

百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 6 期 2020 年 6 月

目 次

学者观点

生态系统遥感:内涵与挑战 吴炳方, 曾源, 闫娜娜, 曾红伟, 赵旦, 张森 (609)

综述

2019 年中国陆表定量遥感发展综述
梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子锦, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖,
孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥 (618)
中国空间辐射测量基准技术 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵,
叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜 (672)
汶川地震前多圈层短—临遥感异常回顾及其时空关联性
..... 何苗, 吴立新, 崔静, 王威, 齐源, 毛文飞, 苗则朗, 陈必焰, 申旭辉 (681)
测绘地物波谱本底数据库 钟守熠, 肖青, 闻建光,
郑兴明, 马明国, 屈永华, 郑柯, 池天河, 唐勇, 游冬琴, 郝大磊, 程娟, 贺敏, 姜涛, 晋锐, 姚晓婧, 赵理君 (701)

技术方法

联合卷积神经网络与集成学习的遥感影像场景分类 余东行, 张保明, 赵传, 郭海涛, 卢俊 (717)
面向类型特征的自适应阈值遥感影像变化检测 刘红超, 张磊 (728)
国产机载大视场三线阵 CCD 相机几何标定 王涛, 张艳, 张永生, 莫德林, 于英 (739)

遥感应用

应用随机辐射传输模型反演云南松林分郁闭度 李骁尧, 黄华国 (752)
风云三号卫星被动微波反演海洋上空云液态水含量 窦芳丽, 商建, 吴琼, 谷松岩 (766)
滑坡蠕变与遥感影像上植被异常关系 郭忻怡, 郭擎, 冯钟葵 (776)

本期责任编辑: 尤笛

《遥感学报》网络版: www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.6 June, 2020)

CONTENTS

Scholar's View Point

Remote sensing for ecosystem: Definition and prospects
..... WU Bingfang, ZENG Yuan, YAN Nana, ZENG Hongwei, ZHAO Dan, ZHANG Miao (617)

Review

Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019
LIANG Shunlin, BAI Rui, CHEN Xiaona, CHENG Jie, FAN Wenjie, HE Tao, JIA Kun, JIANG Bo,
JIANG Lingmei, JIAO Ziti, LIU Yuanbo, NI Wenjian, QIU Feng, SONG Liulin, SUN Lin, TANG Bohui,
WEN Jianguang, WU Guiping, XIE Donghui, YAO Yunjun, YUAN Wenping, ZHANG Yongguang,
ZHANG Yuzhen, ZHANG Yunteng, ZHANG Xiaotong, ZHAO Tianjie, ZHAO Xiang (671)

Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing LU Naimeng,
DING Lei, ZHENG Xiaobing, YE Xin, LI Chuanrong, LYU Daren, ZHANG Peng, HU Xiuqing, ZHOU Chenghu,
YOU Zheng, FANG Jiancheng, GONG Jianya, JIANG Xingwei, LI Jianjun, MA Lingling, XU Na (680)

Remote sensing anomalies of multiple geospheres before the Wenchuan earthquake and its spatiotemporal correlations
..... HE Miao,
WU Lixin, CUI Jing, WANG Wei, QI Yuan, MAO Wenfei, MIAO Zelang, CHEN Biyan, SHEN Xuhui (700)

Design and realization of ground object background spectral library for surveying and mapping ... ZHONG Shouyi,
XIAO Qing, WEN Jianguang, ZHENG Xingming, MA Mingguo, QU Yonghua, ZHENG Ke, CHI Tianhe, TANG Yong,
YOU Dongqin, HAO Dalei, CHENG Juan, HE Min, JIANG Tao, JIN Rui, YAO Xiaojing, ZHAO Lijun (716)

Technology and Methodology

Scene classification of remote sensing image using ensemble convolutional neural network
..... YU Donghang, ZHANG Baoming, ZHAO Chuan, GUO Haitao, LU Jun (727)

Adaptive threshold change detection based on type feature for remote sensing image
..... LIU Hongchao, ZHANG Lei (738)

Geometric calibration of domestic airborne wide-field three-linear CCD camera
..... WANG Tao, ZHANG Yan, ZHANG Yongsheng, MO Delin, YU Ying (750)

Remote Sensing Applications

Retrieving canopy closure of Yunnan pine forests by using stochastic radiative transfer model
..... LI Xiaoyao, HUANG Huaguo (765)

Retrieval of cloud liquid water content over global oceans using FY-3C/3D microwave imager
..... DOU Fangli, SHANG Jian, WU Qiong, GU Songyan (775)

Relationship between landslide creep and vegetation anomalies in remote sensing images
..... GUO Xinyi, GUO Qing, FENG Zhongkui (786)

风云三号卫星被动微波反演海洋上空云液态水含量

窦芳丽^{1,2,3}, 商建³, 吴琼^{2,3}, 谷松岩³

1. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家卫星气象中心 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要: 云液态水含量是气候和水循环研究的重要云微物理参数,也是目前气候变化研究中的最不确定因素之一。通过极轨气象卫星被动微波观测的光谱和极化特征能够实现对云液态水含量的直接测量,本文介绍了一种基于风云三号卫星微波成像仪(MWRI)观测亮温的全天候云液态水含量反演算法,利用快速辐射传输模式、云模型和大气廓线库建立MWRI模拟亮温库并训练反演系数的宽气候态物理算法可以保证算法系数在不同季节和不同地区的适应性。同时提出了一种基于观测增量(O-B)筛选晴空像元并对算法系数及比例因子进行订正的方法。利用统计直方图方法和卫星间交叉比对方法对反演产品精度进行了检验,统计直方图方法检验结果表明,FY-3C云水反演误差为0.028 mm, FY-3D为0.025 mm,与国外同类产品的精度相当;与低轨卫星微波辐射计GMI云水产品的交叉比对结果表明,两者具有较高一致性,均方根误差为0.0325 mm。FY-3C/3D CLW产品目前已经投入业务应用,上下午星组网能够一天内基本覆盖全球,实现全球云水分布监测。

关键词: 遥感, FY-3 MWRI, 云中液态水, 辐射传输, 云模型, 统计直方图, 真实性检验

引用格式: 窦芳丽, 商建, 吴琼, 谷松岩. 2020. 风云三号卫星被动微波反演海洋上空云液态水含量. 遥感学报, 24(6): 766-775

Dou F L, Shang J, Wu Q and Gu S Y. 2020. Retrieval of cloud liquid water content over global oceans using FY-3C/3D microwave imager. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(6): 766-775[DOI:10.11834/jrs.20208323]

1 引言

云液态水含量 CLW (Cloud Liquid Water Content) 是指卫星观测像元内整个大气柱中包含的云中凝结水含量,是云滴和雨滴含水量的总和。根据近年的 IPCC 报告,云是气候系统的水循环和辐射收支过程中重要的影响因子,无论对全球还是区域气候都有着非常显著的影响,同时也是目前气候变化研究中的最不确定因素之一 (Davis, 2011)。云对气候的影响取决于云的宏观特征 (水平和垂直尺度、云水含量、冰水含量和云内温度) 以及微观特征 (云粒子尺度、形状、相态等),因此卫星对 CLW 的遥感反演将有利于云的观测研究,减少云在全球气候研究中的不确定性 (O'Dell 等, 2008)。另外, CLW 产品也常被用于数值天气预报模式云微物理方案的检验以及微波辐射计晴空亮温同化前的云检测 (Fowler 等, 1996; Okamoto 和

