

1 有云环境下卫星红外波段亮温资料直接同化的进展及挑战

3 丁伟钰¹

4 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州, 510640

6 Progresses and challenges of direct assimilation of cloud- 7 affected satellite infrared radiances

9 Ding Weiyu

10 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510640

13 **摘要:** 云与高影响天气有着密切的联系, 卫星红外波段提供了大量的云区的
14 观测信息, 然而云参数的初始误差以及云对辐射过程的非线性影响造成的观测算
15 子模拟误差偏大, 并且误差呈非高斯分布给云区卫星红外资料直接同化带来困难。
16 文章针对有云环境下卫星红外波段亮温资料直接同化的关键技术问题, 回顾和总
17 结了近二十年来国内外在同化方法、辐射传输模式、控制变量、背景误差、云检
18 测、观测误差设置、质量控制及偏差订正等方面的研究进展。已有成果表明卫星
19 资料直接同化的趋势是在晴空区同化技术基础上进一步补充云雨的信息, 完善相
20 应的技术, 从而实现“全天候”的卫星资料直接同化。文章指出云区卫星红外资料
21 直接同化在如何构造与云参数相关的控制变量及其背景误差、如何消除云对观测
22 和观测算子的非线性影响等方面面临挑战。随着观测技术、同化技术、模式技术
23 的共同发展, 卫星红外资料必然在数值预报领域发挥更大的作用。

¹ 收稿日期 2021-09-15; 网络预出版日期 2022-xx-xx

作者简介: 丁伟钰, 男, 1973 年出生, 硕士, 正高级高工, 从事资料同化工作。Email: wyding@gd121.cn

资助项目 广东省重点领域研发计划重点专项项目(2019B111101002), 广东省自然科学基金
(2022A1515011471)

Found by the Science and Technology Department of Guangdong Province with Grant of
2019B111101002, Guangdong Province natural sciences fund project (Grant 2022A1515011471)

24 关键词：有云环境；卫星红外波段亮温；同化

25 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21176

26

27 **Abstract:** Cloud is closely related to high impact weather. Satellite infrared
28 radiances data provides a lot of information in cloudy area. However, the
29 observation operator error caused by the initial cloud parameters errors and the
30 nonlinear influence of cloud on radiation process is too large, and the error
31 distribution is non Gaussian, which brings difficulties to the direct assimilation of
32 satellite infrared data in cloudy conditions. Aiming at the key technical problems
33 of direct assimilation of satellite infrared radiances data in cloudy conditions, this
34 paper reviews and summarizes the research progress of assimilation methods,
35 radiation transfer mode, control variables, background errors, cloud detection,
36 observation errors setting and bias correction at home and abroad in recent 20
37 years. The results show that the trend of direct assimilation of satellite radiance
38 data is to further supplement the cloud and rain information and improve the
39 corresponding technology based on clear sky radiance assimilation technology,
40 so as to realize the direct assimilation of satellite data under “all-weather”
41 conditions. It is pointed out that the direct assimilation of satellite infrared
42 radiances in cloudy conditions faces challenges in how to construct the control
43 variables related to cloud parameters and their background errors, and how to
44 eliminate the nonlinear influence of cloud on observation and observation
45 operators. With the common development of observation technology,
46 assimilation technology and model technology, satellite infrared radiances data

47 will inevitably play a greater role in the field of numerical weather prediction.

48 **Key Words:** cloudy condition; satellite infrared radiances; assimilation

49

50 1 引言

51 20 世纪 90 年代 Eyer 率先利用变分方法对星载大气垂直探测仪资料进行了
52 直接同化, 推动了数值预报的发展, 至今一些国家数值预报系统中使用的卫星资
53 料数量超过了资料总数的 90%, 据统计, 它们对同化的贡献超过了常规探空和地
54 面观测。尽管卫星资料同化取得了巨大的成就并对数值预报的改进做出了明显的
55 贡献, 然而目前可以被同化系统使用的卫星资料大约只占现有卫星观测资料的
56 5%, 其原因除了卫星资料本身的处理和质量控制以外, 大量云区的观测资料由于
57 无法准确描述云内的辐射传输过程而被剔除。据统计, 一个典型的极轨卫星红外
58 通道的视场 (FOV) 约有 75%的时间是有云覆盖的 (Wylie 等, 1999), 仅同化晴
59 空区的卫星亮温资料, 则浪费了大量关键的观测信息。正因为卫星资料包含了大
60 量云区的观测信息, 国内外的数值预报业务中心和研究机构都在从不同的方向开
61 展全天候卫星资料同化工作。卫星微波波段可以探测到云内的部分信息, 云内的
62 水物质的散射过程对资料同化有直接影响, 因此全天候的卫星微波通道资料同化
63 需要关注云和雨的影响。红外波段不能穿透云层, 云内的散射过程的影响可以忽
64 略, 全天候的卫星红外波段资料同化主要关注云的影响。目前卫星 (特别是静止
65 气象卫星) 携带大量的红外观测仪器, 例如我国的 FY4A 星首次在静止轨道上搭
66 载了红外高光谱干涉式大气垂直探测仪(GIIRS), 实现了对大气高时间分辨率、高
67 空间分辨率、高光谱分辨率的观测, 有望进一步提高数值预报的精度。

68 随着模式技术特别是模式物理过程参数化方案的发展、辐射传输模式对云区
69 模拟方案的完善, 全天候卫星亮温资料同化取得了越来越多的进展。Wu 等 (1992)

70 利用卫星观测的向外长波辐射与模拟的向外长波辐射之差构造了目标函数, 采用
71 变分方法极小化目标函数, 从而同化云区卫星资料。之后, Zupanski (1993)、
72 Zou 等 (1993)、Tsuyuki 等 (1996)、Zhu 等 (1999), Guo (2000) 对这个方案
73 进行进一步完善。Greenwald 等 (2002) 提出了全天候 (ALL SKY) 环境下卫星
74 辐射资料直接同化的思路, 并基于四维变分同化系统开展了同化试验。目前国内
75 外主要业务单位都基于各自的业务系统开展了全天候卫星资料直接同化。2005
76 年欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提出了 1D+4D 的同化方案, 用 1D Var 反
77 演云区的总云水汽量 (TCWV), 然后采用 4D Var 系统同化 TCWV (Bauer et al.,
78 2006a,b; Geer et al., 2008)。2009 年这个方案被 4D Var 直接同化云区亮温资料所
79 替代(Bauer et al., 2010; Geer et al., 2010)。2009 年 ECMWF 提出了完全云覆盖情
80 况下卫星红外资料直接同化方案, 批量试验表明该方案对改进预报有正效果
81 (McNally 等, 2009)。2009 年 ECMWF 实现了有云环境下微波资料的直接同化
82 业务应用(Bauer et al. 2010; Geer et al. 2010), 并陆续实现了包括微波成像仪
83 (Bauer et al., 2010; Kazumori et al., 2016; Lean et al., 2017)、微波湿度计 (Geer
84 et al.,2014; Chambon and Geer, 2017; Lawrence et al., 2018) 等资料的同化应用。
85 据统计, 全天候卫星资料在第 5 天的预报中仍然有 3%的影响(Geer et al. 2017))。
86 美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration,
87 NOAA) 利用航空例行天气报告和 GOES (Geostationary Operational
88 Environmental Satellite) 卫星反演三维云结构参数 (云水、云冰等), 通过变分方
89 法同化到模式中, 该方案在 RUC (Rapid Update Cycle) 系统中应用 (Benjamin
90 等, 2004b)。美国国家环境预报中心 (NCEP) 采用 GSI 系统增加了总水汽量作
91 为控制变量, 同化了海洋上没有降水的云区 AMSU-A 资料 (Zhu et al. 2016)。法

