

# Himawari-8/AHI 红外光谱资料降水信号识别与反演初步应用研究

王 根<sup>1,2</sup>, 王东勇<sup>1\*</sup>, 吴 蓉<sup>3</sup>

(1. 安徽省气象台 强天气集合分析和预报重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 安徽省气象科学研究所 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031;

3. 安徽省气候中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 在统计分析“降水”和“非降水”视场点的 Himawari-8(H8) 成像仪(Advanced Himawari Imager, AHI) 红外不同光谱亮温梯度变化基础上, 开展了 H8/AHI 资料反演降水初步应用研究。以安徽区域为例, 当有降水发生时, AHI 通道 7 至通道 16 亮温梯度均有变化。采用字典学习和正则化约束法开展降水反演, 首先构建匹配的 AHI 光谱“亮温”和 GPM“降水”字典, 作为历史样本库; 其次基于“字典”利用 K-最近邻法进行待反演红外光谱亮温“降水”和“非降水”信号识别; 最后在降水信号“子空间”基于正则项约束完成红外资料反演降水。初步试验结果表明基于 Gamma 概率分布贝叶斯模型平均反演的降水与 GPM 降水具有较好的结构相似性, 误差较小, 临界成功指数值较高。进一步将该方法推广应用到 AHI 光谱亮温反演台风“玛莉亚”降水, 得到此方法能够反演出台风的螺旋云雨带。

**关键词:** Himawari-8(H8)/AHI; 降水信号; K-最近邻; 贝叶斯模型平均; 正则项约束

中图分类号: P412.27 文献标识码: A

## Application study of Himawari-8/AHI infrared spectral data on precipitation signal recognition and retrieval

WANG Gen<sup>1,2</sup>, WANG Dong-Yong<sup>1\*</sup>, WU Rong<sup>3</sup>

(1. Anhui Meteorological Observatory, Key Lab. of Strong Weather Analysis and Forecast, Hefei 230031, China;

2. Anhui Institute of Meteorological, Anhui Key Lab. of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China;

3. Anhui Climate Center, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In this paper, the application of an algorithm for precipitation retrieval is studied based on the statistical analysis of the changes of brightness temperature gradient in different infrared spectra of Advanced Himawari Imager(AHI) of H8 in the field of view of “precipitation” and “non-precipitation”. Taking Anhui region as an example, when precipitation occurs, there is some change in brightness temperature gradient of AHI channel 7-16. Furthermore, dictionary learning and regularization constraints are used on precipitation retrieval. Firstly, based on the H8/AHI spectral brightness temperature data and GPM precipitation, spectral “brightness temperature” and “precipitation” dictionary are matched as historical sample databases. Secondly, K-nearest neighbor (KNN) method is used to identify “precipitation” and “non-precipitation” signals on the brightness temperature of the infrared spectrum based on the “dictionary”. Finally, precipitation retrieval for infrared data is carried out in the precipitation signal “subspace” with regularization constraints. The preliminary experimental results show that precipitation structure based on brightness temperature for H8/AHI, which was retrieved by using the

收稿日期: 2019-06-13, 修回日期: 2019-11-12

Received date: 2019-06-13, Revised date: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(41805080), 安徽省自然科学基金(1708085QD89), 安徽省重点研究与开发计划项目(201904a07020099)

**Foundation items:** Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (41805080), the Natural Science Foundation of Anhui province (1708085QD89), the Key Research and Development Program Projects of Anhui Province (201904a07020099).

**作者简介(Biography):** 王根(1983-), 男, 江苏泰州人, 副高, 博士。主要从事高光谱卫星资料同化、卫星反演降水、多源数据融合与深度学习等研究。E-mail: 203wanggen@163.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: AMO\_wangdongyong@163.com

Bayesian model averaging-gamma probability distribution model, has a good similarity with GPM, as well as low relative error, and the critical success index is higher than others. Furthermore, the algorithm is extended and applied to the AHI brightness temperature retrieval of typhoon "Maria" precipitation, and the spiral rain belt can be obtained.

**Key words:** Himawari-8 (H8)/AHI, precipitation signal, K-nearest neighbor, Bayesian model averaging, regular term constraint

**PACS:**42. 68. Wt, 95. 75. Pq, 95. 75. Rs

## 引言

降水在全球能量和水循环中起着重要作用。在台风、暴雨和强对流等灾害性天气发生和发展过程中,对降水监测和预报是天气预报业务关键内容。在气象卫星出现之前,降水监测主要依靠地面雨量计和地基天气雷达,而常规地面台站的观测降水较难把握降水的空间分布和强度变化,雷达探测范围有限<sup>[1]</sup>。气象卫星可以有效获取海洋、山区和沙漠等无人值守区域亮温辐射等信息,其降水反演产品已成为覆盖全球降水研究唯一有效手段<sup>[2]</sup>。

区别于极轨卫星,静止卫星时间分辨率较高,如日本气象厅于2014年7月发射的H8(Himawari-8)观测时间分辨率为10 min<sup>[3]</sup>;我国风云四号A星多通道扫描成像辐射计(Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI)加密期观测资料时间分辨率为15 min<sup>[4]</sup>。微波探测器能穿透云(除降水云外),用于降水反演具有一定优势,但时间分辨率低<sup>[5]</sup>。红外探测器对云敏感,故数值天气预报模式同化红外探测器通道亮温资料前需进行云检测<sup>[6]</sup>,而文中利用此特征。卫星红外光谱资料被应用到多个领域,如姚云军等<sup>[7]</sup>在分析中分辨率成像光谱(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)短波红外第6波段和第7波段对水分变化敏感基础上反演了土壤含水量;王祥等<sup>[8]</sup>基于岸基实测数据的风云三号A星近红外通道反演了海洋大气水汽;师春香等<sup>[9]</sup>利用GMS-5多通道资料和辐射传输模式实现了基于卫星红外分裂窗通道反演大气可降水。王天天<sup>[10]</sup>在分析风云二号C星和热带测雨任务卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission satellite, TRMM)红外光谱通道信号差异基础上,开展了降水判识研究。

关于卫星资料反演降水国内外学者做了大量富有成效的研究。主要方法有统计反演法<sup>[11]</sup>、物理反演法<sup>[12]</sup>、红外和可见光资料融合法<sup>[13]</sup>、地基-卫星和卫星主被动联合反演法<sup>[11]</sup>、查表法<sup>[14]</sup>、机器学习

法等<sup>[15]</sup>。统计反演法较为常用,直接建立观测值和降水之间的统计关系。Ferraro等<sup>[16]</sup>使用统计法取得了较好反演效果;兰红平等<sup>[17]</sup>在建立红外云图对流云云顶亮温与降水强度统计关系基础上,发展了短对流降水强度预测方法。由遥感亮温信息得到降水值是数理中的反问题,基于此Ebtehaj等<sup>[18]</sup>利用机器学习和正则化约束反问题,构建了卫星反演降水模型,开展了TRMM资料反演降水,得到了较高反演精度。

