

周自江,曹丽娟,廖捷,等,2022. 水文气象信息概述:观测、融合与再分析[J]. 气象,48(3):272-283. Zhou Z J, Cao L J, Liao J, et al, 2022. Overview of hydrometeorological information: observation, data fusion and reanalysis[J]. Meteor Mon, 48(3):272-283(in Chinese).

水文气象信息概述:观测、融合与再分析*

周自江 曹丽娟 廖捷 谷军霞 张涛 潘阳

国家气象信息中心,北京 100081

提 要: 高质量的水文气象观测数据是开展气象和水文灾害监测、预报预警及长期气候变化趋势分析的基本支撑。以降水等水分循环基本要素为重点,简要概述部分单源的观测数据集、二维/三维的融合分析产品和多维的再分析产品的研发进展,及其在水文气象监测预报中的应用。分析表明:气象和水文数据是地球系统中水分循环的最重要体现,二者的有效汇聚和协同质量控制,能更有效地促进其在地球系统模式各分量中的应用;经过多源数据融合分析和同化分析形成的多尺度、高精度、高时效、时空连续的格点化分析场,是智能网格天气预报和气候预测的“零时刻”起点,已经成为无缝隙预报业务的组成部分;经过历史数据同化分析产出的长序列大气、陆面等再分析产品,是气候变化演变评估和监测的重要保障,其应用价值远超观测数据本身。

关键词: 水文气象观测,质量控制,数据融合分析,再分析

中图分类号: P412, P641

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.022402

Overview of Hydrometeorological Information: Observation, Data Fusion and Reanalysis

ZHOU Zijiang CAO Lijuan LIAO Jie GU Junxia ZHANG Tao PAN Yang

National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

Abstract: High-quality hydrometeorological observation data are the base for the monitoring, forecasting, prediction of hydrometeorological hazards, and also the basic support for long-term climate trend analysis. Focusing on the fundamental elements such as precipitation of water cycle, this paper summarizes the great progress in developing hydrometeorological observation datasets, two and three dimensional fusion analysis products, and multi-dimensional reanalysis products as well as their application in hydrological and climate monitoring and forecasting. The analysis shows that meteorological and hydrological data are two most important embodiments of water cycle in the earth system. Their effective integration and collaborative quality control can effectively promote their application in various components of the earth system model. Produced through intensive data processing such as data fusion analysis and assimilation analysis of multi-source earth observation data, the gridded analysis products with multi spatiotemporal scale, high precision, high timeliness and continuous space-time are used to be the initial points of intelligent grid forecasting and climate prediction, having become an integral part of seamless fine gridded forecasting operation. The global long-series atmospheric and land surface reanalysis products produced by assimilation of historical observational data play important roles in the assessment and monitoring of long-term evolution of climate change, and their application values are far beyond the observation data itself.

* 国家自然科学基金重大项目(42090033)资助

2022年2月8日收稿; 2022年2月28日收修定稿

第一作者:周自江,主要从事资料质量控制与再分析研究. E-mail: zzi@cma.gov.cn

Key words: hydrometeorological observation, quality control, data fusion analysis, reanalysis

引言

近百年来,全球气候正经历着一次以变暖为主要特征的显著变化。气候变暖带来了一系列的水文气象及气候效应,包括海平面上升、冰川消融、沙漠化加剧,以及高温、暴雨、干旱、风暴等极端天气气候事件发生频率与强度的增加。水以液态、固态和气态的形式在气候系统中不断运动,并储存在海洋、冰川、陆地表面和大气中,是海洋、陆地和大气相互作用中一种最活跃且最重要的枢纽(姜彤等, 2020)。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告(AR6)指出气候变化正在加剧水分循环(IPCC, 2021):带来更强的降水和洪水,或者区域更严重的干旱;气候变化正在影响降水分布型,在高纬度地区,降水可能增加,而在亚热带的大部分地区则可能减少;21世纪,沿海地区的海平面将持续上升,会导致低洼地区发生更为频繁和严重的沿海洪水,并将导致海岸受到侵蚀;进一步的变暖将加剧多年冻土的融化,以及季节性积雪的损失、冰川和冰盖的融化、夏季北极海冰的损失。

鉴于全球气候变暖使得天气气候灾害更为严重且复杂,亟需从地球系统各圈层的相互作用出发,深入研究重大天气气候灾害的时空变化、发生规律、形成原因、预测理论和方法,提高防灾减灾和可持续发展的能力和水平。当前,世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)正在推动地球系统框架下“天气、气候、水与环境+影响”的无缝隙气象业务转型(Brunet et al, 2015; Rauser et al, 2017),且将2022年世界气象日的主题定为“早预警、早行动:气象水文气候信息,助力防灾减灾”(Early Warning and Early Action, Hydrometeorological and Climate Information for Disaster Risk Reduction)。该主题充分体现了水文气象信息对气候变化应对及防灾减灾的重要基础性保障作用。

水文气象信息是地球系统大数据的重要组成部分,包含水分循环和水分平衡中的降水、径流、土壤含水量、蒸发和蒸腾等基本要素,涉及发生在地球大气系统中的暴雨、干旱、洪涝等极端事件等。目前,对于水文气象信息尚没有一个非常严格的定义,本

文暂定为:通过一切可能的观测、探测、遥测手段收集到的气象和水文数据信息,或通过融合分析、同化分析、人工智能分析等加工处理得到的,来自地球系统各圈层的,进行标准化和规范化处理后形成的能描述气候系统状态、结构、成分、现象,并以直观有效的表现形式给出详细信息和时空属性的数据产品集合。

从地球系统获取水文气象信息的最直接手段当属观测。近三十年来,随着科学技术的发展,多源观测数据的融合分析、同化分析技术的快速发展,地基、海基、天基和空基观测的水文气象数据得到充分汇聚、相互校准和综合应用,有效支撑了智能预报、智慧服务和气候变化监测等核心业务和科研工作。本文以降水等水分循环基本要素为重点,以国家气象信息中心(National Meteorological Information Centre, NMIC)的研究型业务实践为主线,探讨通过融合和同化不同观测来源的水文气象信息,构建“全球-区域-局地”一体化零时刻分析场,无限逼近“真实”的地球系统状况,为地球系统模式预报提供更精准的初猜场和历史再分析产品,从而可进一步获取更多要素变量的水文气象及气候信息。

1 水文气象观测数据与质量保障

1.1 水文气象观测的质量控制

观测是人类认识地球系统的基础。当前,WMO全球综合观测系统(WMO Integrated Global Observing System, WIGOS)日趋完善,不仅包括世界天气监测计划下的全球观测系统,还包括了大气成分观测、水文观测和冰冻圈监测等,且正在重点发展生态系统、冰川冻土积雪和海洋领域观测,这些观测包含了大气圈、水圈、冰冻圈的诸多与水文气象相关的基本气候变量(essential climate variables, ECVs),如降水、蒸发、土壤水分、陆地径流、海流、海冰,以及高空大气的水汽含量等等。IPCC关于气候变化的一系列重要结论正是根据这些观测事实得出的。

