

Aeolus 水平径向风速产品资料同化在台风预报中的应用研究

季凌潇¹, 鲍艳松¹, 温渊², 李欢³, 丁佳丽¹

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室/大气物理学院, 南京 210044

2 上海卫星工程研究所, 上海 200240

3 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所, 绵阳 621000

摘要 为评价星载激光测风雷达产品资料同化对台风预报的影响, 以 2020 年台风“黑格比”和 2019 年台风“利奇马”为例, 选用 Aeolus 卫星的水平径向风速产品, 开展星载激光测风雷达资料同化及其对台风预报影响研究。首先基于 ERA5 再分析资料对 Aeolus 产品进行统计检验和偏差订正, 并统计各高度层观测背景差的均方差作为观测误差用于同化试验。然后通过 WRFDA (Weather Research and Forecast Model Data Assimilation) 模式同化 Aeolus 产品并利用 WRF (Weather Research and Forecast Model) 模式开展预报试验。试验结果表明, Aeolus 产品精度较高, 统计所得各层观测误差在 3-5 m/s 范围且随高度的升高而增大, 订正后资料满足三维变分同化无偏假设; 在台风“黑格比”和“利奇马”期间同化该产品能使模式具备更加合理的环流形势, 能够有效提高对台风“黑格比”和“利奇马”路径及强度的预报效果。

关键词 Aeolus 卫星; 水平径向风速; 资料同化; 台风预报

文章编号 中图分类号 P456.7 文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2211.22049

Application of Aeolus Horizontal Line-of-sight Product Data Assimilation in Typhoon Forecast

Lingxiao JI¹, Yansong BAO¹, Yuan WEN², Huan LI³, Jiali DING¹

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration/ Joint Laboratory of Meteorological Environment Satellite Engineering and Application, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Shanghai Satellite Engineering Institute, Shanghai 200240

3 China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000

Abstract: In order to evaluate the impact of spaceborne lidar product data assimilation on typhoon forecast, this paper studied the assimilation of Aeolus Horizontal line-of-sight data and its impact on typhoon forecast for Typhoon Hagupit in 2020 and Typhoon Lekima in 2019. First, we conducted statistical test and deviation correction on Aeolus products and used the statistical root mean square error of each height layer as the observation error for the assimilation. Then, Aeolus products were assimilated by WRFDA (Weather Research and Forecast Model Data Assimilation) model, and the prediction test was carried out by WRF (Weather Research and Forecast Model) model. The experiment results show that the Aeolus products are highly accurate, the observation error of each layer after correction is in the range of 3-5 m/s and increases with the increase of height. The corrected data meet the unbiased assumption of three-dimensional variational assimilation. Assimilating Aeolus products during Typhoon

收稿日期 2023-02-28; 网络预出版日期

作者简介 季凌潇, 男, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要从事资料同化研究。E-mail: lingxiao_ji@163.com

通讯作者 鲍艳松, ysbao@nuist.edu.cn

资助项目 上海航天科技创新基金资助项目 (SAST2019-043, SAST2020-032); 南京信息工程大学大学生创新创业训练计划 (XJDC202110300325)

Founded by Shanghai Aerospace Science and technology innovation foundation (Grant SAST2019-043, SAST2020-032); NUIST Students' Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program (XJDC202110300325)

39 Hagupit and Typhoon Lekima can make the model show more reasonable circulation patten and effectively improve the track and
40 intensity forecast of typhoon Hagupit and Lekima.
41 Key words: Aeolus, Horizontal line-of-sight, Data assimilation, Typhoon forecast

刊

游

谱

科

风

游

大

科

风

刊

大

谱

42 1 引言

43 台风是发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋系统，台风登陆虽然能够为沿海地区带来丰富的降水，但是其对人民生命和财产的危害也同样巨大（康斌, 2016）。风的观测能够影响数值天气预报模式的预报性能，改善模式初始场，对台风预报的改善有重要作用。目前被广泛应用于业务系统的风场资料包括飞机报、无线电探空、风廓线雷达、雷达径向风速以及大气运动矢量（又称云导风或云迹风），以上资料同化入数值模式后能够较好地改善台风预报效果（Zhang et al., 2011; 刘瑞等, 2012; 陈锋等, 2017; 王丹等, 2019）。但是大部分风场资料受到地理条件和天气的限制，无法提供全球尺度全天候的观测。云导风主要集中在中高对流层，无法提供较为完善的平流层下层风场信息，因此全球风场观测系统仍存在明显不足。针对全球风场的高分辨率探测，欧空局（European space agency, ESA）于 1999 年提出了 ADM-Aeolus 任务（Atmospheric Dynamics Mission-Aeolus），旨在获取对流层和平流层的高分辨率风廓线观测，提高数值预报准确性，促进对大气动力学和气候过程的理解。

52 Aeolus 卫星于 2018 年 8 月 22 日成功发射，为太阳同步轨道卫星，飞行高度距地约 320 km。Aeolus 搭载的首颗星载测风激光雷达 ALADIN（Atmospheric Laser Doppler Instrument），以 355 nm 的波长发射紫外激光脉冲。该雷达采用双通道设计，探测信号的多普勒频移以计算获得径向风速，Rayleigh 通道可探测大气分子的后向散射信号，Mie 通道则探测气溶胶粒子的后向散射信号，因此可获得两种独立的径向风速测量值，即 Mie 风和 Rayleigh 风(Stoffelen et al., 2005; Reitebuch, 2012)。Aeolus 产品数据集在 2020 年 5 月 12 日向公众开放并提供多种产品，其中 L2B 产品提供水平径向风速数据（Horizontal line-of-sight, HLOS）即径向风速的水平分量，是 Aeolus 的主要产品，可被用于资料同化和改善数值天气预报模式（Rennie, 2018, 2020b）。

59 为校准 Aeolus 产品，在卫星发射后其团队利用无线电探空和机载激光雷达对 Aeolus 产品进行验证，并根据研究结论对 HLOS 风算法进行改进，修正了包括“热噪点（Hot pixels）”（Weiler et al., 2020）和仪器镜面温度等因素导致的偏差(Rennie and Isaksen, 2020)，但由于激光脉冲能量的减少和接收机中的信号缺失(Reitebuch et al., 2020)，产品随机误差高于预期。目前，Aeolus 产品已较为成熟，各国学者使用多种资料对 Aeolus 产品进行了验证。Hauchecorne（2020）利用法国南部的地基多普勒雷达定量评价了 Aeolus 产品精度，并评估了该产品在大气重力波所引起的平流层风场波动方面的应用能力；Belova et al.（2021）利用两极的风廓线雷达资料作对比，证明了 Aeolus 产品在两极同样具有较高的精度，但由于海冰等季节性因素的影响，冬夏季观测偏差会有所区别；Guo et al.（2021）利用中国的风廓线雷达资料评估 Aeolus 产品，测得 Mie 和 Rayleigh 通道 HLOS 与风廓线雷达资料的平均偏差分别为-0.28 m/s 和-0.64 m/s，偏差的标准差分别为 4.2 m/s 和 6.82 m/s，证明了 Aeolus 产品与中国地区风廓线雷达观测具有较好的一致性，东部沿海地区的风观测更加可靠；Chen et al.（2021）对比我国四个 L 波段无线电探空仪数据，表明 Aeolus 产品中 Mie 和 Rayleigh 通道 HLOS 资料在四个站点偏差的标准差分别为 5.83-7.19 m/s 和 7.38-7.74 m/s，并发现云高和云顶高度的季节性变化会影响 Aeolus 观测性能；Liu et al.（2021）对比中国区域 Aeolus 产品、无线电探空和 ERA5 资料，表明三者有较好的一

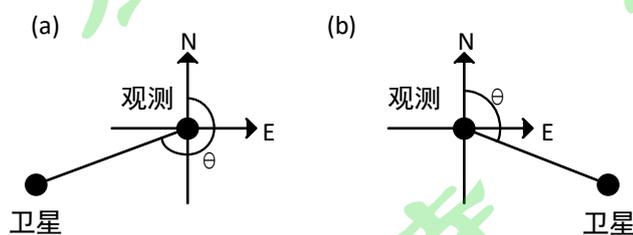
71 致性, Aeolus 产品中 Mie (Rayleigh) 通道对比探空和 ERA5 资料的平均偏差分别为 0.18(-0.24) m/s 和 -0.21(-0.16) m/s,
72 并且 Rayleigh 风观测会受到近地表气溶胶的影响。以上研究均为 Aeolus 产品在数值预报模式的运用奠定了基础。国外
73 已开始利用数值天气预报模式对 Aeolus 产品进行研究验证, Rennie and Isaksen (2020a, 2020b) 运用 ECMWF
74 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 的数据同化系统同化 Aeolus 的 HLOS 风观测, 其结果显示: 相
75 比其他资料, 较少的 Aeolus 风观测能显著提高数值模式的预报效果, 热带和极地地区的短期预报效果提升明显, 风和
76 温度的均方根误差降低约 2%; Martin et al. (2021) 基于德国气象局 (Deutscher Wetterdienst, DWD) 的 ICON
77 (Icosahedral Nonhydrostatic Model) 模式和 ECMWF 的 IFS (Integrated Forecast System) 模式资料, 研究发现 Aeolus
78 产品中 HLOS 资料偏差与升轨降轨、海陆分布、季节以及热带对流有关, 根据不同纬度和经度对 Rayleigh 风观测进行
79 偏差订正能够有效减小 Rayleigh 风与模式产品间的偏差, 从而使 Rayleigh 风更加满足模式同化需求。