卫星红外资料反演降水一直是研究的热点和难点。Behrangi等<sup>[19]</sup>利用GOES-R(Geostationary Operational Environmental Satellite)卫星多通道,采用PERSIANN-MSA方法反演降水,其方案12能有效判识是否有雨,击中率和虚警率分别为0.530和0.355。Tao等<sup>[20]</sup>基于卫星红外和水汽通道亮温,提出了深度神经网络反演降水,判识研究区域是否有雨,击中率和虚警率分别为0.418和0.528。Min等<sup>[15]</sup>基于随机森林开展了H8亮温反演降水研究,其涉及到模式天气预报指数、GPM和H8资料,取得了较好反演结果。孙绍辉等<sup>[14]</sup>利用查算表开展了H8亮温反演降水研究,得到查算表维数越多,反演精度越高。Wang等<sup>[21]</sup>将Ebtehaj等<sup>[18]</sup>提出的方法初步应用于H8红外资料反演降水,文中在此基础上对相关算法进行了优化和改进。首先构建匹配“字典”,作为历史样本库;其次根据不同风暴环境小规模组织内降水特征会重复出现这一性质<sup>[22]</sup>,在统计分析H8/AHI红外通道“降水”和“非降水”亮温梯度变化基础上,基于“字典”利用K-最近邻(K-Nearest, KNN)方法识别待反演视场点的“降水”和“非降水”光谱亮温信号;最后采用正则项约束基于“降水”亮温信号反演降水。反演过程中不同通道亮温对反演模型目标函数贡献率通过贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)“优化”给定<sup>[23]</sup>。进一步分析了不同“历史样本库”对降水反演结果影响,并将文中方法推广应用到H8/AHI亮温反演2018年台风“玛莉亚”降水<sup>[24]</sup>。

## 1 基于先验信息字典学习法和正则项约束的红外光谱亮温反演降水算法介绍

假设每个视场点 FOV 卫星光谱观测亮温和降水分别记为  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_{n_c})^T$  和  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n_r})^T$ , 其中  $n_c$  和  $n_r$  分别表示卫星通道数和降水强度(文中令  $n_r = 1$ )。在有限维空间中,可表示为以下非线性关系<sup>[18,21]</sup>:

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (1)$$

其中,  $F(\cdot): \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y}$  表示将降水强度“投影”到光谱亮温空间;  $\mathbf{v} \in R^{n_c}$  表示误差。

文中历史样本库定义为“亮温”和“降水”字典(Dictionary)  $\Gamma = \{(\mathbf{b}_i, \mathbf{r}_i)\}_{i=1}^M$ , 字典中每一对匹配原子都是通道观测亮温反演降水的基本“原子”。 $\mathbf{b}_i = [b_{1i}, b_{2i}, \dots, b_{n_c i}]^T \in R^{n_c}$  表示光谱亮温字典原子;  $\mathbf{r}_i = [r_{1i}, r_{2i}, \dots, r_{n_r i}]^T \in R^{n_r}$  表示降水字典原子。亮温和降水字典分别标记为矩阵  $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1 | \dots | \mathbf{b}_M] \in R^{n_c \times M}$  和  $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 | \dots | \mathbf{r}_M] \in R^{n_r \times M}$ 。

Ebtehaj<sup>[20]</sup>提出的降水反演模型基本步骤,首先在  $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1 | \dots | \mathbf{b}_M] \in R^{n_c \times M}$  中寻找一组最优“原子”拟合待反演视场点光谱观测亮温  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_{n_c})^T$ , 则有:

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}_s \mathbf{c} + \mathbf{v} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{B}_s$  为最优“原子”构成的字典子集;  $\mathbf{c}$  为原子系数;  $\mathbf{v}$  为观测误差。

其次将原子系数  $\mathbf{c}$  应用到匹配的降水字典子集  $\mathbf{R}_s$ , 得到的  $\mathbf{x}$  即为降水反演值, 则有:

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_s \mathbf{c} + \mathbf{e} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{R}_s$  为与  $\mathbf{B}_s$  对应的  $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 | \dots | \mathbf{r}_M] \in R^{n_r \times M}$  字典“子集”;  $\mathbf{e}$  为误差。

由式(2)和(3)通过推导分析可知,问题转化为求解原子系数  $\mathbf{c}$ 。

文中基于 Ebtehaj 等<sup>[20]</sup>研究成果,通过极小化目标函数(4)式求解原子系数  $\mathbf{c}$ :

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{c}} \left\| \mathbf{W}^{1/2} (\mathbf{y} - \mathbf{B}_s \mathbf{c}) \right\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{c}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{c}\|_2^2 \\ \mathbf{c} \geq 0, \mathbf{1}^T \mathbf{c} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{W}$  为 H8/AHI 通道 7 至通道 16 观测亮温对目标函数的贡献率;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为正则化参数; L1 和 L2 范数分别定义为  $\|\mathbf{c}\|_1 = \sum_i |c_i|$  和  $\|\mathbf{x}\|_A^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ ,  $\mathbf{A}$  是正定矩阵。

文中采用的方法关键是降水信号识别。与非降水相比,降水属于“小概率”事件<sup>[22]</sup>,因此反演降水前需识别通道光谱亮温“降水”和“非降水”信号。首先统计分析不同光谱的“降水”和“非降水”亮温梯度变化幅度;其次使用 KNN 识别降水信号,具体细节可参考 Ebtehaj 等<sup>[18]</sup>研究成果。文中对 Ebtehaj 等<sup>[18]</sup>提出的方法改进如下:

①加入统计得到的 H8/AHI 红外光谱“降水”和“非降水”亮温梯度信息作为先验信息,并将其耦合到 KNN 模型。

②不同光谱通道亮温对反演模型目标函数贡献率  $\mathbf{W}$  通过贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)“优化”给定。BMA 利用马尔可夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)方法实现<sup>[23,25]</sup>。

③优化 KNN 相关参数(如,检测概率  $p$  和邻域  $K$ )和正则化参数  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ <sup>[18]</sup>。

## 2 H8/AHI 红外光谱亮温降水信号识别

### 2.1 资料介绍

文中使用的 H8/AHI<sup>[3]</sup>资料空间分辨率为 2KM, 通道中心波长及探测目的见表 1。H8 数据来源于日本宇宙航空开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)官网,网址为: <http://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index.html>。

图 1 给出 H8/AHI 通道 7 至通道 16 权重函数分

表 1 Himawari-8/AHI 通道中心波长和探测目的

Table 1 Himawari-8/AHI channel-specific central wavelengths and primary purpose

通道	中心波长/ $\mu\text{m}$	探测目的	通道	中心波长/ $\mu\text{m}$	探测目的
7	3.89	地表和云、晚雾、火和风	12	9.64	总臭氧、湍流和风
8	6.24	高层大气水汽、风和降雨	13	10.41	地表和云
9	6.94	中层大气水汽、风和降雨	14	11.24	海温、云和降雨
10	7.35	低层大气水汽、风和 $\text{SO}_2$	15	12.38	总水量、火山灰和海温
11	8.59	总水量、云相态、粉尘、 $\text{SO}_2$ 和降雨	16	13.28	气温、云高和云量

布。本文研究安徽区域,选取Tiros业务垂直探测器辐射传输(Radiative Transfer for Tiros Operational Vertical Sounder, RTTOV)<sup>[26-27]</sup>模式自带廓线集中的中纬度夏季大气廓线作为背景廓线,用于RTTOV计算H8/AHI权重函数。

