

# 海平面观测及数据产品研发进展及展望

陈丽凡 曹丽娟

(国家气象信息中心, 北京 100081)

**摘要:** 海平面高度变化对人类的生存环境和生命安全等均会产生巨大影响, 开展海平面观测及数据产品研发, 对于全球和区域(如中国近海)的当前海平面变化状态、长期变化归因及未来变化趋势的分析评估等具有重要意义。当前, 国际上已有较为成熟的海平面观测系统(GLOSS), 其研发的数据产品为全球和区域海平面变化监测与分析等提供有力支撑; 国内, 国家海洋局也在积极推动卫星观测网和验潮站网的建立和加强, 并通过国家海洋科学数据中心公开发布了多套海平面观测数据产品。然而, 目前国内气候监测业务主要依赖国家海洋信息中心逐年提供的中国沿海海平面距平序列, 为了进一步提升海洋气候监测数据支撑能力, 充分发挥海平面观测数据在海洋灾害评估、应对气候变化等研究中的作用, 亟待加强多来源海平面观测数据的收集、评估及加工处理与业务应用等工作, 积极深入开展验潮站及卫星反演海平面高度数据的对比分析与有效融合, 在此基础上, 逐步构建可自主更新的全球和区域海平面高度序列。

**关键词:** 海平面高度, 验潮站, 卫星高度计, 海平面高度序列

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.003

## The Progress and Prospect of Sea Level Observing System and Data Product Development

Chen Lifan, Cao Lijuan

(National Meteorological Information Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** Rising sea levels are global threats because they have huge impacts on human living environment and life safety. The development of sea level observing system and follow-up data products are particularly important to the analysis of global and regional sea level change, drivers of long-term sea level change and future trend. The global sea level observing system (GLOSS), as a relatively mature international sea level monitoring program, has been designed to provide data products for global/regional sea level observations and analyses. Meanwhile, the State Oceanic Administration of China is also actively promoting the establishment and strengthening of satellite altimetry and tide station networks, and has released multiple sea level data products. However, the domestic climate monitoring mainly depends on the annual coastal sea level anomaly series provided by the National Marine Information Center. Hence it is necessary to reinforce data collection, evaluation, product processing and operational application of the multi-source sea level observations so as to further enhance the supporting capacity of marine climate monitoring data and elaborate the application of sea level observation data in marine disaster assessment and climate change response. Moreover, the comparative analysis and fusion of sea level data from tide station and satellite observations deserve more attention, based on which it is feasible to construct self-renewable global/regional sea-level time series.

**Keywords:** sea level, tide station, satellite altimetry, sea-level time series

### 0 引言

地球四分之三的表面被海洋覆盖, 伴随着人类探测能力和技术水平的提升, 海洋正在逐步揭开其神秘面纱。我国是海洋大国, 拥有1.8万 km的大陆岸线、1.4万 km的岛屿岸线和约300万 km<sup>2</sup>的管辖海域, 加强对海洋的认识水平对国防、运输、经济及气候都有其重要的影响<sup>[1]</sup>。其中, 海洋水位观测在经济生产建设、科学研究、自然灾害预防等方面都起着至关重要

的作用, 其观测数据可用于: 1) 海平面变化、海洋环流等研究: 海平面变化趋势是全球气候变化系统的重要参考指标之一, 通过长序列海平面观测数据了解过去的海平面变化规律、预测未来的海平面变化趋势, 有助于预报海洋现象和应对海洋灾害; 2) 海洋和海岸工程设计: 海防和其他沿海基础设施设计过程中, 往往需要估算沿海极端海平面事件的发生频次等, 从而评估洪水风险等级; 3) 国家和地区的高程基准建立: 基于特定时期的平均海平面数据统计所得的国家和地区高程基准信息可用于土地调查、国界线的界定等; 4) 风暴潮、海啸等灾害性事件的监测: 近实时海平面

收稿日期: 2021年9月15日; 修回日期: 2022年1月1日  
第一作者: 陈丽凡(1989—), Email: chenlf@cma.gov.cn  
资助信息: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004200)

观测数据可用于海洋模式同化过程,从而提供洪水警报和海啸预警等信息;5)潮汐表制作和港口作业:潮汐表是海平面观测数据的主要产品之一,其在航运、军事和生产方面均有重要作用,如沿海的渔业、水产养殖业、农业、盐业、资源开发、港口工程建设、测量、环境保护和潮汐发电等,都需要掌握潮汐变化的规律<sup>[2]</sup>。

在全球变暖日益加剧的背景下,海平面上升已成为全球性的重大环境问题,全球及区域海平面变化研究是当前国内外海洋科学研究的热点问题<sup>[3]</sup>。自1990年来,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)先后发布了六次评估报告,均对海平面变化情况进行了描述,报告指出,全球变暖背景下,全球平均海平面上升的证据是确凿的,且明显加速,其中,海平面的上升速率从1901—1990年的1.4 mm/a,增加至1970—2015年的2.1 mm/a,再到1993—2015年的3.2 mm/a,并进一步增加至2006—2015年的3.6 mm/a(高信度)<sup>[4]</sup>。《中国应对气候变化的政策与行动》(2008年)中明确要求:要通过加强对海平面变化趋势的科学监测以及对海洋和海岸带生态系统的监管,提高沿海地区抵御海洋灾害的能力。自2000年以来,国家海洋局几乎每年开展一次我国沿海海平面监测、海平面变化影响调查与评价,分析结果表明,我国沿海海平面上升速率高于全球同期平均水平,面临的海平面上升影响风险更大<sup>[3, 5]</sup>。此外,中国气象局每年编制的《中国气候变化蓝皮书》也对中国沿海海平面变化情况进行评估,其2021年的报告指出,2020年,中国沿海海平面较1993—2011年平均值高73 mm,为1980年以来的第三高位<sup>[6]</sup>。

不断上升的海平面会对人类的生产、生活造成一定的影响,对人类的生存环境和国家安全等造成威胁。在生态环境方面,海平面上升会引发海岸侵蚀、海水入侵和土壤盐渍化等严重威胁到沿海和岛屿生态系统的灾害性事件,如,已有研究表明,正在上升的海平面已经对我国长江中下游的湿地生态环境构成了威胁,使得长江中下游湿地生态变得更加脆弱<sup>[7-8]</sup>。在经济发展方面,海平面上升减少了海岸带面积,从而影响沿海农业等相关经济的发展,此外,海平面上升带来的极端天气也会给沿海地区带来直接经济损失,如,研究表明,如果没有采取有效的适应措施,受极值水位上升影响的经济损失将随着海平面的上升而显著增加,到21世纪末可能达到全球国内生产总值(GDP)的10%。在民生安全方面,随着海平面上升,风暴和洪水发生将更频繁、更剧烈,风暴潮将到达更

