

台湾近海水文观测体系的构建及其数据分析方法*

冯向波, 严以新

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 台湾岛地处亚欧大陆和太平洋交界处, 台风、东北季风等所引起的海洋灾害频繁, 所以建立完备的海洋水文观测体系显得尤为重要。中国台湾自主建置完成的近海水文观测体系由资料浮标站、观测桩、潮位站、岸边气象站、雷达测波站等多种近海水文观测系统构建组成; 同时, 为确保观测体系的准确性和规范性, 还建立了数据品质管理系统和标准化作业模式。在近海水文观测数据的分析方面, 尝试应用新的数学分析方法, 如通过 EMD (empirical mode decomposition) 方法探讨风暴潮水位变化, 利用小波转换从雷达观测影像中分析近岸波浪信息, 以及发展数据同化技术将观测数据应用于作业化波浪现报、预报模式。此外, 近海水文观测体系在社会应用方面有着很大的发展潜质。

关键词: 近海水文观测; 资料浮标; 雷达测波; EMD; 小波分析; 数据同化

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)01-0035-08

Coastal sea-state monitoring system off Taiwan Island: Its establishment and data analysis

FENG Xiang-bo, YAN Yi-xin

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taiwan Island is at the joint of Eurasian Continent and Pacific Plate, and is always threatened by typhoons and northeasterly winds, which may cause enormous loss of human life and property every year. Therefore it is necessary to develop a coastal sea-state monitoring system. The COMC (Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University) built the Taiwan coastal sea-state monitoring system, which is modern and self-sufficient, consisting of moored buoy, pile station, tide station, coastal weather station, and radar monitoring station. To assure the data quality, Data Quality Check Procedure and Standard Operation Procedure were developed by the COMC. For data analysis, some new methods are introduced to make more detailed analysis, such as EMD (empirical mode decomposition) method that is used in the analysis of storm surge water level, wavelet transform that is used to discuss the near-shore wave characteristics from X-band radar images, and data assimilation technique that is applied in wave nowcast operation. The coastal sea-state monitoring system has a great potential in providing ocean information to serve the society.

Key words: coastal sea-state monitoring; moored buoy; wave monitoring of radar technique; EMD; wavelet transform; data assimilation

台湾岛周围的海洋环境复杂多变, 西侧为台湾海峡, 水深较浅, 一般在 200m 以内, 而东侧则直临太平洋, 水深骤降至 4000m 以下。台湾岛位于

亚欧大陆与西太平洋之交界处, 属亚热带海岛气候, 每逢夏秋之际, 常遭受台风或热带低气压带来的狂风骤雨的侵蚀, 而冬季则又遭受东北季风引

收稿日期: 2009-07-10; 修订日期: 2009-11-25。孙淑杰编辑

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2008491011); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(2009586712); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100094120008); 水利公益性行业科研专项(200901062)

作者简介: 冯向波(1982—), 男, 山东省东营市人, 讲师, 主要从事海岸工程方向研究。E-mail: fxbhu@hhu.edu.cn

* 2007-11—2010-01, 作者在台湾成功大学进行交流学习, 对中国台湾近海水文观测体系的认知过程中, 得到了台湾成功大学水利及海洋工程学系及近海水文中心的协助, 特此致谢。

起的长浪的侵蚀。在非台风或热带低压等异常海象期间,台湾岛的海岸灾害亦相当严重,在波浪、潮汐长年作用下,海岸地形发生变迁,引起海岸灾害。同时,随着社会及经济的发展,近海水文的重要性及对近海水文信息的迫切需求日益突显,诸如航行安全、港湾建设、渔捞养殖、海岸保护及休闲游憩等。

为了可持续性开发利用海洋资源,更有效保护海岸及防救海岸灾害,完善的近海水文观测体系是不可或缺的。自 20 世纪 90 年代起,中国台湾开始建设近海水文观测体系,以全面提升近海水文观测技术水平,改进近海水文数据质量,建置防灾及预警机制,该观测体系的建设及操作任务由成功大学近海水文中心(Coastal Ocean Monitoring Center, COMC)执行。近海水文中心为成功大学所属研究中心之一,设立于 1998 年,旨在从事海洋环境观测技术研发,掌握关键仪器技术,发展本土海洋、气象技术,同时培育海洋研究人才,建立中国台湾作业化海洋环境观测体系^[1-5]。

21 世纪是海洋的世纪,随着人类对海洋资源需求的增加,愈来愈多的挑战不断涌现,沿岸海-气观测体系需要不断的发展和完善,两岸的海洋观测及海洋研究领域迎来了良好的合作契机。本文将介绍台湾近海水文观测体系的构建,新的数学方法在观测数据分析中的应用,以及在观测体系基础上数据同化技术用于作业化波浪预报、建置海岸防灾及预警机制等应用研究。