由于观测系统的差异及观测设备的不同,数据的观测误差始终客观存在,其一般分为性质不同的三类:随机误差、系统误差和错误资料。这些误差或

错误数据需要通过质量控制技术加以甄别或剔除,才能保证观测数据的总体质量。美国国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information, NCEI)早在 20 世纪末就已建立了全自动气象资料质量控制体系,实现对观测资料质量的实时监控。欧美国家还在气象资料质量控制业务体系上,逐步形成了质量控制算法的评估策略,并基于观测偏差分析和同化应用形成了比较成熟的数据黑名单判别技术,很好地保证了各类资料在数值预报中的同化应用效果。我国气象部门在观测资料质量控制方面做了大量探索,建立了台站、省级和国家级三级质量控制业务体系,以及观测端、信息端和应用端相互协调的质量控制业务流程。近年来, NMIC 通过全球大气再分析和实况业务建设,进一步引进消化美国、英国及加拿大等国际数据机构先进的数据处理技术,构建了适应不同应用需求的资料质量控制体系(图 1),包含传统顺序质量控制、综合质量控制、数据偏差订正和均一化等,经过质量控制、质量评估、偏差分析与校订的数据,同步保障了短时临近预报、同化分析及气候数据产品的研发应用。目前,气象与水文预报预测业务需求经过统筹规划(包红军等, 2021),质量控制对象正在向新型观测、关键区域、关键要素聚焦,而质量控制技术正在向实现多圈层协同,以及统计模型与人工智能技术的组合应用发展。

1.2 水文气象观测数据集

将经过综合质量控制和偏差订正的观测数据,整合形成用户可直接使用的基础性数据集,是推进资料应用的有效方式。水文气象预报预测和气候变

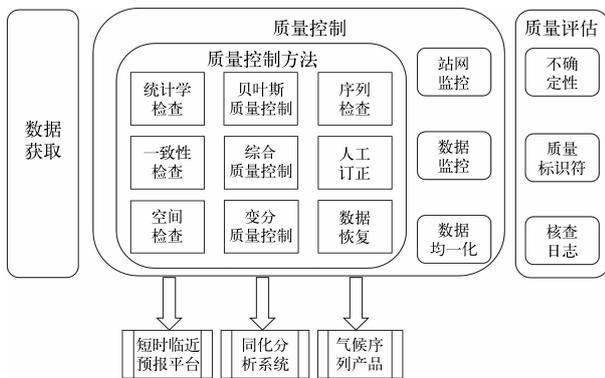


图 1 适应不同应用需求的资料质量控制体系

Fig. 1 Quality control frame for different operational application

化常用的要素包括降水、湿度、云、蒸发、径流等。就水文气象信息来说,陆地和海洋现场观测一直是重点。例如,美国 NCEI 发布的全球综合地表数据库(The Integrated Surface Database, ISD) (Smith et al, 2011),通过整合地面气象站、水文站、农业气象站、水面浮标站等多种类型观测数据,为极端天气监测、气候变化分析提供了重要信息来源,是遥感观测数据和再分析产品检验的重要参照系,也是全球水分循环和其他研究最重要的基础数据(IPCC, 2021),同时也是地下水位历史序列重建及水资源管理的重要输入信息(Ascott et al, 2020)。

国际上已发布了多套全球降水数据集(如: Schamm et al, 2014; NCEI, 2017; Blenkinsop et al, 2018)。其中,全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC)研发的全球日降水产品(Schamm et al, 2014)和 NCEI 2017 年发布的全球日降水产品(global surface summary of the day, GSOD)是广泛使用的全球准实时日降水产品。除了雨量站观测,基于多源卫星反演的降水产品,如热带雨量测量任务(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)卫星产品(Huffman et al, 2007)、CMORPH(CPC morphing technique)卫星反演降水产品(Joyce et al, 2004)等,由于覆盖范围广、时空连续性好,已成为长序列降水气候数据集的重要代表。近年来, NMIC 通过整合全球电信系统(Global Telesystems, GTS)、GSOD、ISD 等多个来源的降水数据,并引入中国国家级气象站实测数据,形成了一套完整性更好的全球日降水产品(Yang et al, 2020)(图 2);通过集成国内外多种来源的海表观测数据,研制出百年长度全球海表观测定时值数据集和全球月值网格产品(Chen et al, 2021);采用拉格朗日集成算法,实现 FY-3B/3C/3D、NOAA-18/19/20、METOP-A/B/C、S-NPP、GPM 等十余颗极轨卫星微波反演降水与风云静止卫星红外数据的集成,形成覆盖东亚区域的逐小时 5 km 分辨率的卫星集成降水产品(East Asian multi-satellite integrated precipitation, EMSIP),产品均方根误差小于 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (徐宾等, 2015)。这些重要进展明显缩小了与发达国家在降水数据集研制方面的差距,助力相关业务科研实现国产数据集的安全替代。

除了降水之外,相对湿度也是反映全球干湿变化最常用的气象要素之一,对水资源的变化有一定指示作用。站点观测的地表相对湿度数据是水汽输

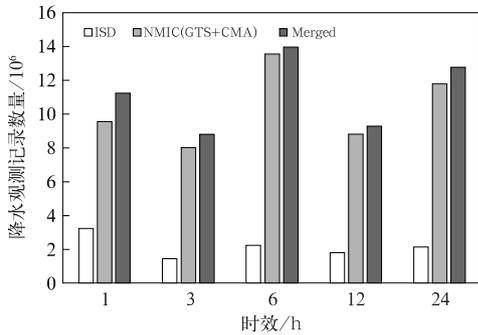


图2 2016年全球降水产品的日降水观测数据量
(引自 Yang et al, 2020; ISD: NCEI 发布的全球地面
小时整合数据; NMIC: GTS 和中国地面小时
降水数据集; Merged: ISD 和 NMIC 的集合)

Fig. 2 Data volumes of global daily precipitation totals
in 2016 from different data sources

(from Yang et al, 2020; ISD: integrated surface database
released by NCEI; NMIC: integration of GTS and
CMA data; Merged: integration of ISD and NMIC data)

