

# 观测系统模拟和评估：进展及展望

李俊<sup>1</sup> 张鹏<sup>2,3</sup> 陈林<sup>2,3</sup> 韩威<sup>4</sup> 陆其峰<sup>2,3</sup> 巩欣亚<sup>2,3</sup> 王培<sup>1</sup> 李正龙<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>美国威斯康星大学麦迪逊分校, 麦迪逊 53706; <sup>2</sup>国家卫星气象中心, 北京 100081; <sup>3</sup>气象卫星创新中心, 北京 100081; <sup>4</sup>中国气象局数值预报中心, 北京 100081)

**摘要:** 开发、维护和使用新的天基观测系统非常昂贵, 并且从仪器发展和配置的完成到业务应用通常有明显的时间延迟(6~12个月)。因此需要事先对现有和未来观测系统的影响和应用技术进行定量评估, 以优化包括仪器指标确定、轨道选取、星座布局和数值天气预报(Numerical Weather Prediction - NWP)等应用。观测系统模拟试验(Observing System Simulation Experiments, OSSEs)是一种敏感性试验, 旨在回答新的观测系统或是对旧观测系统的重新部署带来的影响和价值的问题, 通常指在数值天气预报和气候预测中的影响。OSSEs还为在数值天气预报中应用新的数据类型以及优化已有数据类型提供支撑。数值天气预报模式和卫星资料同化系统的快速发展(例如全天候、全地表覆盖资料的同化等)以及未来大量的新型观测系统的部署(例如静止卫星上的红外高光谱及微波大气探测仪等)对OSSEs试验的同步发展带来挑战和机遇。未来的OSSE试验采用更高时空分辨率分析场、耦合系统分析场等来模拟更加逼近真实状态的自然场景(Nature Run, NR), 并采用更先进的辐射传输模式和同化系统来进行观测系统的模拟和影响试验等。同时基于数值天气预报模式的OSSEs将拓展到短时临近OSSEs, 气候OSSEs等多种形式的观测和模拟评估系统。

**关键词:** OSSE, OSE, FSOI

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.004

## An Overview on the Development of the Observing System Simulation Experiments (OSSEs)

Li Jun<sup>1</sup>, Zhang Peng<sup>2,3</sup>, Chen Lin<sup>2,3</sup>, Han Wei<sup>4</sup>, Lu Qifeng<sup>2,3</sup>, Gong Xinya<sup>2,3</sup>, Wang Pei<sup>1</sup>, Li Zhenglong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin-Madison, Madison 53706

<sup>2</sup> National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081 <sup>3</sup> FengYun Meteorological Satellite Innovation Center

(FY-MSIC), Beijing 100081 <sup>4</sup> Numerical Weather Prediction Center, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** The development, maintenance and use of a new space-based observing system is very expensive. There is usually a significant time delay (around 6 months to 1 year) from the completion of the instrument development and configuration to operational applications. It is very important to quantitatively evaluate the impacts and applications of the current and future observing system in advance to deploy it. The evaluation of the observing systems includes the instrument determination, orbit selection, constellation configuration, the applications to the numerical prediction and etc. The Observing System Simulation Experiments (OSSEs) is a sensitive experiment to study the value of new or proposed observing systems and the impacts of their data. An OSSE is designed to use the data assimilation method to investigate the potential impact of the future observing systems. In an OSSE, a nature run (NR) is generated by a very high temporal and spatial resolution numerical weather prediction (NWP) model output. The rapid development of NWP models and satellite data assimilation bring challenges as well opportunities to the development of OSSEs. Quick-OSSE, Hybrid OSSE and other forms of OSSE are extended to effectively evaluate future observing systems.

**Keywords:** OSSE, OSE, FSOI

### 0 观测系统模拟评估介绍

观测系统模拟试验(Observing System Simulation Experiments, OSSEs)是一种敏感性试验, 旨在回答新的观测系统带来的影响和价值问题, 通常指在数值天气预报中的影响。OSSEs中的“真实大气”是通过高时空分辨率模式模拟生成的自由大气(即所谓的自然场景Nature Run, NR), 所有的现有观测系统和未

来观测都是基于自由大气NR模拟得到, 通过资料同化和数值预报来研究在已有的观测系统基础之上, 未来观测系统对于数值预报误差的影响。Quick-OSSE和混合OSSE(Hybrid-OSSE)是根据传统OSSEs而做出相应的变化, Quick-OSSE主要应用在高分辨率的区域模式中对于未来观测的评估, 混合OSSE通过引入实际观测数据来有效减少传统OSSE的计算复杂性和由此带来的不确定性。

OSSEs类似于观测系统试验(Observing System Experiments, OSEs), 是一种“数据排除(data

收稿日期: 2021年1月10日; 修回日期: 2021年1月20日  
第一作者: 李俊(1965—), Email: Jun.Li@ssec.wisc.edu

denial) ”或“数据影响 (data impact) ”试验; 但 OSSEs 又不同于 OSE, 在 OSSEs 中所使用的数据都是实际观测数据, 而 OSSEs 中所使用的数据是从一个 NR 中模拟得到的观测数据。另外, 在 OSSEs 中, 大气的真实状态是未知的, 只能通过观测和分析去接近或逼近真实状态; 但在 OSSEs 中, 真实场景即 NR 已知 (Truth is known), 因此可以用来揭示数据同化系统的特性和各种观测数据对预报系统的影响。一般而言, OSEs 用于针对现有观测系统作评估, 而 OSSEs 用于未来观测系统的评估。Hybrid-OSSEs 用于未来观测系统评估, 但由于采用了现有观测系统的实际数据, 避免了 OSSEs 中模拟现有系统资料带来的不确定性, 因此其结果具有更高的可信度。