92 国气象局在其全球模式 (ARPEGE) 之中开展了有云环境下 AIRS (Atmospheric
93 Infrared Sounder) 资料同化 (Pangaud et al., 2009) 和 IASI (Infrared Atmospheric
94 Sounder Interferometer) 资料的直接同化工作 (Guidard et al.2011), 并且在对流
95 尺度模式 (AROME) 上开展了有云环境下 IASI 的同化试验 (Guidard et al.2011)。
96 日本气象局 (Okamoto 2013) Okamoto 提出了利用参数来描述云对亮温正演模拟
97 的作用, 该方案可以用于云区卫星资料的质量控制及误差分析。也开展了云区
98 卫星资料同化工作。国内在有云环境下卫星资料直接同化方面开展了相关的研究,
99 丁伟钰等 (2008, 2010b) 针对云区卫星直接同化的正演算子进行研究, 并基于
100 GRAPES-3DVAR 开展了云区 HIRS 资料 (2010a) 和 MODIS (2011) 资料同化的
101 研究工作。Yang 等 (2016) 采用 WRFDA 同化了全天候环境下 AMSR2 (Advanced
102 Microwave Scanning Radiometer 2) 资料, 改进了台风 Sandy 路径和海平面中心
103 气压的模拟。Li 等 (2021) 针对梅雨锋暴雨过程, 采用 WRFDA 同化全天候的风
104 云三号 C 星微波湿度计资料, 发现全天候的方案资料利用率比晴空环境提高 10%,
105 减小了约 0.5% 的湿度场预报误差, 对强降水的预报产生了正面影响。已有成果表
106 明直接同化云区的卫星亮温资料比间接同化反演资料更为有利, ECMWF 已经
107 在其业务系统中实现了云区微波资料的同化应用, 但是云区红外波段的卫星亮温
108 资料仍然没有在业务系统中实现同化应用。近二十年来, 云区卫星红外资料直接
109 同化在不同的技术方面取得了一定的进展, 但是大部分文献都只是针对其中某一
110 项技术进行了研究, 目前缺少文献对云区卫星红外资料直接同化的关键技术进行
111 归纳和总结。

112 目前卫星辐射资料直接同化通常采用变分方法或者集合同化方法, 而且通常
113 采用辐射传输模式作为观测算子, 辐射传输模式对云内辐射过程的模拟能力是云

114 区卫星资料同化的基础。由于云雨区的卫星辐射值正演模拟需要云量、云顶气压
115 以及云内水物质分布, 并且云内物理过程存在非常明显的非线性特征, 正演模拟
116 值常常与观测值相差甚远 (Geer 等 2011)。在全天候卫星资料直接同化方面, 不
117 同的研究工作在同化算子、卫星资料的质量控制、偏差订正等方面存在共性问题。
118 本文不对变分方法和集合同化方法本身进行讨论, 仅从辐射传输模式、云区资料
119 同化的策略、云参数的获取、质量控制、偏差订正、观测误差设置等方面讨论全
120 全天候卫星红外波段资料直接同化的进展及挑战。

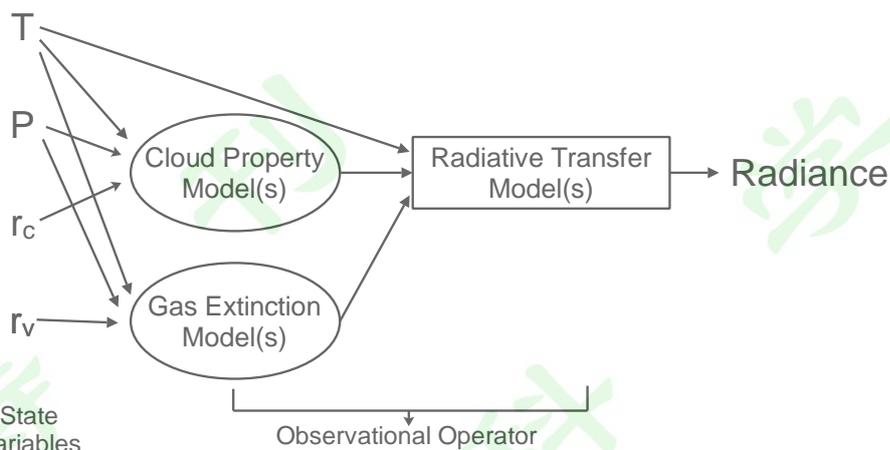
121

122 2 云区卫星资料直接同化方案

123 卫星资料一般通过直接同化或者间接同化的方式改进模式初值。晴空区的卫
124 星资料多采用直接同化的方式, 减少反演环节的误差, 已经成为各业务中心卫星
125 资料同化的趋势。由于辐射传输过程在云内有很强的非线性特征, 因此同化云区
126 的反演资料 (如总水汽量等), 可以避免云的非线性特征对辐射传输、质量控制、
127 偏差订正等技术的影响, 取得了一定的效果, 例如欧洲中心提出的 1D+4D 同化
128 方案。然而卫星反演数据会损失了部分卫星观测信息, 其反演过程有比较大的误
129 差, Geer 等(2008)分析了欧洲中心的 1D+4D 方案后认为直接同化云区观测信息
130 才是发展方向。针对云区的卫星亮温资料, 目前有不同的同化方案, 反映了对云
131 区辐射过程的不同处理思路。

132 第一种常见的方案是为辐射传输模式提供云参数分布, 基于辐射传输模式直
133 接模拟云区的亮温。Greenwald 等 (2002) 提出了利用辐射传输模式、气体消光
134 模式和云模式构造全天候条件下的辐射资料同化的观测算子, 由云模式来提供辐
135 射传输模式需要的云物理量信息, 通过四维变分同化系统, 对 GOES-9 亮温进行

136 同化，改进了陆地层状云系统的模拟。



137

138

图 1 全天候卫星亮温资料直接同化观测算子的构成 (Greenwald 等, 2002)

139

Figure 1. Composition of observational operator for direct assimilation of all-weather satellite brightness temperature data (Greenwald et al, 2002)