送通量变化、干湿变化状况研究的重要输入源之一(谢欣汝等, 2018; 徐丽君等, 2021), 也是全球和区域大气再分析输入的关键地表观测变量(Jiang et al, 2021)。基于站点观测湿度数据, 国内外已发布了长序列均一化数据集和高分辨率的相对湿度网格数据集, 如英国哈德莱中心发布的全球地表湿度数据集 HadCRUH(Willett et al, 2008) 和 HadISDH(Willett et al, 2014), 国家气象信息中心发布的中国相对湿度均一化数据集(朱亚妮等, 2015) 及网格化数据集(赵煜飞和朱亚妮, 2017) 等。美国发布的北美地区高分辨率网格数据集 Daymet(Thornton et al, 2020) 也包含了 1 km 网格的水汽压日值数据。对流层大气湿度观测主要来自探空观测、飞机观测、地基全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)水汽观测及卫星观测。NCEI 发布的综合全球无线电探空数据集(integrated global radiosonde archive, IGRA)(Durre et al, 2018) 提供了 1905 年以来全球高空温度、湿度和风场观测资料。Liao et al(2021) 发布的全球飞机观测基础数据集提供了 2000 年以来的全球飞机观测湿度。卫星垂直探测仪和多通道微波扫描辐射计的应用为高空水汽提供新的信息来源, 特殊传感器微波成像仪(special sensor microwave/imager, SSM/I) 于 1987 年应用后资料质量得到提高, 为海洋上空提供了最为可信的对流层低层大气水汽总量序列。这些观测数据已被广泛应用于全球各国的数值天气预报及再分析产品的研制与评估。地基 GNSS/MET 反演的

大气可降水量数据集已在降水预报中得到了应用(Seco et al, 2012; Yao et al, 2017)。云是水汽在大气中的极其重要的载体, 基于国际卫星云气候计划的 ISCCP 产品、地球观测系统 EOS 系列卫星云产品、云雷达卫星 CloudSat 云产品等都能有效表征基本云属性及不同时间尺度上的变化, 是研究全球云水资源分布等的数据库。此外, 微波辐射计可以提供大气温湿度、水汽密度及云液态水廓线(郑飒飒, 2019; 孔凡超等, 2021), 微波辐射计联合云雷达观测可以提高相对湿度廓线反演的精度(丁虹鑫等, 2018)。

径流是水分循环陆地分支中的重要变量。WMO 全球径流数据中心(Global Runoff Data Centre, GRDC) 提供了全球范围内超过 1 万个观测站点的流量数据。根据 2020 年水文统计年报(http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/swxytjnb/202109/t20210915_1544005.html), 我国水文水资源监测共有国家基本水文站 3000 余个, 专用水文站 4000 多个, 覆盖全部江河湖泊。地表蒸发不仅是地球表面水文循环的重要组成部分, 也是径流研究的重要参考数据之一。自 20 世纪 50 年代我国在地面气象站开展蒸发观测以来, 形成了长序列蒸发日值和月值数据集。但由于不同时期和地区部署了两种不同的蒸发仪器(大型蒸发和小型蒸发), 造成数据均一化较为困难。Xiong et al(2012) 利用偏最小二乘法进行线性回归, 重建了中国日大型蒸发数据集; Xue et al(2016) 利用改进的 Delta 统计降尺度方法重建了逐月累积蒸发量, 并以此开展了径流数据模拟与评估试验。

综上所述, 基于多渠道的气象和水文数据, 一方面, 通过多源数据时间序列的空间相关性分析等算法可有效甄别各类观测及元数据数据的错误与不确定性, 进而提升数据集质量(Bliefernich et al, 2021)。另一方面, 通过降水、径流、土壤水分、城市排水等多源信息的综合应用, 可有效分析极端强降水条件下潜在洪涝灾害的发生条件, 城市化条件下洪水响应时间和峰值时空变化状况, 以及水资源评估与水基础设施建设规划等(Smith et al, 2002; Chang et al, 2010)。

2 多源数据融合分析与实况构建

2.1 多源数据融合分析

随着综合观测系统的发展, 地基、海基、空基、天

基观测数据越来越多。但是,由于受到自然条件限制,地面和海洋站点观测分布不均匀,空间代表性始终存在不足,难以做到连续的时空覆盖。同样,地基或地基遥感探测容易受到遮挡物和反演算法的影响,产品精度也受到一定制约。因此,发挥不同来源观测数据的优势,发展多源融合分析产品是获取逼近水文气象“真值”的有效手段。

仍以降水数据为例,不同来源降水数据的优势和不足非常明显(表 1)。正因如此,多源融合降水应运而生。国际上早期的全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project Combined Precipitation, GPCP)(Huffman et al, 1997)、CPC 融合降水分析产品(CPC merged analysis of precipitation, CMAP)(Xie and Arkin, 1997)等降水产品结合了静止卫星红外探测时空连续分辨率高和极轨卫星被动微波降水精度较高的优势,并利用地面观测对卫星集成降水进行订正,融合形成长序列 2.5°分辨率的逐候降水数据,在水文气象及气候变化研究领域被广泛应用。20 世纪 90 年代后期,随着卫星资料的广泛应用,发展了概率密度匹配(probability density

function, PDF)等遥感资料校正及偏差订正技术,最优插值(optimum interpolation, OI)、卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)等融合技术在降水融合领域也有了更成熟的应用,卫星集成及融合降水产品时空分辨率显著提高,如美国的 TMPA(TRMM multi-satellite precipitation analysis)(Huffman et al, 2007)、CMORPH、日本 GSMaP(global satellite mapping of precipitation)(Ushio et al, 2009)等产品分辨率达到了逐小时 0.1°分辨率,为全球大范围高分辨率的降水监测提供了便利。天气雷达探测信息的引入,进一步提升了区域降水的精细刻画能力,美国 StageIV 系统(Kitzmilller et al, 2013)和 MRMS(Multi-Radar Multi-Sensor)系统(Zhang et al, 2016)针对雷达估测降水的偏差,以雨量计为基准发展了基于 KF、OI、反距离权重(inverse distance weighted, IDW)等方法的平均场系统误差订正和局部偏差订正技术(Seo and Breidenbach, 2002)。其中,MRMS 系统产品的空间分辨率达 1 km,更新频次达 2 min,在强降水灾害天气监测和临近预报方面发挥了重要作用。

表 1 各种来源降水数据的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of precipitation data from various sources

数据来源	优点	缺点
地面观测降水数据	可准确表征观测点上的降水量	海洋、无人区、地形复杂区域没有雨量观测数据
卫星反演降水产品	全球覆盖,能反映降水空间结构特征	反演精度不足,对固态降水基本没有反演能力
雷达估测降水产品	时空分辨率高	易受遮蔽物影响,覆盖范围有限
模式分析降水产品	空间全覆盖,对系统性或固态降水有一定模拟能力	对局地性、对流性降水模拟能力相对较差

我国多源数据融合的研究起步相对晚一些。2007 年, NMIC 开启了多源降水融合探索,研制出逐日 25 km 单源降水产品。之后,在消化改造国外相关技术[PDF、OI、贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)等]基础上,陆续研制出逐小时 10 km 分辨率“地面+卫星”二源融合降水产品、逐小时 5 km 和 1 km 分辨率“地面+卫星+雷达”三源融合降水产品(潘昶等, 2018),并利用气象和水文雨量站观测数据进行了独立样本检验。经过多年业务科研应用反馈与优化,2021 年 9 月中国区域逐小时 1 km 分辨率降水产品实现业务运行,为强降水监测和智能网格预报业务提供了高精度“零时刻”分析场。2020 年 2400 个国家自动站独立检验评估结果显示(表 2),基于地面、雷达和卫星三源融合的降水产品的均方根误差和平均偏差分别为 $0.526 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $-0.007 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 优于单源地面分析产品的 $0.576 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $-0.015 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 以

