大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

辐射传输模式对地基微波辐射计观测亮温的模拟能力分析

邹荣士 何文英 王普才 茆佳佳 陈洪滨 李军 南卫东 常越

Assessment of Radiative Transfer Models Based on Observed Brightness Temperature from Ground-Based Microwave Radiometer

ZOU Rongshi HE Wengying WANG Pucai MAO Jiajia CHEN Hongbin LI Jun NAN Weidong CHANG Yue

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20134

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

风云三号微波观测资料的海雾同化模拟
Sea Fog Simulation with Assimilation of FY-3A Microwave Data
大气科学. 2017, 41(3): 421 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16105

安徽省淮南森林冠层辐射传输过程的特征
Characteristics of Solar Radiation and Radiative Transfer of a Forest Canopy in Huainan, Anhui Province
大气科学. 2021, 45(1): 205 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19251

不同卫星微波遥感资料同化对台风路径模拟的影响
Effects of Assimilating Microwave Remote Sensing Data of Different Satellite on the Simulation of Typhoon Track
大气科学. 2018, 42(2): 398 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17150

基于地面短波辐射观测资料计算淡积云的辐射强迫及水平尺度方法研究
Estimation of Radiative Forcing and Chore Length of Shallow Convective Clouds (SCC) Based on Broadband Pyranometer Measurements
大气科学. 2018, 42(2): 292 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17115

一个检验太阳光度计定标结果可靠性的方法
An Objective Method for Assessment of Langley Calibrations of Sunphotometer
大气科学. 2020, 44(1): 39 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1905.18184

基于CCSM4.0长期积分试验评估不同辐射强迫对中国干旱半干旱区降水的影响
Effects of Radiative Forcing on Precipitation over Arid and Semi-arid Region in China Based on CCSM4.0 Simulation
大气科学. 2018, 42(2): 311 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16167

关注微信公众号，获得更多资讯信息

邹荣士, 何文英, 王普才, 等. 2021. 辐射传输模式对地基微波辐射计观测亮温的模拟能力分析 [J]. 大气科学, 45(3): 605−616.　ZOU Rongshi, HE Wengying, WANG Pucai, et al. 2021. Assessment of Radiative Transfer Models Based on Observed Brightness Temperature from Ground-Based Microwave Radiometer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 605−616. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20134

辐射传输模式对地基微波辐射计观测亮温的模拟能力分析

邹荣士[1]　何文英[1,3]　王普才[1,3]　茆佳佳[4]　陈洪滨[1,3]
李军[1]　南卫东[1,2]　常越[1]

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大气物理研究所华北香河全大气层野外科学观测研究站，香河 065400
3 中国科学院大学，北京 100049
4 中国气象局气象探测中心，北京 100081

摘　要　提供高时间分辨率大气温度湿度廓线的地基微波辐射计近年来广泛使用，多通道观测亮温的数据质量是大气廓线产品合理性的基本保障。一般定期液氮绝对定标可以更好维护亮温数据质量，但实际操作颇为不易。辐射传输模式作为一种辅助工具，可以检验和认识地基微波辐射计观测亮温的数据质量。本文针对三个辐射传输模式：MonoRTM、ARTS 和 MWRT，结合北京探空观测资料、北京观象台和河北香河站同类型的德国 RPG 地基微波辐射计观测资料，分析比较了三个模式的模拟与观测亮温差异，评估不同辐射传输模式对地基微波辐射计观测的模拟能力。地基微波辐射计 14 个通道观测亮温与模式模拟的差异统计比较发现：三个模式的模拟结果与地基微波辐射计大部分通道的观测亮温都很接近，与观测结果具有很好一致性（如相关系数高达 0.99），而对温度通道 ch8（51.26 GHz）和 ch9（52.28 GHz），三个模式模拟与观测相关系数明显较低（<0.80），并且存在显著的绝对偏差（4～5 K），表明模式在这两个通道的模拟能力有待提高。三个模式中，MonoRTM 模式在温度通道 ch8、ch9 和 ch10（53.86 GHz）存在明显的系统性偏差，尤其是 ch8 高达 5 K；ARTS 模式对水汽通道 ch1（22.24 GHz）的模拟能力相对较弱；MWRT 模拟与观测亮温在多个通道上相对更为接近和稳定，尤其系统性偏差最小。此外，探空廓线与地基观测站的空间位置不一致，对地基微波辐射计水汽通道的模拟结果影响较为显著，而对水汽不敏感的温度通道影响甚微。两地观测亮温与模式模拟的比对，初步表明北京观象台地基微波辐射水汽通道的观测质量有待改进。

关键词　地基微波辐射计　微波亮温　辐射传输模式　反演
文章编号　1006-9895(2021)03-0605-12　　**中图分类号**　P412.1　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20134

Assessment of Radiative Transfer Models Based on Observed Brightness Temperature from Ground-Based Microwave Radiometer

ZOU Rongshi[1], HE Wengying[1,3], WANG Pucai[1,3], MAO Jiajia[4], CHEN Hongbin[1,3], LI Jun[1], NAN Weidong[1,2], and CHANG Yue[1]

收稿日期　2020-03-16；**网络预出版日期**　2020-09-01
作者简介　邹荣士，男，1981 年出生，博士，主要从事大气探测和大气遥感研究。E-mail: zours@mail.iap.ac.cn
通讯作者　何文英，E-mail: hwy@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划项目 2017YFC1501700，国家自然科学基金项目 41575033
Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1501700), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41575033)

1 *Key Laboratory of middle Atmosphere and Global Environment Observation* (*LAGEO*), *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

2 *Xianghe Observatory of Whole Atmosphere*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xianghe* 065400

3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

4 *Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract Ground-based microwave radiometers (MWRs) have been widely used in recent years due to the fact that they provide atmospheric temperature and humidity profiles with high temporal resolutions. The quality of the multi-channel brightness temperature (TB) is the measure used to determine the quality of retrieved atmospheric profile products. In general, periodic absolute calibration using liquid nitrogen best maintains the quality of TB observations, but this operation is complex and difficult. As an auxiliary tool, radiative transfer model can be used to determine the TB quality of MWRs. Using observations from the Beijing radiosonde and two RPG MWRs located at the Beijing Observatory (GXT) in Beijing and the Xianghe site (XH) in Hebei, we evaluated three radiative transfer models—MonoRTM, ARTS, and MWRT—by comparing their simulations with those of the corresponding TBs observed at both sites. The results show that for most of the 14 MWR channels the simulations of the three models are highly consistent with the observed TBs (i.e., correlation coefficients up to 0.99), but for the temperature channels ch8 (51.26 GHz) and ch9 (52.28 GHz), there was a significant absolute deviation (approximately 4–5 K) between the simulated and observed TBs, and the correlation coefficient decreased significantly (<0.80), which indicates that the model simulation at these two channels must be improved. Of the three models, MonoRTM showed obvious systematic deviation at temperature channels ch8, ch9, and ch10 (53.86 GHz), particularly at ch8, which had a bias of up to 5 K. The ARTS model generated the worst simulation at the water vapor channel ch1 (22.24 GHz). The MWRT simulations were relatively more stable and closer to the corresponding TB observations at 14 channels, with the least systematic deviation. In addition, the locations of the radiosonde measurements differed from that of the MWR site, which had a significant impact on the simulations for the MWR's water vapor channels. Comparisons of the observed and simulation TBs at both sites indicates that the observation quality of the water vapor channels for the MWR at GXT must be improved.

