

1 谢飞, 田文寿, 郑飞, 张健恺, 陆进鹏, 2021. 基于 DART+WACCM 搭建的平
2 流层同化、天气预报和气候预测模型研究[J]. 大气科学. XIE Fei, TIAN Wenshou,
3 ZHENG Fei, ZHANG Jiankai, LU Jinpeng, 2021. Stratospheric assimilation, weather
4 forecast and climate prediction model based on DART + WACCM[J]. Chinese Journal
5 of Atmospheric Sciences (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2104.21014.

6 7 基于 DART+WACCM 搭建的平流层同化、天气预报 8 和气候预测模型研究

9
10 谢飞¹, 田文寿², 郑飞³, 张健恺², 陆进鹏¹

11 1 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875

12 2 兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州, 730000

13 3 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

14 15 摘要

16 本论文基于 Whole Atmosphere Community Climate Model 模式最新版本
17 WACCM6 和 Data Assimilation Research TestBed (DART) 同化工具最新版本
18 Manhattan, 开发了中高层大气温度、臭氧和水汽卫星资料的同化接口, 搭建了一个包含完整平流层过程的数值同化、天气预报和短期气候预测模型(此后简称模型); 本模型对 2020 年 3~4 月平流层大气变化进行了同化观测资料的模拟, 并以同化试验输出的分析场作为初值, 对 5~6 月的平流层大气进行了 0~30 天天气尺度预报以及 31~60 天短期气候尺度预测的回报试验。结果表明: 本模型能较好地重现 2020 年 3、4 月北极平流层出现的大规模臭氧损耗事件随时间的演变特征, 模拟结果和 Microwave Limb Sounder (MLS) 卫星观测结果很接近; 而未进行同化的模拟试验, 虽然可以模拟出北极臭氧损耗现象, 但是模拟的臭氧损耗规模相比 MLS 卫星观测结果要低很多; 利用同化试验 4 月末输出的分析场作为初值, 预报的 5 月北极平流层臭氧变化与 MLS 卫星观测值的差值小于 0.5 ppmv, 预测的 6 月北极平流层臭氧变化只在 10~30 hPa 之间的区域, 与观测之间的差异达到了 1 ppmv。本模型不但改善了北极平流层化学成分变化的模拟, 也显著地提升

了北极平流层温度和环流的模拟。本模型同化模拟的 3~4 月、预报预测的 5~6 月北极平流层温度和纬向风变化与 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA2) 再分析资料结果具有很好的一致性, 仅在北极平流层顶部, 预报预测的温度和纬向风分别与再分析资料之间的均方根误差 (RMSE) 为~3 K 和~4m/s。未进行同化的试验模拟的 3~4 月、预报预测的 5~6 月北极平流层的温度和纬向风与 MERRA2 再分析资料之间的 RMSE 在大部分区域都达到 6 K 及 5 m/s 以上。从全球范围来看, 本模型对平流层中低层模拟性能改善最为显著, 其预报预测结果与观测值之间的差异, 比未进行同化试验的结果, 减少了 50%以上。

关键词 平流层 数值同化 天气预报 短期气候预测

Stratospheric assimilation, weather forecast and climate prediction model based on DART + WACCM

XIE Fei¹, TIAN Wenshou², ZHENG Fei³, ZHANG Jiankai², LU Jinpeng¹

1 College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875

2 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000

3 International Center for Climate and Environment Science, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029

Abstract

Based on the latest version of the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM6) and the Data Assimilation Research TestBed (DART), this paper develops an assimilation interface for temperature, ozone, and water vapor data in the middle and upper atmosphere, and builds an assimilation model with complete

1 stratospheric processes that includes Assimilation, Weather Forecasting and
2 Short-Term Climate Prediction System. The system performs assimilation simulations
3 of the stratospheric atmosphere in March-April 2020 and provides 0-3 days, 4-15 days
4 and 16-30 days forecast and 31-60 days short-term climate prediction for the
5 stratospheric atmosphere changes in May-June using the assimilation analysis field as
6 the initial value. The results show that the system can reflect the time evolution of the
7 very unusual ozone depletion event in the Arctic stratosphere in March and April 2020,
8 which is very close to the Microwave Limb Sounder (MLS) satellite observations;
9 while the simulations without assimilation can simulate the Arctic ozone depletion
10 event, the magnitude of ozone depletion is much smaller than that of the MLS satellite.
11 The assimilation model system not only improves the simulation of the chemical
12 composition of the Arctic stratosphere, but also provides better simulations of the
13 Arctic stratospheric temperature and circulation changes. The simulated March-April
14 and predicted May-June Arctic stratospheric temperature and latitudinal wind
15 variability are in good agreement with the results of Modern-Era Retrospective
16 Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA2) reanalysis with
17 assimilation. The RMSE between the simulated March-April and the predicted
18 May-June Arctic stratosphere temperature and wind and the MERRA2 reanalysis data
19 are ~ 3 K and ~ 4 m/s in most regions, respectively. On a global scale, this system has
20 the most significant improvement in the simulation of the middle and lower
21 stratosphere, with the RMSE in the prediction results reduced by more than 50%
22 compared to the prediction results of unassimilated simulation experiments.
23 Keywords Stratosphere, Assimilation, Weather forecasting, Short-term climate
24 prediction

25

26 1、引言

27 平流层位于大气 10~50 千米之间的高度层，属于临近空间的中低层部分。平
28 流层空气的垂直运动非常弱，大气演变过程比较缓慢，稳定度高，也几乎没有对
29 流层中的那些复杂且瞬变的天气现象。Baldwin and Dunkerton (2001) 通过对日

1 平均 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 再分析资料的分析证
2 实, 平流层中 10 hPa 以上的强位势高度异常会随着时间向下传输, 并在 15 天左
3 右传输到对流层中, 影响对流层的天气气候变化。近些年来, 国内一些学者的研
4 究甚至发现, 我国所在的东亚地区, 其气候变化也会受平流层极涡、热带平流层
5 过程的影响 (例如: 胡永云, 2006; Chen et al., 2011; 田文寿等, 2011; Ren et
6 al., 2014)。一方面, 由于平流层环流异常可以对对流层天气过程与气候变化造
7 成不可忽视的影响; 另一方面, 平流层是未来临近空间低动态飞行器活动的新区
8 域。研究平流层的环流、温度及与其相关的化学成分变化, 既能进一步理解对流
9 层气候变化, 也能为临近空间低动态飞行器飞行活动提供气象安全保障。因此,
10 平流层大气环流、温度变化及与其相关的化学成分变化已受到了国内外学者的广
11 泛关注 (例如: Yi et al., 2002; 吕达仁和陈洪滨, 2003; Zheng et al., 2004;
12 陈洪滨等, 2006; Li et al., 2007; Chen et al., 2008; 陈月娟等, 2009; 刘毅等,
13 2009; 卞建春等, 2011; Xu et al., 2015)。

14 平流层作为传统大气科学和空间科学研究的过渡地带, 前人主要集中在平流
15 层动力-物理-化学过程机制方面的研究, 而对平流层环流、温度和化学成分变化
16 的预报和短期气候预测方面的工作却非常少。在平流层大气的研究中, 一方
17 面, 平流层观测数据少、种类少、缺失值多, 而大气环流模式对平流层环流随时
18 间变化的模拟水平与观测资料之间还有一定差距。数值同化技术可能为平流层研
19 究产生更接近观测值的、更完整的数据集。另一方面, 由于平流层与对流层的相
20 互作用, 数值模式中平流层变化的预报预测效果可能会对对流层整个动力过程和
21 热力场的预报预测, 甚至对全球天气预报和短期气候预测结果都有极其重要的影
22 响。天气气候变化的预报预测技术的高低, 受数值模式本身包含的化学反应和物
23 理过程完整度、物理参数化方案优化程度、边界条件等影响; 另外, 预报预测数
24 值试验的初始场精度也是影响预报预测结果的一个重要条件。当下, 使用观测资
25 料进行数值同化就是估计数值模式初值这一问题的方法和手段。21 世纪以
26 来, 平流层大气探测和反演技术在不断的发展 (吕达仁和陈洪滨, 2003), 以往
27 同化对流层气象观测资料的技术正在向平流层大气延伸。

28 针对平流层大气资料数值同化技术, 近些年国内外的一些学者对此核心问题
29 开展了研究。比如, 国际上就有学者基于三维变分同化方法开发了中高层大气数
30 值同化技术。Jackson (2007) 通过英国气象局资料同化系统 (基于三维变分同

化方案)将Microwave Limb Sounder (MLS) 卫星的臭氧观测资料同化到了数值模式中。他们的研究中发现,对MLS观测资料同化后,模拟结果中平流层臭氧体积混合比的误差标准差和平均分析误差降低了。Pierce et al., (2007) 指出将太阳掩星臭氧体积浓度观测资料 (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III) 同化到模式中,能够显著提高Real-time Air Quality Modeling System (RAQMS) 模式中低平流层和上对流层的臭氧体积分浓度的模拟效果。肖存英等 (2017) 也使用三维变分同化方案,在模式中连续同化了全球10~96 km (临近空间) 高度范围内MLS卫星臭氧数据。此外,三维变分同化方法还被应用到了准两日振荡 (McCormack et al., 2009)、极地云 (Siskind et al., 2011) 和平流层爆发性增温事件 (Coy et al., 2009; Ren et al., 2011; Wang et al., 2011) 的研究中。四维变分资料同化,则是在三维变分资料同化的基础上,加入时间维度信息,把多个时刻的大气状态数据联系起来,找到数据之间的变化关系。通过四维变分方案,Errera et al. (2008) 在一个化学传输模式中,同化了臭氧体积分浓度观测资料。他们的研究发现同化臭氧浓度观测资料能够较好地提高模式中平流层臭氧洞结构变化的模拟效果。后来,Elbern et al. (2010) 通过结合流依赖模型与四维变分同化技术,研发出了The Synoptic Analysis of Chemical Constituents by Advanced Data Assimilation (SACADA) 系统。这是一种新型的中高层大气化学数值同化系统,此系统甚至可以同时同化观测的 O_3 、 N_2O 、 CH_4 、 HNO_3 、 NO_2 和水汽等资料。然而,使用三维变分或者四维变分方法进行数据同化也并非没有潜在的问题。特别是,由于错误的设定背景误差协方差,可能会导致出现虚假的相关关系 (Polavarapu et al., 2005)。

集合数据同化是可用于大气变化研究的另一种数据同化方法。集合数据同化会从集合成员中直接获得背景误差协方差,这样就不需要指定背景误差协方差,从而降低了由于指定背景误差协方差而产生的虚假相关性的可能性。因此,集合数据同化方法在大气模型数据同化中具有一定的潜在优势。由美国大气研究中心 (NCAR) 开发的 Data Assimilation Research TestBed (DART) 同化工具,采用的集合数据同化方法就是集合卡曼滤波方法。Pedatella et al. (2013) 利用 DART 研究了 WACCM 模式在同化观测资料以后,对中高层大气中的日变率模拟性能的改善。他们发现,在同化了来自辐射传感器和飞机的温度和风、卫星的风、低层大气的 Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate

1 (COSMIC) 折射率, 以及中高层大气的 Sounding of the Atmosphere using
2 Broadband Emission Radiometry (SABER) 温度观测资料后, 模拟的全球大气环
3 流与观测资料之间的均方根误差减少了 40%。他们指出, WACCM+DART 可以
4 重现中高层大气的日变化规律, 能够深入研究从地表到平流层的真实日变化特征。
5 随后, Pedatella et al. (2013) 利用 WACCM+DART 重现了 2009 年平流层爆发性
6 增温的时空演变过程。他们的研究中, 同化了中高层大气的 MLS 和 SABER 卫
7 星温度观测资料、COSMIC 掩星观测资料和低层大气的飞机、探空、卫星云轨迹
8 风等观测资料。对 2009 年 1 月平流层爆发性增温的模拟显示, 在升温过程中,
9 平流层的行星波活动显著增加, 这可能是由于行星 1 波和 2 波之间的非线性波流
10 相互作用所致。他们通过对全大气数据同化系统的模拟分析还发现, 对流层和平
11 流层之间的大尺度动态耦合过程, 对热层和电离层的变化具有提前数天的潜在预
12 报能力。Sassi et al. (2013) 同样使用 WACCM 加数据同化技术, 研究了 2009 年
13 1 月与 2 月之间发生的平流层大面积升温事件, 并成功地重现了事件发生后异常
14 环流持续数周的现象, 并重点研究了 200 公里 (低层热层) 以下大气环流的动态
15 响应。

16 在前人的研究中, 他们主要关心的是中高层大气同化技术的发展, 平流层天
17 气尺度预报和短期气候预测相关技术的研究涉及较少。而且他们使用的中高层大
18 气模式和数值同化工具版本相对较老, 有必要尝试使用最新版本的模式和同化工
19 具搭建的模型重新研究这些问题。国内平流层大气的数值同化研究起步较晚。基
20 于 WACCM+DART, 敬文琪等 (2019) 将 2016 年 2 月一次平流层爆发性增温 (SSW)
21 过程作为个例模拟进行了臭氧观测同化试验, 发现 WACCM+DART 臭氧分析场
22 能够较真实反映 SSW 期间北极上空平流层臭氧廓线随时间的演变特征。但是, 研
23 究过程中, 只同化了臭氧变量。特别是对于平流层大气预报和预测方面的技术还
24 没有受到国内科学家的足够重视。为了将我国在平流层同化、预报和预测领域的
25 研究推进到国际领先地位, 建立基于多源观测的平流层大气环境状况数据库, 开
26 发面向平流层大气高影响天气的专业模式和数值预报, 既能加强对平流层大气的
27 基础认识, 推动平流层大气探测技术的发展, 重新认识平流层大气中关键天气、
28 气候要素和化学成分在不同时间尺度上的空间分布特征以及平流层大气与对流
29 层的动力耦合机制, 又能解决国家国防活动重大需求, 为临近空间大气飞行器提
30 供气象环境安全保障。这个研究中, 我们基于 WACCM 最新的版本 WACCM6 大气

化学气候模式和DART最新版本DART_Manhattan同化工具搭建了一个具有多变量数值同化、0-30天天气尺度预报和30-60天短期气候预测能力的模型。为了检测模型的性能，研究中进行了同化、预报和预测3个方面的检测。以2020年3、4月北极平流层出现的大规模损耗（Hu, 2020; Witze, 2020）为主要研究个例，检测了同化中高层卫星资料后，模型对臭氧洞事件的重现能力。以2020年4月底的同化结果分析场为初值，对5、6月的平流层大气状态进行了回报试验，并对比了预报预测结果与其他再分析资料的差异。文章的结构如下：第2章详细介绍了同化、预报和预测模型，第3章利用本模型重现了2020年3、4月北极平流层臭氧大规模损耗事件，第4章分析了模型对北极平流层环流和温度的同化和预报、预测能力，第5章诊断了模型对全球平流层温度和环流模拟、预报和预测能力的改善，第6章为讨论和结论。

2、数据、模式与试验设计

(1) 数据

MERRA2 的温度场和纬向风再分析资料，用于同化效果的检验。MERRA2 是 MERRA 的第 2 版。其水平分辨率为 $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。MERRA2 的垂直分辨率在中上层平流层约为 2~4 km，在对流层上层和下层平流层约为 1~2 km，从 1000~0.1 hPa 共 72 层。

MLS 的臭氧体积浓度卫星观测资料，用于同化效果的检验。MLS 是搭载在由 NASA 于 2004 年 7 月 15 日发射升空的 Aura 卫星上的微波临边探测器。MLS 探测器临边探测廓线水平间隔约为 200~550 km，垂直分辨率为 2.5~5.5 km，空间覆盖范围为 $82^{\circ}\text{S} \sim 82^{\circ}\text{N}$ 。本研究采用的 MLS v4.2x 标准臭氧体积浓度产品是由 240 GHZ 的辐射值与 115GHZ 辐射值获取的大气温度产品反演得到的。根据 MLS v4.2x 2 级产品质量和描述文档（Livesey, 2015），261~0.02 hPa 范围之外的臭氧体积浓度资料不推荐用于科学研究用途，因此本研究只使用气压范围为 261~0.02 hPa 的臭氧体积浓度资料。

TIMED/SABER 臭氧、水汽体积浓度和温度卫星观测资料，用于中高层大气数值同化，SABER 是美国航天局 TIMED 卫星上的四个仪器之一。SABER 仪器的主要目标是为我们研究平流层、中间层和热层低层的能量、化学、动力学和传输的基本过程和特征提供必要的的数据。SABER 通过使用 10 个通道宽带的

limb-scanning 红外辐射计对大气层进行全球扫描, 其光谱范围为 $1.27\ \mu\text{m}$ 至 $17\ \mu\text{m}$ 。SABER 可以提供动力学温度、压强、位势高度、痕量气体 O_3 、 CO_2 、 H_2O 、 $[\text{O}]$ 和 $[\text{H}]$ 的体积混合比等变量的垂直剖面图。

(2) WACCM模式

Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) 是美国大气研究中心近年来发展的“对流层—平流层—中间层—热层底部”一体化的全球三维大气模式, 采用有限体积动力框架 (Lin, 2004)。WACCM中的化学过程通过三维全球大气化学输送模式MOZART来实现 (Kinnison et al., 2007), 包含50余种主要的化学成分以及多种中间层与热层下层区域中的主要离子成分, 并考虑了多种痕量气体的化学反应过程 (Garcia et al., 2007)。

本研究采用的模式版本为WACCM的最新第6代版本 (WACCM6), 它代表了中层大气直至中间层模拟的最新水平。WACCM6的水平分辨率使用 0.9° (纬度) $\times 1.25^\circ$ (经度)。在垂直方向上, WACCM6 从边界层向上扩展至热层底部 ($5.96 \times 10^{-6}\ \text{hPa}$; $140\ \text{km}$) 共70个垂直层次, 垂直分辨率在对流层约为 $1.1\ \text{km}$, 平流层低层 $1.1\sim 1.4\ \text{km}$ 之间, 平流层顶 (约 $50\ \text{km}$) 高度附近为 $1.75\ \text{km}$, $65\ \text{km}$ 以上垂直分辨率约为 $3.5\ \text{km}$ 。与以往的WACCM版本相比, WACCM6再现的中层大气中的温度、风和微量成分 (如水汽和臭氧) 的气候态特征与观测更接近, 能够更准确模拟SSW导致的平流层变化, 改善了全球温度和平流层环流对火山喷发的响应, 对QBO和中层大气的长期趋势有很好的模拟水平。其模拟的温度、风和水汽与观测相比偏差很小, 比以前版本的WACCM小得多。尽管模拟的南半球极地平流层在春季和初夏与观测相比存在温度偏差, 但WACCM6能够重现20世纪和21世纪臭氧的演变特征。另外, 热带地区的模拟和观测相比还存在一些偏差, 这可能是由于热带上升流的速度模拟不好造成的。WACCM6对平流层模拟的改善, 改善了全球气候变化的模拟, 甚至改善了地表气候的模拟。WACCM6模拟的高纬变率, 特别是冬季海平面气压的标准差, 与观测结果更为一致, 而且在WACCM6中模拟的阻塞频率也与观测更接近。

(3) DART 同化系统

Data Assimilation Research Testbed (DART)是由美国国家大气研究中心 (NCAR) 资料同化研究部门研发的一款基于集合EAKF (Ensemble Adjustment

1 Kalman Filter) 滤波理论的、适用于资料同化教学、研究和开发的开源软件工具
2 (Anderson, 2010)。最小二乘框架下的EAKF基本算法 (Anderson, 2003) 分
3 为两步: 第一步, 分别在单个观测位置上利用标量集合滤波方法, 计算每个观测
4 变量先验估计集合成员的更新增量; 第二步, 利用观测变量先验估计集合的更新
5 增量和观测变量先验估计集合与每个模式状态变量集合的线性回归关系, 线性化
6 地计算每个模式状态变量集合的更新增量。集合EAKF相对传统的EnKF方法的主
7 要优点在于: 一方面它不需要通过矩阵运算构建线性调整矩阵, 从而耗费大量计
8 算资源; 另一方面它将观测向量分为多个单一观测标量, 分别计算观测增量, 便
9 于并行化, 更符合实际的工作需求。目前, DART工具很多观测类型的同化接口
10 有待进一步开发。

11 本研究使用的DART同化工具版本为最新的Manhattan版本。DART采用模块
12 化编程方法, 应用集成卡尔曼滤波器, 该滤波器的作用是将模型值调整为与一组
13 观测数据信息更一致的状态, 这需要运行DART输入的多个观测实例来生成一个
14 状态集合。也就是将适合被同化的观测算子类型应用于每个状态, 以生成模型对
15 观测的估计, 然后将这些估计及其不确定性与观测值及其不确定性进行比较, 最
16 终对模型的状态进行调整。

17 (4) 同化、预报和预测试验设计

18 本研究一共设计了四组试验。第一组为历史重现试验, 模拟时期为 2020 年
19 3 月 1 日至 4 月 30 日。采用 WACCM6+DART 的同化模拟, 同化了 SABER 卫
20 星温度、臭氧和水汽资料, 温室气体强迫来自 Coupled Model Intercomparison
21 Project Phase 6 (CMIP6) 2020 年 3~4 月多模式集合平均结果, 海温驱动资料来
22 自 Hadley 观测资料。第二组也为历史重现试验, 模拟时期同样为 2020 年 3 月 1
23 日至 4 月 30 日。采用 WACCM6 单独模拟, 温室气体强迫来自 Coupled Model
24 Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) 2020 年 3~4 月多模式集合平均结果,
25 海温驱动资料来自 Hadley 观测资料。其与第一组试验相比, 只是没有进行数值
26 同化处理。第三组为预报预测试验, 采用 WACCM6 模型, 回报时段为 2020 年
27 5 月 1 日至 6 月 30 日。温室气体强迫来自 Coupled Model Intercomparison Project
28 Phase 6 (CMIP6) 2020 年 5~6 月多模式集合平均预测结果, 未来海温冰强迫资
29 料来自 NCEP coupled forecast system model version 2 (CFSv2), 预报初值为第一组
30 试验输出的 4 月 30 日分析场。第四组试验与第三组完全类似, 只是试验初值为