及雷达产品的 $0.815 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $-0.016 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。目前, NMIC 的多源融合分析产品已由降水要素拓展到海洋、陆地和三维大气的多个关键气象要素,其中与水分循环密切相关的有三维云(朱智等, 2021)、降水相态、蒸散发、土壤温湿度(Han et al, 2019)、积雪、海冰等。产出上述产品的核心技术各不相同,呈现出很好的多样性,例如利用逐步订正技术,融合雷达、卫星、探空等多源数据研制出中国区域逐小时三维云产品;应用高分辨率高质量陆面驱动数据和数值模拟技术,研发出中国区域逐小时积雪产品。此外,还研发了全球 25 km、逐日海冰密集度产品(张雷等, 2021),数据质量与英国 OSTIA、美国 OISST 产品较为接近。在此基础上,逐步建立了“全球-区域-局地”一体化大气、陆面、海洋多源融合分析实况产品体系(图 3),实时产出产品达 140 余种,全球分辨率达到 10 km、中国区域则为 1 km、局地可达百米。各类产品不仅在时空尺度上互补,更为重要的

表 2 降水产品及各数据源独立检验评估结果

数据	平均偏差/(mm · h ⁻¹)	均方根误差/(mm · h ⁻¹)	相关系数
地面分析	-0.015	0.576	0.857
雷达定量估测降水	-0.016	0.815	0.720
CMORPH	-0.034	1.102	0.366
融合降水产品	-0.007	0.526	0.850

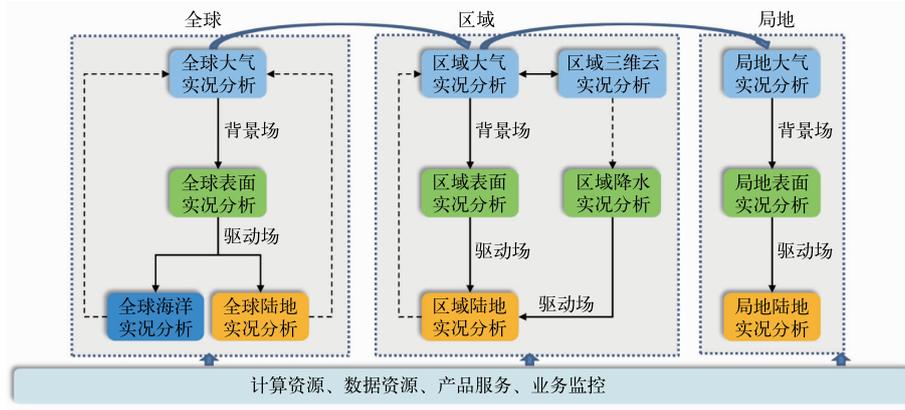


图 3 “全球-区域-局地”一体化大气、陆面、海洋多源融合分析实况产品

Fig. 3 Multi-source merging analysis products of “global-regional-local” integrated atmospheric, land and ocean multi-source data

是存在着内在的耦合驱动,且可实现相互验证和迭进。

2.2 融合分析实况产品的应用

通过融合分析快速产出的高精度实况产品,作为智能网格预报的背景场或预报模型的目标场,可提升网格预报的精细化程度和准确率,已成为时、日、月、季、年无缝隙预报业务的重要组成部分,支撑多尺度天气气候系统监测和预报(图 4)。例如,国

家气象中心将实时的降水实况产品用于快速滚动更新网格定量降水预报的订正(湛芸等,2021),以此来提高突发性中小尺度天气系统的降水预报能力。再如,2021年7月17—23日,河南省遭遇历史罕见特大暴雨,5 min 时效、逐 10 min 滚动更新的 1 km 分辨率多源融合降水实况分析产品直观地展现了降水过程的极端性,精准地捕捉到降水极值和强降水中心,为一线气象保障提供了重大支持(图 5)。

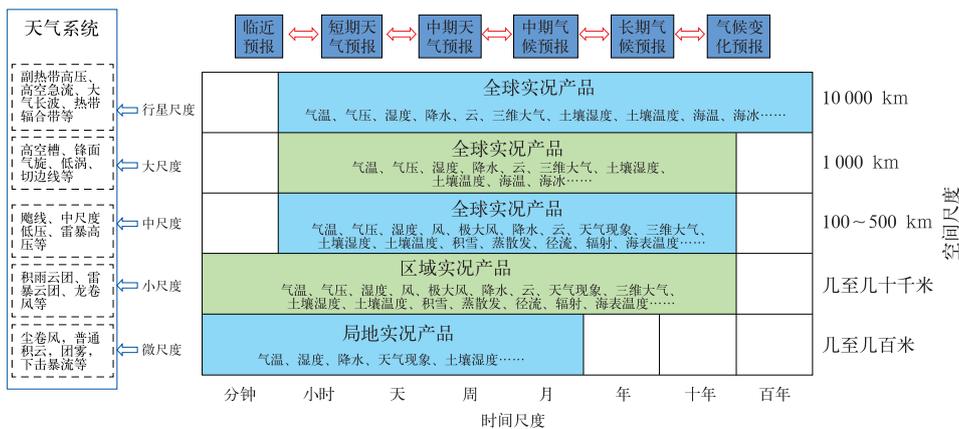


图 4 融合分析产品与无缝隙预报业务的对应关系

Fig. 4 Corresponding relationship between multi-source data fusion analysis products and seamless forecast operation

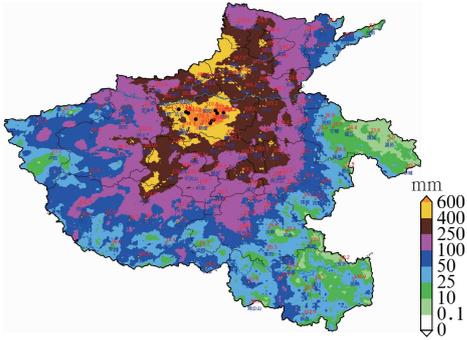


图 5 1 km 分辨率多源融合降水实况产品监测
2021 年 7 月 17 日 00—15 时河南暴雨过程累计雨量
Fig. 5 Observed accumulated rainfall during
the extreme rainstorm in Henan Province by the
1 km resolution multi-source data merging
precipitation product in 00—15 BT 17 July 2021

除了直接应用于水文气象灾害监测和预报,多源融合实况分析产品也作为水文模型的输入数据得到应用。如国家气象中心将降水实况产品接入水文模型前端,应用于渍涝风险及洪水预报业务(包红军等,2021)。水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心将降水等陆面驱动数据接入陆面水文模型,在辽宁、云南、长江中下游等地区发生的区域性干旱事件监测中发挥了重要作用。