Derber, 2006)。

目前卫星观测 CLW 的方式包括微波被动载荷测量和近红外载荷测量,由于红外辐射只能观测到云顶,红外测量手段需要根据云的光学厚度、有效半径通过经验关系获取云水含量,属于非直接观测 (Bennartz, 2007),而低频微波通道能够穿透几乎整个云层,微波辐射计根据云的微波光谱特性和极化特征能够实现对云水的直接测量 (Petty, 1990)。自 1962 年首次发现微波辐射计能够观测到大气可降水和云水含量以来 (Barret 和 Chung, 1962),多颗极轨卫星上的微波辐射计如 NEMS、SSM/I、ATMS、TMI、GMI 等都给出了相当长时间序列的云水气候观测数据 (Staelin 等, 1976; Wentz, 1997; Weng 等, 2012),应用于气候分析。目前海洋上空 CLW 的反演在国内外已实现了业务化,虽然也有不少研究尝试使用物理反演和高频微波极化差方法对陆面上空的云水进行

收稿日期: 2018-08-14; 预印本: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41905034,41475030)

第一作者简介: 窦芳丽, 1986 年生, 女, 助理研究员, 研究方向为微波定量遥感、卫星资料同化的理论 and 应用。E-mail: doufl@cma.gov.cn

通信作者简介: 谷松岩, 1963 年生, 女, 研究员, 研究方向为卫星微波遥感相关理论 and 应用。E-mail: gusy@cma.gov.cn

反演 (Jones 和 Haar, 1990; Greenwald, 1997), 但是由于陆面反演依赖于陆表辐射率的处理, 而随时间、空间和频率变化的陆表辐射率极大的影响了陆面上空的云水反演质量, 目前反演精度还存在问题 (姚展予和彭亮, 2009), 因此本文的业务云水反演算法限制在海洋上空。

云水是一个高度变化的测量目标, 它的含量取决于给定位置云的类型, 同时不同类型的云层可能存在于大气中的不同高度层, 在空间上也并非均匀分布, 因此云的反演一直是研究难点。目前国内外基于微波辐射计进行云水反演的算法分为统计反演和半物理反演两种, 统计反演算法利用卫星观测亮温和地基微波辐射计反演的云水建立不同气候条件下的统计关系 (Alishouse, 1990; Weng 等, 1997), 半物理算法利用辐射传输模式模拟微波辐射亮温, 建立微波辐射与云水的关系 (Petty, 1990; 陈洪滨, 2000; Liu 和 Curry, 1993; Bauer 和 Schluessel, 1993; Weng 等, 2003), 由于云水含量缺乏大样本站点真实观测值, 因此后者成为目前云水反演的主流业务算法。过去的半物理算法研究表明, 亮温模拟和反演的结果取决于所使用的辐射传输模式、大气廓线库以及对云的参数化表征, 尤其是辐射传输所使用云模型的设置非常关键, 同时反演算法参数和比例因子也需要借助实际观测进一步优化 (Weng 和 Grody, 1994; Tang 和 Zou, 2017)。

风云三号 (FY-3) 卫星是中国第二代极轨气象卫星, 继 FY-3A、3B 两颗试验星后, FY-3C、3D 业务卫星分别于 2013 年 9 月和 2017 年 10 月成功发射并相继投入业务, 实现上下午星组网观测。FY-3C、3D 上的微波成像仪 (MWRI) 工作频点为 10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89 GHz, 每个频点配备 VV、HH 双极化, 共 10 个通道, 经检验 MWRI 各通道均具有较高的辐射定标精度 (Wu 和 Chen, 2016), 其一级、二级产品广泛应用于天气气候分析和数值预报同化中 (Lu 等, 2011)。星载微波辐射计产品依赖于亮温, 除了是地气系统参数的函数, 也与仪器设计和指标相关, 因此需要针对 FY-3C/3D MWRI 的观测亮温数据进行其云水产品业务反演算法的开发。本文利用快速辐射传输模式模拟了宽气候态的辐射亮温, 开发了基于物理模型的 MWRI 海上云液态水全天候产品, 然后利用国家卫星气象中心

FY-3 仪器质量监控系统的 MWRI 观测增量 O-B (Observation minus Background) 结果对算法参数进行了优化。云水产品缺乏用于验证的真实站点观测, 本文利用 RSS (Remote Sensing System) 的统计直方图方法以及低轨微波辐射计 GMI (GPM Microwave Imager) 业务云水产品对反演结果进行了检验。

2 CLW 产品反演算法

2.1 反演算法原理

2.1.1 非降水云反演

微波辐射计亮温受地气系统参数的影响, 是海面风、海温、大气中水汽、云水和降水的函数。在 40 GHz 以下, 云和水汽的散射作用可以忽略 (廖国男, 2002), 根据辐射传输理论的等温大气假设并忽略多次散射项推导, 非降水云云水含量可以利用微波辐射计的 37 GHz 云水敏感通道和 23 GHz 水汽吸收通道, 通过多元线性回归反演 (Grody, 1976; Weng 和 Grody, 1994),

$$CLW = a_0 \left(\ln(290 - T_{B37V}) \right) - a_1 - a_2 \ln(290 - T_{B23V}) \quad (1)$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 等 3 个回归因子通过辐射传输模式模拟亮温与模式输入云水含量的多元线性回归获得, 实际反演中 T_{B37V} 为 MWRI 36.5 GHz V 极化 (通道 7) 观测亮温, T_{B23V} 为 23.8 GHz V 极化 (通道 5) 观测亮温。MWRI 不同通道天线亮温对同一观测目标的分辨率不同, 且由于仪器设计通道间无法完全配准, 导致瞬时视场有差别, 在反演之前需要通过重采样算法对观测亮温进行分辨率匹配和通道配准, 这里使用了 BG (Backus-Gilbert) 算法进行通道间匹配, BG 算法是一种在对目标天线方向图进行拟合的基础上实现分辨率重构的技术 (杨虎等, 2012), 已在 FY-3 MWRI 的产品处理系统中实现业务应用。由于云水反演算法利用了 23.8 V 和 36.5 V 两个通道的亮温, 需要使用 MWRI 36.5 V 通道匹配到 23.8 V 通道之后的亮温值作为云水反演的输入, 因此可以认为云水含量产品的分辨率为 23.8 V 通道的 27 km×45 km。

由于云水的绝对含量值很小, 受系数影响相对较大, 反演算法的关键是训练出足够精确的 a_0 、 a_1 、 a_2 系数, 本文通过在辐射传输模式中输入变化范围较宽的环境参数, 能够模拟全球大部分地区、