140

141

由于辐射传输模式对云区的模拟需要云内水物质等参数的分布, 因此这类方

142

法有不同的云参数提供方案。在辐射传输模式中基于单层云的假设, 只需要提供

143

云量和云顶气压给辐射传输模式即可模拟云区的红外波段亮温。法国气象局

144

(Pangaud et al., 2009) 采用二氧化碳薄片法反演云顶高度和等效云量提供给辐

145

射传输模式做云区的模拟, 同化了云区的 AIRS 资料。Lavanant 等 (2011) 比较

146

了该方案获得的云参数与 IASI 云产品, 发现在云顶气压方面有非常好的一致性。

147

Guidard 等 (2011) 在全球模式上采用该方案获得云顶气压和等效云量, 同化了

148

云区的 IASI 资料。Prates 等 (2014) 在同化云区 IASI 资料时发现采用两层云的

149

假设比单层云假设可以反演出更精细的云参数, 比单层云假设可以更好的同化云

150

区卫星资料。另外一种方案是采用模式模拟的云参数, 丁伟钰等 (2010a) 采用

151

模式模拟的云量和云顶高度作为常数提供给辐射传输模式, 同化了云区的 HIRS

152

资料。

153

第二种云区卫星资料直接同化方案是云清除 (cloud-clearing, 简称 CC) 方

154

案, 当云层高度和光学性质在水平方向上均匀时, 云清除方案可以获得在部分多

155 云区域的晴空部分观测到的辐射值 (Smith, 1968)。Smith 等 (2004) 使用传统
156 的单波段方法, 将中分辨率成像光谱辐射计 (MODIS) 的红外晴空区辐射和 AIRS
157 云区辐射结合起来进行云清除。由于该方法不需要模拟云, 因此在处理云区辐射
158 亮温时计算效率高。Li Jun (2005) 采用 CC 方法利用附加信息计算部分多云区
159 域的等效晴空辐射, 从而从部分多云区域中提取晴空区域。定义 R_v^{CC} 为云清除以
160 后的辐射值:

$$161 \quad R_v^{CC} = \frac{R_v^1 - R_v^2 N^*}{1 - N^*} \quad (1)$$

162 其中 R_v^1 和 R_v^2 是相临区域的辐射值, N^* 是这两个相邻区域的有效云覆盖比,
163 定义如下:

$$164 \quad N^* = \frac{R_v^1 - R_v^{clr}}{R_v^2 - R_v^{clr}} \quad (2)$$

165 其中 R_v^{clr} 是这两个相邻区域的 v 波段晴空辐射值的平均值。根据公式可知当
166 N^* 等于 0 的时候, 该方法对应的是晴空条件, 并且 N^* 不能等于 1, 因此该方法虽
167 然不用计算云区的辐射值, 但是只适合晴空及部分有云的情况。Wang 等 (2015,
168 2017, 2019) 在区域模式中采用云清除方法同化了有云影响的卫星红外辐射资料,
169 并针对热带气旋系统进行了分析, 研究发现, 这种方案可以将部分有云区域的卫
170 星资料同化应用, 增加了被同化的卫星资料数量, 对台风的路径预报有改进, 同
171 时提高了温度、比湿以及风场的模拟效果。Reale 等 (2018) 在全球模式的同化
172 系统中, 对比了同化晴空区 AIRS 资料和云区经过云清除后的 AIRS 资料, 发现使
173 用后者对热带气旋路径模拟有明显改进。

174 以上两种同化方案针对云区的辐射过程提出了不同的解决思路。第一种方案
175 是在晴空区同化技术的基础上, 增加云的信息, 完善云区的观测算子, 实现“全
176 天候”的卫星资料直接同化。云区的观测信息同化进入模式以后, 将改进云区的

177 大气参数和云参数的模拟，使模式模拟与观测更接近。第二种方案是在特定云条
178 件下获得晴空辐射值，仍然“回归”到晴空区的同化技术，但是该方案不能适用于
179 完全云覆盖情况。这两种方案都采用了辐射传输模式作为观测算子，在同化技术
180 上有一定共性。本文第三部分将从具体关键技术方面，分析云区红外资料直接同
181 化面临的挑战及进展。

182

183 3 云区卫星资料直接同化的关键技术

184 3.1 辐射传输模式

185 因为卫星并没有直接观测到大气的温度、湿度以及云的特征，因此在数值预
186 报模式的资料同化中通常通过辐射传输模式，将数值模式中的气象参数与卫星辐
187 射值的观测建立联系，目前有两个主要的辐射传输模式：一个是 RTTOV (Radiative
188 Transfer model for TOVS)，由 John Eyre 于 1990's 年代创建，目前在欧洲中期天
189 气预报中心、英国气象局、日本气象局、中国气象局、德国气象局、法国气象局
190 等业务部门的模式中使用。另一个是 CRTM (Community Radiative Transfer
191 Model)，由 Larry M. McMillin 和 Henry E. Fleming 于 1970's 年代创建，目前在
192 美国 NCEP 业务部门使用。也有少量研究是基于其他的辐射传输模式，如
193 SHDOMPPDA (Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method Plane Parallel for
194 Data Assimilation) (Evans 2007, Polkinghorne 等 2011)。SARTA (Stand-Alone
195 AIRS Radiative Transfer Algorithm, Strow et al. 2003, Carrier 等 2007)。卫星遥
196 感包含了主动遥感和被动遥感两大类，主动遥感设备能够主动发射遥感信号，接
197 收反射回的遥感信息，例如合成孔径雷达。被动遥感设备接收地球表面和/或大
198 气发射（或者反射太阳辐射）的辐射信息，目前大部分气象卫星上的仪器都是被

199 动遥感设备。资料同化系统采用的辐射传输模式适用于可见光、红外、微波等波
200 段的被动遥感的卫星辐射计、光谱仪和干涉仪的模拟。

201 辐射传输方程可以总结为：

$$202 \quad L(\nu, \theta) = \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) d\tau + (\text{surface emission}) + (\text{surface reflection}) + \\ 203 \quad (\text{surface scattering}) + (\text{cloud/rain contribution}) \quad (3)$$

204 其中晴空区到达大气层顶辐射值 $L_{clr}(\nu, \theta)$ 如公式 4 所示

$$205 \quad L_{clr}(\nu, \theta) = \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) d\tau + \tau_s(\nu, \theta)\varepsilon_s(\nu, \theta)B(\nu, T_s) + [1 - \\ 206 \quad \varepsilon_s(\nu, \theta)]\tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 \frac{B(\nu, \theta)}{\tau^2} \varepsilon_s(\nu, \theta) d\tau \quad (4)$$

207 其中 τ_s 为从黑体表面向太空的透射率， ε_s 为黑体表面的发射率， $B(\nu, T)$ 为频
208 率 ν ，温度 T 的普朗克函数。方程右边第一项为大气向上发射，第二项与黑体表
209 面发射有关，第三项为向下的大气发射被黑体表面反射。该公式对于卫星红外及
210 微波通道都适用。

211 对于云区，红外通道和微波通道有不同的处理方法。在红外波段，基于单层
212 黑体云的假设并且不考虑散射，卫星接收到的频率 ν ，天顶角 θ 的辐射值 $L(\nu, \theta)$ 可
213 以表示为：

$$214 \quad L(\nu, \theta) = (1 - N)L_{clr}(\nu, \theta) + NL_{cld}(\nu, \theta) \quad (5)$$

215 其中 $L_{clr}(\nu, \theta)$ 为晴空区大气向上辐射值， $L_{cld}(\nu, \theta)$ 为完全云覆盖区域云顶大
216 气向上辐射值， N 为云量。假设单层云并且云顶的发射率为 1， $L_{cld}(\nu, \theta)$ 可以表
217 示为：

$$218 \quad L_{cld}(\nu, \theta) = \tau_{cld}(\nu, \theta)B(\nu, T_{cld}) + \int_{\tau_{cld}}^1 B(\nu, T) dt \quad (6)$$