1 近海水文观测体系的构建

1.1 观测系统

近海水文中心引进美国国家海洋大气总署(NOAA)的观测技术与规范及数据品质管理要求,建立适合中国台湾的海、气观测技术及严格的数据品质管理系统,确保观测数据的正确性;将研发、制造、布放、监控、数据品质管理、维修及检校与服务结合为一体化作业,整个作业程序通过 ISO 9001 认证,确保观测体系的系统性与规范性。观测体系自主掌控,不需受限于境外厂商,具备现代化及自主化的特点。中国台湾近海水文观测系统包括用于近海水文观测的资料浮标与观测桩、用于潮位观测的新一代音波式水位计、用于气象观测的自动化岸边气象观测系统,以及进行立体观测的雷达测波等遥感观测系统^[4]。观测系统共计 43 个观测站,其中

数据浮标站 14 站,潮位站 11 站,气象站 14 站,观测桩 2 站,雷达测波站 2 站,另设有多处视讯站及观测现场之信息站等(图 1)。

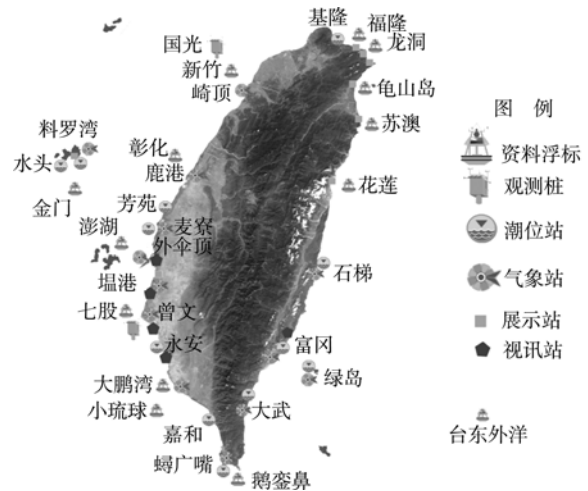


图 1 中国台湾近海水文观测站网

Fig. 1 Distribution of Chinese Taiwan coastal meteor-oceanographic monitoring stations

1.1.1 资料浮标

数据浮标(data buoy)是一种海上无人海象环境检测站,是参考美国海洋大气总署的观测方法、依据台湾岛周围海域环境特性所改良设计的本土化近海水文观测系统(中国台湾专利第 087358 号)。数据浮标呈碟状外形,直径 2.5m,高度 4.95m,重约 1300kg(图 2a)。数据浮标装有 3 片太阳能电池与 6 颗电瓶,组成电源供应系统,能源自给自足。为了观测作业与海上航行船只的安全,资料浮标还设置有航行警示灯与雷达发射器。同时,数据浮标下方装有锚链连接锚锭,固定于底床,使浮标在一定范围内自由漂浮,进行各种海洋水文观测作业。数据浮标可以布放于任何水深海域,浅则几米,深可到数千米,是一座多功能的工作平台,依据需求可装置多种量测仪器,在海上可以进行全自动长期观测作业,观测数据通过无线电及卫星通讯两种传输系统,实时传输至监控中心,透过数据品质管理程序确保观测数据质量。

数据浮标具有观测波浪(波高、周期、波向、波谱)、风(风速、风向、阵风)、气压、气温、水温等基本功能,每 1h 进行一次取样作业,取样频率均为 2Hz,波浪与风的取样时间为 10min,气温、气压、水温的取样时间为 1min,其观测仪器分别为波浪量测仪、风速风向计、气压计、气温计和水温计。数据浮标通过量测水粒子不同方位的加速度以

获得各个波浪参数。遇到台风等异常海象时还可以透过卫星下指令, 对作业频率做调整。由于数据浮标为模块化设计, 故可依据需求加装流速、水质、雨量等观测仪器。除可取得海洋水文数据外, 数据浮标亦通过装有的卫星定位仪(GPS)取得经纬度资

料。卫星定位仪于数据浮标工作时开始定位, 等观测作业结束时取得定位数据, 然后由传输系统传至监控中心。台湾近海水文观测系统中, 依据实际需要设有 13 处近岸数据浮标站、1 处深海浮标站^[6-7]。

