

# 雾霾天激光雷达测温数据拼接方法

李博<sup>1,2</sup>, 魏红霞<sup>1</sup>, 赵亮<sup>3</sup>, 王玉峰<sup>1</sup>, 华灯鑫<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

<sup>3</sup>中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 为解决雾霾天气条件下激光雷达探测温度高度偏低的难题, 研究了一套数据拼接方法。该方法引入高分辨 WRF(weather research and forecasting model)模式模拟温度, 与激光雷达测温数据进行拼接, 通过拟合区域选取、分析高度层确定、拼接数据校正、最佳拼接区域选取、拼接效果评估等关键技术设计, 将雾霾天激光雷达探测数据高度由 2 km 向上拓展至整个对流层并到达平流层中低部区域, 即 20 km 左右高度。对拼接结果的综合质量评估表明, 激光雷达与模式数据拼接效果较好, 拼接廓线与标准廓线的吻合度较高, 且最大相对误差为 1.5%。特别是在最佳拼接区域内, 激光雷达数据与模式数据具有很高的拟合度。本方法利用模式数据与雷达数据的互补优势, 实现了温度廓线大量层、高质量数据重构。本文拼接方法同样适用于其它复杂天气条件。

**关键词** 遥感; 雾霾; 激光雷达测温; 模式温度; 数据拼接

中图分类号 P41

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0928003

## Data Splicing Method for LiDAR Detection Temperature Under Fog-Haze Condition

Li Bo<sup>1,2</sup>, Wei Hongxia<sup>1</sup>, Zhao Liang<sup>3</sup>, Wang Yufeng<sup>1</sup>, Hua Dengxin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** In this study, a novel method for splicing LiDAR temperatures was proposed to solve the problem of low LiDAR detection heights when fog-haze conditions were encountered. Accordingly, a typical fog-haze case was selected as the research sample. High-resolution weather research and forecasting (WRF) model temperatures were specifically used to splice LiDAR temperatures. The splicing method focused on key technologies, including a fitting region selection technique, a coordinate height layer analysis method, a correction method between model data and LiDAR data, an optimal splicing region selection method, and an evaluation method for splicing results. The maximum height of splicing data was extended to approximately 20 km, including the entire troposphere and the lower-middle stratosphere. This was especially larger than the original height of the LiDAR data (2 km). According to a series of detailed quality assessments, the splicing data were very reliable, with a perfect match trend between the splicing profile and the standard profile and a maximum error of less than 1.5%. There was a better fit between LiDAR data and model data in the optimal splicing region. The advantages of both model data and LiDAR data were fully exploited in the proposed splicing method. Based on this, the data with a larger detection layer and high-quality temperature profile was reconstructed. Moreover, the proposed splicing method was also suitable for other complex weather conditions.

**Key words** remote sensing; fog-haze; lidar detecting temperature; model temperature; data splicing

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-12-22; 录用日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(41627807)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JQ5176)、灾害天气国家重点实验室基金项目

\* E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

## 1 引 言

当前激光雷达已可实现对大气温度的高垂直分辨探测<sup>[1]</sup>。然而,当激光雷达遭遇到雾霾、沙尘等复杂天气时,信号急剧衰减会导致探测高度迅速降低。这种复杂天气条件下激光雷达探测高度受限既是广大学者所共同面对的问题,又是深入应用激光雷达数据所不可规避的问题。这是因为在复杂天气研究中,不仅需要分析低层数据,而且也需要分析中高层数据。以近年严重威胁人类安全的雾霾天为例,对流层中高层冷空气的侵袭对其消散至关重要<sup>[2]</sup>。因此,有必要探明雾霾期间中高层大气温度廓线的变化特征。为此,本文提出模式模拟温度与激光雷达探测温度的拼接方法,用以重构复杂天气条件下的测量层数较大的温度廓线数据。

与无线探空仪、微波辐射计、电声测温系统、飞机或火箭、卫星遥感等探测方式相比<sup>[3-5]</sup>,激光雷达的测温优势一方面在于测温廓线分辨率高,可在垂直空间内 3.75 m 左右提供一组数据,另一方面在于其单色性较好、方向性较强,可有效避免高空漂移造成的探测误差。从理论上讲,瑞利散射激光雷达、差分吸收激光雷达、高光谱分辨率激光雷达、振动拉曼激光雷达、转动拉曼激光雷达等均可探测大气温度的<sup>[6-8]</sup>。当前国内外众多研究单位已相继实现了激光雷达的大气温度探测,其中西安理工大学设计出的振动-转动拉曼激光雷达系统可实现大气温、湿度同步探测<sup>[9]</sup>,并且针对该系统又专门研发了测温数据综合多级质量控制系统<sup>[10]</sup>,可确保探测温度的准确可靠。

与上段常规探测和激光雷达探测相比,大气数值模式的优势一方面在于分辨率高,当前水平网格距可达 10 km 以内,可确保对局地小区域的精准模拟,而且在增加侧边界层后垂直分辨率可加密至 50 层以上<sup>[11-13]</sup>,另一方面在于模式数据垂直高度高,在任何天气条件下均可达 20 km 以上,即可穿过整个对流层到达平流层中低部的高度范围。近年来,随着模式参数化方案的不断完善与同化方法的逐渐成熟<sup>[14-16]</sup>,模拟结果的可靠性得到业内普遍认可,因此数值模式已成为当前气象领域非常先进的研究手段。国际上用于科学研究的高分辨中尺度模式包括经典的 MM5 (5th generation NCAR/Penn State mesoscale model)<sup>[17]</sup>,以资料同化见长的