开展 OSSEs 的动机包括经济考量、观测到应用时效考量、科学性考量和决策依据考量。张鹏等<sup>[1]</sup>讨论了晨昏轨道卫星的平台特征, 观测特点和潜在应用, 并通过讨论对数值天气预报的影响来进一步讨论了发展晨昏卫星的可能途径。国际上第一颗晨昏轨道气象卫星 (风云三号 E 星) 即将发射, 未来将对数值天气预报的进一步改进提供新的观测数据。Privé 等<sup>[2]</sup>对高空长航无人驾驶飞机 (HALE) 的探空观测进行的 OSSEs 试验, 表明了探空资料可以改进台风结构和环境场的预报。由于开发、维护和使用一个新的天基观测系统非常昂贵, 并且从仪器发展和配置完成到数值预报业务应用通常有明显的时间延迟 (6~12 个月)。因此, 开展 OSSEs 可以事先对现有和未来天基观测系统的影响和应用技术进行定量评估, 以此了解新的天基观测系统的价值及其带来的影响。此外, OSSEs 提供的观测系统的定量信息可以用于数据同化系统的诊断和改进。最后, 基于 OSSEs 得到的结论, 为未来新的观测系统的规划、优化、发展和应用提供重要的决策依据。OSSEs 的应用包括定量评估观测系统对地球系统科学、数据同化和数值预报的潜在影响, 评估和/或开发新的数据处理和同化方法, 评估观测系统的设计和优化配置 (例如覆盖范围、分辨率、精度和数据冗余等), 以及优化全球天气和气候观测系统。

美国和欧洲早已开展大量的 OSSEs 研究<sup>[3-7]</sup>。随着航天和遥感产业的蓬勃发展, 中国也非常重视 OSSEs 在遥感认证和观测系统规划中的作用, 尤其是建立和发展面向风云气象卫星观测的模拟和预报影响评估系统。本文第一部分介绍了几种主要的观测系统评估方法, 包括传统 OSSEs 的概念及几大要素; 第二部分介绍了 OSSEs 的发展历史, 取得的主要成就以及局限性; 第三部分介绍了 OSSEs 的近期进展; 第四部分总

结了 OSSEs 的重要意义及未来展望。

## 1 观测系统评估的几种主要方法

### 1.1 观测系统试验 (OSEs)

OSEs 是一种传统的评估一个特定现有观测系统对于数值天气预报影响的方法。OSEs 通常由两个覆盖相同时间的试验组成, 分为 3 个步骤:

①控制试验, 试验同化业务运行中使用的全部分观测;

②对比试验, 从同化过程中系统地添加或去除选定观测数据集;

③基于控制试验和对比试验的比较, 评估该类型观测数据集时对数值天气预报质量的影响。

OSE 首要的也是最主要的的应用在于对新的观测资料同化的效果评估。当新的观测资料进入资料同化系统时, 首先评估新的观测资料与之前的所有观测资料及分析场的契合程度, 其次就是需要评估新的观测资料对于预报效果产生的正影响, 以及正影响的大小。由于评估一种新型观测资料的影响不能仅凭单个试验或者短时间的试验, 因此 OSE 通常需要长期稳定地运行一段时间, 并且采用不同季节的月平均统计检验试验, 因此需要大量的运算资源。另外, OSE 还可用于研究不同资料同化方法对观测系统的影响。

### 1.2 观测影响预报灵敏度方法 (FSOI)

另一种主要的观测评估方法是基于伴随 (Adjoint) 诊断的评估方法, 被称作观测影响预报灵敏度 (FSOI) 方法<sup>[8]</sup>。FSOI 方法是由 Langland 等<sup>[9]</sup>介绍应用。FSOI 方法使用四维变分资料同化系统 (4DVar) 中的基础算子 (观测算子、线性算子、伴随算子) 来量化某种类型观测对于分析场或预报场误差的灵敏度。FSOI 的特征在于无需添加或去除特定类型的观测数据, 而是所有观测数据均在同化系统中时, 某种类型的观测数据对预报结果的影响直接进行评估。在 FSOI 计算方法中, 不需要从预报开始来评估观测是否改进了分析场, 并可以作为一种诊断方法来对观测进行质量控制。

与 OSE 相比, FSOI 方法主要有两个优势: 第一, FSOI 无需长时间运行即可获得一个稳定结果; 第二, FSOI 无需从观测系统中添加或去除选定的观测数据集, 而采用独立于观测系统运行的伴随矩阵进行评估。如果同化模式并不是四维变分系统或者并没有与此模式相对应的伴随算子, 则很难用 FSOI 方法对观测系统进行评估。因此, FSOI 作为 OSEs 的一种补充评估方法, 也是非常好的检验某种类型观测数据贡献的手段, 二者通常会显示非常相似的评估结果。但 FSOI

得到的结果并不是直接的预报影响效果，而是一种敏感性试验结果，表明预报误差的减少对某种观测的敏感性。

### 1.3 观测系统模拟试验 (OSSEs)

OSSEs主要用于在卫星载荷还未发射前对未来观测资料的定量评估。OSSEs与OSEs类似，只不过OSSEs中采用的是模拟观测而非真实观测资料。因此OSSEs也被视为对OSEs的一个扩展，用于模拟和评估未来观测系统，当然现有观测系统也必须一并考虑在内。OSSEs通常有以下的几个步骤组成：