3 资料再分析与水文气象

3.1 资料再分析产品及应用

众多研究表明,观测资料的发展丰富了人们的理论认识,以及对自然规律的数理描述,这对天气气

候模式的改进具有重要推动作用。例如 21 世纪初,在三维变分的同化技术条件下,卫星资料应用从同化反演廓线升级到直接同化卫星辐射率,就使全球预报技巧(特别是南半球)显著提升。同样,数值模式和同化系统的发展,也推动了观测资料的发展,为数据分析提供了更多的工具。观测资料与同化系统对接,依靠同化反馈数据的诊断分析,反复磨合,便可建立更完整、更高质量的基础数据集,同时可以产出高质量的再分析产品(图 6)。

资料再分析,就是利用先进的、固定的数据同化系统和数值预报模式,将模式预报和历史观测资料融合,从而获取多变量、空间覆盖完整、时间均一稳定的长序列历史分析产品,实现对过去天气和气候状况的重现。与针对特定要素开展的快速融合分析不同,资料再分析更加注重动力、物理、化学上的协调一致,同化的数据更全面,产出的物理量也更多。从 20 世纪 90 年代中期开始,欧美日先后组织实施了一系列全球大气资料再分析计划,并已经完成了四代全球大气资料再分析研制(表 3)。2017 年,欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的最新一代再分析产品(ERA5)代表着当前最高水平。与前几代不同,其在资料同化方面有全面改进,引入集合信息来表征“流依赖”的背景误差协方差矩阵(Hersbach et al, 2020)。从表 3 可以看出,国际再分析发展趋势有如下特点:同化方法越来越先进;考虑大气与其他过程(气溶胶、大气化学、海洋、陆面)耦合;分析数据集的空间分辨率逐渐提高,同化的观测资料(尤其卫星资料)越来越多;时间上向后追溯到更早期。

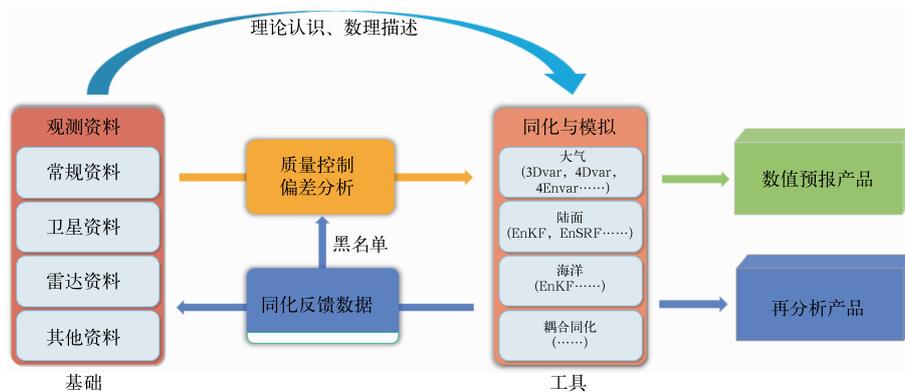


图 6 观测资料与数值预报、再分析的逻辑关系

Fig. 6 Relationship of observation data with numerical prediction and reanalysis data

表3 全球主要大气再分析产品

再分析产品名称		产品时段	分辨率	同化方法
第一代	NASA/DAO	1980—1995年	$2 \times 2.5L20$	3S-OI+IAU
	NCEP/NCAR	1948年至今	T62L28	3DVar SSI
	ERA-15	1979—1993年	T106L31	3D-OI
第二代	NCEP/DOE	1979年至今	T62L28	3DVar SSI
	ERA-40	1957—2002年	TL159L60	3DVar
	JRA-25	1979—2004年	T106L40	3DVar
第三代	ERA-Interim	1979—2019年	TL255L60	4DVar
	CFSR	1979年至今	T382L64	3DVar GSI
	MERRA	1979年至今	$1/2 \times 2/3L72$	3DVar GSI
	JRA-55	1957年12月至今	TL319L60	4DVar
第四代	ERA5	1979年至今	TL639L137	Ensemble of 4DVar

为了获取更高质量的陆面要素信息,国际主流的全球大气再分析都基于离线的陆面模式模拟研制一套单独的陆面再分析数据集,例如 ERA-Interim/Land (Balsamo et al, 2015)、ERA5/Land (Sabater et al, 2017)、MERRA-Land (Reichle et al, 2011) 和 CFSR-Land (Meng et al, 2012) 等。此外,国际上还先后组织实施了一系列全球海洋再分析产品的研究与制作,例如美国的 SODA (Carton and Giese, 2008)、ECCO (Menemenlis et al, 2008)、HYCOM (Chassignet et al, 2007)、ECMWF 的 ORA (Zuo et al, 2017)、法国的 GLORYS (Parent et al, 2011)、日本的 MOVE (Toyoda et al, 2012)、ESTOC (Masuda et al, 2010) 等,不仅为海洋短期数值预报和气候预测提供了初始场,而且还用于海洋动力学和海洋在气候变化中的影响研究。

再分析产品已成为研究地球系统重要的数据源 (Hodges et al, 2011),在天气、气候、海洋和水文等领域具有广泛应用。Lin et al (2014) 研究显示 MERRA 和 ERA-Interim 再分析数据正确地再现了全球季风降水的季节性。Winkelbauer et al (2022) 使用最先进的 ERA5 等再分析数据分析了北极主要流域的季节循环和年度径流趋势,计算了整个北极地区的河流流量。由于再分析能够为水文模型提供气温、降水量、蒸散量、土壤水分和径流等水文数据,因而被广泛用于各地的水文模型 (Zhao et al, 2010)。例如, Hersbach et al (2015) 选择 ERA-20CM 气候再分析作为驱动水文模型的输入,开展长时间序列的水文变化研究。Essou et al (2016a; 2016b) 使用美国的全球和区域再分析数据比较了水文模型的输出,再分析数据能够再现除亚热带和湿润的大陆地区以外的降雨年际变化。Dile

and Srinivasan (2014) 在气象数据缺乏的非洲尼罗河流域进行水文预报时,将 CFSR 再分析资料与传统气象数据输入 SWAT 模型中并对模拟结果进行了评估,发现使用 CFSR 气象数据的月尺度模拟精度较好。高瑞等 (2017) 以天山西部山区的喀什河流域为典型研究区,利用 1990—2000 年实测水文气象站点资料、CFSR 及 ERA-Interim 数据,驱动水文变量渗透能力 (variable infiltration capacity, VIC) 模型所得的径流过程与实测径流过程,评估了再分析降水数据在喀什河流域的适用性。