1 第二组试验输出的4月30日分析场。四组试验的模式时间积分步长设置为1800
2 秒。同化试验中，同化周期为6小时，同化窗区为±1.5小时。四组试验中，每
3 组试验5个集合成员，文章中的结果均为5个集合试验平均结果。表1更清晰的
4 显示了四组试验的设计方案。

6 表1：四组试验设计。

7 Table1: Design of experiments

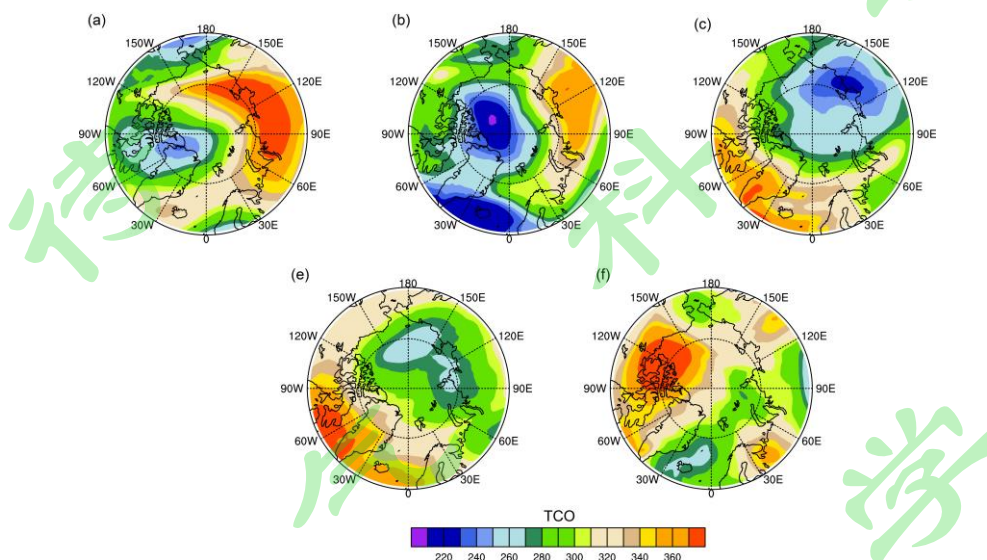
	模拟时段	同化	海温，海冰	试验初值
第一组	2020年3月1日 4月30日	SABER 温 度、臭氧、 水汽	Hadley 观测资料	WACCM6 默认设 置输入
第二组	2020年3月1日 4月30日	无同化	Hadley 观测资料	WACCM6 默认设 置输入
第三组	2020年5月1日 6月30日	无同化	CFSv2 海洋模式 预测资料	第一组试验输出的 4月30日分析场
第四组	2020年5月1日 6月30日	无同化	CFSv2 海洋模式 预测资料	第二组试验输出的 4月30日分析场

9 第一组试验在本研究中有2个作用：1、与第二组没有进行同化的试验对比，
10 以说明同化卫星资料以后对历史重现试验的改善效果；2、第一组试验的2020年4
11 月30日的分析场为第三组WACCM6模式预报预测试验提供初始场。而第二组试
12 验的2个作用是：1、与第一组试验结果对比（同上）；2、第二组试验的2020年4
13 月30日的分析场为第四组WACCM6模式预报预测试验提供初始场。第三组和第
14 四组为历史回报试验。第三组试验的作用是检测利用WACCM6+DART同化模型

1 为WACCM6提供了预报初值后，WACCM6预报预测模型对历史过程的回报效果。
2 第四组试验则是为了与第三组试验结果对比分析，检测WACCM6的预报初值在
3 没有进行同化改善的情况下，对历史过程的回报能力。

4

5 3、2020年北极平流层臭氧3、4月同化模拟与5、6月预报预测



6

7 图 1 第一组试验（同化 SABER 资料的试验，见表 1）模拟的 2020 年 3 月 1 日
8 (a)，3 月 15 日 (b)，3 月 30 日 (c)，4 月 15 日 (d) 和 4 月 30 日 (e) TCO
9 分布图。单位 DU。

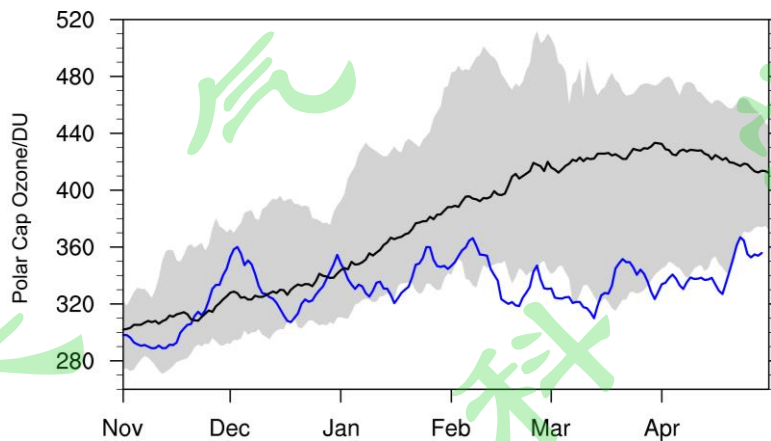
10 Fig. 1 The first set of experiments (see Table 1) simulated TCO distribution for March
11 1 (a), March 15 (b), March 30 (c), April 15 (d), and April 30 (e), 2020. Units DU.

12

13 我们首先分析了第一组试验，也就是 WACCM6+DRAT 模型在中高层大气同
14 化了 SABER 温度、臭氧和水汽 3 种变量以后，平流层臭氧的模拟结果。图 1 给
15 出了模拟的北极臭氧柱总量（TCO）随时间的变化特征。图 1a~e 分别表示 3 月
16 1 日、3 月 15 日、3 月 30 日、4 月 15 日，4 月 30 日 TCO 的变化。可见，从 3
17 月 1 日开始，北极圈内已经开始出现臭氧损耗（图 1a）；到 15 日的时候，臭氧
18 损耗继续加强（图 1b）；到了 3 月 30 日，北极臭氧已经开始出现大规模损耗现
19 象，TCO 降低到了 220 Dobson Unit (DU) 以下（图 1c）；在 4 月 15 日时，北极
20 臭氧损耗现象已经开始减弱（图 1d）；到 4 月 30 日，北极的臭氧大规模损耗事
21 件基本结束（图 1e）。图 2 给出了由 MERRA2 再分析资料计算得到的、整个北

1 极地区平均的 TCO 随时间的变化曲线。2020 年的臭氧大规模损耗事件主要从 2
2 月底开始并到 4 月中下旬结束 (Hu, 2020)。3 月中下旬, 臭氧含量降至最低值,
3 这种创纪录的低臭氧持续到 2020 年 4 月 19 日。这里需要注意的是, 图 2 的曲线
4 中 TCO 的最低值在 320 DU 左右, 这是因为图 2 中 TCO 曲线是 $60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 平均
5 得到的。作为参考, 在这段时间内, 整个北极地区 TCO 气候态的平均臭氧总量
6 柱 400 DU 以上, 这是因为北极极涡通常在 3 月破裂, 使富含臭氧的空气从低纬
7 度地区进入极地地区。自 1979 年以来, 北极上空如此异常的低臭氧只在 1997
8 年和 2011 两年出现过。2020 年 3 月的异常低臭氧量在观测记录中是绝无仅有的。
9 对比图 1 和图 2 可以看到, WACCM6+DRAT 模型的同化试验模拟结果很好地重
10 现了 2020 年北极平流层臭氧 3、4 月大规模损耗情况。

11



12

13 图 2 MERRA2 再分析资料中, 过去 30 年 (1990-2020) $60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 平均的 TCO
14 月变化曲线。黑线为 1990-2019 年 TCO 月变化的平均结果, 阴影区域代表
15 1990-2019 年 TCO 的月变化范围。蓝线代表 2020 年 TCO 月变化曲线。单位 DU。

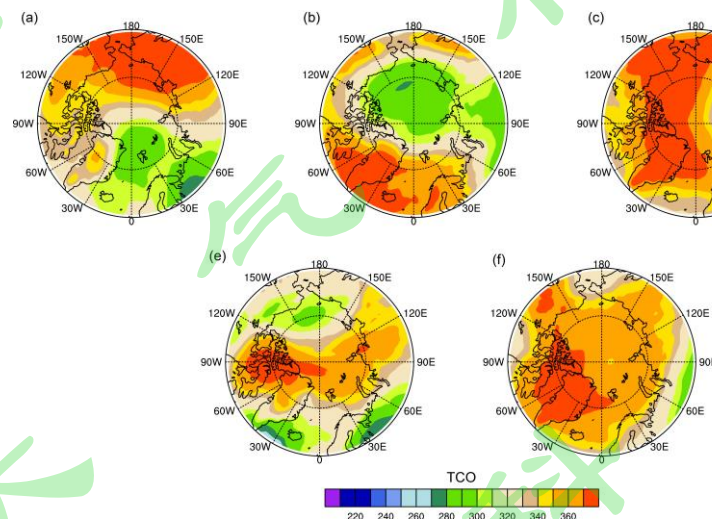
16 Fig.2 Monthly TCO changes averaged over $60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ for the past 30 years
17 (1990-2020) from MERRA2 reanalysis. The black line is the average result of the
18 monthly TCO changes from 1990~2019, and the shaded area represents the range of
19 1990-2019 TCO changes. The blue line represents the monthly TCO change for 2020.
20 Units DU.

21

22 图 3 给出了第二组试验 WACCM6 模式在没有进行资料同化的情况下, 模拟
23 的北极臭氧柱总量 (TCO) 随时间的变化特征。图 3a~e 分别表示 3 月 1 日、3

1 月 15 日、3 月 30 日、4 月 15 日、4 月 30 日 TCO 的变化。在 3 月 1 日和 3 月 15
2 日（图 3a 和 b），可以看到北极臭氧也出现了损耗的现象。但是，臭氧损耗最严
3 重的区域，TCO 也在 280DU 以上。到 3 月 30 日的时候（图 3c），臭氧损耗现象
4 已经完全消失，直到 4 月底也再没有出现臭氧损耗现象（图 3d 和 e）。这说明，
5 没有同化 SABER 资料的第二组试验并没有重现 2020 年 3、4 月北极平流层臭氧
6 大规模损耗的现象。这也说明了，对于目前即使是包含了完整平流层过程的模式
7 模拟的平流层变化与观测之间还是存在一定的差距。而中高层大气同化技术可能
8 是解决这一问题中的一个有效手段。

9



10

11 图 3 第二组试验（未进行同化的试验，见表 1）模拟的 2020 年 3 月 1 日（a），3
12 月 15 日（b），3 月 30 日（c），4 月 15 日（d）和 4 月 30 日（e） TCO 分布图。
13 单位 DU。

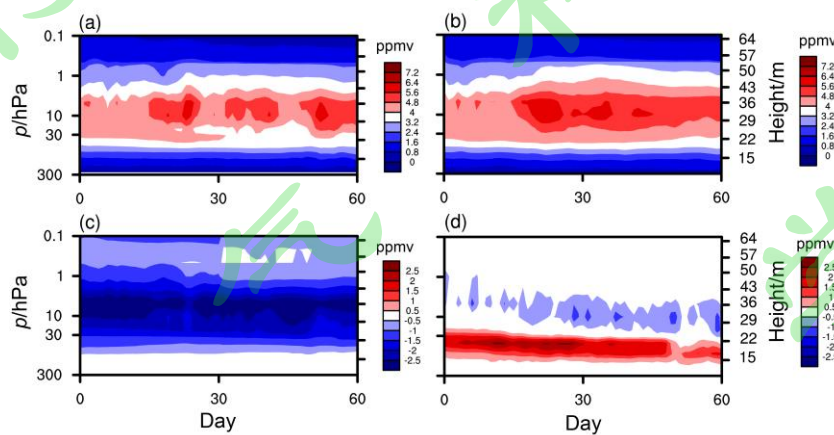
14 Fig. 3 The second set of experiments (see Table 1) simulated TCO distribution for
15 March 1 (a), March 15 (b), March 30 (c), April 15 (d), and April 30 (e), 2020. Units
16 DU.