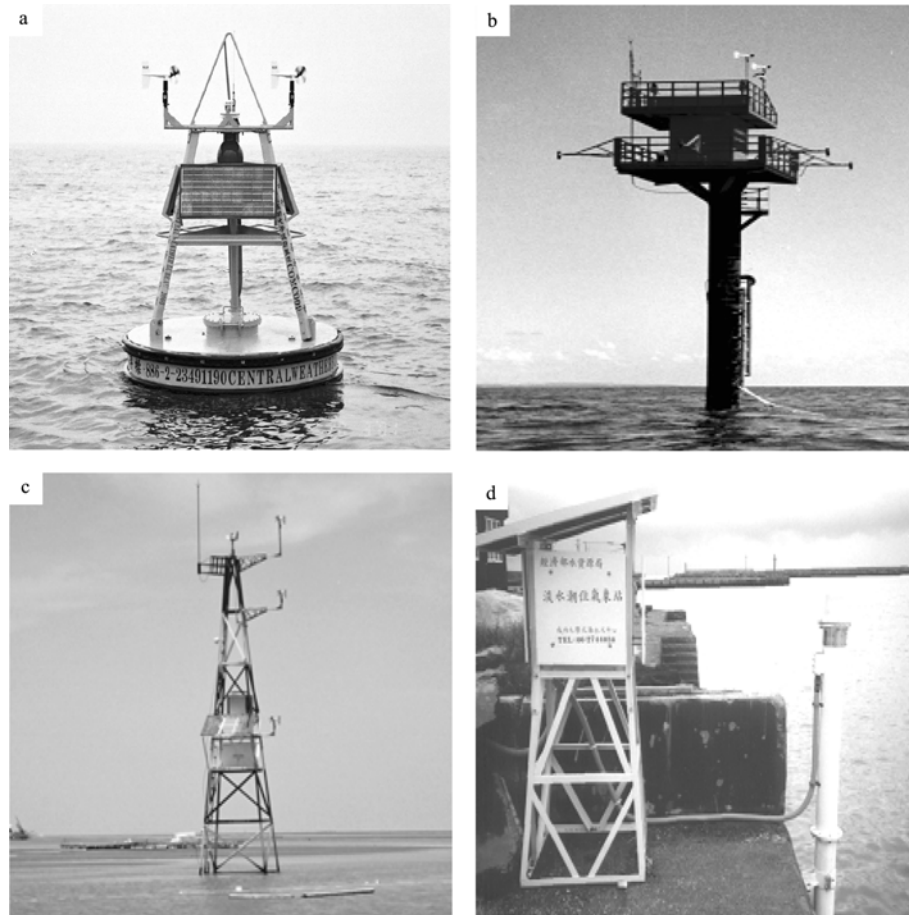


图 2 中国台湾近海观测的海-气观测系统

a. 海洋气象观测资料浮标; b. 海洋气象观测桩; c. 气象站; d. 潮位站

Fig. 2 Four kinds of coastal meteor-oceanographic monitoring systems used

1.1.2 观测桩

观测桩是一座固定于海上的海洋环境观测平台, 池等独立电力系统、通讯传输设备与数据收录系统。一般而言, 观测平台通常距离平均海平面约 10m 左右, 以对海洋和大气进行现场观测。海上观测桩系统与数据浮标的功能相近, 包含有观测仪器单元、数据自动传输单元及数据分析与品质管理单元, 惟不同的是资料浮标适合于任何水深, 而考虑到建制成本, 观测桩通常仅设置于近岸具有平坦砂质底床的地区。

观测桩的观测内容与数据浮标类似, 包括波浪(波高、周期、波向、波谱)、风(风速、风向、阵风)、气压、气温、水温等, 但观测桩的波浪观测原理与数据浮标不同。观测桩系设置数组式超音波波

高计来观测波浪, 波浪分析采用零上切法分析水位时序列, 计算波浪统计特性值。若使用 3 支以上的波高计形成波高计数组, 则可以进一步求得其方向波谱。影响观测桩测波的因素主要为台湾海峡的较大潮差, 对于 10min 的取样过程已属不可忽略的程度。此外, 搭载其上的超音波波高计则容易因为海面上的气泡影响超音波的回波, 导致出现异常值。图 3a 所示为受潮汐影响的波浪观测时序列, 取样时间为 10min, 取样频率为 2Hz, 共 1200 点。图 3b 则是受系统或外在环境影响的结果。所以, 观测技术仍有待改进之处^[4]。

1.1.3 遥感观测——雷达测波站

利用 X 波段雷达监测海况为中国台湾近年来研

发的海象监测技术之一,为能掌握与国际同步的技术,通过与德国研究单位交流,目前已发展出自动化的微波雷达海况监测系统——X波段雷达观测系统(图4、图5)。X波段雷达观测系统包含讯号撷取设备、分析设备以及数据传输设备3个部分,为了将雷达原始讯号引出,将之数字化后用计算机分析,系统使用20MHz的高速取样器撷取雷达讯号,成波

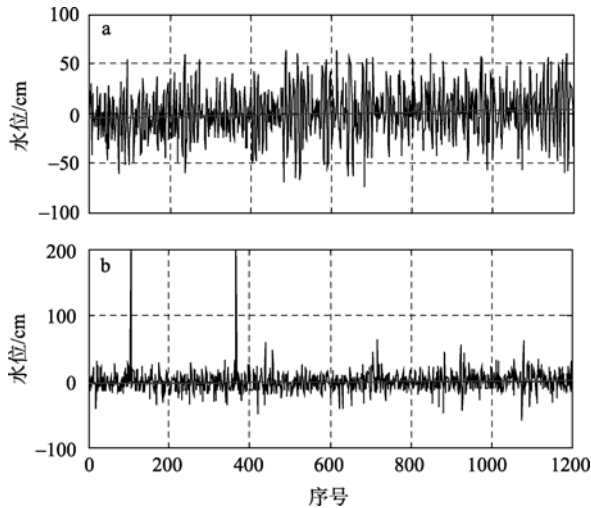


图3 典型观测桩测波的噪声产生来源

Fig. 3 Observed noise by pile station



图4 移动雷达海况监测系统

Fig. 4 Mobile coastal radar monitoring system



图5 固定雷达海况监测系统

Fig. 5 Fixed coastal radar monitoring system

场影像空间分辨率为每像素7.5m。通过影像分析以及波浪理论可求取海况波谱参数,进而转化至需要之波浪参数,搭配数据传输系统,将观测数据及时传输至控制中心,进行数据品质管理^[2,4,8]。