①在整个OSSEs的试验时段内，建立一个模拟的“真实”大气状态场用于观测数据的模拟、订正和数据同化结果的验证，在OSSEs中被称作NR。作为真实大气的代表，NR并不是现实世界中的真正大气场景。通常，NR来自于高时空分辨率、高精度的，且自由运行的（无观测数据融入）NWP模式输出结果。该模式应尽可能独立于用作资料同化和影响试验的模式。OSSE中真实场景已知，因此可以验证和揭示数据同化系统的方法和特性，以及各种观测数据对预报的影响。

②模拟所有类型的观测数据集，包括已有的观测系统和未来的观测系统；同时模拟所有观测数据集的观测误差，包括不同通道之间和邻近观测点之间的相关性误差。OSSEs的优势在于可以模拟各种新的观测类型数据，并且要求模拟观测应尽可能真实（表现出与实际观测相同的系统影响，包含与实际观测相同的误差特性）。OSSEs在对各种现有的以及未来的观测系统进行模拟时，需采用具有实际意义的观测轨道和参数等进行观测模拟。

③控制试验，试验同化所有现有业务同化系统中的观测模拟数据集。

④对比试验，在控制试验基础上添加待评估的新的观测类型的模拟数据集；或者对已有的观测类型采用新的部署或同化策略等。

⑤基于控制组和对比组的比较，评估新的观测类型、已有观测类型的新的部署或同化策略等对数值天气预报的影响。

开展OSSEs有3个主要作用：1) 定量评估一个新型的观测系统未来能否对数值天气预报产生正效果或减少数值预报误差，并定量计算减少的误差值。2) 通过OSSEs对一个新型观测系统做出设计和优化决策。相比于发展一套成熟的观测系统而言，开展OSSEs的经济成本微不足道。并且，通过OSSEs可对现有的业务同化系统进行试验和升级，缩短从仪器载

荷发展和配置到实现数值预报业务应用的时间周期。3) 通过OSSEs研究资料同化系统在已知“真值”条件下的表现。

图1为OSSE的组成结构，其中所有类型的观测模拟资料应来自于具有高时空分辨率和高精度的NR，资料同化和数值预报系统应采用与目前业务同化系统尽可能一致的模式和设置。注意产生NR的预报模式应与资料同化后的数值预报模式不同，以此来避免在OSSE中出现预报模式同卵双生（identical twin）的问题。当OSSE用于先进观测系统影响试验时，采用的同化系统应该是先进的和经过良好测试的，并且OSSE须与实际的数值天气预报业务系统同步，所使用的数值天气预报中的各个分系统和组件须是业务中真实使用的系统和组件。OSSE应定期运行以用于评估观测系统调整（如现有仪器退役等）或新仪器部署带来的影响。最后为了保证OSSE的可信度，还需对OSSE各要素（NR、模拟、预报影响等）进行检验。

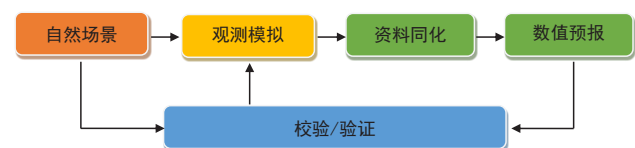


图1 观测系统模拟试验 (OSSE) 组成结构  
Fig. 1 The structure and components of the OSSEs

## 2 OSSE的发展历史及主要局限

早在1954年，Newton提出了观测系统对数值天气预报（NWP）影响的几个问题，包括应在哪些地方增加观测站点，对探空数据的准确性要求多高，以及最佳的观测网络密度等。针对温度、水汽和风场资料等，全球大气研究方案（GARP）在1967—1973年，通过对数值预报的影响进行了大型试验和评估<sup>[10]</sup>。为了检验和评估更多未来的观测类型对数值预报的潜在影响，OSSE的方法逐渐被提出并得到发展<sup>[3-5, 11-12]</sup>。Arnold和Dey<sup>[13]</sup>在综述文章中总结了早期OSSE的方法、适用性和局限性，以及对未来OSSE的设想。

大量研究表明，在开发和部署新的观测系统之前，OSSE有助于回答有关新的观测系统的潜在影响，以及观测资料的最佳使用方法等众多问题，例如：

1) 自1985年开始，Atlas等开展了一系列全球OSSE来研究极轨卫星温度、湿度和风廓线的相对影响，结果表明风廓线数据在纠正分析误差及改善天气预报方面有着巨大潜力<sup>[14-15]</sup>，进一步研究表明500 hPa以上的上层风相对于下层风而言，对数值预报提供了大部分的影响<sup>[16]</sup>。

2) 针对天基多普勒测风激光雷达 (DWL) 的轨道配置和功率的影响<sup>[3, 17-18]</sup>, 以及在全球风观测系统和全球对流层风探测器任务中的应用, OSSE被用于决定对雷达测风的具体需求<sup>[4, 19-20]</sup>。

3) 在ERS和NSCAT散射计发射前通过OSSE研究其潜在影响, 相关结论在仪器发射后得到证实。OSSE还被用于开发和测试包括星载被动和主动微波遥感表面风场数据同化方法, 首次获得了散射计数据、SSM/I风速数据在数值天气预报中可以产生有利影响的结果<sup>[16, 21-22]</sup>。

4) 高光谱红外大气探测仪<sup>[23]</sup>观测结果的定量影响以及清云处理的重要性, 这一点后来也通过大气红外探测仪 (AIRS) 的实际数据得到证实<sup>[24]</sup>。