17

18 为了进一步的分析历史重现试验中（第一、二组试验）同化试验和未进行同
19 化的试验与观测结果之间的差异，图 4a 和图 4b 给出了北极地区平均的平流层臭
20 氧含量从 2020 年 3 月 1 日到 4 月 30 日之间的变化特征，并与 MLS 卫星观测资
21 料进行了对比。对于北极地区，臭氧高含量区域分布在 50~1 hPa 之间。图 4a-b
22 表明同化试验模拟的臭氧含量（图 4a）比未进行同化的试验模拟的臭氧含量（图

4b) 要低得多。图 4c 显示了图 4a 中的臭氧含量变化与过去 20 年平均的 3 月 1 日到 4 月 30 日臭氧含量变化之差。可以看到, 相对于过去臭氧的含量变化, 2020 年 3 月 1 日到 4 月 30 日北极平流层臭氧的含量要低得多。图 4d 显示了图 4a 中的臭氧含量变化与 MLS 观测臭氧的差异。总体来说, 同化后模拟的平流层臭氧变化与观测资料结果很接近, 在 1 hPa 以上和 100 hPa 以下, 它们之间的差异非常小。但是, 30~1 hPa 之间, 同化后模拟的臭氧含量相对观测值也偏小~0.5ppmv, 在 100~30 hPa 之间, 相对观测值偏大。

8



9

图 4 (a) 第一组试验 (同化 SABER 资料的试验, 见表 1) 模拟的 2020 年 3、4 月北极地区平均的臭氧含量变化。(b) 第二组试验 (未进行同化的试验, 见表 1) 模拟的 2020 年 3、4 月北极地区平均的臭氧含量变化。(c) 为 (a) 中的臭氧含量变化与过去 20 年北极地区平均的臭氧变化的气候态的差值。(d) 为 (a) 中的臭氧含量变化与 MLS 资料中的北极地区平均的臭氧含量变化的差值。单位 ppmv。

Fig. 4 (a) Simulated changes in Arctic average ozone in March/April 2020 from the first set of experiments (Table 1). (b) Simulated changes in Arctic average ozone in March/April 2020 from the second set of experiments (Table 1). (c) is the difference between the changes in ozone in (a) and the climate state of the Arctic average ozone change over the past decade. (d) is the difference between the changes in ozone in (a) and the change in Arctic average ozone from MLS data. Units ppmv.

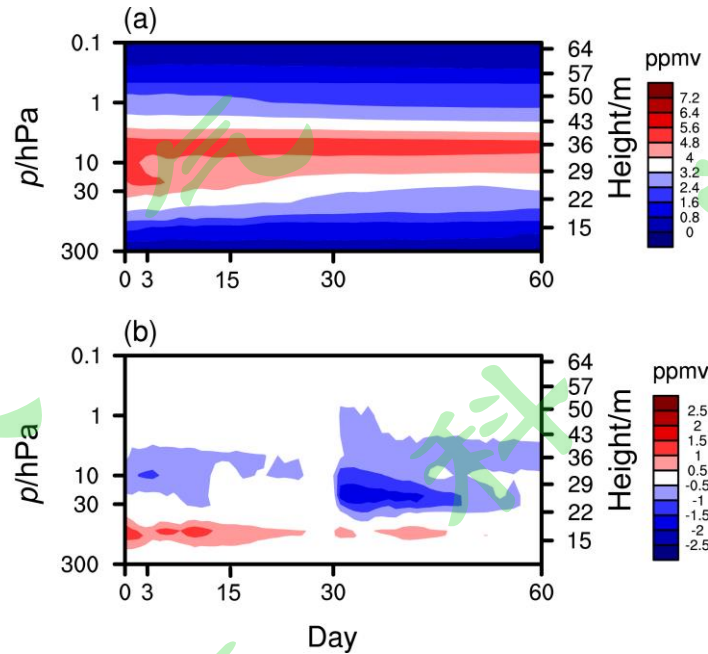
21

可见, 同化 SABER 卫星资料有效地提高了 WACCM6 模拟平流层臭氧变化

1 的能力。在试验中，一共同化了臭氧、温度和水汽三种变量。DART 的集成卡尔
2 曼滤波器，会将 WACCM6 的臭氧、温度和水汽输出结果调整为与观测数据信息
3 更一致的状态。这将可能从两个方面对 WACCM6 的臭氧输出结果进行改善。一
4 是，通过集成卡尔曼滤波器，模拟结果直接向观测结果的调整。但是，SABER
5 卫星资料轨道覆盖率不全面，仅仅靠模拟结果直接向观测结果的调整，对于一些
6 无臭氧观测资料同化的区域，臭氧模拟改善效果有限。而研究中，温度和水汽观
7 测资料的同化会从化学过程方面对臭氧模拟结果进行影响。改善平流层温度可以
8 改善平流层臭氧的损耗和生成速度模拟。特别对于极地，平流层温度是影响极地
9 云形成的最重要因子之一。同化平流层温度资料，使模拟的温度更接近观测结果，
10 这也会使极地云的模拟更接近观测结果。极地云上发生的非均相化学反应释放的
11 活性卤族元素，是造成臭氧洞的直接因素。图 1 中，第一组同化试验中能重现
12 2020 年春季的臭氧洞现象，除了与直接同化臭氧有重要关系外，同化平流层温
13 度变化也可能是重要因素。而对于同化平流层水汽资料，水汽分解产生的 OH 离
14 子可以把臭氧还原成氧气，另外它也是生成极地云的主要成分。这些都说明，通
15 过同化技术对平流层温度和水汽模拟的改善，对平流层臭氧模拟的改善作用是肯
16 定的。这里需要说明的是，本研究中，我们仅同化了一种卫星资料。这可能意味
17 着，对于改善平流层变化的模拟，虽然中高层大气同化技术是一个有效手段，但
18 是仅同化一种卫星资料模拟的平流层变化可能还会与真实大气之间存在一定误
19 差。未来还需要同化多种卫星资料，通过多源资料同化的方式来进一步改善平流
20 层模拟效果。

21 以第一组同化试验输出的 4 月 30 日分析场为初始场，第三组试验对 2020
22 年 5 月 1 日到 6 月 30 日的平流层臭氧变化进行了回报试验检验。图 5a 给出了回
23 报的平流层臭氧含量变化。图 5b 为回报试验结果与 MLS 臭氧观测结果之差。对
24 于 0~3 天的预报结果，预报值与 MLS 观测值之间只有在 100~1 hPa 存在明显的
25 差异，在 30~1 hPa 之间，预测值偏小 0.5 ppmv，在 100~30 hPa 之间，预测值偏
26 大 0.5 ppmv；绝对误差在 0.5 ppmv 之内。对比图 4d 可以看到，差异主要来自于
27 同化试验输出的 4 月 30 日分析场在 100~1 hPa 之间与 MLS 观测值之间存在误差。
28 对从第 4 到第 15 天的预报结果，预报值与观测值之间没有出现误差随时间增益
29 的现象，预测值与观测值之间有很好的 consistency。特别是对于第 16 到第 30 天的预

1 报结果，其预报值与观测值之间的差异相比于 0~15 的预报结果与观测值之间的
2 差异更小了。对比图 4a 和图 5a 可以看到，从 5 月开始，100~1 hPa 之间臭氧含
3 量由于季节变化减小。15-30 天预报值与观测值之间差异的减少，应该是由
4 于臭氧总含量随季节变化减少导致的。也就是说 15-30 天预报值与观测值之间的绝对
5 误差减少了，但是相对误差可能并没有显著减少。从第 30 天开始的短期气候尺
6 度预测中的预测值与观测值之间的误差突然出现了较大的差异，但是到了 45 天
7 以后，误差又减少了（图 5b）。此结果可能与 MLS 观测值本身存在的观测误差
8 有关。这个结果将来还需要与其他观测资料对比以进一步验证。总体来说，短期
9 预测尺度的结果与观测值之间的误差很稳定，预测结果与观测值有很高的一致性。
10



11
12 图 5 (a) 第三组试验（以第一组同化试验输出的分析场为初值的试验，见表 1）
13 预报的 5 月和预测的 6 月的北极地区平均的臭氧含量变化。(b) 为 (a) 图中的
14 臭氧含量变化与 MLS 资料中臭氧含量变化的差值。单位 ppmv。

15 Fig. 5 (a) Forecasted and predicted changes in Arctic-averaged ozone for May and
16 June by the third set of experiments (Table 1), respectively. (b) is the difference
17 between ozone changes in (a) and ozone change in MLS data. Units ppmv.

18
19 Ivy et al. (2017), Xie et al. (2016, 2017) 发现，北极平流层臭氧损耗能显
20 著影响北半球气候变化。利用数值同化技术提升目前模式中模拟、预报和预测平

1 流层臭氧变化，这不但可能提升模式对流层气候变化的模拟能力，也可能提升对
2 流层延伸期预报和短期气候预测能力。

3 4 **4、2020 年北极平流层温度和环流 3、4 月同化模拟与 5、6 月预报预测**

5 上一章分析了 WACCM6+DRAT 同化、预报预测模型对 2020 年发生的北极
6 臭氧大规模损耗过程的重现能力以及对臭氧的预报预测能力。由于臭氧变化可以
7 通过辐射作用影响平流层的温度和环流，这一章节，我们将继续分析
8 WACCM6+DRAT 模型对北极平流层温度和环流 2020 年 3、4 月同化模拟和 5、6
9 月预报预测的结果。