大多数大气—海洋状况下的测量亮温，使多元线性回归的反演条件能够包含大多数天气气候态，保证反演系数的准确性。

2.1.2 有降水云反演

降雨与云在辐射传输中起到的作用非常相似，因此降雨的存在会增加云水反演的复杂性，难以通过多元线性回归的方法准确获得有降雨像元的反演系数，因此本文基于降水云中液水含量与地面平均降雨率之间的经验关系进行有降水云中的云水含量反演

$$CLW = C(1 + \sqrt{HR}) \quad (2)$$

式中， R 是平均降雨率 (mm/h)， H 是降雨层厚度 (km)，从气候统计来看可以认为是海温 T_s (K) 的函数，

$$H = 1 + 0.14(T_s - 273) - 0.0025(T_s - 273)^2 \quad T_s < 301$$

$$H = 3 \quad T_s \geq 301 \quad (3)$$

从式 (2)、式 (3) 可见，当降水云内的云水含量超过阈值 C 时，降雨开始发生，阈值 C 由 Wentz 和 Spencer (1998) 利用 38 个温带气旋的数据统计得到，一般设定为 0.18 mm。云水含量随降雨强度的增加而增大，在降雨率高至 1—2 mm/h 条件下云水含量值产生饱和。反演中使用的降雨率和海温均来自 FY-3 MWRI 业务产品，经检验产品具有较高的精度 (杨虎等, 2013)。

2.2 算法模式设置

在非降水云反演算法中，首先需要模拟有云水存在条件下的 MWRI 亮温。所使用的辐射传输模式是美国卫星资料同化联合中心开发的快速辐射传输模式 CRTM (Community Radiative Transfer Model)，辐射传输模式的驱动场是 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 短期预报大气廓线数据集，包含 25000 条温、压、湿廓线，从地表到大气层顶 (0.01 hPa) 将大气垂直分为 137 层，分层垂直分辨率为几十米到几公里，采样覆盖全球，包括赤道和极地地区 (Eresmaa 和 McNally, 2014)，在预处理中先筛除有降水廓线。

CRTM 对云的处理是独立的多次散射辐射传输计算模块，考虑了 5 种类型云中水凝物 (云水、云冰、雨、雪、霰) 的吸收和多次散射。CRTM 的云粒子单粒子光学参数通过米散射计算成为查找表，

表内的维度是单层大气的积分云水含量 (kg/m^2) 和粒子有效半径 (μm) (Han 等, 2006; Baum 等, 2005)。在非降水云中只考虑云水对辐射传输的影响，假设云在水平上均匀无限，暂不考虑多层云假设，云物理参数模型采用 Falcone (1979) 的 10 种典型水云模型，首先将该模型提供的粒径分布、云水密度等参数转换成 CRTM 可识别的有效粒子半径和云水含量，有效粒子半径采用典型云粒径分布的 gamma 函数，根据式 (4)

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_0^\infty r^3 n(r) dr}{\int_0^\infty r^2 n(r) dr} \quad (4)$$

进行分布积分计算，计算后的粒径及其他需要输入 CRTM 的云物理参数详见表 1。在云底高度和云顶高度之间每层的云水含量 (g/m^2) 为

$$CLW = \rho_c \cdot rand \cdot \Delta z \quad (5)$$

式中， ρ_c 为 10 种典型云的云水密度， $rand$ 为 0—1 的随机数， Δz 为每层大气的厚度，可根据压高公式计算。

在模拟大气和云的条件下，添加粗糙海面模型，海温从 0°C — 30°C ，海面风速从 0—20 m/s 之间，风向从 0° — 360° 随机变化。CRTM 的微波海表发射率模型采用 FASTEM5，是一种包含白沫覆盖参数化模块的快速海表发射率计算模型 (Bormann 等, 2012)。

表 1 典型云模型的云物理参数

Table1 Cloud physical parameters in the typical cloud model

序号	云类型	有效粒子半径/ μm	云水密度/ (g/m^3)	云底高度/ m	云顶高度/ m
1	积云	12	1.0	660	2700
2	高层云	7.2	0.41	2400	2900
3	层积云	10	0.55	660	1320
4	雨层云	12	0.61	160	1000
5	层云	9	0.42	160	660
6	层云-2	8.3	0.29	330	1000
7	层云—层积云	6.7	0.15	660	2000
8	层积云-2	10	0.3	160	2000
9	雨层云-2	10.3	0.65	160	660
10	塔状积云	15.2	0.57	660	2700

2.3 反演参数订正

反演云水值对式 (1) 中的 a_0 、 a_1 、 a_2 参数变

化很敏感，由于MWRI定标误差可能造成CRTM模拟亮温与实际观测亮温之间存在偏差，因此需要借助实际观测亮温对反演参数进行重新订正。根据式1，在CLW为0的情况下，

$$\ln(290 - T_{B37V}) = a_1 + a_2 \ln(290 - T_{B23V}) \quad (6)$$

可见反演参数 a_1 、 a_2 能够利用晴空条件下观测亮温的线性回归进行重新校正，Weng和Grody (1994)和Tang和Zou (2017)通过匹配的可见光观测来筛选晴空亮温，由于可见光与红外观测像元分辨率和代表性差异会给晴空像元筛选带来误差，本文提出一种基于MWRI本身观测增量(O-B)偏差严格筛选晴空亮温的校正方法。

O-B偏差常被应用于同化前诊断估计卫星资料的观测误差，进行资料的质量控制和偏差订正(Waller等, 2016)，该参数定义为观测亮温 y 与背景场模拟亮温的残差

$$d_b^o = y - H(x^b), \quad (7)$$

式中， x^b 来自数值预报模式背景场，通过观测算子 H 将背景场插值到观测空间并转换成卫星观测量，在FY-3仪器质量监控系统中，模式背景场使用T639业务模式预报结果，观测算子使用CRTM和RTTOV两种快速辐射传输模式。

O-B偏差来源包括仪器本身灵敏度、定标、仪器响应特性等因素，以及模式背景场误差、辐射传输模式误差等。在云和降雨存在条件下，由于模式背景场的云水成物廓线与真实云相比存在较大的模拟误差，辐射传输模式使用多次散射求解方案考虑水成物的吸收和多次散射效应，辐射传输计算也存在较大的不确定性，导致云和降雨像元出现O-B偏差。因此通过严格的O-B阈值，能够筛选受云雨和其他因素影响的观测值，对卫星观测资料进行质量控制(刘兆玮和官莉, 2013)。基于以上原理，本文利用FY-3仪器质量监控系统的O-B偏差结果筛选用于比例因子校正的观测值。当各通道O-B同时满足以下条件时，认为该亮温为晴空并处于仪器稳定状态。

$$\begin{aligned} |(O - B)_{10V}| &< 10 K \\ |(O - B)_{18V}| &< 1 K \\ |(O - B)_{23V}| &< 1 K \\ |(O - B)_{37V}| &< 1 K \\ |(O - B)_{89V}| &< 10 K \end{aligned} \quad (8)$$

利用2018年3月1—10日FY-3仪器质量监控

系统的FY-3C/3D MWRI O-B结果，共筛选出138653对观测亮温，根据式6计算回归系数 a_1 、 a_2 ，将校正后的参数输入式(1)，重新利用模拟亮温和模式输入的云水含量根据式(1)回归计算比例因子 a_0 ，并计算模式输入“真实”云水和线性反演云水的相关系数和均方根误差，这两个统计量用于检验回归模型， R 越接近1，rms越小，回归方程越显著。表2给出了回归系数和统计量，可见相关系数超过0.96，表明云水与双通道亮温的线性关系成立，回归方程显著。