ARPS(Advanced Regional Prediction System)<sup>[18]</sup>,以及近些年发展迅速的 WRF (Weather Research and Forecasting Model)<sup>[19]</sup>等。近 20 年我国科学家经过不懈努力,陆续研发了具有自主知识产权的以 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System)为代表的多套模式系统,不断缩小与发达国家数值模式的差距。上述这些模式可根据研究需求分别模拟城市、区域、全球等不同尺度范围的天气过程,由此提供时空序列完整的、种类丰富的高分辨率四维大气数据集<sup>[20]</sup>。

本文以复杂天气条件为背景,以典型雾霾过程为突破,介绍了一种基于雷达温度与模式温度的拼接方法。该方法可将激光雷达温度廓线向上拓展至 20 km,为探索雾霾特征及其可能成因提供了高垂直分辨、高探测高度的数据支撑。

## 2 资料与方法

### 2.1 WRF 模式模拟参数调试

借助 2018 年 6 月发布的最新版 WRF\_V4.0(以论文写作时间为参考)开展模拟,并对模拟效果进行检验与评估,如果模拟效果不理想,需重新调试模式参数并再次开展模拟。表 1 给出了最终选定的模式参数,模拟采用的双重双向嵌套区域为 D01 与 D02,其中 D01 中心网格点设为西安理工大学激光雷达测站(109°E, 34.25°N),并由 D01 作为母区域对 D02 进行反馈,以保证更好的模拟效果。双重网格距水平空间分辨率分别取为 9 km 和 3 km,在增

表 1 WRF 模式参数

Table 1 Parameters for WRF model simulation

Parameter	D01	D02
Input data	NCEP	
Central grid	109°E, 34.25°N	Nested region
Longitude	84-134°E	106-112°E
Latitude	24.25-44.25°N	31.25-37.25°N
Horizontal resolution	9 km	3 km
Vertical resolution	59 levels	
Time resolution	30 min	
Microphysics parameterization	Goddard GCE	
Cumulus convection parameterization	Kain-Fritsch	None
Integration time (UTC)	2013-12-15T00:00:00 to 2013-12-31T12:00:00	

加侧边界层后将垂直空间分辨率加密至 59 层,时间分辨率为 30 min,模拟时段涵盖整个雾霾过程:北京时间(UTC)2013 年 12 月 15 日 00 时至 31 日 12 时。以 NCEP (National Centers Environmental Prediction) 再分析资料为初始场,双重区域选 Goddard GCE 微物理方案, D01 选浅对流 Kain-Fritsch 积云参数化方案, D02 忽略积云方案。分析数据均采用分辨率更高的 D02 内网格数据。

### 2.2 测温激光雷达系统及 10 个标定方程温度反演新方法

西安理工大学自主研发的用于温度探测的转动拉曼激光雷达系统可实现 5 个独立光通道信号的精细分光。其中第 4、5 通道信号分别为高、低两路转动拉曼散射信号。有关该套探测系统的详细介绍请参见文献[9]。与激光雷达探测系统配套的温度反演新算法采用 10 个方程对原始探测信号进行标定<sup>[10]</sup>,并利用氮气分子散射强度与温度之间的特定依赖关系实现大气温度反演。对反演结果的对比检验表明,这种新算法在刻画温度廓线细节上更具优势,反演误差比传统采用 3 个标定方程时的误差小 2 K 以上。

### 2.3 廓线数据拼接方法

模式数据与雷达数据是具有不同垂直分辨率的两类廓线,根据它们的特点设计了细致的拼接流程(图 1),关键包含 5 个步骤:1)在一段垂直高度上确定拟合区域,拟合区域内激光雷达温度和 WRF 温度有较高的重合度,根据两类数据特点,拟合区域最高点、最低点分别由雷达数据最高点、WRF 数据最低点确定。2)雷达数据与模式数据垂直分辨率不同,造成数据高度层并非完全匹配,若只考虑严格意义上的对等高度层温度数据,则可用于拼接的层数较少,因此需借鉴近似对等高度法(Peer to Peer height, P2P)<sup>[10]</sup>确定两类数据的分析高度层。3)引入我国气象台站常规探空数据(radiosonde data)作为标准数据,通过相对误差分析选取误差较大的一类数据,将其按等步长向另一类数据平移<sup>[21]</sup>(步长取值将在后文讨论),由此实现雷达数据与 WRF 数据的检验并校正,以确保获取最佳拼接数据。4)利用多种误差统计与分析法<sup>[22]</sup>(拼接千米偏差、拟合千米偏差、相关系数)确定最佳拼接区域判定标准,并据此在拟合区域中自动搜索出最佳拼接区域。5)在上述基础上开展拼接并进行效果评估,分别对雷达温度和 WRF 温度进行线性拟合,对拟合后的两类温度进行拼接:利用雷达低探测盲区的优势,

0.4 km 到最佳拼接区域最低点采用拟合后的雷达温度;最佳拼接区域采用校正后的雷达温度与 WRF 温度的平均值,以保证拼接数据的平滑;利用复杂天气条件下模式数据高模拟高度的优势,最佳拼接区域最高点以上采用 WRF 温度。