219 其中 τ_{cld} 是云顶以上的透射率， T_{cld} 是云顶温度。目前辐射传输模式也可以针
220 对多层云进行模拟，并且考虑云的散射作用。

221 对于微波波段需要考虑云和降水的散射作用, 并且采用和红外波段不同的计
222 算方案。例如 RTTOV 辐射传输模式的微波通道针对云水、雨水、冰、雪等水物
223 质计算, 并采用的球形水云粒子和冰云粒子近似。目前 RTTOV 和 CTRM 的散射
224 计算模块都需要提供云内水物质分布数据。

225 经历三十多年的发展, 辐射传输模式已经成为卫星资料直接同化的关键组成
226 部分。辐射传输模式中的光谱数据库在不断更新和扩展, 使得大量新的观测仪器
227 可以被同化到模式之中。辐射传输模式更新了光谱数据建模方案, 如: RTTOV 模
228 式 1999 年的版本只是用到了 32 个探空的 40 层数据 (Chevallier et al., 2000),
229 目前用的是 83 个廓线的 101 或 54 层数据 (Matricardi, 2008)。越来越多的参数
230 化方案加入到辐射传输模式系统中, 如新的吸收气体光学厚度参数化方案
231 (Hocking, 2021) 可以更好的适用于太阳辐射和静止卫星仪器的模拟, 云的
232 光学特征参数化的改进 (Baran 等, 2014) 提高了云区辐射传输过程的模拟能力。
233 这些改进有利于云区红外资料的直接同化。

234 从辐射传输模式的模拟过程可以发现, 云内的吸收、散射和反射过程十分复
235 杂, 观测算子存在明显的非线性特征, 目前的计算过程是基于一定的假设条件并
236 且做了参数化处理。云区的红外和微波通道的正演模拟误差比较大。如果选择晴
237 空区, 并且挑选地面影响较小的通道或者只同化海洋区域的卫星资料同化 (海洋
238 表面的反射率比较均一), 可以降低辐射传输过程的模拟难度, 提高其模拟精度。
239 全球模式业务系统中卫星辐射资料的直接同化就是采用的这些策略, 明显提高了
240 数值模式的预报效果, 卫星资料成为数值天气预报系统中最重要的观测资料。目
241 前国内外数值预报业务系统大多只同化了晴空区的卫星辐射资料。云区卫星同化
242 通道资料同化需要考虑云的非线性影响, 并考虑云的信息与模式其他控制变量之

243 间的协调关系，这使得云区卫星红外通道资料同化面临巨大的挑战。随着辐射传
244 输模式技术的发展，云区辐射传输过程的模拟能力逐步提高，云区卫星红外亮温
245 资料的同化取得了一定的进展。

246

247 3.2 控制变量与背景误差

248 卫星亮温资料同化的一个关键点是如何将卫星亮温资料的变化与模式控制
249 变量的变化建立联系。在集合同化系统中可以通过集合协方差，在变分同化系统
250 一般通过观测算子的切线性算子及其伴随算子。数值模式中云的预报是温度、湿
251 度、风等其他变量驱动的，云区卫星亮温资料同化重点是调整模式的控制变量，
252 虽然在同化系统中增加云或者云中水物质作为控制变量并不是必须的，但是同化
253 系统中增加与云雨相关的控制变量是比较常用的方法。Geer 等 (2019) 在同化
254 IASI 资料时没有增加控制变量。McNally 等 (2009) 在同化完全云覆盖区域的 IASI
255 资料时增加云顶气压和云量作为同化系统的控制变量，其中云顶气压的背景误差
256 设置为 5hPa，云量误差设置了一个非常小的值。英国气象局的同化系统中控制
257 变量总水汽量包含了云水、云冰，由一个增量算子对其中的每个部分进行分配
258 (Migliorini 等, 2018)。Okamoto 等 (2018) 采用 LETKF 集合同化系统同化云
259 区葵花 8 资料，控制变量中包括了水汽、云水、雨水、云冰和霰。丁伟钰等(2010a)
260 在使用 grapes-3dvar 同化云区 HIRS 资料时将云中水物质作为状态变量加入到辐
261 射传输模式，没有在同化系统中增加控制变量，在同化云区的 MODIS 资料 (丁
262 伟钰等 2010b, 丁伟钰等 2011) 时，在 grapes-3dvar 中增加了云水含量、云冰
263 和云量作为控制变量，尽管云参数的调整量不会引入到数值模式初值之中，但是
264 这种方案调整的温度和湿度更加合理。云区卫星资料直接同化增加的云参数作为

265 控制变量，这些变量一般是非高斯分布，sun 等（2021）提出了一个适用于水凝
266 物变量的高斯转换方法，转换的变量更接近高斯分布，为水凝物作为控制变量提
267 供了一种途径。

268 变分方法中背景误差协方差是通过模型化的假设进行简化的，由于云区物理
269 过程存在很强的非线性性，因此云区变量背景误差协方差的构建与晴空区有较大
270 差别。Auligné 等（2011）强调需要非均匀背景误差建模来表示背景误差矩阵的
271 空间变异性，可以使用统计回归（Derber 和 Bouttier, 1999; Berre 2000）或使
272 用更复杂的非线性平衡关系（Pagé 等, 2007）。Meng 等（2021）根据卫星云指
273 数产品自适应调整 B 矩阵中云区水物质变量，这种云依赖的 B 矩阵构造方案有
274 助于改进云区卫星亮温资料同化。

275

276 3.3 云检测

277 传统的云检测方案主要是用于晴空区的卫星资料同化。为了剔除云区的影响，
278 需要针对卫星资料开展光谱差值检查、时间和空间变化性检查，来挑选出没有受
279 到云影响的区域。对于全天候卫星资料直接同化需要提供辐射传输模式需要的云
280 参数，因此不需要进行云检测。例如 ECMWF（McNally 等 2009）、NOAA
281 （Polkinghorne 等 2011），日本气象局（Okamoto 等 2017）等机构在研究云区
282 卫星亮温资料同化时，都没有进行云检测。

283 目前卫星资料同化方案中，有一类云检测方法并不是完全剔除卫星视场
284 （FOV）中的云，而是根据某些卫星传感器的观测波段对一定高度以上的云并不
285 敏感这个规律，挑选出这些数据进行同化，可以在一定程度上同化视场有云的区
286 域中的卫星亮温资料。McNally（2003）提出了基于红外高光谱资料来挑选不受

287 云影响的观测通道 (clear channels) 的方法: 假定模式层存在黑体的单层云, 依
288 次计算每一层大气云顶以上的辐射率与晴空总辐射率之间的偏差占晴空总辐射
289 率的比例, 获得比值大于 0.01 的气压层 (如公式 3) 为云敏感高度, 卫星权重函
290 数与大气状态有关, 所有的通道都依赖大气状态, 将这些通道的云敏感高度进行
291 排序并滤波处理以避免大气背景场误差混淆云信号, 计算这些通道之间云敏感高
292 度变化的梯度, 第一次梯度变化最显著的通道即为不受云影响的最低通道。排序
293 在此高度以上的通道为晴空通道, 排序在此高度以下的通道为有云通道

$$294 \quad \frac{|R_{clear} - R_{cloudy}|}{R_{clear}} > 0.01 \quad (7)$$

295 Carrier 等 (2007) 将云顶气压和卫星观测通道的权重函数相结合, 来挑选权
296 重函数的主要贡献来自云顶以上的观测通道, 这些通道没有受云的影响。余意等
297 (2017) 采用 McNally (2003) 提出的云检测方法, 在台风“红霞”和“莫兰蒂”的模
298 拟中同化了 IASI 资料, 结果表明, 有效的云检测能提高 IASI 资料同化分析场的
299 准确性, 并有利于改进台风的预报技巧。