表2 统计回归系数、相关系数和均方根

Table 2 The regression coefficients, correlation and rms error between the true and regressed CLWs

	a_0	a_1	a_2	R	rms/mm
FY-3C	-1.8280	2.7757	0.3704	0.9625	0.0047
FY-3D	-1.7894	2.7825	0.3708	0.9614	0.0049

3 CLW产品精度检验

3.1 检验数据和方法介绍

微波辐射计对云水含量的观测可以认为是目前最为准确的测量技术，没有真实的地面站点观测数据能够用于云水含量产品的检验。Han等(1995)采用地基或机载微波辐射计观测结果检验星载微波辐射计的云水精度，然而由于二者时间和空间代表性不同，验证存在很大的不确定性，并且无法在全球范围内进行验证。因此本文使用同类微波辐射计的业务云水产品和再分析资料，利用国外同类产品检验中普遍采用的统计直方图方法(Wentz, 1998)和卫星间交叉比对方法对FY-3 CLW产品精度进行了检验。

3.1.1 国外同类微波云水产品

本文使用的同类微波云水产品均来自RSS，该机构在国外微波辐射计一级产品定标和二级业务产品反演方面处于领先地位，其云水产品可作为FY-3 CLW产品的检验参考源。

SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) 辐射计是美国DMSP-F16 (Defense Meteorological Satellite Program - F16) 卫星上装载的多通道微波辐射计，该卫星升交轨过境时间为15:50，与FY-3D的14:00相差不到两小时。SSM/I频点从19 GHz到

183 GHz, 53.1°地面入射角与扫描方式均与FY-3 MWRI近似相同。本文使用的SSM/I第7版本云水产品来自`ftp://ftp.ssmi.com/ssmi/f16/bmaps_v07/` [2018-08-14], 为0.25°格点日产品, 用于统计直方图检验。

GMI辐射计是GPM (Global Precipitation Measurement) 卫星上的多通道圆锥扫描微波辐射计, 频率从10 GHz到183 GHz, 对地面观测天顶角为52.8°, 与MWRI近似相同。GMI具有非常高的定标精度, 同时GPM卫星轨道高度为403 km, 轨道倾角65°, 其快速重访周期使得极轨卫星相同频点微波辐射计能够与它进行交叉定标和产品验证。本文使用的GMI云水产品 (RSS V8.2版本) 是RSS提供的轨道产品, 用于卫星间交叉比对。

3.1.2 再分析资料

本文在统计直方图检验方法中使用的ERA-5再分析数据是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 于2017年发布的第五代大气再分析数据集, 可以被认为是迄今最准确的再分析数据。ERA-5模式原始水平分辨率31 km, 提供从海表面到0.01 hPa (约80 km) 共137层的小时分析场。

ERA-5再分析云水含量数据来自ECMWF数据服务系统<http://apps.ecmwf.int/datasets/> [2018-08-14], 为插值后的0.25°格点场, 从数据集中提取云水柱含量和雨水柱含量并求和。

3.1.3 检验方法介绍

对FY-3 CLW产品的检验分为两部分, 基于统计直方图的检验和卫星间交叉比对。

首先利用RSS统计直方图方法对反演结果进行检验, 该方法目前被应用于SSM/I、AMSRE等业务云水产品检验中 (Wentz, 1997)。统计直方图方法的原理是基于反演误差对全样本概率密度函数的影响, 概率密度函数 (*pdf*) 是描述变量在某个取值点附近出现次数也就是出现概率的函数, 真实云水*pdf*的最大值应出现在CLW=0处, 并呈类指数分布迅速衰落, 通过增加高斯随机噪声的数值模拟试验证明, 在反演误差存在的情况下, *pdf*的左侧半功率点在CLW=0处, 而半功率宽度可以用来表征反演的均方根误差大小。检验过程利用2018年3月共31 d的FY-3C MWRI、FY-3D MWRI云水产品、DMSP-F16 SSM/I云水产品 and ERA-5再

分析云水含量数据, 通过核密度估计方法计算概率密度函数, 进一步计算FY-3云水产品和SSM/I云水产品的反演误差并比对。

检验的第二部分是利用低轨辐射计进行卫星间交叉比对, 选取2018年3月1日—3月15日共15天的GMI二级云水轨道产品, 包括升轨和降轨, 与FY-3C、FY-3D MWRI云水轨道产品分别进行时空匹配, 由于云的时空变化剧烈, 时空匹配的阈值选择像元与像元的时间距离小于10 min, 空间距离小于1 km。

3.2 检验结果分析

3.2.1 基于统计直方图的检验结果

图1给出了FY-3C MWRI、FY-3D MWRI云水产品、DMSP-F16 SSM/I云水产品和ERA-5再分析云水含量数据的概率密度函数, 为了保证四者对比的一致性, 首先要将MWRI反演的轨道产品经等经纬度投影处理成0.25°日产品。这里使用的ERA-5云水含量与原数据集中的云水定义不同, 实际进行统计的是原数据集中积分云水含量与雨水含量之和。从图1可见, 数值预报模式模拟的云水分布接近真实云水的分布形态, 最大值出现在CLW=0处并随CLW增大呈指数下降趋势, MWRI和SSM/I反演的云水*pdf*分布左侧半功率点均位于0值附近, 符合理论推断, 根据*pdf*计算SSM/I的半功率宽约为0.025 mm, 与RSS官方发布的0.025 mm精度相符。使用同样的方法得到FY-3C MWRI半功率宽度即云水反演误差为0.028 mm, FY-3D反演误差为0.025 mm。FY-3D CLW的概率密度函数曲线相较于FY-3C与SSM/I更接近, 在超过0.1 mm的云水含量处较为明显, 可能的原因是FY-3D与DMSP-F16同属下午星, 过境时间更接近, 而云水的高时空变化使得FY-3D比3C与SSM/I具有更佳一致性。

3.2.2 卫星间交叉比对结果

经GMI轨道数据与MWRI轨道数据的时空匹配, 共得到GMI-MWRI共16332个匹配样本点, 图2显示了二者的散点密度分布, 颜色代表落在该区间内的频数, 由于真实云水分布的特征是小数值占据的比例更大, 匹配的样本分布也呈同样态势, 大多数样本落在0—0.1 mm区间内, 总体可见

MWRI反演的云水含量与GMI产品的一致性较好,统计匹配样本得到二者的相关系数为0.9061,具有比较相关的高性,平均偏差及标准偏差为 0.0075 ± 0.0325 mm,与直方图方法得到的结果相比略高,这与卫星间交叉比对比时存在的时空匹配偏差、产品算法差别有关。