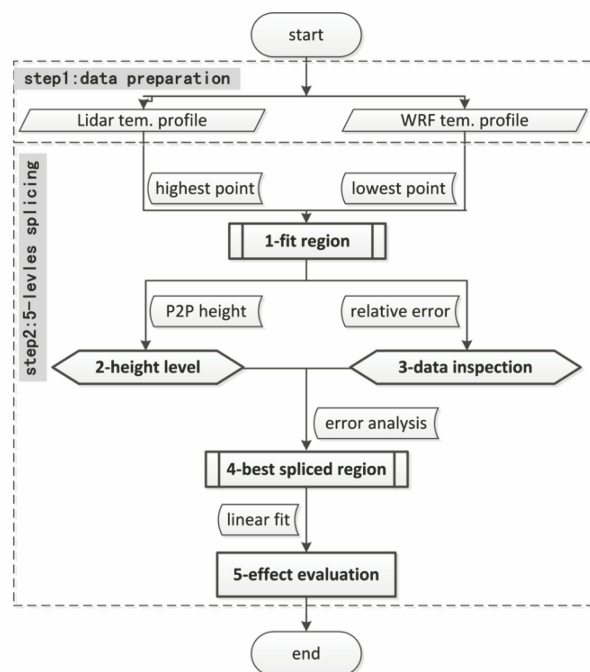


图 1 数据拼接流程

Fig. 1 Flow chart of data splicing

经过以上 5 个步骤后的拼接温度既包含雷达低层数据,又兼顾模式高层数据,同时通过误差分析来保证拼接的准确与可靠,通过两种千米偏差来评估两类数据的匹配程度。拼接千米偏差是两类数据在拼接区域线性拟合后的每千米偏差程度,拼接区域拟合后,将拟合系数用于整个拟合区域。拟合千米偏差是两类数据在拟合区域拟合后的每千米偏差程度。这两种千米偏差的计算公式为

$$D = \frac{\sum_{i=m}^n \left[ \frac{|X_i - (a \times Y_i + b)|}{X_i} \right]}{(n - m) \times \frac{\Delta h}{1000}}, \quad (1)$$

式中: $X_i$ 、 $Y_i$  分别为第  $i$  个点的模式温度与雷达温度; $a$ 、 $b$  为线性拟合系数; $\Delta h$  为雷达垂直分辨率; $n$  和  $m$  为拟合区域内的最高点与最低点; $(n - m) \times \frac{\Delta h}{1000}$  是将偏差归一到每米,便于对比分析。当  $n$ 、 $m$  取拟合区域的最高点与最低点时,可求拟合千米偏差;当  $n$ 、 $m$  取拼接区域的最高点与最低点时,可求拼接千米偏差。

最佳拼接区域是两类廓线数据匹配与拼接的关

键区域,将通过严谨的评判流程选取:1)选相关系数大于  $A$  的区域;2)选拼接千米偏差小于  $B$  的区域;3)当1)和2)均满足时,两类数据在拼接区域已可较好地匹配,为使它们在整体拟合方面也表现较好,还需在此基础上对拟合千米偏差进行排序,考虑模式数据与雷达数据的垂直分辨率匹配程度,选出最小的3组偏差区域;4)在所选的3组最小拟合千米偏差区域中,取拟合范围最大者为最佳拼接区域,以确保模式与雷达数据具有尽可能多的有效对等高度层。其中  $A$ 、 $B$  分别为相关系数、拼接千米偏差的判定标准,它们的取值将在后文讨论。

### 3 研究过程

#### 3.1 用于拼接的典型雾霾个例选取

2013年,雾霾成为年度关键词。中国500个大中城市中仅有不到1%达到世界卫生组织规定的健康空气质量标准,而世界上污染最严重的10个城市中,有7个在中国。2013年下半年,西安雾霾持续升级,特别是12月18日,AQI (air quality index)以500爆表,空气质量污染指数位列全国污染严重城市排行榜第一。可见这是一次非常典型的雾霾过程,本文以此为例开展拼接方法研究。结合能见度与环境质量监测数据时间演变序列分析表明(图2),本次雾霾发生时段为12月16日至25日,从18日开始进入重度霾污染期,最差能见度不足百米。

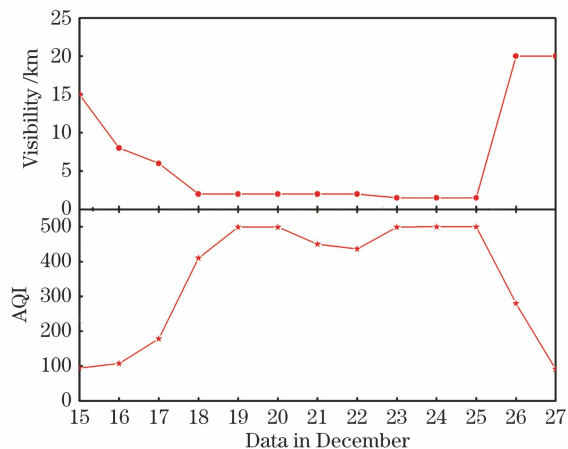


图2 典型雾霾发生前后西安地区能见度与空气质量指数  
Fig. 2 Visibility and AQI before and after the typical fog-haze case in Xi'an

#### 3.2 重度霾时刻温度拼接过程

本节以2013年12月21日20时重度霾时刻为例介绍数据拼接过程。

图3给出了此时刻雷达温度廓线、模式温度廓线与标准温度廓线的定性对比,结合激光雷达特点,

本文取0.4 km以下为探测盲区。模式温度廓线从底层[图3(a)]到高层[图3(b)]均与标准温度廓线吻合较好。激光雷达遇雾霾天在2 km以上并无探测结果[图3(b)],但探测高度较低的激光雷达温度也与标准温度趋势基本一致[图3(a)]。可见参与拼接的模式温度与激光雷达温度(这两类温度统称“拼接温度”)均具有较好的可靠性。