Keywords Ground-based microwave radiometer, Microwave brightness temperature, Radiative transfer model, Retrieval

1 引言

微波辐射计是被动接收环境发射的微波辐射而进行遥感探测的仪器，具有较高灵敏度和高度方向性。由于微波波长较长，能够穿透一定云层，因此地基微波辐射计能够 24 小时全天候工作，尤其廓线型地基微波辐射计利用大气水汽和氧气的微波辐射信号能够反演大气温度、湿度廓线以及云雨信息（Westwater, 1993; Ware et al., 2003; 姚志刚和陈洪滨, 2005），能够弥补每日两次的常规探空廓线测量的不足。所以，近年来地基微波辐射计在气象领域广泛应用，成为大气探测的重要技术手段之一（刘红燕等, 2009; 赵兵科等, 2009; Cimini et al., 2011, 2015; Löhnert and Maier, 2012; 刘思波等, 2015）。

在正常工作环境中，地基微波辐射计可以在无人看管条件下全天候运行，提供秒级的多通道微波亮温（TB，Brightness Temperature）。基于微波观测亮温，采用统计反演方法，如多元线性回归或非线性神经网络方法，可以反演出高时间分辨率的大气温度和湿度廓线。通常气象台站或业务部门会直接使用地基微波辐射计提供的大气温湿廓线，因此反演廓线的数据质量需要更多关注。

除了反演方法外，地基微波辐射计反演的大气廓线质量与观测亮温的数据质量紧密相关。尽管地基微波辐射计研制技术现在已经较为成熟，但在具体实践应用中，发现地基微波辐射计的观测亮温会在个别通道或整体出现系统性漂移，产生明显的观测误差，往往在液氮绝对定标后会恢复正常（王振会等, 2014; 朱雅毓等, 2015）。地基微波辐射计在外场观测中通常要求每半年进行一次液氮绝对定标。而液氮属于危险化学品，必须用液氮专用的液氮罐储存才行；由于温度过低，皮肤接触液氮时间超过 2 秒即可致冻伤，在外场液氮定标时，必须佩戴专业防护手套。此外，液氮只能在某些化工厂、研究机构等处购买，有些观测台站附近无法获取，因此，一些台站的地基微波辐射计未必能够保证每半

年一次的液氮绝对定标，其观测温数据质量也未必有保障。

为了提高对地基微波辐射计日常观测数据质量的监控和检验，本文考虑引入辐射传输模式。辐射传输模式是基于辐射传输方程建立的，是连接观测和模拟辐射信息的桥梁，在大气遥感领域广泛使用，如卫星观测的定标以及产品的反演算法，卫星资料同化等。Clough et al.（2005）较为系统介绍了几种公开可用的辐射传输模式及其改进之处，并指出这些模式已经能够较好应用于反演算法开发和欧洲天气预报模式中。通过辐射传输模式得到的模拟亮温与观测亮温的一致性，可以分析评估卫星观测数据的质量（Goldberg et al., 2001; Lu et al., 2011）。Hewison et al.（2006）分析比较四种常用的微波吸收模式对于地基微波辐射计观测的模拟能力，并指出这些模式对于地基微波辐射计有较高的定标准确性。国内学者利用辐射传输模式作为辅助工具（李青等, 2014; 茆佳佳等, 2018），结合地基微波辐射计观测时刻的大气廓线得到模拟亮温，根据模拟与观测亮温的比对，相对独立客观地评估观测亮温的数据质量。王振会等（2014）利用辐射传输模式计算的模拟亮温发现所用的地基微波辐射计观测亮温在某些微波通道出现显著的系统性漂移，若继续使用这些明显有误的观测亮温去反演大气廓线，势必产生有误的大气温湿廓线信息。

基于辐射传输原理建立的辐射传输模式具有扎实的理论基础，并且模式模拟结果与地基微波辐射计的具体标定无关。因此，本文针对北京国家综合气象观测试验基地（简称观象台站）和华北香河全大气层野外科学观测研究站（简称香河站）布设的同类型的地基微波辐射计的观测亮温数据，采用多个辐射传输模式进行模拟交叉验证，不仅比较不同辐射传输模式模拟结果的差异，同时还根据差异程度分析不同模式的模拟能力以及观测亮温的质量。

2　观测数据和辐射传输模式

自 2018 年 1 月，国家重点研发项目“超大城市垂直综合气象观测技术研究及试验”分别在中国科学院大气物理研究所的华北香河全大气层野外科学观测研究站（香河站）和北京国家综合气象观测试验基地（观象台站）开展了地基微波辐射计，两地的微波辐射计都采用德国 RPG 公司生产的 RPG-HATPPRO 廓线型地基微波辐射计，主要利用微波段的水汽和氧气吸收波段通道组的辐射特性差异反演大气湿度和温度廓线。

RPG-HATPPRO 共有 14 个通道，其中通道 1～7（ch1–ch7）的中心频率依次是：22.24、23.04、23.84、25.44、26.24、27.84、31.40 GHz，处于水汽吸收线中心及其附近，称为水汽通道，用于反演大气湿度廓线；通道 8～14（ch8 至 ch14）的中心频率依次是：51.26、52.28、53.86、54.94、56.66、57.30、58.00 GHz，位于氧气吸收带及其附近，称为氧气通道，主要用于反演大气温度廓线。该仪器按照要求每半年进行一次液氮绝对定标，以保证观测亮温数据的质量。通常，RPG-HATPPRO 采用垂直对天顶的观测模式，每 1～2 秒接收一组亮温数据，而每隔大约 10 秒产生反演的大气温度和湿度廓线。如此高时间分辨率的大气廓线信息，可以弥补常规探空每日 2 次的观测廓线，为监测和研究大气温湿度垂直结构的时空演变提供宝贵的观测资料。

要验证两地微波辐射计观测亮温，还需要探空测量的大气廓线观测数据。北京观象台站（39.81°N，116.48°E，简写为 GXT）和河北香河站（39.95°N，116.96°E，简写为 XH），两地相距约 50 km。北京探空在观象台站施放，也是距离香河观测站最近的探空，因此本文统一采用北京观象台站（即北京站）探空观测数据，为辐射传输模式提供所需的大气廓线输入信息，选取的时间段是 2019 年 1～3 月。本文比较分析的是与探空观测时段对应的地基微波辐射计观测亮温和模式模拟亮温，其中观测亮温为探空测量时段内高时间分辨率的多组观测亮温的平均结果。

对于辐射传输模式，考虑到目前存在多种大气辐射传输模式，为了选取适合地基微波辐射计的辐射模式，有必要对模式的模拟能力进行认识和评估。本文针对相关文献上提到较多的三个模式，即 MonoRTM、ARTS 和 MWRT，进行比较和评估。

MonoRTM（the Monochromatic Radiative Transfer Model）模式是美国大气环境研究所（AER，Atmospheric and Environmental Research Inc.）开发的一款适合于微波段的大气辐射传输模型，物理基础与逐线积分模式一致，主要针对有限的单色光谱进行模拟。该模式在 Clough et al.（2005）工作中与其他辐射模式进行比对分析，也多次与美国南部大平原（SGP）上的多种观测数据进行验证，包括