远的内陆,从而威胁人类的生命财产安全,此外,海平面上升会导致咸水入侵沿海陆地的含水层、地表水和土壤,影响地下水的质量,进而影响饮用水的供给等<sup>[4]</sup>。在国家安全方面,海平面上升会导致小岛屿国家的国土受到被淹没的威胁,全球沿岸国家的领土面临逐渐流失风险,进而引起人口的跨境迁移、国籍和海洋边界变化等问题,如,由于海平面上升,2001年,太平洋岛国图鲁瓦发布申明,该国对抗海平面上升的努力失败,其国居民将逐步撤离,举国搬迁新西兰<sup>[9-10]</sup>。

海平面不可逆转的持续上升趋势,以及海平面上升对沿海地区和岛屿的自然环境、社会经济和生态系统等多方面的重大影响和严重威胁强调了海平面变化研究的重要性,而海平面上升的分析预测结果的可靠性直接源于观测数据集的质量<sup>[11]</sup>。为科学应对全球气候变化及海平面上升的影响、加强海平面上升对中国海洋灾害的风险管理和海洋环境的监测能力、满足《中国气候变化蓝皮书》及气候变化评估等业务科研的应用需求,需加强自主研发、追加更新的海平面气候数据及序列产品等的研发,从而加深对海平面变化规律及其影响的认识与理解,而这一切,需要我们对海平面的观测手段/设备、国内外海平面数据产品情况等有一定的了解,从而更好地部署相关监测系统及产品研发计划等<sup>[12]</sup>。

## 1 海平面观测

海面是指处于不停运动中的海洋表面,海平面则是指消除海洋中波浪和潮汐等波动后一定时间内海面高度的平均,是通过海面高度的观测数据统计得到的,目前对海面高度的观测手段主要包括验潮站和卫星高度计两大类<sup>[3-4]</sup>。

### 1.1 验潮站

验潮站是指在选定的地点,通过设置自记验潮仪或水尺来记录水位变化的观测站。随着现代科技的发展,各种不同原理的验潮方式不断涌现,从传统的水尺、浮子式验潮到新发展的压力式、雷达、声学等验潮,各种验潮方式各有其优缺点。其中,水尺验潮通过在选定的验潮水域打桩或利用现有港湾设施固定安装验潮水尺,其水位数据由人工目视观测并进行记录。该方法简单方便,可长时间免维护,设备费用低,但耗费人力,且观测数据受人为主观因素影响较大,目前多用于固定验潮站自记水位计的潮位校核或临时应急观测。浮子式验潮利用漂浮于海面的浮子,它随海面上下浮动,其随动机构将浮子的上下运动转换为记录纸滚轴的旋转,从而在记录纸上留下水位变

化曲线,其测量精度较高,稳定性好。目前我国主要采用浮子式水位计进行潮位测量。声学式验潮利用声波反射原理实现对水位高度的测量,根据传感器的安装位置,分为空气介质和水介质型验潮仪。这种潮汐观测方法设备成本低,但不便在离岸较远的海上验潮点进行验潮,其在美国的潮位观测中应用较多。压力式验潮将验潮仪安置于水下固定位置,通过检测海水的压力变化而推算出海面的起伏变化。该种验潮方式适用于远岸、近岸以及深海的潮汐观测,但对传感器的防护性要求高,测量过程中还需要水温、盐度、大气压力等信息进行潮位数据修订。雷达验潮通过测量电磁波往返海面的时间,结合雷达波传播速度,即可推算得到被测水面与雷达的相对距离<sup>[13]</sup>。

验潮站的观测数据最早可追溯至18世纪初,其具有长期稳定的特点,是研究20世纪以来海平面变化最主要的数据来源,在研究海平面局部特征和长期趋势方面具有不可替代的优势<sup>[3]</sup>。此外,利用验潮站近海精度高、数据长期稳定等特点,可以改正卫星近海数据精度及校正卫星测高数据的低频信号漂移等。但验潮站也有明显的使用缺陷,例如其空间分布和数量具有局限性。验潮站大多分布在海洋沿岸及岛屿上,在深海及开阔的海面分布较少,且总体呈北半球多南半球少的分布状态。其次,验潮站观测的海平面是以水准尺零点或者某一水准面为基准的相对海平面,其容易受到局部地壳垂直运动的影响,且最早采用固定水准尺验潮方法,其验潮数据由人工记录,难免存在记录过程中一些人为因素带来的误差<sup>[12, 14]</sup>。

全球海平面观测系统(GLOSS)是由政府间海洋学委员会(IOC)在1985年成立的一项国际间的合作计划,代表了世界水位观测技术的前沿,它的目标是建立一个高质量的全球和区域的海平面观测网,用于海平面气候变化和气象预警等科学研究和业务应用<sup>[2]</sup>。GLOSS主要包含6个全球验潮站资料中心:持久海平面中心(PSMSL)、延时资料中心(BODC)、快速资料中心(UHSLC)、水位联合档案中心(JASL/UHSLC)、水位实时资料监控中心(VLIZ)及验潮站的全球导航卫星系统资料中心(SONEL),各中心可提供不同采样频率(小时、天、月)的验潮站观测资料集,具体如表1所示。以PSMSL为例,其管理并发布全球近2000个验潮站的月尺度海平面数据,站点覆盖世界大部分海岸线(图1),各测站的资料长度从几十年到几百年不等。此外,GLOSS还有一个全球核心工作网(GCN),由均匀分布在全球的约300个潮位站组成,这些验潮站对全球性海平面变化趋势和上升速

表1 GLOSS观测网的6个全球数据中心<sup>[2]</sup>  
Table 1 Six GLOSS data centers<sup>[2]</sup>

	资料中心	职责	数据持有	更新实效
月均值	PSMSL	研制最终的月均海平面数据产品	GCN, GLOSS-OC, GLOSS-LTT	每年
延时模式	BODC	研制最终的高频海平面数据产品	GCN, GLOSS-OC, GLOSS-LTT	每年
快速模式	UHSLC	研制临时的质量控制数据产品	GCN, GLOSS-OC	每4~6周
小时数据产品	JASL/ UHSLC	研制最终的高频订正数据产品	GCN, GLOSS-OC	每年
海平面监测系统	VLIZ	原始数据监控	GCN, GLOSS-OC	近实时
GNSS数据	SONEL	GLOSS潮位站附近的GNSS数据收集	GCN, GLOSS-OC, GLOSS-LTT	每年