3.2 中国第一代大气和陆面再分析

NMIC 于 2013 年底启动全球大气再分析工作,通过一系列试验和监测评估,建立了第一代全球大气和陆面再分析系统,成功研制出 1979 年以来全球大气再分析产品 (简称 CMA-RA, 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率 34 km, 垂直层次为 64 层, 模式层顶为 0.27 hPa) 和全球陆面再分析产品 (时间分辨率为 3 h, 空间分辨率为 34 km, 垂直层次为 4 层)。以 ERA5 为基准,多方综合评估表明,CMA-RA 的三维大气温度场、湿度场、风场等总体上优于国际第一、二代全球大气再分析产品,与国际第三代全球大气再分析产品质量相当 (图 7)。CMA-RA 已于 2020 年 12 月实现业务化运行,可实现近实时追加更新,时效上快于从互联网下载国际同类产品。于 2021 年 5 月向全社会公开发布,用户已覆盖气象、水文、农业科学、地球科学、环境与安全等多个行业。与国际主流再分析产品一样,CMA-RA 包含了诸多与水循环相关的物理量,如降水、降雪、雪深、地表径流、土壤温度、土壤体积含水量、蒸散发、冠层总蓄水量等 (表略)。目前,国家气候中心的中国多模式

集成(China multi-model ensemble, CMME)预测系统已实现初始场由日本 JRA55 替换为国产 CMA-RA 数据;世界气象中心(北京)也基于 CMA-RA 开展了全球天气及气候监测服务(图 8 和图 9)。

但是实事求是地讲,CMA-RA 与 ECMWF 最新一代再分析 ERA5 相比还存在相当大的差距。这种差距不仅表现在产品分辨率、精度和序列长度等表层,还在同化技术、多分量模式耦合等核心技术层面。ERA5 采用了集合四维变分混合同化技术,实现了大气、陆面和波浪模型的耦合,产品时间分辨率达到 1 h,已成为全球再分析工作的追赶目标。

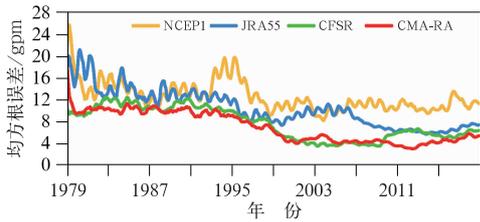


图 7 CMA-RA 500 hPa 位势高度与国际主流再分析产品(以 ERA5 为参照)
Fig. 7 CMA-RA of 500 hPa geopotential height and three major reanalysis datasets (RMSE relative to ERA5)

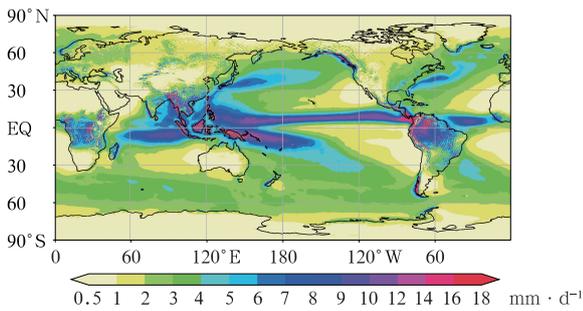


图 8 1981—2010 年 CMA-RA 全球日降水量气候态
Fig. 8 Climatology of global daily precipitation derived from CMA-RA (1981—2010)

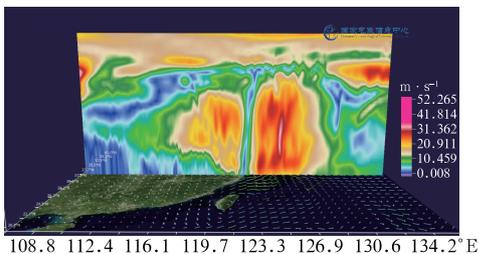


图 9 基于 CMA-RA 的台风烟花三维结构
Fig. 9 3D structure of Typhoon In-Fa derived from CMA-RA

4 未来工作展望

未来一段时期,全球综合观测系统和社会化观测还将快速发展。例如,欧盟哥白尼计划持续地加强卫星观测和直接观测,以及相应的数据和产品研发,其中卫星每天生产的数据量高达 12 TB。与此同时,地球系统模式正在从大气向陆地、海冰、海洋、海浪等分量模式扩展,而且趋于走向统一的地球系统模式。目前,积雪、陆面、海冰等观测资料同化还不是很充分,相对落后于大气资料,所以在地球系统模式的未来发展过程中,各圈层交界面上的水文气象观测资料的同化应用极其重要,需要进一步深化水文气象数据的收集整理、质量控制、融合分析和再分析。

(1)观测数据汇聚与质量控制。面向水文气象预报预测业务需求,进一步加强全球数据发现与收集、历史资料拯救、部门数据交换、社会化观测数据获取与处理,发展新型观测数据质量控制、复杂下垫面数据质量控制、社会化观测数据质量控制及偏差分析订正技术,实现多圈层协调质量控制、质量评估及偏差分析与订正,拓展人工智能技术在数据重建及偏差订正方面的应用,构建满足地球系统模式不同分量应用需求的立体综合水文气象观测信息。

(2)多源数据融合分析。科学消除各类观测探测资料的系统偏差及复杂下垫面条件影响,进行误差估计和多尺度最优分析从而得到准确的实况场。面向“早预警、早行动”对水文气象实况信息的需求,研发快速多源数据融合分析技术,产品要素向冰冻、生态等圈层拓展,更新频次提高至分钟级,重点区域产品空间分辨率提高至次百米级,逐渐逼近“真实”水分循环全过程,为防灾减灾提供精密的水文气象监测数据,并为模式预报提供更精准的初猜场。

(3)资料再分析。在我国第一代全球大气再分析数据产品基础上,研发高分辨率全球区域一体化大气再分析系统,研制具有更高时空分辨率全球和区域再分析产品。因篇幅局限,本文对国内海洋、大气化学再分析研发进展涉猎较少。但从未来发展看,可逐步将大气再分析扩展到耦合陆面、海洋、海冰、积雪、冰盖、大气化学、生物地球化学、动态植被等气候系统组分,研究多圈层、多组分和多过程相互协调的资料同化技术,优化不同历史时期气候系统

各组分背景误差协方差,研发更长时段气候系统耦合再分析产品。

(4)人工智能分析。紧跟美国和 ECMWF 人工智能战略,加快经典数理分析技术与大数据、人工智能、云计算等新一代信息技术的融合应用,围绕灾害性天气识别、短时临近预报、气候预测,以及数据质量控制、误差分析订正、时空降尺度等典型气象应用场景,研发高质量气象和水文人工智能应用训练、验证及测试数据集,发布基准数据集,从而促进人工智能在数据分析、数值模式多环节的应用。

致 谢:本文撰写得到了刘志权、师春香、姜立鹏等人在多源数据融合分析与再分析方面提供的有益指导和重要帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

包红军,张恒德,许风雯,等,2021. 国家级水文气象预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,47(6):671-684. Bao H J, Zhang H D, Xu F W, et al, 2021. Progress and challenge of national level operational technology for hydrometeorological forecasting[J]. Meteor Mon, 47(6):671-684(in Chinese).

