

# 中分辨率成像光谱仪的大气温度廓线和地面探空数据同化

蔡熠<sup>1,2</sup>, 徐青山<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031

**摘要** 大气温度廓线是气候、气象以及大气辐射传输计算中的重要参数。利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)的测量数据反演的产品在扫描带上约每间隔 500 m×500 m 即存在一个温度廓线数据, 垂直空间分辨率约为 1 km。基于最优插值法, 使用地面探空站点的月均数据对 MODIS 反演的大气廓线进行校正。在有地面探空站点的地区, 将校正后的结果与当天实时地面探空探测的廓线进行对比, 得到的平均误差和均方根误差均减小了 10% 以上。在没有地面探空站点的地区, 采用周围几个站点月均数据的加权平均对 MODIS 数据进行校正, 将校正结果与当天实时释放的探空气球数据进行对比, 发现平均误差和均方根误差均大幅减小。

**关键词** 大气光学; 大气温度廓线; 数据同化; 中分辨率成像光谱仪

**中图分类号** P413.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.070101

## Data Assimilation Between Atmospheric Temperature Profile of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and Ground Sounding Data

Cai Yi<sup>1,2</sup>, Xu Qingshan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Atmospheric temperature profile is an important parameter for climate, meteorology and atmospheric radiative transfer calculation. Temperature profile data of products inversed from data measured by moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) exists on scanning strip per 500 m×500 m with the vertical resolution of 1 km. Based on the optimal interpolation method, the monthly averaging data of ground sounding site is used to correct the MODIS-inversed atmospheric profiles. In the area with ground sounding sites, the corrected results are compared with the profiles obtained by real-time ground sounding detection of a day, and it is shown that the average error and the root mean square error decrease more than 10%. In the area without ground sounding sites, we use the weighted average data of several sites around the target area to correct the MODIS data, and compare the correction results with real-time balloons data of the day. We find that the average error and the root mean square error greatly decrease.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric temperature profiles; data assimilation; moderate resolution imaging spectroradiometer

**OCIS codes** 010.1290; 010.1285; 120.6200

**收稿日期:** 2017-02-06; **收到修改稿日期:** 2017-03-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(41275020)、气象专项课题(GYHY201106002-03)

**作者简介:** 蔡熠(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事大气辐射传输方面的研究。E-mail: 412532431@qq.com

**导师简介:** 徐青山(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气探测、大气辐射传输以及卫星遥感反演与图像订正等方面的研究。E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

## 1 引言

中分辨率成像光谱仪(MODIS)是美国地球观测系统(EOS)计划中 Terra 和 Aqua 两颗卫星携带的重要仪器。利用 MODIS 对全球陆地、海洋和大气进行反复观测,观测范围每 1~2 天覆盖全球一次<sup>[1]</sup>。MODIS 数据产品中的 MOD07 提供大气温度廓线、湿度廓线以及大气可降水量等反演参数,地面分辨率为 500 m×500 m,比同类型的高光谱红外大气探测器 AIRS(地面分辨率为 13.5 km×13.5 km)的分辨率高。大气参数廓线决定了大气的特性,影响大气透过率等参数的计算精度。很多科研工作者对大气参数廓线进行了相关的观测和分析,孙刚等<sup>[2]</sup>分析了大气参数对折射率结构特性的影响,伯广宇等<sup>[3]</sup>使用瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达探测大气温度,王玉峰等<sup>[4]</sup>使用拉曼激光雷达系统观测对流层高度的大气温度。