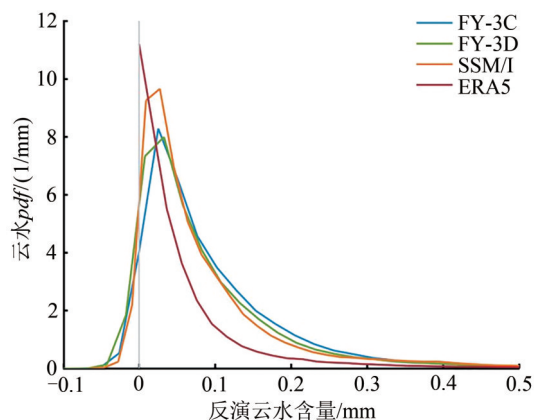


图1 FY-3 云水产品、SSM/I 云水产品 and ERA5 再分析云水的概率密度函数(*pdf*)

Fig1 Probability density function(*pdf*) for the cloud liquid water from FY-3 products, SSM/I products and ERA-5 reanalysis datasets

散点分布呈纺锤型,表明在云水含量的中间段(0.05—0.2 mm)反演的均方根误差较两端略大,在超过0.4 mm的大云水区间,从有限的匹配样本看来MWRI反演值偏大,偏差也较大,可能的原因是当云水超过0.4 mm时,较大云滴和降雨出现的概率较高,37 GHz亮温对其响应欠佳,降雨像元反演算法依赖于气候经验关系,也受到算法中上游输入海温和降雨率数据精度的影响。

卫星间交叉比对比方法计算得到的标准偏差比统计直方图方法略大,这也与交叉比对比方法本身的不确定性有关,如时空匹配时带来的观测时间差异、空间代表性差异,以及不同产品生成算法和处理过程的差异,均会造成检验结果的误差增大。

3.2.3 个例分析

3.2.3.1 FY-3C/3D 日产品分析

将FY-3C、FY-3D MWRI每日升轨各14轨数据拼接,重复像元采用覆盖处理(与RSS日产品处理方式相同),经等经纬度投影后得到CLW日产品。选取2018-03-01 FY-C/D和DMSP-F16卫星SSM/I的CLW日产品进行分析,FY-3D与F16同属

下午星,F16卫星升交轨过境时间为15:50,与FY-3D的14:00相差不到2小时,云系形状具备可比性,由于FY-3C过境时间为10:00,因此在日产品处理时,重复像元使用FY-3D覆盖。同时选择FY-3D中分辨率光谱成像仪(MERSI)真彩色云图作为对比。处理后FY-3和SSM/I CLW分布如图3(a)、图3(b)所示,可见FY-3C/3D上下午星组网观测后,一天的全球覆盖度大幅提高,而SSM/I观测刈幅之间的缝隙影响了全球云系的分析。对比二者的空间分布可见,云系分布的状态比较一致,在云水分布图上能够清晰的识别出位于日本岛东侧的锋面气旋逗点云系、汇聚在北太平洋白令海洋面和北大西洋的涡旋云系,以及位于南太平洋和南大西洋的锋面气旋云系。与SSM/I日产品相比,FY-3 CLW产品能够更好的显示出云的细节结构,以北美洲西侧的涡旋云系为例,FY-3能够识别出位于冷锋后部的线状、细胞状积云云系,同样的云系特征显示在MERSI云图上(图3(c)),而SSM/I只能看到锋面云系;可见光云图上可见位于白令海的涡旋云系南部的细胞状云,在FY-3 CLW上清晰可见,在SSM/I基本不可见。相比于SSM/I,FY-3 CLW在大云水含量的条件下值偏小,综上分析,FY-3 CLW对云水含量较小的薄云响应比较敏感,对厚云的反演云水值略小于SSM/I,基本云系特征二者一致。

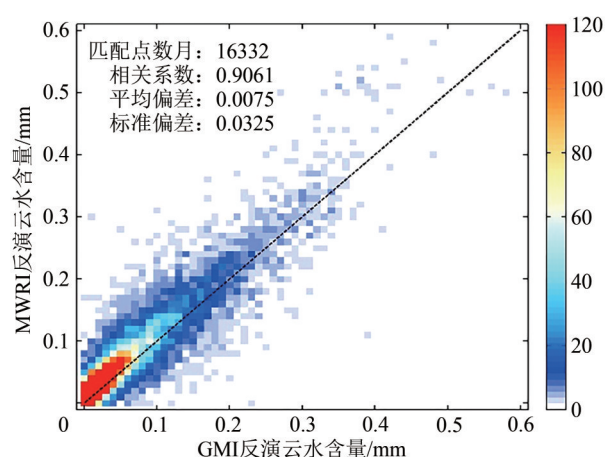


图2 MWRI反演云水含量与GMI云水产品对比图

Fig2 The comparison between MWRI CLW products and GMI CLW products

3.2.3.2 热带气旋个例分析

热带气旋云系中的含水量分布特征及演变规律能够用于指示热带气旋强度的变化趋势,FY-3

系列微波辐射计能够提供对热带气旋一天内最多6次观测,其CLW产品也被应用于热带气旋监测分析业务。以2018年3号台风杰拉华为例分析FY-3 CLW对台风的监测能力,图4给出了FY-3 CLW产品、SSM/I CLW产品、MERSI的可见光云

图以及ERA-5再分析云水对台风杰拉华的监测情况,在同时间段内尽量选择与FY-3过境时间接近的结果,FY-3与SSM/I时间相差约3 h,与MERSI几乎无时间差,与ERA-5时间相差30 min左右。

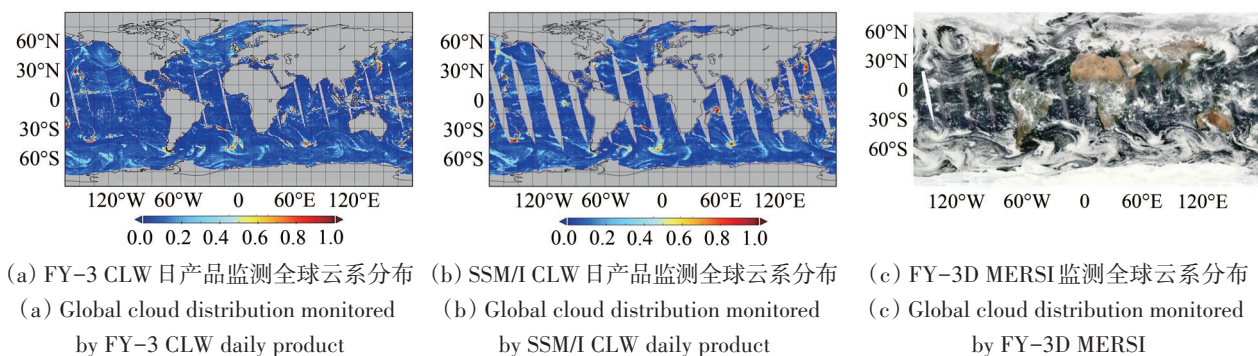
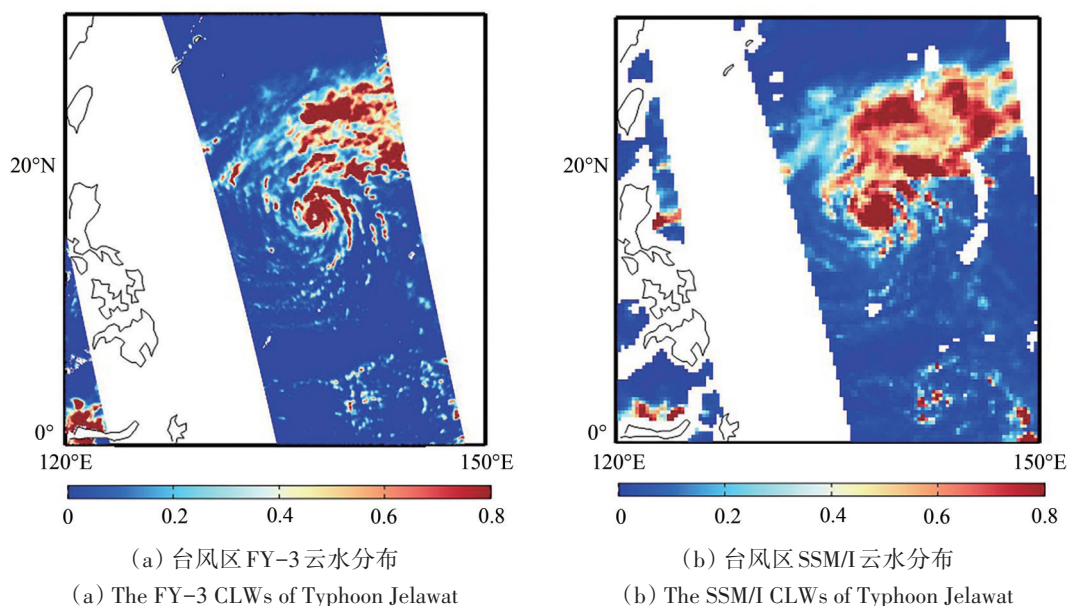