湛芸,曹勇,孙健,等,2021. 中央气象台精细化网格降水预报技术的发展和思考[J]. 气象,47(6):655-670. Chen Y, Cao Y, Sun J, et al, 2021. Progress of fine gridded quantitative precipitation forecast technology of National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6):655-670(in Chinese).

丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018. 云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J]. 气象,44(12):1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12):1604-1611(in Chinese).

高瑞,穆振侠,彭亮,等,2017. CFSR、ERA-Interim 再分析降水数据在高寒山区径流模拟中的适用性[J]. 水电能源科学,35(9):8-12. Gao R, Mu Z X, Peng L, et al, 2017. Application of CFSR and ERA-Interim reanalysis data in runoff simulation in high cold alpine areas[J]. Water Resour Power, 35(9):8-12(in Chinese).

姜彤,孙赫敏,李修仓,等,2020. 气候变化对水文循环的影响[J]. 气象,46(3):289-300. Jiang T, Sun H M, Li X C, et al, 2020. Impact of climate change on water cycle[J]. Meteor Mon, 46(3):289-300(in Chinese).

孔凡超,李江波,王颖,2021. 北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演大气湿温廓线分析[J]. 气象,47(9):1062-1072. Kong F C, Li J B, Wang Y, 2021. Analysis on atmospheric profiles retrieved by microwave radiometer at genting venue of Beijing Olympic Winter Games[J]. Meteor Mon, 47(9):1062-1072(in Chinese).

潘昉,谷军霞,宇婧婧,等,2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报,76(5):755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al, 2018. Test of merging methods for multi-source

observed precipitation products at high resolution over China [J]. Acta Meteor Sin, 76(5):755-766(in Chinese).

谢欣汝,游庆龙,林厚博,2018. 近 10 年青藏高原中东部地表相对湿度减少成因分析[J]. 高原气象,37(3):642-650. Xie X R, You Q L, Lin H B, 2018. Surface relative humidity decreases and its cause over the Qinghai-Tibetan Plateau in recent ten years[J]. Plateau Meteor, 37(3):642-650(in Chinese).

徐宾,师春香,姜立鹏,等,2015. 东亚多卫星集成降水业务系统[J]. 气象科技,43(6):1007-1014, 1069. Xu B, Shi C X, Jiang L P, et al, 2015. Multi-satellite integrated operational system of East Asian precipitation[J]. Meteor Sci Technol, 43(6):1007-1014, 1069(in Chinese).

徐丽君,卫琦,徐俊增,等,2021. 中国北方干旱区降雨与相对湿度变化趋势的非一致性研究[J]. 水资源与水工程学报,32(2):38-44. Xu L J, Wei Q, Xu J Z, et al, 2021. Inconsistent change trends between precipitation and relative humidity in arid areas of North China[J]. J Water Resour Water Eng, 32(2):38-44(in Chinese).

张雷,徐宾,廖志宏,等,2021. 全球多源海冰密集度融合资料研制试验[J]. 气象学报,79(4):703-715. Zhang L, Xu B, Liao Z H, et al, 2021. Development experiment of a global multi-source sea ice concentration fusion dataset [J]. Acta Meteor Sin, 79(4):703-715(in Chinese).

赵煜飞,朱亚妮,2017. 中国地面均一化相对湿度月值格点数据集的建立[J]. 气象,43(3):333-340. Zhao Y F, Zhu Y N, 2017. Establishment of grid datasets of monthly homogenized surface relative humidities over China[J]. Meteor Mon, 43(3):333-340(in Chinese).

郑飒飒,2019. MWP967 KV 型地基微波辐射计反演产品的质量评估 [J]. 高原山地气象研究,39(2):82-86. Zheng S S, 2019. Quality assessment on inverted products of MWP967 KV ground-based microwave radiometer [J]. Plateau Mountain Meteor Res, 39(2):82-86(in Chinese).

朱亚妮,曹丽娟,唐国利,等,2015. 中国地面相对湿度非均一性检验及订正[J]. 气候变化研究进展,11(6):379-386. Zhu Y N, Cao L J, Tang G L, et al, 2015. Homogenization of surface relative humidity over China[J]. Climate Change Res, 11(6):379-386(in Chinese).

朱智,师春香,刘瑞霞,等,2021. 我国三维云融合分析业务系统(3DCloudA-V1.0)研制与开发[J]. 气象科技,49(1):55-62. Zhu Z, Shi C X, Liu R X, et al, 2021. Research and development of three-dimensional cloud merging analysis operation system (3DCloudA-V1.0) in China[J]. Meteor Sci Technol, 49(1):55-62(in Chinese).

Ascott M J, Macdonald D M J, Black E, et al, 2020. In situ observations and lumped parameter model reconstructions reveal intra-annual to multidecadal variability in groundwater levels in sub-Saharan Africa [J]. Water Resour Res, 56(12):e2020WR028056.

Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, et al, 2015. ERA-interim/Land: a global land surface reanalysis data set [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 19(1):389-407.