在早期的OSSE研究中, 由于可用的模型非常有限, 用于生成NR和模拟观测的模式与数据同化预报的模式是完全一样的<sup>[25]</sup>, 即著名的“同卵双生”问题。由于忽视了物理参数化和插值误差, 导致自由运行的NR并不能完全真实的反应自然场景的“真值”, 从而使得数据同化预报的结果与NR非常接近。因此, 无论是对已有的还是未来的观测类型而言, 其观测与背景偏差 (O-B), 观测与分析偏差 (O-A), 及分析与背景偏差 (A-B) 等检验统计量, 与实际业务相比都严重偏低<sup>[3, 26]</sup>。事实上, 在同卵双生的OSSE中, 由于采用同样的模型对观测进行模拟, 使得模拟观测数据集与背景场具有高度一致的系统特性, 这也导致在同化中只需非常少量的观测就达到了极好的预报效果。而现实中具有高时空分辨率、全球覆盖的观测类型, 例如全球卫星资料, 其观测误差空间不能被有效地模拟, 故其影响也难以被准确评估。

Arnold和Dey<sup>[13]</sup>提出了“异卵双生”的OSSE方法, 即采用一个模式用于生成NR和模拟观测, 而采用另一个模式用于OSSE的同化预报; 但两个模型之间的差异应小于真实大气与业务数值预报模式之间的差异<sup>[17, 27-28]</sup>。Stoffelen等<sup>[26]</sup>对异卵双生的OSSE方法在观测模拟评估中的效果进行了检验。显然, 这是对同卵双生OSSE的一种很有效的改进方法, 但仍然不能完全消除OSSE对模式的依赖性。为进一步减小同卵双生问题的影响, 另一种常用方式是采用一个高空间分辨率、高精度的模型来生成NR和模拟观测, 而采用一个空间分辨率相对较低的OSSE的同化预报系统。虽然此法对部分研究适用, 但仍然存在一个潜在风险是无法实际评估未来观测系统在未来同化预报中的最佳同化策略及其影响问题。

此外, 由于NR本身的局限性 (例如空间分辨

率, 物理参数化方案), 对各种类型观测覆盖范围和观测误差特性模拟能力的局限性 (例如辐射传输模式的准确性, 模拟观测误差及误差相关性是否真实), 以及同化系统的先进性等问题, 都使得开展OSSE研究和应用具有一定局限性。不过, 通过比较O-B和O-A的分布特征, 单点观测系统影响试验, OSSE校验等方法, 可以对OSSE的可靠性和局限性进行检验。最后, 所有的OSSE都不可以得出超过上述局限性的结论。

### 3 OSSEs近期重要进展

#### 3.1 关于 NR

早期的OSSEs主要受到模型发展的限制, 无法采用真正具有高时空分辨率和高精度的模型来生成NR。目前, 全球发布的成熟可用的NR只有ECMWF发布的T511 NR<sup>[29]</sup>和美国NASA的全球模式和同化中心GMAO的科学家发布的G5NR<sup>[30]</sup>。在此基础上, 美国NOAA的科学家近期发布了一个更先进的空间分辨率为7 km的OSSE系统<sup>[5]</sup>。G5NR采用了更高空间分辨率的模式生成NR, 并且在传统观测、辐射观测、掩星弯曲角等观测类型误差进行模拟时采用了随机误差+偏差的方法, 表1总结了2个OSSEs系统的主要组成要件及其特征。

表1 T511 NR和G5NR的组成要件对于GNSS/RO和GEO-HSS两种观测类型的比较<sup>[5, 29-30]</sup>

Table 1 The comparison between T511 NR and G5NR for the simulation of GNSS/RO and GEO-HSS<sup>[5, 29-30]</sup>

要素	系统组件	T511 OSSE	G5NR OSSE
NR	Nature Run	ECMWF T511	GMAO 7 km (ECMWF T1279)
观测类型	传统观测误差	无偏观测	随机误差+偏差
	辐射观测误差	随机误差	随机误差+偏差
	GNSS/RO 观测类型	反射率	弯曲角
	GNSS/RO 观测误差	无	随机误差+偏差
	Geo-HSS 观测模拟	SARTA (U. Wisconsin)	CRTM (JCSDA)
全球同化预报系统	GDAS 版本	2012	2014
	GDAS 分析场	Hybrid GSI/EnKF (T382/T190)	Hybrid GSI/EnKF (T574/T574)
	GDAS 预报	T382 GSM	T1534 GSM
	辐射偏差订正	Two part, slow convergence	Unified, fast convergence
	CRTM 版本	2.0.5	2.1.3
	VSDDB(检验 S/W)	Version 16	Version 17

事实上, 无论是T511 NR还是G5NR的分辨率都不够高, 为了更好地模拟真实大气的状态, 尤其是模拟更多中小尺度的自然现象, 例如对对流云系统的模拟等, 仍然需要更高分辨率的模式。来自ECMWF与橡树岭国家实验室的科学家近期完成了世界上第一个平均网格间距为1.4 km的地球大气季节性尺度全

球模拟<sup>[31-32]</sup>，该模拟是在橡树岭的Summit计算机（截至2019年11月世界上最快的计算机）上用改编版的ECMWF综合预报系统（IFS）运行的。与9 km网格间距和参数化的模型相比，最新的1.4 km网格化间距模型的模拟结果可以很好地模拟深对流系统等，对于中小尺度的自然现象的仿真具有更好的保真度。