地基微波辐射计（Turner et al., 2007）。MonoRTM 模式也陆续被国内学者使用，开展地基微波辐射计反演算法研究（黄兴友等, 2013）和观测亮温数据质量的研究（茆佳佳等, 2018）。该模型的输入数据包含多个输入文件，包括大气温度、气压、湿度等大气参数；微波辐射计的通道数、天顶角等信息，模式输出不同情况下的模拟亮温。

ARTS（the Atmospheric Radiative Transfer Simulator）模式主要由德国汉堡大学和瑞士查尔姆斯理工大学开发，其目的是集合开发一个高度模块化、快速精确、普遍适用的辐射传输模式，并且专门针对不同星载探测器设计不同的辐射模块，如微波垂直探测器（AMSU）、微波湿度探测（MHS）、改进型甚高分辨率辐射仪（AVHRR）、高分辨率红外辐射探测器（HIRS）等（Buehler et al., 2011, 2018）。李书磊等（2016）详细介绍了 ARTS 模式组成模块及其多方面应用。

除了上述两个公开并高度模块化开发的辐射传输模式，本文还使用了一个简单快捷的微波辐射传输模式 MWRT（Liu, 1998）。该模式采用 4 流离散纵坐标方法（DOM：Discrete Ordinate Method）处理辐射传输方程。尽管多流 DOM 方法能准确和稳定地解决辐射传输计算问题，但是计算量大影响计算效率，不利于辐射传输模式在实际工作中应用。为此，Liu（1998）开发建立快速高效的 4 流 DOM 的 MWRT 模式，跟 32 流辐射传输模式相比，MWRT 不仅计算效率高，并且计算准确性也比较好。此外，MWRT 模式含有详实而丰富的云和降水粒子衰减处理过程，尤其采用离散偶极子近似（Liu, 2004）方法处理雪花、冰雹等大的非球形冰相粒子衰减，对于云雨条件下的大气微波辐射传输计算问题具有较强的处理能力。

3 模式模拟与观测亮温的比对分析

上述三个模式运行需要的输入参数，主要包括地基微波辐射计多通道的中心频率、扫描天顶角信息、还有大气温湿度廓线信息。结合 2019 年 1～3 月北京探空站提供的大气廓线观测数据，三个模式输出三组 RPG 地基微波辐射计 14 个通道的模拟亮温，然后与 GXT 和 XH 两站的地基微波辐射计观测亮温进行匹配。通过比较分析观测和模拟亮温差异，评估三个模式的模拟能力。需要说明的是，目前模式模拟只是输入大气温湿度廓线信息，没有云或降水参数信息，即模式没有考虑云或降水过程对于模拟结果的影响。因此在本文分析的匹配样本，只选取地基微波辐射计上降雨传感器显示无雨的观测样本，即包括有云和晴空时的观测数据。

3.1 三种模式模拟结果与单站观测的比较

为了定量化描述模拟与观测亮温的差异程度，这里引入公式（1～4）定义的几个统计参数：平均偏差（Mean）、绝对偏差（Amean）、标准偏差（Stddev）和相关系数（Corr）：

$$\mathrm{Mean} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i), \tag{1}$$

$$\mathrm{AMean} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|(x_i - y_i)|, \tag{2}$$

$$\mathrm{Stddev} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}, \tag{3}$$

$$\mathrm{Corr} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}, \tag{4}$$

其中，x 和 y 分别为地基微波辐射计多通道对应的观测和模拟亮温，i 是匹配样本数目。Mean 和 AMean 可以反映出所有匹配样本总的模拟和观测差异程度，考虑到 Mean 存在正负偏差相互抵消作用，引入 AMean 能更为直观体现每个匹配样本差异程度对总平均结果的贡献；标准偏差则可以反映出所有匹配样本的模拟与观测差异离散分布程度，若该值越大，表明多个差异样本相互之间越离散；相关系数则反映所有样本的模拟和观测结果的线性一致性，本文后面展示的相关系数都是通过了置信度为 99% 的显著性检验。首先分析香河站地基微波辐射计观测亮温与三个模式模拟结果的差异。先选取三个模式对水汽通道 1（Channel 1，简写为 ch1，22.24 GHz）和 ch7（31.40 GHz），温度通道 ch8（51.26 GHz）和 ch14（58.0 GHz）的模拟结果与对应观测亮温的散点分布图（图 1），并给出相应的统计参数。图 1 中自上而下对应水汽通道 ch1、ch7 和温度通道 ch8、ch14，从左往右对应 MWRT、MonoRTM 和 ARTS 三个模式。总体看来，这四个通道的模拟与观测一致性整体都较好，其中温度通道 ch14 一致性最佳，三个模式模拟与观测的相关系数都在 0.99 以上，全部样本的散点图都集中分布在 y=x 的蓝色对称轴线上；其次是水汽通道 ch1，模式 MonoRTM 和 MWRT 结果与观测的相关系数很接近，基本都是 0.96，相比较而

言 ARTS 模拟与观测稍有点离散，相关系数只有 0.90，标准差也高于前两个模式；而对于水汽通道 ch7 和温度通道 ch8，三个模式模拟与观测的整体一致性有所减弱，尤其出现个别偏离明显的样本，