300 Li 等 (2020) 在 GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 同化系统中使用 clear
301 channels 的云检测方法, 发现该方法无法检测出云团边缘的薄云, 因此在这个方
302 案的基础上增加葵花 8 卫星 AHI (Advanced Himawari Imager) 云掩膜 (Cloud
303 Mask) 资料来挑选晴空区和剔除高层云。采用这种两次云检测 (double cloud
304 detection, 简称 DCD) 方法比仅用 clear channels 方法有改进。

305

306 3.4 观测误差

307 云区卫星资料的观测误差包括了卫星资料对于云区的观测误差、观测算子误
308 差以及代表性误差。云区卫星资料的观测误差计算模型通常和云参数有关。Geer

309 和 Bauer (2001) 提出云区卫星亮温资料观测误差的设置应该遵循“对称”原则，
310 即同时考虑观测和模拟的云的效应，避免因为单一依靠卫星观测或者模式模拟而
311 产生的采样误差。Okamoto 等 (2014) 在葵花 8 卫星资料同化中，提出了一个
312 新参量 C_A (cloud effect average)

$$313 \quad C_A = \frac{|B-B_{clr}|+|O-B_{clr}|}{2} \quad (8)$$

314 C_A 反映的是观测亮温、全天候模拟亮温与晴空模拟亮温之间的偏差。根据 C_A
315 参数建立线性模型来获得云区的观测误差，为避免观测误差在空间上的相关性，
316 将计算的观测误差再扩大 2 倍以上，云区的观测误差 (>10K) 远大于晴空区(1-
317 2K)。Geer 等 (2019) 在同化 IASI 资料时，观测误差的设置同样采用了对称误差
318 模型并适当扩大，晴空区的观测误差设置为 1.5K-1.9K，完全云区设置为 10K-22K。
319 Stengel 等 (2013) 同化云区 SEVIRI 资料时，根据云量和云高为卫星观测误差设
320 置了常数值。

321

322 3.5 质量控制

323 为了保证卫星资料同化效率，需要对卫星资料进行质量控制，用以保证卫星
324 观测资料的质量以及观测算子可以较好的模拟出该亮温值。晴空区一般采用卫星
325 资料观测与背景场之差 (observation-minus-background，简称 OMB)、剔除近
326 地通道非海洋下垫面的资料、根据地形调整粗检测 (gross check) 阈值、稀疏化
327 或者超级观测等方法进行质量控制。这些质控技术同样适用于云区卫星资料直接
328 同化，同时云区卫星资料同化更注重云的影响。Bauer 等 (2010) 在同化全天候
329 卫星资料时采用的是阈值剔除的方法，只是针对云雨区增大了观测误差，从而增
330 大了质量控制的阈值，使部分云雨区的资料不被剔除，由于增大了观测误差，这

331 部分资料在同化系统的影响也变小了。由于难以获得云的准确观测值（如云量、
332 云高及云内水物质分布等），Okamoto 等（2014）根据公式（8）中的 C_A 作为阈
333 值，当 $|O - B|$ 的值大于一定倍数的 C_A ，这些观测将被剔除。Okamoto 等（2017）
334 针对葵花 8 卫星的 AHI（Advanced Himawari Imager）仪器，分析了观测的亮温值
335 与 RTTOV 正演模拟值之差的分布特征，研究发现模拟亮温很少低于 230K，对云
336 越是敏感的通道，其观测亮温与模拟亮温之差越大。因此提出了以下云区亮温资
337 料的质控方案：（1）剔除掉无法模拟的亮温低值部分（亮温小于 230K 的观测值），
338 （2）剔除掉观测亮温与模拟亮温之差的大值部分（ $|O - B| > 1.8C_A$ ）。Okamoto
339 等（2019）采用 LETKF 同化方法及以上质控方案，同化了葵花 8 卫星红外辐射资
340 料，比较了只同化晴空区的亮温和同时同化晴空区和云区的亮温的影响，发现同
341 化云区的观测资料后对初始场有更好的改进，由于全天候情况下卫星资料同化相
342 比晴空有更好的资料覆盖，因此对降水等极端天气的模拟有更稳定的改进。
343 Polkinghorne 等在同化 GOES 红外资料的过程中使用了云模式模拟云分类，只有
344 当模拟的云分类与观测的云分类一致，并且模拟亮温与观测亮温之差在一定阈值
345 范围内的资料才同化到初始场中。

346 除了阈值剔除方法之外，Geer 等（2019）在同化 IASI 资料式采用变分质量
347 控制（VarQC）的方法，VarQC 对每个观测资料都设置了权重，在目标函数极小
348 化过程中根据每个资料与附近资料的一致性来调整权重。

349

350 3.6 偏差订正

351 在资料同化过程中一般假设背景场误差和观测的偏差服从正态分布，但是由
352 于同化方法、观测算子、模式系统、观测资料等原因，所有同化系统都受到偏差

353 的影响 (Dee 2005)。实际上, 背景场和观测资料的误差是系统性的, 背景误差
354 的产生是由于数值模式在物理过程、分辨率等多方面的不足导致的, 卫星观测误
355 差包含了与仪器相关的偏差, 观测算子(辐射传输模式)的计算偏差, 这些偏差
356 是无法用随机噪声来表示。因此卫星资料同化能否对数值预报产生正影响, 偏差
357 订正是必不可少的环节。刘志权等(2007)认为卫星资料偏差订正的首要任务是
358 订正卫星辐射数据与数值模式之间的相对偏差。晴空卫星辐射资料的偏差订正通
359 常根据数值模式进行调整, 假设后者提供相对无偏的温度和湿度场。极轨卫星通
360 常采用的扫描角偏差订正和气团偏差订正。经过偏差订正之后, 晴空区的卫星资
361 料观测与背景场之差接近正态分布, 然而在有云和降水的情况下, 它们可能具有
362 显著的非高斯误差特征(Bocquet et al. 2010; Okamoto et al. 2014; Okamoto 2017;
363 Harnisch et al. 2016; Otkin et al. 2018)。

364 通常有两种偏差订正的方法: 静态方法和动态方法。这两种方案通常采用线
365 性预测模型, 该模型包含从模式变量和卫星状态参数导出的预测因子。预测值由
366 称为偏差系数的回归系数加权。而静态方法在所有连续分析中使用固定的偏差系
367 数, 因此无法跟踪偏差变化 (Eyre 1992; Harris 和 Kelly, 2001), 动态偏差订正
368 (如变分偏差校正, VarBC) 方案与同化系统内的模式状态一起更新偏差系数
369 (Dee 2005 Dee, 2004; Auligne' et al., 2007)。具体公式如下所示:

$$370 \quad \tilde{H}(x, \beta) = H(x) + \beta_0 + \sum_{i=1}^{N_p} \beta_i p_i \quad (9)$$