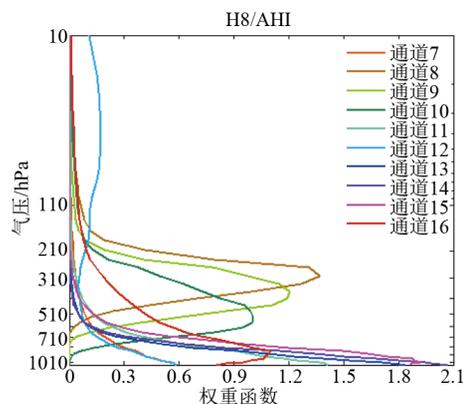


图1 基于RTTOV模式的H8/AHI通道7至16权重函数分布

Fig. 1 Weight function of H8/AHI channel 7 to 16 based on RTTOV model

由图可知,H8/AHI通道8、9、10和16权重函数峰值层分别位于300.0 hPa、371.6 hPa、532.6 hPa和863.4 hPa,其它通道权重函数峰值几乎位于近地层。

文中采用的GPM IMERG<sup>[28]</sup>降水数据空间覆盖范围为89.95°S~89.95°N,179.95°W~179.95°E,分辨率为0.1°×0.1°,时间取整点(mm/h),即每日24次降水值。降水数据来源于美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)官网,网址为: <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>。

因H8/AHI和GPM数据空间分辨率不同,在构建字典时,采用“最邻近”法将H8/AHI各通道光谱亮温值插到GPM视场点,作为文中统计分析和亮温反演降水的数据源。

## 2.2 研究区域介绍

淮河流域(记为“Huaihe river basin”)是中国第七大水系<sup>[29]</sup>,覆盖范围30°55′~36°36′N,111°55′~121°25′E,总面积约2.7×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,是一个天然盆地。降水具有显著的时空变化特征,雨季(6~9月)降水占年降水总量的50%~80%。降水由南向北,山区向平原,沿海向内陆递减<sup>[29]</sup>。文中研究仅关注安徽区域<sup>[30]</sup>。安徽(记为“Anhui”)位于中国东部季风区,部分位于淮河流域,受东部海洋影响,大部分地区年

降水量在800~1700 mm之间。安徽区域降水主要包括春夏之交的梅雨和夏秋时节的台风雨<sup>[29-30]</sup>。

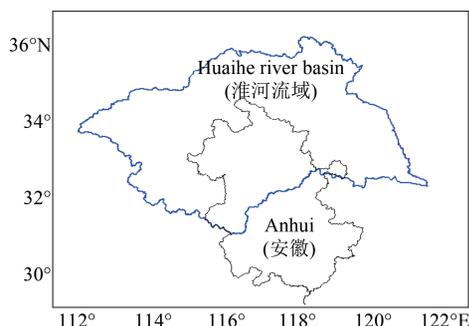


图2 淮河流域和安徽区域覆盖范围

Fig. 2 Area Coverage of Anhui zone and Huaihe river basin

## 2.3 H8/AHI通道降水信号识别—单通道分析

选取安徽区域2个时间段的H8和GPM资料进行降水信号识别。时间段分别为2018年6月25至2018年7月25日、2018年8月25日至2018年9月25日。H8光谱亮温降水视场点的判断参考匹配的GPM降水资料。给出了H8/AHI红外通道7至通道16“降水”和“非降水”视场点(Field-Of-View, FOVs)平均亮温辐射特征比较结果见图3(左列)。H8/AHI各个通道非降水和降水亮温梯度(非降水-(Minus, 减号)降水)变化幅度值见图3(右列)。

由图3可知,对于H8/AHI红外光谱通道7至通道16,当降水发生时通道亮温梯度均有变化。此2个时间段内,通道8的亮温变化幅度值最小,分别为14.60 K和9.65 K;通道14的亮温变化幅度值最大,分别为46.38 K和33.57 K。其它通道亮温变化幅度具有较好的一致性,变化规律显著,说明H8/AHI光谱亮温对降水信号识别有较好的指示作用。前一个时间段亮温梯度变化幅度较大,可能与安徽区域雨季主要集中在6月至7月份有关<sup>[29-30]</sup>。

为分析不同降水强度对H8/AHI光谱亮温影响,将降水分5个等级进行统计分析。5个等级分别为非降水、0.1~5 mm/h降水、5~10 mm/h降水、10~15 mm/h降水、15~(+∞) mm/h降水(标记为:“15~Inf”)。

统计分析时间段内GPM降水(降水>0.1 mm/h)概率密度函数(Probability density function, PDF)分布、均值、标准差、峰度和偏度值见图4(左列)。不同等级降水的H8/AHI通道7至通道16亮温平均值见图4(右列)。

由图4可知,当降水发生时,H8/AHI通道7至通

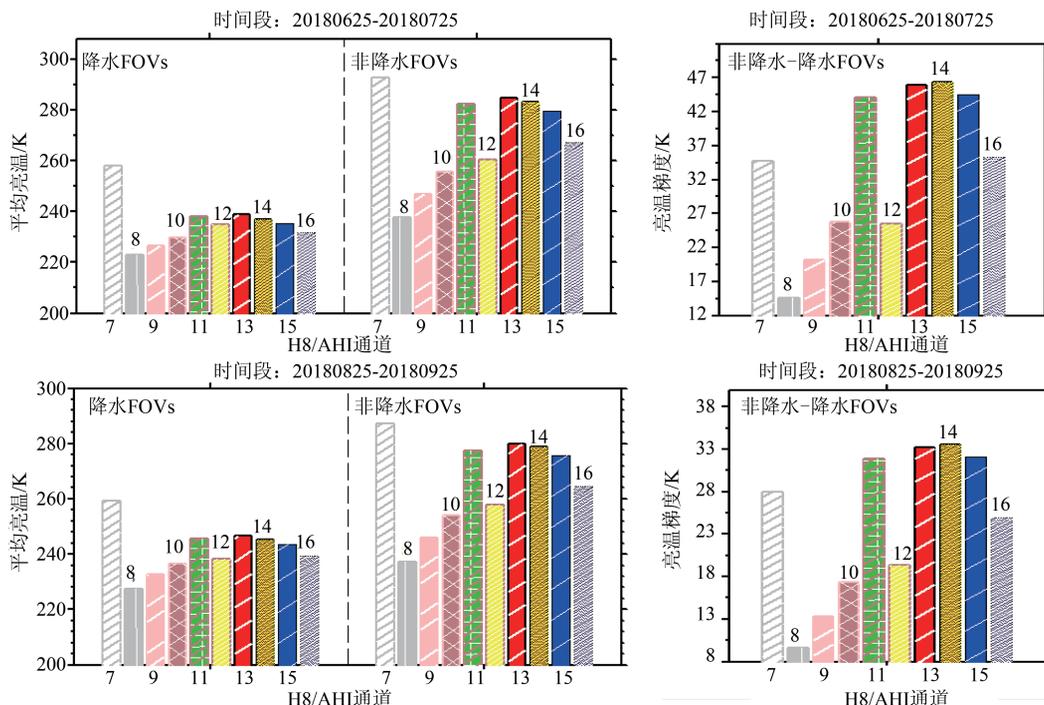


图3 降水与非降水视场点通道亮温辐射特征比较,H8/AHI通道平均亮温(左)及亮温梯度(右)  
 Fig.3 Comparison of radiance characteristics for precipitation and non-precipitation FOVs, average brightness temperature of H8/AHI(left) and brightness temperature gradient (right)