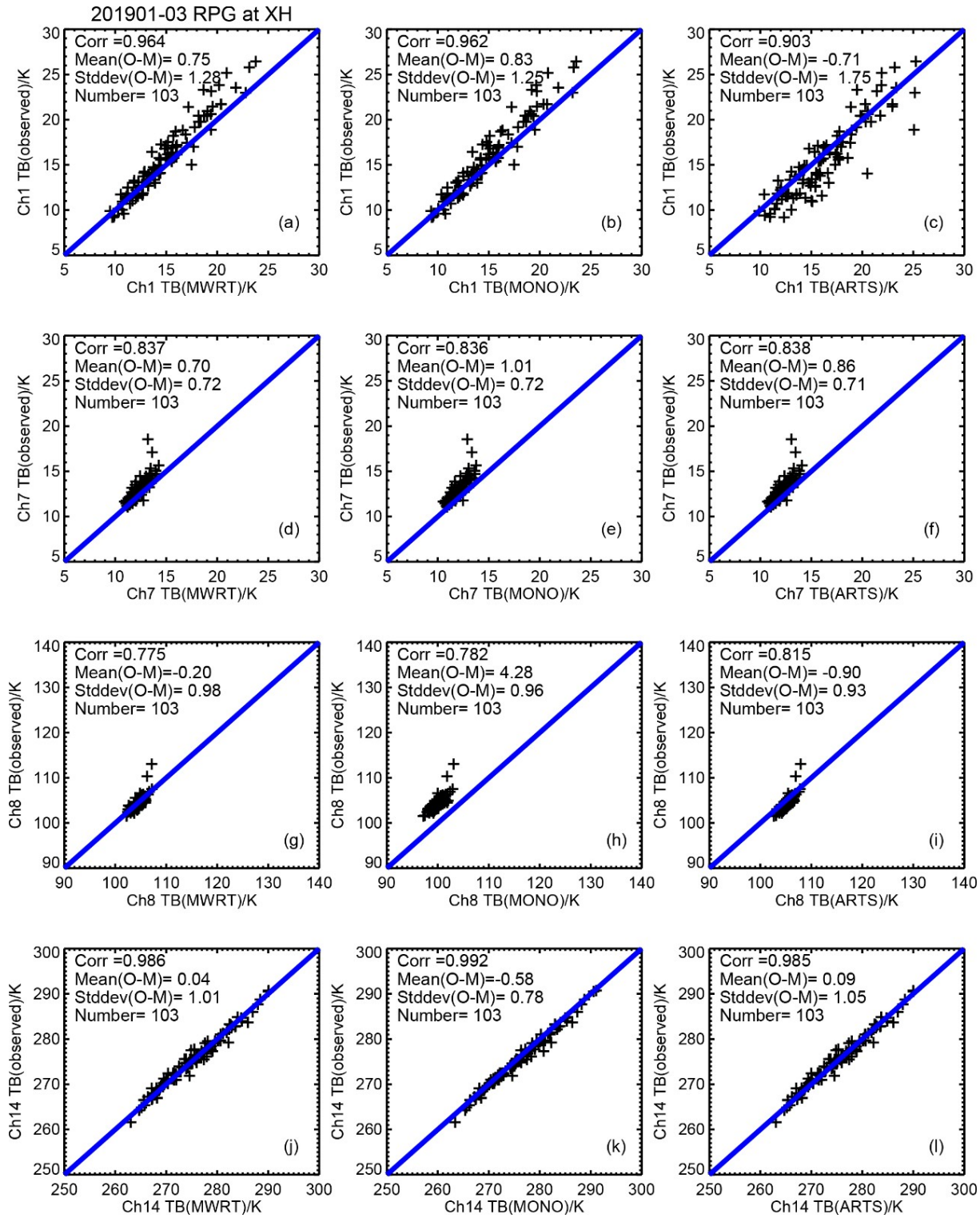

图 1　香河站（XH）地基微波辐射计的 ch1（ch 代表通道）、ch7、ch8、ch14 的观测亮温（O）与三种模式 MWRT、MonoRTM、ARTS 模拟亮温（M）的散点分布图

Fig. 1　Scatter plots of simulated brightness temperature (TB) (M) from the MWRT, MonoRTM, and ARTS models and observed TB (O) at ch1 (ch indicates channel), ch7, ch8, and ch14 by the MWR at the Xianghe site (XH)

从而导致两者的相关系数降低到 0.80 左右，主要原因是这两个通道对于大气中水汽变化更为敏感。

类似的，图 2 是北京观象台（GXT）地基微波辐射计观测亮温与三个模式模拟结果的散点分布图。这里选取差异较明显的三个通道：水汽通道 ch7 和温度通道 ch8 和 ch9（52.28 GHz）。由于观象台地基微波辐射计观测资料在 2019 年 1～3 月有部分缺失，与模式模拟亮温相匹配的样本数明显少于香河站，不过观测与模拟亮温的一致性看上去比香河站比对结果更好，尤其对于通道 ch7，如图 2a–c 显示，三个模式的模拟结果与观测亮温的线性相关性都高达 0.97，没有出现明显离散的样本，对应标准偏差只有 0.3 K，不过在具体数值上，模拟亮温整体都系统性偏低于对应观测亮温，产生约 2.5 K 的平均偏差。对于温度通道 ch8 和 ch9，三个模式与观测的相关系数和标准差各有点不同，其中 ARTS 模拟与观测相关系数最高而且标准差最小，其次是 MonoRTM，最后是 MWRT。但是在具体量值差异上，MonoRTM 在 ch8 出现明显的系统性偏差（>5 K），而另外两个模式则与观测较为接近，

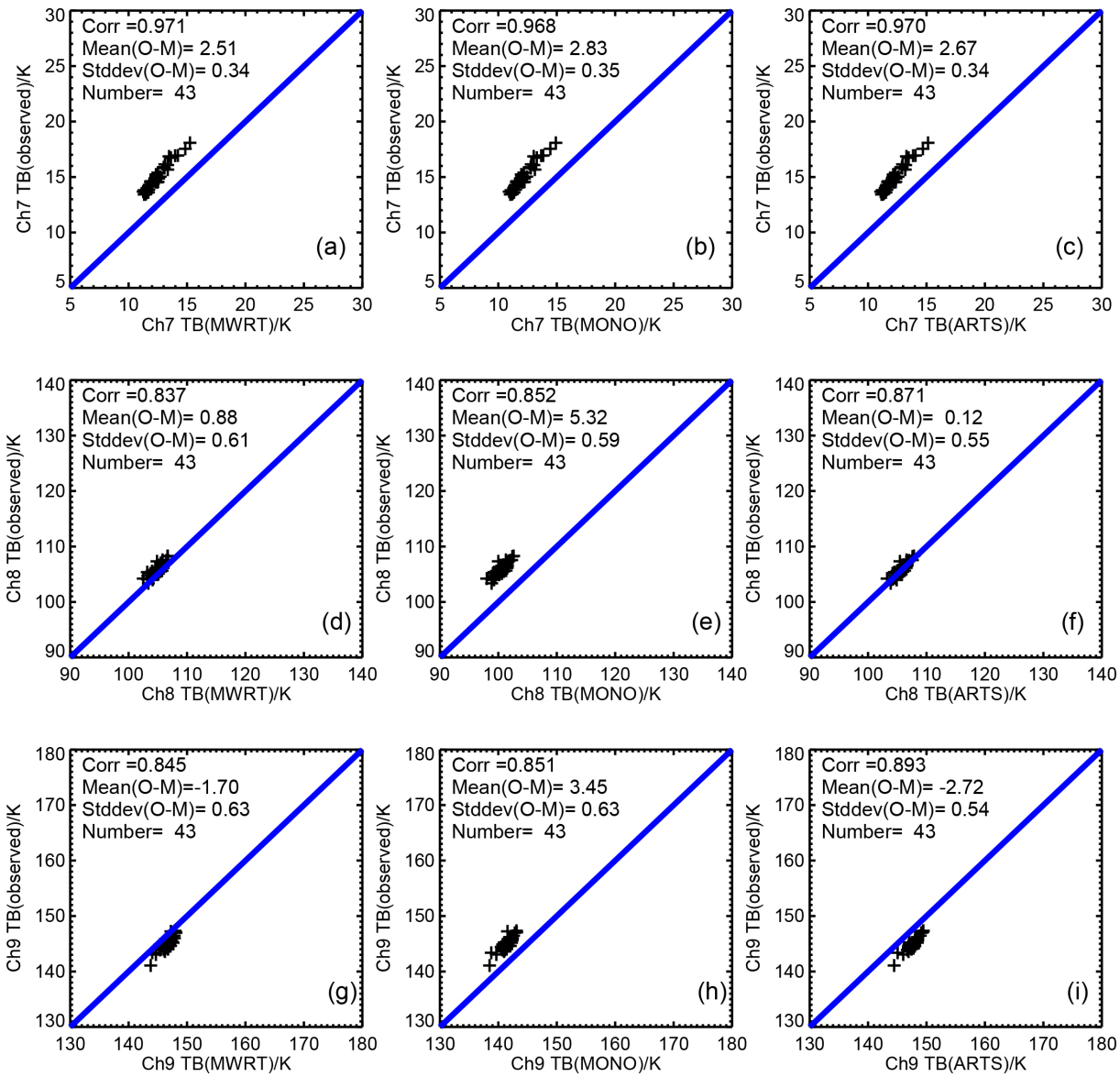

图 2 北京观象台（GXT）地基微波辐射计 ch7、ch8 和 ch9 通道的观测亮温（O）与三种模式 MWRT、MonoRTM、ARTS 模拟亮温（M）的散点分布图

