

# CMA高分辨率陆面数据同化系统 (HRCLDAS-V1.0) 研发及进展

韩帅<sup>1</sup> 师春香<sup>1</sup> 姜志伟<sup>1</sup> 徐宾<sup>1</sup> 李显凤<sup>2</sup> 张涛<sup>1</sup> 姜立鹏<sup>1</sup> 梁晓<sup>1</sup> 朱智<sup>1</sup> 刘军建<sup>3</sup> 孙帅<sup>4</sup>

(1 国家气象信息中心, 北京 100081; 2 江西省气象信息中心, 南昌 330046;

3 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 4 南京信息工程大学, 南京 210044)

**摘要:** 回顾了中国气象局高分辨率陆面数据同化系统 (High Resolution China Meteorological Administration Land Data Assimilation System, HRCLDAS) 的研发历程, 重点介绍了HRCLDAS研发过程中的重要进展和突破, 概要阐述了这些进展对HRCLDAS业务化的贡献。主要包括: 引入1 km分辨率地形数据, 采用多重网格变分分析技术制作1 km分辨率气象驱动数据; 基于FY-2卫星1 km可见光通道、高分辨率地形及地表反照率等数据, 改善地面入射太阳辐射产品质量与空间分辨率, 利用辐射计算模型 (Hybrid) 模型与地面站日照时数、气温等观测资料模拟地面太阳辐射, 并利用多重网格变分分析技术实现二者融合; 实现东亚多卫星集成降水产品 (EMSIP) 与4万余自动站观测降水融合, 并实时生成格点融合产品, 针对陆面模拟分辨率高、数据量大的特点, 设计了分块并行与模式并行结合的计算方案, 建立了高效的土壤湿度模拟产品业务系统, 有效地推动各级气象部门开展相关业务应用工作。

**关键词:** HRCLDAS, 驱动数据, 陆面模式, 业务系统

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.013

## Development and Progress of High Resolution CMA Land Surface Data Assimilation System

Han Shuai<sup>1</sup>, Shi Chunxiang<sup>1</sup>, Jiang Zhiwei<sup>1</sup>, Xu Bin<sup>1</sup>, Li Xianfeng<sup>2</sup>,  
Zhang Tao<sup>1</sup>, Jiang Lipeng<sup>1</sup>, Liang Xiao<sup>1</sup>, Zhu Zhi<sup>1</sup>, Liu Junjian<sup>3</sup>, Sun Shuai<sup>4</sup>

(1 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081 2 Jiangxi Meteorological Information Center,  
Nanchang 330046 3 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002 4 Nanjing University of Information  
Science and Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** This paper reviews the development of HRCLDAS, a high-resolution land data assimilation system, focuses on the important progress and breakthroughs in HRCLDAS research and development, and summarizes the contribution of these developments to the HRCLDAS operation. These include the 1 km resolution of meteorological data by using multi-grid variation analysis technique; The ground Radiation product quality and spatial resolution based on the data of 1-km visible channel, high-resolution terrain and surface albedo of FY-2 satellite; Simulation of ground solar radiation using hybrid model and ground station sunshine hours, air temperature and other elements; Achieving the integration of the these information by using multiple grid variation analysis technology; Achieving integration of the East Asia satellite precipitation products (EMSIP) and observational data at 40-thousand automatic stations. A parallel calculation scheme combining the block parallel and mode is designed to realize efficient soil moisture simulation based on the characteristics of high terrestrial simulation resolution and large data volume. The HRCLDAS did promote all meteorological departments at varous levels to carry out related operation applications

**Keywords:** HRCLDAS, forcing data, land model, operation

收稿日期: 2017年6月26日; 修回日期: 2017年12月16日  
第一作者: 韩帅 (1989—), Email: hans@cma.gov.cn  
通信作者: 师春香 (1964—), Email: shicx@cma.gov.cn  
资助信息: 国家气象科技创新工程攻关任务“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”; 国家自然科学基金项目 (91437220); 国家气象信息中心青年基金 (NMICQJ201606)

## 0 引言

长期以来, 地面气象要素及土壤温湿度等数据的获取, 主要依靠地面人工站和自动站的观测仪器进行定时观测, 由于站点离散且分布不均匀, 难以覆盖整个中国区域。利用数学方法将站点观测值插值成格点数据, 在站点密集且空间变异较少的区域, 效果良好; 但是在地形复杂区域广阔但站点稀少的区域, 尤

其是在中国西部地区，单纯的数学方法难以获取高质量的格点实况数据。

最近的十几年，国内外在离线的陆面数据同化系统建设方面已经做了不少研究，取得了一定的成果<sup>[1-3]</sup>，他们的共同特点是将陆面的数值模式和卫星、雷达、站点观测等信息进行融合，获取更为可靠的地面气象要素场和陆表土壤温湿度、地表热通量等数据。

同时，高时空分辨率的陆面数据同化系统也在逐步发展，如美国大气研究中心（NCAR）的高分辨率陆面数据同化系统（HRLDAS）<sup>[4-5]</sup>已经具有能够提供土壤湿湿度的预报能力；韩国气象局（KMA）发展的韩国陆面数据同化系统（KLDAS）<sup>[6]</sup>与HRLDAS非常类似，着重于改进陆面模式驱动场。KLDAS已用于提供中尺度天气预报模式（WRF）模式的陆面初始场，但目前仍局限于个例研究。然而，由于各国陆面数据同化系统主要是为本国服务，注重对于本国的数据研究，因此即使在区域上包括了其他国家，这些其他国家的数据质量也难以保证。因此，建立我国自己的高时空分辨率陆面数据同化系统势在必行。