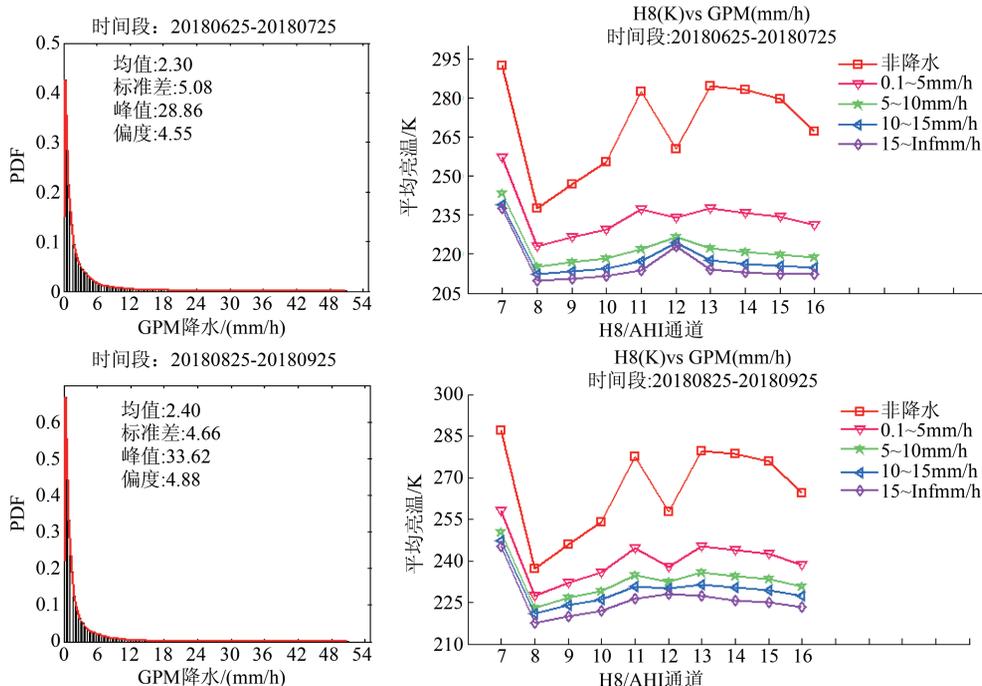


图4 GPM降水概率密度分布(左)与不同降水等级H8/AHI红外光谱亮温均值变化(右)  
 Fig.4 Probability density distribution of GPM precipitation (left) and mean changes of infrared spectral brightness temperature of H8/AHI in different precipitation grades(right)

道16通道亮温均有变化,即使仅有弱降水,光谱亮温变化幅度仍较大。当降水强度增强时,H8/AHI亮温梯度变化幅度较小,可能与文中统计样本中的降

水样本少,代表性不够有关;也可能与红外光谱对云较敏感,只能探测云顶亮温 and 无法穿透云层等自身特点有关<sup>[6,14,27]</sup>。但不同等级降水的亮温梯度存

在一定变化,说明 AHI 光谱亮温变化对不同等级降水有一定指示作用。文中选取的 2 个时间段 AHI 光谱亮温变化具有较好一致性,规律较为显著。

### 2.4 H8/AHI 通道降水信号识别—多通道相互关系分析

进一步选取安徽区域 2017 年 8 月 20 日至 2017 年 8 月 26 日时间段的 AHI 和 GPM 资料开展 AHI 光谱亮温规律分析和降水反演初步研究。

由图 5 可知,对于 H8/AHI 红外光谱通道 7 至通道 16,当降水发生时通道亮温梯度均有变化,其变

化规律与单通道分析结果类似。

文中进一步统计了此时间段内非降水视场点 (FOVs) 和降水视场点 AHI 不同通道亮温之间的关系。通道亮温散点分布见图 6,其中色标表示视场点 FOV 数量。

由图 6 可知,在统计分析非降水视场点时,通道 8 和 13、通道 10 和 12 具有较强的相关性,“非降水”时 H8/AHI 光谱亮温值均较大;当有降水时,H8/AHI 光谱亮温值总体较小,但也有一些值偏大,可能是存在弱降水、或受安徽区域地形等影响,也可能与

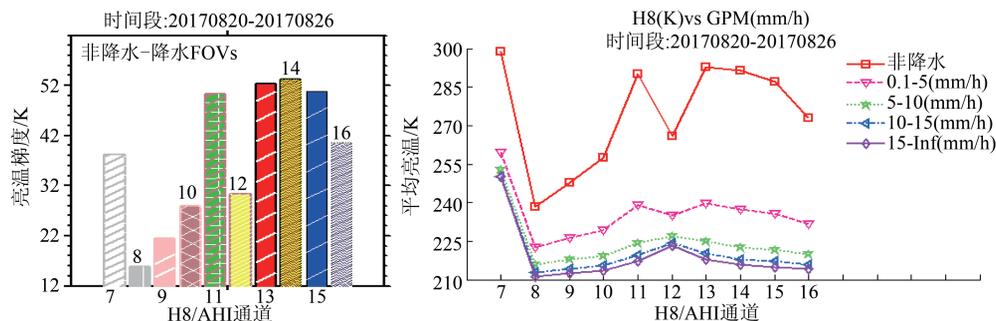


图5 非降水与降水视场点亮温梯度(左)和不同等级降水亮温均值(右)

Fig.5 FOVs brightness temperature gradient of the non-precipitation and precipitation(left) and mean brightness temperature in different precipitation grades (right)

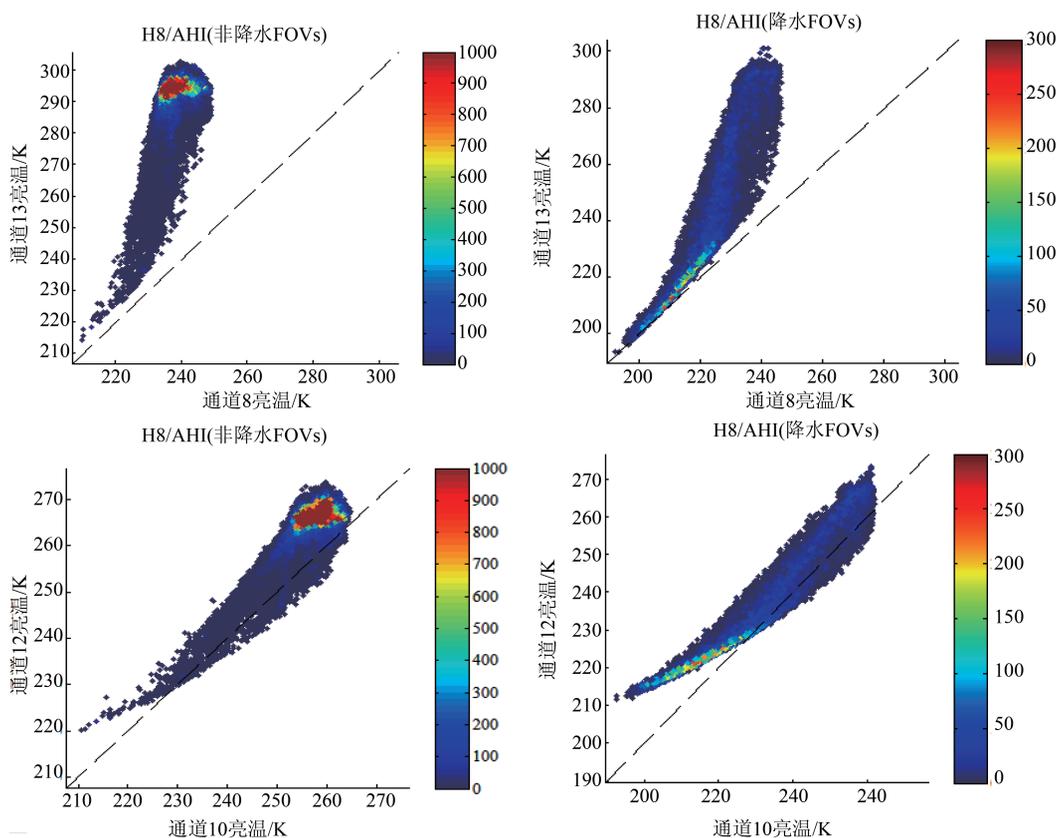


图6 H8/AHI不同通道亮温之间散点分布

Fig.6 Scatter distribution of the different channels between brightness temperatures of H8/AHI