图3 2018年3月1日FY-3 CLW、SSM/I CLW日产品和FY-3D MERSI监测全球云系分布

Fig3 The global cloud distributions monitored by FY-3 CLW daily product, SSM/I CLW daily product and FY-3D MERSI on March 1, 2018

从图4(a)、图4(b)可见,由于FY-3轨道数据具有较高的空间采样率(10 km),实际空间分辨率优于SSM/I 0.25°产品,因此FY-3对台风云系细节结构展示更好,台风眼区、内螺旋云带和外螺旋云雨带清晰可见,两者在云墙区和螺旋雨带区的CLW量值相近,超过0.8 mm。可见光云图由于薄云遮挡,没有显出眼区(图4(c)),可见微波对薄云的穿透性使之对台风内部结构的监测具有其独特优势。比较图4(d)和图4(a)、图4(b)

可见,再分析数据中的台风云水分布的位置和结构与卫星观测有较大的差别,云墙区和螺旋雨带区的最大CLW量值与卫星观测一致,这是由于数值预报模式对云的预报依赖微物理参数化方案和积云参数化方案,预报结果与实际云的宏微观特征差别较大,而再分析数据在同化过程中并未将云参数作为控制变量,云的同化方案目前也存在极大的不确定性,观测数据进入同化后对云的修正程度有限。



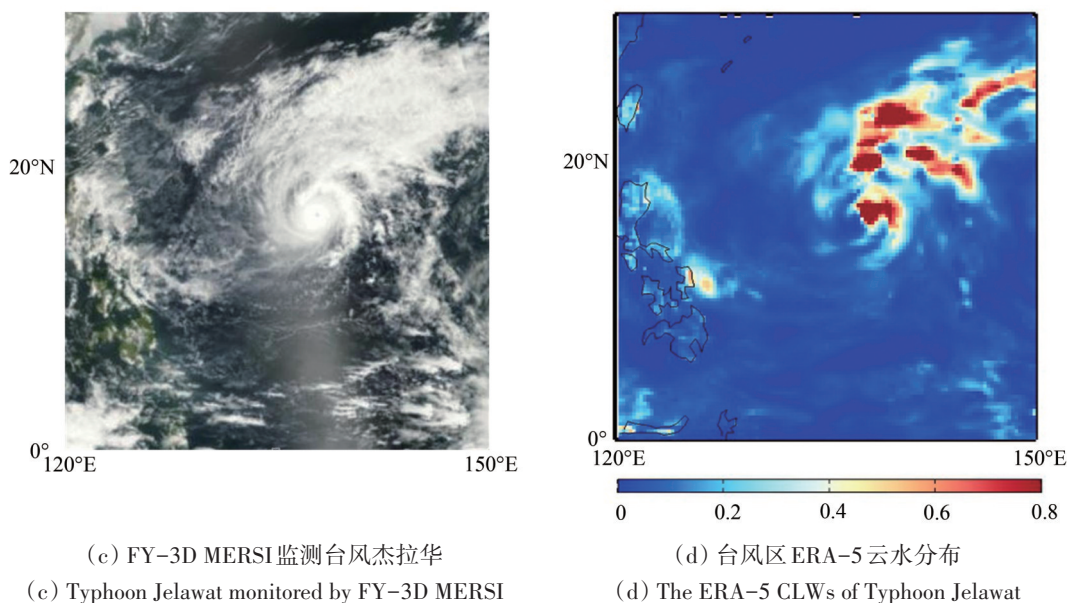


图4 FY-3 CLW、SSM/I CLW、FY-3D MERSI 和 ERA-5 CLW 监测台风杰拉华云系分布
Fig4 The cloud distributions of Typhoon Jelawat monitored by FY-3 CLW, SSM/I CLW, FY-3D MERSI and ERA-5 CLW

4 结 论

本文在介绍 FY-3C、3D MWRI 海上云液态水含量产品生成所使用的模式设置、数据和算法的基础上，利用统计直方图方法和卫星间交叉比对方法对反演产品精度进行了定量检验，选取日产品个例和台风个例，通过与国外同类卫星日产品、MERSI 可见光云图以及再分析资料的云水监测结果比对，评价了 FY-3 CLW 产品监测全球云系和热带气旋云系的准确性，以及不同数据源对云水观测的异同。研究结果表明：

(1) FY-3 MWRI CLW 全天候反演算法基于辐射传输模式和较宽气候态的大气廓线库，以及十种典型云模型，能够覆盖大多数天气气候状态，能够保证产品算法在不同时间和经纬度区域的适应性。本文提出了一种基于观测增量的晴空检测算法，能够有效筛选晴空亮温，用于反演参数和比例因子校正。

(2) 微波辐射计对云水含量的观测可以认为是目前最为准确的测量技术，真实性检验需要特殊考虑。利用国外同类产品的业务化检验的统计直方图方法对 FY-3 CLW 产品进行评价，统计结果表明 FY-3C 云水反演误差为 0.028 mm，FY-3D 为 0.025 mm，与 SSM/I 云水产品精度相当。与 GMI CLW 产品交叉比对结果显示，二者相关系数为 0.9061，具有较高相关性，平均偏差及标准偏差为

0.0075±0.0325 mm。

(3) 通过分析日产品的云系分布，可以看到 FY-3C/3D 上下午星组网观测后，一天的全球覆盖度大幅提高。FY-3 CLW 日产品与 SSM/I CLW 日产品的全球云系分布比较一致，FY-3 CLW 对云水含量较小的薄云响应比较敏感，对厚云的反演云水值略小于 SSM/I。分析对热带气旋的监测结果可知，FY-3 对台风云系细节结构展示更好，台风眼区、内螺旋云带和外螺旋云雨带清晰可见。