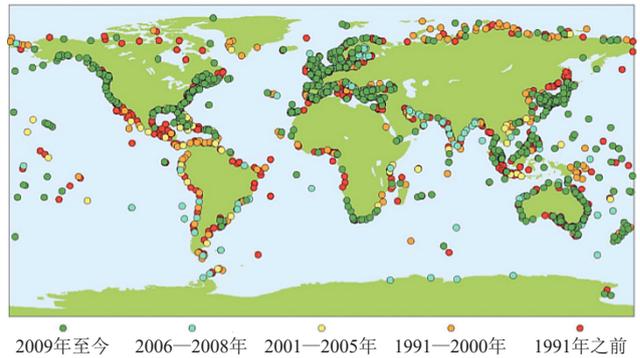


图1 全球潮位站分布示意图<sup>[2]</sup>  
Fig. 1 Distribution of tide stations<sup>[2]</sup>

率进行监测,并为长期气候变化研究提供帮助,如为IPCC报告中的海平面分析评估提供数据支持等。

中国的潮位观测历史可追溯至1860年,系统的验潮站工作始于1964年,重要的长期验潮站包括塘沽、烟台、青岛、吴淞、厦门和广州等<sup>[3]</sup>。随着《“一站多能”海洋(中心)站“十三五”实施方案》的落实,近年来,我国海平面观测站点逐渐增多,布局日趋合理,观测能力稳步提升。同时,业务化开展基准潮位核定工作,进行验潮系统相关技术培训,逐年对海洋站站址变迁、环境变化、零点调整和仪器更换等引起的资料均一化问题进行核定,形成了长期、连续、稳定的高质量海平面数据序列,为海平面与气候变化研究、海洋防灾减灾和海洋生态文明建设等提供重要支撑。目前,中国海平面观测网拥有100余个海平面观测站<sup>[15]</sup>,观测序列长度自1942年至今不等。《2020年中国海平面公报》资料显示,近海有15个空间分布均匀的站点可提供1980年至今的完整的海平面历史序列数据<sup>[16]</sup>。

## 1.2 卫星高度计

卫星测高是脉冲测距中主动式测距的一种,它利用卫星上装载的测高仪、辐射计和合成孔径雷达等仪器,通过发射天线向星下点发射一定频率的脉冲信

号, 并接收来自海面发射信号, 从而实时测量卫星到海表的距离; 进而结合已有的定轨方法获取精确的卫星高度, 再利用各种算法或模型给出各种误差源的改正项, 就可以确定出相对于椭球参考系的海表面高度值, 即绝对海平面。卫星测高最初只是为了确定海面形状, 现已广泛地应用于全球海平面监测、中尺度涡及环流的探测等领域的研究<sup>[7, 14, 17]</sup>。

卫星测高技术最早于1969年由美国著名的大地测量学者Kaulat提出, 随着现代计算机技术和空间技术的发展应运而生并趋于成熟(表2)。1973年, NASA在Skylab上搭载了测高计, 尽管该测高数据的精度较差, 甚至无法使用, 但其为卫星测量海面高度开创了先河, 证明了卫星测高的可行性。随后NASA在1975

年发射了测高卫星Geo-3, 该卫星轨道倾角为115°, 轨道高度为840 km, 测高精度为0.25~0.50 m, 为后续测高卫星的发射打下了坚实的基础。1978年, NASA发射了测高卫星SeaSat, 该卫星测高计使用了高压压缩比脉冲压缩技术, 由于电源故障问题, 该卫星只运行了3个月, 但获得了大量的海洋数据。随着卫星定轨及测高数据处理技术的发展, 卫星测高的测量精度也不断提升。1985年, 美国海军发射了测高卫星GeoSat, 该卫星执行了三年多的重复周期任务和18个月的大地测量任务, 为海洋时变及动态变化的研究提供了丰富的海洋信息。1998年, GeoSat的后继测高卫星GFO (GeoSat-Follow-On) 登空, 该卫星的测高精度高达35 mm<sup>[14]</sup>。

表2 卫星高度计发展现状(截至2018年)<sup>[20]</sup>  
Table 2 Development of satellite altimeter (as of 2018)<sup>[20]</sup>

卫星平台	雷达高度计	运行时间	模式	波段	重访周期/d	轨道间距/km	测高精度/cm
Skylab	S-193	1973年	1	Ku	-	-	85~100
Geos-3	ALT	1975—1979年	1	Ku	23	-	25~50
SeaSat	ALT	1978年	1	Ku	17	-	10
GeoSat	Radar Alt	1985—1990年	1	Ku	17	8	4
ESR-1	RA-1	1991—1995年	1	Ku	35	80	3~4
TOPEX/Poseidon	ALT/Poseidon-1	1992—2006年	1	Ku和C	10	315	2~3
ERS-2	RA-1	1995—2003年	1	Ku	35	80	3~4
GFO	Radar Alt	1998—2008年	1	Ku	17	165	3.5
Jason-1	Poseidon-2	2001—2013年	1	Ku和C	10	315	2
ENVISAT	RA-2	2002—2012年	1	Ku和S	35	80	2
ICESat-1	GLAS	2003—2009年	4	1064 nm和532 nm	183	15	10
Jason-2	Poseidon-3	2008—2019年	1	Ku和C	10	315	2
Cryosat-2	SIRAL	2010年至今	1、2、3	Ku	369或30	7.5	1~3
HY-2A	HY-2A	2011—2022年	1	Ku和C	14	208	4
SARAL	Altika	2013年至今	1	Ka	35	80	2
Jason-3	Poseidon-3B	2016年至今	1	Ku和C	10	315	2
Sentinel-3A	SRAL	2016年至今	2	Ku和C	27	104	1
Tiangong-2	InIRA	2016—2018年	3	Ku	-	-	-
ICESat-2	ATLAS	2018年至今	4	532 nm	91	-	-
Sentinel-3B	SRAL	2018年至今	2	Ku和C	27	104	-
SWOT	KaRIN	2022年至今	1、3	Ka、Ku和C	20	-	-

继GeoSat发射之后, 测高卫星迎来了大的发展热潮。1991年, 欧空局成功发射了欧洲第一颗遥感卫星ERS-1, 该卫星的平均轨道为785 km, 轨道倾角为98.5°, 测高精度约为30~40 mm。1995年, ERS-1的后续卫星ERS-2发射成功, 该卫星主要执行精密重复周期任务。2002年, 欧空局又成功发射了ERS系列的后继卫星ENVISAT, 该卫星的轨道及测高计的测距模式都得到了较大的完善, 测高精度可达20 mm<sup>[14]</sup>。基于测高技术的发展, 为了更好的监测全球海洋变

化, NASA和法国空间局(CNES)于1992年联合发射了测高卫星T/P (Topex/Poseidon), 由于T/P测高卫星载有GPS接收机, 且对流层延迟和微波辐射均得到了良好的改正, 该卫星的测高精度为20 mm左右, 是目前公认测高精度最高的测高卫星之一, 其后继卫星Jason-1、Jason-2和Jason-3分别在2001、2008和2016年成功发射。这四颗卫星提供了迄今为止近30年连续的卫星测高数据, 是研究海洋环流及其变化、海面地形及海表高度长期变化最完整、精度最好的测高数据,