### 3.2 关于 Quick-OSSE

Quick-OSSE是指在较短的时间内通过数据同化之后进行单一预测试验；它的优点是经济，运行速度快，有时可以用来回答与某一特定天气（例如台风或暴雨）有关的问题，或用来揭示特定观测系统的影响潜力；缺点是效用有限，因为它们通常不能得到统计上显著的定量试验结果。Quick-OSSE对于数据同化影响分析有广泛的应用<sup>[6, 31-35]</sup>。高时空分辨率的高精度大气温湿度场为局地天气预报中的强风暴系统（LSS）的预报提供重要信息。对于来自地球静止轨道（GEO）的高光谱分辨率或高光谱红外探测仪（统一称之为GEO-HSS）为大气动力场和热力场提供了前所未有的连续三维信息，这对数值模式预报提供了重要的帮助。为了证明GEO HSS探测仪辐射对LSS预报的价值，Li等<sup>[7]</sup>开发了一个区域quick-OSSE框架，包括高分辨率NR的运行生成、综合观测模拟与验证以及对LSS预报的影响研究。结果表明，在现有的低地球轨道（LEO）探测仪的基础上，GEO HSS探测仪可以为LSS预报提供正影响（整体均方根误差降低3.56%）。此外，更频繁的同化和更小的稀疏距离允许更多的观测被同化，并可能进一步增加GEO HSS探测仪观测在预报中的正效果。

Li等<sup>[35]</sup>利用快速的区域观测系统模拟试验，研究了利用小卫星填补传统气象卫星缺失带来的影响。他们的研究表明，单个小卫星，无论是红外高光谱还是微波探测仪，都能够对局地强风暴天气的预报有所改进。然而，为了填补传统卫星缺失带来的影响，需要发射三颗甚至更多的小卫星，来增加观测的覆盖面，以弥补小卫星精度略低、通道略少的缺陷。

陈柯等<sup>[36]</sup>基于我国候选的50 GHz、118 GHz、183 GHz、380 GHz和425 GHz五频段静止轨道微波辐射计载荷方案，开展了地球静止轨道微波观测系统模拟试验，研究了其观测时间分辨率、频段选取和观测误差对台风预报的影响，以2018年台风“玛利亚”和“山竹”为案例分析了静止轨道微波资料同化对台风预报的影响。试验结果表明，对于静止轨道微波资料同化应用，提高观测资料的时间分辨率、增加通道数量和降低噪声水平，能够有效提升台风数值预报性能。

### 3.3 关于 Hybrid OSSE

传统的OSSEs试验可以对观测数据的影响进行很好的评估，但是在进行模拟和计算中有两个难点，其一是关于如何模拟已有的观测数据并与实际一致的观测误差，另一个是如何对OSSEs进行验证和校正（即OSSEs中现有观测系统对预报的影响应与业务预报系统中观测数据的影响接近或相当）。与传统OSSEs不一样，Hybrid OSSE不使用传统意义上的自由运行产生的NR，而是使用高时空分辨率的再分析资料作为NR，比如ERA5。这使得Hybrid OSSE与传统OSSEs相比有两个优势：1）只有未来观测数据是从高时空分辨率的再分析场中模拟得到的，而其他已有观测数据则是直接用实际的观测数据；2）预报结果不仅可以与再分析资料进行比较，还可以与实际观测来比较进而对未来观测系统进行有效的评估，例如热带气旋最佳路径和在实际天气事件中获得的雨量器数据。Hybrid OSSE大大减少了模拟已有观测数据的复杂性和不确定性，可以更有效的提高对于目标观测的预报影响评估试验结果。图2 给出用ERA5再分析资料作为NR模拟的GEO CrIS FSR第1183通道亮温，和CrIS FSR实际观测的亮温进行比较，其中在GEO CrIS FSR

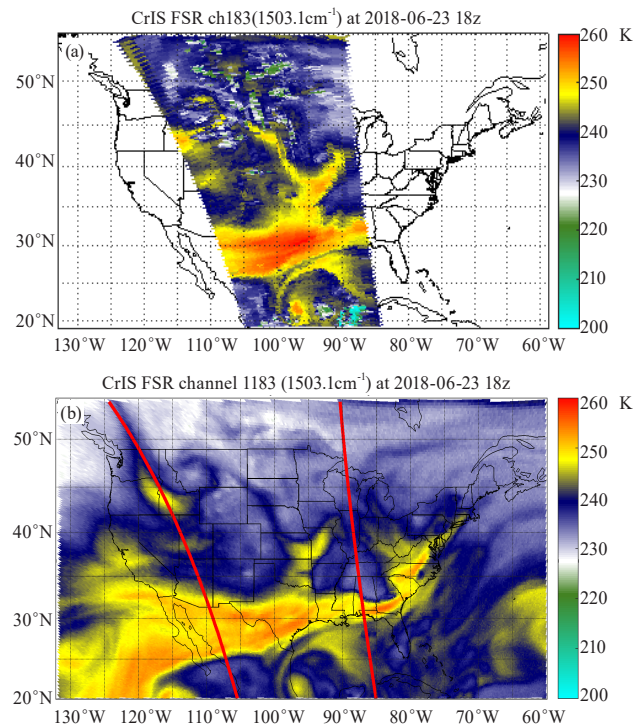


图2 实际观测的CrIS FSR 1183通道亮温 (a) 和用ERA5做为NR模拟的静止卫星CrIS FSR 1183通道亮温 (b) (注意两者的观测角度不一样)

Fig. 2 The brightness temperature of the CrIS FSR channel 1183 from the real observations (a) and the simulated GEO satellite (b) (Note the two have different zenith angles)

图中，LEO观测数据已经用红线标出，可以看出模拟亮温可以反映出与实际观测非常相近的天气系统和大气干湿状态，并且由于在同一时刻静止卫星的观测范围远大于极轨卫星，所以利用再分析数据模拟未来观测系统也是可行且较为省时的一种方法。