Fig. 2 Scatter plots of simulated TBs (M) from the MWRT, MonoRTM, and ARTS models and observed TBs (O) at ch7, ch8, and ch9 by the MWR at the Beijing Observatory (GXT) site

基本都集中在 $y=x$ 的蓝色对称轴线上；而对于 ch9，三个模式模拟结果与对应观测都呈现不同程度的偏离，相比较而言，MWRT 和 ARTS 都系统性偏高与观测，只是后者更为明显，而 MonoRTM 系统性偏低观测最明显，超过 3 K。

3.2　两站观测结果与模式的比较

除了上述单站个别通道的比对，香河站（XH）和观象台（GXT）地基微波辐射计的 14 通道观测与模拟亮温的统计参数比对一起显示在图 3 中，其中实线为 XH 站点，虚线为 GXT 站点。首先，从图 3a 中相关系数比对，可以看到 MonoRTM 和 MWRT 在 14 个通道上基本重合，而 ARTS 除了水汽通道 ch1 和温度通道 ch8 和 ch9 外，其余通道也与前两个模式基本重合。可以说，单个站点的三个模式模拟与观测结果的相关系数在大多数通道上基本重合，但是两个站点还是有明显差异：对于水汽通道（ch1 至 ch7），南郊观象台模拟与观测的相关性稳定并且高于 0.95，而香河站点的水汽通道模拟与观测的相关性随着频率增加而逐渐降低，如从 ch1 的 0.96 减少到 ch7 的 0.83。对于温度通道 ch8 和 ch9，两地的模拟与观测相关性都明显较低，尤其香河站的 MonoRTM 和 MWRT 与 ch8 观测亮温的相关性不足 0.80，而 ARTS 接近 0.82；而对水汽不敏感的温度通道 ch10～ch14，两个站点相关系数结果基本一样，都接近 1.0。

模拟与观测的相关系数在两个站点的差异，主要因为两地都采用北京观象台的气象探空廓线，对于 GXT 微波辐射计来说是同地比较，而对于 XH 站，距离观象台探空站约有 50 km。通常大气中水汽时空变化较快，北京站探空提供的大气湿度廓线与香河站上空的水汽会有一些差异，因此模式模拟的水汽通道与香河站对应观测结果的一致性降低，相关系数也有所降低，并且对于水汽变化敏感的温度通道 ch8～ch9，也有类似的影响。只有对水汽不敏感的温度通道 ch10～ch14，大气温度廓线变化相对稳定，因此对两地模拟亮温影响甚微，在两地都能达到接近 1.0 的相关系数。

图 3b 显示河北香河和北京观象台两地的模拟和观测差异的标准差变化。总体看来，两个站点 14 个通道的标准差变化趋势很接近，其中对于通道 ch2～ch10，三个模式在单个站点的标准差基本重合；只在水汽通道 ch1 出现 ARTS 模式高于另外两个模式，也在通道 ch11～ch14 出现 MonoRTM 小于另外两个模式的差异趋势。当然，两个站点的标准差具体量值有明显差异：观象台站 14 通道的标准差都低于 1.0 K，远小于对应的香河站结果，即观象台站模拟与观测的差异离散程度明显小于香河站。这种离散程度的明显差异与采用北京观象台的探空廓线有关。

图 3c 是量化显示模式模拟与两地观测亮温的绝对偏差差异程度。总体看来，水汽通道 ch1～ch7 和温度通道 ch11～ch14 的绝对偏差较为稳定，尤其后者的三个模式在两个地点的绝对偏差都非常接近，约为 0.7 K，而对于水汽通道，香河站的绝对偏差基本稳定在 1 K，而对应北京观象台的绝对偏差基本在 3 K。三个模式在温度通道 ch8～ch10 的绝对偏差差异较为明显，其中最为显著之处是 ch8，该通道不仅两地的观测与模拟的相关系数最低，而且 MonoRTM 模拟结果在两个站点与观测的绝对偏差最高，约为 4～5 K，而对应的 MWRT 和 ARTS 模拟与观测的绝对偏差约为 1 K；对于绝对偏差也较大的 ch9 和 ch10，还是 MWRT 和 ARTS 都低于对应的 MonoRTM 结果。对于其他温度通道 ch11～ch14，三个模式的绝对偏差基本重合，并且都明显减小到 0.7 K。总体来说，对于绝对偏差显著变化的 ch8～ch10，无论香河站或观象台站，三个模式中，MWRT 的绝对偏差最小，然后是 ARTS，而 MonoRTM 绝对偏差最大。

结合图 1 和图 2 中模式模拟和观测亮温的散点图分布，可以看到，对于模式与观测的相关系数接近以及标准差接近的通道，还要看其平均或绝对偏差变化，若存在显著差异，则表明模拟结果与观测亮温存在系统性偏差。首先，三个模式在北京观象台的地基微波辐射计水汽通道 ch1～ch7 一直存在约 3 K 的绝对偏差，其对应散点图明显表明观测亮温系统性偏高于模拟结果，而对应香河站水汽通道观测与模拟总体很接近，只有 1 K 以内的绝对偏差，明显比观象台对应的比对结果小。本文研究中两地地基微波辐射的模拟亮温都采用北京观象台的探空廓线，理论上模式模拟结果应该与北京观象台的微波辐射计的观测更接近，可是散点图和图 3c 显示的模拟亮温与香河站地基微波辐射计水汽通道观测结果更为接近，而与观象台水汽通道观测亮温存在明显的系统性偏差。在 Hewison et al.（2006）分析晴空条件下四种常用微波吸收模式对地基微波辐射计观测的模拟能力的研究工作中，显示了多个模式