同时也是各区域海面高模型及全球海面高模型的基准数据。2013年, CNES和印度空间研究组织 (ISRO) 联合发射了测高卫星SARAL, 该卫星搭载Altika测高计, 是首次搭载Ka波段高度计的测高卫星, 提高了工作频率、垂直分辨率和脉冲重复频率, 可获得更高精度的测高数据<sup>[14]</sup>。

国内, 2011年, 中国空间技术研究院 (CAST) 在太原成功发射了中国首颗海洋观测卫星HY-2A, 该卫星的主要任务是监测海洋动力环境。2018年, 我国成功发射了HY-2A的后继卫星HY-2B, 该卫星可以覆盖世界90%的海域。2020和2021年, 我国又成功发射了HY-2C和HY-2D卫星, HY-2B、HY-2C与HY-2D测高卫星组网运行, 组成中尺度海洋动力环境监测系统, 共同构成中国海洋动力环境监测网, 实现对全球海面高度等要素的全天时、全天候高精度观测<sup>[14, 18]</sup>。

上述卫星测高计覆盖的海洋范围约为81°S—81°N, 在对海平面变化有着不可忽略影响的两极区域, 其数据还是空白的。由于激光在冰面的反射性较好, 2003年, NASA成功发射第一颗激光测高卫星ICESat-1, 主要研究两极冰盖的消融情况, 其后继卫星ICESat-2在2018年成功发射。2010年, 欧空局成功发射了测高卫星CryoSat-2, 其任务的目的在于测定冰冻圈的变化趋势, 该卫星有低分辨率、合成孔径雷达与合成孔径雷达干涉测量模式, 提升了测高数据的空间分辨率。其中, 合成孔径雷达干涉测量模式由于采样密度的增加, 能够监测冰盖边缘复杂的地形。欧空局还于2016年发射测高卫星Sentinel-3A, 该卫星采用合成孔径雷达技术, 其测高精度达到了7 mm, 并于2018年发射了Sentinel-3 (哨兵-3卫星) 系列的后续卫星Sentinel-3B<sup>[14, 19]</sup>。

卫星测高具有全天候、覆盖范围广、高频次、数据质量较高等优势, 是海洋领域重要研究数据之一。随着卫星测高技术的改进和完善, 其测量精度由米级到厘米级, 分辨率由百千米到几千米, 观测对象由最初的海洋扩展到冰面等区域, 如可在潮位站极度缺乏的南大洋地区开展全天候的重复、准确的观测。国际上, 通过卫星上搭载的雷达高度计, 已经形成了1992年至今的连续海平面监测能力。但是由于卫星测高仪观测条件的限制, 卫星测高在深海海域的精度虽然可达厘米级, 但在近海接收的测高回波受陆地和地球物理环境的综合影响, 其反射波形会发生改变, 数据质量大大降低, 甚至无法使用, 而验潮站主要分布于近海沿岸, 近海数据测量精度较高<sup>[14]</sup>。此外, 卫星测高数据存在轨道采样时空不规则的缺点, 给其使用带来

了很大的不便, 针对轨道随机获得的实测数据通过插值获得时间和空间规则的网格化数据是极为必要的<sup>[7]</sup>。

### 1.3 全球导航卫星系统 (GNSS)/验潮站联测

在采用验潮站相对海平面数据分析海平面长历史变化趋势时, 要考虑除气候变化因素外的陆地沉降对其影响。陆地垂向运动的普遍原因是冰川均衡调整, 此外, 一些局地性的因素也会造成陆地的垂向运动, 如大河三角洲沉积压实效应以及沿海高层建筑物修建、地下水过度抽取等都会造成局域性陆地沉降, 从而加剧相对海平面上升, 还有一些偶发因素如地震、板块运动等也会导致区域性的陆地升降, 从而影响沿海的相对海平面变化<sup>[14, 21]</sup>。因此, 需要建立与验潮站参考面点联测的GNSS站, 用于验潮站高程变化的监测。此外, 卫星测高测得的是绝对海平面, 想要让验潮数据与卫星测高数据的参考面相一致, 也需要建立与验潮站参考面点联测的GNSS站, 求出验潮站参考面的大地高, 进而求出验潮站测得的绝对海面高。

1997年, 根据科学研究和业务应用的需要, 以及在数据使用中暴露出来的一些问题, GLOSS工作组确立了4个工作重点, 其中一项就是将全球定位系统GPS对陆地高程变化的监测纳入到计划中来。2012年, GLOSS再次强调将加强其核心网络所有验潮站配备GNSS站的工作计划, 这一升级主要用于配合卫星测高数据的校准, 更好地确定相对于地心的海平面上升速度以及局地海平面变化。根据GLOSS技术材料说明, GPS接收器要尽量安装在接近验潮站的地方, 距离大约几百米以内, 要定期 (至少每年) 进行GPS水准点和验潮零点、基本水准点之间的连测<sup>[21-22]</sup>。

最近几年国内对基准核定工作给予了高度重视, 技术得到了很大提高, 管理也越来越完善, 取得了不少的成果。2009年始, 国家海洋局在沿海56个长期验潮站陆续增设GNSS观测设施, 建立了中国沿海GNSS业务化观测系统 (2010年建成)。但目前我国的验潮站基准核定工作还需进一步加强和完善, 例如: 我国海洋站从2008年开始开展GPS观测, 但由于时间序列短、稳定性差等问题, 到目前为止其还没有充分发挥应有的作用; 我国各验潮站水准联测时采用的联测基点不同, 联测时间不一致, 无法在全国范围内统一基准下分析各验潮站的地壳垂直形变。目前, 我国对沿海长期验潮站地壳垂直形变现状的了解仍相对匮乏, 制约着我国近海海平面变化研究工作的深入开展。进一步提高我国GNSS观测技术、资料处理能力、加强GNSS资料的应用, 对于提高近海验潮站基准核定能力有很大的帮助<sup>[22-23]</sup>。

## 2 国际海平面观测数据产品

目前, 国际上海平面高度数据产品主要有GLOSS的全球验潮站资料中心发布的从实时到历史、从定时到月尺度的验潮站相对海平面观测数据产品, GNSS/验潮站联测的垂直位移数据产品, 以及多个机构研发的多源卫星海平面融合数据及其全球平均海平面序列产品, 具体如下。

### 2.1 实时验潮站监测资料

VLIZ实时监控系統 (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php>) 提供全球和区域验潮站的实时运行状况监测, 并提供相关信息以快速检查各个站点的原始数据流, 此外, 该系统还提供全球实时验潮站相对海平面数据。整体上, 该系统不仅接收GTS传输数据, 同时还接收包括FTP等频道的传输数据, 但这些数据均没有经过质量控制处理, 数据质量不能得到保证。