371 其中 $\tilde{H}(x, \beta)$ 是为偏差订正后的观测算子, $H(x)$ 是辐射传输模式, x 是背景场
372 状态变量, β_0 是偏差的常数项, p_i 和 β_i 是和第 i 个预报因子及其系数, N_p 是预报
373 因子的个数。已经有大量研究将动态偏差订正技术应用于集合同化系统, 如 Fertig
374 等 (2009) 在 EnKF 系统中采用自适应偏差订正方法, 使用偏差系数集合与状态

375 向量一起分析偏差系数。技术动态偏差订正技术在 ECMWF、NCEP、JMA 等单位
376 的业务模式中应用。云区的卫星资料偏差订正需要建立与云参数有关的预测因子，
377 由于无法获得无偏的云参数信息，因此 ECMWF 在开展云区卫星资料同化中并没有
378 有进行偏差订正（例如 McNally 等 2009，Bauer 等 2010）。Okamoto 等（2019）
379 在同化葵花 8 资料时发现不做偏差订正的模拟效果反而优于采用 VarBC 进行偏
380 差订正后的效果。

381 针对云区卫星资料与背景场模拟之间的偏差存在很强的非线性的问题，
382 Otkin 等（2018）提出了一种非线性偏差订正方法，将卫星观测与背景场模拟值
383 之差进行泰勒级数展开，第 0 阶和第 1 阶近似可以看作是偏差的常数项和线性
384 项，2 阶以上的近似认为是非线性项。针对 SEVIRI 卫星资料的研究发现，采用高
385 阶泰勒级数项时，对云顶高度敏感的变量是有效的预测因子，该方法能够有效地
386 消除全天候卫星红外观测的偏差。Otkin 等（2019）在区域集合同化系统中同化
387 了全天候的 SEVIRI 资料，由于对云顶高度敏感的预测因子能够有效去除背景场
388 高层云带来的亮温偏差，因此水汽、云、风速还有温度的预报有改进。

389

390 4 讨论与结论

391 高影响天气与云密切相关，卫星提供了大量云区的观测信息。直接同化卫星
392 资料可以避免反演带来的误差，是目前卫星资料同化的发展方向，但是直接同化
393 有云环境下的卫星亮温资料面临巨大的挑战。表 1 给出了本文总结的卫星红外资
394 料在晴空区和云区同化的关键技术，晴空区的直接同化类似于做“减法”：通过云
395 检测和质量控制技术，剔除受到云或复杂地表等非线性过程影响的数据或通道。
396 而云区的同化需要考虑云参数与控制变量的关系以及云的非线性作用，其中包括：

397 如何建立同化方案将云区的亮温观测与模式的控制变量联系起来, 如何选取与云
 398 有关的控制变量、构造控制变量之间的背景误差协方差、如何考虑云对观测和观
 399 测算子的非线性影响, 如何进行质量控制和偏差订正等。从已有的研究成果来看,
 400 云区卫星资料直接同化的难点在于云参数的初始误差以及云对辐射过程的非线
 401 性影响造成的观测算子模拟误差偏大, 并且误差呈非高斯分布。这为质量控制、
 402 偏差订正、背景误差协方差的构造带来困难。

403
 404 表 1 卫星红外资料直接同化的关键技术

405 Table 1 Key technologies of direct assimilation of satellite infrared data

关键技术	晴空区	云区
辐射传输模式	考虑大气和地表面的作用	云吸收、反射等过程的非线性作用
控制变量	模式状态变量, 一般是温度和水汽	考虑控制变量与云中水物质的关联, 或者增加与云雨相关的控制变量
背景误差	各向同性的模型化假设	非均匀背景误差建模
云检测	严格的云检测	提供详细的云参数
观测误差	考虑观测误差、观测算子误差及代表性误差	除了晴空区的误差之外, 还需考虑观测的云与背景场的云不一致造成的采样误差
质量控制	OMB、剔除近地通道非海洋下垫面的资料、根据地形调整粗检测阈值、稀疏化或者超级观测等	除了晴空区的技术方案以外, 还需考虑云对观测算子的影响
偏差订正	扫描角订正、气团订正等方案	除了晴空区的技术方案以外, 还需考虑云雨情况下偏差的非线性特征

406

407 尽管云区辐射过程的非线性特征给云区红外资料直接同化带来困难, 但是针

408 对云区卫星资料同化的各项关键技术仍取得令人瞩目的进展。主要包括如下几个
409 方面：

410 (1) 建立了构建“全天候”观测算子的同化思路，在观测算子中补充云的信
411 息，提高正演算子在云区的模拟能力。此外，“云清除”可以获得部分云覆盖区
412 域中的晴空信息，这部分资料是对完全晴空区的补充。这两种方案都是以辐射
413 传输模式作为观测算子，表明卫星资料直接同化的趋势是在晴空区同化技术基
414 础上进一步补充云雨的信息，从而完成“全天候”的卫星资料直接同化。

415 (2) 云区的卫星资料同化通常在同化系统控制变量中增加云参数，并考虑
416 云参数与其他控制变量之间的关系。针对背景误差协方差中云区和晴空区的非均
417 匀性问题，提出了使用统计回归或使用更复杂的非线性平衡关系来构建背景误差
418 协方差。控制变量以及背景误差协方差的改进趋势表明：云区卫星资料同化将把
419 云中水物质等参数与模式温度、水汽等变量联系起来，目前这部分工作的进展并
420 不多，这也是云区卫星资料直接同化需要进一步完善之处。

421 (3) 在卫星资料观测误差设置以及质量控制等方面，形成了在“对称误差”模
422 型的基础上再适度膨胀的经验算法来构造观测误差，采用阈值控制的方法来剔除
423 背景场模拟值偏差较大的观测，或者 VarQC 来动态调整观测误差的比重的方案。
424 这表明在观测误差设置和质控方面需要考虑云的误差带来的影响。

425 (4) 偏差订正在卫星资料直接同化过程中有着非常重要的作用，但是将晴
426 空区常用的偏差订正方法应用到云区，其效果并不理想。云区需要综合考虑观测
427 和模拟偏差的非高斯分布特征，另外 VarBC 的方法也有应用前景。

428 云区卫星红外资料直接同化是非常复杂的系统工程，目前的研究进展来看，
429 大部分研究成果仍然基于辐射传输模式，着力于提高云区辐射传输过程的模拟能

430 力, 并且在控制变量、背景误差、云检测、观测误差设置、质量控制及偏差订正
431 等方面开展更多的工作来克服云区辐射过程的非线性特征带来的影响。云区辐射
432 过程的非线性特征给云区卫星资料直接同化带来困难, 同时数值预报模式需要同
433 化云区的卫星资料来改进高影响天气的模拟, 虽然这看似难以解决的矛盾, 但是
434 随着观测技术、同化技术、模式技术的整体发展, 越来越多的稠密观测信息同化
435 到模式初值中, 数值模式能够提供更加准确、精细的云的背景场信息, 观测与背
436 景场之差逐步减小, 将进一步推动云区卫星资料的直接同化。

437

438 参考文献

439 Anderson E , Jrvinen H . 1999. Variational quality control[J]. Quarterly Journal of the
440 Royal Meteorological Society, 125(554). 697-722. DOI: 10.1002/qj.49712555416