在国家气象科技创新工程驱动下，国家气象信息中心为此制定了长远发展规划，并确定了总体目标的制定和实施方案：在建设初期，根据当时的需求和业务能力，计划将系统研发分为四个阶段，第一阶段（CLDAS-V1.0）主要任务是搭建业务运行平台，重点在于对温度、气压、湿度、风速、降水和辐射等驱动数据的处理，优化地表、土壤和植被参数，并选择一个合适的陆面模式（美国NCAR开发的CLM），实现模式的实时运行，获取土壤温湿度等陆表变量产品；第二阶段（CLDAS-V2.0）主要任务是实现多个陆面模式的运行和多模式集成，并继续改进地表、土壤和植被参数和陆面驱动数据；第三阶段（CLDAS-V3.0）主要任务是实现地面观测土壤湿度、卫星反演土壤湿度的同化；第四阶段（CLDAS-V4.0）主要任务是实现卫星观测微波亮温数据的同化。

随着气象服务和市场的需要发展，研制更高分辨率的陆面数据同化系统已经迫在眉睫。2016年初，国家气象信息中心果断决策，提前开展了中国区域1 km陆面数据同化系统的研制；在经过1年的艰苦攻关，实现多项技术突破，建成CMA高分辨率陆面数据同化系统（HRCLDAS），实现提前2年完成气象科技创新工程目标。本文主要介绍HRCLDAS系统在研发的各个阶段和系统业务化中的发展历程。

## 1 主要研发进展

### 1.1 模式输入场的制备

#### 1.1.1 气温、气压、湿度、风速

地面2 m气温、湿度、地面气压、10 m风速4个要素的融合算法核心部分沿用了CLDAS-V1.0和CLDAS-V2.0系统的业务算法，既引入了美国海洋大气局地球系统研究实验室（NOAA/ESRL）开发的时空多尺度分析系统（STMAS）<sup>[7]</sup>。该系统通过不同尺度的分析方法，能够有效地捕捉陆面要素中的长波和短波信息，并考虑不同尺度的天气动力学限制条件，同时还可以结合不同时间的空间信息给予优化和最有效的提取观测信息。该系统的优点是避免了传统数据同化的关于背景误差协方差的一些不合理假设，以及节约在大尺度的计算时间和详细提取小尺度信息的时间，从而合理缩短同化过程的计算时间。因此，本系统继续沿用这一核心算法，同时为进一步描述1 km分辨率尺度的细节，尤其是气温、气压等随海拔高度变化较为明显的要素场，本系统引入美国国家航空航天局（NASA）和美国国防部国家图像测绘局（NIMA）联合测量制作而成的全球区域30 m空间分辨率地形数据产品，采用面积权重方法重采样制作亚洲区域0.01°空间分辨率的数字高程模型（DEM）地形参数数据<sup>[8]</sup>，对温度、气压等进行地形调整，其中温度递减率除了受地形高度的影响外，还可能受到风力、对流型天气等其他要素影响，谭晓光等<sup>[9]</sup>研究发现，使用一定范围内测站实际观测的温度与地形高度之间的线性关系的系数作为温度的垂直递减率来进行地形调整，可以既保持处理算法简单，又能够在一定程度上综合考虑上述影响。

为了对1 km陆面融合产品进行质量评估，国家气象信息中心对2016年1月1日—12月31日的小时数据进行了回算，并对其进行评估检验。本方案中陆面融合产品的评估所使用的“真值”为2380个国家级气象站点小时观测资料，观测时间与实况格点融合分析产品一致。利用双线性插值的方法，将融合分析产品插值到站点所在经纬度，与相应时刻的观测数据进行比较，具体如下表1所示。

表1 气温、相对湿度、风速偏差落区统计表  
Table 1 Statistics of the bias in air temperature, relative humidity and wind speed

气温	误差分布	±0.1 °C	±0.2 °C	±0.5 °C	±1 °C
	气象站点 (%)	60.6%	78.7%	93.0%	97.6%
相对湿度	误差分布	±1%	±5%	±10%	
	气象站点 (%)	60.6%	98.5%	99.7%	
风速	偏差分布	±0.5 m/s	±1 m/s	±1.5 m/s	
	气象站点 (%)	91.2%	98.4%	99.6%	

### 1.1.2 地面入射太阳辐射

在CLDAS-V1.0和CLDAS2.0版本的系统中,地面入射太阳辐射是利用基于对离散坐标算法的辐射传输模型(DISORT)对FY-2静止卫星可见光通道信息进行反演,从而获取地面入射太阳辐射,暂未将地面观测信息进行融合。

为进一步提高辐射数据质量,在HRCLDAS-V1.0的系統设计中,提出了融合我国观测站的辐射站数据。但目前我国辐射观测网密度较低,仅有99个业务观测站点,不能满足STMAS融合的要求。为获得更多的样本数据,采用Yang等<sup>[10]</sup>发展的Hybrid模型来模拟地面自动站辐射值。该模型计算简单,且考虑了大气中的辐射传输过程,无需局地校正,适用于不同海拔和气候区域。