80 虽然目前针对 Aeolus 产品的研究已经较多, 但主要集中于对其产品精度的评估, 并且对于我国范围内的 Aeolus 产
81 品研究仍然较少, 缺乏对其产品的数值模式应用研究。本文针对我国东南沿海及太平洋西部, 探索 Aeolus 产品在模式
82 中的实际应用。本文对 Aeolus 产品中 HLOS 资料进行质量控制和偏差订正后, 统计其观测误差, 对台风“黑格比”和
83 “利奇马”进行个例试验, 分析同化 HLOS 资料对临近我国的台风预报的改善作用。

84 2 模式资料与试验方案

85 2.1 数据介绍

86 Aeolus 为晨昏-太阳同步轨道卫星, 倾角约为 97° , 卫星天底角约为 35° (Straume, 2020)。Aeolus 卫星激光脉冲垂
87 直于轨道射向夜半球, 以减少阳光引起的背景辐射 (Erik et al., 2008)。在大部分大气条件下, 风的垂直分量数值较小,
88 因此脉冲信号的多普勒频移主要由水平风在卫星观测方向的分量决定。在中低纬度, 方位角在卫星升轨时段约为 260° ,
89 在降轨时段则约为 100° , 因此中低纬度的信号多普勒频移主要是由纬向风引起的。高纬度方位角逐渐变化, 经向风对
90 信号多普勒频移影响更大。



91
92 图 1 方位角示意图: (a)升轨; (b)降轨

93 Fig.1 A schematic of azimuth angle: (a) ascending orbit; (b) descending orbit

94 Aeolus 产品中, 19 个脉冲信号 (Laser pulse) 所得径向风速的平均定义为一个雷达测量 (Measurement), 而 n 个

95 雷达测量 ($1 \leq n \leq 30$) 根据其与其重心位置的距离权重, 计算得到一个 Aeolus 产品观测 (Observation)。其中, 雷达测量
96 的水平尺度约为 2.8 km, 因此每个观测的累计长度为 $2.8 * n$ km。Mie 和 Rayleigh 通道垂直分层均为 24 层, 可探测 30
97 km 高度以内的大气风场, 低层垂直分辨率为 250 m, 高层则为 2 km (Reitebuch, 2018)。两个通道垂直分辨率设置不
98 同, Mie 通道低层分层更多, Rayleigh 通道则可以探测更高海拔的风场信息。

99 Aeolus 的 Level 2B 产品完成了必要的校准和仪器订正, 是 Aeolus 的主要风场产品, 提供大气校正和地理定位
100 后的水平径向风速 HLOS 观测。产品中每一个雷达测量都会根据大气光学特性将大气分类为 Cloudy 和 Clear, Rayleigh-
101 Clear 和 Mie-Cloudy 被认为是有效观测 (Witschas, 2020), 而 Rayleigh-Cloudy 和 Mie-Clear 这两类数据在本研究中被剔
102 除, 不进行讨论。每个观测数据点均由相同大气分类的雷达测量组成, 可提供较大尺度的风观测资料, 并为数值预报
103 和资料同化作准备。

104 2.2 模式介绍

105 本研究采用 4.0 版本的 WRF (Weather Research and Forecast Model) 模式及 WRFDA (Weather Research and Forecast
106 Model Data Assimilation system) 同化系统, 利用 WRFDA 系统中雷达资料同化模块对 Aeolus 产品中水平径向风速
107 HLOS 进行直接同化。WRFDA 雷达径向风速代价函数为:

$$108 \quad J_{vr} = 1/2 * \sum (V_r - V_r^{ob})^2 / \sigma_{vr} \quad (1)$$

109 式中, V_r 为模式径向风速, V_r^{ob} 为观测径向风速, σ_{vr} 为观测误差方差, 其中模式径向风速 V_r 观测算子为:

$$110 \quad V_r = (x - x_r)/r * u + (y - y_r)/r * v + (z - z_r)/r * (w - V_T) \quad (2)$$

111 式中 x 、 y 、 z 为雷达中心所在位置, x_r 、 y_r 、 z_r 则是观测点位置, r 表示观测点到雷达中心距离, u 、 v 、 w 为由模
112 式格点插值到观测点的风分量, V_T 为粒子下落末速度, 与粒子大小有关。在对 HLOS 资料进行同化时, 根据其产品特
113 性, 仅考虑风场的水平分量, 故将原径向速度 V_r 观测算子, 即计算公式 2 中垂直风速部分删除, 修改为公式 3, 卫星
114 星下点位置代替雷达位置作为模式输入。

$$115 \quad V_r = (x - x_r)/r * u + (y - y_r)/r * v \quad (3)$$

116 2.3 试验设置

117 研究试验区域为单层嵌套, 区域中心为 (15 °N, 120 °E), 水平分辨率 27 km (图 1), 垂直分为 41 层, 模式顶气
118 压为 50 hPa。模式采用的物理参数化方案为: WSM6 微物理过程方案, RRTM 长波辐射方案, Dudhia 短波辐射方案,
119 Kain-Fritsch 积云参数化方案, YSU 边界层方案, Monin-Obukhov 近地层方案以及 Noah 陆面过程方案。

120 Aeolus 卫星每日 09 时和 21 时 (世界时, 下同) 左右经过太平洋西部, 即试验区中部海洋区域。研究采用三维变
121 分同化方法, 利用 09 时 HLOS 资料进行同化试验。利用 2020 年 7 月整月的 12 h 预报和 24 h 预报结果的偏差样本统计
122 得到背景误差协方差。考虑到 Aeolus 产品较新, 且默认的地基雷达径向风速观测误差不适用于同化 HLOS 资料, 故需
123 要针对试验区域 HLOS 资料制定合理的质量控制和偏差订正方案, 并给出同化所需观测误差估计。

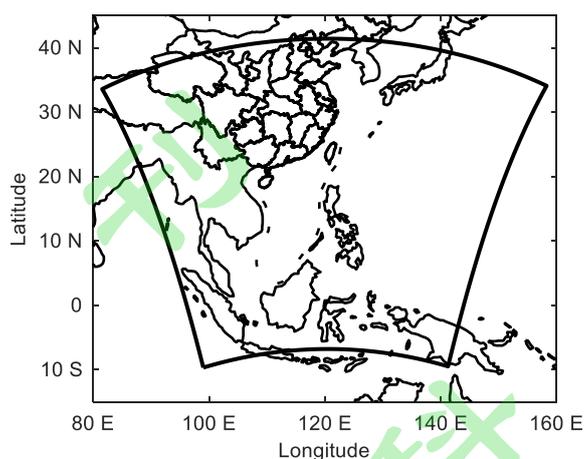


图 2 模式区域

Fig.2 Model domain

3 质量控制与偏差订正

3.1 质量控制方案

参考欧洲中期天气预报中心 ECMWF 和美国国家海洋和大气管理局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 对 Aeolus-L2B 产品中 HLOS 资料的质量控制方案, 首先制定具体质量控制方案如下:

(1) 大气成分检测: 根据 L2B 产品中的大气分类字段 `observation_type`, 挑选 Mie-Cloudy 和 Rayleigh-Clear 数据, `observation_type=1` 表示 cloudy, 2 表示 clear;

(2) 数据有效性检验: Aeolus 产品有效性可根据质控标签 `validation_flag` 判断, 0 表示数据无效, 1 表示有效 (Kloe et al., 2016), 挑选 `validation_flag=1` 的 Mie 和 Rayleigh 通道的有效数据;

(3) 估测误差检验: Aeolus-L2B 产品提供了对每个数据点的误差估计值 `hlos_error_estimate`, 该值由 L2B 产品中 Mie 和 Rayleigh 通道风场数据算法得到, 本研究仅考虑 `hlos_error_estimate<5 m/s` 的 Mie 通道数据和 `hlos_error_estimate<12 m/s` 的 Rayleigh 通道数据 (Reitebuch, 2019);