441 Auligné, T., Lorenc, A., Michel, Y., Montmerle, T., Jones, A., Hu, M., & Dudhia, J. 2011.
442 Toward a New Cloud Analysis and Prediction System [J]. Bulletin of the American
443 Meteorological Society, 92(2), 207-210. DOI:10.1175/2010BAMS2978.1

444 Baran, A. J., Cotton, R., Furtado, K., Havemann, S., Labonnote, L.-C., Marengo, F., Smith,
445 A., and Thelen, J.-C. 2014. A self-consistent scattering model for cirrus. II: The high and low
446 frequencies [J]. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 140, 1039-1057 DOI:10.1002/qj.2193,

447 Bauer, P., et al., 2010. Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part I:
448 Implementation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136(652): p. 1868-
449 1885. DOI: 10.1002/qj.659

450 Berre, L., 2000: Estimation of synoptic and mesoscale forecast error covariances in a
451 limited-area model [J]. Mon. Wea. Rev., 128, 644-667. DOI:10.1175/1520-
452 0493(2000)128<0644:EOSAMF>2.0.CO;2

453 Bocquet, M., C. A. Pires, and L. Wu, 2010: Beyond Gaussian statistical modelling in
454 geophysical data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 138, 2997-3023. DOI:
455 0.1175/2010MWR3164.1

456 Carrier, M., X. Zou and W.M. 2007. Lapenta, Identifying Cloud-Uncontaminated AIRS
457 Spectra from Cloudy FOV Based on Cloud-Top Pressure and Weighting Functions [J]. Monthly
458 Weather Review, 135(6): p. 2278-2294. DOI: 10.1175/MWR3384.1

459 Chevallier, F., Chédin, A., Chéruy, F., and Morcrette, J. J. 2000. TIGR-like atmospheric
460 profile databases for accurate flux computation [J]. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 777-785. DOI:
461 10.1002/qj.49712656319

462 Dee, D.P., 2005. Bias and data assimilation [J]. Quarterly Journal of the Royal
463 Meteorological Society, 131(613): p. 3323-3343. DOI: 10.1256/qj.05.137

464 DERBER, J. and F. BOUTTIER, 1999. A reformulation of the background error covariance
465 in the ECMWF global data assimilation system [J]. Tellus A, 51(2): p. 195-221. DOI:

466 10.3402/tellusa.v51i2.12316

467 丁伟钰, 万齐林, 陈子通等, 2010a. 有云条件下 HIRS/3 资料的同化及其对“珍珠”台风
468 的影响[J]. 气象学报, 68 (1): 70-78. Ding W Y, Wan Q L, Chen Z T, et al. 2010a. Assimilation
469 of HIRS/3 Brightness Temperature in Cloud Condition and Its Impact to CHANCHU Typhoon
470 [J]. Acta Meteorological Sinica. 68(1):70-78. DOI: 10.11676/qxxb2010.008

471 Ding W Y, Wan Q L, Zhang C Z, et al. 2010b. MODIS BRIGHTNESS TEMPERATURE DATA
472 ASSIMILATION UNDER CLOUDY CONDITIONS: METHODS AND IDEAL TESTS[J]. Journal of
473 Tropical Meteorology, 16(04):313-324. DOI:10.3969/j.issn.1006-8775.2010.04.002

474 Ding W Y, Wan Q L, Huang Y Y, et al. 2011. Modis brightness temperature data
475 assimilation under cloudy conditions II: impacts on rainstorm forecasting [J]. Journal of
476 Tropical Meteorology(3 期), 221-230. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8775.2011.03.004

477 Evans, K. F., 2007: SHDOMPPDA: A radiative transfer model for cloudy sky data
478 assimilation [J]. J. Atmos. Sci., 64, 3858-3868. DOI: 10.1175/2006JAS2047.1

479 Fertig, E., and Coauthors, 2009: Observation bias correction with an ensemble Kalman
480 filter [J]. Tellus, 61A, 210-226. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2008.00378.x

481 Guidard V, Fourrie N, Brousseau P, Rabier F. 2011. Impact of IASI assimilation at global
482 and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes [J]. Q. J. R.
483 Meteorol. Soc. 137: 1975-1987. DOI:10.1002/qj.928

484 Geer, A.J., P. Bauer and P. Lopez, 2008. Lessons learnt from the operational 1D + 4D-Var
485 assimilation of rain- and cloud-affected SSM/I observations at ECMWF [J]. Quarterly Journal
486 of the Royal Meteorological Society, 134(635): p. 1513-1525. DOI: 10.1002/qj.304

487 Geer, A.J. and P. Bauer, 2011. Observation errors in all-sky data assimilation [J]. Quarterly
488 Journal of the Royal Meteorological Society, 137(661): p. 2024-2037. DOI: 10.1002/qj.830

489 Geer, A. J., Migliorini, S., and Matricardi, M. 2019, All-sky assimilation of infrared
490 radiances sensitive to mid- and upper-tropospheric moisture and cloud [J]. Atmos. Meas.
491 Tech., (12) 4903-4929. DOI: 10.5194/amt-12-4903-2019

492 Harnisch, F., M. Weissmann, and A. Perianez, 2016: Error model for the assimilation of
493 cloud-affected infrared satellite observations in an ensemble data assimilation system [J].
494 Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 142, 1797-1808. DOI: 10.1002/qj.2776

495 Hocking, J., Vidot, J., Brunel, P., Roquet, P., Silveira, B., Turner, E., and Lupu, C. 2021. A
496 new gas absorption optical depth parameterisation for RTTOV version 13, Geosci [J]. Model
497 Dev., 14, 2899-2915, DOI:10.5194/gmd-14-2899-2021,

498 Lavanant L, Fourrie N, Gambacorta A, Grieco G, Heillette S, Hilton FI, Kim MJ, McNally
499 AP, Nishihata H, Pavelin EG, Rabier F. 2011. Comparison of cloud products within IASI
500 footprints for the assimilation of cloudy radiances [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc. 137:1988-2003,
501 DOI: 10.1002/qj.917.

502 Li, J., Liu, C. Y., Huang, H.-L., Schmit, T. J., Menzel, W. P., & Gurka, J. 2005. Optimal cloud-
503 clearing for AIRS radiances using MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote
504 Sensing, 43(6), 1266-1278. DOI: 10.1109/TGRS.2005.847795

505 Li, Y., Chen, K. & Xian, Z. 2021. Evaluation of All-Sky Assimilation of FY-3C/MWHS-2 on
506 Mei-yu Precipitation Forecasts over the Yangtze-Huaihe River Basin [J]. Adv. Atmos. Sci. 38,
507 1397-1414. DOI: 10.1007/s00376-021-0401-y

508 刘志权,张凤英,吴雪宝等. 2007. 区域极轨卫星 ATOVS 辐射偏差订正方法研究[J]. 气象
509 学报 65(1),113-123. Liu Z Q, Zhang F Y, Wu X B. 2007. A REGIONAL ATOVS RADIANCE-

510 BIAS CORRECTION SCHEME FOR REDIANCE ASSIMILATION [J]. Acta Meteorologica Sinica.
511 65(1): 113-123

512 Matricardi, M. . 2003. RTIASI-4: a new version of the ECMWF fast radiative transfer model
513 for the infrared atmospheric sounding interferometer. ECMWF, Technical Memorandum, 425,
514 63.