10 图 6a、b 和 c 分别显示了，第一组同化了 SABER 温度、臭氧和水汽资料的
11 试验输出的、第二组未进行资料同化试验输出的以及 MERRA2 再分析资料的
12 2020 年 3、4 月平流层温度变化。相比于图 6c，同化试验和未进行同化的试验都
13 较好地模拟出了北极 2020 年 3、4 月平流层温度的变化特征（图 6a 和 b），即平
14 流层低层温度从 3 月开始升高，从 190 K 上升到 210 K 左右；而平流层中上层温
15 度变化不大。图 6d 显示了第一组试验输出的平流层温度变化与 MERRA2 再分析
16 资料之间的差值，图 6e 显示了第二组试验输出的平流层温度变化与 MERRA2
17 再分析资料之间的差值。可以看到，在同化了 SABER 温度、臭氧和水汽资料以
18 后，在 1 hPa 以下的温度变化与 MERRA2 再分析资料之间的差异小于 2 K。但是
19 在 1 hPa 以上，第一组同化试验模拟的 3 月份温度变化相对于 MERRA2 再分析
20 资料结果偏大了 4 K 左右，而 4 月份却偏小 4 K 左右，这可能与 WACCM6 模式
21 模拟的平流层高层的 semi-annual oscillation (SAO) 性能有关。但是总体而言，
22 同化后模拟的温度变化和再分析资料有很高的一致性。未进行同化的试验模拟的
23 平流层温度变化与 MERRA2 再分析资料之间存在较大差异。例如，在 3 月中上
24 旬，模拟的平流层温度偏暖 6 K 左右，而从中下旬开始，平流层下层温度变化模
25 拟仍然偏暖而上层模拟偏冷 8 K 左右。这种差异一直持续到了 4 月底。

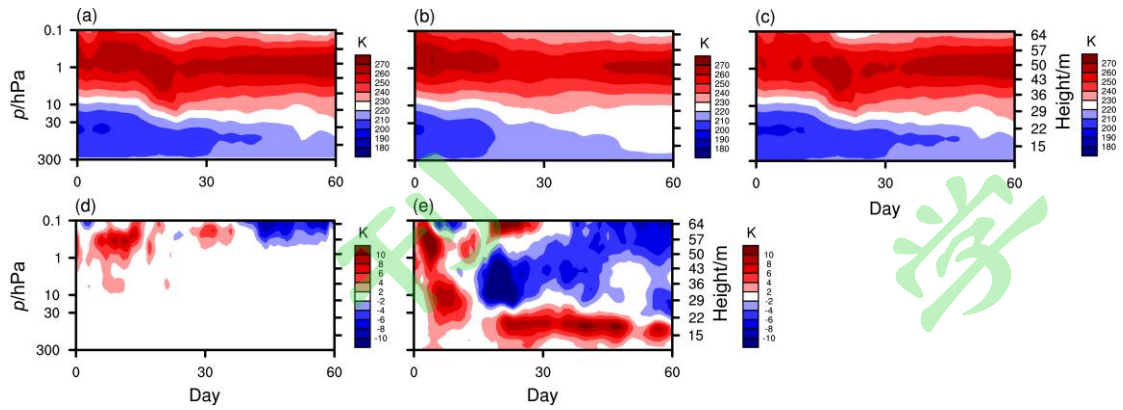
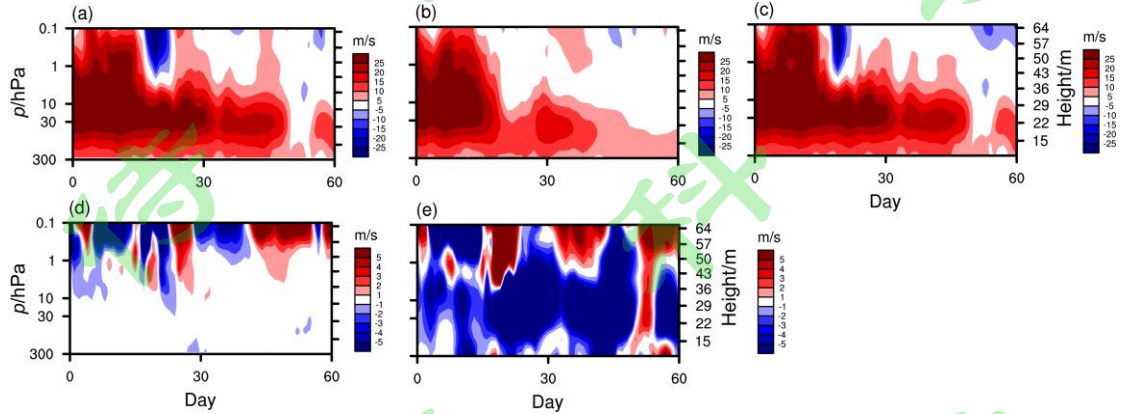


图 6 (a) 第一组试验 (同化 SABER 资料的试验, 见表 1) 模拟的 2020 年 3、4 月北极地区平均的温度变化。(b) 第二组试验 (未进行同化的试验, 见表 1) 模拟的 2020 年 3、4 月北极地区平均的温度变化。(c) MERRA2 再分析资料中的 2020 年 3、4 月北极地区平均的温度变化。(d) 为 (a) 与 (c) 的差值。(e) 为 (b) 与 (c) 的差值。单位为 K。

Fig. 6 (a) Arctic average temperature change in March and April 2020 simulated in the first set of experiments (Table 1). (b) Arctic average temperature change in March and April 2020 simulated in the second set of experiments (Table 1). (c) Arctic average temperature change for March and April 2020 in the MERRA2 reanalysis data. (d) is the difference between (a) and (c). (e) The difference between (b) and (c). Units are K.

对应北极平流层温度的变化, 图 7a、b 和 c 分别显示了, 第一组同化了 SABER 温度、臭氧和水汽资料的试验输出的、第二组未进行资料同化试验输出的以及 MERRA2 再分析资料的 2020 年 3、4 月北极平流层环流变化。北极平流层纬向西风在 3 月初最强, 从三月中旬开始减弱, 这说明平流层高层极涡从 3 月中旬开始崩溃, 但是平流层低层的极涡还在继续维持, 直到四月中旬以后, 纬向西风几乎接近于零。第一组同化模拟试验和再分析资料之间表现出了很好的一致性 (图 7a 和 c)。但是, 未进行数值同化的第二组试验模拟得到北极平流层纬向西风强度与再分析资料结果存在明显的差异。图 7b 表明, 由于未进行资料同化, 第二组试验模拟的整个北极平流层极涡从 3 月中旬开始就全部崩溃, 此后模拟的平流层低层纬向西风速比再分析资料里的结果要弱得多。图 7d 和图 7e 进一步展示了, 第一组和第二组试验模拟的 2020 年 3、4 月北极平流层环流变化与再分析资料之间

1 的差异。图 7d 所示，第一组同化试验模拟的 1 hPa 以下北极平流层环流的变化
2 与再分析资料之间存在高度的一致性；但是，在 1 hPa 以上，它们之间存在类似
3 日周期的波动性差异。这可能与模式模拟潮汐波性能有一定关系。对于第二组未
4 进行同化的试验，相对于再分析资料，北极平流层高层的纬向风模拟明显偏强，
5 但是中低层严重偏弱。



6 图 7 和图 6 类似，但是为纬向风变化。单位为 m/s。

7 Fig. 7 Same as Fig. 6, but for zonal wind. Units are m/s.

8

9
10 同化 SABER 卫星资料有效地提高了 WACCM6 模拟平流层温度和环流变化
11 的能力。同化臭氧、温度和水汽三种变量，这将可能从两个方面对 WACCM6 的
12 温度输出结果进行改善。一是，温度模拟结果直接向温度观测结果的调整。臭氧
13 和水汽分别可以吸收短波辐射和长波辐射调整大气温度。二则是，臭氧和水汽的
14 模拟通过同化改善后，会通过调整辐射过程改善平流层的温度模拟。对于平流层
15 的纬向绕极环流，平流层从极地到热带温度梯度是一个主要决定因子。由于平流
16 层热带温度高极地温度低，平流层温度从热带向极地递减。根据热成风原理，平
17 流层会产生绕极环流。上面提到，同化 SABER 卫星资料提高了 WACCM6 平流
18 层温度变化模拟，这也会改善平流层从热带到极地温度梯度的模拟，从而改善平
19 流层纬向风的模拟。另外，对比图 4，图 6 和图 7 可以发现，由于第二组试验未
20 同化 SABER 温度、臭氧和水汽，其模拟的北极平流层温度在上层区域偏冷下层
21 区域偏暖，其导致的与中纬度温度梯度的变化，引起的直接结果是平流层上层纬
22 向风速偏强而中下层偏弱。这对应着北极极涡模拟偏弱。因此，第二组未进行同
23 化的试验模拟的 2020 年 3、4 月北极臭氧损耗比第一组同化试验和观测资料显示
24 的臭氧损耗要弱得多。这再次证明利用同化技术是提升目前模式中平流层模拟能

1 力的一个重要手段。

2 以第一组同化试验输出的 4 月 30 日分析场为初始场，第三组试验对 2020
3 年 5 月 1 日到 6 月 30 日的北极平流层温度变化进行了回报试验检验。同样，以
4 第二组未进行同化的试验输出的 4 月 30 日分析场为初始场，第四组试验对 2020
5 年 5 月 1 日到 6 月 30 日的平流层温度变化进行了回报试验检验。为了对比第一
6 组和第二组试验为第三组和第四组试验提供的初始场的差别，这里图 8 给出了第
7 一组和第二组试验输出的以及 MERRA2 资料中的 2020 年 4 月 30 日北极地区
8 ($60\text{--}90^\circ\text{N}$) 平均的温度和纬向风垂直曲线。对于温度场来说，在未同化卫星资
9 料的情况下，第二组试验提供的温度初始值明显与 MERRA2 再分析资料之间存
10 在较大差异，在平流层低层温度偏小 6 k 而在高层偏小近 8 k (图 8a 和 8b)。而
11 第一组同化了 SABER 卫星资料温度的试验提供的温度初始值与 MERRA2 再分
12 析资料之间差异基本在 1 hPa 以下小于 1 k (图 8a 和 8b)。注意 1 hPa 以上，第
13 一组试验提供的温度初始场与 MERRA2 资料之间也存在 2-4 k 左右的差异，具
14 体原因将来值得进一步研究。对于纬向风而言，第二组试验提供的纬向风初始值
15 在平流层低层风速偏小 $\sim 8\text{ m/s}$ 而在高层偏大 $\sim 4\text{ m/s}$ (图 8c 和 8d)。而第一组试
16 验提供的纬向风初始值与 MERRA2 再分析资料之间差异基本在 1 hPa 以下小于 1
17 m/s (图 8c 和 8d)。同样，在 1 hPa 以上，第一组试验提供的风速初始场与 MERRA2
18 资料之间也存在 6 m/s 左右的差异。但是，总体而言，同化试验提供的初始场相
19 对于未同化的试验有较大幅度的改善。
20