雷达系统的有效观测范围约为3.5—5km半径的圆形区域,依据雷达影像分析可求得波浪参数的时间序列,同时亦可测得海面流速和流向。台风期间,雷达观测结果与资料浮标作比对,示性波高的平均差值为0.4m,主波向的平均差值在13°以内。该测波系统会受到极端天气影响,如大雨天气下其测管效果并不理想,有待进一步改进(图6)。

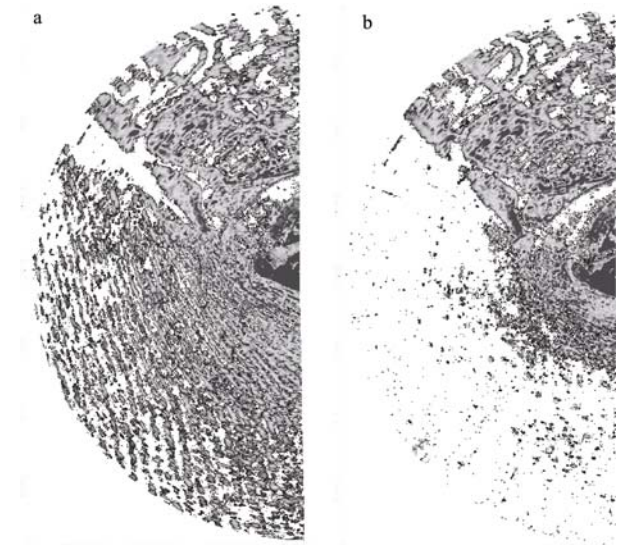


图6 未受下雨影响(a)及受下雨影响(b)的雷达观测影像

Fig. 6 Radar images with (a) and without (b) heavy rain interference

1.2 数据资料品质管理及标准化作业模式

在观测过程中,由于传感器噪声、传输过程数据编码与译码及其他不确定因素,数据监控站所接收的数据中不可避免地存在着不正确的数据。另一方面,在恶劣气候条件下所测得的极端数据与不正确的数据在形态特性上往往十分相似,这些极端数据极为难得而珍贵,因此如何准确地将不正确的数据自珍贵的极端数据中分离出来并去除,实为关键。资料品质管理即保证观测数据必须合乎仪器规格或是物理特性;观测值于时间及空间上的变化是渐变的,若时间上的改变量超过某一限度或是在空间上相邻测点的数据无法以物理观点解释,都可视为可疑数据;不同数据项间如气温和时间具有关联性,可依据所量测的资料与其他相关资料进行不同形式的回归分析。上述3个论点在品质管理理论中称之为数据的合理性、连续性与关

联性。基本上,所有的资料品质管理由极具资料分析经验的专业研究人员鉴定判别,其作业流程图如图 7 所示。

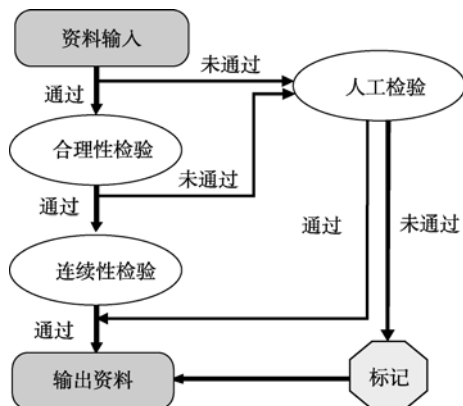


图 7 观测体系的数据品质管理流程图

Fig. 7 Data quality check procedure

为确保近海水文观测的最终观测数据的质量,观测作业流程必须遵守标准化作业程序。建立标准化作业程序,可以减低人为疏忽,避免因作业人员的流动而造成观测技术或方法的缺失,同时亦作为新观测人员的训练教材。海况观测作业项目繁多,细节庞杂,牵涉广泛,从系统的研发、组建、维修、海上布放、运转监控、资料品质管理及回收进厂校验等工作,到台风等异常海况下的系统运作,均已建立了标准化作业程序。整个观测作业流程自 1990 年通过 ISO 9001 认证,实施国际标准化作业程序,在制度上推动了中国台湾水文观测标准化进程^[9]。

2 观测数据分析方法的研究

2.1 EMD 分析风暴潮水位

有效分析观测数据是观测体系的重要内容。台风期间,风暴潮水位变化对防灾预警以及海洋工程尤为重要。台风来临期间,潮位站观测的潮位数据既包含天文潮也包含气象潮。人们所关心的风暴潮水位主要受天气影响,一般是由潮位原始资料经过调和分析,滤除天文潮得来的。而用于调和分析的数据有观测时间长度的限制,一般 1 个月为最短观测时间,如此才能基本滤除天文潮的影响;另外,由此得到的风暴潮水位中,仍有周期性水位讯号存在。而应用另一新的数据分析方法——经验模态分解法(empirical mode decomposition method, EMD),则可以避免上述问题。