文中匹配插值方法或 H8/AHI 探测仪器通道噪声等有关,后期开展相关方向深入研究。

### 3 H8/AHI 红外光谱亮温反演降水试验结果分析与比较

#### 3.1 精度评估度量方法

文中降水反演精度评估采用的“量化”方法有皮尔森相关系数(Pearson product-moment correlation coefficient,文中记为“R”)、结构相似性(Structural SIMilarity, SSIM)、归一化互信息(Normalized mutual information, NMI)、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)<sup>[22]</sup>、击中率(probability of detection, POD)、虚警率(false-alarm ratio, FAR)和临界成功指数(critical success index, CSI)<sup>[31]</sup>。

#### 3.2 基于贝叶斯模型平均 BMA 的通道亮温对目标函数贡献率优化

文中基于先验信息和 KNN 得到 H8/AHI 红外光谱“降水”信号后,给定通道贡献率  $W$  较为关键。文中基于贝叶斯模型平均 BMA 优化 H8/AHI 不同通道对反演模型目标函数贡献率  $W$ ,优化过程中分别采用 BMA-Gamma、BMA-Normal 和 BMA-Heteroscedastic 方法<sup>[21,23]</sup>。其中,Gamma、Normal 和 Heteroscedastic 分别表示异方差 Gamma、同方差正态和异方差正态条件概率分布。不同方法得到 AHI 不同通道  $W$  见图 7。

由图 7 可知,基于 BMA-Gamma 得到通道 10 的贡献率值较大,可能与通道 10 主要探测低层大气水汽等信息有关(见表 1)<sup>[3]</sup>,而其它通道贡献率值较小。

基于 BMA-Gamma、BMA-Normal 和 BMA-Heteroscedastic 方法开展 H8/AHI 亮温反演降水试验得到的 2017 年 8 月 24 日 08 时(世界时)反演降水和 GPM 降水分布见图 8。

由图 8 可知,基于 BMA-Gamma、BMA-Normal 和 BMA-Heteroscedastic 得到的 H8/AHI 光谱亮温反演降水与 GPM 降水结构形态、降水落区和强度具有

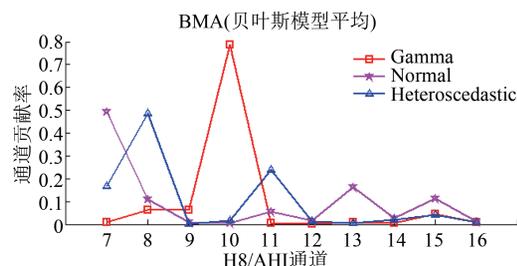


图 7 基于 BMA 方法优化的 H8/AHI 通道亮温对目标函数的贡献率

Fig. 7 Optimized contribution rate of the brightness temperature of H8/AHI channel to objective function based on the BMA

较好的一致性。

基于“量化”指标评估 H8/AHI 亮温反演降水和 GPM 降水精度见表 2。计算 POD、FAR 和 CSI 时的降水阈值设定为 1.5 mm/h。

从表 2“量化”评估指标可以看出,基于 BMA-Gamma 得到的 H8/AHI 不同光谱通道贡献率用于降水反演效果最好,可能与降水服从“Gamma”分布特征有关<sup>[32]</sup>。相关系数 R 最大值为 0.678 7,可能与样本量和样本代表性不足有关,后期深入研究。

#### 3.3 不同样本字典对降水反演结果影响分析

图 9 给出了 2017 年 8 月 24 日 09 时(世界时) GPM 降水和基于“不同样本”资料采用 BMA-Gamma 方法得到的反演降水。“不同样本”资料分别为:2017 年 8 月 24 日 07 时资料、2017 年 8 月 24 日 08 时资料、此 2 个时次样本资料合并。

进一步采用“量化”指标评估了基于历史不同样本字典 H8/AHI 光谱亮温反演降水和 GPM 精度见表 3。

结合图 9 和表 3 中“量化”指标可以看出,除了相关系数 R 度量外,基于 07 时的样本字典用于 09 时 AHI 亮温反演降水效果最好,基于 07 时和 08 时的样本字典反演优于 08 时样本。分析原因:因降水为小概率事件,样本库中各等级降水,尤其是极端降水可能“代表性”不够,“代表量”不足;同时文中采用

表 2 不同通道贡献率反演降水的量化指标评分

Table 2 Quantified index score of retrieval precipitation with different channel contribution rates

方法	R	SSIM	NMI	PSNR	POD(%)	FAR(%)	CSI(%)
BMA-Gamma	0.6787	0.7457	0.6788	18.2047	96.34	5.10	91.60
BMA-Normal	0.6529	0.7402	0.6858	17.8366	95.73	4.70	91.41
BMA-Heteroscedastic	0.6436	0.7376	0.6870	17.8252	95.70	4.75	91.34

注:SSIM 单位无量纲,SSIM 越大,则表明 2 个比较对象越相似,当 SSIM 为 1 时,则表明待比较的 2 个对象是同一对象<sup>[23]</sup>;NMI 单位为 mm;PSNR 单位为 dB(分贝),PSNR 值越大,则表明反演降水与 GPM 降水比较,失真越少。