该模型通过输入地面自动站常规观测的气温、气压、相对湿度以及日照时数等信息,结合站点所在经纬度、观测时刻太阳高度角等信息,最终计算得到小时分辨率的2400多个国家级自动站小时地面入射太阳辐射值。利用多重网格变分分析的方法对卫星反演的地面入射太阳辐射数据和Hybrid模型计算的站点观测地面入射太阳辐射数据进行融合,最终生成高分辨率地面入射太阳辐射产品。

通过利用2015年91个辐射观测站点数据与1°分辨率的云与地球辐射能量系统辐射资料(CERES-SYN1deg)、欧洲再分析辐射资料(ERA-Interim)、及本项目利用FY-2卫星直接反演的辐射(Solar-Swcdn)和反演结果与Hybrid计算的站点辐射融合结果(Solar-Swcdn-Merge)这四套数据产品的日平均数据对比发现,CERES卫星反演的SYN1deg产品效果最好,相关系数达到0.93,日平均数据均方根误差(32.14 W/m<sup>2</sup>)和平均偏差(6.73 W/m<sup>2</sup>)均为最小;相比之下,Solar-Swcdn-Merge模拟效果次之,相关系数为0.927;ERA-Interim再分析资料,相关系数只有0.86,相对较差。

### 1.1.3 小时累计降水

降水驱动数据是陆面模式中最重要驱动数据之一,降水驱动数据是否准确将对土壤湿度的模拟结果产生非常大的影响,采用东亚多卫星集成降水产品(EMSIP)<sup>[11-12]</sup>作为背景场,利用STMAS方法将背景场与全国4万多个站点观测数据进行融合,获取1 km分辨率降水融合产品。

国家气象信息中心在充分调研了多星降水集成技术的基础上,于2012年开展了多种卫星集成技术研究,实现国家卫星气象中心FY-2E/G红外1通

道亮温与FY-3B微波成像仪(MWRI)降水率、美国国家航空航天管理局(NASA)的热带降水测量卫星(TRMM/GPM)降水率、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的微波湿度计(NOAA-18/19 MHS)降水率、欧洲极轨卫星微波湿度计(MetOp-A/B MHS)降水率和美国海军卫星被动微波辐射计(DMSP-F16/F17/F18 SSMIS)降水率等8颗卫星的微波降水的集成,形成了东亚多卫星集成降水业务系统(EMSIP)。2014年5月29日该系统开始业务试运行,并于2014年末通过业务内网分对外提供数据服务。

为研制高时空分辨率的降水融合产品,HRCLDAS的降水产品设计了以下融合分析方案:首先从全国综合气象信息数据共享平台(CIMISS)获取了中国4万余个地面观测站点的逐小时降水观测数据;其次,STMAS参数的调试,在STMAS的众多参数中,影响半径能够控制STMAS选取多大范围内的站点观测降水用于订正卫星降水产品,针对选用的站点降水数据较多,影响半径分别选取了3、10、15、20、25等5个影响半径,利用STMAS融合技术对2015年6月8—9日两天的48个时次的EMSIP降水数据进行了融合试验,将所得到的降水数据插值到2380个国家级自动站点上,然后利用对应的观测值进行检验,计算两者之间的相关系数、均方根误差、偏差、平均降水量,结果如表2和表3所示,根据不同的融合半径试验评估指标,综合分析选取半径为25的方案进行降水融合产品的制作。另外,在研制初期,研发团队还分别选用EMSIP降水和目前国际主流的美国多卫星集成降水产品(CMORPH)为背景场,利用STMAS融合技术进行融合试验,对比分析发现,两者评估结果非常接近,项目组最终选择融合了国产FY卫星的EMSIP产品为降水背景场数据。

表2 不同半径下的个例评估结果(2015年6月8—9日)  
Table 2 Evaluation results of a case (June 8—9, 2015) at different radius

radius	相关系数	均方根误差	偏差	平均降水量	样本数
STAMS_3	0.8289	0.6918	0.0072	0.1865	109347
STAMS_10	0.9724	0.2946	0.0024	0.1817	109347
STAMS_15	0.9739	0.2861	0.0023	0.1816	109347
STAMS_20	0.9741	0.2852	0.0024	0.1817	109347
STAMS_25	0.9742	0.2845	0.0024	0.1817	109347

表3 不同背景场评估结果(2015年6月8—9日)  
Table 3 Evaluation results of different background fields

	STMAS融合	偏差	均方根误差	相关系数
独立性检验	EMSIP融合降水	-0.002486	0.633507	0.790721
	CMORPH融合降水	-0.002923	0.631492	0.792045



### 1.1.4 高分辨率地表参数

#### 1) 地表覆盖类型

通用陆面模式（CLM模式）以植被功能类型为基础划分地表覆盖。它将地表覆盖分为冰川、湖泊、湿地、及不同的植被功能类型，分别包括：裸土、温带常绿针叶林、寒带常绿针叶林、寒带落叶针叶林、热带常绿阔叶林、温带常绿阔叶林、热带落叶阔叶林、温带落叶阔叶林、寒带落叶阔叶林、温带常绿阔叶灌木、温带落叶阔叶灌木、寒带落叶阔叶灌木、极地C3草、非极地C3草、C4草和农作物。