地面探空站点分布于全球各地,在格林威治时间 0:00 和 12:00 进行垂直观测,并通过无线电探空获取大气的温度、湿度和压力等参数。但是,受地面探空站点地理位置分布与探测时间的限制,研究人员无法获得没有地面探空站点分布地区和施放时间段之外的大气温度和湿度廓线数据。MODIS 反演数据产品在地理分布上相比探空站点有很大的优势,但是地面探空数据精度上比 MODIS 反演数据精度高很多,因此,将地面观测信息和卫星观测数据进行同化成为近年来的研究热点,很多科研工作者对此进行了研究。美国航空航天局等机构共同开发了北美陆面数据同化系统(NLDAS)<sup>[5]</sup>和全球陆面数据同化系统(GLDAS)<sup>[6]</sup>,以对陆地表面的数据进行同化。Gao 等<sup>[7]</sup>研究了直接同化卫星辐射数据和黄海海雾数值;陆其峰等<sup>[8]</sup>进行了 ATOVS(Advanced TIROS Operational Vertical Sounder)卫星数据同化研究,对暴雪进行监测;王毅等<sup>[9]</sup>通过对卫星高度计的数据进行同化,评估了西北太平洋海浪数值预报。

数据同化是将不同的观测资料以某种方法有效地结合起来,最终得到更加客观、接近自然的结果<sup>[10]</sup>。常用的数据同化方法有逐步订正法、最优插值法、三维/四维变分法以及卡曼滤波法等。最优插值法在假设背景值、观测值和分析值均为无偏估计的前提下求解最小化分析方差,以得到权重系数<sup>[11]</sup>。最优插值法在 20 世纪前就被引入气象学中<sup>[12]</sup>,其优点是原理简单、计算量较小、分析精度相对较高,并且该方法利用分析点周围一定范围的数据进行方程求解,很适合对大气观测数据的这类时间和空间分布范围较广的数据进行同化计算。因此,本文使用最优插值法对 MODIS 反演的温度廓线数据和地面探空站点的观测月均温度数据进行数据同化。

## 2 最优插值同化算法

在最优插值同化算法中,目标点的分析值等于目标点本身的估计值加上订正值,而订正值由观测值与估计值差的加权平均得到<sup>[13]</sup>。假设  $x$  为分析变量,第  $i$  个分析格点上的背景场、分析场和真值分别用  $x_i^b$ 、 $x_i^a$  和  $x_i^t$  表示,则在第  $i$  个分析格点上,背景场和分析场的误差方差  $\sigma_{bi}^2$  和  $\sigma_{ai}^2$  可分别定义为

$$\sigma_{bi}^2 = \overline{(x_i^b - x_i^t)(x_i^b - x_i^t)}, \quad (1)$$

$$\sigma_{ai}^2 = \overline{(x_i^a - x_i^t)(x_i^a - x_i^t)}. \quad (2)$$

背景场在  $K_i$  个观测点之间的误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵分别为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \overline{(x_1^b - x_1^t)(x_1^b - x_1^t)} & \overline{(x_1^b - x_1^t)(x_2^b - x_2^t)} & \cdots & \overline{(x_1^b - x_1^t)(x_{K_i}^b - x_{K_i}^t)} \\ \overline{(x_2^b - x_2^t)(x_1^b - x_1^t)} & \overline{(x_2^b - x_2^t)(x_2^b - x_2^t)} & \cdots & \overline{(x_2^b - x_2^t)(x_{K_i}^b - x_{K_i}^t)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \overline{(x_{K_i}^b - x_{K_i}^t)(x_1^b - x_1^t)} & \overline{(x_{K_i}^b - x_{K_i}^t)(x_2^b - x_2^t)} & \cdots & \overline{(x_{K_i}^b - x_{K_i}^t)(x_{K_i}^b - x_{K_i}^t)} \end{bmatrix}_{K_i \times K_i}, \quad (3)$$