### 2.2 定时值/日尺度验潮站资料

UHSLC数据库提供了两个质量控制级别的包含定时/日等不同时间分辨率的海平面观测数据 (<https://>

[uhslc.soest.hawaii.edu/datainfo/](https://uhslc.soest.hawaii.edu/datainfo/)), 两个质量控制流程分别对应快速交付(FD)和研究质量控制(RQD)两套资料集。其中, FD数据是在数据收集的1~2个月内发布的, 其只关注大级别转移和明显异常值的基本质量控制。在FD基础上, JASL结合其他一些海平面观测信息, 对获取到的数据开展综合质量控制, 形成RQD资料集, 该资料集每年更新, 更新后提交给PSMSL进行月尺度海平面数据的生成。其中, RQD资料集是目前经过质量控制的、数据量最大的全球定时值海平面数据集, 其质量控制过程主要包括: 1) 粗大误差(如数据跳变和时间偏移)检查和订正; 2) 对缺测小于25 h的数据进行插补; 3) 对相对海平面观测数据的参照面变动等问题进行订正; 4) 编制可描述性的站点信息及其质量评估结果。RQD的日均值海平面数据是在定时值数据上开展两步滤波生成的: 1) 从质量控制后的定时值数据中过滤掉全日潮和半日潮成分; 2) 采用卷积滤波器剔除残余的高频成分。最新资料显示, JASL可提供超900个站点的资料, 各站点的资料长度主要集中在5~30 a, 部分站点可提供超过70 a的数据(图2)。

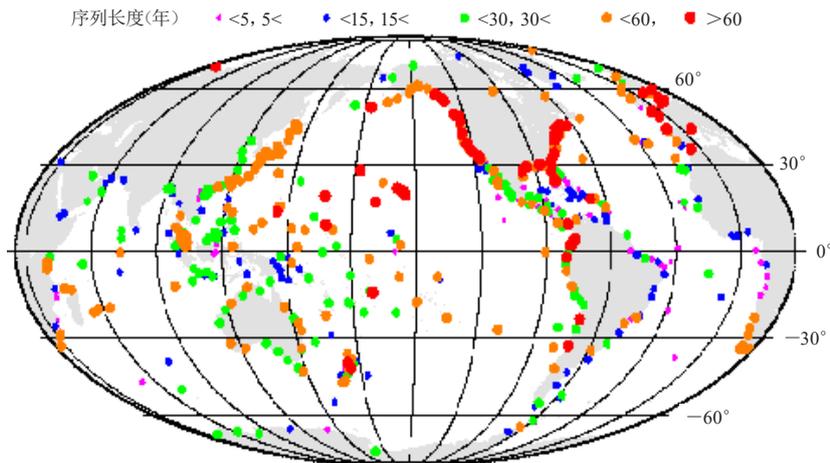


图2 JASL资料中各验潮站的资料长度(截止到2018年3月)<sup>[24]</sup>  
Fig. 2 Lengths of the sea-level time series in the JASL (as of March 2018)<sup>[24]</sup>

在JASL的定时值海平面数据基础上, BODC进一步整合了海平面观测记录对应的基准面等元数据信息, 从而发布了一套GLOSS观测网的“最终版”验潮站相对海平面定时值资料集, 其补充提供的基准面信息可用于海平面数据的均一化订正。

### 2.3 月尺度验潮站资料

PSMSL接受并发布全球约2000多个潮位站的月均和年均海平面数据 (<https://www.psmsl.org/>), 其中110多个含1900年以前的数据, 最早的记录可追溯至1806年(法国的一个站点), 其数据产品每年度追加更新一次。为保证发布的海平面数据质量, PSMSL会对接收

到的海平面资料进行检查, 以避免在数据中混入类似抄报错误或大的基准变化引起的误差等, 具体包括: 1) 检查月均海平面的年均值是否与接收的年均值一致; 2) 对资料进行“常识性”的一致性检查, 包括接收到的相对海平面数据的基准面与以前所用的基准是否一致; 3) 对长度超过20年的资料进行线性拟合, 通过分析观测值相对拟合值的偏离程度, 从而判断异常值; 4) 针对时间跨度 $\geq 20$ 年的资料所提供的基准面订正系数, 对其年均值进行线性回归, 以找出不正确的基准面信息; 5) 通过对比月均、年均海平面与临近年份的对应值, 从而判断突变值; 6) “颠倒”检查, 即

对月均海平面进行季节性波动检查，以判断季节波动是否“颠倒”；7)“伙伴”检验，即通过与邻站(“伙伴”，相距不到400 km)进行对比，以进一步判断并标记海平面异常值。

PSMSL提供两种类型的数据，分别是Metric和RLR。当其接收的月均和年均海平面资料通过以上质量检查后，将被整合成Metric资料集，其目前约含2300多个站点资料。由于Metric数据直接收集自各个国家和地区，其相对海平面观测数据的参考面不统一，即使是同一站点，不同年份的参考面也可能不相同。在Metric资料中，如果海平面资料能够对应到其验潮水准点，则结合这些参照面元数据信息，将海平面观测数据校正到同一参考面，从而保证同一站点的的海平面数据都相对一个参考点，该环节即为对质量控制后的Metric资料中的海平面数据进行均一性订正。订正后的数据将被整合成RLR资料集，其目前约有1548个站点的资料。此外，PSMSL的月均海平面是对日均值数据进行传统的均值统计，且当验潮站一个月含 $\geq 15$  d的实测数据时，才编制月均海平面；年均海平面则是对月均值数据进行加权平均，若验潮站有 $\geq 11$ 个月平均值观测数据时，则计算相应年均值，其中，每个月的权重对应为该月有实测数据的天数。为了避免月均值和年均值数据出现负值，每个验潮站的基准面被定义为低于平均海平面约7000 mm。目前，仅RLR资料集可以用于时间序列分析，如区域或全球范围的海平面长期变化研究，不在RLR资料集内的Metric站点资料则仅应用于不超过一年时间范围的海平面季节性波动分析<sup>[25-26]</sup>。

## 2.4 GNSS/验潮站基准联测资料

国际GNSS/验潮站基准联测工作组(TIGA-WG)是GLOSS全球验潮站观测网中的一个重要组成部分，它可以提供潮位站位置和垂直沉降速率，是国际GNSS服务为全球大地测量观测系统(GGOS)、全球气候观测系统(GCOS)和世界气候研究计划(WCRP)总体目标的实现做出的重要贡献。TIGA-WG的数据产品除可用于评估验潮站基准点的垂直沉降速率外，还可应用于卫星高度计数据的订正(<https://www.igs.org/wg/tiga/>)。TIGA对验潮站GNSS联测的精度要求是：站点位置误差在5~10 mm范围，站点垂直位移速率误差小于1 mm/a。