更细致地对比分析图3可揭示各类数据的优势:不受雾霾天气影响,模式数据可穿过整个对流层并到达平流层中低部高度(20 km左右),常规探空数据高度要低一些(16 km左右),而雾霾天激光雷达数据探测高度最低(仅为1.4 km);激光雷达数据的优势在于垂直分辨率高(约3.75 m),而常规探空数据仅提供了10个标准层的温度,模式数据经加密后垂直分辨率远高于探空数据(59层,图3中的点表示对应的数据层)。可见,有必要充分利用两类数据的优势,开展雷达数据与模式数据的拼接。通过数据拼接/重构实现温度廓线测量层数的拓展。根据2.3节选取0.66~1.41 km[图3(a)虚线区域]为拟合区域。

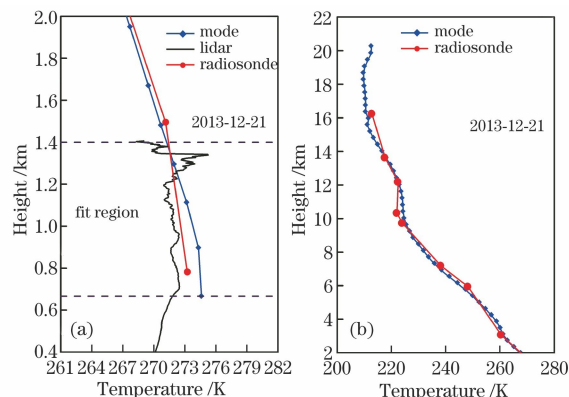


图3 模式温度、雷达温度与标准温度廓线定性对比。  
(a) 2 km以下;(b) 2~20 km

Fig. 3 Qualitative analysis of the temperature profile during model data, lidar data and radiosonde data. (a) <2 km; (b) 2~20 km

图3已定性表明拼接温度与标准温度具有较好的吻合趋势。图4中通过量化分析进一步表明,两类拼接数据与标准数据的相对误差较小,其中激光雷达数据最大误差小于2%,误差范围为0~2%(为方便观察,本文误差图一律作居中处理),出现在1.3~1.4 km之间,这可能是由于激光雷达遇到强霾天气信号衰减所致,模式数据最大误差小于1.5%,误差范围为0~1.5%。总体而言,定性分析与定量分析共同表明参与拼接的两类数据质量较为可靠。

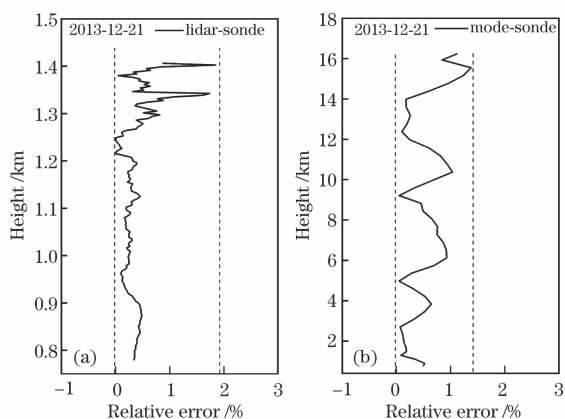


图 4 拼接数据与标准数据相对误差定量分析。

(a) 雷达与标准温度。(b) 模式与标准温度

Fig. 4 Quantitative analysis of the splicing data and radiosonde data on relative error. (a) Between lidar data and radiosonde data; (b) between model data and radiosonde data

更细致地对比图 4 可以发现,相比于激光雷达数据[图 4(a)],模式数据误差分布更为均匀,且整体误差值相对更小[图 4(b)]。因此,根据 2.3 节,可知需对激光雷达数据进行等步长平移的校正。校正步长需通过实验选取:分别以 11 组步长(0、±0.2、±0.4、±0.6、±0.8、±1.0)向模式数据移动,分析不同移动距离对应的雷达数据与模式数据的相对误差(图 5)。由图 5 可见,当步长取 0.4 时误差达到最小(虚线),据此选 0.4 K 为校正步长。

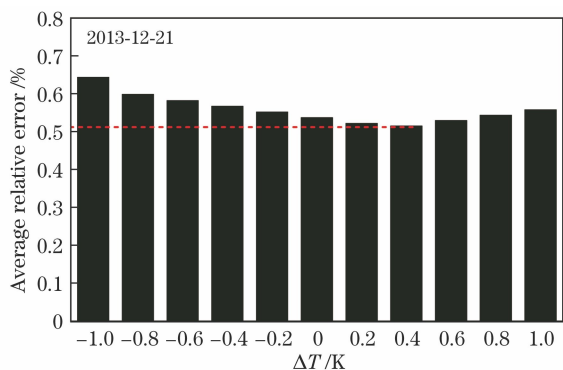


图 5 11 组步长对应的相对误差

Fig. 5 Relative error corresponding to 11 groups of step sizes

接下来确定最佳拼接区域的判定标准。需随机选取 2013 年 12 月雾霾期间 4 组样本开展实验。在备选的 20 组拼接区域中,对应的相关系数与拼接千米偏差如图 6 所示。由图 6(a)可表明,多数相关系数分布于 0.85~1.00 之间(阴影),结合相关系数显著性检验法<sup>[23]</sup>,取评判标准 A 为 0.85 时就可去除不相关拼接区域。文献[22]表明雷达数据垂直分辨

率为 3.75 m,每千米约 270 个点,当每点垂直位置偏差为 1%、2%、3%、4%时,对应的拼接偏差值分别为 2.7、5.4、8.1 和 10.8。而由图 6(b)表明,拼接千米偏差主要分布于 0~2.7 之间(阴影)。结合这两方面,取评判标准 B 为 2.7,此时对应的每点偏差为 1%,可确保两类数据间有较好的匹配效果与精度。