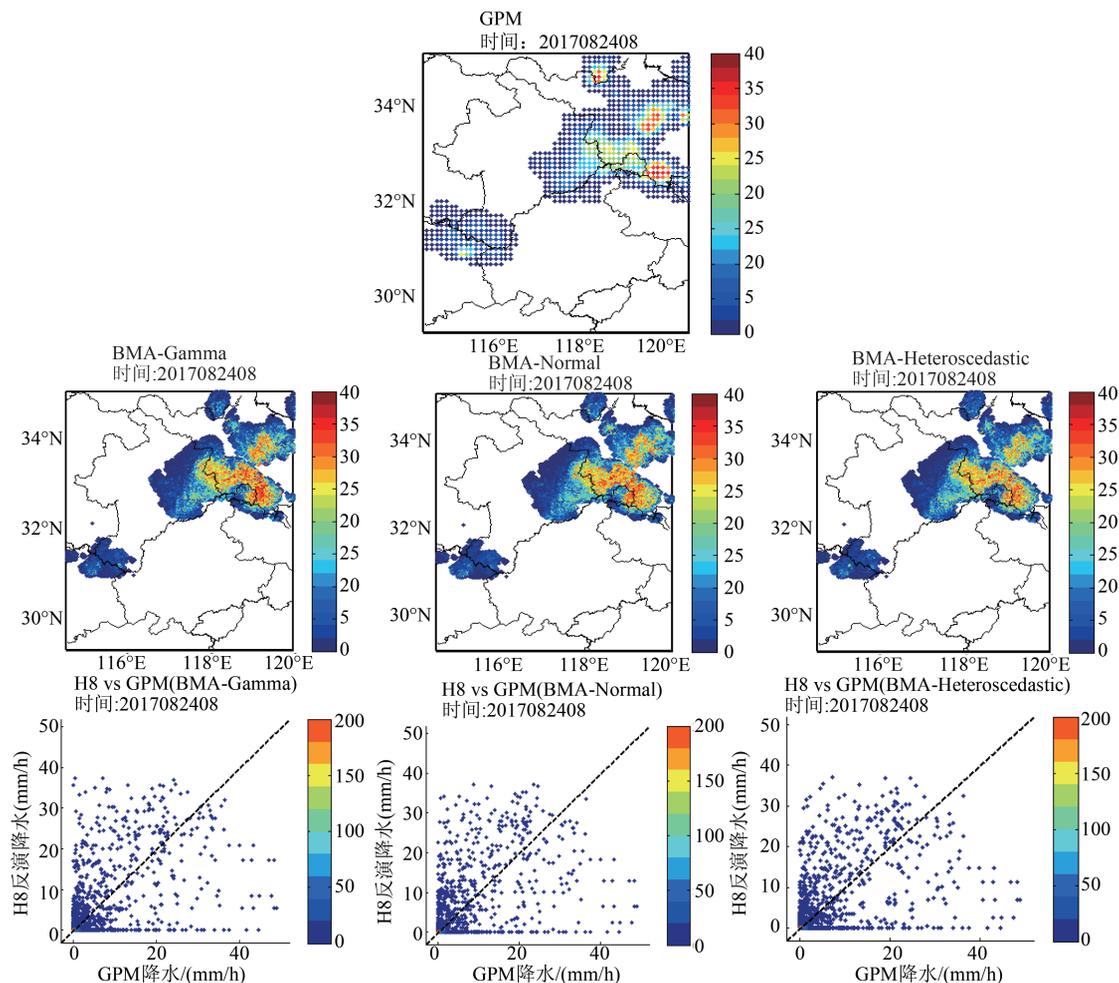


图8 不同BMA方法反演降水及GPM降水分布

Fig.8 Distribution of retrieval precipitation of different BMA methods and GPM precipitation

表3 不同样本量反演降水的量化指标评分结果

Table 3 Results of quantitative index scoring for precipitation retrieval with different sample sizes

样本量	R	SSIM	NMI	PSNR	POD(%)	FAR(%)	CSI(%)
07时	0.6037	0.7789	0.6503	16.9828	94.54	5.25	89.83
08时	0.6267	0.7382	0.7365	15.9193	92.07	4.16	88.53
07+08时	0.6357	0.7564	0.7002	16.4999	93.43	4.20	89.75

的反演算法是针对单视场点,未考虑降水整个形态结构,初步分析可能07时样本库的降水场或H8/AHI云图整个形态分布与09时次更接近。但从相关系数R度量可知,样本量越大,越接近反演时次,则相关系数值越大。

基于07时样本字典的SSIM值最大,而R值最小,从图9可以看出,07时样本均值最小,但标准差较大,说明数据变化幅度较大,可能存在一些降水极端值,这一点从峰度值36.4172也可以验证,说明基于07时样本能反演出09时极端降水,更说明文中样本字典构建会影响降水反演精度。

文中相关系数值偏低,说明红外光谱亮温反演降水具有一定难度,这点从孙绍辉等<sup>[14]</sup>、Behrangi等<sup>[19]</sup>和Tao等<sup>[20]</sup>研究得到的相关系数也较低可以佐证,故需后期深入研究红外亮温资料反演降水算法。

### 3.4 算法推广应用—基于H8/AHI亮温反演台风“玛莉亚”降水初探

文中进一步采用H8/AHI通道亮温反演2018年台风“玛莉亚”发展不同阶段降水。下图给出了2018年7月10日08时、16时和18时AHI通道13观测亮温、H8反演降水和GPM降水分布。此处“字

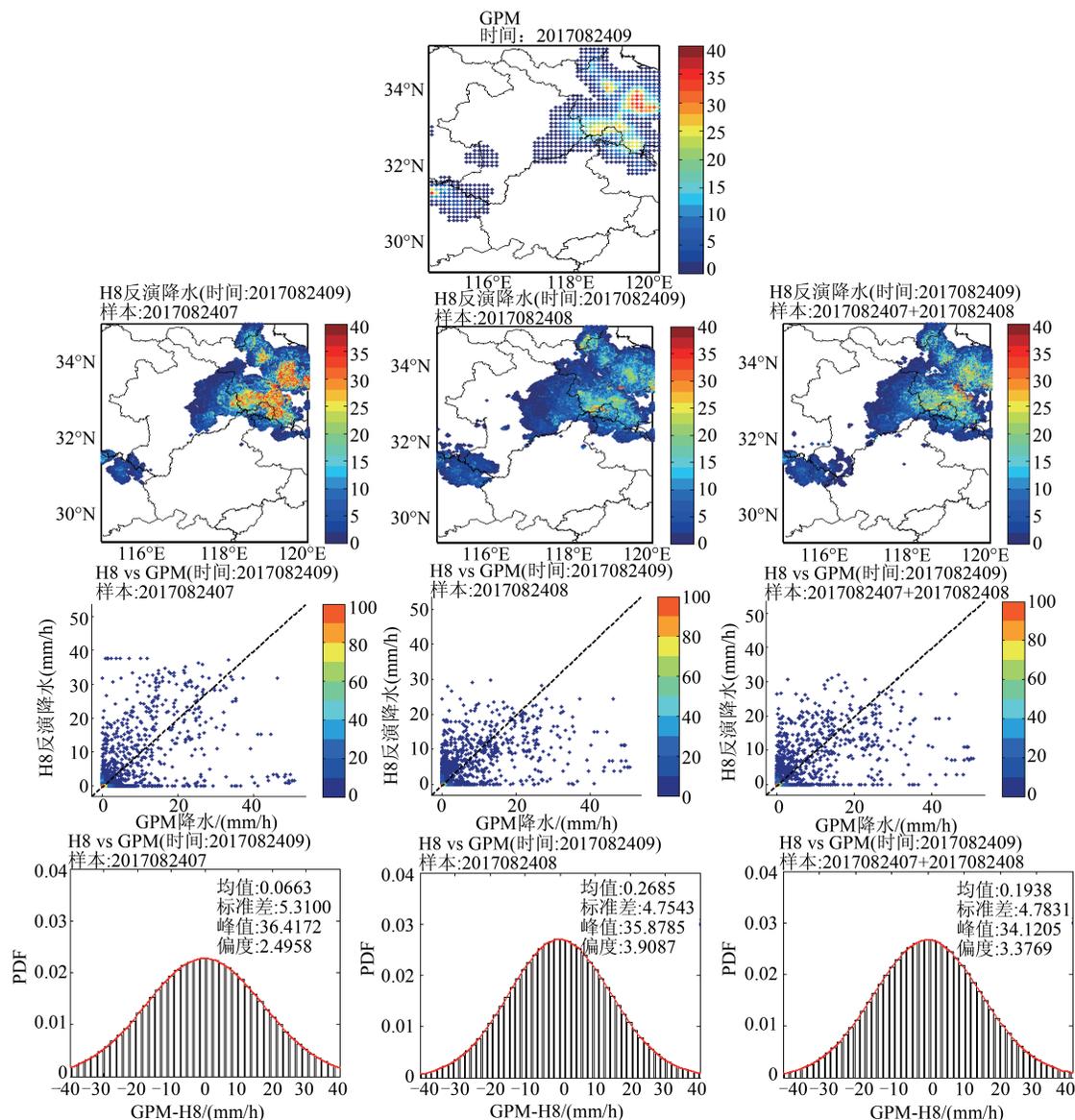


图9 不同历史样本库字典的H8/AHI反演降水,GPM降水散点及两者差值的概率密度函数分布

Fig.9 Scatter of H8/AHI retrieval precipitation of different historical sample dictionary, the GPM precipitation and PDF of precipitation difference