综上，FY-3 CLW 产品精度可靠，具备天气和气候等方面的业务应用能力。下一步的工作将持续分析海洋上空 CLW 产品的稳定性，继续改进 FY-3 海上 CLW 产品算法，并开发陆面上空云水反演的业务算法。

志 谢 文中使用的 SSM/I 和 GMI 日产品数据来源于 RSS 的数据分发 FTP，ERA-5 再分析资料来源于 ECMWF 数据分发网站，在此表示感谢。

参考文献(References)

- Alishouse J C, Snider J B, Westwater E R, Swift C T, Ruf C S, Snyder S A, Vongsathorn J and Ferraro R R. 1990. Determination of cloud liquid water content using the SSM/I. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28(5): 817-822 [DOI: 10.1109/36.58968]
- Barrett A H and Chung V K. 1962. A method for the determination of high-altitude water-vapor abundance from ground-based micro-

- wave observations. *Journal of Geophysical Research*, 67(11): 4259-4266 [DOI: [10.1029/jz067i011p04259](https://doi.org/10.1029/jz067i011p04259)]
- Bauer P and Schuessel P. 1993. Rainfall, total water, ice water, and water vapor over sea from polarized microwave simulations and special sensor microwave/imager data. *Journal of Geophysical Research*, 98(D11): 20737-20759 [DOI: [10.1029/93jd01577](https://doi.org/10.1029/93jd01577)]
- Baum B A, Yang P, Heymsfield A J, Platnick S, King M D, Hu Y X and Bedka S T. 2005. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part II: narrowband models. *Journal of Applied Meteorology*, 44(12): 1896-1911 [DOI: [10.1175/JAM2309.1](https://doi.org/10.1175/JAM2309.1)]
- Bennartz R. 2007. Global assessment of marine boundary layer cloud droplet number concentration from satellite. *Journal of Geophysical Research*, 112(D2): D16302 [DOI: [10.1029/2006JD007547](https://doi.org/10.1029/2006JD007547)]
- Bormann N, Geer A and English S. 2012. Evaluation and comparisons of FASTEM versions 2 to 5[2018-4-1]. http://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/itsc/itsc18/program/files/links/8.07_Bormann_po.pdf
- Chen H B. 2000. A retrieval algorithm for deriving liquid water path from space-borne microwave radiometric measurements. *Journal of Remote Sensing*, 4(3): 165-171(陈洪滨. 2000. 星载微波辐射计遥感反演云水量的一个算式. *遥感学报*, 4(3): 165-171) [DOI: [10.11834/jrs.20000301](https://doi.org/10.11834/jrs.20000301)]
- Davis M A. 2011. Cloud-Radiative Feedback and Ocean-Atmosphere Feedback in the Southeast Pacific Ocean Simulated by IPCC AR4 GCMs. Columbus: Ohio State University: 34-35
- Eresmaa R and McNally A P. 2014. Diverse Profile Datasets from the ECMWF 137-level Short-range Forecasts. NWPSAF-EC-TR-017. ECMWF [DOI: [10.13140/2.1.4476.8963](https://doi.org/10.13140/2.1.4476.8963)]
- Falcone Jr V J, Abreu L W and Shettle E P. 1979. Atmospheric attenuation of millimeter and submillimeter waves//Proceedings of EASCON 79, Electronics and Aerospace Systems Conference. Arlington: Institute of Electrical and Electronics Engineers: 36-41
- Fowler L D, Randall D A and Rutledge S A. 1996. Liquid and ice cloud microphysics in the CSU general circulation model. Part 1: model description and simulated microphysical processes. *Journal of Climate*, 9(3): 489 - 529 [DOI: [10.1175/1520-0442\(1996\)009<0489:laicmi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<0489:laicmi>2.0.co;2)]
- Greenwald T J, Combs C L, Jones A S, Randel D L and Haar T H V. 1997. Further developments in estimating cloud liquid water over land using microwave and infrared satellite measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 36(4): 389-405 [DOI: [10.1175/1520-0450\(1997\)036<0389:fdiecl>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<0389:fdiecl>2.0.co;2)]
- Grody N. 1976. Remote sensing of atmospheric water content from satellites using microwave radiometry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 24(2): 155-162 [DOI: [10.1109/tap.1976.1141324](https://doi.org/10.1109/tap.1976.1141324)]
- Han Q, Welch R, Chou J, Rossow W and White A. 1995. Validation of satellite retrievals of cloud microphysics and liquid water path using observations from FIRE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(23): 4183-4195 [DOI: [10.1175/1520-0469\(1995\)052<4183:vosroc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<4183:vosroc>2.0.co;2)]
- Han Y, van Delst P, Liu Q H, Weng F Z, Yan B H, Treadon R and Derber J. 2006. JCSDA community radiative transfer model (CRTM)—version 1. NOAA Technical Report NESDIS 122. NOAA
- Jones A S and Haar T H V. 1990. Passive microwave remote sensing of cloud liquid water over land regions. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10): 16673-16683 [DOI: [10.1029/jd095id10p16673](https://doi.org/10.1029/jd095id10p16673)]
- Liau G N. 2002. An Introduction to Atmospheric Radiation. Guo C L and Zhou S J, trans. 2nd ed. Beijing: Academic Press: 425-430 (廖国男. 2002. 大气辐射导论. 郭彩丽, 周诗健, 译. 2版. 北京: 气象出版社: 425-430)
- Liu G S and Curry J A. 1993. Determination of characteristic features of cloud liquid water from satellite microwave measurements. *Journal of Geophysical Research*, 98(D3): 5069-5092 [DOI: [10.1029/92jd02888](https://doi.org/10.1029/92jd02888)]
- Liu Z W and Guan L. 2013. Assessing the ability for using O-B of FY-3A microwave humidity sounders to identify clouds. *Journal of the Meteorological Sciences*, 33(5): 536-542 (刘兆伟, 官莉. 2013. 评估FY-3A微波湿度计O-B对云的识别能力. *气象科学*, 33(5): 536-542) [DOI: [10.3969/2012jms.0186](https://doi.org/10.3969/2012jms.0186)]
- Lu Q F, Bell W, Bauer P, Bormann N and Peubey C. 2011. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(658): 1298-1311 [DOI: [10.1002/qj.834](https://doi.org/10.1002/qj.834)]
- O'Dell C W, Wentz F J and Bennartz R. 2008. Cloud liquid water path from satellite-based passive microwave observations: a new climatology over the global oceans. *Journal of Climate*, 21(8): 1721-1739 [DOI: [10.1175/2007JCLI1958.1](https://doi.org/10.1175/2007JCLI1958.1)]
- Okamoto K and Derber J C. 2006. Assimilation of SSM/I radiances in the NCEP global data assimilation system. *Monthly Weather Review*, 134(9): 2612-2631 [DOI: [10.1175/mwr3205.1](https://doi.org/10.1175/mwr3205.1)]
- Petty G W. 1990. On the Response of the Special Sensor Microwave/Imager to the Marine Environment: Implications for Atmospheric Parameter Retrievals. Washington: University of Washington: 118
- Staelin D H, Kunzi K F, Pettyjohn R L, Poon R K L, Wilcox R W and Waters J W. 1976. Remote sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus 5 microwave spectrometer. *Journal of Applied Meteorology*, 15(11): 1204-1214 [DOI: [10.1175/1520-0450\(1976\)015<1204:rsowav>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1976)015<1204:rsowav>2.0.co;2)]
- Tang F and Zou X L. 2017. Liquid water path retrieval using the lowest frequency channels of *Fengyun-3C* Microwave Radiation Imager (MWRI). *Journal of Meteorological Research*, 31(6): 1109-1122 [DOI: [10.1007/s13351-017-7012-7](https://doi.org/10.1007/s13351-017-7012-7)]
- Waller J A, Dance S L and Nichols N K. 2016. Theoretical insight into diagnosing observation error correlations using observation-minus-background and observation-minus-analysis statistics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(694): 418-431 [DOI: [10.1002/qj.2661](https://doi.org/10.1002/qj.2661)]
- Weng F, Zou X, Wang X, Yang S and Goldberg M D. 2012. Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for numerical weather prediction and tropical cyclone applications. *Journal of Geophysical Research*, 117(D19): D19112 [DOI: [10.1029/2012JD018144](https://doi.org/10.1029/2012JD018144)]
- Weng F Z and Grody N C. 1994. Retrieval of cloud liquid water using the Special Sensor Microwave Imager (SSM/I). *Journal of Geophysical Research*, 99(D12): 25535-25551 [DOI: [10.1029/94jd02304](https://doi.org/10.1029/94jd02304)]
- Weng F Z, Grody N C, Ferraro R, Basist A and Forsyth D. 1997. Cloud liquid water climatology from the special sensor microwave/imager. *Journal of Climate*, 10(5): 1086-1098 [DOI: [10.1175/1520-0442\(1997\)010<1086:clwcf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1086:clwcf>2.0.co;2)]
- Weng F Z, Zhao L M, Ferraro R R, Poe G, Li X F and Grody N C. 2003. Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms. *Radio Science*, 38(4): 33-1-33-13 [DOI: [10.1029/](https://doi.org/10.1029/)