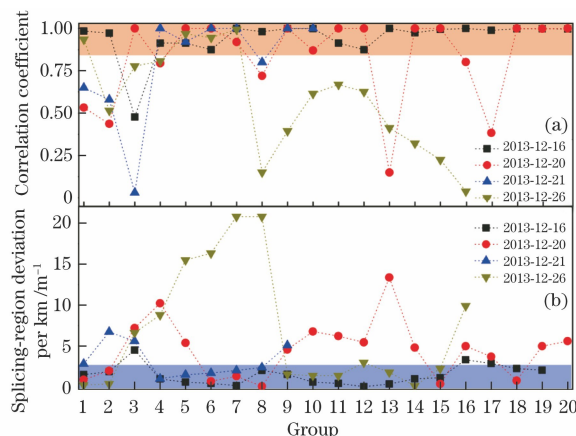


图 6 基于 4 组样本 20 组拼接区域的评判标准。

(a) 相关系数;(b) 拼接千米偏差

Fig. 6 Judgment criteria for based on 20 groups of splicing-regions in 4 groups of samples. (a) Correlation coefficient; (b) splicing-region deviation per km

根据上段确定的最佳拼接区域评判标准( $A \geq 0.85, B \leq 2.7$ ),继续以 12 月 21 日重度霾时刻为例介绍拼接算法,下一步需在众多区域中确定最佳拼接区域。图 7 是 21 日雷达数据与模式数据在 9 组不同备选区域中对应的相关系数、拼接千米偏差和拟合千米偏差:通过相关系数评判,有第 4、5、6、8、9 共 5 组备选区域符合标准 A[图 7(a),阴影];通过拼接千米偏差评判,有第 4~8 共 5 组备选区域符合标准 B[图 7(b),阴影];同时符合标准 A、B 的备选区域有 4 组(第 4、5、6、8 组);下一步拟合千米偏差的选取在这 4 组样本之间展开,取最小的 3 组拟合千米偏差(但是恰巧第 4 组和第 5 组数据相等),故选取结果为第 4、5、6、8 组[图 7(c),阴影];最后,在选取三重评判标准后,取第 4、5、6、8 组中区域范围最大者为最佳拼接区域,结果为第 4 组(图 7 虚框所示),即确定出 0.89~1.41 km 为两类数据最佳拼接区域。

在上述选定的最佳拼接区域内,根据 2.3 节方法继续开展拼接。图 8 是重度霾时刻温度最终拼接结果,可初步判定模式数据与雷达数据实现了较好的拼接:从整层拼接温度(实线)与标准温度(虚线)

的廓线定性对比分析结果[图 8(a)]可知,两者廓线趋势基本吻合;从整层拼接温度与标准温度相对误差的定量分析结果[图 8(b)]可知,两者最大误差不足 1.5%,误差整体较小;而且,没有拼接前的雷达探测高度仅为 1.4 km 左右[图 3(a)],拼接后数据高度到达 20 km [图 8(a)]。

足 1.5%,误差整体较小;而且,没有拼接前的雷达探测高度仅为 1.4 km 左右[图 3(a)],拼接后数据高度到达 20 km [图 8(a)]。

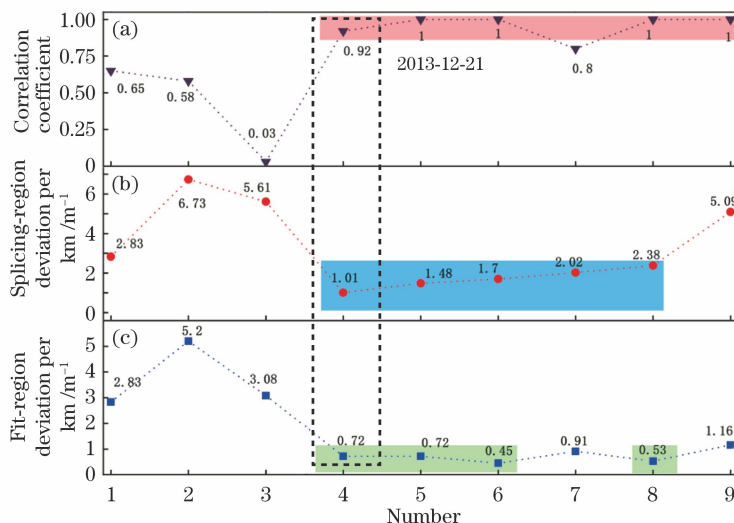


图 7 最佳拼接区域的选取参数。(a)相关系数;(b)拼接千米偏差;(c)拟合千米偏差  
Fig. 7 Parameters for selecting the best splicing-region. (a) Correlation coefficient;  
(b) splicing-region deviation per km; (c) fit-region deviation per km