Okamoto等<sup>[37]</sup>为研究搭载在下一代的葵花静止地球轨道卫星上的红外高光谱大气探测仪(Geo-HSS)的潜在影响，设计了基于再分析资料(ERA5)为NR的Hybrid OSSE试验。采用一个典型的强降水事件发生时期的具有高精度的再分析资料(ERA5)作为“真实的”大气廓线信息，对地球静止卫星上的红外高光谱大气探测仪观测的模拟仿真试验。Wang等<sup>[38]</sup>在Hybrid OSSE中，对GEO上搭载全光谱分辨率的高光谱红外探测仪CrIS的可能影响开展了研究。选择2018

年和2019年的两个局地强风暴(LSS)天气过程案例来评估GEO CrIS-FSR的影响。图3给出了ERA5再分析数据中的V风场500hPa分析图(图3a)，控制试验和模拟试验中的V风场分别在图3b和图3c。其中控制试验是指对现有观测数据的同化，包括传统观测数据(GTS)，微波卫星资料(AMSUA和ATMS)和红外卫星资料(IASI和CrIS-FSR)；模拟试验用模拟的静止卫星CrIS-FSR数据代替极轨卫星CrIS-FSR数据，其他观测数据不变。为了更好的比较同化模拟GEO CrIS-FSR和观测CrIS-FSR的变化，图3d是ERA5再分析场和控制试验的差别(ERA5-CNTRL)，它的标准误差协方差(standard deviation)是3.51 m/s，图3e是ERA5再分析场和模拟试验的差别(ERA5-EXP)，它的标准误差协方差是3.41 m/s。所以对于500 hPa风

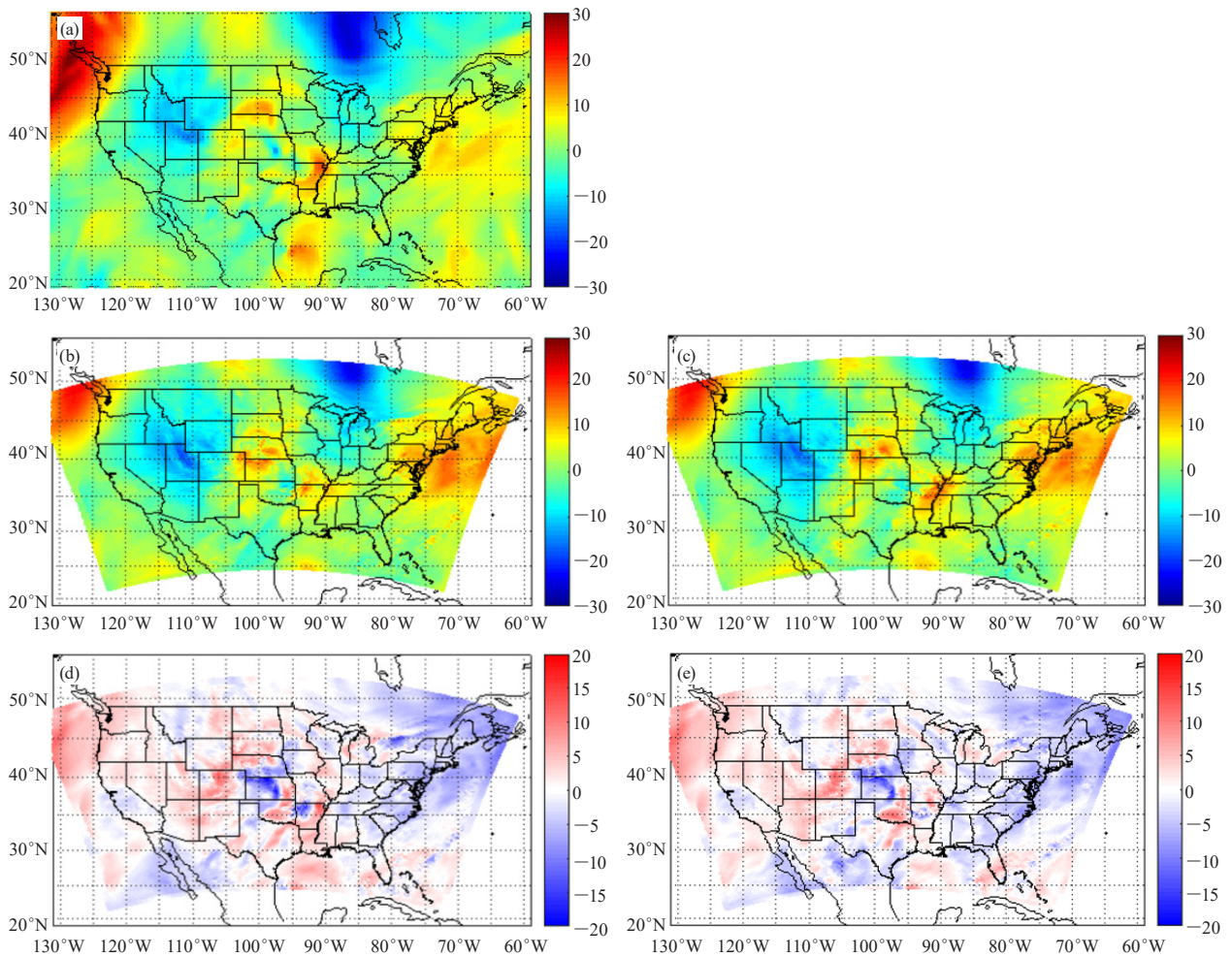


图3 500 hPa 风场图 (单位: m/s)

(a) ERA5再分析资料风场; (b) 从控制试验中得到V风场; (c) 从模拟试验中得到V风场; (d) ERA5再分析资料和控制试验V风场的差别(ERA5-CNTRL); (e) ERA5再分析资料和模拟试验V风场的差别(ERA5-EXP)

Fig. 3 The V-wind at 500 hPa (unit: m/s)