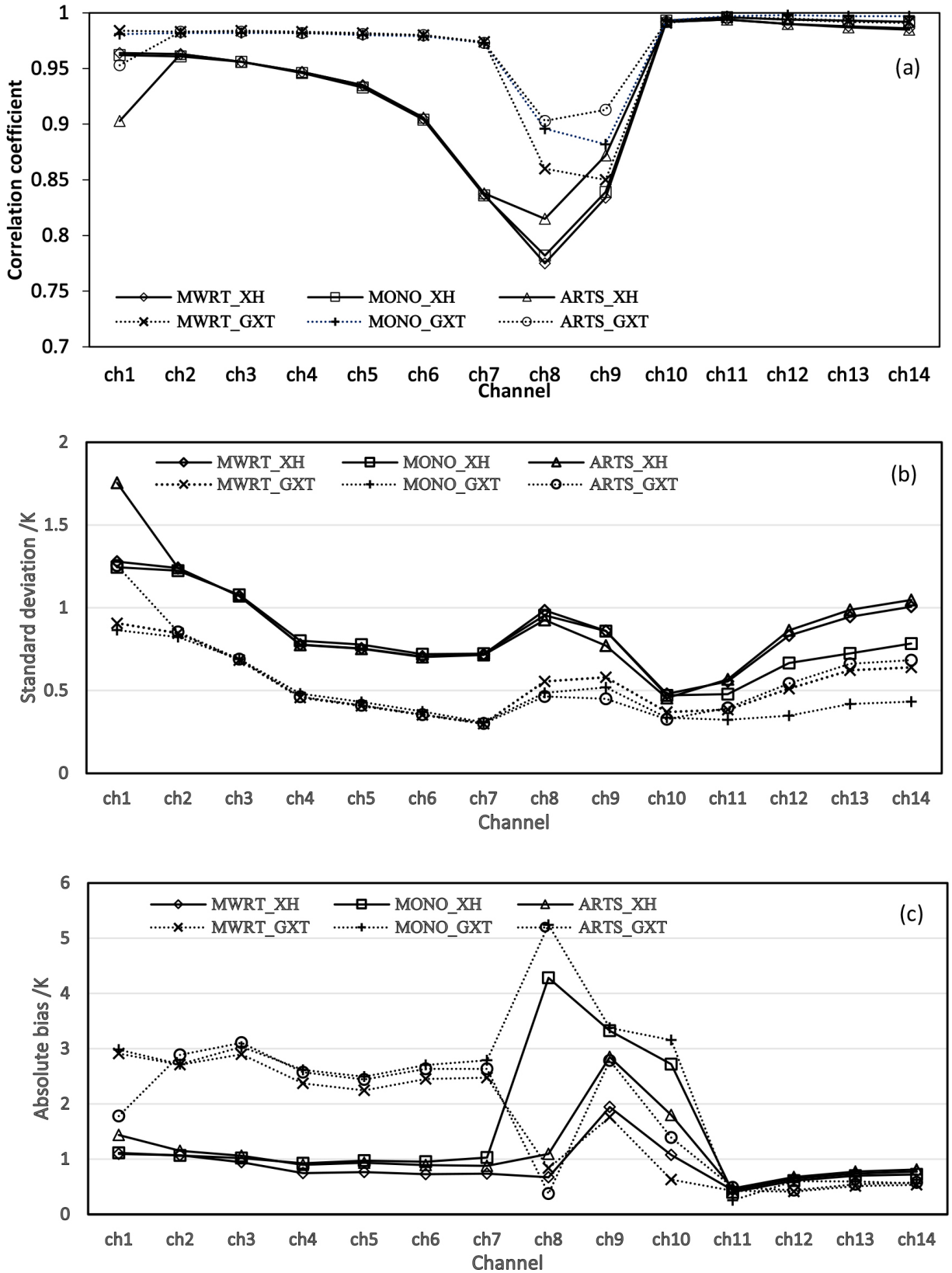

图 3 香河站（XH）和北京观象台站（GXT）地基微波辐射计 14 个通道观测亮温与模拟亮温的统计参数变化：（a）相关系数；（b）标准偏差；（c）绝对偏差

Fig. 3 Variations in the statistical parameters for 14 MWR channels at XH and GXT sites: (a) Correlation coefficient; (b) standard deviation; (c) absolute bias

在水汽通道（22～31.5 GHz）普遍存在约 0.5 K 的模拟偏差。本文分析的香河站地基微波辐射计水汽通道的模拟与观测结果偏差基本在 1 K 以内，除了模式自身偏差，还有探空廓线地理位置差异引起的偏差。对于北京观象台站，探空与地基微波辐射计位置基本一致，地基微波辐射计水汽通道的模拟结果与观测亮温存在系统性 3 K 的偏差，除了 0.5 K 的模式偏差，更多偏差估计是观测资料本身的问题，这意味着北京观象台地基微波辐射计的水汽通道的观测质量有待进一步改进。其次，使用同一套探空廓线情况下，三个模式的模拟结果在地基微波辐射计大部分通道上都很接近，也与观测结果具有很好一致性，除了个别通道，如温度通道 ch8～ch10，尤其三个模式在温度通道 ch8 和 ch9，不仅模拟与观测结果的相关系数明显较低，而且存在明显的绝对偏差，初步表明模式在这些通道的模拟能力有待提高。三个模式中，MonoRTM 模拟结果与两地观测亮温的相关系数普遍很高并且标准差小，只在温度通道 ch8～ch10 存在明显的系统性偏差，尤其在 ch8 的绝对偏差高达 5 K；而 ARTS 模式除了对水汽通道 ch1 模拟能力较弱外，在其他通道和 MWRT 模式结果都较接近；相比较而言，MWRT 模拟与观测亮温在多个通道上相对更为接近和稳定，尤其系统性偏差最小。

3.3　云天和晴天观测与模拟比较

在上述分析的匹配样本中，包括有云和晴空时的观测数据。由于本文分析的是 2019 年 1～3 月数据，该时段多以晴天为主，云天较少，降水过程更少，并且大气中水汽变化相对夏季较弱，因此，这三个月的模拟结果与观测在整体上比较接近。为了进一步认识云天对模式和观测结果比对的影响，参考以往研究中识别云天的方法：依据探空测量的相对湿度（RH）廓线大于 85% 作为有云存在的识别阈值（车云飞等, 2015; 丁虹鑫等, 2018）。云雨条件下辐射模式计算具有较多不确定性，通常只选取晴天条件下模式结果检验观测亮温质量（王振会等, 2014; 茆佳佳等, 2018）。

本文同时给出云天和晴天的模拟和观测亮温的比对结果，即对 1～3 月所有模拟与观测亮温的匹配数据，依据 RH>85% 的判别条件将样本划分为两类：晴天和云天，对比的散点图如图 4 所示，其中黑色样本代表晴天、红色样本代表云天。这里选取了对水汽敏感的水汽通道 ch7 和温度通道 ch8，这两个通道也是模拟与观测相关系数偏低的通道。2019 年 1～3 月的匹配样本中云天样本明显较少，对于匹配样本较多的香河站，云天样本不足晴天样本的 1/4，即占全部样本比例不到 1/5。无论是香河站还是观象台站，三个模式在云天和晴天条件下模拟结果与观测的一致性普遍较好，两类天气条件下的散点分布总体区别不大，尤其在观象台台站。香河站的这两个水汽敏感通道在晴空和云天条件下都出现个别偏离较大的样本，这可能还是探空水汽廓线与局地水汽分布存在差异引起的。总体看来，2019 年 1～3 月两个站点出现的云层对模式模拟结果的影响相对不显著。当然，复杂多变的云对辐射传输模式的影响，如不同云的高度、厚度以及云中含水量等有关参数对多通道地基微波辐射计的定量化影响，还需要在未来研究工作中进行更深入的分析，也需要依赖云雷达提供更多云参数观测数据的支持。