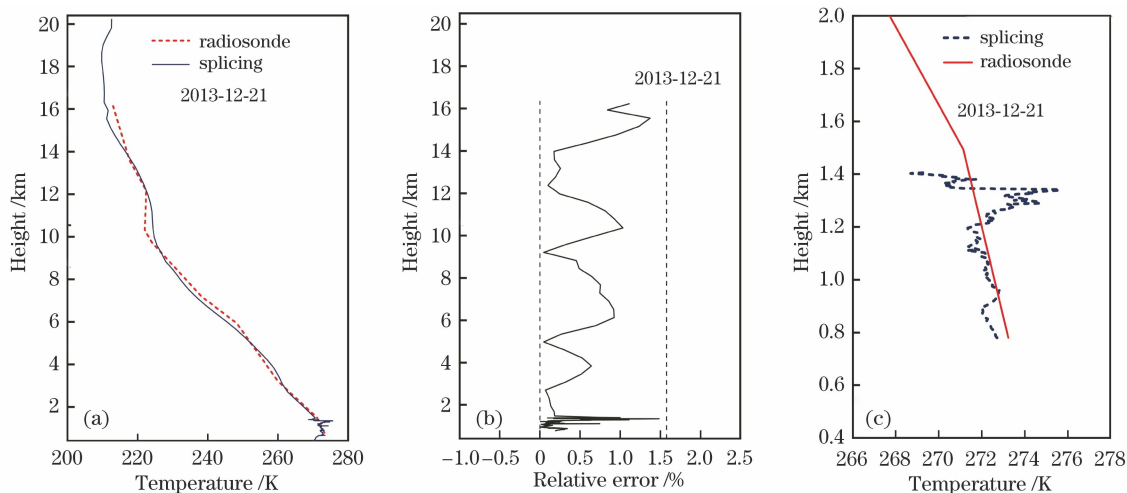


图 8 模式-雷达拼接结果。(a)整层拼接温度与标准温度的定性对比分析;(b)整层拼接温度与标准温度的误差定量分析;  
(c)最佳拼接区域内的拼接温度与标准温度的定性对比分析

Fig. 8 Temperature splicing results between model and lidar data. (a) Qualitative contrast on profiles between splicing temperature and standard temperature during the whole layers; (b) quantitative contrast on relative error between splicing temperature and standard temperature during the whole layers; (c) qualitative contrast on profiles between splicing temperature and standard temperature in the best splicing region

### 3.3 拼接效果综合评估

为了更全面评判模式数据拼接效果,以类似方法拼接了常规探空数据与雷达数据[图(9)]。对比图 8 和图 9 可以表明:利用本文拼接方法,模式数据与探空数据均能与激光雷达数据实现较好的拼接拟合;特别是在各自的最佳拼接区域内,从定性[图 8(c),图 9(b)]与定量分析[图 9(c)]均可表明,

拼接数据始终“紧密围绕”在标准数据两侧,两套数据拼接后的相对误差均可控制在理想的范围内,其中探空-雷达拼接最大误差不足 0.5%,模式-雷达拼接最大误差为 1.5%。

图 10 和表 2 进一步给出了两套数据拼接效果的综合评估,通过这些更详尽的对比可以表明,相对于探空数据,模式数据在刻画细节方面更具优势:模

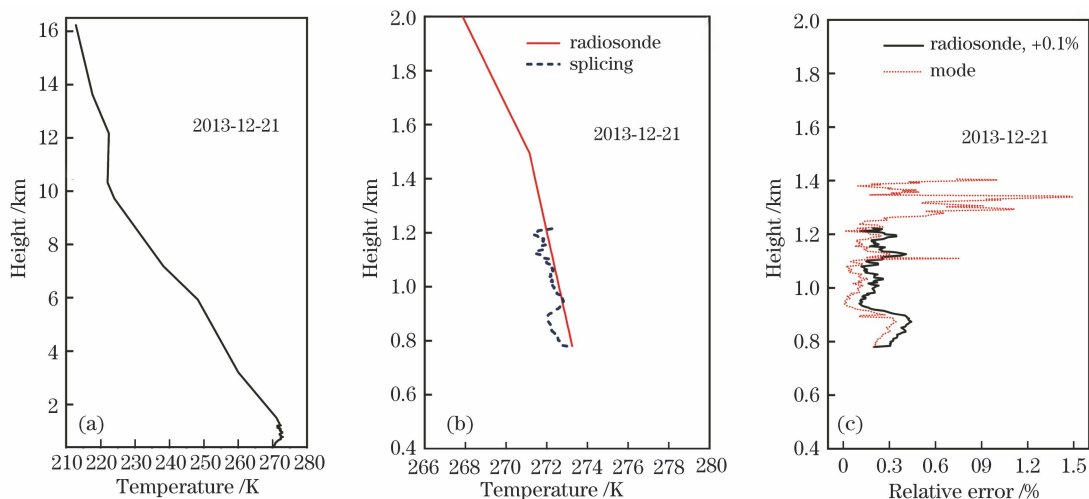


图 9 探空-雷达拼接结果及其与模式-雷达拼接结果对比。(a)整层探空-雷达拼接温度;(b)最佳拼接区域内的探空-雷达拼接温度与标准温度的定性对比分析;(c)最佳拼接区域内的模式拼接温度与标准温度、探空拼接温度与标准温度的误差定量对比分析

Fig. 9 Temperature splicing results between radiosonde and lidar data, and their comparison with the splicing results between model and lidar data. (a) Profile of splicing temperature between radiosonde and lidar data during the whole layers; (b) qualitative contrast on profiles between radiosonde-lidar splicing temperature and standard temperature in the best splicing region; (c) quantitative contrast on relative errors between the model-lidar splicing temperature and standard temperature, and between the radiosonde-lidar splicing temperature and standard temperature in the best splicing region

式数据的最佳拼接区域范围大于探空数据[表 2, 图 8(c), 图 9(b)(c)], 因此, 从与激光雷达数据的拟合高度范围考虑, 模式数据的拟合度更高, 这是由于常规探空在最佳拼接区域内仅有 1 层数据, 而本研究中模式高度层已加密至 59 层, 在具体应用中, 还可通过增加侧边层数等方法, 将模式高度层(特别是在最佳拼接区域内的近似对等高度层)继续加密至更多层; 此外, 在备选的 8 组最佳拼接区域中, 有 5 组模式数据拼接千米偏差明显优于探空数据, 有 3 组模式结果近似于探空结果(图 10); 而且, 模式拼接的整体相关系数与拟合千米偏差也优于探空拼