典”初步选为反演时次的前2个时次样本,采用BMA-Gamma进行通道贡献率度量。关于台风“玛莉亚”的介绍可参考Wang等<sup>[24]</sup>研究成果。

由图可知,采用文中的算法得到的H8/AHI亮温反演降水与GPM降水较吻合,且能反演出台风中的螺旋云雨带(图中红色“椭圆”标记)。因本试验使用的H8/AHI资料时空分辨率高于GPM资料,从H8反演的台风降水能得到降水的整体形态结构和“纹理”信息。空间上,文中算法可辅助开展GPM资料“降尺度”研究<sup>[22]</sup>,以增加“高频”信息,降尺度资料可用于水文等研究领域。时间上,H8每10 min观测一次,GPM每30 min一次数据,H8可辅助开展

GPM降水的时间插值,插值数据可用于分析台风等演变特征,文中仅为初探,后期将深入开展此方面研究。

#### 4 总结与展望

卫星红外资料反演降水一直是研究的热点和难点,本文选定安徽区域利用葵花8(H8)成像仪AHI资料,在统计分析“降水”和“非降水”红外不同光谱亮温梯度变化基础上,开展了反演降水算法初步应用研究。具体结论如下:

(1) H8/AHI红外光谱通道“降水”和“非降水”信号识别。当有降水发生时,H8/AHI红外光谱通道

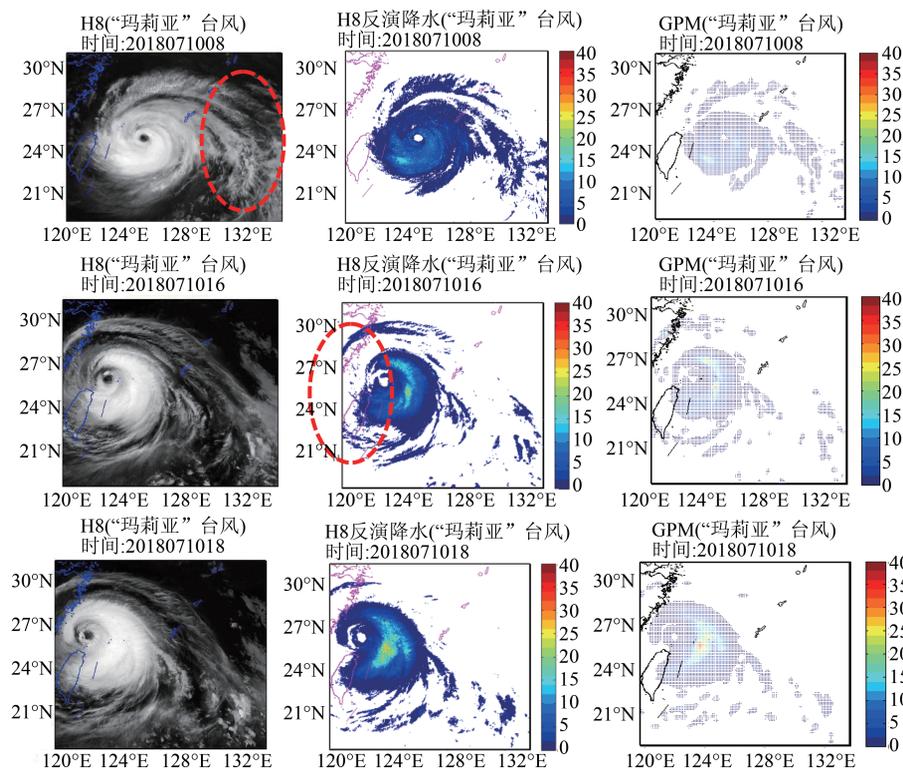


图10 H8/AHI通道亮温(左)、反演降水(中)和GPM降水(右)序列变化

Fig.10 Sequence changes of H8/AHI brightness temperature (left), retrieval precipitation (middle) and GPM precipitation (right)

7至通道16亮温梯度均有变化。统计发现即使存在弱降水,各光谱通道亮温也均有较大变化,不同通道间亮温对“降水”和“非降水”的响应也有内在关联。

(2)红外光谱通道亮温对反演模型目标函数的贡献率分析。加入统计分析出的H8/AHI红外光谱“降水”和“非降水”亮温梯度信息作为先验信息,能较好地辅助KNN识别通道亮温“降水”信号。根据度量指标可知,基于BMA-Gamma方法反演的降水与GPM降水较接近。

(3)不同样本构建的字典对降水反演结果影响分析。历史样本字典的构建较为关键,从相关系数度量可知,样本量越大,越接近反演时次,则相关系数数值越大。将文中方法推广到反演台风降水研究,得到台风降水与GPM降水较接近,且能反演出台风的螺旋云雨带。

因本文仅开展算法初步应用研究,统计分析资料时间段较短,历史样本库代表性不够,研究深度也不够。后期将开展大量实际个例研究,在构建历史样本字典时,加入如K指数、对流有效位能指数等<sup>[31]</sup>信息,并将可见光通道纹理信息融入到红外通道。在反演目标函数中引入稳健统计方法,加入

M-估计Huber-范数等<sup>[27]</sup>。进一步将成果业务化到风云四号A星AGRI<sup>[4]</sup>、降水监测、预报和预警中,以期更好地开展强对流和台风降水等公共气象服务。

**致谢:**在此衷心感谢Ebtehaj博士给予的理论解释和指导,感谢评审专家在百忙之中为本文提出的宝贵意见,特别感谢编辑部老师们为本稿件辛勤付出,感谢日本宇宙航空开发机构JAXA提供的Himawari-8数据,感谢美国国家宇航局NASA提供的GPM IMERG降水数据。

## References

- [1] LIU Yu-Jia, CHEN Hong-Bin, JIN De-Zhen, *et al.* Quality control and representativeness of automatic weather station rain gauge data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, (刘雨佳, 陈洪滨, 金德镇, 等. 加密自动气象站雨量计资料的质量控制及其相关关系的研究. *大气科学*) 2014, **38**(1): 159-170.
- [2] LU Jun-Feng, CHEN Ren-Sheng, HAN Chun-Tan, *et al.* Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products [J]. *Advances in Water Science*, (刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 多卫星遥感降水数据精度评价. *水科学进展*) 2010, **21**(3): 343-348.
- [3] Kim B Y, Lee K T. Using the Himawari-8 AHI multi-channel to improve the calculation accuracy of outgoing long-wave radiation at the top of the atmosphere [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**, 589.