(4) 海拔高度检验: 剔除数据点海拔高度小于 160 m 的 Mie 通道数据, 同时剔除海拔高度小于 2 km 的 Rayleigh 通道数据;

(5) 累计长度检验: 剔除观测累计长度小于 5 km 的 Mie 通道数据, 同时剔除累计长度小于 60 km 的 Rayleigh 通道数据。

(6) 数据稀疏化: 利用等间隔取点方法进行水平方向的稀疏化处理。将 Mie 通道 HLOS 资料稀疏化至 90 km, Rayleigh 通道由于在累计长度检验中保留累计长度大于 60 km 的资料, 并未进行稀疏化 (Garrett, 2020)。

3.2 偏差订正

Aeolus 产品中, Mie 通道观测精度较高而 Rayleigh 通道误差较大, 利用线性回归方法对 Rayleigh 通道 HLOS 观测进行偏差订正, 以获得更加满足三维变分同化无偏假设的风场资料 (Garrett, 2020)。试验时间选取 2020 年 7 月 1-31

147 日，以每日 09 时 ERA5 再分析资料作为参考场，将 ERA5 资料插值到 Aeolus 产品的观测点位置，并根据公式（4）计
 148 算其在 HLOS 方向上的风速分量 $HLOS_{ERA5}$ ，从而统计 Aeolus 产品与 ERA5 之间观测背景差 $Diff$ 分布。

149
$$HLOS_{ERA5} = -u * \sin\theta - v * \cos\theta \quad (4)$$

150 公式（4）中， u 和 v 代表 ERA5 插值到卫星观测点的水平风速分量， θ 表示卫星相对于观测的方位角。分别对不
 151 同纬度带（ l ）和高度层（ p ）的 Rayleigh 通道观测进行订正。根据试验区域设置，将纬度带划分为：小于 0° ， $0-10^\circ N$ ，
 152 $10-20^\circ N$ ， $20-30^\circ N$ 以及大于 $30^\circ N$ 共五个纬度带；高度层划分方法为 $0-25\text{ km}$ ，每隔 1 km 划分一个高度层。选用各纬
 153 度带、各高度层的 Rayleigh 通道 HLOS 观测为订正因子，假设观测背景差 $Diff$ 与订正因子之间是线性关系，则观测背
 154 景差与订正因子 HLOS 之间关系为：

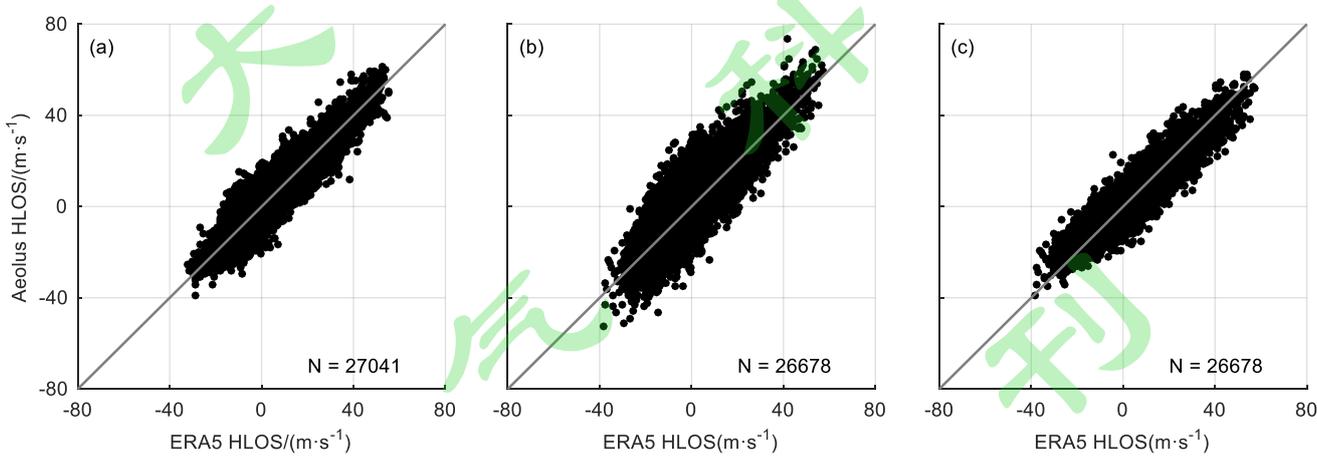
155
$$Diff_{(l,p)} = c_{0(l,p)} + c_{1(l,p)} * HLOS_{(l,p)} \quad (5)$$

156 式中 $c_{0(l,p)}$ 和 $c_{1(l,p)}$ 分别为偏差订正系数，是将 HLOS 值以及观测背景差 $Diff$ 作为数据集，利用最小二乘法拟合得到。

157 订正后 HLOS' 可表示为：

158
$$HLOS'_{(l,p)} = HLOS_{(l,p)} - (c_{0(l,p)} + c_{1(l,p)} * HLOS_{(l,p)}) \quad (6)$$

159 图 2 是 2020 年 7 月 Aeolus 产品对比 ERA5 再分析资料的 HLOS 散点分布图。由图 2 可知，Mie 通道 HLOS 分布基
 160 本集中于对角线分布，无明显异常点。订正前 Rayleigh 通道 HLOS 在其大值附近存在部分偏差较大点，数据整体分布
 161 较为松散，订正后 Rayleigh 通道资料分布更加集中于对角线，数据整体质量提高。



162
 163 图 3 Aeolus 产品相对 ERA5 背景场中 HLOS 的散点分布：（a）Mie 通道；（b）订正前 Rayleigh 通道；（c）订正后
 164 Rayleigh 通道

165 Fig.3 Scatter distribution of HLOS data in Aeolus products against ERA5 background fields: (a) Mie channel; (b) Rayleigh
 166 channel before correction; (c) Rayleigh channel after correction

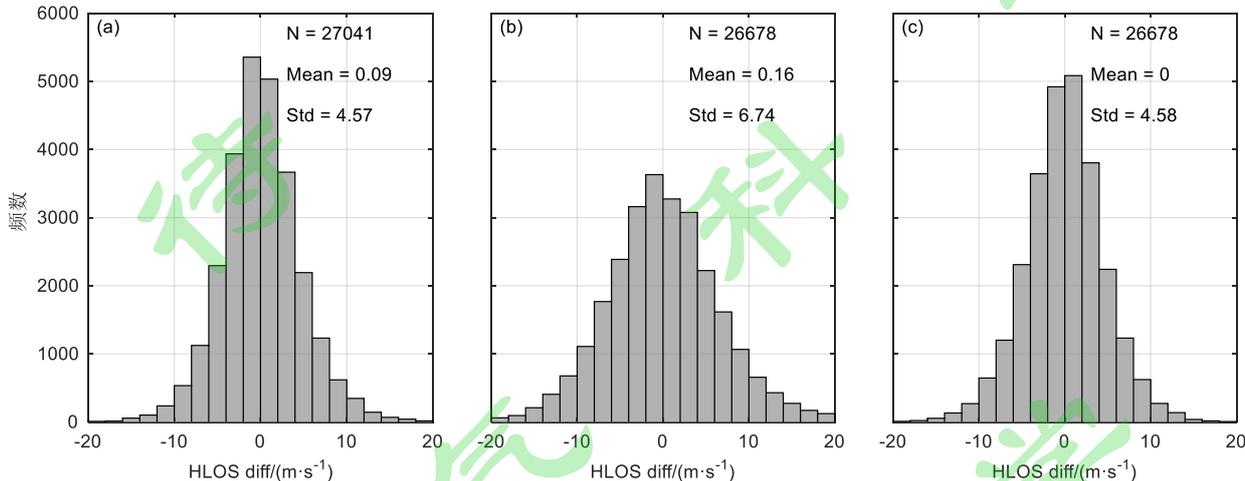
167 为进一步评价偏差订正方法效果，图 3 给出 Mie 通道和偏差订正前后 Rayleigh 通道观测背景差 $Diff$ 的概率分布直
 168 方图，并计算整体观测背景差 $Diff$ 均值（Mean）及均方差（Std）。由图 3 可知，Mie 通道 HLOS 资料 $Diff$ 分布基本满

169 足正态分布，峰值出现在零值附近，*Diff* 均值为 0.09 m/s，均方差为 4.57 m/s；订正前 Rayleigh 通道 *Diff* 均值为 0.16

