Ding A, et al. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality. *National Science Review*, 2017, 4(6): 810-833.
- [34] Lou M, Guo J, Wang L, et al. On the relationship between aerosol and boundary layer height in summer in China under different thermodynamic conditions. *Earth and Space Science*, 2019, 6(5): 887-901.
- [35] Liu J, Huang J, Chen B, et al. Comparisons of PBL heights derived from CALIPSO and ECMWF reanalysis data over China. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 153: 102-112.

(下转51页)

- 对比. 气象, 2016, 42(6): 743-755.
- [5] 吕达仁, 魏重, 忻妙新, 等. 地基微波遥感大气水汽含量的普适性回归反演. 大气科学, 1993, 17(6): 721-731.
- [6] 朱元竟, 胡成达, 甄进明, 等. 微波辐射计在人工影响天气研究中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 1994, 30(5): 597-606.
- [7] 赵玲, 马玉芬, 张广兴, 等. MP-3000A微波辐射计的探测原理及误差分析. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(5): 54-57.
- [8] Hill G E. Measurement of atmospheric liquid water by a ground-based single-frequency microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1991, 8(5): 685-690.
- [9] Liu G R, Liu C C, Kuo T H. Rainfall intensity estimation by ground-based dual-frequency microwave radiometers. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(6): 1035-1041.
- [10] 张京江, 楚艳丽, 刘红燕, 等. 地基GPS和微波辐射计倾斜路径水汽对比观测实验方案设计. 气象科技, 2009, 37(2): 239-242.
- [11] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 微波辐射计亮温观测质量控制研究. 气象科学, 2013, 33(2): 130-137.
- [12] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降雨量的初步研究. 大气科学, 2010, 34(3): 548-558.
- [13] 姚作新, 吕鸣, 贺晓东, 等. MP-3000A型微波辐射计在乌鲁木齐探空站的辅助性探测研究. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(1): 38-43.
- [14] 赵玲, 马玉芬, 张广兴, 等. 地基35通道微波辐射计观测资料的初步分析. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(1): 56-58.
- [15] 刘建忠, 张蕾. 微波辐射计反演产品评价. 气象科技, 2010, 38(3): 325-331.
- [16] 高金辉, 贾利锋, 顾学俊. 利用地基微波辐射计探测降雨强度的方法研究. 河南师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(5): 47-50.
- [17] 周嵬, 吴宏议, 田海军. 基于微波辐射计资料浅析对流降雨云内与环境温差. 干旱气象, 2011, 29(1): 10-16.

(上接12页)

- [36] Zhang W, Guo J, Miao Y, et al. Planetary boundary layer height from CALIOP compared to radiosonde over China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16: 9951-9963.
- [37] Angevine W M, Ecklund W L, Carter D A, et al. Improved radio acoustic sounding techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11: 42-49.
- [38] Compton J C, Delgado R, Berkoff T A, et al. Determination of planetary boundary layer height on short spatial and temporal scales: a demonstration of the covariance wavelet transform in ground-based wind profiler and lidar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30: 1566-1575.
- [39] Bianco L, Wilczak J M, White A B, et al. Convective boundary layer depth estimation from wind profilers: statistical comparison between an automated algorithm and expert estimations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25: 1397-1413, doi:10.1175/2008jtecha981.1.
- [40] Vickers D, Mahrt L. Evaluating formulations of stable boundary layer height. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43: 1736-1749, doi:10.1175/jam2160.1.
- [41] Kurzeja R J, Berman S, Weber A H. A climatological study of the nocturnal planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 54: 105-128.
- [42] Kosović B, Curry J A. A large eddy simulation study of a quasi-steady, stably stratified atmospheric boundary layer. *Journal of the Atmospheric Science*, 2000, 57: 1052-1068.
- [43] Pichugina Y L, Banta R M. Stable boundary layer depth from high-resolution measurements of the mean wind profile. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49: 20-35, doi:10.1175/2009jamc2168.1.
- [44] 宋星灼, 张宏升, 刘新建, 等. 青藏高原中部地区不稳定大气边界层高度的确定与分析. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(3): 328-333.
- [45] 魏浩. 小波变换在风廓线雷达探测大气边界层高度中的应用研究. 热带气象学报, 2015, 31(6): 811-820.
- [46] Singh N, Solanki R, Ojha N, et al. Boundary layer evolution over the central Himalayas from radio wind profiler and model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16, doi:10.5194/acp-2016-101.
- [47] Cohn S A, Angevine W M. Boundary layer height and entrainment zone thickness measured by lidars and wind-profiling radars. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 1233-1247.
- [48] Raveh-Rubin S. Dry intrusions: Lagrangian climatology and dynamical impact on the planetary boundary layer. *Journal of Climate*, 2017, 30: 6661-6682.
- [49] Schaub D, Weiss A, Kaiser J, et al. A transboundary transport episode of nitrogen dioxide as observed from GOME and its impact in the Alpine region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5: 23-37.
- [50] Huang J, Guo J, Wang F, et al. CALIPSO inferred most probable heights of global dust and smoke layers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120: 5085-5100.
- [51] Gu Y, Yim S. The air quality and health impacts of domestic transboundary pollution in various regions of China. *Environmental International*, 2016, 97: 117-124.
- [52] Deardorff J W. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29: 91-115.
- [53] Moeng C H, Sullivan P P. A comparison of shear- and buoyancy-driven planetary boundary layer flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, 51: 999-1022.
- [54] Manninen A J, Marke T, Tuononen M J, et al. Atmospheric boundary layer classification with Doppler lidar. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 8172-8189.
- [55] Huang T, Yim S H, Yang Y, et al. Observation of turbulent mixing characteristics in the typical daytime cloud-topped boundary layer over Hong Kong in 2019. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1533.
- [56] Bellamy J C. Objective calculations of divergence, vertical velocity, and vorticity. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 1949, 30: 45-49.
- [57] 文宝安. 水平散度的几种计算方法. 气象, 1980, 6(5): 32-36.
- [58] 尚可政, 王式功, 杨德保, 等. 三角形法计算涡度和散度的一种改进方案. 高原气象, 1999, 18(2): 125-129.
- [59] 崔一峰. 计算散度的三点法比较及订正新方案. 气象, 1989, 15(6): 15-20.
- [60] 刘梦娟, 杨引明. 基于风廓线网的散度和涡度计算. 气象科技进展, 2017, 7(1): 27-32.