(a) ERA5 reanalysis fields; (b) CNTRL; (c) EXP; (d) the differences between ERA5 and CNTRL (ERA5-CNTRL); (e) the differences between ERA5 and EXP (ERA5-EXP)

场, GEO CrIS-FSR可以提供更大的观测范围和观测数据, 因此使预报结果更接近NR, 通过同化GEO CrIS-FSR让V风场在500 hPa的误差降低3%。

进一步的分析表明, GEO CrIS FSR 对于大气温度、湿度、降水量以及风场的预报都有所改善, 总的RMSE降低了5%。Hybrid OSSE的优势在于, 它允许在更现实的环境中评估未来的观测结果, 而传统的OSSEs则需要对系统进行复杂的校准, 以确保结果的真实性。所谓校准(calibration)是指微调OSSE系统使得当OSSE完全用于现有观测系统时, 得到的影响结果与OSE试验结果相当, 或与业务预报系统中观测数据的影响相当, 这是OSSE中的一个很大挑战, 同时耗费大量的计算。而Hybrid OSSE则避免了校准的问题, 只需做OSSE确认(verification)即可, OSSE的确认可以通过比较两组试验完成, 第一组是完全采用现有观测系统数据, 而第二组则是在第一组的基础上将某个仪器(例如极轨卫星高光谱大气探测仪)的实际观测替换成模拟观测, 两组试验结果一致即表明Hybrid OSSE系统可信度高, 可以用于评估未来同类型的观测系统(例如静止卫星高光谱大气探测仪)。

#### 4 总结

开发和建立集轨道模拟、导航模拟、观测模拟和影响评估于一体的综合OSSE系统对地球系统科学发展、数据同化和数值预报研发、观测系统设计和优化配置等具有重要意义。传统的OSSE存在以下四个方面的局限性:

1) 基于自由大气的NR难以真实反映诸如台风和局地强对流等高影响天气事件;

2) 现有系统的观测特性特别是误差特性难以在模拟中得到客观表征;

3) 用于评估影响的预报模式既不能和NR太接近也不能相差太远, 如果相差太远, 则难以证明影响, 而如果太接近, 则影响可能无意义;

4) 传统OSSE很难进行校准, 校准意味着需要对OSSE系统进行调整, 以便将其应用于现有系统真实观测时, 来自真实数据和模拟数据的影响是接近且可比较的。

Hybrid OSSE系统能有效克服以上局限。其所有模拟基于高分辨率分析场或再分析场, 因而能较好的反应真实场景, 而模拟只针对未来观测系统, 试验中现有系统都采用实际观测资料, 避免了OSSE校正及模拟现有系统带来的问题。Hybrid OSSE可以成为未来观测系统模拟和评估的重点研究方向。

未来的综合系统应能够模拟来自任意轨道包括

高、中、极、低四类轨道的各类仪器观测, 能够评估仪器性能指标、时间分辨率、空间分辨率和空间覆盖范围等综合需求, 能够用于观测系统规划和星座优化布局。未来OSSE综合系统需要更全面的耦合模型来生成NR, 例如通过地球系统大科学装置将大气、海洋、陆地模型都耦合起来, 生成可以更好地代表自然中大气状态的NR, 以及模拟自然大气中的物理和化学现象。Halliwell 等<sup>[39-40]</sup>采用一个大气和海洋耦合模型生成的NR开展了OSSE研究。也可采用更高时空分辨率的区域和全球分析场或再分析场用于Hybrid OSSE。并且未来的OSSE NR应具有云雨大气下的观测模拟能力; 先进同化系统(尤其云雨大气下); 先进的观测模拟技术(主被动、全天候、全地表、全波段); 新型OSSE概念(不通过传统的NWP同化), 例如短临预报型OSSE和天气分析诊断型OSSE等。

#### 参考文献

- [1] 张鹏, 杨磊, 谷松岩, 等. 晨昏轨道卫星的气象应用需求分析. 气象科技进展, 2015, 5(2): 6-12.
- [2] Privé N C, Xie Y, Koch S, et al. An observing system simulation experiment for the unmanned aircraft system data impact on tropical cyclone track forecasts. 2014. Monthly Weather Review, 142, 4357-4363.
- [3] Atlas R. Atmospheric observations and experiments to assess their usefulness in data assimilation Special Issue-Data assimilation in meteorology and oceanography: theory and practice. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1997, 75, 111-130.
- [4] Atlas R, Bucci L, Annane B, et al. Observing system simulation experiments to access the potential impact of new observing system on hurricane forecasting. Marine Technology Society Journal, 2015, 49: 140-148.
- [5] Hoffman R N, Atlas R. Future observing system simulation experiments. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97: 1601-1616.
- [6] Jones T A, Koch S, Li Z. Assimilating synthetic hyperspectral sounder temperature and humidity retrievals to improve severe weather forecasts. Atmospheric Research, 2017, 186: 9-25.
- [7] Li Z, Li J, Wang P, Lim A, et al. Value-added impact of geostationary hyperspectral infrared sounders on local severe storm forecasts-via a quick regional OSSE. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 35(10): 1217-1230.
- [8] Cardinali C. Forecast sensitivity observation impact with an observation-only based objective function. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2018, 144(716): 2089-2098.
- [9] Langland R H, Baker N L. Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2004, 56(3): 189-201.
- [10] Perry J S. The Global Atmospheric Research Program. Reviews of Geophysics, 1975, 13(3): 661-667.
- [11] Nitta T. Some analyses of observing systems simulation experiments in relation to the First GARP Global Experiment. GARP Working Group on Numerical Experimentation, Report 10, 1975: 1-35.
- [12] Lord S J, Kalnay E, Daley R, et al. Using OSSEs in the design of the future generation of integrated observing system. Long Beach: 1st Symposium on integrated Observations Systems, 1997.
- [13] Jr Arnold C P, Dey C H. Observing-Systems Simulation Experiments: Past, Present, and Future. Bulletin of the American Meteorological Society, 1986, 67(6): 687-695.
- [14] Atlas R, Kalnay E, Halem M. The impact of satellite temperature sounding and wind data on numerical weather prediction. Optical Engineering, 1985, 24(2): 242341 <https://doi.org/10.1117/1.1360000>