SONEL是GLOSS的GNSS数据汇编中心(<https://www.sonel.org/?lang=en>)，它通过与PSMSL和UHSLC密切合作，开发了一个集成的全球观测系统，该系统可将潮位计和GNSS数据库连接起来，从而提供相关

数据服务。SONEL的目标是通过验潮仪(相对海平面)和现代大地测量技术(垂直地面运动)，为海平面长期趋势的研究以及卫星高度计的校准等，提供近海岸高质量的海陆连续测量。SONEL网站上GPS天解的解算结果是由拉罗谢尔大学(ULR)利用目前高精度GPS数据处理软件GAMIT/GLOBK解算的，其时间分辨率为定时值，要素包括验潮站坐标、卫星轨道、地球定向参数、天顶对流层延迟参数等。此外，SONEL网站还收编了三个数据分析中心提供的联测的GNSS站点观测得到的验潮站垂直沉降速率，包括：1)由美国内华达大地测量实验室(NGL)生产的NGL14，它提供了全球904个验潮站附近的、覆盖1996年1月至2019年4月的地面沉降速率；2)由美国喷气推进实验室(JPL)生产的JPL14，它提供了全球366个验潮站附近的、覆盖1994年1月至2019年12月的地面沉降速率；3)由德国地球科学研究中心(GFZ)生产的GT2，它提供了全球579个验潮站附近的、覆盖1994年1月至2015年12月的地面沉降速率。这三套资料集都满足各站点最短资料长度为3 a、整体上数据缺失不超过30%的条件。

## 2.5 多卫星融合产品

卫星测高数据有零级(Level 0)、一级(Level 1)及二级(Level 2)产品，分别对应直接从仪器上获取的原始数据、用一定的算法将Level 0产品转换成工程单位的产品及用重新跟踪将数据转换成地球物理学单位的地球物理数据。一般科学研究、业务应用等使用的是Level 2级及其后续处理产品<sup>[1, 14, 27]</sup>。其中，Level 2级产品包含：1)FDGDR，快速发布的地理记录数据，一般在3 h之内发布，主要用来进行天气预报、实时海况和海洋环流监测等；2)IGDR，中间临时的GDR数据，在约3 d后发布，主要用来对海洋环流进行监测、预报等，比FDGDR精度高；3)GDR，最终产品，约30~50 d内发布，包含了精密的仪器订正和轨道订正等。不同卫星的GDR数据可从不同机构的相关网页上进行下载，如：PO.DAAC发布的Version c的变轨后的Jason-1 GDR-D产品、ESA发布的变轨后的ENVISAT GDR-V2.1+产品、NOAA发布的Jason-2 GDR-D产品，以及国家卫星海洋应用中心分发的HY-2T版本IGDR产品<sup>[1]</sup>。

单卫星任务沿轨GDR数据存在轨道采样时空不规则的缺点，此外，由于单颗卫星大于100 km的轨道间隔，以及10~30 d不等的运行周期，极大地限制了卫星高度计沿轨数据在海洋中尺度涡、中尺度环流等科学研究中的直接应用。随着高度计卫星更新换代，其运行数量始终维持在3~4颗以上，充分利用多颗卫星

沿轨数据,在规则网格上融合产生二维数据产品,是克服沿轨数据局限性的有效方法<sup>[28-29]</sup>。相比沿轨GDR数据,融合数据可明显提高空间分辨率,且其空间分布均匀,时间序列可得到一定的延伸,数据可利用性更高,有利于联合其他气候数据进行海洋研究分析<sup>[7]</sup>。此外,多卫星融合数据经过了必要的标准化改正,如对流层干湿分量改正、电离层延迟改正、海潮和固体潮改正、极潮改正、海洋负荷潮汐改正、仪器改正以及反变气压计改正等。研究显示,基于多卫星融合数据分析得到的海面变化相对单卫星高度计分析得到的结果,其误差明显下降<sup>[1]</sup>。

目前,国际上应用最广泛的多卫星融合高度计产品为法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心(AVISO)对外发布的海表高度距平值资料,该资料主要基于TOPEX/POSEIDON、Jason-1和ERS/Envisat等多颗高度计卫星资料融合而成(<https://www.aviso.altimetry.fr/index.php?id=1526>)。AVISO卫星高度计产品可以分为两类:准实时资料和延时资料。准实时资料可以为业务应用提供准实时的高度计资料,而延时资料则可以为海洋学研究提供质量更高的延时高度计产品。两类AVISO高度计产品的制作过程大体都包含:资料获取、资料预处理、质量控制、交叉校正、生成沿轨资料、生成融合的网格资料、输出检测等7个步骤。AVISO高度计产品的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,空间覆盖范围为全球,时间分辨率为天,延时资料长度为1993年至今,其距平值相对1993—2012年的均值统计而成。

此外,国际上还有多家机构基于多卫星融合生成全球月尺度海平面高度序列产品,如:1)美国NOAA的海平面序列产品,其融合了TOPEX/Poseidon、Jason-1、Jason-2和Jason-3等卫星高度计数据,资料长度为1992—2022年([https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries\\_global.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php));2)美国科罗拉多大学(CU)的海平面序列产品,其融合了TOPEX、Jason-1、Jason-2和Jason-3等卫星高度计数据,资料长度为1992至今(<http://sealevel.colorado.edu/>);3)澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的海平面序列产品,其资料长度为1880—2014年,1993年开始其融合了验潮站和卫星高度计数据(<https://research.csiro.au/slrwavescoast/sea-level/>);4)美国NASA的海平面序列产品,其融合了OPEX/Poseidon、Jason-1、OSTM/Jason-2和Jason-3等卫星高度计数据,数据更新为4个月延迟,资料长度为1992年至今(<https://sealevel.nasa.gov/understanding->

[sea-level/key-indicators/global-mean-sea-level](#))。

## 2.6 多源融合最新发展方向

海平面变化的低频率多尺度特征一直是国际上研究的热点问题,获取长时间序列是研究这一问题的唯一途径,联合验潮站和卫星测高等数据进行重构是目前获取长时间全球平均海平面变化序列的主要方法。传统的验潮站观测数据虽然具有长时间跨度的连续性,可用于分析海平面变化的年代际周期特征及长时间尺度变化趋势,但其观测站点离散、分布不均,在全球平均海平面变化分析中,不确定性较大<sup>[30]</sup>。相较而言,卫星测高可提供全球更广范围内的海平面高度观测,但其观测历史较短。因此,联合卫星测高和验潮站观测数据可获得长时间、高精度全球平均海平面变化序列。