170 m/s，其分布跨度较大，均方差达到 6.74 m/s。偏差订正后 Rayleigh 通道资料得到明显改善，零值附近资料数量显著增

171 多，样本分布跨度减小，其 *Diff* 均值为 0，均方差减小至 4.58 m/s。订正后 Rayleigh 资料与背景场更加接近，观测背景

172 差更加满足三维变分同化的无偏假设，证明了该偏差订正方法的有效性。



173

174 图 4 Aeolus 产品相对 ERA5 背景场中 HLOS 观测背景差的概率分布：(a) Mie 通道；(b) 订正前 Rayleigh 通道；(c)

175 订正后 Rayleigh 通道

176 Fig.4 Probability distribution of difference of HLOS data in Aeolus products against ERA5 background fields: (a) Mie channel;

177 (b) Rayleigh channel before correction; (c) Rayleigh channel after correction

178 图 4 统计了 Mie 和订正前后 Rayleigh 通道观测背景差 *Diff* 随高度分布。从图 4 可以看出，Mie 通道各高度层观测

179 背景差 *Diff* 的均值基本分布在零值附近，在 16 km 以上有较为明显的增大趋势，其最大值达到 3.70 m/s；10 km 以下

180 Mie 通道 *Diff* 均方差在 4 m/s 左右波动，10 km 以上均方差随高度的升高而增大，最大值达到 6.33 m/s。订正前 Rayleigh

181 通道各高度层观测背景差 *Diff* 均值在零值附近的波动较为明显，17-18 km 高度层中 *Diff* 存在明显偏差；订正后 Rayleigh

182 通道各层 *Diff* 均值为 0，均方差在 3-6 m/s 范围内，随高度的升高先增大后减小。对 Rayleigh 通道进行的偏差订正消除

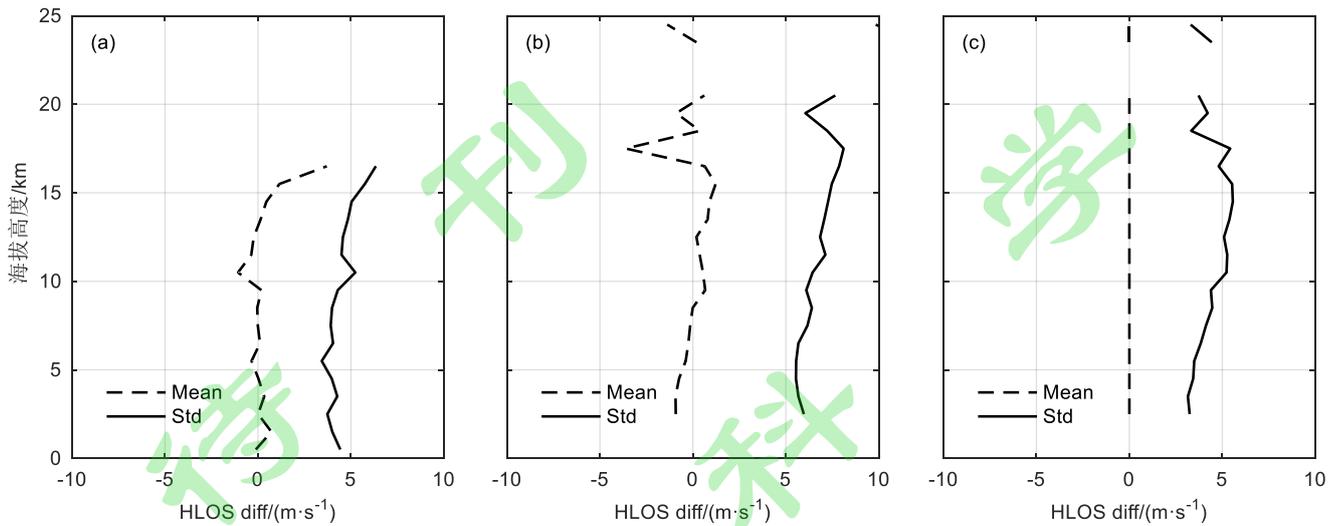
183 了各高度层观测背景差 *Diff* 的整体偏差，有效改善了 Rayleigh 通道 HLOS 观测质量，减小观测背景差均方差。

184 根据以上统计结果可知，Mie 通道和订正前 Rayleigh 通道 HLOS 资料基本满足三维变分同化的无偏假设，订正后

185 Rayleigh 通道 HLOS 偏差更小。当目标观测场与参考场不相关且假设参考场近似于真实大气值时，可以将目标观测相

186 对于参考场的均方根误差作为实际资料的观测误差值（庄照荣和薛纪善，2004；Gao et al., 2012）。对比 ERA5 资料，

187 计算 Aeolus-HLOS 资料与 ERA5 的观测背景差的均方差，作为同化所需的观测误差输入 WRFDA。



188

189 图 5 Aeolus 产品相对 ERA5 背景场中 HLOS 观测背景差的垂直分布：(a) Mie 通道；(b) 订正前 Rayleigh 通道；(c)
190 订正后 Rayleigh 通道

191 Fig.5 Vertical distribution of difference of HLOS data in Aeolus products against ERA5 background field: (a) Mie channel; (b)
192 Rayleigh channel before correction; (c) Rayleigh channel after correction

193 4 台风个例试验

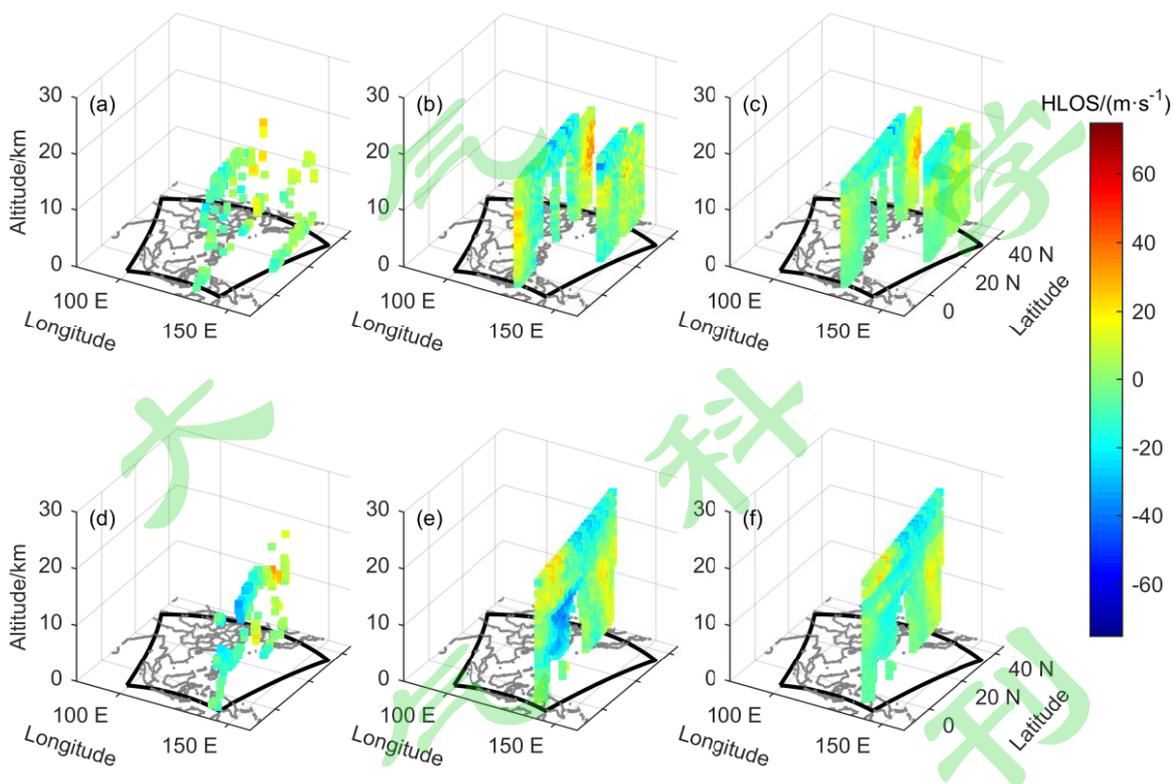
194 4.1 个例介绍

195 本文选取 2020 年第 4 号台风“黑格比 (Hagupit)”和 2019 年第 9 号台风“利奇马 (Lekima)”个例来探究同化
196 Aeolus 产品中 HLOS 资料对台风路径及强度预报的影响。台风“黑格比”于 2020 年 8 月 1 日 12 时在我国台湾岛以东
197 洋面加强为热带风暴，之后向西北移动，分别于 8 月 2 日 18 时和 8 月 3 日 06 时达到强热带风暴和台风等级，并继续
198 向我国浙江南部沿海靠近，台风强度继续加强。该台风在 8 月 3 日 12 时达到强台风等级，并于当日 19 时 30 分左右以
199 近巅峰强度在浙江省乐清市沿海登陆，登陆时中心气压 970 hPa，近中心最大风力等级为 13 级 (38 m/s)。登陆后台风
200 转为北向移动，受到浙江山地地形的影响，“黑格比”强度逐渐减弱，分别于 4 日 00 时和 4 日 09 时减弱为强热带风暴
201 和热带风暴。该台风纵穿浙江省及江苏省，4 日 22 时由江苏盐城进入黄海西部，转向东北移动，最终在朝鲜半岛以西
202 海域减弱消散。该台风造成我国 188 万人受灾，5 人死亡，直接经济损失约百亿元。台风“利奇马”则是在 2019 年 8
203 月 4 日 12 时达到热带风暴等级，并在 8 月 6 日 18 时达到台风等级。台风“利奇马”于 8 月 9 日 17 时 45 分在浙江温岭
204 市沿海登陆，登陆时中心气压为 930 hPa，近中心最大风力为 16 级 (52 m/s)。登陆后“利奇马”强度迅速减弱并转向
205 偏北方向移动。该台风登陆时间长、陆上滞留时间长、影响范围大并且对我国造成严重的灾害影响。