模式中原有的地表覆盖类型数据分辨率为 $0.5^\circ$ ，这个精度对进行高分辨率陆面模拟而言，需要进行改进，并且数据在中国区域的准确性也存在一定的争议，因此需要用分辨率和准确性更好的地表覆盖数据对其进行替换。替换所使用的数据库基于冉有华等人<sup>[13]</sup>研究制作的多源数据融合的中国土地覆盖资料，该数据是综合了2000年中国1:10万土地利用数据、中国植被图集的植被型分类、中国1:10万冰川图、中国1:100万沼泽湿地图和2001年MODIS Q1几个数据，使用最大信任度原则进行决策，采用的IGBP分类系统制作得到。融合后的数据与中国土地利用图、MODIS和国际地圈生物圈计划（IGBP）地表覆盖进行了对比，结果显示，总体一致性分别是88.84%、47.59%和40.2%，Kappa系数分别是0.85、0.38和0.31<sup>[13]</sup>，具有比较高的可信度。

#### 2) 土壤参数

土壤参数包括：土壤颜色、土壤质地、土壤层厚度、土壤温度、土壤湿度、土壤的热/水力传导和扩散系数、干土壤的土壤热容、干土壤的热传导率、孔隙度、饱和的负压土壤水势、饱和土壤导水率等。土壤质地是土壤中不同大小直径的矿物颗粒的组合状况，是土壤重要的物理属性。许多大小不同的土粒按不同的比例组合在一起会表现出不同的土壤粗细情况，一般根据土壤中砂粒、粉粒和粘粒各自所占的比例来对土壤质地类型进行划分。

模式中自带的土壤质地数据库来源于联合国粮农组织（FAO）和维也纳国际应用系统研究所

（IIASA）所构建的世界土壤数据库（HWSD）中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的1:100万土壤数据。该数据可为建模者提供模型输入参数，农业角度可用来研究生态农业分区，粮食安全和气候变化等。但是由于土壤质地难以进行实际观测，以上土壤质地数据集使用的实测资料非常少，如FAO数据集在中国区域仅仅由61个土壤剖面插值而来，空间代表性比较差<sup>[14]</sup>。面向陆面模拟的中国土壤数据集数据来源于第二次土壤普查的1:100万中国土壤图和8595个土壤剖面与HWSD数据库在pH值等微量元素方面进行了对比，在一些方面更加符合认识规律。它的分辨率比HWSD要高，而且空间分布更加可信，数据还给出了空间分布可信度的信息，数据为栅格格式，空间分辨率为30 arcsec。为便于使用CLM模型，土壤数据分为8层。

## 1.2 模拟方案及评估

本系统采用的陆面模式是NCAR的CLM3.5模型，该模型提供了大气模式所需要的表面反照率（可见光和红外光波段的直射和散射光）、向上长波辐射、感热通量、潜热通量、水汽通量、以及东西向和南北向的地表应力。这些参量分别由许多生态和水文过程控制，模式对叶子物候、气孔生理及水循环进行模拟。河流运输模式向下传输至海洋。因为模式要与气候模式和数值天气预报模式耦合，所以在陆面过程参数化计算的有效性和复杂性中要做折衷选择。模式并没有详尽描述水文气象、陆地生态，而是仅对一些描述陆—气相互作用本质特性的重要陆面过程做计算量最少的简化处理。

### 1.2.1 陆面模拟方案设计

首先将北美陆面数据同化系统（NLDAS）和CMA 陆面数据同化系统（CLDAS）两个系统的空间分辨率、产品格点数、数据量和计算资源等进行了对比，为了方便比较，将NLDAS-2的参数指标作为标准，其他产品与之对比（表4），可以看出，HRCLDAS-V1.0陆面模拟所需的计算资源和文件的数据量都非常大，这也是目前高分辨率陆面模拟面临的

表4 NLDAS与CLDAS数据量对比统计表  
Table 4 Comparisons of the data volumes among NLDAS and CLDAS

参数	NLDAS-2	NLDAS-3	CLDAS-1	CLDAS-2	HRCLDAS-V1.0
空间分辨率	1倍	4倍	2倍	2倍	12.5倍
产品格点数	1倍	16倍	12倍	16倍	303倍
数据量	1倍	12倍	3倍	4倍	75倍
计算资源	历史回算: NASA supercomputer 实时系统: NCEP operational machine		1节点 32核	1节点 32核	6节点 192核

最主要的问题之一，在现有的条件下实现业务生产，必须设计合理可行的技术方案。通过大量的调研和试验，最终确定根据研究区域的经度信息将整个模拟区域平均分为35个子区域，每分钟提交一个区域的作业量，利用6个计算节点分块并行与模式并行结合的计算方案，循环提交作业，在35~40 min完成一个时次的模拟计算。应用此方案，解决了IBM系统文件大小受限，计算资源和计算时效等问题。

### 1.2.2 土壤湿度质量评估

产品检验主要使用中国气象局土壤水分自动观测观测资料对HRCLDAS-V1.0系统土壤湿度产品质量进行了评估验证<sup>[15-16]</sup>。

目前，气象部门传统的人工监测土壤水分的频率和效率已经远远不能满足决策部门和公众对于干旱监测的需求。近年来，中国气象局开展了自动土壤水分观测网的建设工作，自动土壤水分观测网就是为了在气候变化背景下提高农业干旱监测和预警的业务和科研水平而建设。土壤湿度自动观测主要包含三种观测地段：固定观测地段、作物观测地段和辅助观测地段。固定观测地段采用自动土壤水分观测仪进行自动连续观测，作物地段采用自动土壤水分观测仪进行自动连续或定时观测，辅助地段采用便携式土壤水分仪进行观测。在固定观测地段，最大观测深度一般为1 m，分为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm、70~80 cm、90~100 cm，地下水位深度小于1 m的地区，最深测到土壤饱和持水状态层，而因土层较薄导致观测深度无法达到规定要求的地区，则最深测至土壤母质层。在作物观测地段，最大观测深度一般为1 m，分为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、90~100 cm，果树等根系较深作物的观测深度根据业务服务需要由省级业务主管部门确定。在辅助观测地段，最大观测深度一般为50 cm，分为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm共5个层次。