联合验潮站和卫星测高开展海平面重构主要采用正交函数,包括经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)以及循环平稳经验正交函数(Cyclo Stationary Empirical Orthogonal Function, CSEOF)等。其原理均是将卫星测高等格网海平面变化序列进行EOF或CSEOF分解,以得到表征空间变化特征的模态和表征时间变化特征的主成分。在假定空间变化特征模态是稳定的前提下,选取一定数量的空间变化主模态,并结合最小二乘法对选取的长时间观测的验潮站相同格网内的平均海平面序列进行最优求解,从而得到验潮站数据的表征时间变化特征的主成分,最后重构空间模态和主成分得到验潮站数据有效时间内的全球格网海平面变化序列,继而得到全球平均海平面变化序列<sup>[31]</sup>。

## 3 我国海平面观测数据产品

我国海平面观测数据产品主要来自国家海洋科学数据中心(隶属国家海洋信息中心)公开发布的全球、区域及中国近海的验潮站观测数据。

### 3.1 全球验潮站资料

国家海洋科学数据中心公开发布的全球水位综合数据集(<http://mds.nmdis.org.cn/pages/dataViewDetail.html?dataSetId=35>),该数据集由国家海洋信息中心制作,其涵盖了国内外多个大型合作项目和计划,包括全球海平面观测系统(GLOSS)、政府间海洋学委员会/国际海洋资料与信息交换委员会(IOC/IODE)、东北亚海洋观测系统(NEAR-GOOS)以及香港天文台等发布的全球海域范围内的水位资料。数据经过预处理、分类筛选、质量控制、排重处理与人工审核、整合处理等一系列处理过程,最终形成的全球水位综合数据集按年存放,其观测要素为逐时水位,数据集时

间范围为1846—2020年，空间范围为全球海域。

### 3.2 区域验潮站资料

国家海洋科学数据中心公开发布的中国月平均水位延时数据产品 (<http://mds.nmdis.org.cn/pages/dataViewDetail.html?dataSetId=5>)，其包括中国近海大连、吕四、坎门、闸坡、西沙、南沙6个海洋站自2000年1月以来的数据，经过解码、格式检查、代码转换、标准化、自动质量控制、可视化检查、校准等处理，形成标准化数据集。其中，质量控制包括范围检验、非法码检验、相关性检验、季节性检验、站代码检验和可视化图形检验等，该数据每月更新一次，数据格式为ASCII（字符）格式。

## 4 总结与展望

海平面高度变化对人类的生存环境和生命安全等均会产生巨大的影响，开展海平面观测及数据产品研发，对于全球和区域（近海）的当前海平面气候变化状态、气候变化归因及未来气候变化趋势的分析评估等具有重要意义，海平面高度也是全球气候监测系统（GCOS）提出的7个重要全球气候监测指标之一。

目前，国际上已有较为成熟的海平面观测网（GLOSS），其研发的数据产品为全球和区域海平面变化监测等提供有力支撑；国内，国家海洋局也在积极推动验潮站和卫星观测网的建立，通过国家海洋科学数据中心公开发布了多套海平面观测数据产品。目前，气候监测业务主要依赖国家海洋信息中心逐年提供的中国沿海海平面距平序列，为了进一步提升海洋气候监测数据支撑能力，亟待加强多来源海平面观测数据的收集、评估及加工处理与业务应用等工作，积极开展验潮站及卫星反演海平面观测数据评估及对比分析，在此基础上，逐步构建可自主更新的海平面高度序列。为此，未来几年亟待加强如下工作。

1) 持续开展海平面观测数据挖掘及提升海平面观测数据基础加工处理能力。近年来，中国气象局通过国际GTS、双边交换等形式获得全球海洋潮位观测资料及近海部分潮位站观测资料，然而近海仍有大片海域尚无共享的海平面观测。此外，验潮站观测的是相对海平面，其观测数据所参考的水准点可能随着时间发生变动，未来需进一步加强海平面观测元数据的收集，为开展资料序列订正提供基础。此外，目前业务尚未实现对收集获取的海平面观测数据的完全解码和数据质量控制，未来需要在进一步加强各来源海平面观测数据的发掘及收集基础上，加强已收集到的海平面观测数据的解码处理能力及其质量控制能力，从而有望进一步提高入库的数据量以及数据质量等，以提供

更广泛、更有效的海平面观测基础数据。

2) 加强多来源海平面观测数据的处理技术研发。PSMSL的月尺度海平面观测资料是目前开展全球海平面气候变化分析评估等应用最广泛的数据源，基于其可进行相关站点数据的分析处理从而形成全球和区域海平面变化序列；PSMSL已实现业务应用的数据处理技术，包括质量控制技术、日/月尺度均值统计方法及参照面的均一性订正方案等均可借鉴于中国近海海平面观测数据的处理。此外，卫星高度计在近海受跟踪算法和误差校正的局限，观测到的海平面数据误差相对较大，因此，未来可更多的纳入沿岸的验潮站数据和GNSS的地面沉降信息等，对基于卫星的近岸海域海平面观测数据进行订正，从而进一步攻关基于国外、国内多颗卫星的海平面融合产品研发，有效将卫星遥感观测与近海站点观测相结合，将近海海平面和大洋海平面变化相衔接。

### 参考文献

- [1] 崔伟. 多源卫星高度计海面高度异常数据融合研究. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2016.
- [2] Merrifield M, Holgate S, Mitchum G, et al. The Global Sea Level Observing System (GLOSS) Implementation Plan 2012. Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), 2012.
- [3] 王慧, 刘秋林, 李欢, 等. 海平面变化研究进展. 海洋信息, 2018, 33(3): 19-26.
- [4] 蔡榕硕, 谭红建. 海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 163-171.
- [5] 常乐, 孙文科. 全球及中国近海海平面变化趋势研究进展及展望. 地球与行星物理评论, 2021, 52(3): 266-279.
- [6] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021). 北京: 科学出版社, 2021.
- [7] 汲俊生. 基于多源卫星高度计数据的中国近海海平面变化研究. 青岛: 青岛理工大学, 2017.
- [8] 徐曜. 多代卫星测高数据处理及其在海平面变化监测中的应用. 杭州: 杭州师范大学, 2017.
- [9] 吴涛, 康建成, 王芳, 等. 全球海平面变化研究新进展. 地球科学进展, 2006, 21(7): 730-737.
- [10] 冯寿波. 领土丧失与国家地位: 海平面上升对小岛国的挑战. 西部法学评论, 2019, (3): 103-114.
- [11] 王慧, 范文静, 刘克修, 等. 对美国潮位观测数据核定的研究及应用. 海洋信息, 2013, (4): 15-22.
- [12] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖和海平面上升. 气候变化研究进展, 2019, 15(6): 700-703.
- [13] 郭婷婷, 陈泽宗, 陈应峰, 等. 基于压力式验潮仪的潮汐应急观测可行性研究. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 41-48.
- [14] 牛余朋. 基于卫星测高、验潮和GNSS的日本海及邻近海域海面高模型建立及海平面变化预测. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [15] 国家海洋局. “一站多能”海洋(中心)站“十三五”实施方案. 北京: 国家海洋局, 2016.
- [16] 自然资源部海洋预警监测司. 2020年中国海平面公报. 北京: 自然资源部海洋预警监测司, 2021.
- [17] 李青. 基于卫星测高技术的高纬度海冰厚度时空变化研究. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [18] 蒋兴伟. 发展海洋卫星组网观测 助力海洋强国建设. 长沙: 第十九期钱学森论坛, 2019.
- [19] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望. 海洋学报, 2015, 37(1): 1-10.
- [20] 廖静娟. 星载雷达高度计数据处理及陆地应用. 北京: 科学出版社, 2020.
- [21] 谢书谊, 陈美香, 张建立, 等. 陆地垂向运动对沿海相对海平面变