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} \overline{(x_1^{\text{obs}} - x_1^t)(x_1^{\text{obs}} - x_1^t)} & \overline{(x_1^{\text{obs}} - x_1^t)(x_2^{\text{obs}} - x_2^t)} & \cdots & \overline{(x_1^{\text{obs}} - x_1^t)(x_{K_i}^{\text{obs}} - x_{K_i}^t)} \\ \overline{(x_2^{\text{obs}} - x_2^t)(x_1^{\text{obs}} - x_1^t)} & \overline{(x_2^{\text{obs}} - x_2^t)(x_2^{\text{obs}} - x_2^t)} & \cdots & \overline{(x_2^{\text{obs}} - x_2^t)(x_{K_i}^{\text{obs}} - x_{K_i}^t)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \overline{(x_{K_i}^{\text{obs}} - x_{K_i}^t)(x_1^{\text{obs}} - x_1^t)} & \overline{(x_{K_i}^{\text{obs}} - x_{K_i}^t)(x_2^{\text{obs}} - x_2^t)} & \cdots & \overline{(x_{K_i}^{\text{obs}} - x_{K_i}^t)(x_{K_i}^{\text{obs}} - x_{K_i}^t)} \end{bmatrix}_{K_i \times K_i}, \quad (4)$$

式中  $x_1^{\text{obs}}, x_2^{\text{obs}}, x_{K_i}^{\text{obs}}$  为第 1, 2,  $K_i$  个观测点的数据。第  $i$  个分析格点与不同观测点之间的背景场误差协方差向量为

$$\mathbf{b}_i = \left[ \overline{(x_1^{\text{b}} - x_1^{\text{t}})(x_i^{\text{b}} - x_i^{\text{t}})} \quad \overline{(x_2^{\text{b}} - x_2^{\text{t}})(x_i^{\text{b}} - x_i^{\text{t}})} \quad \cdots \quad \overline{(x_{K_i}^{\text{b}} - x_{K_i}^{\text{t}})(x_i^{\text{b}} - x_i^{\text{t}})} \right]^{\text{T}}. \quad (5)$$

最优插值的分析公式为

$$x_i^{\text{a}} = x_i^{\text{b}} + \sum_{k=1}^{K_i} W_{ki} (x_k^{\text{obs}} - x_k^{\text{b}}) \equiv x_i^{\text{b}} + \mathbf{w}_i^{\text{T}} (\mathbf{x}^{\text{obs}} - \mathbf{x}^{\text{b}}), \quad (6)$$

式中  $W_{ki}$  为权重系数,  $\mathbf{w}_i$  为权重系数向量,  $\mathbf{x}^{\text{obs}}$  为观测场,  $\mathbf{x}^{\text{b}}$  为背景场。

要使得分析误差方差最小, 应有

$$\min_{\mathbf{w}_i} \sigma_{\text{ai}}^2 = \min_{\mathbf{w}_i} \overline{(x_i^{\text{a}} - x_i^{\text{t}})(x_i^{\text{a}} - x_i^{\text{t}})}. \quad (7)$$

联立(6)、(7)式, 令  $\partial \sigma_{\text{ai}} / \partial \mathbf{w}_i = 0$ , 即背景场误差和观测误差不相关, 可以简化权重向量为

$$\mathbf{w}_i = (\mathbf{B} + \mathbf{O})^{-1} \mathbf{b}_i. \quad (8)$$

由(8)式可知, 通过误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵可以解出权重系数, 由于矩阵的求逆不一定成功, 因此通常采用求解方程组的方法求解权重系数<sup>[14]</sup>。

### 3 有探空站点时的数据处理

MODIS 所提供的大气温度廓线数据是由卫星数据反演得到的, 数据精度不高。把地面探空站点的探空数据作为真值, 将 MODIS 的大气温度和湿度廓线数据与探空数据进行对比, 以便进一步进行分析处理。实验中选取的 MODIS 数据为 2016 年 1 月北京气象观测站(39.93°N, 116.28°E)附近的大气温度和湿度廓线数据, 地面观测数据为当地气象观测站提供的当天探空气球所测数据。北京地区 2016 年 1 月 MODIS 温度廓线的平均误差和均方根(RMS)误差如图 1 所示。