由于土壤湿度地面站点观测资料与HRCLDAS-V1.0模式模拟产品代表的空间尺度不一致，直接将HRCLDAS-V1.0产品插值到观测站点上进行评估有一定的问题，而分区域对观测土壤湿度和HRCLDAS-V1.0土壤湿度产品的区域平均值进行比较评估，可以在一定程度上降低空间尺度差异对评估结果的影响。鉴于各省自动土壤水分观测仪的型号、定标系数等情况存在差异，因此采用分省评估方案，在每个省对土壤湿度区域平均值进行比较分析。

考虑到土壤中存在固态水（冰）对观测仪器性能的影响，评估时尽量剔除冬天的数据，利用了2015年5月1日—2015年10月31日（共计184天）的观测资料。总体如表5所示，HRCLDAS-V1.0土壤湿度产品的质量较好，2015年全国平均相关系数为0.87，偏差为0.001 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>，均方根误差为0.03 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>。全国31个省份中，HRCLDAS-V1.0有18个省份的相关系数在0.9以上，27个省份的相关系数在0.8以上，26个省份的均方根误差在0.04 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>以下，27个省份的偏差在±0.04 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>之间。西藏、贵州、云南等区域偏差和均方根误差较大，初步分析认为，这些区域地形复杂，土壤类型变化大，高分辨率陆面模拟精度还有待提高，且目前土壤湿度自动观测还没有业务化的质控程序，需要进一步改进。综合各项评估指标看来，河北、江苏、黑龙江、福建、陕西、宁夏、甘肃、青海、广东、广西等多省（区、市）的产品质量都较好。

表5 CLDAS-V1.0和HRCLDAS-V1.0土壤湿度对比  
Table 5 Comparison of soil moisture between CLDAS-V1.0 and HRCLDAS-V1.0

省 (区、市)	CLDAS-V1.0			HRCLDAS-V1.0		
	相关系数	偏差	均方根误差	相关系数	偏差	均方根误差
安徽	0.89	0.01	0.03	0.91	-0.03	0.04
北京	0.93	0.03	0.04	0.97	0.03	0.04
重庆	0.81	0.04	0.04	0.82	0.01	0.01
福建	0.91	0.03	0.03	0.87	0.001	0.01
甘肃	0.91	0.02	0.02	0.77	0.01	0.01
广东	0.87	0.01	0.02	0.88	-0.01	0.01
广西	0.89	0.01	0.02	0.88	-0.02	0.02
贵州	0.87	-0.04	0.05	0.82	-0.06	0.07
海南	0.94	0.06	0.06	0.93	0.03	0.03
河北	0.97	0.06	0.06	0.91	-0.03	0.04
黑龙江	0.74	-0.04	0.05	0.83	0.01	0.02
河南	0.88	0.01	0.02	0.93	0.001	0.01
湖北	0.89	-0.02	0.03	0.91	-0.03	0.04
湖南	0.94	0.01	0.01	0.9	-0.02	0.03
江苏	0.85	0.03	0.04	0.91	0.001	0.01
江西	0.78	0.05	0.06	0.92	0.02	0.02
吉林	0.68	0.03	0.04	0.89	0.03	0.03
内蒙古	0.80	0.05	0.05	0.73	0.03	0.04
青海	0.89	0.01	0.02	0.9	0.01	0.02
陕西	0.94	0.05	0.05	0.94	0.02	0.02
上海	0.84	0.01	0.02	0.79	-0.02	0.03
山西	0.94	0.04	0.05	0.91	0.03	0.04
四川	0.87	0.07	0.08	0.94	0.02	0.03
天津	0.95	0.02	0.02	0.95	-0.04	0.05
新疆	0.82	-0.04	0.04	0.88	-0.01	0.01
西藏	0.78	0.08	0.08	0.85	0.07	0.08
云南	0.97	-0.06	0.06	0.97	-0.08	0.08
浙江	0.85	0.06	0.07	0.83	0.001	0.03
全国	0.76	0.02	0.02	0.87	0.001	0.03

## 2 系统业务化建设

HRCLDAS-V1.0系统软件的业务处理过程总体上分为五个阶段，即数据采集与处理阶段、陆面驱动数据产品生产阶段、陆面模式模拟与土壤湿度产品生产阶段、业务产品实时评估、产品服务与后处理阶段。

数据采集与处理阶段，主要完成系统所有输入数据的收集，并对收集的数据进行分析、质量控制、投影等标准化处理和输出，处理后的数据按类别保存到相应目录。

陆面驱动数据产品生产阶段，主要是利用STMAS融合分析模块、降水驱动模块、短波辐射遥感反演与融合分析三个模块，生产陆面气温、气压、湿度、风速、降水、辐射驱动产品，并保存到驱动数据目录。

