

微波湿度计探测青藏高原卷云和温湿度分布

何杰颖<sup>1</sup>, 张升伟<sup>1</sup>, 贾立丽<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 鉴于青藏高原地区的气象站和探空数据观测数据非常有限, 且其卷云和温湿度分布对全球气候有重要影响, 提出联合风云三号卫星微波湿度计 (FengYun-3C microwave humidity and temperature sounder, FY-3C MWHTS) 在轨观测数据和欧洲中值预报中心发布的青藏高原地区再分析数据, 采用改进的神经网络方法分析上对流层和低平流层大气卷云极化和散射信息敏感性, 开发青藏高原地区大气卷云检测反演算法。进而利用在轨实时运行的 FY-3C 星微波湿温探测仪数据提取青藏高原地区全天候大气卷云信息, 研究青藏高原区域卷云随季节的变化规律和分布特征。

**关键词:** 风云三号; 微波湿度计; 卷云; 散射信息; 反演

**doi:** 10. 3969/j. issn. 1000-3177. 2018. 03. 006

**中图分类号:** P412. 27      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3177(2018)157-0032-08

Analysis of Cirrus and Atmospheric Temperature and Humidity on Qinghai-Tibet Plateau Using FY-3C-MWHTS

HE Jieying<sup>1</sup>, ZHANG Shengwei<sup>1</sup>, JIA Lili<sup>1,2</sup>, LI Na<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper focuses on research and analysis of atmospheric cirrus located on the top of troposphere and lower stratosphere. By comparing the polarization and scattering sensitivity of cirrus and combining the in-orbiting observation of microwave humidity and temperature sounder (MWHTS) onboard FY-3C satellite (FY-3C) and simulation values using NCEP/WRF/ARTS models, an algorithm named neural network has been presented to realize the analysis of whether the atmospheric cirrus is exist. If so, the bottom and top heights will be retrieved. Furthermore, based on in-orbiting observation brightness temperatures of FY-3C MWHTS for the whole year of 2014, with all weather and all day, this paper makes an analysis about the seasonal variation and distribution of cirrus in Qinghai-Tibet plateau.

**Key words:** FY-3C; MWHTS; cirrus; scattering; retrieve

0 引言

青藏高原位于我国西部地区(25°N~40°N, 75°E~105°E), 作为全球气候系统中的一个敏感地区, 对全球气候变化的响应具有敏感性。近年来已开展表层土壤温度和水分等方面研究, 但大气卷云和降水分布复杂多变, 对表层土壤温度和含水量有着直接影响, 同时极大地影响亚洲季风和大气水循环以及对

流层和平流层水汽交换。目前, 青藏高原地区地面探测站点稀少, 观测资料缺乏, 卷云内部结构的不确定性很大程度上制约了该地区气候变化的研究以及短时气象预报的准确性, 是影响全球气候变化研究的一个不利因素<sup>[1-3]</sup>。

高空卷云在较高海拔的青藏高原地区尤为常见, 相对较暖而潮湿的空气随着青藏高原这一特殊地区虽然得到了广泛的重视, 但是受限于激光雷达

收稿日期: 2016-02-23      修订日期: 2016-12-14  
基金项目: 中国科协青年托举工程(2015QNRC001); 中国科学院青年创新促进会(2016136); 军委装备发展部预研基金(6140136010116)。  
作者简介: 何杰颖(1984---), 女, 副研究员, 主要研究方向为星载微波辐射计定标和数据处理。  
E-mail: hejieying@mirslab.cn

探测范围窄,可见光和红外遥感设备依赖于光线和不能穿透云层的限制,加之地面资料匮乏,使其在云的垂直分布和内部结构的认知上还存在一定的困难,大多科研工作着眼于云量和云类型等宏观的特征,并未开展卷云内部冰晶粒子参数的研究。

1 FY-3 MWHTS 简介

2013 年 9 月 23 日 11 时 07 分发射的风云三号 C(FY-3C)星是我国第二代极轨气象卫星的第三颗星<sup>[5]</sup>。其上装载的新型微波温湿探测仪已于 2013 年 9 月 30 日开机工作。与风云三号 A/B 星微波湿度计(microwave humidity sounder,MWHS)相比,

新一代微波湿度计(MWHTS)在 118 GHz 氧气吸收线和 183 GHz 水汽吸收线设计了 2 组共 15 个大气探测通道,在大气窗区设置了 89 GHz 和 150 GHz 探测通道。其中,118.75 GHz 是世界首次在极轨气象卫星上使用,包含了 118.75 GHz 附近的 8 个氧气吸收通道,用来获取大气不同高度的温度分布数据。150 GHz 由双极化更改为垂直极化,183.31 GHz 为中心的探测通道由原来 3 个增加为 5 个探测通道,工作在水汽吸收频段,用来获取大气层不同高度的湿度分布的数据<sup>[6]</sup>。本文将利用 150 GHz 和 89 GHz 单极化通道以及 183.31 GHz 和 118 GHz 远翼探测青藏高原地区大气卷云参数。