206 针对台风“黑格比”，选取 2020 年 8 月 2 日 00 时至 4 日 00 时，采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 NCEP GFS 预报资料作为模
207 式初始场和边界条件，设计了三组对比试验。Ctrl 试验为控制试验，不同化任何资料，利用 WRF 模式预报 48 h；

208 Aeolus 试验同化 Mie 和订正前 Rayleigh 通道 HLOS 资料，模式从 2 日 00 时积分 9 h 作为“spin up”，利用统计得到的 7
209 月观测误差，在 2 日 09 时同化 HLOS 资料，同化时间窗为 1 h，同化后继续预报 39 h 至 4 日 00 时。Aeolus-bias 试验同
210 化 Mie 和订正后 Rayleigh 通道 HLOS 资料，其余设置同 Aeolus 试验。对比三组试验结果，分析 HLOS 资料同化对台风
211 预报的影响。Aeolus 试验中 130 条廓线，共 813 个 HLOS 数据同化入模式，而 Aeolus-bias 试验则有 130 条廓线资料，
212 共 815 个 HLOS 数据进入模式。

213 而针对台风“利奇马”，选取 2019 年 8 月 8 日 00 时至 10 日 00 时，同样设计 Ctrl、Aeolus 和 Aeolus-bias 三组试
214 验，同化时间为 8 日 09 时，其余设置与“黑格比”个例相同。Aeolus 试验中 94 条廓线，共 681 个 HLOS 数据同化入
215 模式，而 Aeolus-bias 试验则有 97 条廓线资料，共 675 个 HLOS 数据进入模式。该台风个例中，观测误差利用 2019 年
216 7 月 HLOS 资料统计获得。



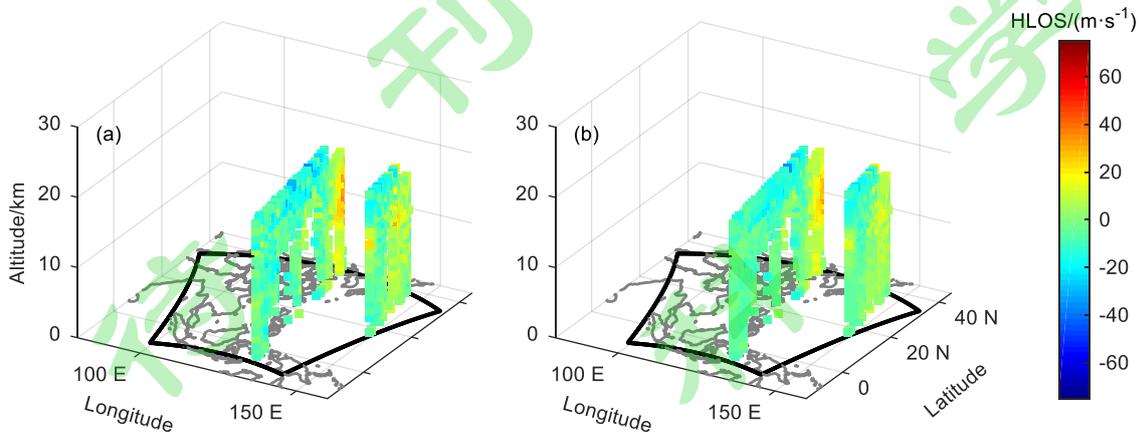
217
218 图 6 台风“黑格比” (a, b, c) 和“利奇马” (d, e, f) 个例中 HLOS 资料分布：(a, d) Mie 通道；(b, e) 订正前 Rayleigh 通
219 道；(c, f) 订正后 Rayleigh 通道

220 Fig.6 Data distribution of HLOS products in typhoon “Hagupit” (a, b, c) and “Lekima” (d, e, f): (a, d) Mie channel; (b, e) Rayleigh
221 channel before correction; (c, f) Rayleigh channel after correction

222 4.2 分析场增量特征分析

223 同化增量场是由同化分析场减去背景场得到，通过增量场可以观察到分析场相较背景场的变化情况，并由此判断
224 同化是否存在异常。为了探究同化对预报结果带来的影响，以台风“黑格比”为例，分析 2020 年 8 月 2 日 09 时的同

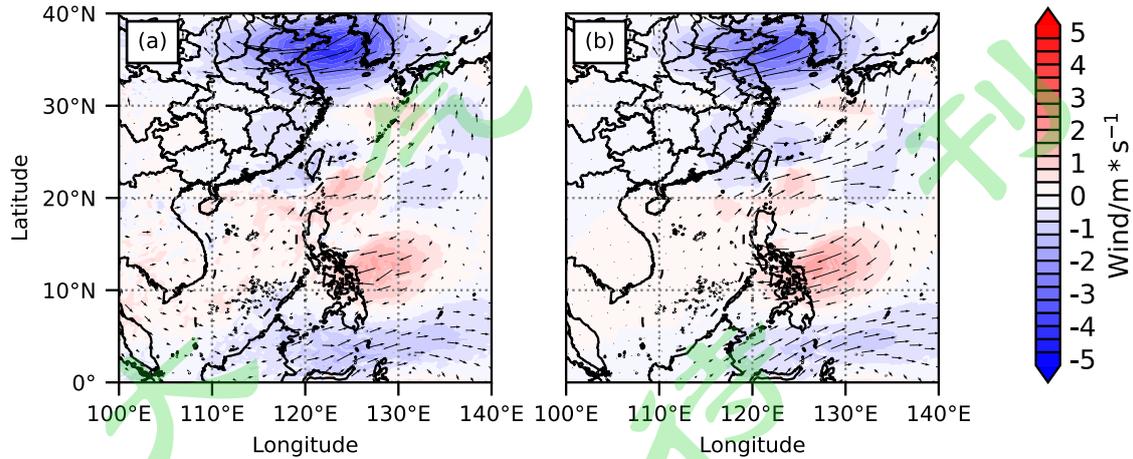
225 化结果，探究同化质控前后 Aeolus 资料对模式初始场的改进效果。图 7 给出 Aeolus 试验和 Aeolus-bias 试验中，同化
 226 入系统的 HLOS 资料分布情况。



227
 228 图 7 台风“黑格比”个例中同化入系统的 HLOS 资料分布：(a) Aeolus 试验，(b) Aeolus-bias 试验

229 Fig.7 Distribution of HLOS data assimilated into the system in typhoon “Hagupit”: (a) Aeolus, (b)Aeolus-bias

230 业务上分析引导气流时以 500 hPa 高度风场作为参考，为分析同化 HLOS 资料对初始场改进效果，给出 2020 年 8
 231 月 2 日 09 时，台风“黑格比”个例中 Aeolus 试验和 Aeolus-bias 试验分别对比 Ctrl 试验的 500 hPa 风场增量情况。从
 232 图 8 可以看出，两组试验在台风周围的风场增量较为相近，同化后在台风位置北方，即台湾岛东北处出现气旋性风场
 233 增量，台风周围有东北方向的风场增量，减弱了初始场中向西的引导气流，该风场增量形势可抑制台风西移，使台风
 234 路径向东偏移。