- 2002rs002679]
- Wentz F J. 1997. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *Journal of Geophysical Research*, 102(C4): 8703-8718 [DOI: [10.1029/96JC01751](https://doi.org/10.1029/96JC01751)]
- Wentz F J and Spencer R W. 1998. SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55(9): 1613-1627 [DOI: [10.1175/1520-0469\(1998\)055<1613:sirrwa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<1613:sirrwa>2.0.co;2)]
- Wu S L and Chen J. 2016. Instrument performance and cross calibration of FY-3C MWRI//Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing: IEEE: 388-391 [DOI: [10.1109/igarss.2016.7729095](https://doi.org/10.1109/igarss.2016.7729095)]
- Yang H, Shang J, Lv L Q, He J K and Xu H X. 2012. Study of channel resolution matching of spaceborne microwave radiometer and its application in MWRI of FY-3 satellite. *Aerospace Shanghai*, 29 (1): 23-28, 51 (杨虎, 商建, 吕利清, 何嘉恺, 徐红新. 2012. 星载微波辐射计通道分辨率匹配技术及其在FY-3卫星MWRI中的应用. *上海航天*, 29(1): 23-28, 51) [DOI: [10.3969/j.issn.1006-1630.2012.01.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1630.2012.01.005)]
- Yang H, Li X Q, You R and Wu S L. 2013. Environmental data records from Fengyun-3B microwave radiation imager. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 3(4): 136-143 (杨虎, 李小青, 游然, 武胜利. 2013. 风云三号微波成像仪定标精度评价及业务产品介绍. *气象科技进展*, 3(4): 136-143) [DOI: [10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.014)]
- Yao Z Y and Peng L. 2009. Advances in satellite passive microwave remote sensing of cloud liquid water. *Acta Meteorologica Sinica*, 67 (2): 331-341 (姚展予, 彭亮. 2009. 卫星微波被动遥感云中液态水的研究进展. *气象学报*, 67(2): 331-341) [DOI: [10.3321/j.issn:0577-6619.2009.02.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6619.2009.02.016)]

Retrieval of cloud liquid water content over global oceans using FY-3C/3D microwave imager

DOU Fangli^{1,2,3}, SHANG Jian³, WU Qiong^{2,3}, GU Songyan³

1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environment Satellites, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: Cloud Liquid Water Content (CLW) links the hydrological and radiative components of the climate system and is an important parameter for research in climate and cloud microphysics. Cloud liquid water is a highly variable target and depends on cloud type. The different cloud types exist on different levels and vary in the satellite sensor view.

Cloud liquid water is one the most uncertain factors in climate change research. CLW can be directly measured from the passive microwave measurements on the basis of its spectral and polarization signatures. The all-sky CLW retrieval algorithms for FY-3C and FY-3D microwave imagers (MWRI) are presented in this study. The CRTM rapid radiative transfer and various cloud models, as well as ECMWF short-range forecast profile datasets are utilized for training the retrieval coefficients. Hence, the physical-based algorithm could ensure the adaptability of the CLW products for different seasons and regions. To prevent matching errors between visible and microwave pixels, a novel clear-sky detection method based on O-B (observations minus backgrounds) errors of FY-3 MWRI brightness temperatures is given and proved effective to adjust the coefficients and the scale factor of the retrieval equation. Then, the retrievals under rainy conditions based on the climate statistical features are added in the FY-3 CLW all-sky algorithms.

As the validation of satellite derived CLWs is difficult to carry out, the statistical histogram method raised by Remote Sensing System (RSS) is used to estimate the accuracy of FY-3 CLW daily products and DMSP-F16 SSM/I CLW products. Results showed that the RMSE of FY-3C CLWs is 0.028 mm and FY-3D is 0.025 mm. As the RMSE of SSM/I CLWs is 0.025 mm according to the same method, the accuracy of FY-3 CLWs is comparable to that of the RSS operational products. We selected 15 days of FY-3 CLW orbital product data in March 2015 to compare with the GPM GMI orbital products from RSS under strict matching constraint. The comparison result shows that the two kinds of products are of good consistency, and the correlation coefficient reached 0.9061. The mean deviation and RMSE are 0.0075 ± 0.0325 mm.

The global distribution of FY-3 daily CLW was analyzed and compared with the distributions of clouds observed by SSM/I and FY-3D MERSI. According to the analysis, the cloud distribution observed by FY-3 is consistent with SSM/I and MERSI observations. FY-3 CLWs were more sensitive to thin clouds with smaller particles and less water content. The CLW values of thick clouds were slightly underestimated than SSM/I. FY-3 CLWs could depict the detailed structure of typhoons, including eye area, inner cloud wall, and outer spiral rain belt. At present, FY-3C/D CLW products are used in operations. The networking of morning and afternoon orbit satellites could achieve global coverage in one day.

Key words: remote sensing, FY-3 MWRI, cloud liquid water, radiative transfer, cloud model, statistical histogram, validation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41905034, 41475030)