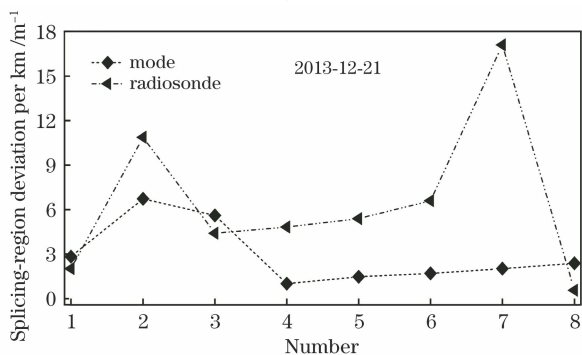


图 10 8 组备选拼接区域对应的拼接千米偏差

Fig. 10 Splicing-region deviation per km corresponding to 8 groups of splicing-regions to be selected

表 2 模式拼接与探空拼接综合评判参数

Table 2 Comprehensive evaluation parameters between model-lidar splicing and radiosonde-lidar splicing

Evaluation parameter	Model-lidar	Radiosonde-lidar
The best splicing region /km	0.89-1.41	0.78-1.22
The best splicing value /km	0.52	0.44
Effective height /level	≥4	1
Correlation coefficient	0.92	0.88
Fit-region deviation per km /m <sup>-1</sup>	0.72	6.09

接(表 2), 这也印证了前文模式数据与雷达数据的拟合度更高。

### 3.4 雾霾全过程数据拼接

上文以重度霾时刻为例介绍了模式数据与雷达数据的拼接过程, 并对拼接结果进行了深入的对比分析, 分析结果表明通过本拼接法可实现两类数据较高拟合度的拼接。考虑到雾霾天气具有大时间尺度(本个例维持 10 d), 因此可以以 24 h 为间隔绘制雾霾生命史温度廓线时间序列, 图 11 是按本文拼接方法完成的、且进行了质量评估(与重度霾时刻评估方法相同, 评估过程略)的雾霾前后每日 20 时的激光雷达数据拼接, 可以直观看出雾霾前后拼接方法对数据高度带来的积极影响: 未拼接前, 在雾霾发生

期间,激光雷达最高探测高度不足 2 km[图 11(a)],而在拼接以后,雾霾天温度廓线高度得到普遍提升,达 18 km 以上[图 11(b)].可见,本文拼接方法有效解决了雷达遇到雾霾等复杂天气条件时探测高度

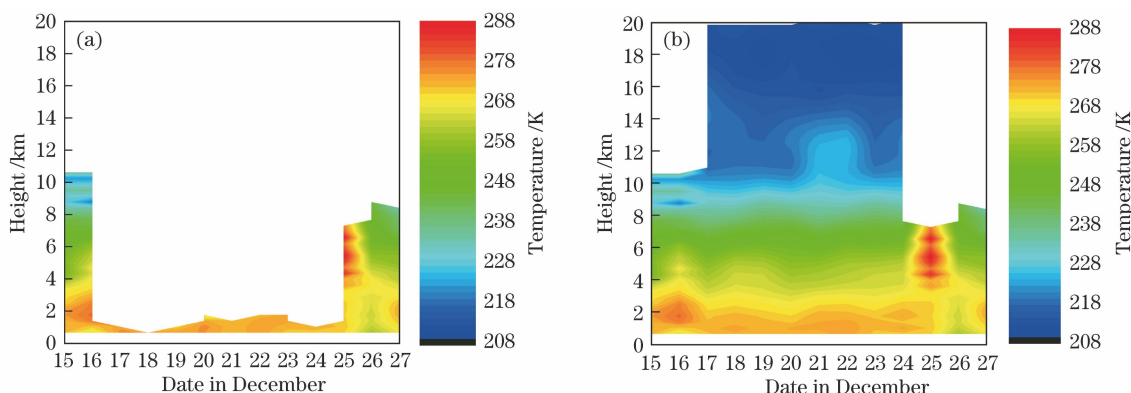


图 11 雾霾前后每日 20 时激光雷达测温数据拼接效果对比。(a)未拼接前测温数据。(b)拼接后测温数据

Fig. 11 Contrast of splicing temperature at 20:00 UTC during the whole fog-haze phase.

(a) Unsplicing temperature profile. (b) splicing temperature profile

## 4 结 论

激光雷达测温数据具有较高的垂直分辨率,但遇到雾霾天气时探测高度会急剧降低,通常不足 2 km.为克服这一弊端,本文引入高分辨 WRF 模式温度数据,并将其与雾霾天激光雷达测温数据进行拼接,在确保(通过定性、定量检验)参与拼接的实验数据尽可能真实地接近大气实况的基础上,构建了一种数据拼接新方法。

该拼接方法较充分地利用了雷达数据与模式数据各自优势,可为解决“激光雷达遭遇雾霾等复杂天气条件后探测高度降低的问题”提供方法支撑,拼接后的重构数据可由原来的 2 km 拓展至整个对流层并到达平流层中低部区域(20 km 左右),使雷达数据与模式数据实现更好的拟合。定性与定量质量评估均表明,激光雷达温度与模式温度拼接结果质量较为可靠,拼接廓线与标准廓线趋势基本吻合,且最大相对误差控制在 1.5% 以下的理想范围。由于参与拼接的模式数据高度层加密设置为 59 层(后续研究中可根据需要还可加密至更多层),因此拼接数据仍保持了较高的垂直分辨率。综合分析有效对等高度层与拟合千米偏差等表明,在最佳拼接区域内雷达数据与模式数据具有更高的拟合度,拟合千米偏差达  $0.72 \text{ m}^{-1}$ 。