- [4] Yang J, Zhang Z, Wei C, *et al.* Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites—FengYun 4 (FY-4) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, **98**(8): 1637–1658.
- [5] ZHONG Zhong, WANG Xiao-Da. Comparison among precipitation retrieval schemes over land and ocean with microwave brightness temperature data [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, (钟中, 王晓丹. 利用微波亮温资料反演陆地和海洋降水方案的对比. *解放军理工大学学报(自然科学版)*) 2006, **7**(2): 200–204.
- [6] WANG Gen, ZHANG Hua, YANG Yin. Research progress of quality control for AIRS data [J]. *Advances in Earth Science*, (王根, 张华, 杨寅. 高光谱大气红外探测器 AIRS 资料质量控制研究进展. *地球科学进展*) 2017, **32**(2): 139–150.
- [7] YAO Yun-Jun, QIN Qi-Ming, ZHAO Shao-Hua, *et al.* Retrieval of soil moisture based on MODIS shortwave infrared spectral feature [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (姚云军, 秦其明, 赵少华, 等. 基于 MODIS 短波红外光谱特征的土壤含水量反演. *红外与毫米波学报*) 2011, **30**(1): 9–14.
- [8] WANG Xiang, ZHAO Dong-Zhi, SUE Xiu, *et al.* Retrieving precipitable water vapor based on FY-3A near-IR data [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (王祥, 赵冬至, 苏岫, 等. 基于岸基实测数据的 FY-3A 近红外通道海洋大气水汽反演. *红外与毫米波学报*) 2012, **31**(6): 550–555.
- [9] SHI Chun-Xiang, XIE Zheng-Hui. Operational method of total precipitable water retrieved from satellite multi-channels' infrared data [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (师春香, 谢正辉. 卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法. *红外与毫米波学报*) 2005, **24**(4): 304–308.
- [10] WANG Tian-Tian. A compare of the thermal infrared signal from FY-2C and TRMM satellites and the investigation on rain detection by the thermal infrared signal [C]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, (王天天. FY-2C 和 TRMM 卫星红外通道信号差异分析及降水判识研究. 北京: 中国气象科学研究院) 2007.
- [11] CUI Lin-Li, YANG Yin-Ming, YOU Ran, *et al.* Application study of FY-3A/MWHS in quantitative precipitation estimation [J]. *Plateau Meteorology*, (崔林丽, 杨引明, 游然, 等. FY-3A/MWHS 数据在定量降水估计中的应用研究. *高原气象*) 2012, **31**(5): 1439–1445.
- [12] LI Xiao-Qing, YANG Hu, YOU Ran, *et al.* Remote sensing typhoon Songda's rainfall structure based on Microwave Radiation Imager of FY-3B satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, (李小青, 杨虎, 游然, 等. 利用风云三号微波成像仪资料遥感“桑达”台风降雨云结构. *地球物理学报*) 2012, **55**(9): 2843–2853.
- [13] LIU Yuan-Bo, FU Qiao-Ni, SONG Ping, *et al.* Satellite retrieval of precipitation: An overview [J]. *Advances in Earth Science*, (刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等. 卫星遥感反演降水研究综述. *地球科学进展*) 2011, **26**(11): 1162–1172.
- [14] SUN Shao-Hui, LI Wan-Biao, HUANG Yi-Peng. Retrieval of precipitation by using Himawari-8 infrared images [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, (孙绍辉, 李万彪, 黄亦鹏. 利用 Himawari-8 卫星红外图像反演降雨. *北京大学学报(自然科学版)*) 2019, **55**(2): 215–226.
- [15] Min M, Bai C, Guo J P, *et al.* Estimating summertime precipitation from Himawari-8 and global forecast system based on machine learning [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, **57**(5): 2557–2570.
- [16] Ferraro R R, Marks G F. The development of SSM/I rain rate retrieval algorithms using ground based radar measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, **12**(8): 755–770.
- [17] LAN Hong-Ping, ZHANG Ru-Lin, JIANG Yin. Infrared rainfall estimation technique for small area and its use in very short-term weather forecasting [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, (兰红平, 张儒林, 江崑. 用红外云图估测小区域雨强及其在短时预报中的应用. *热带气象学报*) 2000, **16**(4): 366–373.
- [18] Ebtehaj A M, Bras R L, Foufoula-Georgiou E. Shrunk Locally Linear Embedding for Passive Microwave Retrieval of Precipitation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(7): 3720–3736.
- [19] Behrangi A, Hsu K L, Lmam B, *et al.* PERSIANNMSA: a precipitation estimation method from satellite based multispectral analysis [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, **10**(6): 1414–1429.
- [20] Tao Y, Hsu K, Gao X, *et al.* A two-stage deep neural network framework for precipitation estimation from bispectral satellite information [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, **19**(2): 393–408.
- [21] Wang Gen, Ding Conghui, Liu Huilan. Precipitation retrieval from Himawari-8 satellite infrared data based on dictionary learning method and regular term constraint [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2019, **10**(3): 61–65, 68.
- [22] WANG Gen, SHENG Shao-Xue, HUANG Yong, *et al.* Study on precipitation image downscaling based on the method of Ill-posed problems solving [J]. *Advances in Earth Science*, (王根, 盛绍学, 黄勇, 等. 基于不适定反问题求解的降水图像降尺度研究. *地球科学进展*) 2017, **32**(10): 1102–1110.
- [23] Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, *et al.* Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles [J]. *Monthly Weather Review*, 2005, **133**(5): 1155–1174.
- [24] Wang Gen, Wang Dongyong, Han Wei, *et al.* Typhoon cloud system identification and forecasting using the Feng-Yun 4A/Advanced Geosynchronous Radiation Imager based on an improved fuzzy clustering and optical flow method [J]. *Advances in Meteorology*, 2019, ID 5890794.
- [25] Vrugt J A, Braak C J F, Diks G G H, *et al.* Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2009, **10**(3): 271–288.
- [26] Hocking J, Rayer P, Rundle D, *et al.* RTTOV v11 Users Guide. NWPSAF-MO-UD-028, [EB/OL]. [https://nwp-saf.eu/site/download/documentation/rtm/docs\\_rttov11/users\\_guide\\_11\\_v1.4.pdf](https://nwp-saf.eu/site/download/documentation/rtm/docs_rttov11/users_guide_11_v1.4.pdf), 2015.
- [27] WANG Gen, TANG Fei, LIU Xiao-Bei, *et al.* Application of M-estimators method on FY-3B/ IRAS channel brightness temperature generalized variational assimilation

- [J]. *Journal of Remote Sensing*, (王根, 唐飞, 刘晓蓓, 等. M-估计法广义变分同化FY-3B/IRAS通道亮温. *遥感学报*) 2017, **21**(1):52-61.
- [28] Sounak K B, Chandrasekar V. Cross-Validation of Observations between the GPM Dual-Frequency Precipitation Radar and Ground Based Dual-Polarization Radars [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(11), 1773.
- [29] Tao Yumeng, Duan Qingyun, Ye Aizhong, *et al.* An evaluation of post-processed TIGGE multimodel ensemble precipitation forecast in the Huai river basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**(D):2890-2905.
- [30] YU Bo, BAO Wen-Zhong, WANG Dong-Yong, *et al.* Basis and practice of Anhui weather forecast [M]. Beijing: Meteorological Press, (于波, 鲍文中, 王东勇. 安徽天气预报业务基础与实务). 北京: 气象出版社, 2013.
- [31] Liu Z J, Min M, Li Jun, *et al.* Local severe storm tracking and warning in pre-convection stage from the new generation geostationary weather satellite measurements [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**:383.
- [32] Husak G J, Michaelsem J, Funk C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, **27**:935-944.