4　总结

地基微波辐射计能够提供全天候 24 小时的大气温湿廓线，为监测和研究局地大气温湿度廓线垂直结构变化提供重要技术手段。但是，从地基微波辐射计观测亮温反演获得大气温湿度廓线的准确性尚存在一些不确定性，尤其观测亮温数据自身质量会直接影响反演的大气廓线。由于辐射传输模式跟地基微波辐射计的标定和运行状态无关，利用模式模拟的多通道微波计辐射亮温作为参考，可以用来检验地基微波辐射计观测亮温的数据质量。

本文针对三种辐射传输模式：MonoRTM、ARTS 和 MWRT，结合北京探空资料和两个站点（北京观象台和河北香河站）的地基微波辐射计观测亮温资料，比较这三个模式在 2019 年 1～3 月的模拟结果与观测差异，评估不同辐射传输模式的模拟能力。

通过模式模拟与观测亮温的统计参数（包含相关系数、平均偏差、绝对偏差和标准偏差）定量化比较表明：（1）三个模式的模拟结果在地基微波辐射计的大部分通道上都很接近，也与观测结果具有较好一致性（相关系数高达 0.99），而在温度通道 ch8 和 ch9，三个模式模拟与观测相关系数明显降低，而且存在明显的绝对偏差，表明模式在这些通道的模拟能力有待提高。（2）MonoRTM 模式在温度通道 ch8 至 ch10 存在明显的系统性偏差，

尤其是 ch8 高达 5 K；ARTS 模式对水汽通道 ch1 的模拟能力较弱；MWRT 模拟与观测亮温在多个通道上相对更为接近和稳定，尤其系统性偏差最小。

（3）相距约 50 km 的北京观象台和河北香河站的地基微波辐射计观测亮温与模式模拟的差异，表明探空廓线与地基观测站的空间位置不一致对地基微

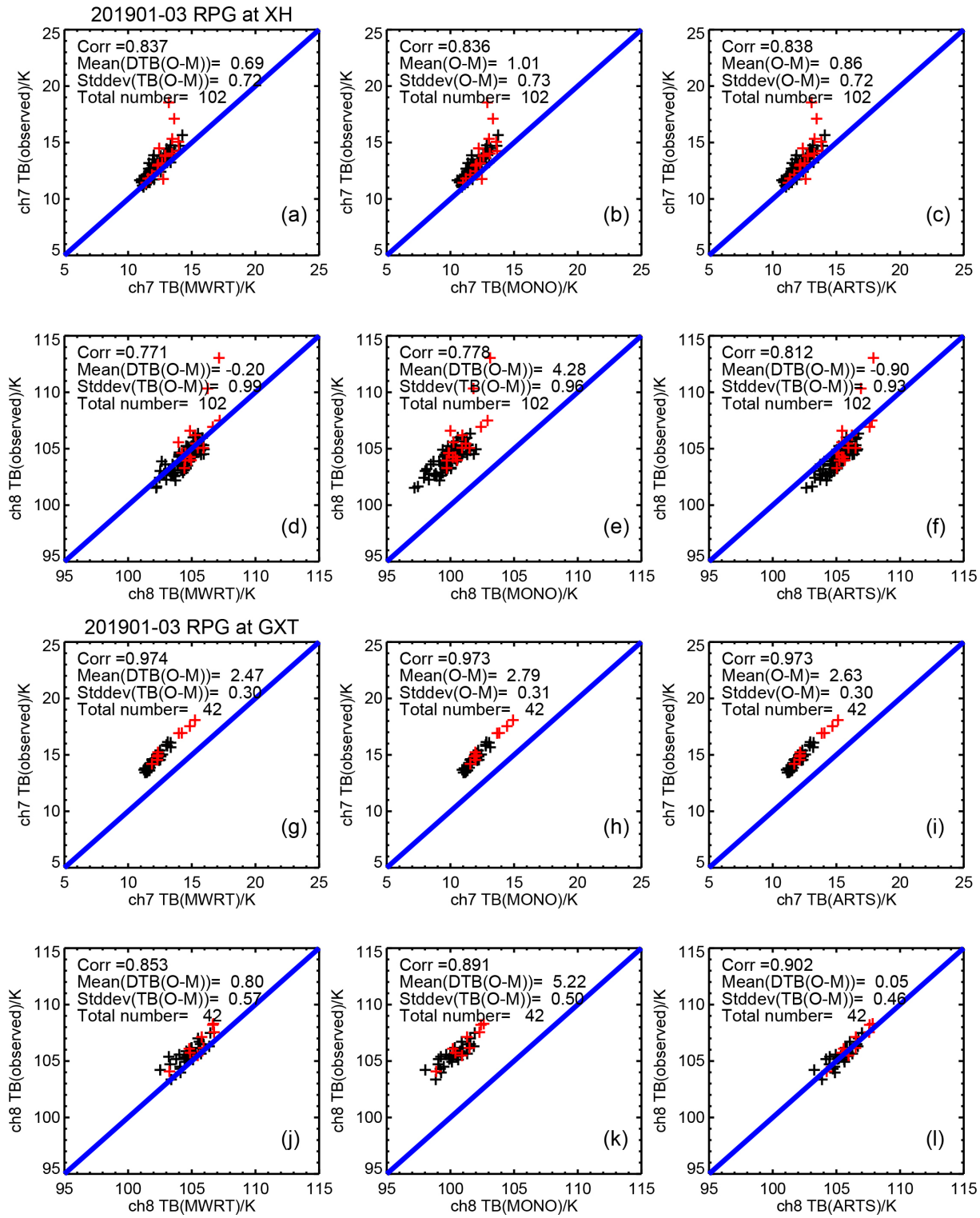

图 4 香河站（XH）和北京观象台站（GXT）的晴天（黑色）和云天（红色）观测亮温与三个模式模拟亮温比对散点图：（a–f）香河站；（g–l）观象台

Fig. 4 Scatter plots of simulated and observed TBs under clear (in black) and cloudy (in red) conditions at (a–f) XH and (g–l) GXT sites

波辐射计水汽通道的模拟结果影响较为显著，而对水汽不敏感的温度通道影响甚微。（4）观象台地基微波辐射水汽通道的观测亮温与模拟结果存在 3 K 的系统性偏差，明显高于香河站对应的结果，初步表明观象台观测数据质量有待进一步改进。

通过观测资料对辐射传输模式的模拟能力进行分析，能够了解辐射传输模式之间的差异性，并对地基微波辐射计观测质量进行评估。全面评估仍需要更长时段的观测资料。本文的比对工作初步表明辐射传输模式能够较好模拟出地基微波辐射计观测结果，可以作为地基微波辐射计观测质量的辅助监测技术手段。在不方便开展液氮绝对定标的情况下，借助辐射传输模式的模拟结果作为参考，尽早发现地基微波辐射计观测亮温出现的问题并加以订正，对及时提醒观测人员进行仪器标定、了解观测数据质量情况、提高观测数据的利用价值具有重要意义。

致谢 北京国家综合气象观测试验基地提供探空数据和地基微波辐射计观测数据，中国科学院大气物理研究所华北香河全大气层野外科学观测研究站提供香河地基微波辐射计观测数据。MonoRTM 模式由美国 ARE 公司提供、ARTS 模式由欧洲几个国家的大学集中开发提供、MWRT 模式由美国佛罗里达州州立大学刘国胜老师提供。