本文拼接方法同样适用于其它复杂天气,且有效避免了激光雷达遇雾霾、沙尘等天气探测高度偏低的弊端,可以实现复杂天气条件下的测量层数较

偏低的难题,由此较好地实现了模式数据与激光雷达两类数据的优势互补。这种不受复杂天气影响的测量层数较大的数据拼接方法为后续雾霾分析应用研究提供了有价值的方法参考。

大的数据重构,为后续研究提供了宝贵的高垂直分辨率、高探测高度的温度廓线数据支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y J, Song S L, Li F Q, et al. High-precision measurements of lower atmospheric temperature based on pure rotational Raman lidar[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2294-2305.  
李亚娟, 宋沙磊, 李发泉, 等. 基于纯转动 Raman 激光雷达的中低空大气温度高精度探测[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2294-2305.
- [2] Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44: 27-36.  
张人禾, 李强, 张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 27-36.
- [3] Li W B, Wu L T, Zhang C X, et al. Retrieval of atmospheric vertical temperature profile over ocean with satellite remote sensing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, 39(5): 656-665.  
李万彪, 吴龙涛, 张呈祥, 等. 气象卫星遥感探测海面大气温度垂直廓线[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(5): 656-665.
- [4] Liu H Y. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(4): 719-728.  
刘红燕. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度



- 分析[J]. 气象学报, 2011, 69(4): 719-728.
- [5] Hu X M, Cai M, Yang S, et al. Air temperature feedback and its contribution to global warming[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49: 468-486.  
胡晓明, 蔡鸣, 杨崧, 等. 大气温度反馈的机理及其对全球增暖的贡献[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 468-486.
- [6] Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 21-27.  
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 21-27.
- [7] Li S C, Wang D L, Li Q M, et al. Pure rotational Raman lidar for absolute detection of atmospheric temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(14): 143301.  
李仕春, 王大龙, 李启蒙, 等. 绝对探测大气温度的纯转动拉曼激光雷达系统? [J]. *物理学报*, 2016, 65(14): 143301.
- [8] Li Q M, Li S C, Qin Y L, et al. Design and performance of spectroscopic filter of rotational Raman temperature lidar for absolute measurement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014207.  
李启蒙, 李仕春, 秦宇丽, 等. 绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计及性能 [J]. *物理学报*, 2018, 67(1): 014207.
- [9] Wang Y F, Gao F, Zhu C X, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328004.  
王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统 [J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328004.
- [10] Li B, Hua D X, Zhou Y, et al. Synthetical multilevel quality analysis and control technique for Raman lidar temperature detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0428003.  
李博, 华灯鑫, 周艳, 等. 拉曼激光雷达测温的综合多级质量控制技术 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0428003.
- [11] Zhang F M, Wang C H. Experiment of surface-layer wind forecast improvement by assimilating conventional data with WRF-3DVAR [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(3): 675-685.  
张飞民, 王澄海. 利用 WRF-3DVAR 同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验 [J]. *高原气象*, 2014, 33(3): 675-685.
- [12] Yuan Z H. Study of the influence of the different horizontal resolutions and microphysical setups on the idealized simulation of a squall line[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(4): 648-666.  
袁招洪. 不同分辨率和微物理方案对飑线阵锋锋模拟的影响 [J]. *气象学报*, 2015, 73(4): 648-666.
- [13] Tang X B, Ping F, Luo Z X. A modified cumulus parameterization scheme and its applications in simulation of heavy rainfall [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(1): 45-58.  
唐细坝, 平凡, 罗哲贤. 中尺度模式积云参数化方案的改进及其在暴雨模拟中的应用 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(1): 45-58.
- [14] Wang J C, Zhuang Z R, Han W, et al. An improvement of background error covariance in the global GRAPES variational data assimilation and its impact on the analysis and prediction: statistics of the three-dimensional structure of background error covariance [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(1): 62-78.  
王金成, 庄照荣, 韩威, 等. GRAPES 全球变分同化背景误差协方差的改进及对分析预报的影响: 背景误差协方差三位结构的估计 [J]. *气象学报*, 2014, 72(1): 62-78.
- [15] Zhu J, Tang X, Wang Z F, et al. A review of air quality data assimilation methods and their application [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(3): 607-620.  
朱江, 唐晓, 王自发, 等. 大气污染资料同化与应用综述 [J]. *大气科学*, 2018, 42(3): 607-620.
- [16] Zhang X B, Wan Q L, Xue J S, et al. Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(1): 159-176.  
张旭斌, 万齐林, 薛纪善, 等. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用 [J]. *气象学报*, 2015, 73(1): 159-176.
- [17] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) [R]. Oklahoma: University of Oklahoma, 1994: 138.
- [18] Xue M, Droegemeier K, Wong V. ARPS Version 4.0 Guide [R]. Oklahoma: University of Oklahoma, Oklahoma, 1995: 380.
- [19] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J. A description of the advanced research WRF Version 2 [R]. Oklahoma: University of Oklahoma, 2005: 76.
- [20] Li B, Wang N, Jiang M, et al. The features of a type of west-low and east-high heavy rainfall in Shaanxi province [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(4): 981-993.  
李博, 王楠, 姜明, 等. 陕西一类“东高西低型”暴雨的基本特征 [J]. *高原气象*, 2018, 37(4): 981-993.
- [21] Gao F, Li S H, Li W W, et al. Application of spatial variance construction in correction of pile-up effects of

- lidar photon-counting data [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0528002.
- 高飞, 李松辉, 李婉婉, 等. 空间方差构建在激光雷达光子计数数据堆栈修正中的应用 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0528002.
- [22] Huang L F, Gong W, Li J, et al. Signal splicing of dual-receiver Mie scattering lidar in atmospheric remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(4): 705-719.
- 黄立峰, 龚威, 李俊, 等. 大气遥感双视场米散射激光雷达信号拼接 [J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 705-719.
- [23] Rodgers J L, Nicwander W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient [J]. The American Statistician, 1988, 42(1): 59-66.