- Blenkinsop S, Fowler H J, Barbero R, et al, 2018. The INTENSE project: using observations and models to understand the past, present and future of sub-daily rainfall extremes[J]. *Adv Sci Res*, 15: 117-126.
- Bliefernicht J, Salack S, Waongo M, et al, 2021. Towards a historical precipitation database for West Africa: overview, quality control and harmonization[J/OL]. [2022-02-08]. <http://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.7467>. DOI: 10.1002/joc.7467.
- Brunet G, Jones S, Ruti P M, 2015. Seamless prediction of the earth-system: from minutes to months[EB/OL]. [2022-02-08]. http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1156_en.pdf.
- Carton J A, Giese B S, 2008. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA)[J]. *Mon Wea Rev*, 136(8): 2999-3017.
- Chang N B, Yang Y J, Goodrich J A, et al, 2010. Development of the metropolitan water availability index (MWAI) and short-term assessment with multi-scale remote sensing technologies[J]. *J Environ Manage*, 91(6): 1397-1413.
- Chassignet E P, Hurlburt H E, Smedstad O M, et al, 2007. The HYCOM (HYbrid coordinate ocean model) data assimilative system[J]. *J Mar Syst*, 65(1/2/3/4): 60-83.
- Chen L F, Cao L J, Zhou Z J, et al, 2021. A new globally reconstructed sea surface temperature analysis dataset since 1900[J]. *J Meteor Res*, 35(6): 911-925.
- Dile Y T, Srinivasan R, 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin[J]. *J Am Water Resour Assoc*, 50(5): 1226-1241.
- Durre I, Yin X, Vose R S, et al, 2018. Enhancing the data coverage in the integrated global radiosonde archive[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 35(9): 1753-1770.
- Essou G R, Arsenault R, Brissette F P, 2016a. Comparison of climate datasets for lumped hydrological modeling over the continental United States[J]. *J Hydrol*, 537: 334-345.
- Essou G R C, Sabarly F, Lucas-Picher P, et al, 2016b. Can precipitation and temperature from meteorological reanalyses be used for hydrological modeling? [J]. *J Hydrometeorol*, 17(7): 1929-1950.
- Han S, Shi C X, Xu B, et al, 2019. Development and evaluation of hourly and kilometer resolution retrospective and real-time surface meteorological blended forcing dataset (SMBFD) in China[J]. *J Meteor Res*, 33(6): 1168-1181.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730): 1999-2049.
- Hersbach H, Peubey C, Simmons A, et al, 2015. ERA-20CM: a Twentieth-Century atmospheric model ensemble [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(691): 2350-2375.
- Hodges K I, Lee R W, Bengtsson L, 2011. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25 [J]. *J Climate*, 24(18): 4888-4906.
- Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al, 1997. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(1): 5-20.
- Huffman G J, Alder R F, Bolvin D T, et al, 2007. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. *J Hydrometeorol*, 8(1): 38-55.
- IPCC, 2021. Climate change 2021: the physical science basis[R/OL]. [2022-02-08]. <https://upstree.com/environment-ippc-report-climate-change-2021-the-physical-science-basis/>.
- Jiang H, Xu W H, Yang S, et al, 2021. Development of an integrated global land surface dataset from 1901 to 2018[J]. *J Meteor Res*, 35(5): 789-798.
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al, 2004. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. *J Hydrometeorol*, 5(3): 487-503.
- Kitzmler D, Miller D, Fulton R, et al, 2013. Radar and multisensor precipitation estimation techniques in national weather service hydrologic operations[J]. *J Hydrol Eng*, 18(2): 133-142.
- Liao J, Wang H Y, Zhou Z J, et al, 2021. Integration, quality assurance, and usage of global aircraft observations in CRA[J]. *J Meteor Res*, 35(1): 1-16.
- Lin R P, Zhou T J, Qian Y, 2014. Evaluation of global monsoon precipitation changes based on five reanalysis datasets[J]. *J Climate*, 27(3): 1271-1289.
- Masuda S, Awaji T, Sugiura N, et al, 2010. Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters [J]. *Science*, 329(5989): 319-322.
- Menemenlis D, Campin J M, Heimbach P, et al, 2008. ECCO2: high resolution global ocean and sea ice data synthesis [C] // AGU Fall Meeting, Washington D C; AGU.
- Meng J, Yang R Q, Wei H L, et al, 2012. The land surface analysis in the NCEP climate forecast system reanalysis[J]. *J Hydrometeorol*, 13(5): 1621-1630.
- NCEI, 2017. Global surface summary of the day[EB/OL]. (2017-06-07). [2022-02-08]. <https://data.noaa.gov/dataset/dataset/global-surface-summary-of-the-day-gsod>.
- Parent L, Ferry N, Garric G, et al, 2011. GLORYS2: a global ocean reanalysis simulation of the period 1992-present [J]. *Geophys Res Abstr*, 13.
- Rausser F, Alqadi M, Arowolo S, et al, 2017. Earth system science frontiers: an early career perspective[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(6): 1120-1127.
- Reichle R H, Koster R D, De Lannoy G J M, et al, 2011. Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates [J]. *J Climate*, 24(24): 6322-6338.
- Sabater J M, Dutra E, Balsamo G, et al, 2017. ERA5-Land: a new state-of-the-art global land surface reanalysis dataset [C] // 31st Conference on Hydrology, Seattle; European Commission: 1-16.
- Schamm K, Ziese M, Becker A, et al, 2014. Global gridded precipitation

- over land; a description of the new GPCP first guess daily product[J]. *Earth Syst Sci Data*, 6(1): 49-60.
- Seco A, Ramirez F, Serna E, et al, 2012. Rain pattern analysis and forecast model based on GPS estimated atmospheric water vapor content[J]. *Atmos Environ*, 49: 85-93.
- Seo D J, Breidenbach J P, 2002. Real-time correction of spatially non-uniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements[J]. *J Hydrometeorol*, 3(2): 93-111.
- Smith A, Lott N, Vose R, 2011. The integrated surface database: recent developments and partnerships[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 92(6): 704-708.
- Smith J A, Baek M L, Morrison J E, et al, 2002. The regional hydrology of extreme floods in an urbanizing drainage basin[J]. *J Hydrometeorol*, 3(3): 267-282.
- Thornton M M, Shrestha R, Wei Y, et al. 2020. Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4 [M]. (2020-12-15). Tennessee: ORNL DAAC, Oak Ridge. DOI: 10.3334/ORNLDAAC/1840.
- Toyoda T, Fujii Y, Yasuda T, et al, 2012. Improved analysis of the seasonal-interannual fields by a global ocean data assimilation system[C]// The 61st National Congress of Theoretical and Applied Mechanics. National Committee for IUTAM: 50-50.
- Ushio T, Sasashige K, Kubota T, et al, 2009. A Kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data [J]. *J Meteor Soc Jpn Ser II*, 87A: 137-151.
- Willett K M, Dunn R J H, Thorne P W, et al, 2014. HadISDH land surface multi-variable humidity and temperature record for climate monitoring[J]. *Climate Past*, 10(6): 1983-2006.
- Willett K M, Jones P D, Gillett N P, et al, 2008. Recent changes in surface humidity; development of the HadCRUH dataset[J]. *J Climate*, 21(20): 5364-5383.
- Winkelbauer S, Mayer M, Seitner V, et al, 2022. Diagnostic evaluation of river discharge into the Arctic Ocean and its impact on oceanic volume transports[J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 26(2): 279-304.
- Xie P P, Arkin P A, 1997. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(11): 2539-2558.
- Xiong A Y, Liao J, Xu B, 2012. Reconstruction of a daily large-pan evaporation dataset over China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 51(7): 1265-1275.
- Xue J, Gui D W, Lei J Q, et al, 2016. Reconstructing meteorological time series to quantify the uncertainties of runoff simulation in the ungauged Qira River Basin using data from multiple stations [J]. *Theor Appl Climatol*, 126(1/2): 61-76.
- Yang S, Jones P D, Jiang H, et al, 2020. Development of a near-real-time global in situ daily precipitation dataset for 0000 - 0000 UTC[J]. *Int J Climatol*, 40(5): 2795-2810.
- Yao Y B, Shan L L, Zhao Q Z, 2017. Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application[J]. *Sci Rep*, 7(1): 12465.
- Zhang J, Howard K, Langston C, et al, 2016. Multi-radar multi-sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation; initial operating capabilities[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(4): 621-638.
- Zhao T B, Fu C B, Ke Z J, et al, 2010. Global atmosphere reanalysis datasets; current status and recent advances[J]. *Adv Earth Sci*, 25(3): 241-254.
- Zuo H, Balmaseda M A, Mogensen K, 2017. The new eddy-permitting ORAP5 ocean reanalysis; description, evaluation and uncertainties in climate signals[J]. *Climate Dyn*, 49(3): 791-811.

(本文责编:何晓欢)