EMD 是 Huang 等^[10]提出的一种新的数据处理方法。EMD 能够直接摘出原始讯号中不同频率范围的

能量组成,将原始讯号以一组本质模态函数 IMF (intrinsic mode function) 表达,这个方法可以看做是将原来的讯号用 IMF 展开,而这些 IMF 都是从原来讯号中推导出来的。若原始讯号的数据是非线性或非平稳性的,利用 EMD 也能处理,它具有完整性、近乎正交性以及可适性,所以该方法具有分析潮位观测数据的潜质。基于文章篇幅考虑,在此不对其具体的计算方法做赘述,仅讨论其分析的风暴潮水位实例。

分析数据为中国台湾水头潮位站观测数据,观测时间为 2008 年 9 月 23 日—10 月 2 日,其中蔷薇台风警报期间为 9 月 26 日—29 日,调和分析见图 8, EMD 分析见图 9、图 10。由分析结果对比可

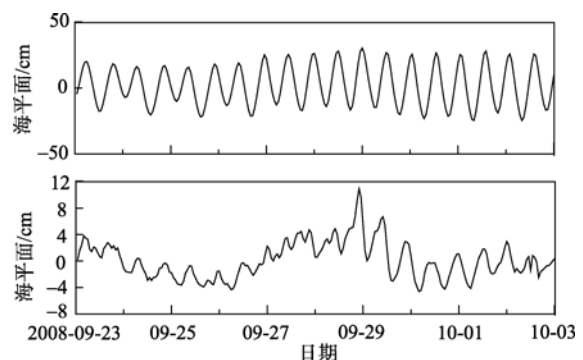


图 8 潮位观测原始水位与调和分析后的风暴潮水位

Fig. 8 Sea level of observed raw data and storm surge water level produced by harmonic analysis

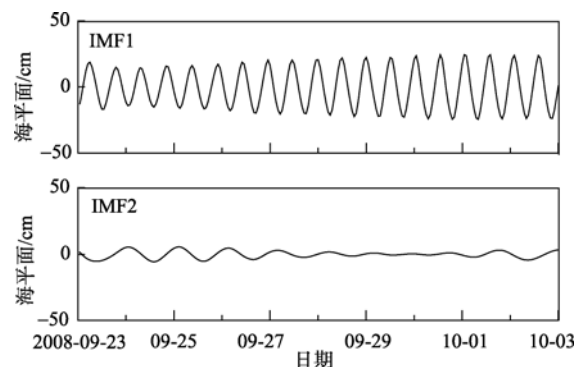


图 9 EMD 分析风暴潮水位的 IMF

Fig. 9 IMF of EMD during analyzing storm surge water level

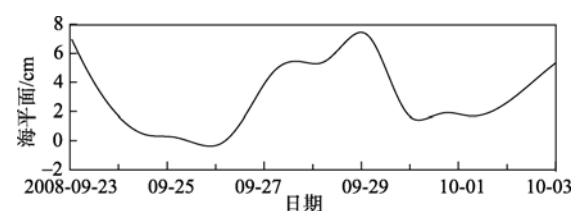


图 10 EMD 分析的风暴潮水位

Fig. 10 Storm surge water level produced by EMD

知, 调和的风暴潮水位仍有非台风影响的周期性讯号存在, 而 EMD 分析结果则不存在此周期性讯号, 仅体现由台风引起的风暴潮水位, 二者最高水位相差约 20cm。该发现使得我们重视调和分析风暴潮水位的合理性与正确性。另外, 相较于调和分析, EMD 对分析数据的时间长度要求较低, 使得该方法具有更强的适用性。当然, EMD 仍然有待改进, 比如分析数据两端的误差如何消除以及最后的风暴潮水位如何确定等。EMD 从新的角度来分析观测数据, 在非定常信号分析领域的潜质值得大家研究和探讨。

2.2 小波转换在雷达影像分析中的应用

X 波段雷达观测系统是中国台湾近年来运用雷达测波技术自主研发的一套遥感观测系统。由于海浪中波长、波向与波高等波浪信息由波浪谱计算求得, 而波浪谱又可籍由雷达回波影像谱分析得到^[11], 因此如何有效、合理分析影像谱是雷达测波系统的重要内容, 直接关系到观测结果准确度以及系统的适用性。传统上常利用傅里叶转换(FFT)将雷达观测影像转换成影像谱, 当雷达远离于岸边或忽略近岸影响时, 该方法尚可适用, 然而对于分析近岸的影像, 该方法则不适合。近岸海域的波浪受水深、地形影响, 具有非均匀性(non-homogeneity), 因此在分析近岸影像时, 傅里叶转换把波浪在空间上的差异性平均化, 以至于波浪折射及浅化变形等特性无法体现出来。近海水文中心运用小波转换(wavelet transform)建立了非均匀影像的分析方法, 使得雷达观测系统可应用于近岸海况观测, 藉以对研究波浪折射、浅化变形等课题有重要贡献^[8,12]。