515 Meng, D., Chen, Y., Li, J., Wang, H., Wang, Y., & Sun, T. 2021. Cloud-dependent piecewise
516 assimilation based on a hydrometeor-included background error covariance and its impact
517 on regional Numerical Weather Prediction. Monthly Weather Review, 149(9):3155-3171,
518 DOI: 10.1175/MWR-D-20-0419.1

519 McNally, A.P. and P.D. Watts, 2003. A cloud detection algorithm for high-spectral-
520 resolution infrared sounders [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,
521 129(595): p. 3411-3423. DOI: 10.1256/qj.02.208

522 McNally, A.P., 2009. The direct assimilation of cloud-affected satellite infrared radiances
523 in the ECMWF 4D-Var [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 135(642): p.
524 1214-1229. DOI: 10.1002/qj.426

525 Migliorini, S., A.C. Lorenc and W. Bell, 2018. A moisture-incrementing operator for the
526 assimilation of humidity- and cloud-sensitive observations: formulation and preliminary
527 results [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144(711): p. 443. DOI:
528 10.1002/qj.3216

529 Okamoto, K., A.P. McNally and W. Bell, 2014. Progress towards the assimilation of all-sky
530 infrared radiances: an evaluation of cloud effects [J]. Quarterly Journal of the Royal
531 Meteorological Society, 140(682): p. 1603-1614. DOI: 10.1002/qj.2242

532 Okamoto, K., 2017. Evaluation of IR radiance simulation for all-sky assimilation of
533 Himawari-8/AHI in a mesoscale NWP system [J]. Quarterly Journal of the Royal
534 Meteorological Society, 143(704): p. 1517-1527. DOI: 10.1002/qj.3022

535 Otkin, J.A., R. Potthast and A.S. Lawless, 2018. Nonlinear Bias Correction for Satellite Data
536 Assimilation Using Taylor Series Polynomials [J]. Monthly Weather Review, 146(1): p. 263-
537 285. DOI: 10.1175/MWR-D-17-0171.1

538 Otkin, J.A. and R. Potthast, 2019. Assimilation of All-Sky SEVIRI Infrared Brightness
539 Temperatures in a Regional-Scale Ensemble Data Assimilation System [J]. Monthly Weather
540 Review, 147(12): p. 4481-4509. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0133.1

541 Pagé, C., Fillion, L., & Zwack, P. 2007. Diagnosing Summertime Mesoscale Vertical Motion:
542 Implications for Atmospheric Data Assimilation [J]. Monthly Weather Review, 135(6), 2076-
543 2094. DOI: 10.1175/MWR3371.1

544 Pangaud T, Fourrie N, Guidard V, Dahoui M, Rabier F. 2009. Assimilation of AIRS
545 radiances affected by mid to low level clouds [J]. Mon. Weather Rev. 137: 4276-4292.
546 DOI:10.1175/2009MWR3020.1.

547 Polkinghorne, R. and T. Vukicevic, 2011. Data Assimilation of Cloud-Affected Radiances
548 in a Cloud-Resolving Model [J]. Monthly Weather Review, 139(3): p. 755. DOI:
549 10.1175/2010MWR3360.1

550 Prates, C., et al., 2014. Assimilation of satellite infrared sounding measurements in the
551 presence of heterogeneous cloud fields [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological
552 Society, 140(683): p. 2062-2077.

553 Reale, O., McGrath-Spangler, E. L., McCarty, W., Holdaway, D., & Gelaro, R. 2018. Impact

554 of adaptively thinned AIRS cloud-cleared radiances on tropical cyclone representation in a
555 global data assimilation and forecast system [J]. *Weather and Forecasting*, 33, 909–931.
556 DOI:10.1175/WAF-D-17-0175.1

557 Smith, W.L., 1968: An improved method for calculating tropospheric temperature and
558 moisture from satellite radiometer measurements [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 96, 387–396. DOI:
559 [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096%3C0387:AIMFCT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096%3C0387:AIMFCT%3E2.0.CO;2)

560 Smith W. L., Zhou D. K., Huang H.-L., Li J., Liu X., and Larar A. M., 2004. Extraction of
561 profile information from cloud contaminated radiances, in *Proc. ECMWF Workshop on*
562 *Assimilation of High Spectral Resolution Sounders in NWP*, Jun. 28–Jul. 1, pp. 145–154.
563 <https://www.ecmwf.int/node/12340>

564 Strow, L. L., S. Hannon, S. D. Machado, H. Motteler, and D. Tobin, 2003: An overview of
565 the AIRS radiative transfer model [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41, 303–313. DOI:
566 10.1109/TGRS.2002.808244

567 Sun, T., Chen, Y., Meng, D. et al. 2021. Background Error Covariance Statistics of
568 Hydrometeor Control Variables Based on Gaussian Transform [J].*Adv. Atmos. Sci.* 38, 831–
569 844 DOI: 10.1007/s00376-021-0271-3

570 Wang, P., Li, J., Goldberg, M. D., Schmit, T. J., Lim, A. H. N., Li, Z., et al. (2015). Assimilation
571 of thermodynamic information from advanced infrared sounders under partially cloudy skies
572 for regional NWP [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 5469–5484.
573 DOI:10.1002/2014JD022976

574 Wang, P., et al., 2017. The Impact of Cross-track Infrared Sounder (CrIS) Cloud-Cleared
575 Radiances on Hurricane Joaquin (2015) and Matthew (2016) Forecasts [J]. *Journal of*
576 *Geophysical Research: Atmospheres*, 122(24): p. 13,201–13,218. DOI: 10.1002/2017JD027515

577 Wang, P., et al., 2019. Impacts of Observation Errors on Hurricane Forecasts When
578 Assimilating Hyperspectral Infrared Sounder Radiances in Partially Cloudy Skies [J]. *Journal of*
579 *Geophysical Research: Atmospheres*, 124(20): p. 10802. DOI: 10.1029/2019JD031029

580 Yang, C., Z. Q. Liu, J. Bresch, S. R. H. Rizvi, X. Y. Huang, and J. Z. Min, 2016: AMSR2 all-
581 sky radiance assimilation and its impact on the analysis and forecast of Hurricane Sandy with
582 a limited- area data assimilation system [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and*
583 *Oceanography*, 68(1), 30917. DOI: 10.3402/tellusa.v68.30917

584 余意,张卫民,曹小群等,2017,同化 IASI 资料对台风“红霞”和“莫兰蒂”预报的影响研究[J].
585 *热带气象学报*, 33(4):500-509. DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.04.007. Yu Y, Zhang W
586 M, Cao X Q. 2017. IMPACT OF DATA ASSIMILATION FOR THE IASI OBSERVATIONS ON THE
587 FORECAST OF TYOHOON HONGXIA AND MOLANDI [J]. *Journal of Tropical Meteorology*.
588 33(4):500-509

589 Zhu, Y., and Coauthors, 2016: All-sky microwave radiance assimilation in NCEP’s GSI
590 analysis system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 144,4709–4735, DOI: 10.1175/MWR-D-15-0445.1

591