陆面模式模拟与土壤湿度产品生产阶段，主要是利用陆面驱动数据处理子系统生产的陆面驱动数据产品，驱动CLM3.5陆面模式分块运行模拟土壤湿度，并标准化输出土壤湿度数据，然后将这些分块土壤湿度数据进行拼接、垂直层插值以及日值数据合成等处理，最终输出标准化土壤湿度分析产品。

产品实时评估阶段，主要利用地面站点观测数据，提取地面站点位置的业务产品格点值，计算均方根误差、偏差、相关系数等评估指标，并将计算结果存档和打印到图形产品上。

产品服务与后处理阶段，主要从产品结果目录

中获取陆面驱动、土壤湿度产品，标准化制作图形产品，并将相应的数据产品和图形产品通过通信系统推送到指定的FTP目录，最终实现业务产品的CIMISS入库归档、业务内网展示和中国气象数据网的数据分发。

上述五个阶段之间和各个阶段内核心的流程交互以及业务协作，将由调度管理和运行监控子系统集成管理统一调度与控制，从而使HRCLDAS-V1.0业务系统形成一个协调统一的稳定可靠的有机整体。运行调度和监控作为数据采集、数据处理、陆面驱动数据处理与产品生产、陆面模式模拟与土壤湿度产品生产、产品数据后处理等全过程生命周期业务流程的控制中枢，具有数据请求配置、流程配置及调度、运行监控等功能。HRCLDAS-V1.0业务系统通过调度管理和运行监控，实现业务处理流程的统一配置和调度管理，以及协调各个业务单元的协同工作。

## 2.1 业务输出产品清单及命名规则

### 2.1.1 产品清单

根据产品生成时间和数据类型将HRCLDAS-V1.0业务产品（表6）分为驱动数据和模式模拟结果两种。驱动数据时间分辨率为1 h，空间分辨率为1 km；模式模拟结果时间分辨率为1 d，空间分辨率为1 km。产品分为NetCDF格式的数据产品和图片（PNG）格式的图形产品。

表6 HRCLDAS-V1.0业务产品清单  
Table 6 List of HRCLDAS-V1.0 business products

序号	产品类别	空间分辨率	文件名称	文件名	产品更新频次	文件大小	产品时效
1	驱动数据	0.01°	2 m气温	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_HOR-TMP-yyyymmddhh.nc/jpg	每小时	nc: 126 MB jpg: 0.14 MB	滞后27 min
2			地面气压	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_HOR-PRS-yyyymmddhh.nc/jpg	每小时	nc: 126 MB jpg: 0.14 MB	滞后27 min
3			2 m湿度	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_HOR-SHU-yyyymmddhh.nc/jpg	每小时	nc: 126 MB jpg: 0.14 MB	滞后27 min
4			10 m风速	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_HOR-WIN-yyyymmddhh.nc/jpg	每小时	nc: 126 MB jpg: 0.14 MB	滞后27 min
5			小时累计降水	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_HOR-PRE-yyyymmddhh.nc/jpg	每小时	nc: 126 MB jpg: 0.14 MB	滞后8 h
6			地面入射短波辐射	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_HOR-SSRA-yyyymmddhh.nc/jpg	每小时	nc: 126 MB jpg: 0.14 MB	滞后24 h
7	模式结果	0.01°	0~5 cm土壤湿度	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_DAY-SM000005-yyyymmdd00.nc/jpg	每天	nc: 121 MB jpg: 0.14 MB	滞后半天
8			0~10 cm土壤湿度	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_DAY-SM000010-yyyymmdd00.nc/jpg	每天	nc: 121 MB jpg: 0.14 MB	滞后半天
9			10~40 cm土壤湿度	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_DAY-SM010040-yyyymmdd00.nc/jpg	每天	nc: 121 MB jpg: 0.14 MB	滞后半天
10			40~100 cm土壤湿度	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_DAY-SM040100-yyyymmdd00.nc/jpg	每天	nc: 121 MB jpg: 0.14 MB	滞后半天
11			100~200 cm土壤湿度	Z_NAFP_C_BABJ_yyyymmddhhmmss_P_HRCLDAS_RT_CHN_0P01_DAY-SM100200-yyyymmdd00.nc/jpg	每天	nc: 121 MB jpg: 0.14 MB	滞后半天



### 2.1.2 产品文件名命名规则

产品文件命名遵循CIMISS和通信系统命名规则，具体如下：

Z\_NAFP\_C\_BABJ\_yyyymmddhhmmss\_P\_HRCLDAS\_类别\_区域\_空间分辨率\_时间属性-变量要素-时间.文件类型

其中，

Z\_NAFP\_C\_BABJ：固定字段；

yyymmddhhmmss：产品生成时间，表示年月日时分秒，世界时；

P：固定代码；

HRCLDAS：产品生成系统，表示CMA高分辨率陆面数据同化系统；

类别：“RT”表示高时效的实时产品

区域：“CHN”表示中国区域；

空间分辨率：“0P01”表示 $0.01^{\circ}$ 的空间分辨率；

时间属性：“HOR”表示产品的时间分辨率为小时；“DAY”表示产品的时间分辨率为小时；

TMP：要素属性，表示2 m气温；

PRS：要素属性，表示地面气压；

SHU：要素属性，表示2 m比湿；

WIN：要素属性，表示10 m风速；

SSRA：要素属性，表示地面入射短波辐射；

PRE：要素属性，表示小时累计降水；

SM：要素属性，表示土壤湿度

yyymmddhh：资料时间，世界时，表示产品为“yyymmddhh”产品；

yyymmdd00：资料时间，世界时，表示产品为“yyymmdd”日值产品；

文件类型：“nc”表示NetCDF格式，“png”表示png图形格式。

### 2.2 业务系统的运行稳定性

HRCLDAS-V1.0业务系统对实时运行的各种情况有较完备的判识、处理方案，具有较好的容错能力。在系统运行稳定性测试期间，所有测试时段的数据产品和图形产品均稳定正常生成。