- 化的影响. 海洋科学进展, 2019, 37(2): 187-198.
- [22] 骆敬新, 刘克修, 范文静, 等. 全球海平面观测系统现状及对我国海洋站观测的启示. 海洋开发与管理, 2014, (7): 9-14.
- [23] 周东旭, 周兴华, 张化疑, 等. 利用GPS连续观测进行中国沿海验潮站地壳垂直形变分析. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 516-522.
- [24] Caldwell P C, Thompson P. Joint Archive for Sea Level Data Report: March 2018. The Joint Archive for Sea Level (JASL), 2018.
- [25] Woodworth P L, Player R. The permanent service for mean sea level: an update to the 21st century. Journal of Coastal Research, 2003, 19(2): 287-295.
- [26] Holgate S J, Matthews A, Woodworth P L, et al. New data systems and products at the permanent service for mean sea level. Journal of Coastal Research, 2013, 29(3): 493-504.
- [27] 宿春鹏. 联合卫星测高、GRACE和温盐资料研究海平面变化. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [28] 刘冰石. 利用多源观测数据分析2011年来全球平均海平面加速上升成因. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [29] 刘磊, 蒋星亮, 费建芳, 等. 多源卫星高度计新融合产品的研发与评估. 科学通报, 2020, 65: 1888-1897.
- [30] Frederikse T, Jevrejeva S, Riva R E M, et al. A Consistent sea-level reconstruction and its budget on basin and global scales over 1958-2014. Journal of Climate, 2018, 31(3): 1267-1280.
- [31] 金涛勇, 肖明宇, 王锴. 近百年全球平均海平面变化重构研究进展与分析. 中国科技论文在线精品论文, 2017, 10(20): 2314-2319.

## (上接15页)

- 象科技进展, 2017, 7(6): 82-91.
- [27] 李震坤. 基于动力相似模式识别的延伸期降水预报方法. 上海: 上海市气候中心, 2020.
- [28] 董雪峰, 赖欣, 杨淑群, 等. 基于CFSv2的四川省延伸期三类天气过程预报研究. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(04): 413-424.
- [29] 伯忠凯. 基于CFS模式的山东省高温过程动力降尺度预测. 济南: 山东省气候中心, 2018.
- [30] 高建芸, 陈彩珠, 周信禹, 等. 2010年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析. 气象科技进展, 2013, 3(1): 39-45.
- [31] 池艳珍, 何芬, 唐振飞. 2016年登陆和影响福建台风成因分析及预测. 气象, 2017, 43(10): 1287-1295.
- [32] 杨德南, 高建芸, 陈锦鹏, 等. 低频扰动增量法在华南冬季低温延伸期预报中的应用研究. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 10-19.
- [33] 王宇, 钟琦. 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)2014年报性能. 气象科技进展, 2015, 5(4): 68-69.
- [34] 纪立人. 欧洲中期天气预报中心情况简介. 气象科技, 1983, (2): 28-30.
- [35] 金荣花, 马杰, 毕宝贵. 10~30d延伸期预报研究进展和业务现状. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(2): 1-5.
- [36] 马杰, 金荣花, 宗志平, 等. 延伸期预报中的可预报性浅析. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 137-143.
- [37] 王延. S2S多模式资料在海洋性大陆区域及我国延伸期降水预报中的应用. 成都: 成都信息工程大学, 2020.
- [38] 何欢然. ECMWF S2S试验对中国东部夏季次季节降水的预报技巧评估及误差订正. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [39] 湛芸, 董全, 田付友, 等. 美国NCEP集合预报最新进展. 天气预报, 2014, 6(5): 68-74.
- [40] 朱玉祥, 俞小鼎, 赵亮, 等. 10~30d延伸期预报及其策略思考. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(4): 38-44.
- [41] 康志明, 鲍媛媛, 周宁芳. 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势. 气象科技进展, 2013, 3(1): 18-24.
- [42] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸期预报. 气象, 2010, 36(7): 111-122.
- [43] 杨秋明. 10~30d延伸期天气预报方法研究进展与展望. 地球科学进展, 2015, 30(9): 970-984.
- [44] 林纾, 惠志红, 郭俊琴, 等. 150天韵律方法月内过程预测系统简介及应用检验. 气象科技进展, 2013, 3(5): 48-51.
- [45] 张东方, 成青燕, 何慧根, 等. CFSv2模式资料在成都市延伸期降水预测中的应用评估. 气象研究与应用, 2021, 42(2): 1-6.
- [46] 信飞, 马悦, 王蔚, 等. 2020年上海梅雨异常特征及延伸期预报分析. 暴雨灾害, 2020, 39(6): 578-585.
- [47] 罗布. MJO在西藏夏季降水延伸期预报中的应用. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [48] 吴胜安. 基于MJO的海南延伸期气候预测技术研究. 海口: 海南省气候中心, 2018.
- [49] 孙国武, 李震坤, 信飞, 等. 用低频天气图方法进行延伸期预报的探索. 气象科技进展, 2013, 3(1): 6-10.
- [50] 贾旭伟, 李旭, 张莹, 等. 基于低频振荡的西北地区中西部延伸期降水预报研究. 干旱气象, 2016, 34(3): 553-559.
- [51] 孙昭莹, 马振峰, 杨小波, 等. 低频天气图方法在四川盆地夏季延伸期强降水预报中的应用. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 20-26.
- [52] Seo K, Wang W, Gottschalck J, et al. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models. Journal of Climate, 2009, 22(9): 2372-2388.
- [53] Jones C, Carvalho L M V, Wayne Higgins R, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. Journal of Climate, 2004, 17: 2078-2095.
- [54] 贾旭伟. 基于低频振荡和相似技术的西北地区中部降水过程延伸期预报研究. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [55] 蔡金玲, 何勇, 林巧, 等. 气象领域局校合作的经验与启示. 科技中国, 2019, (1): 17-21.