表 1 微波湿度计通道特性参数

序号	中心频率/GHz	极化	带宽/MHz	频率 稳定度/MHz	动态范围/K	灵敏度/K	定标精度/K	主波束 效率/(%)
1	89.00	V	1 500	50	3~340	1.0	1.3	>92
2	118.75±0.08	H	20	30	3~340	3.6	2.0	>92
3	118.75±0.20	H	100	30	3~340	2.0	2.0	>92
4	118.75±0.30	H	165	30	3~340	1.6	2.0	>92
5	118.75±0.80	H	200	30	3~340	1.6	2.0	>92
6	118.75±1.10	H	200	30	3~340	1.6	2.0	>92
7	118.75±2.50	H	200	30	3~340	1.6	2.0	>92
8	118.75±3.00	H	1 000	30	3~340	1.0	2.0	>92
9	118.75±5.00	H	2 000	30	3~340	1.0	2.0	>92
10	150.00	V	1 500	50	3~340	1.0	1.3	>95
11	183.31±1.00	H	500	30	3~340	1.0	1.3	>95
12	183.31±1.80	H	700	30	3~340	1.0	1.3	>95
13	183.31±3.00	H	1 000	30	3~340	1.0	1.3	>95
14	183.31±4.50	H	2 000	30	3~340	1.0	1.3	>95
15	183.31±7.00	H	2 000	30	3~340	1.0	1.3	>95

2 数据处理

2.1 数据收集与匹配

基于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)全球 6 小时再分析数据和中尺度天气预报模式(the weather research and forecasting model,WRF),生成与 FY-3B/C 星微波数据时空匹配的廓线及地表数据<sup>[7]</sup>。

下载 NCEP 6 小时再分析数据,驱动 WRF 模式,进行 3 层嵌套生成所需数据,如图 1 所示,第一层为中国区域,第二层为中国西北区域,第三层为青藏地区,经度 75°E~105°E,纬度 25°N~40°N,利用非静力中尺度数值模式 WRF v3.5 对青藏高原及其周边区域进行高分辨率数值模拟。

选取卷云存在的仿真区域,时间阈值为卫星过境前后 15 min,考虑微波湿度计星下点分辨率为

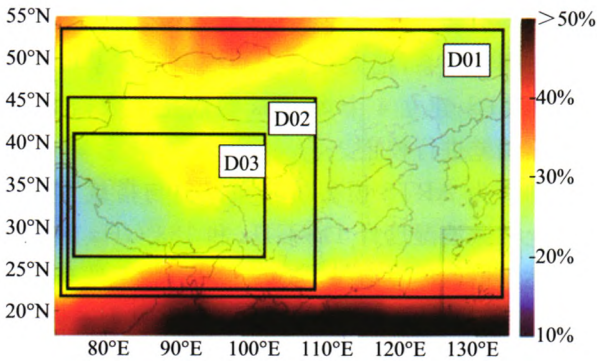


图 1 WRF 生成数据区域设置

15 km×15 km,转化为经纬度约合 0.15°×0.15°,可设其搜索半径  $r^2 \leq 0.2^2 + 0.2^2$ ,搜寻插值点周围最近 4 点,同时考虑云的影响,若 4 点中亮温差异最大值大于 10 K,则舍去该插值点,通过求最近 4 点平均值,可将湿度计亮温资料插值匹配至仿真区域中。



## 2.2 数据预处理

1)地表分类。根据 FY-3B/C 微波湿度计 89 GHz 和 150 GHz 通道足迹,将地表类型分为干、湿陆地,干陆地类型即为表面无冰雪、水体覆盖,湿陆地类型包含冰雪覆盖和降雨覆盖。

2)NCEP/WRF/ARTS 验证。NCEP 再分析数据集采用先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对地面、无线电探空、飞机、卫星等资料来源的观测资料进行质量控制和同化处理,获得实时格点再分析数据资料,以空间分辨率  $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$  网格形式存储,且每 6 小时更新一次,具有连续性强和分辨率高的优点,能够弥补常规观测资料在灾害性天气分析方面的不足。

WRF 模式提供全球高时空分辨率数据,通过设置物理参数,能够满足数据样本的需求,生成满足时空匹配要求的全球或区域廓线数据和海/地表数据(如温湿度、气压、风向、风速、降雨率等),避免星载微波辐射计参数反演过程中时空匹配不精确以及仿真与实测亮温值误差较大的不足。

ARTS(atmospheric radiative transfer simulator)<sup>[8]</sup>是一个用于大气热辐射计算的公开模型,具有多重散射计算功能,适用于上视、临边和下视的微波辐射传输模拟计算,不仅可以进行 1~1 000 GHz 范围内的大气辐射传输模拟,还可以根据自己的需要和算法,进行模型的二次开发。由于卷云在微波区域的相互作用主要是散射,所以必需选择具有大气粒子散射计算的软件<sup>[9]</sup>。