### 2.3 数据量与负载率

HRCLDAS-V1.0业务系统登录服务器分配存储空间5 TB，用于临时存储输入数据、业务产品、中间结果等。HRCLDAS-V1.0业务系统具有历史数据自动删除功能，实时系统会自动删除各自3天前的历史数据，以确保业务系统正常运行所需的存储空间。

目前，HRCLDAS-V1.0业务系统数据存储量基本维持在约4 TB，存储空间利用率总体维持在84%左右。

### 2.4 系统效率与效能分析

目前，HRCLDAS-V1.0业务系统各功能模块中，除短波辐射遥感反演和CLM陆面模式采用并行计算外，其他功能模块均采用串行计算。

经业务系统运行调度流程优化，实时系统在整点20 min启动。气温、气压、湿度、风速驱动产品制作模块运行时间在10 min以内完成；小时降水驱动产品制作模块运行时间在4 min以内完成；短波辐射驱动产品制作模块运行时间在17 min以内完成；陆面模式模拟分析产品制作模块运行时间在40 min以内完成；业务产品制图模块运行时间平均在5 min以内。下一步，将对驱动数据核心程序进行优化升级，使气温、气压、湿度、风速产品的时效得到进一步提升，预计未来将在整点过12 min之内完成这四种数据产品的制作。

## 3 结论与讨论

研制1 km分辨率的陆面数据同化系统是《国家气象信息中心气象现代化实施方案（2014—2020年）》中明确提出的目标，也是国家气象科技创新工程的攻关任务之一。HRCLDAS-V1.0是在CLDAS-V1.0与CLDAS-V2.0基础上发展而来，即是对之前系统的延续，又是面对市场需求，进行了一次提升：

1) 与CLDAS-V1.0相比，HRCLDAS-V1.0陆面驱动数据中2 m气温、地表气压、2 m湿度、10 m风速制作过程中融入了高分辨率的DEM和反照率等信息，同时，降水和短波辐射融合模块也进行了改进，将地面站点观测数据与背景场进行更有效的融合。

2) 由于土壤湿度空间变异性非常强，高空间分辨率的陆面模拟能够较好的抓住土壤湿度空间变异的细节，模拟结果与对应的地面观测土壤湿度分布更为接近，HRCLDAS-V1.0在保证数据产品质量的情况下，成功将分辨率从 $0.0625^{\circ}$ 提高到 $0.01^{\circ}$ ，对于土壤湿度这样空间变异强、分布复杂的要素而言，意义是非常重要的，在实际应用中，如土壤墒情监测、作物估产等，此类高分辨率产品应用非常迫切<sup>[17]</sup>。

3) 高分辨率陆面模拟对计算资源和存储资源的要求极高，为了进行中国区域1 km陆面模拟，HRCLDAS-V1.0设计了分区并行与模式并行的模拟方案，实现了中国区域1 km分辨率土壤湿度产品的高效模拟。

尽管如此，但高分辨率陆面模拟消耗大量的计算和存储资源，在有限的资源的情况下，目前只针对土壤湿度进行了细致分析评估；未来在进一步扩充计

(下转116页)