小波转换原理乃藉由不同尺度、位置与方向的小波母函数与被分析讯号进行内积, 来求得影像在不同空间域与时间域所对应的频率能量特性, 其具有良好的空间分辨率^[12], 可解析出不同时空的近岸海况特性。限于文章篇幅, 在此不对其具体的计算方法做赘述。

观测影像的小波转换分析波谱见图 11、12。该观测海域为中国台湾垦丁近岸海域, 波浪折射及浅化变形明显, 雷达天线距离海岸线约 10m, 子影像取于雷达影像的近岸区域, 大小为 128 × 128 像素, 空间分辨率为每像素 7.5m, 取 6 个不同的空间位置点进行小波转换分析。对比傅里叶转换, 小波转换的影像分析方法可以获得较丰富的近岸非均匀性波浪信息, 分析区域中, 近岸波浪之波长变化、波向变化等浅化变形特性均可体现^[13]。

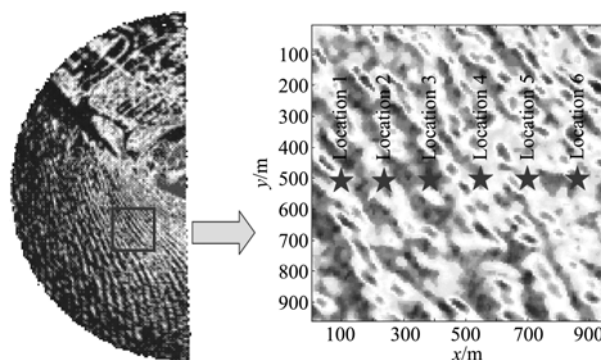


图 11 垦丁观测海域之雷达分析影像

Fig. 11 Analyzed radar image detected in Kending, Chinese Taiwan

2.3 数据同化在作业化数值波浪预报模式中的应用

随着数据同化技术(data assimilation)在气象领域中广泛之应用, 海洋工作者试图将其应用于数值波浪现报、预报模式中, 起始由于缺乏高质量的观测数据而使得其发展受阻。就中国台湾而言, 环岛作业化波浪监测网的建置并持续稳定运转为数据同化技术在作业化数值波浪预报领域的发展提供了绝佳机会。数据同化技术应用于数值波浪模式与传统方法不同点在于, 传统的方法利用数值波浪模式进行推算(hindcast), 并与现场实测资料做对比, 藉以调整模式中的参数设定, 从中调校出最佳值参数组合, 其后模式便被用来进行海况预报(forecast); 而数据同化的数值波浪预报模式则是通过数据同化技术将作业化数值波浪模式与作业化实时观测系统进行整合, 利用实时数据对海况进行校正, 以提升数值波浪预报模式之准确度^[14]。

数据同化方法主要分为两类: 一为连续数据同化(sequential data assimilation), 另一为变分资料同化(variational data assimilation), 而连续数据同化常见的方法有直接内插法、最佳内插法(optimal interpolation)、Kalman 滤波法等。基于数据同化方法发展的完善情况及可作业化等方面考虑, 最佳内插法是现今大多作业化的同化系统采用的方法。最佳内插法是以线性叠加方式表示分析值、实测值与始算值的关系, 以最佳权重决定计算格点受实测值的影响程度, 以改善模式推算精度。近海水文中心发展的作业化数值波浪预报模式中, 数据同化的浮标观测数据并未采用传统的波高数据, 而是考虑到波浪方向对预报的重要性, 开创性地采用方向波谱作为同化资料^[15]。