本文采用开放的大气辐射传输仿真系统(ARTS)用于辐射传输模拟,重点分析粒子形状、分布方向等引起的大气辐射的极化差异,及其与卷云参数之间的关系,把大气卷云参数及廓线基础数据代入 ARTS,建立 4 个 Stokes 参数亮温数据集,并对亮温偏差进行校正。

图 2 为 ARTS 模型仿真亮温值与搭载 FY-3C 卫星上的微波湿度计 118 GHz 和 183 GHz 通道的观测亮温值的比对结果,红色为偏差,黑色线条为标准差。对于所有 15 个通道,通道 1 和 10,偏差和标准差大于 3 K,可见,对于窗区通道,辐射仿真相较于吸收通道仍具有一定的不准确度。图 3 为利用再分析数据作为输入,利用 WRF 模式生成高时空分辨率大气参数,再利用 ARTS 模型仿真亮温,与在轨运行的 AMSU-B 载荷观测亮温进行比对,样本均为 120 个,包含上午和晚上的数据,对于不同频率通道,均方差和相关系数有一定差别,且与图 2 反应规律相一致,具体数据如图 3 所示。

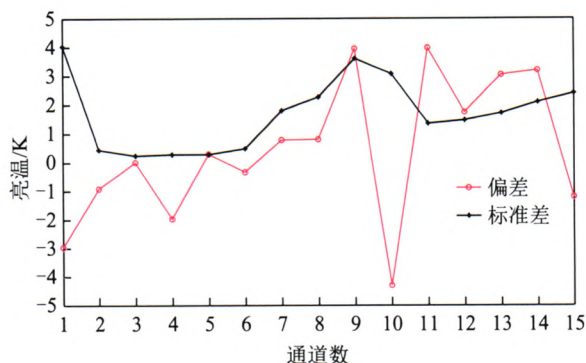


图 2 ARTS 模型仿真和 FY-3C MWS 在 118 GHz 和 183 GHz 通道实测亮温偏差和标准差统计分布

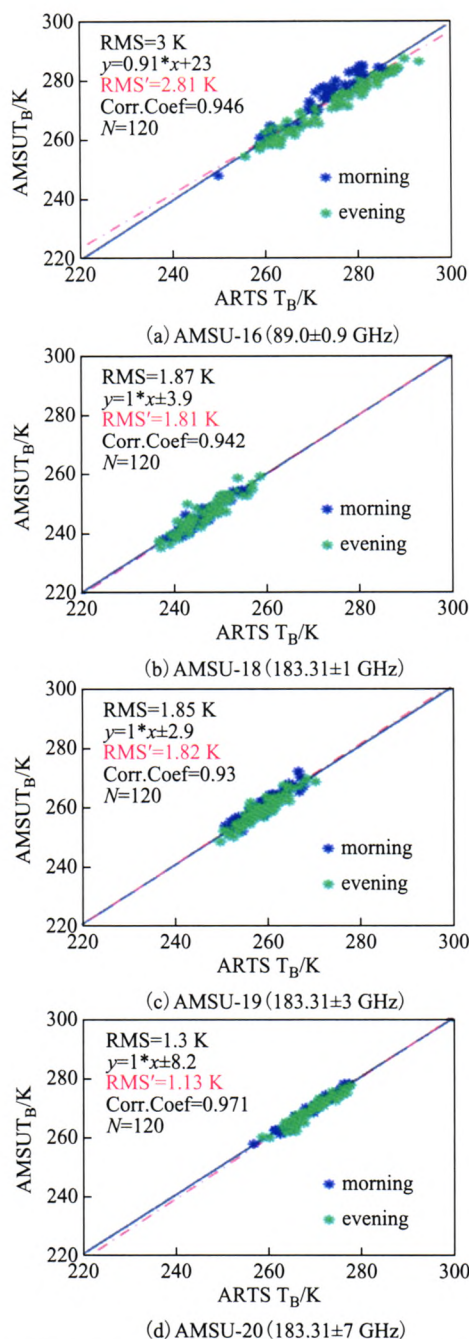


图 3 NCEP/WRF/ARTS 仿真模型与 AMSU-B 通道亮温对比  
注:横坐标为仿真结果,纵坐标为 AMSU-B 观测结果。



通过分析可知,NCEP/WRF/ARTS 模式生成的亮温数据与 AMSU-B 实测数据相比,一致性较好,均方差 RMS(root mean square error)在窗区 89 GHz 为 3 K,而在水汽吸收通道均方差 RMS 优于 1.9 K,相关系数优于 0.93,且在 89 GHz 和 183.31±3 GHz 时,晚 8 点时刻结果一致性略好。

2.3 青藏高原地区亮温分析

FY-3C 星于 2013 年 9 月 23 日在中国太原卫星发射中心发射升空,其上搭载的微波湿度计(MWHTS)运行稳定,数据可通过中国气象局国家卫星中心网站免费下载。