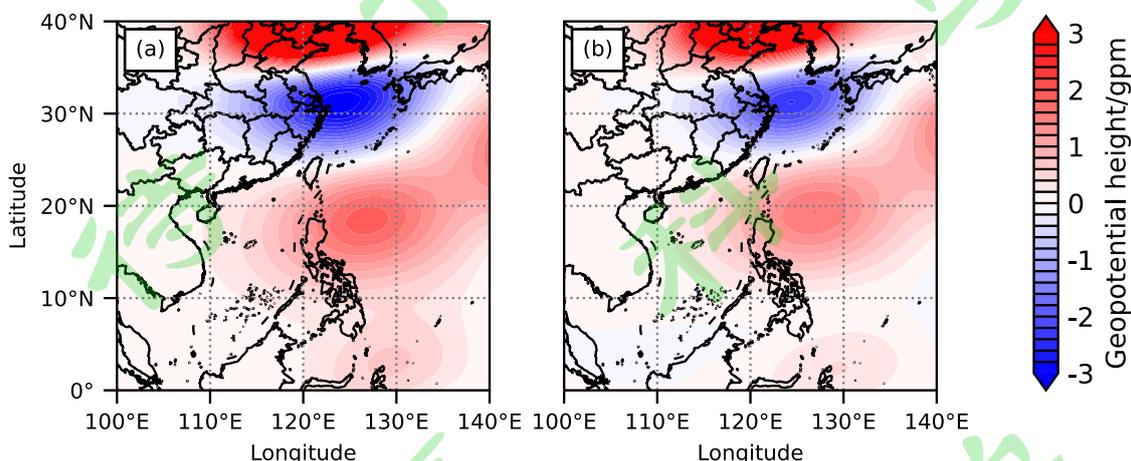


235
 236 图 8 2020 年 8 月 2 日 09 时台风“黑格比”500 hPa 风场增量场：(a) Aeolus 试验，(b) Aeolus-bias 试验

237 Fig.8 At 09:00 on August 2, 2020, the increment of 500 hPa wind of Typhoon “Hagupit”: (a) Aeolus, (b)Aeolus-bias

238 图 9 为 2020 年 8 月 2 日 09 时，台风“黑格比”个例中 Aeolus 试验和 Aeolus-bias 试验分别对比 Ctrl 试验的 500 hPa

239 位势高度场增量情况。该时刻两组试验位势高度增量同样具有相似的分布形势，同化 HLOS 资料对位势高度的改进主
240 要集中在模拟区域东部。同化后台风位置北部位势高度降低，有利于台风路径向北偏移，Aeolus-bias 试验位势高度降
241 低区域较 Aeolus 试验更小，可减小台风路径的北偏。



242
243 图9 2020年8月2日09时台风“黑格比”500 hPa位势高度增量场：(a) Aeolus 试验，(b) Aeolus-bias 试验

244 Fig.9 At 09:00 on August 2, 2020, the increment of 500 hPa geopotential height of Typhoon “Hagupit”: (a) Aeolus, (b) Aeolus-
245 bias

246 4.3 台风路径及强度预报误差

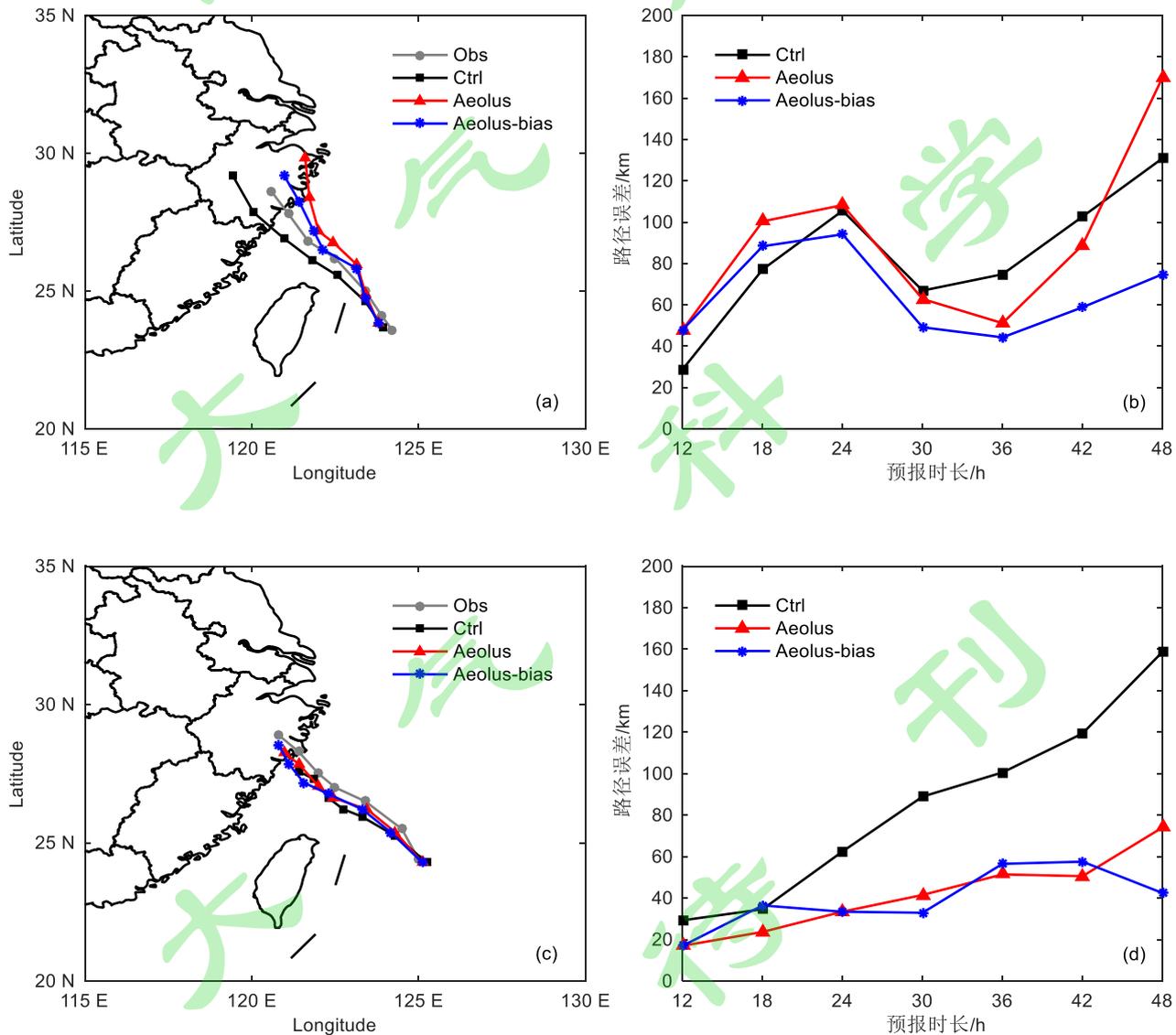
247 为揭示同化 Aeolus 产品中 HLOS 资料对台风“黑格比”和“利奇马”的路径及强度的影响，本文将中国台风网提
248 供的台风最佳路径数据集作为参考标准，比较 Ctrl 试验、Aeolus 试验和 Aeolus-bias 试验中，台风预报的路径及强度与
249 实际观测之间的差异。由于最佳路径资料未记录 2020 年 8 月 2 日 09 时台风观测，对 2 日 12 时开始每隔 6 h 的试验结
250 果进行对比，直至 4 日 00 时共 7 个时刻。同理，针对台风“利奇马”，对 2019 年 8 月 8 日 12 时开始，每隔 6 h 的试验
251 结果进行对比，直至 10 日 00 时。

252 图 10 (a, b) 为 Ctrl、Aeolus 和 Aeolus-bias 试验对台风“黑格比”的路径预报以及路径误差，Obs 则代表中国台风
253 网所记录的台风路径。未同化任何资料的 Ctrl 试验所预报台风路径位于实测路径的西侧，Aeolus 试验中同化未经偏差
254 订正的 HLOS 资料使预报路径向东北方向调整，但偏移量较大，导致 4 日 00 时的路径误差增大。而 Aeolus-bias 试验
255 中，同化偏差订正的 HLOS 资料减小了台风位置向东北方向的偏移，其预报路径最贴近实测，并且在 24-48 h 内路
256 径误差均为最小。Ctrl 试验在 12-48 h 内路径误差平均为 83.84 km，Aeolus 试验由于最后时刻对台风位置北移的高估，
257 路径误差平均为 89.94 km，比 Ctrl 试验增大了 6.10 km。Aeolus-bias 试验的路径误差平均仅为 65.37 km，比 Ctrl 试验减
258 小 18.47 km，最大减小 56.11 km。

259 图 10 (c, d) 给出 Ctrl、Aeolus 和 Aeolus-bias 试验对台风“利奇马”的路径预报和路径误差。Ctrl 试验预报路径位
260 于实际观测南部，并且预报的台风移动速度较慢。同化 HLOS 资料后，预报的台风移动速度有所加快，台风路径更加