对比于传统预报模式, 波谱数据同化于数值波浪模式后, 其预报精度显著提升(图 13—15)。另外, 同化数据实时取自于距台湾岛 200 多公里的深海浮

标, 当台风到达浮标附近时, 该作业化数值波浪模式可提前 4—5h 预报台风浪到达近岸时的海况, 即

可实现实时现报(nowcast), 为近岸海况预警做指导, 具有突出现实价值^[15]。

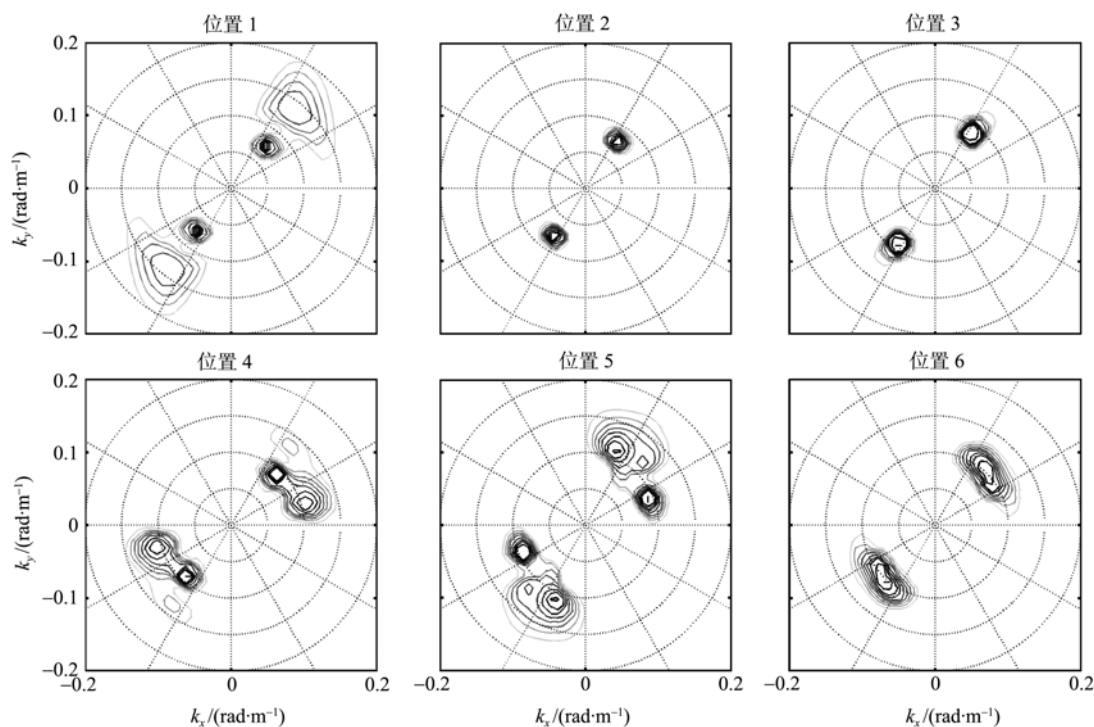


图 12 运用小波转换分析观测影像(图 11)的空间波谱

Fig. 12 Wave number spectra calculated by 2D-FT at six different locations

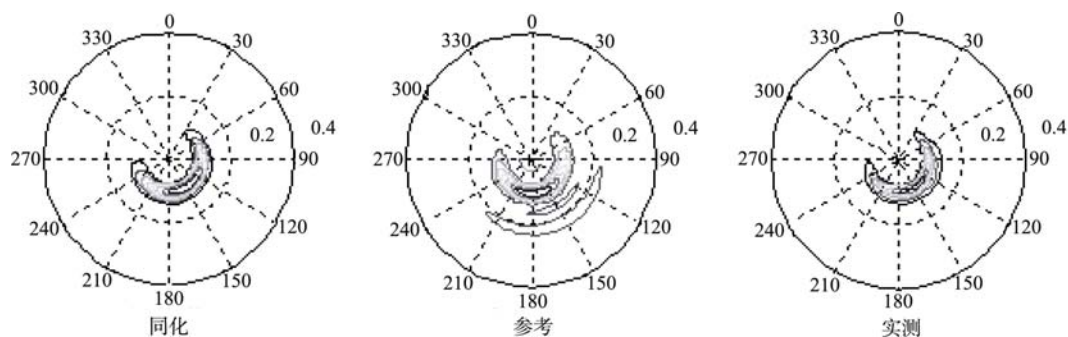


图 13 预报模式计算的二维波谱与实测数据比较

Fig. 13 Performance of 2D spectra calculated by model compared with measurement data

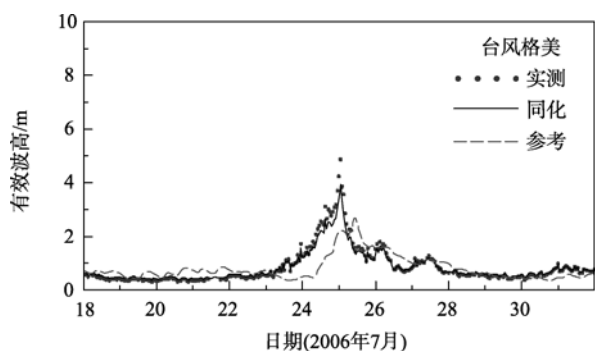


图 14 预报模式计算的波高与实测数据比较

Fig. 14 Time series of SWH calculated by model compared with measurement data

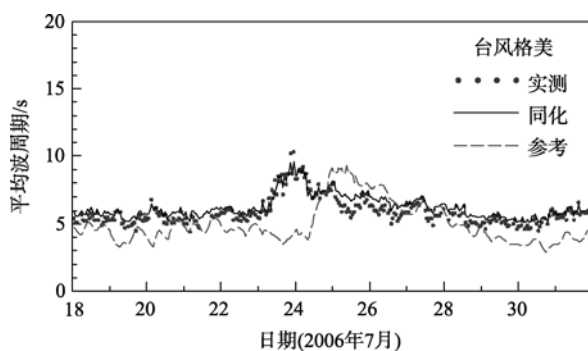


图 15 预报模式计算的平均周期与实测数据比较

Fig. 15 Time series of mean wave period calculated by model compared with measurement data

3 中国台湾近海水文观测体系的社会应用及后续发展

近海水文观测体系应用层面甚广,一方面实时监测海洋环境,发布近海水文信息,为海岸灾害防治及预警提供依据;一方面,为海岸地区的开发经营、渔业养殖与捕捞、灾害防治、海岸保育、休闲游憩、航海运输、港湾设计等皆需要长期近海水文数据的工程提供设计依据,或是为防救灾抢险及海上活动决策参考^[16]。