本文将利用 FY-3C 气象卫星微波湿度计(MWHTS)全天候获取的在轨辐射亮温数据,着重

分析位于青藏高原区域工作在 118 GHz、183 GHz 吸收峰及远翼通道和窗区通道的 L1 亮温数据随时间和空间的变化关系,分析大气中卷云极化信息的敏感性,开发针对青藏高原地区卷云反演算法,分析研究青藏高原地区自 2014 年大气卷云分布特征及其随季节的变化。

通过分析 FY-3C 微波湿度计 2014 年 1 月 20 日观测青藏高原卷云及降雨分布的亮温图,可以看出,通道 1、通道 4~通道 15 对大气中卷云和降水粒子的极化和散射信息具有不同程度的敏感性。图 4 是 FY-3C 微波湿度计青藏高原地区通道 1、通道 9、通道 10 和通道 15 通道亮温值,是建立卷云参数反演算法的主要成分信息。

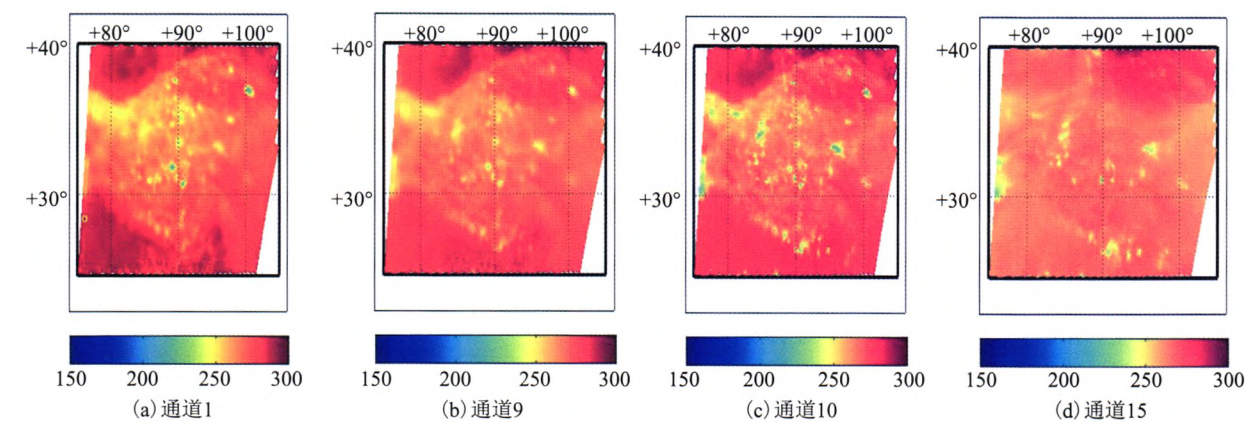


图 4 FY-3C 微波湿度计青藏高原地区通道 1、通道 9、通道 10 和通道 15 通道亮温值(单位为 K)

3 卷云检测反演算法

选取青藏高原地区 2014 年 1—12 月微波湿温探测仪实测数据,利用神经网络算法获取大气温湿度廓线,进而分析判断是否存在卷云,以及卷云的云顶和云底高度。

卷云参数反演流程见图 5。卷云检测算法选用神经网络算法,如图 6 所示,共 3 层,输入层的神经元数分别为 15,5 个水汽通道,2 个窗区通道以及 8 个氧气吸收通道,隐层神经元数通过经验

公式以及反复验证确定为 16,输出层神经元数为 120,即分别对应于 0~20 km 的 60 个离散值的大气温度廓线和大气湿度廓线,每层大气参数取该层平均值<sup>[10-11]</sup>。

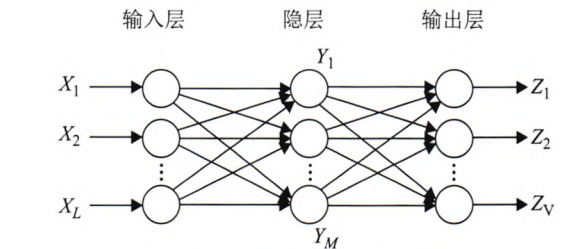


图 6 神经网络原理示意图

选取时间和经纬度匹配的样本数据,利用 ARTS 辐射传输模型仿真的亮温值与 WRF 模式生成的大气温湿度廓线建立映射模式,通过后向传输误差修正模式确定反演系数。

对于隐层的第 j 个节点,可以表示为:

$$Y_j = S(\sum_{i=1}^L w_{ij}x_i + b_j) \tag{1}$$

式中: $w_{ij}$  是连接第 i 个输入神经元和第 j 个隐层神经元的权重; $b_j$  是计算值和测量之间的偏差。S 是

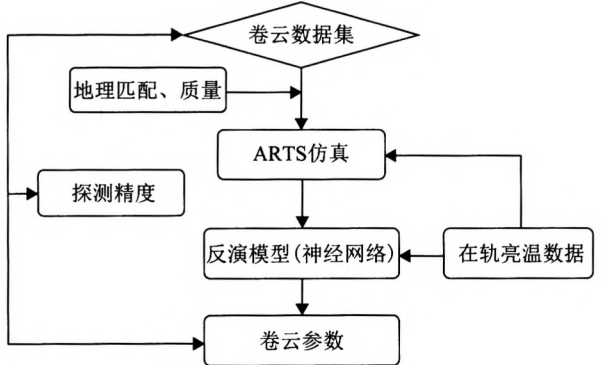


图 5 卷云参数反演流程



sigmoid 函数,表述如下:

$$S(a) = \frac{1}{1 + \exp(-a)} \tag{2}$$

输出层可以表示为:

$$Z_k = \sum_{j=1}^M w_{jk} Y_j + b_k \tag{3}$$

式中: $w_{jk}$ 是连接第  $j$  个隐层神经元和第  $k$  个输出神经元的权重值; $b_k$  是测量值和输出值之间的偏差。它适用于非线性模型,在反复训练过程中,加权函数得以确定,从而减小实际训练的输出向量与测量的输出向量的偏差。相邻层间神经元完全连接,输入元素输入到输入层,经过隐层,传输到输出层,前者采用 sigmoid 函数,后者采用 purelin 函数<sup>[12]</sup>。

反演模型系数确定后,利用 FY-3CMWHTS 实测数据进行验证,需满足温度反演均方差 1.2 K,水汽密度反演均方差 0.8 g/m<sup>3</sup> 的反演精度要求。

4 卷云分布特征分析

利用神经网络算法反演青藏高原地区 2014 年 10 月 12 日大气温湿度廓线见图 7 和图 8。可见,在不同的经纬度,由于地形差异,大气状态也不尽相

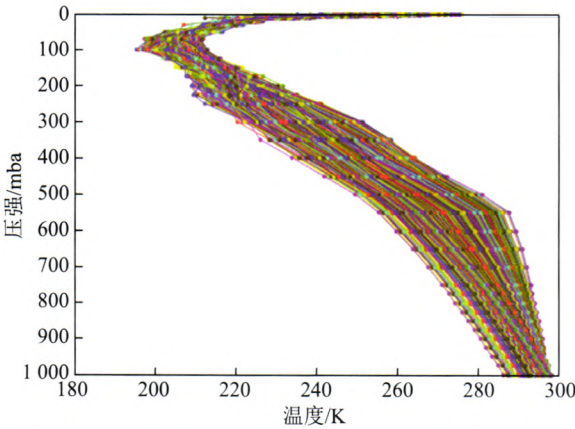


图 7 青藏高原地区 2014 年 10 月 12 日大气温度廓线分布

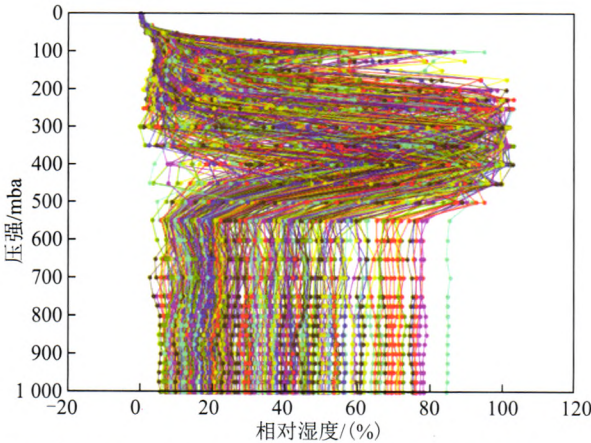


图 8 青藏高原地区 2014 年月平均大气湿度廓线分布

同,分布趋势也有明显变化,湿度廓线的变化比温度廓线的变化更明显且无规律。

卷云发生概率  $P$  可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$P = \frac{T_C}{T_A} \times 100\% \tag{4}$$

式中: $T_C$ 表示固定区域内存在卷云的样本数; $T_A$  表示固定区域内总样本数。

图 9 是 2014 年 1—12 月青藏高原地区的卷云概率分布情况,可知,在 2—7 月,均匀出现概率明显高于其余月份,这是由于青藏高原的特殊地形,沿该地区抬升的暖湿空气会产生很多地形型卷云,从而导致干旱的青藏高原分布与季节和经纬度密切相关。青藏高原东北部的相对高值主要出现在春季,卷云存在的样本数占总样本数的 57%。