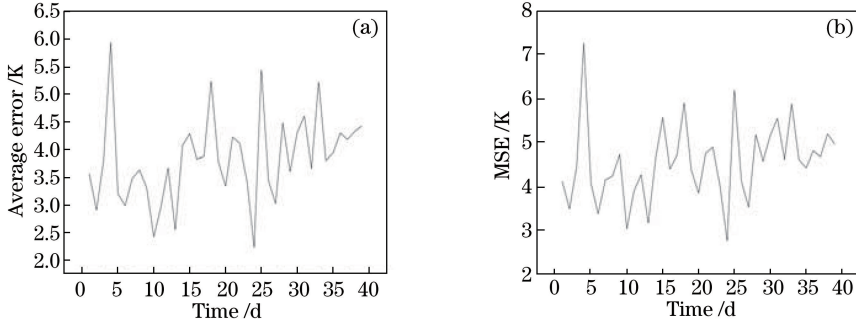


图 1 北京地区 2016 年 1 月 MODIS 温度廓线的(a)平均误差和(b)均方根误差

Fig. 1 (a) Average error and (b) root mean square error of MODIS temperature profiles in Beijing at January 2016

根据北京地区 2016 年 1 月的 MODIS 数据, 可得 MODIS 温度廓线数据的平均误差为 3.83 K, 最高可达 5.96 K; 平均均方根误差为 4.56 K, 最高可达 7.29 K。MODIS 误差较大时使用 MODIS 温度廓线数据会对后续的大气辐射计算等引入较大的误差, 因此需要对其进行校正以减小影响。

月均数据来源于国内各个探空站点 1991 年 1 月至 2010 年 12 月共 20 年的探空资料汇总, 包括每天两个时刻(格林威治时间 0:00 和 12:00)的大气温度、气压和湿度等参数的高度廓线, 对这些数据进行统计平均, 得到该地区逐月平均的大气平均廓线<sup>[15]</sup>。选取北京地区 2016 年 1 月的月均数据, 使用最优插值法对 MODIS 每天的温度和湿度廓线数据进行校正, 并将校正结果与地面探空站点的数据进行对比。

图 2 为 2016 年 1 月 7 日校正前后温度廓线数据对比图, 校正数据基本分布于月均数据与 MODIS 数据之间, 在低空较接近 MODIS 数据, 在高空接近月均数据, 与实际的探空数据更为吻合。MODIS 数据的平均误差为 2.911 K, 均方根误差为 3.497 K。校正后数据的平均误差为 2.31 K, 比 MODIS 数据的平均误差减小了 20.6%; 校正后数据的均方根误差为 3.15 K, 比 MODIS 数据的平均误差减小了 9.9%。图 3 为北京地区

2016年1月校正后的温度廓线和MODIS反演的温度廓线与地面探空站点数据的误差分析。可以看出,MODIS数据偏离真值时,根据月均数据对MODIS数据进行校正可大幅减小平均误差和均方根误差;误差波动不大时,校正结果与MODIS结果基本持平,略有减小。2016年1月校正结果的总体平均误差为3.14 K,比MODIS数据的平均误差减小了18%;平均均方根误差为3.95 K,比MODIS数据的平均均方根误差减小了13.3%。