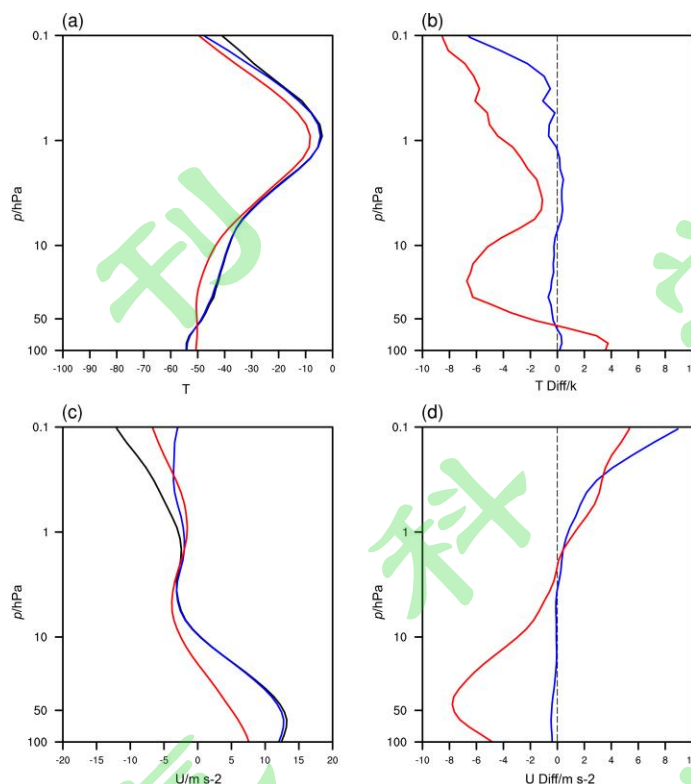


图 8 (a) 2020 年 4 月 30 日北极地区 (60-90°N) 平均的温度垂直曲线。黑线基于 MERRA2 资料, 蓝线基于第一组试验 (同化 SABER 资料的试验) 资料, 红线基于第二组试验 (未进行同化的试验) 资料。(b) 中蓝线为 (a) 中蓝线与黑线之差, 代表第一组试验结果与 MERRA2 的差值, 红线为 (a) 中红线与黑线之差, 代表第二组试验结果与 MERRA2 的差值。(c) (d) 与 (a) (b) 类似, 但是为纬向风的变化。

Fig. 8 (a) Arctic region (60-90°N) average temperature vertical curve on April 30, 2020. Black line is based on MERRA2, blue line is based on the first set of experiments, the red line is based on the second set of experiments. The Blue line in (b) is the difference between the Blue line and the Black line in (a), which represents the difference between the first set of experiments and the MERRA2. The red line in (b) is the difference between the red line and black line in (a), which represents the difference between the second set of experiments and the MERRA2. (c),(d) are similar to (a),(b), but for the changes of zonal wind.

图 9a 和图 9b 给出了两组试验回报的北极平流层温度变化, 图 9c 为 MERRA2 再分析资料结果。从它们之间的差异可以看到 (图 9d 和 e), 以同化试验输出的

分析场为初始场的平流层温度预报结果，不管是 0~30 天的天气尺度预报还是 30~60 天的短期气候尺度预测结果与再分析资料之间在 1 hPa 以下都非常一致，误差在 2 K 以内（图 9d）。在 1 hPa 以上，0~60 天的回报温度相对再分析资料都偏低，最大偏差大约-6 K 左右，特别是 4~15 天的预报结果相对再分析资料偏差最大。这主要是因为，第一组同化试验中，模拟的 4 月底的北极平流层高层温度相对再分析资料偏低造成的（图 8a 和 b）。以此作为预测初值，造成了回报试验中 1 hPa 以上温度回报结果相对再分析资料结果偏低（图 9d）。但是有意思的是，此偏差在后续的预测中并没有被放大而是稳定在了-6 K 左右。如前文所述，未进行同化的第二组试验模拟的 4 月北极平流层温度变化与再分析资料之间存在较大的差异，特别是在 30 hPa 以上，模拟的平流层温度严重偏低（图 8a 和 b）。因此，以第二组试验输出的 4 月底分析场为初值的第四组试验，回报的北极平流层温度在平流层高层和高层都出现了相对再分析资料结果偏低的现象（图 9e）。

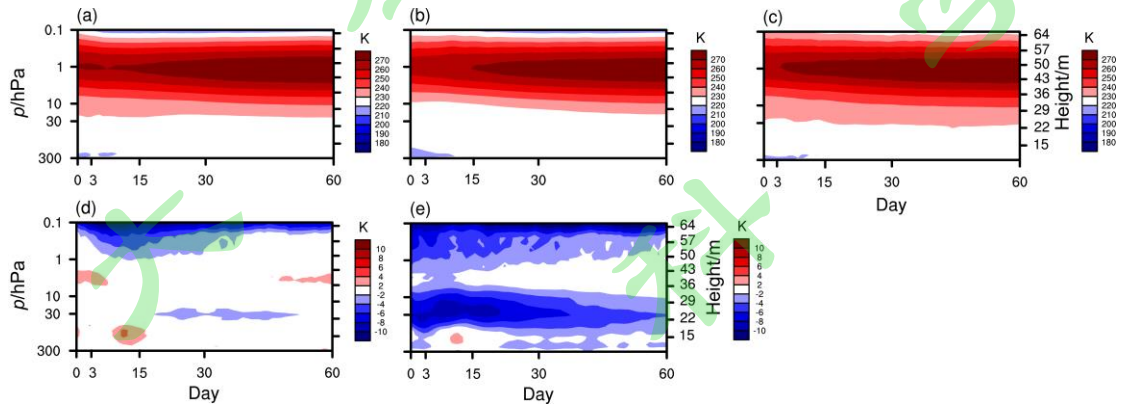


图 9 (a) 第三组试验（以第一组同化试验输出的分析场为初值的试验，见表 1）预报的 5 月和预测的 6 月的北极地区平均的温度变化。(b) 第四组试验（以第二组未进行同化的试验输出的分析场为初值的试验，见表 1）预报的 5 月和预测 6 月的北极地区平均的温度变化。(c) MERRA2 再分析资料中的 2020 年 5、6 月北极地区平均的温度变化。(d) 为 (a) 与 (c) 的差值。(e) 为 (b) 与 (c) 的差值。单位为 K。

Fig. 9 (a) Forecasted and predicted changes in Arctic-averaged temperature for May and June by the third set of experiments (Table 1), respectively. (b) Forecasted and predicted changes in Arctic-averaged temperature for May and June by the fourth set of experiments (Table 1), respectively. (c) Arctic average temperature change for May

and June 2020 in the MERRA2 reanalysis data. (d) is the difference between (a) and (c). (e) The difference between (b) and (c). Units are K.

类似图 9，图 10 显示了北极平流层纬向风变化的回报试验检验。可以看到由于季节变化，从 5 月份开始，北极平流层高层已经从纬向西风转变为纬向东风（图 10a，10b 和 10c）。对于纬向风的回报，第三组使用同化数据为初值的回报试验结果与再分析资料之间的差异较小，存在 2 m/s 左右的差异（图 10d）。但是在 5 月初的北极平流层低层，出现了较大幅度的偏差，这可能与第三组试验对对流层的预报结果存在较大偏差有关。对于第四组没有使用同化试验输出的分析场为初值的试验，预报预测结果和再分析资料之间存在明显差异（图 10e）。对于 0~15 天的天气尺度预报，北极平流层中上层纬向东风预报偏弱 4m/s 左右，而平流层低层纬向西风预报同样偏弱 4m/s 左右。这主要与未进行数值同化的试验（第二组试验）提供的初值场与再分析资料间在平流层上层和低层存在差异有关（图 7e）。而对于 15-30 天的预报和 30 天以上的短期预测结果，预报预测的北极平流层上层纬向东风偏弱（图 10e），差异甚至达到了 5m/s 以上。

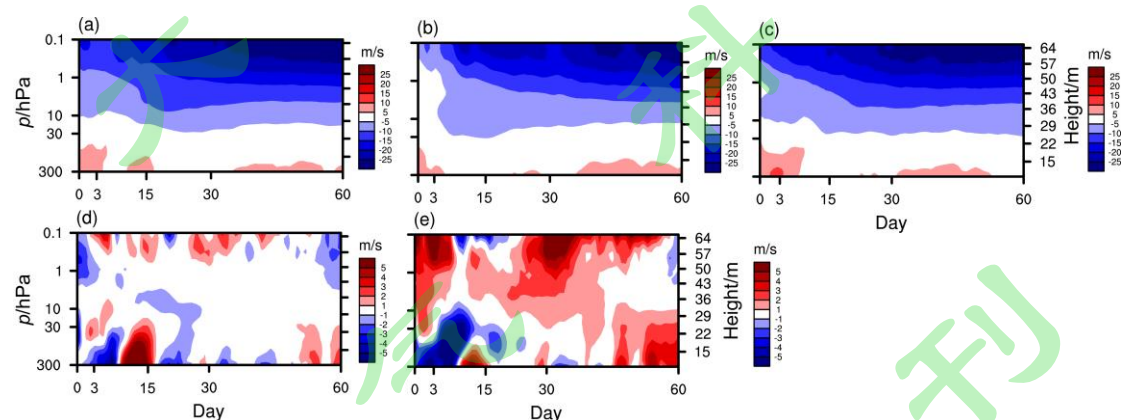


图 10 和图 9 类似，但是为纬向风变化。单位为 m/s。

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for zonal wind. Units are m/s.

5、数值同化技术对全球平流层温度和环流模拟、预报和预测能力的改善

图 11 显示了，第一组同化了 SABER 温度、臭氧和水汽资料的试验和第二组未进行资料同化试验输出的 2020 年 3、4 月全球平流层温度和纬向风与 MERRA2 再分析资料之间的均方根误差 (RMSE) (图 11a-d)。同化 SABER 资

料后，在 1 hPa 以下，模拟的全球平流层温度和纬向风的 RMSE 分别小于 2 K 和 2 m/s（图 11a 和 c）。在 1 hPa 以上，温度和纬向风的 RMSE 分别超过了 4 K 和 6 m/s。平流层高层与再分析资料之间的差异可能与 SABER 资料与 MERRA2 资料之间本身存在差异有一定关系。图 11b 和图 11d 给出了没有同化 SABER 卫星资料的试验输出的全球平流层温度和纬向风的 RMSE。可以看到，全球平流层中，模拟的大部分区域的温度的 RMSE 超过了 4 K，而纬向风的 RMSE 甚至超过了 10 m/s。对比图 11a 和图 11b 以及图 11c 和图 11d 可以看到，同化中高层大气卫星资料对模拟全球平流层大气变化都有很显著的改善效果，而不仅仅局限于上面讨论的北极平流层。