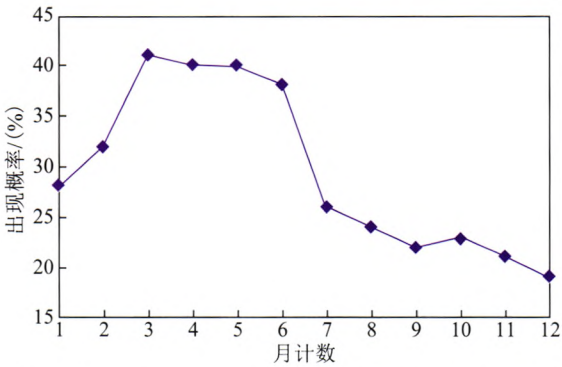


图 9 是 2014 年 1—12 月中国地区的卷云概率分布情况

图 10 是 2014 年 1—12 月青藏高原地区的卷云云底和云顶高度的分布情况,云底平均分布在 69 km,云顶平均分布在 12~14 km,且其随季节性的变化规律与对流层顶基本一致。

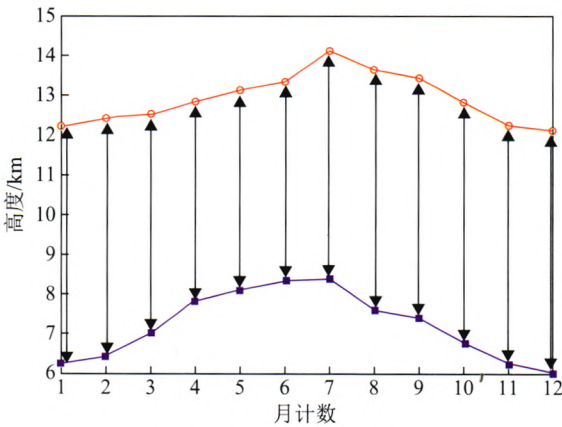


图 10 卷云云底和云顶高度的分布

通过对不同样本云顶高度出现概率的统计分析可知,2014 年 1—5 月和 10—12 月,卷云云顶高度分布在 9~11 km,而在 6—9 月,分布高度多集中在 11~13 km,详见表 2。

表 2 2014 年卷云高度分布概率												%
高度	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
5~7 km	2	3.0	2	1	1.0	0.2	0.2	0.2	0.4	1	0.5	1.0
7~9 km	6	6.2	7	5	3.0	2	0.3	0.4	0.4	2	4.0	1.2
9~11 km	14	16.0	20	22	23.0	14	8.0	18.0	6.0	10	11.0	11.0
11~13 km	3	4.2	5	7	9.0	20	15.0	27.0	11.0	5	4.5	5.0
13~15 km	1	2.0	3	2	2.0	0.8	2.0	4.0	3.4	4	0.4	0.3
15~17 km	1	1.6	2	2	1.8	0.6	0.4	0.8	0.6	0.6	0.4	0.3
17~19 km	1	1.0	2	1	0.2	0.4	0.1	2.0	0.2	0.4	0.2	0.2
总计	28	32.0	41	40	40.0	38	26.0	24.0	22.0	23	21.0	19.0

5 卷云微观物理特征分析

大气吸收采用 Liebe 的毫米波传播模型,大气水滴相互作用参数根据 Lorenz-Mie 理论计算。模型划分为 3 个部分:1)大气物理和相互参数的生成;2)海洋表面物理和相互参数的生成;3)解析矢量辐射传输等式。

雨和冰的粒子尺寸采用 Marshall-Palmer 分布函数描述。对云水和冰云,采用改进的 Gamma 分布函数。这些模型的局限在于假设水滴是球形,然而实际大气中粒子并非球形。对于高频,球形粒子的假设是错误的,而应该假设粒子是非球形粒子,如雨粒子是扁平的,冰粒子是 Chebyshev 形状的。

由于卷云在微波区域的相互作用主要是散射,因此需要包含多重散射的贡献。为了考虑卷云中非球形、方向性冰粒子散射引起的极化,在 ARTS 中对全矢量辐射传输方程(vector radiativetransfer equation,VRTE)进行了求解。VRTE 利用离散坐标迭代(discrete ordinates method,DOIT)方法<sup>[13]</sup>。利用 ARTS 模型模拟冰云分布可知冰云的频率特性是随着频率升高,冰云的探测敏感性增加。

多通道极化测量可以提供有关云粒子形状的有用信息。在忽略多重散射的情况下,对于随机方向分布的粒子,我们通常会高估其极化差。而大气中水平方向分布的粒子占主导地位,其水平和垂直辐射的极化差可达 3 K 以上。研究表明:如果假设散射粒子是水平排列的扁平球形粒子,尺寸分布参数取决于温度和冰水含量,则:1)不同粒子类型时圆极化亮温没有明显的不同,因此第 4 个 Stokes 参数近似为零;2)±45°极化会导致 4 K 的亮温差;3)垂直极化云的消光系数最小。

利用云的极化信息,可以模拟 1~1 000 GHz 范

围大气云参数,尤其是卷云参数的辐射传输,进而分析给定频率、不同极化的亮温特性<sup>[11]</sup>。图 11 给出云卷云 IWP 对亮温影响的初步模拟结果。可见随着频率升高,IWP 的影响日趋明显。