为适应目前社会环境需要,强化相关部门防灾及预警决策体系,加强近海水文数据之运用与管理,近海水文中心将近海水文体系结合地理信息系统建立了“海岸水情系统”,除去在观测现场设置信息展示站提供海况信息服务,亦在因特网上提供数据的查询、整合维护与数据汇入(出)的服务。该系统每 12h 一次产出未来 3 天波浪预报场。除可为相关部门救灾抢险提供决策参考,亦可让社会大众实际了解台湾岛四周海域现况,更可与其他近海水文单位进行数据信息整合,以进行防救灾抢险工作。在台风警报期间,执行 24h 监测,随时提供最新海况信息。近年来,几乎每两年即可观测到一次台风引起大于 10m 之巨浪,实时海况信息有效提高海岸防救灾效率,有效减少了灾害损失,2007 年克罗莎台风观测实例如图 16 所示^[5,17]。

风观测实例如图 16 所示^[5,17]。

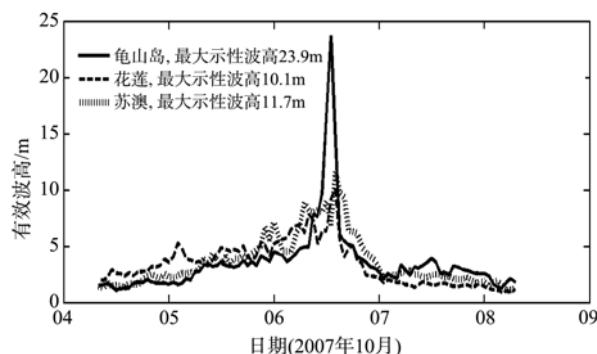


图 16 2007 年 10 月克罗莎台风期间龟山岛实测波浪达 24m
Fig. 16 Freak wave (24m) during Typhoon Krosa measured by Guishandao buoy

近岸地带为当今人类发展的核心地带,亦为环境敏感地带,为配合科学、可持续性开发海岸的目的,近海水文观测需不断发展和完善。今后台湾近海水文体系将持续研发先进而多样的观测技术,有如遥感、影像观测、深海观测等技术,以面对海洋生态环境、异常海况观测等近海水文领域中涌现的新课题;同时也加强数据分析研究,探讨更多更深层次的海洋科学问题,以提升观测数据的学术价值;大力开发近海水文观测的社会应用价值,发展更加完备的海岸防灾及预警系统,使近海水文和海洋研究惠及于民。

参考文献

- [1] 高家俊, 庄士贤, 蔡嘉蓉. 海象数据库之现况与问题[C] //1999 年海岸工程研讨会论文集, 中国台湾: 海洋工程学会, 1999.
- [2] 张国强, 李汴军, 庄士贤, 等. 台风期间海岸水文监测系统之建置[C] //2003 年海岸工程研讨会论文集. 中国台湾: 海洋工程学会, 2003.
- [3] 高家俊, 庄士贤, 卓训杰, 等. 近海水文观测站网建置工程[R]. 成功大学近海水文中心, 2000.
- [4] 高家俊, 张江福, 董东璟, 等. 近海水文网基本站之建置[R]. 成功大学近海水文中心, 2003.
- [5] 高家俊, 许泰文, 黄清哲, 等. 海岸灾害监测预警系统建置[R]. 成功大学水利及海洋工程学系, 2008.
- [6] 邓中柱. 作业化数据浮标之评介[J]. 气象学报, 1983, 39(2): 116-123.
- [7] 高家俊. 数据浮标监控系统——操作手册[R]. 成功大学近海水文中心, 1998.
- [8] 高家俊, 董东璟, 张江福, 等. 雷达测波监测系统建立之研究[R]. 成功大学近海水文中心, 2004.
- [9] 高家俊. 海气象数据浮标系统数据品质管理标准及作业规范[S]. 成功大学近海水文中心, 1997.
- [10] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, A 454: 903-995.
- [11] NIETO J C, SOARES C G. Analysis of directional wave fields using x-band navigation radar[J]. Coastal Engineering, 2000, 40: 375-391.
- [12] 吴立中. 时空合域连续小波转换应用于非均匀波长之研究[D]. 中国台湾: 成功大学水利及海洋工程学系, 2008.
- [13] FENG XIANGBO, YAN YIXIN, KAO CHIA-CHUEN, et al. Non-homogeneity of nearshore wave field from x-band radar images[C]. ISOPE, 2009: 696-701.
- [14] LIONELLO P, GUNTHER H, JANSSEN P A E M. Assimilation of altimeter data in a global third generation wave model[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, C97: 14453-14474.
- [15] 范扬铭. 波谱数据同化应用于 SWAN 波浪模式[D]. 中国台湾: 成功大学水利及海洋工程学系, 2008.
- [16] 高家俊. 海岸水文分析应用手册[R]. 成功大学近海水文中心, 2008.
- [17] 庄士贤, 李汴军, 张江福, 等. 台湾沿海潮位站网分类评估与海岸灾害决策系统之建置[R]. 成功大学近海水文中心, 2005.