261 接近于实测。该个例试验中，HLOS 的偏差订正对台风路径影响较小，12-42 h 内 Aeolus 和 Aeolus-bias 试验的路径误差
 262 差相差不到 13 km，而在 10 日 00 时，Aeolus-bias 试验预报的路径误差较 Aeolus 试验减小 31.63 km。在 12-48 h 内，
 263 Ctrl 试验路径误差平均为 84.89 km，Aeolus 试验路径误差平均为 41.70 km，较 Ctrl 试验减小 43.19 km，误差最大减小
 264 84.68 km。同化偏差订正后的 HLOS 资料可使路径偏差进一步减小，Aeolus-bias 试验路径误差平均为 39.50 km，较 Ctrl
 265 试验减小 45.39 km，最大减小 116.30 km。

266 由此可见，同化 HLOS 资料可对台风路径的预报做出一定的调整与改善。两个台风个例中，Aeolus-bias 试验在预报
 267 时段内的平均路径误差均小于 Aeolus 试验，同化偏差订正后的 HLOS 资料可进一步提高路径预报的准确性，使台风
 268 路径更加接近实测。



269
 270 图 10 台风“黑格比”(a, b)和“利奇马”(c, d)试验时段内的路径预报(a, c)及路径误差(b, d)

271 Fig.10 Track forecast (a, c) and track error (b, d) during typhoon “Hagupit” (a, b) and “Lekima” (b, d)

272 图 11 (a, b) 为 Ctrl、Aeolus 和 Aeolus-bias 试验对台风“黑格比”各时次的强度预报以及强度误差。在“黑格比”
273 台风个例中，未同化任何资料的 Ctrl 试验预报台风强度与实测相比误差较大。随着台风逐渐靠近陆地，实测台风强度
274 逐渐增强至 965 hPa，而 Ctrl 试验预报强度保持在 994 hPa 左右，未能模拟出台风强度近海加强和登陆后减弱的过程。
275 在 12-48 h 内，Ctrl 试验预报台风强度误差平均为 15.50 hPa。同化未进行偏差订正的 HLOS 资料的 Aeolus 试验中，预
276 报的台风强度有所调整，相比 Ctrl 试验更接近于实测，但同样未能模拟出 36-42 h 台风强度剧烈增强的过程。由于
277 Aeolus 试验中台风路径更加偏北，接近分析增量场中的位势高度负增量中心，因此 Aeolus 试验较同化偏差订正后
278 HLOS 资料的 Aeolus-bias 试验预报台风强度略有增强。Aeolus 试验在 12-48 h，其预报台风强度误差为 9.65 hPa，比
279 Aeolus-bias 试验减小 0.53 hPa。

280 图 11 (c, d) 则给出 Ctrl、Aeolus 和 Aeolus-bias 试验对台风“利奇马”各时次的强度预报和强度误差。预报 12 h
281 时，三组试验台风强度均与实测存在较大的偏差。随着台风移动，Ctrl 试验预报台风强度略有加强后快速减弱，与实
282 测间误差基本均大于 30 hPa，其预报台风强度误差平均为 32.80 hPa。同化 HLOS 资料的两组试验中，台风强度的减弱
283 幅度较小，更加贴近实测强度。同化偏差订正后 HLOS 资料的 Aeolus-bias 试验预报台风强度误差的平均为 20.79 hPa，
284 较 Ctrl 试验减小 12.01 hPa 并且比 Aeolus 试验误差减小 1.40 hPa。

285 总体而言，同化 HLOS 资料可以改善台风“黑格比”和“利奇马”预报效果，但是在台风发展为强台风时，强度
286 的改善效果并不明显。其原因为同化时刻台风内部的 HLOS 观测较少，对台风结构影响不大，而台风强度主要与台风
287 内部结构相关，因此强度改进较小。台风路径与环境场密切相关，同化 HLOS 资料后改善了模拟区域的风场，对台风
288 路径有积极的引导作用，所以台风路径的改进较为显著。

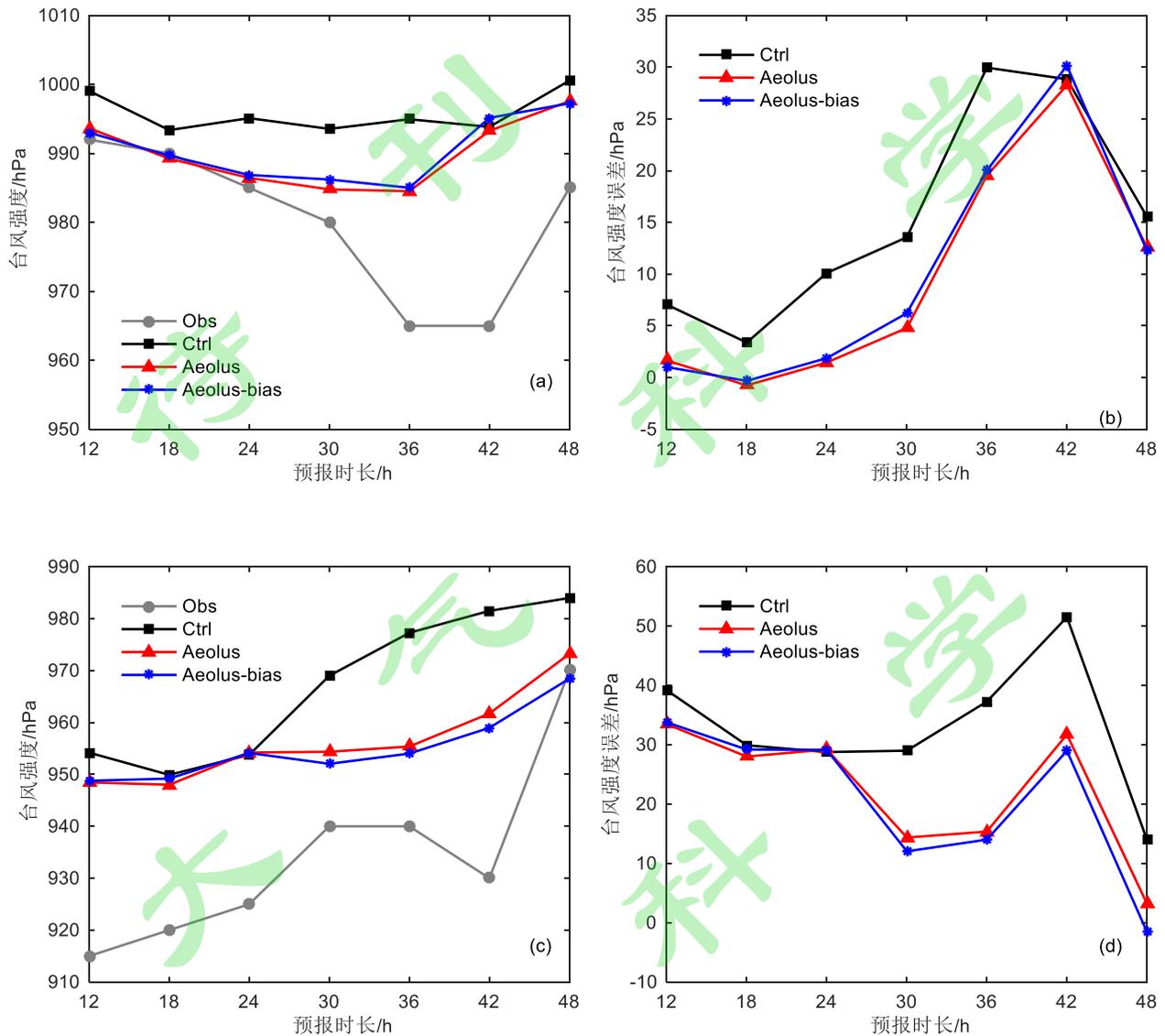


图 11 台风“黑格比”(a, b)和“利奇马”(c, d) 试验时段内的强度预报 (a, c) 及强度误差 (b, d)

Fig.11 Intensity forecast (a, c) and intensity error (b, d) during typhoon “Hagupit” (a, b) and “Lekima” (b, d)

5 结论

为探索同化 Aeolus 卫星资料对台风“黑格比”和“利奇马”预报的影响，本文基于 ERA5 再分析资料对质控后的 Aeolus HLOS 产品进行偏差订正，统计该产品的观测误差，并利用 WRF 模式和 WRFDA 同化系统，对 HLOS 资料进行同化和预报试验，综合分析试验的同化增量情况、台风路径和台风强度，结果表明：

(1) 通过对比质控后的 Aeolus 产品与 ERA5 再分析资料，Mie 通道和偏差订正处理后的 Rayleigh 通道 HLOS 观测均较为合理，Rayleigh 通道观测背景差均值和均方差得到减小，接近高斯分布，满足同化的应用需求。