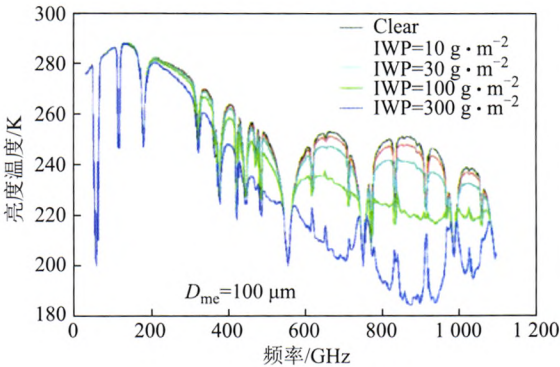


图 11 卷云冰水路径的影响

在亚毫米波段,冰云的出现会通过散射作用使大气上行辐射亮温减小,尤其是在吸收谱线之间的窗区频段。冰云的散射系数会随着频率的增加而增加,因此亮温随频率增加而降低。图 7 给出在冰粒子尺寸等于 100 μm、高度等于 10~12 km 时不同 IWP 时的亮温计算值,频率越高,对 IWP 的敏感度越高。因此为了获取小尺寸粒子的卷云,必须使用更高探测频率。图 12 给出了在 IWP 为 30 gm<sup>-2</sup>

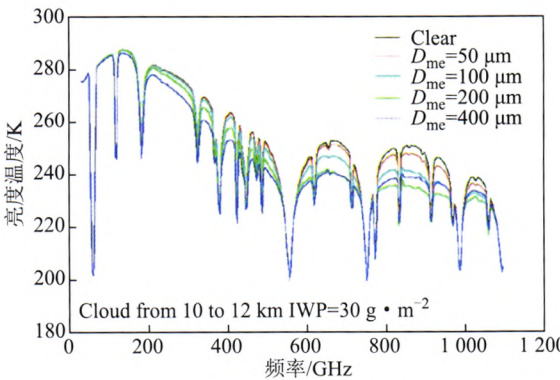


图 12 卷云粒子尺寸的影响



时,云高设置为 10~12 km,设置不同球形半径时的亮温仿真结果,粒子半径范围为 50~400  $\mu\text{m}$ 。通过结果对比可见,卷云粒子半径越小,对于亮温的敏感性越小。

由于云中水滴的散射作用,亚毫米波反演卷云是存在潜在误差的。卷云中的水汽既吸收亚毫米波辐射,同时也反射其上的亚毫米波辐射。与晴空相比,这二种效应都会降低亮温值。图 13 给出在相对湿度较高、云层相对较低时的亮温降低情况。

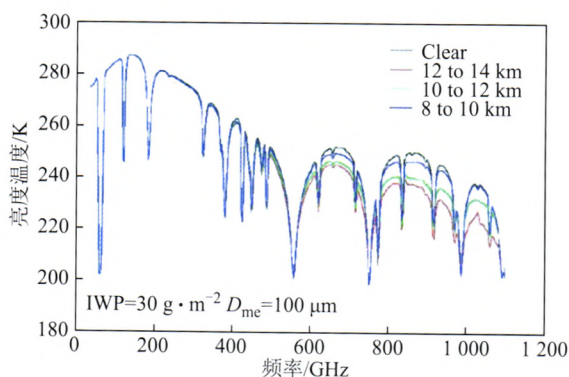


图 13 云层高度对亮温的影响

通过仿真分析可知,FY-3C 星微波湿度计探测通道为 89~183 GHz,在轨观测数据可在一定程度上分析卷云内部的物理特征。图 14 分析可知,在青藏高原,卷云分布具有一定规律性,冰水和液水含量

集中在 6—8 月。图 15 显示 2015 年 1 月 20 日 12 时的卷云分布随高度变化,呈现不同的分布特点,也验证了探测卷云需要全天候能深入卷云内部探测微观物理特性的必要性,微波湿度计在一定程度上能满足卷云探测的需求,但根据卷云中粒子尺寸、形状等不同,还需更高频率的亚毫米波载荷全面深入探测卷云的内部微观物理特征,如 325 GHz、448 GHz、664 GHz 等。