- org/10.1117/12.7973481.
- [15] Atlas R, Kalnay E, Susskind J, et al. Simulation studies of the impact of future observing systems on weather prediction. Proc Seventh Conf On NWP, 1985: 145-151.
- [16] Atlas R. The effects of marine winds from scatterometer data on weather analysis and forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82: 1965-1990.
- [17] Rohaly G D, Krishnamurti T N. An observing system simulation experiment for the Laser Atmospheric Wind Sounder (LAWS). Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1993, 32: 1453-1471.
- [18] Zhang L, Pu Z. An observing system simulation experiment (OSSE) to assess the impact of Doppler Wind Lidar (DWL) measurements on the numerical simulation of a tropical cyclone. Advances in Meteorology, 2010: 743863.
- [19] Atlas R, Riishojgaard L P. Application of OSSEs to observing system design. In: Ardanuy P E, Puschell J J. Remote Sensing System Engineering. Proceedings of the SPIE, 2008, 7087: 708707.
- [20] Riishojgaard, L P, Ma Z, Masutani M. Observation system simulation experiments for a global wind observing sounder. Geophysical Research Letters, 2012, 39: L17805.
- [21] Atlas R, Hoffman R N, Brin E. The impact of ERS-1 scatterometer data on GEOS and NCEP model forecasts. 11th Conference on Numerical Weather Prediction. Boston: American Meteorological Society, 1996: 99-101.
- [22] Atlas R, Hoffman R N. The use of satellite surface wind data to improve weather analysis and forecasting. In: Halpern D. Satellites, Oceanography and Society. Amsterdam: Elsevier, 2000: 57-78.
- [23] Menzel W P, Schmit T J, Zhang P, et al. Satellite-based atmospheric infrared sounder development and applications. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(3): 583-603.
- [24] Chahine M T, Pagano T S, Aumann H H, et al. AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87: 911-926.
- [25] Halem M, Dlouhy R. Observing system simulation experiments related to space-borne Lidar wind profiling. Part 1: Forecast impacts of highly idealized observing systems. Journal of Jiangsu Vocational and Technical Institute of Economics and Commerce, 1984: 272-279.
- [26] Stoffelen A, Marseille G J, Bouttier F, et al. ADM-Aeolus Doppler wind lidar Observing System Simulation Experiment. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2006, 619: 1927-1948.
- [27] Keil M. Assimilating data from a simulated global constellation of stratospheric balloons. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 130: 2475-2493.
- [28] Lahoz W A, Brugge R, Jackson D R, et al. An observing system simulation experiment to evaluate the scientific merit of wind and ozone measurements from the future SWIFT instrument. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131: 503-523.
- [29] Andersson E, Masutani M. Collaboration on Observing System Simulation Experiments (Joint OSSE). ECMWF News Letter, 2010, 123: 14-16.
- [30] Gelaro R, Putman W M, Pawson S, et al. Evaluation of the 7-km GEOS-5 nature run. Greenbelt : NASA Goddard Space Flight Center, 2015: NASA/TM-2014-104606/Vol36.
- [31] Boukabara S-A, Moradi I, Atlas R. Community global observing system simulation experiment (OSSE) package (CGOP): description and usage. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, 33: 8.
- [32] Wedi N P, Polichtchouk I, Dueben P, et al. A baseline for global weather and climate simulations at 1 km resolution. Journal of Advances in Modeling Earth System, 2020, 12(11). <https://doi.org/10.1029/2020MS002192>.
- [33] Wang H L, Huang X Y, Chen Y S. An observing system simulation experiment for the impact of MTG Candidate Infrared Sounding mission on the regional forecasts: system development and preliminary results. ISRN Meteorology, 2013: 971501.
- [34] Zhang S X, Pu Z X, Posselt D J, et al. Impact of CYGNS ocean surface wind speeds on numerical simulations of a hurricane in observing system simulation experiments. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2017, 34: 375-383.
- [35] Li Z, Li J, Schmit T J, et al. The alternative of CubeSat based advanced infrared and microwave sounders for high impact weather forecasting. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2019, 12 (2): 80-90.
- [36] 陈柯, 洪鹏飞, 韩威, 等. 基于GRAPES 4D-Var的静止轨道微波观测系统模拟试验研究. 气象学报, 2021, 待发表.
- [37] Okamoto K, Owada H, Fujita T, et al. Assessment of the potential impact of a hyperspectral infrared sounder on the Himawari follow-on geostationary satellite. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 2020, 16: 162-168.
- [38] Wang P, Li Z, Li J, et al. Added-value of GEO-hyperspectral infrared radiances for local severe storm forecasts using hybrid OSSE method. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38, 1315-1333.
- [39] Halliwell Jr G R, Srinivasan A, Kourafalou V, et al. Rigorous evaluation of a fraternal twin ocean OSSE system in the open Gulf of Mexico. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31 (1): 105-130.
- [40] Halliwell Jr G R, Kourafalou V, Le Henaff M, et al. OSSE impact analysis of airborne ocean surveys for improving upper-ocean dynamical and thermodynamical forecasts in the Gulf of Mexico. Progress in Oceanography, 2015, 130: 32-46.