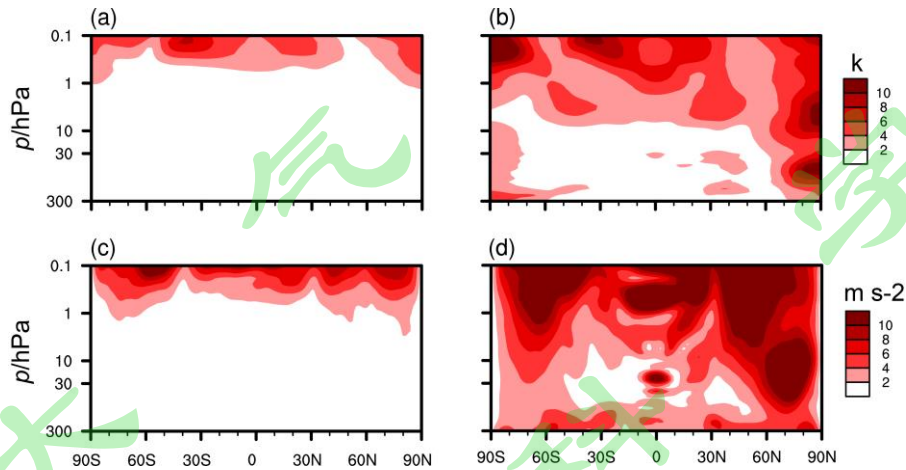


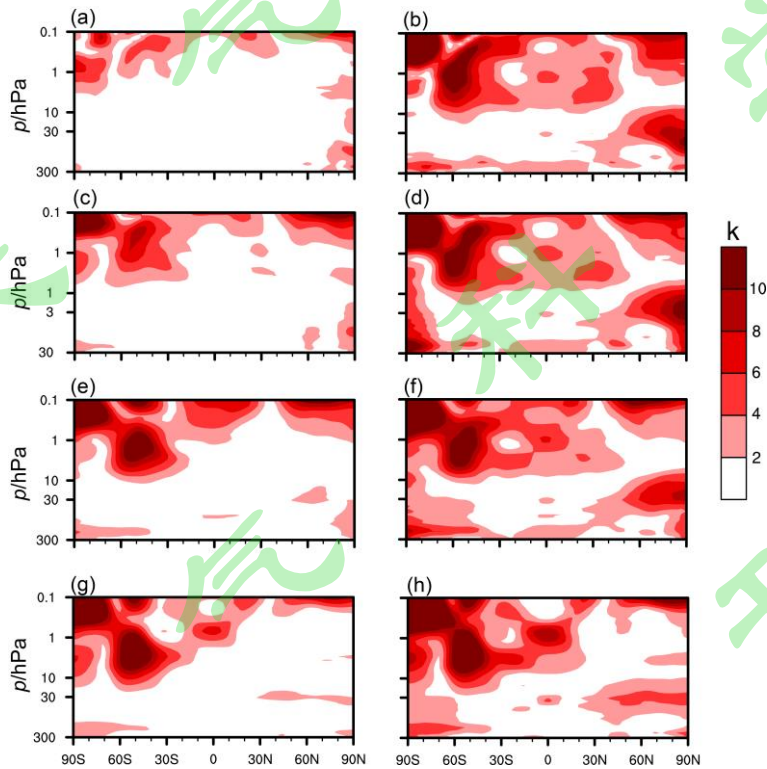
图 11 (a) 和 (c) 分别为第一组试验（同化 SABER 资料的试验，见表 1）模拟的 2020 年 3、4 月平流层温度和纬向风与 MERRA2 再分析资料之间的 RMSE。(b) 和 (d) 分别为第二组试验（未进行同化的试验，见表 1）模拟的 2020 年 3、4 月平流层温度和纬向风与 MERRA2 再分析资料之间的 RMSE。

Fig. 11 (a) and (c) are the stratospheric temperature and wind RMSEs of March and April 2020 between the first set of experiments (Table 1) and the MERRA2 reanalysis data, respectively. (b) and (d) are the stratospheric temperature and wind RMSEs of March and April 2020 between the second set of experiments (Table 1) and the MERRA2 reanalysis data, respectively.

中高空大气数值同化不但可以改善模式全球平流层大气变化的模拟能力也可以改善平流层大气变化的预报与预测性能。图 12 显示了，第三、四组试验天

1 气尺度预报和短期气候尺度预测的 2020 年 5、6 月全球平流层温度与 MERRA2
2 再分析资料之间的 RMSE。注意，第三组试验的初值来自于第一组同化试验输出
3 的分析场，而第四组试验的初值来自于第二组未进行同化的试验输出的分析场。
4 对 0~3 天的天气尺度预报（图 12a 和 b），第三组试验预报的平流层温度的 RMSE
5 只在小部分区域超过了 4 K，在大部分区域 RMSE 都小于 2 K。而第四组试验预
6 报的平流层温度的 RMSE 在南半球高纬度地区的平流层高层超过了 10 K；另外，
7 北极平流层的温度 RMSE 也较大，这个特征在前文的图 9 也可以看到。第三组
8 试验天气尺度预报和短期气候尺度预测的平流层温度的 RMSE 分布相比短期预
9 报并没有发生变化，虽然 RMSE 数值有所增大，但是增益较小且稳定（图 12c、
10 e、和 g）。而第四组试验天气尺度预报和短期气候尺度预测的平流层温度的 RMSE
11 （图 12d、f、和 h）相比第三组试验的结果要大得多。

12



13

14 图 12 (a)、(c)、(e) 和 (g) 分别为第三组试验（以第一组同化试验输出的分
15 析场为初值的试验，见表 1）输出的平流层温度 5 月 0~3 日预报 (a)，4~15 日预
16 报 (c) 和 16~30 日预报 (e) 和 6 月短期气候预测 (g) 结果与 MERRA2 再分析
17 资料之间的 RMSE。(b)、(d)、(f) 和 (h) 分别为第四组试验（以第二组未进
18 行同化的试验输出的分析场为初值的试验，见表 1）输出的平流层温度 5 月 0~3

1 日预报 (a), 4~15 日预报 (c) 和 16~30 日预报 (e) 和 6 月短期气候预测 (g)
2 结果与 MERRA2 再分析资料之间的 RMSE。

3 Fig. 12 (a), (c), (e), and (g) are the stratospheric temperature RMSEs between the 0~3
4 days forecast (a), 4~15 days forecast (c) and 16~30 days forecast (e), and short-term
5 climate prediction (g) from the third set of experiments (Table 1) and the MERRA2
6 reanalysis data, respectively. (b), (d), (f), and (h) are the stratospheric temperature
7 RMSEs between the 0~3 days forecast (a), 4~15 days forecast (c) and 16~30 days
8 forecast (e), and short-term climate prediction (g) from the fourth set of experiments
9 (Table 1) and the MERRA2 reanalysis data, respectively.

10

11 图 13 显示了, 第三、四组试验天气尺度预报和短期气候尺度预测的 2020
12 年 5、6 月全球平流层纬向风与 MERRA2 再分析资料之间的 RMSE。第三组试验
13 0~3 天的天气尺度预报的平流层风速的 RMSE 较小, 15 天以后的预报和短期气
14 候预测的纬向风的 RMSE 有所增大; 特别在热带和南半球平流层高层, 纬向风
15 的预报预测结果与 MERRA2 再分析资料之间存在较大差异; 北半球平流层环流
16 预测结果相对较好 (图 13a、c、e 和 g)。而第四组试验全球平流层纬向风预报和
17 预测结果的 RMSE 都很大 (图 13b、d、f 和 h)。总体来说, 使用同化试验输出
18 的分析场作为初值, 能较好地改善模式平流层温度和环流的预报预测性能。

19

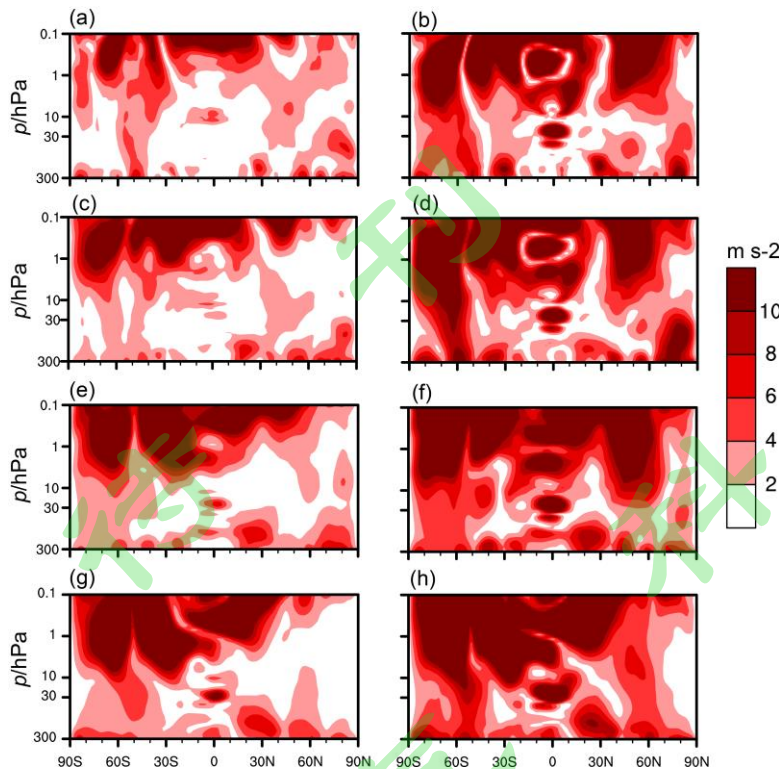


图 13 和图 12 类似，但是为纬向风变化。

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for zonal wind.

6、讨论与结论

作为临近空间的重要组成部分，平流层是未来空间飞行器的主要活动区域。平流层的环境大气状态对飞行器的准确入轨和安全都具有显著影响，也是飞行器的设计参数、飞行试验的主要依据。但是，目前平流层的观测资料相对较少，而数值模式在表达平流层环境大气状态时还存在一定缺陷。数据同化技术可将新的观测数据引入模型，这有利于模拟减少甚至滤掉模型噪声，使得模拟预测结果更加接近平流层环境真实状态。同化技术与模型的结合，可以获得许多没有观测仪器支持下的大气状态数据。因此，平流层的数据同化技术成为了连接观测数据和模型模拟预测的主要桥梁，在平流层的状态表征与研究中会起到重要作用。平流层数据同化、预报预测系统的研究，将对平流层数值预报质量的提高起到关键作用，从而加强对平流层低动态飞行器飞行活动的气象安全保障。本研究使用 WACCM6 模式+DART 工具，开发了中高层大气温度、臭氧和水汽资料的同化接口，搭建了包含完整平流层过程的数值同化、天气预报和短期气候预测模型。利用该模型，针对 2020 年 3、4 月北极平流层臭氧大规模损耗事件进行了重现模拟

1 试验,并以同化试验输出的分析场作为初值,对 5~6 月的平流层大气进行了 0~30
2 天天气尺度预报以及 31~60 天短期气候尺度预测。结果表明:本模型能真实反映
3 2020 年 3、4 月北极平流层出现的大规模臭氧损耗事件随时间的演变特征,和
4 MLS 卫星观测结果很接近;利用同化试验输出的 4 月末分析场作为初值,预报
5 的 5 月北极平流层臭氧变化与 MLS 卫星观测值的差值小于 0.5 ppmv,预测的 6
6 月北极平流层臭氧变化只有在 30~10 hPa 之间区域,与观测之间的差异超过了 1
7 ppmv。该模型同化模拟的 3~4 月、预报预测的 5~6 月北极平流层温度和纬向风
8 变化与 MERRA2 再分析资料结果具有很好的一致性,仅在北极平流层顶部,预
9 报预测的温度和纬向风与再分析资料之间的 RMSE 分别为~3 K 和~4m/s。与未进
10 行数值同化的试验相比,中高层大气同化技术对平流层中低层模拟效果改善最为
11 显著,其预报预测结果比未进行同化的试验的预报预测结果的误差减少了 50%
12 以上。

13 目前该研究还存在以下一些问题没有讨论:

14 1、文章只描述了该模型对平流层环流等变量同化、预报和预测效果的好与
15 坏,并没有解释导致这些效果的原因,这也是下一步工作需要详细研究的问题;

16 2、由于臭氧和水汽有很强的辐射作用,它们的变化是影响平流层温度变化
17 的主要因子;平流层臭氧和水汽的变化又和温度有关。本研究同时同化了温度、
18 臭氧、水汽 3 种变量,从而不能清楚判定哪一个变量的同化对平流层臭氧、温度
19 和环流模拟的改善效果最显著;