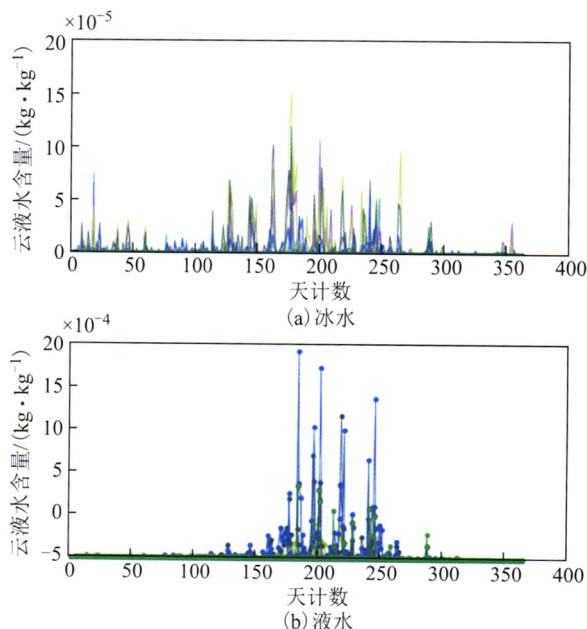


图 14 青藏高原地区卷云中冰水和液水比湿含量平均分布

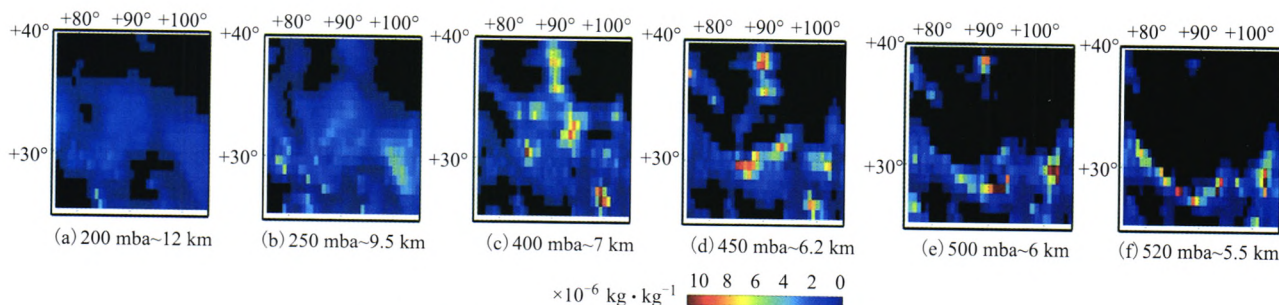


图 15 青藏高原地区大气不同高度范围内卷云分布情况

## 6 结束语

本文利用 FY-3C 气象卫星 MWHTS 全天候获取的辐射亮温数据,分析青藏高原地区大气中卷云信息的敏感性,开发针对青藏高原地区卷云

检测以及云顶和云底判断的反演算法,分析该地区卷云的分布规律,进而分析研究青藏高原地区 2014 年大气卷云分布特征随季节的变化规律以及卷云内部微观物理特征,并给出后续探测的载荷需求。

## 参考文献

- [1] 马耀明,姚檀栋,王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究:GAME/Tibet 与 CAMP/Tibet 研究进展[J]. 高原气象,2006 (25):344-351.
- [2] 孙鸿烈,郑度. 青藏高原的形成演化[M]. 上海:上海科学技术出版社,1996:21-145.
- [3] 陶诗言,陈联寿,徐祥德. 第二次青藏高原大气科学实验研究进展(一)[M]. 北京:气象出版社,1994:61-108.

- [4] 刘瑞金,张镭,王宏斌,等.半干旱地区卷云特征的激光雷达探测[J].大气科学,2011,35(5):863-870.
- [5] ZHANG S W,LI J,WANG Z Z. Design of the second generation microwave humidity sounder(MWHS-II) for chinese meteorological satellite FY-3[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, ISSN:2153-6996,2012,1(1):4672-4675.
- [6] ZHANG S W,LI J,JIANG J S,et al. Design and development of microwave humidity sounder for FY-3 meteorological satellite[J]. Journal of Remote Sensing 2008,12(3):199-207.
- [7] DAVIS C,EMDE C,HARWOOD R. A 3-D polarized reversed monte carlo radiative transfer model for millimeter and submillimeter passive remote sensing in cloudy atmospheres[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,2005,43(5):1096-1101.
- [8] FOMIN B,FALALEEVA V. Spectra of polarized thermal radiation in a cloudy atmosphere;line-by-line and Monte Carlo model for passive remote sensing of cirrus and polar clouds[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,2016,177:301-317.
- [9] NCEP Global Tropospheric Analyses, 1 x 1 Daily Sep. 15, 1999-Present[R/OL] // <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.
- [10] 王瑾. 西北半干旱区卷云的激光雷达探测及其辐射效应的模拟研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [11] 李锡祥,麻金继,梁晓芳. 基于 BP 神经网络进行云相态识别方法的研究[J]. 大气与环境光学学报,2010,5(4):299-304.
- [12] HE J Y,ZHANG S W. Humidity retrievals in mid-latitude and tropical regions using FY-3 MWHS[J]. Journal of Remote Sensing,2012(3),581-597.
- [13] BUEHLER S A,ERIKSSON P, KUHN T, et al. ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,2011,112:1551-1558.
- [14] BARAN A. Cloud Ice Water Submillimeter Imaging Radiometer CIWSIR Mission Proposal[R/OL] // <https://www.researchgate.net/publication/237587919>.