(2) Aeolus 产品的观测背景差存在较为明显的垂直结构特征，其中 Mie 通道 HLOS 观测背景差在 10 km 以下变

299 化较小, 10 km 以上则随高度逐渐增大; 订正后 Rayleigh 通道观测得到改善, 各高度层 HLOS 观测背景差均值为零,
300 均方差随高度先增大后减小。将 Mie 和 Rayleigh 通道观测背景差的均方差作为同化所需的观测误差。

301 (3) 在台风“黑格比”和“利奇马”个例中, 同化 Aeolus 产品对模式风场有较好的调整作用, 可改善试验区域
302 的环境场。风场增量能够有效地抑制台风路径的偏移, 有利于改进台风路径预报。位势高度场的改进较不明显, 其增
303 量主要集中于区域右上角, 台风北部负增量和南部正增量的形势同样对台风路径起到调整作用。

304 (4) 台风路径与环境场密切相关, 而台风强度则与其内部结构有关。在台风“黑格比”和“利奇马”个例中,
305 同化 Aeolus 产品改善了环境风场, 对台风路径的改进较为明显, 由于台风内部资料较少, 对台风内部结构的影响不是
306 很大, 一定程度上改进了台风强度预报。

308 参考文献

- 309 Belova E, Kirkwood S, Voelger P, et al. 2021. Validation of Aeolus winds using ground-based radars in Antarctica and in
310 northern Sweden [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(8): 5415-5428. doi: 10.5194/amt-2021-54.
- 311 陈锋, 董美莹, 冀春晓. 2017. 不同资料同化对登陆台风菲特(2013)短时预报的影响研究 [J]. *气象*, 43(09):1029-1040.
312 doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.001. Chen F, Dong M Y, Ji C X. 2017. Relative Impact from Surface,
313 Radiosonde, Aircraft, Satellite, and Radar Observations on Short-Time Forecasting for Typhoon Fitow (2013) at
314 Landfall [J]. *Meteorological Monthly*, 43(09):1029-1040. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.001.
- 315 Chen S, Cao R, Xie Y, et al. 2021. Study of the seasonal variation in Aeolus wind product performance over China using
316 ERA5 and radiosonde data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(15): 11489-11504. doi: 10.5194/acp-21-
317 11489-2021.
- 318 Erik A, Alain D, Martin E, et al. 2008. ADM-Aeolus science report [R]. ESA SP-1311. 130.
- 319 Gao F, Jacobs N A, Huang X Y, et al. Estimation of TAMDAR observational error and assimilation experiments[J]. *Weather
320 and forecasting*, 2012, 27(4): 856-877. doi: 10.1175/waf-d-11-00120.1
- 321 Garrett K. 2020. Evaluation of Aeolus L2B data quality and impact on NOAA global NWP [C]// Aeolus Cal/Val and Science
322 Workshop 2-6 November 2020.
- 323 Guo J, Liu B, Gong W, et al. 2021. Technical note: First comparison of wind observations from ESA's satellite mission
324 Aeolus and ground-based radar wind profiler network of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(4): 2945-
325 2958. doi: 10.5194/acp-2020-869.
- 326 Hauchecorne A, Khaykin S, Wing R, et al. 2020. Validation of ESA Aeolus wind observations using French ground-based
327 Rayleigh Doppler lidars at midlatitude and tropical sites [C]// EGU General Assembly 2020.
328 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-19786>, 2020.
- 329 康斌. 2016. 我国台风灾害统计分析[J]. *中国防汛抗旱*, 26(02):36-40. doi: 10.16867/j.cnki.cfdm.2016.02.010. Kang B.
330 2016. Statistical Analysis of Typhoon Disasters in China [J]. *China Flood and Drought Management*, 26(02):36-40.
331 doi: 10.16867/j.cnki.cfdm.2016.02.010.
- 332 Kloe J D, Tan D, Andersson E, et al. 2016. ADM-Aeolus Level-2B/2C Processor Input/Output Data Definitions Interface
333 Control Document [R]. AE-IF-ECMWF-L2BP-001. 96.
- 334 刘瑞, 翟国庆, 王彰贵, 等. 2012. FY-2C 云迹风资料同化应用对台风预报的影响试验研究 [J]. *大气科学*, 36(02):350-

335 360. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11052. Liu R, Zhai G Q, Wang Z G, et al. 2012. Impact of Application of
336 Cloud Motion Wind Data from FY-2C Satellite on Simulation of Typhoon Cases [J]. Chinese Journal of Atmospheric
337 Sciences, 36(02):350-360. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11052.

338 Liu B, Guo J, Gong W, et al. 2021. Intercomparison of wind observations from ESA's satellite mission Aeolus, ERA5
339 reanalysis and radiosonde over China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics. doi: 10.5194/acp-2021-41.

340 Martin A, Weissmann M, Reitebuch O, et al. 2021. Validation of Aeolus winds using radiosonde observations and numerical
341 weather prediction model equivalents [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 14(3): 2167-2183. doi:
342 10.5194/amt-14-2167-2021.

343 Reitebuch O. 2012. The Spaceborne Wind Lidar Mission ADM-Aeolus [M]. Schumann U. Atmospheric Physics: Heidelberg,
344 Berlin: Springer, 815-827.

345 Reitebuch O, Huber D, Nikolaus I. 2018. ADM-Aeolus Algorithm Theoretical Basis Document ATBD Level1B Products
346 [R]. AE-RP-DLR-L1B-001. 117.

347 Reitebuch O, Marksteiner U, Weiler F, et al. 2019. The Aeolus Data Innovation and Science Cluster DISC - Overview and
348 First Results [C]// ESA Living Planet Symposium 2019.

349 Reitebuch O, Lemmerz C, Lux O, et al. 2020. Initial Assessment of the Performance of the First Wind Lidar in Space on
350 Aeolus [C]// The 29th International Laser Radar Conference (ILRC 29), EPJ Web of Conferences. doi:
351 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023701010>.

352 Rennie M. 2018. An assessment of the expected quality of Aeolus Level-2B wind products[C]// The 28th International
353 Laser Radar Conference (ILRC 28), EPJ Web of Conferences. doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817602015>

354 Rennie M and Isaksen L. 2020a. The NWP impact of Aeolus Level-2B Winds at ECMWF [R]. ECMWF Technical
355 Memoranda No 864. 110.

356 Rennie M, Tan D, Andersson E, et al. 2020. Aeolus Level-2B Algorithm Theoretical Basis Document [R]. Tech. Rep. AED-
357 SD-ECMWF-L2B-038. 124.

358 Rennie M and Isaksen L. 2020b. An Assessment of the Impact of Aeolus Doppler Wind Lidar Observations for Use in
359 Numerical Weather Prediction at ECMWF [C]// EGU General Assembly 2020. doi:
360 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5340>.

361 Stoffelen A, Pailleux J, Källén E, et al. 2005. The Atmospheric Dynamics Mission for Global Wind Field Measurement
362 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(1), 73-88. doi: 10.1175/BAMS-86-1-73.

363 Straume A G, Rennie M, Isaksen L, et al. 2020. ESA's Space-Based Doppler Wind Lidar Mission Aeolus – First Wind and
364 Aerosol Product Assessment Results [C]// The 29th International Laser Radar Conference (ILRC 29), EPJ Web of
365 Conferences. doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023701007>.

366 王丹, 阮征, 王改利, 等. 2019. 风廓线雷达资料在 GRAPES-Meso 模式中的同化应用研究 [J]. 大气科学, 43(03):634-
367 654. Wang Dan, Ruan Zheng, Wang Gaili, et al. 2019. A study on assimilation of wind profiling radar data in
368 GRAPES-Meso model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 634-654. doi:
369 10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18125.

370 Weiler F, Kanitz T, Wernham D, et al. 2021. Characterization of dark current signal measurements of the ACCDs used on-
371 board the Aeolus satellite [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 14: 5153-5177. doi:
372 <https://doi.org/10.5194/amt-14-5153-2021>.

373 Witschas B, Lemmerz C, Geiß A, et al. 2020. First validation of Aeolus wind observations by airborne Doppler wind lidar
374 measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 13: 2381-2396. doi: <https://doi.org/10.5194/amt-13-2381->

2020.

Zhang F, Wang Y, Gamache J F, et al. 2011. Performance of convection-permitting hurricane initialization and prediction during 2008-2010 with ensemble data assimilation of inner-core airborne Doppler radar observations [J]. Geophysical Research Letters, 38(15):98-106. doi: 10.1029/2011GL048469.

庄照荣, 薛纪善. 2004. 云迹风资料的三维变分同化及对台风预报的影响试验 [J]. 热带气象学报, 20(3): 225-236.
Zhuang Z R, Xue J S. 2004. Assimilation of cloud-derived winds and its impact on typhoon forecast [J]. J Trop Meteor, 20(3): 225-236.

气

科

风

学

大

学

学

刊

学

报