- 开发. 气象, 2014, 40(9): 1152-1158.
- [4] 吴林林, 刘黎平, 徐海军, 等. 基于MICAPS3核心的人影业务平台设计与开发. 气象, 2013, 39(3): 383-388.
  - [5] 孙卓, 李江波, 曾健刚. 基于MICAPS3.2的灾害性天气个例库与预报训练系统的设计与应用. 干旱气象, 2017, 35(3): 522-527.
  - [6] 王若瞳, 黄向东. 海量气象数据实时解析与存储系统的设计与实现. 计算机工程与科学, 2015, 37(11): 58-64.
  - [7] Kreps J, Narkhede N, Rao J. A distributed messaging system for log processing // Proceedings of the NetDB. 2011: 1-7.
  - [8] Toshniwal A, Taneja S, Shukla A, et al. Storm@ twitter // Proceedings of the 2014 ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM, 2014: 147-156.
  - [9] Zaharia M, Chowdhury M, Das T, et al. Fast and interactive analytics over Hadoop data with Spark. USENIX Login, 2012, 37(4): 45-51.
  - [10] Carbone P, Katsifodimos A, Ewen S, et al. Apache flink: Stream and batch processing in a single engine. Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering, 2015, 36(4): 28-38.
  - [11] Ranjan R. Streaming big data processing in datacenter clouds. IEEE Cloud Computing, 2014, 1(1): 78-83.
  - [12] Zaharia M, Chowdhury M, Das T, et al. Resilient distributed datasets: A fault-tolerant abstraction for in-memory cluster computing // Proceedings of the 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association, 2012: 2-2.
  - [13] 黄向东, 王建民, 葛斯函, 等. 一种海量多维文件集合的存储模型 // 第31届中国数据库学术会议, 2014: 1.
  - [14] 郝浩. FTP原理解析. 计算机与网络, 2016(14): 40-41.
  - [15] 朱小祥, 刘震坤, 罗兵, 等. 美国AWIPS II系统开发进展及业务应用. 气象科技合作动态, 2014(F06): 1-30.
  - [16] Hansen T, Mathewson B M, LeFebvre T J, et al. Forecast methodology using the GFE suite. 17th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, 2001.
  - [17] H Gerapetritis, LG Lee. Intelligent use of a lapse rate smart tool in the graphical forecast editor. Eastern Region Technical Attachment, 2003(1): 1-9.
  - [18] Yu L, Cao L, Li Y, et al. Introduce on Typhoon Forecast Operational System // Proceedings of 27th IIPS for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. 2011.
  - [19] 郑卫江, 吴焕萍, 罗兵, 等. GIS技术在台风预报服务产品制作系统中的应用. 应用气象学报, 2010, 21(2): 250-255.
  - [20] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战. 气象, 2010, 36(7): 33-42.
  - [21] 赵栋, 郭煜, 寿绍文, 等. SWAN 系统在一次暴雨天气过程分析中的应用. 气象科技, 2013, 41(2): 326-333.
  - [22] 吕晓娜, 牛淑贞, 袁春风, 等. SWAN 中定量降水估测和预报产品的检验与误差分析. 暴雨灾害, 2013, 32(2): 142-150.
  - [23] 李俊, 支树林, 郭艳, 等. SWAN 系统雷达定量降水估测产品在江西的应用. 气象与减灾研究, 2012, 35(2): 61-66.

(上接108页)

算资源和存储资源的情况下, 将对土壤温度、积雪深度、感热潜热通量、径流等要素进行评估分析, 提供更多更全面的陆面要素变量供科研和业务使用。

致谢: 本文是对HRCLDAS-V1.0系统研发和业务化工作的综述, 是整个研发团队的一项集体性工作的总结。在研发过程中, 团队成员精诚团结、奋发向上的精神感人至深。限于篇幅, 不能将所有参与工作的人员列入, 在表示谢意的同时也致以歉意。另外, 在CLDAS发展过程中, 多年来一直得到谢元富、杨宗良、夏友龙、詹习武、谢平等多位海外专家以及国内谢正辉、田向军、戴永久、阳坤等专家的支持与帮助, 在这里一并表示感谢!

#### 参考文献

- [1] Jacoc M J, Moors E J, Ter M H W, et al. Evaluation of European Land Data Assimilation System (ELDAS) products using in site observations. Tellus A, 2010, 60(5): 1023-1037.
- [2] Tian X, Xie Z. A global land data assimilation system: preliminary evaluations // AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2009.
- [3] Mitchell K E, Lohmann D, Houser P R, et al. The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system. J Geophys Res, 2004, 109(D7): 585-587.
- [4] Chen F, Manning K W, LeMone M A, et al. Description and evaluation of the characteristics of the NCAR High-Resolution Land Data Assimilation System. J Appl Meteor Climatol, 2007, 46: 694-713.
- [5] Chen F, Manning K W, Barlage M, et al. NCAR High-resolution Land Data Assimilation System and its recent applications. American Geophysical Union, Spring Meeting 2008.
- [6] Lim Y J, Lee T Y, Byun K Y. Korea Land Data Assimilation System (KLDAS) and its application using WRF. In 22nd Conference on Hydrology, 88th American Meteorological Society Annual Meeting, New Orleans, LA, January 20-24, 2008.
- [7] Xie Y, Koch S, Mcginley J, et al. A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. Monthly Weather Review, 2011, 139(4): 1224-1240.
- [8] 张涛, 苗春生, 王新. LAPS与STMAS地面气温融合效果对比试验. 高原气象, 2014, 33(3): 743-752.
- [9] 谭晓光, 罗兵. 天气预报分析型数据模型及生成. 应用气象学报, 2014(1): 120-128.
- [10] Yang K, Huang G W, Tamai N. A hybrid model for estimating global solar radiation. Solar Energy, 2001, 70: 13-22.
- [11] Xu B, Xie P, Xu M, et al. A validation of passive microwave rain-rate retrievals from the Chinese FengYun-3B satellite. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16: 1886-1905.
- [12] 徐宾, 师春香, 姜立鹏, 等. 东亚多卫星集成降水业务系统. 气象科技, 2015, 43(6): 1007-1014.
- [13] 冉有华, 李新, 卢玲. 四种常用的全球1km土地覆盖数据中国区域的精度评价. 冰川冻土, 2009, 31(3): 490-500.
- [14] Shanguan W, Dai Y, Liu B, et al. A China data set of soil properties for land surface modeling. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212-224.
- [15] 韩帅, 师春香, 林泓锦, 等. CLDAS土壤湿度业务产品的干旱监测应用. 冰川冻土, 2015, 37(2): 446-453.
- [16] 韩帅, 师春香, 姜立鹏, 等. CLDAS土壤湿度模拟结果及评估. 应用气象学报, 2017, 28(3): 369-378.
- [17] 杨霏云, 高学浩, 钟琦, 等. 作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示. 气象科技进展, 2012, 2(3): 34-38.