参考文献（References）

Buehler S A, Eriksson P, Lemke O. 2011. Absorption lookup tables in the radiative transfer model ARTS [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 112(10): 1559−1567. doi:10.1016/j.jqsrt.2011.03.008

Buehler S A, Mendrok J, Eriksson P, et al. 2018. ARTS, the Atmospheric Radiative Transfer Simulator— version 2.2, the planetary toolbox edition [J]. Geosci. Model Dev., 11: 1537−1556. doi:10.5194/gmd-11-1537-2018

车云飞, 马舒庆, 杨玲, 等. 2015. 云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响 [J]. 应用气象学报, 26(2): 193−202. Che Yunfei, Ma Shuqing, Yang Ling, et al. 2015. Cloud influence on atmospheric humidity profile retrieval by ground-based microwave radiometer [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 26(2): 193−202. doi:10.11898/1001-7313.20150207

Cimini D, Campos E, Ware R, et al. 2011. Thermodynamic atmospheric profiling during the 2010 winter Olympics using ground-based microwave radiometry [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 49(12): 4959−4969. doi:10.1109/TGRS.2011.2154337

Cimini D, Nelson M, Güldner J, et al. 2015. Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology [J]. Atmos. Meas. Tech., 8(1): 315−333. doi:10.5194/amt-8-315-2015

Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. 2005. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 91(2): 233−244. doi:10.1016/j.jqsrt.2004.05.058

丁虹鑫, 马舒庆, 杨玲, 等. 2018. 云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究 [J]. 气象, 44(12): 1604−1611. Ding Hongxin, Ma Shuqing, Yang Ling, et al. 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(12): 1604−1611. doi:10.7519/j.issn.1000<0526.2018.12.010

Goldberg M D, Crosby D S, Zhou L H. 2001. The limb adjustment of AMSU-A observations: Methodology and validation [J]. J. Appl. Meteor., 40(1): 70−83. doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0070:TLAOAA>2.0.CO;2

Hewison T J, Cimini D, Martin L, et al. 2006. Validating clear air absorption model using ground-based microwave radiometers and vice-versa [J]. Meteorol. Z., 15: 27−36. doi:10.1127/0941-2948/2006/0097

黄兴友, 张曦, 冷亮, 等. 2013. 基于 MonoRTM 模型的微波辐射计反演方法研究 [J]. 气象科学, 33(2): 138−145. Huang Xingyou, Zhang Xi, Leng Liang, et al. 2013. Study on retrieval methods with MonoRTM for microwave radiometer measurements [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 33(2): 138−145. doi:10.3969/2012jms.0127

李青, 胡方超, 楚艳丽, 等. 2014. 北京—地基微波辐射计的观测数据一致性分析和订正实验 [J]. 遥感技术与应用, 29(4): 547−556. Li Qing, Hu Fangchao, Chu Yanli, et al. 2014. A consistency analysis and correction of the brightness temperature data observed with a ground-based microwave radiometer in Beijing [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 29(4): 547−556. doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2014.4.0547

李书磊, 刘磊, 高太长. 2016. 大气辐射传输模拟器 (ARTS) 软件的介绍 [J]. 大气与环境光学学报, 11(4): 241−248. Li Shulei, Liu Lei, Gao Taichang. 2016. Introduction of atmospheric radiative transfer simulator software [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics (in Chinese), 11(4): 241−248.

Liu G S. 1998. A fast and accurate model for microwave radiance calculations [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 76(2): 335−343. doi:10.2151/jmsj1965.76.2_335

Liu G S. 2004. Approximation of single scattering properties of ice and snow particles for high microwave frequencies [J]. J. Atmos. Sci., 61(20): 2441−2456. doi:10.1175/1520-0469(2004)061<2441:AOSSPO>2.0.CO;2

刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 2009. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析 [J]. 大气科学, 33(2): 388−396. Liu Hongyan, Wang Yingchun, Wang Jingli, et al. 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(2): 388−396. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.16

刘思波, 何文英, 刘红燕, 等. 2015. 地基微波辐射计探测大气边界层高度方法 [J]. 应用气象学报, 26(5): 626−635. Liu Sibo, He

Wenying, Liu Hongyan, et al. 2015. Retrieval of atmospheric boundary layer height from ground-based microwave radiometer measurements [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 26(5): 626−635. doi:10.11898/1001-7313.20150512

Löhnert U, Maier O. 2012. Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payerne: Prospects and challenges [J]. Atmos. Meas. Tech., 5(5): 1121−1134. doi:10.5194/amt-5-1121-2012

Lu Q F, Bell W, Bauer P, et al. 2011. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137(658): 1298−1311. doi:10.1002/qj.834

茆佳佳, 张雪芬, 王志诚, 等. 2018. 多型号地基微波辐射计亮温准确性比对 [J]. 应用气象学报, 29(6): 724−736. Mao Jiajia, Zhang Xuefen, Wang Zhicheng, et al. 2018. Comparison of brightness temperature of multi-type ground-based microwave radiometers [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 29(6): 724−736. doi:10.11898/1001-7313.20180608

Turner D D, Clough S A, Liljegren J C, et al. 2007. Retrieving liquid water path and precipitable water vapor from the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) microwave radiometers [J]. Geosci. Remote Sens., 45: 3682−3690.

王振会, 曹雪芬, 黄建松, 等. 2014. 基于气象资料变化特征和辐射传输模式的微波辐射计工作状态分析 [J]. 大气科学学报, 37(1): 1−8. Wang Zhenhui, Cao Xuefen, Huang Jiansong, et al. 2014. Analysis on the working state of a ground-based microwave radiometer based on radiative transfer model and meteorological data variation features [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 37(1): 1−8. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2014.01.001

Ware R, Carpenter R, Güldner J, et al. 2003. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid [J]. Radio Sci., 38(4): 8079. doi:10.1029/2002RS002856

Westwater E R. 1993. Ground-based microwave remote sensing of meteorological variables [M]//Janssen M. Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry. New York: John Wiley, 145–213.

姚志刚, 陈洪滨. 2005. 七通道微波辐射计遥感大气温度廓线的性能分析 [J]. 气象科学, 25(2): 133−141. Yao Zhigang, Chen Hongbin. 2005. Analysis of the remote sensing of atmospheric temperature profiles using the seven channel microwave radiometer [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 25(2): 133−141. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2005.02.004

赵兵科, 邵德民, 鲁小琴, 等. 2009. 多通道地基微波辐射计在 0713 号“韦帕”台风登陆前后探测性能及特征分析 [J]. 地球科学进展, 24(9): 1001−1008. Zhao Bingke, Shao Demin, Lu Xiaoqin, et al. 2009. Performance and characteristics analysis of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer before and after 0713 typhoon “Wipha” landfall [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24(9): 1001−1008. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2009.09.006

朱雅毓, 王振会, 楚艳丽, 等. 2015. 地基微波辐射计亮温观测数据的综合质量控制与效果分析 [J]. 气象科学, 35(5): 621−628. Zhu Yayu, Wang Zhenhui, Chu Yanli, et al. 2015. Comprehensive quality control and efficiency analysis on brightness temperature data by ground-based microwave radiometer [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 35(5): 621−628. doi:10.3969/2014jms.0031