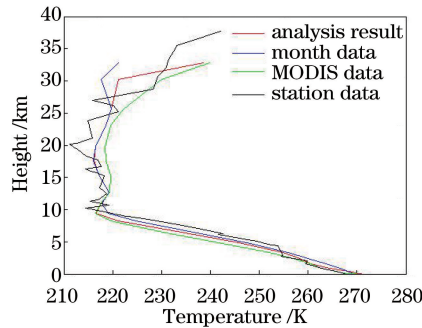


图2 2016年1月7日温度廓线校正结果

Fig. 2 Correction result of temperature profile in 2016-01-07

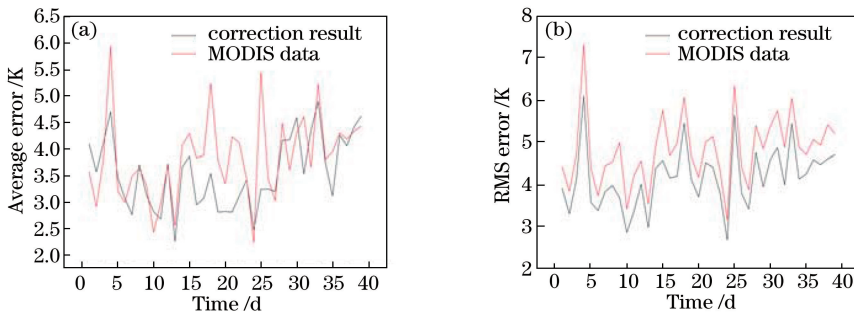


图3 北京地区2016年1月温度廓线校正后数据与MODIS数据的(a)平均误差和(b)均方根误差

Fig. 3 (a) Average error and (b) root mean square error between MODIS data and correction results of temperature profile in Beijing at January 2016

#### 4 没有探空站点的数据处理

全球共有1538个地面探空站点,国内共有119个,每天通过无线电探空获取两个时刻大气垂直的温度、湿度和压力等廓线数据(格林威治时间0:00和12:00)。探空站点只能获取站点所在地的大气廓线数据,故月均数据也按照站点位置分布。对于没有站点位置的数据,可以对周围几个站点的月均数据进行加权平均后得到近似月均数据,即

$$\bar{x} = \sum_n f_i x_i, \quad (9)$$

式中 $\bar{x}$ 为目标位置数据, $f_i$ 为加权因子, $x_i$ 为周围第*i*个站点所测数据。

以合肥地区(31.9°N,117.16°E)为例,合肥大致位于阜阳站点与安庆站点中间位置并较接近于南京站点,故将这三个站点所测的数据进行加权平均(权重因子与距离负相关),得到合肥的估计月均数据;接着,使用合肥的估计月均数据对MODIS数据进行校正;最后,实时释放一个探空气球探测数据,并将其作为真值。于2016年9月5日下午3:00在合肥本地释放一个探空气球,当天天气晴朗无云,较适合观测,并且MODIS数据精度相对较高,将获得的探测廓线数据作为真值并将其与最后的同化结果进行对比分析。温度廓线校正结果如图4所示。

由图4可以看出,MODIS数据、月均数据与真值的廓线都较为接近。分析数据结果可得:MODIS数据的平均误差为2.7328 K,均方根误差为3.2798 K;校正后结果的平均误差为1.3095 K,比MODIS数据的平均误差增加了76%;校正后结果的均方根误差为1.5966 K,比MODIS数据的均方根误差增加了51%。