20 3、本研究只同化了一种卫星资料,多种卫星资料同时同化对模式的改善作
21 用也有待进一步研究;

22 4、我们目前在模拟时间上只针对性地选取 2020 年 3~6 月进行了研究,本模
23 型对不同月份不同季节的改善效果还不清楚。这些问题都需要进一步的讨论和研
24 究。

25

26 致谢

27 感谢 NCAR 提供的 WACCM6 模式和 DART 同化工具;感谢 NASA 提供的
28 MERRA2, MLS 和 SABER 资料;感谢北京师范大学超算中心提供的计算资源。

29

1 参考文献 (References)

- 2 Anderson J L. 2003. A local least squares framework for ensemble filtering [J]. Mon.
3 Wea. Rev., 131 (4): 634-642.
- 4 Anderson J L. 2010. A non-Gaussian ensemble filter update for data assimilation [J].
5 Mon. Wea. Rev., 138 (11): 4186-4198.
- 6 卞建春, 严仁嫦, 陈洪滨. 2011. 亚洲夏季风是低层污染物进入平流层的重要途径
7 径[J]. 大气科学, 35: 897-902. Bian Jianchun, Yan Renchang, Chen Hongbing.
8 2011. Tropospheric pollutant transport to the stratosphere by Asian summer
9 monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese),
10 35(5):897-902.
- 11 Baldwin M P, Dunkerton T J. 2001. Stratospheric Harbingers of Anomalous Weather
12 Regimes[J]. Science, 294: 581-584.
- 13 陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 2006. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望
14 [J]. 大气科学, 30: 813-820. Chen Hongbin, Bian Jianchun, Lv Daren. 2006.
15 Advances and Prospects in the Study of Stratosphere-Troposphere Exchange[J].
16 Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 30(5): 813-820.
- 17 陈月娟, 易明建, 毕云, 等. 2009. 平流层微量气体变化趋势的研究[J]. 地球科学
18 进展, 24(3): 308-319. Chen Yuejuan, Yi Mingjian, Bi Yun, et al. 2009. A Study
19 of the Trends of the Trace Gases in Stratosphere. Advances in Earth Science (in
20 Chinese), 24(3): 308-319.
- 21 Chen Q L, Li Z, Fan G Z, et al. 2011. Indications of stratospheric anomalies in the
22 freezing rain and snow disaster in South China 2008[J], Sci. China. Earth. Sci.,
23 54: 1248-1256.
- 24 Chen Z Y. Chen H B. Chen W, et al. 2008. Advances in the researches in middle and
25 upper atmosphere in 2006-2008[J]. Chin. J. Space Sci, 28: 60-71.
- 26 Coy L, Eckermann S, Hoppel K. 2009. Planetary wave breaking and tropospheric
27 forcing as seen in the stratospheric sudden warming of 2006[J]. J. Atmos. Sci.,
28 66: 495-507.
- 29 Elbern H, Schwinger J, Botchorishvili R. 2010. Chemical state estimation for the
30 middle atmosphere by four-dimensional variational data assimilation: System

1 configuration [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D6): D06302.

2 Errera Q, Daerden F, Chabrillat S, et al. 2008. 4D-Var assimilation of MIPAS
3 chemical observations: Ozone and nitrogen dioxide analyses [J]. *Atmos. Chem.*
4 *Phys.*, 8 (20): 6169-6187.

5 敬文琪, 王业桂, 崔园园,等. 2019. 基于 WACCM+DART 的临近空间 SABER 和
6 MLS 臭氧观测同化试验研究 [J]. *大气科学*, 43 (2): 233-250. Jing Wenqi,
7 Wang Yegui, Cui Yuanyuan, et al. 2019. Assimilation of near space ozone data
8 from SABER and MLS observations into the whole atmosphere community
9 climate model and data assimilation research test-bed [J]. *Chinese Journal of*
10 *Atmospheric Sciences* (in Chinese), 43 (2): 233–250.

11 Garcia R R, Marsh D R, Kinnison D E, et al. 2007. Simulation of secular trends in the
12 middle atmosphere, 1950 – 2003 [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D9): D09301.

13 胡永云. 2006. 平流层极地臭氧损耗影响对流层气候的研究进展[J]. *北京大学学*
14 *报*, 42: 561-568. Hu Yongyun. 2006. Possible Impact of Stratospheric Polar
15 Ozone Depletion on Tropospheric Climate [J]. *Acta Scientiarum Naturalium*
16 *Universitatis Pekinese* (in Chinese), 42(5), 561-568.

17 Hu Y. 2020. The very unusual polar stratosphere in 2019–2020[J]. *Sci. Bull.*, 65:
18 1775-1777.

19 Ivy D J, Solomon S, Calvo N, et al. 2017. Observed connections of Arctic
20 stratospheric ozone extremes to Northern Hemisphere surface climate[J].
21 *Environ. Res. Lett.*, 12, 024004.

22 Jackson D R. 2007. Assimilation of EOS MLS ozone observations in the Met Office
23 data-assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133 (628): 1771-1788.

24 Kinnison D E, Brasseur G P, Walters S, et al. 2007. Sensitivity of chemical tracers to
25 meteorological parameters in the MOZART-3 chemical transport model [J]. *J.*
26 *Geophys. Res.*, 112 (D20): D20302.

27 刘毅, 刘传熙. 2009. 利用 WACCM-3 模式对平流层动力、热力场及微量化学成
28 分季节变化的数值模拟研究[J]. *空间科学学报*, 6: 580-590. Liu Yi and Liu
29 Chuanxi. 2009. Simulation: Studies on Seasonal Variations of the Stratospheric
30 Dynamics and Trace Gases Using Coupled Chemistry-Climate Model

1 WACCM-3 [J]. Chinese Journal OF Space Science (in Chinese), 6: 580-590.

2 Li T, She C Y, Liu H L, et al. 2007. Sodium lidar observed strong inertia-gravity wave
3 activities in the mesopause region over Fort Collins, CO (41°N, 105°W) [J]. J.
4 Geophys. Res., 112: D22104.

5 Lin S J. 2004. A “vertically Lagrangian” finite-volume dynamical core for global
6 models [J]. Mon. Wea. Rev., 132 (10): 2293-2307.

7 Livesey N J. 2015. Earth Observing System (EOS) Aura Microwave Limb Sounder
8 (MLS) version 4.2 x level 2 data quality and description document, 91109-8099,
9 version 4.2 x [R]. Jet Propulsion Lab., Calif. Insti. of Tech., Pasadena, Calif.

10 吕达仁, 陈洪滨. 2003. 平流层和中间层大气研究的进展[J]. 大气科学, 2: 750-769.

11 Lv Daren, Chen Huobing. 2003. Advances in Middle Atmosphere Physics
12 Research[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2: 750-769.

13 McCormack J P, Coy L, Hoppel K W. 2009. Evolution of the quasi 2-day wave during
14 January 2006[J]. J. Geophys. Res., 114, D20115.

15 Pedatella N M, Raeder K, Anderson J L, et al. 2013. Application of data assimilation
16 in the Whole Atmosphere Community Climate Model to the study of day-to-day
17 variability in the middle and upper atmosphere[J]. Geophys. Res. Lett., 40:
18 4469-4474.

19 Pierce R B, Schaack T, Al-Saadi J A, et al. 2007. Chemical data assimilation estimates
20 of continental U.S. ozone and nitrogen budgets during the intercontinental
21 chemical transport experiment North America [J]. J. Geophys. Res., 2007, 112
22 (D12): D12S21.

23 Polavarapu S M, Ren S, Rochon Y, et al. 2005. Data assimilation with the Canadian
24 Middle Atmosphere Model[J]. Atmos. Ocean, 43, 77-100.

25 Ren R C, Hu Jinggao. 2014. An emerging precursor signal in the stratosphere in
26 recent decades for the Indian summer monsoon onset[J]. Geophys. Res. Lett., 41:
27 7391-7396.

28 Ren S, Polavarapu S, Beagley S R, et al. 2011. The impact of gravity wave drag on
29 mesospheric analyses of the 2006 stratospheric major warming[J]. J. Geophys.
30 Res., 116, D19116.

- 1 Sassi F, Liu H L, Ma J, et al. 2013. The lower thermosphere during the Northern
2 Hemisphere winter of 2009: A modeling study using high altitude data
3 assimilation products in WACCM-X [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (16): 8954–8968.
- 4 Siskind D E, Stevens M H, Hervig M, et al. 2011. Consequences of recent Southern
5 Hemisphere winter variability on polar mesospheric clouds[J]. *J. Atmos. Sol.*
6 *Terr. Phys.*, 73(13), 2013-2021.
- 7 田文寿, 田红瑛, 商林, 等. 2011. 热带平流层与对流层之间相互作用的研究进展
8 [J]. *热带气象学报*, 27: 765-77. Tian Wenshou, Tian Hongying, Shan Lin, et al.
9 2011. Advances in Interactions Between Tropical Stratosphere and
10 Troposphere[J], *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27: 765-77.
- 11 Wang H, Fuller-Rowell T J, Akmaev R A, et al. 2011. First simulations with a whole
12 atmosphere data assimilation and forecast system: The January 2009 major
13 sudden stratospheric warming[J]. *J. Geophys. Res.*, 116, A12321.
- 14 Witze A. 2020. Rare ozone hole opens over Arctic — and it's big. *Nature*, 580: 18-19.
- 15 肖存英, 胡雄, 杨钧烽, 等. 2017. 临近空间 Aura/MLS 卫星数据同化技术及其在
16 数值预报中的应用. 第四届高分辨率对地观测学术年会论文集. P351, V419.
17 Xiao Cunying, Hu Xiong, Yang Junfeng, et al. 2017. Near-Space Aura/MLS
18 Satellite Data Assimilation Technology and its Application in Numerical Forecast
19 [J]. *Proceedings of the Fourth Annual Conference on High-resolution Earth*
20 *Observation (in Chinese)*. P351, V419.
- 21 Xie F, Li J, Tian W, et al. 2016. A connection from Arctic stratospheric ozone to El
22 Niño-Southern oscillation[J]. *Environ. Res. Lett.*, 11, 124026.
- 23 Xie, F, J. Li, J. Zhang, et al. 2017. Variations in North Pacific Sea Surface
24 Temperature Caused by Arctic Stratospheric Ozone Anomalies[J]. *Environ. Res.*
25 *Lett.*, 12, 114023.
- 26 Xu J Y, Li Q Z, Yue J, et al. 2015. Concentric gravity waves over Northern China
27 observed by an airglow imager network and satellites[J]. *J. Geophys. Res.*, 120,
28 11058-11078.
- 29 Yi F, Zhang S D, Zeng H J, et al. 2002. Lidar observations of sporadic Na layers over
30 Wuhan (30.5°N, 114.4°E) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(9), 591-594.

- 1 Zheng X, Zhou X, Tang J, et al. 2004. A meteorological analysis on a low
- 2 tropospheric ozone event over Xining, North western of China on 26-27 July,
- 3 1996[J]. Atmos. Environ., 38: 261-271.