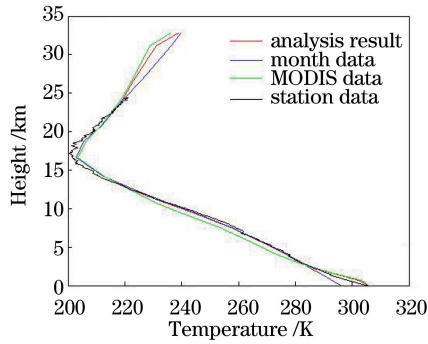


图4 2016年9月5日温度廓线校正结果

Fig. 4 Temperature profile correction results in 2016-09-05

## 5 结 论

选择最优插值法对 MODIS 数据与地面探空站点 20 年的月均数据进行同化,分别对有站点和没有站点两种情况进行分析和验证。在有站点分布的北京地区,对 2016 年 1 月每天的 MODIS 数据进行校正,并与当天的站点实时探测结果进行对比分析。结果表明:当 MODIS 数据偏离真值时,月均数据对 MODIS 数据的校正能够大幅减小平均误差和均方根误差;当误差波动不大时,校正结果与 MODIS 数据基本持平;校正结果的总体平均误差为 3.14 K,比 MODIS 数据的平均误差减小了 18%;平均均方根误差为 3.95 K,比 MODIS 数据的均方根误差减小了 13.3%。在没有站点的合肥地区,将周围几个站点的月均数据进行加权平均后得到合肥地区的估计月均数据,再利用月均数据进行校正。选择天气晴朗的某一天在合肥释放探空气球测量数据,以获取真值。对真值及校正结果进行对比,结果表明:校正后结果的平均误差为 1.3095 K,比 MODIS 数据的平均误差增加了 76%;校正后结果的均方根误差为 1.5966 K,比 MODIS 数据的均方根误差增加了 51%。

对北京和合肥两个地区的分析表明,使用数据同化算法可以有效提高 MODIS 数据的精度,该方法可以应用于科研与工程计算中。但是,在地面探空站点稀少的地区则无法通过插值得到较真实的数据,故很难得到有效应用。

## 参 考 文 献

- [1] Maccherone B. National aeronautics and space administration. Specification[EB/OL]. (2002-5-4)[2017-6-1]. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.
- [2] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, *et al.* Profile and character of atmospheric temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 592-596.  
孙 刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响[J]. *光学学报*, 2004, 24(5): 592-596.
- [3] Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing, *et al.* Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 19-25.  
伯广宇, 刘 博, 钟志庆, 等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 19-25.
- [4] Wang Yufeng, Gao Fei, Zhu Chengxuan, *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.
- [5] Luo L, Robock A, Mitchell K E, *et al.* Validation of the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) retrospective forcing over the southern Great Plains[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108 (D22): 8843.
- [6] Rodell M, Houser P R, Jambor U E A, *et al.* The global land data assimilation system[J]. *Bulletin of the American*

Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.

- [7] Gao S H, Wu Z, Yang B. Assimilation of GMS-5 satellite winds using nudging method with MM5[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 24(3): 215-224.
- [8] Lu Qifeng, Zhang Wenjiang, Zhang Peng, *et al.* Monitoring 2008 cold surge and frozen disasters snowstorm in south China based on regional ATOVS data[J]. Scientia Sinica Terrae, 2010, 40(3): 380-392.  
陆其峰, 张文江, 张 鹏, 等. 基于区域 ATOVS 数据同化的 2008 中国南方低温雨雪冰冻灾害的暴雪监测研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 380-392.
- [9] Wang Yi, Yu Zhouwen. Validation of impact of assimilation of altimeter satellite significant wave height on wave forecast in the northwest pacific[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(6): 1-8.  
王 毅, 余宙文. 卫星高度计波高数据同化对西北太平洋海浪数值预报的影响评估[J]. 海洋学报, 2009, 31(6): 1-8.
- [10] Shi Liangwu, Lin Liyu, Wang Sichun, *et al.* Image fusion based on data assimilation and differential evolution algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(9): 1688-1692.  
石良武, 林立宇, 王四春, 等. 基于数据同化和差分进化算法的图像融合[J]. 光子学报, 2010, 39(9): 1688-1692.
- [11] Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation[J]. Journal of Climate, 1994, 7(6): 929-948.
- [12] Gandin L S. On optimal interpolation and extrapolation of meteorological fields[J]. Trudy GGO, 1960, 114: 75-89.
- [13] Zou Xiaolei. Data assimilation theory and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 12.  
邹晓蕾. 资料同化理论和应用[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 12.
- [14] Ma Zhaipu. Study of data assimilation method and its application to sea flow field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002: 1-156.  
马寨璞. 海洋流场数据同化方法与应用的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002: 1-156.
- [15] Qin Qibing, Wei Heli. Construction of real-time atmospheric parameter profiles based on average radiosonde profiles and surface meteorological data[J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2013, 8(3): 1-8.  
秦琦冰, 魏合理. 基于历年探空数据构建实时大气参数廓线的方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(3): 1-8.