

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.001

海浪预报方法研究进展

刘凡^{1,2}, 陆小敏^{1,2}, 徐丹³, 戴雯雯², 李慧洲²

(1. 河海大学海岸灾害与防护教育部重点实验室, 江苏 南京 211100;
2. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100; 3. 江苏科技大学计算机学院, 江苏 镇江 212100)

摘要:总结了海浪预报方法的分类和研究现状,对比分析了各类方法的优缺点。通过对比分析可知,半经验半理论预报法、经验统计预报法、数值预报法3类传统的海浪预报方法区域化显著,模型建立困难,并且对于实时性数据要求较高。此外,还分析了海浪预报的发展趋势,展望了大数据、人工智能和深度学习等新技术在海浪预报研究领域的应用前景。

关键词:灾害性海浪;海浪预报;大数据;人工智能;深度学习

中图分类号:TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)05-0387-07

Research progress of ocean waves forecasting method

LIU Fan^{1,2}, LU Xiaomin^{1,2}, XU Dan³, DAI Wenwen², LI Huizhou²

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China;
3. School of Computer Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: This study summarizes the classification, research status, advantages and disadvantages of existing ocean wave forecasting methods. Through the comparative analysis, it can be noted that the three traditional wave forecasting methods, semi-empirical and semi-theoretical forecasting method, empirical statistical forecasting method and numerical forecasting method, are significantly regionalized, face the challenge of modeling difficulties, and require high real-time data. Meanwhile, this paper also analyzes the developing trends and prospects the application foreground of some new techniques such as big data, artificial intelligence, and deep learning in the field of wave forecasting.

Key words: disastrous ocean waves; wave forecasting; big data; artificial intelligence; deep learning

灾害性海浪通常是指海上有效波高大于或等于4 m的海浪^[1],主要是在热带气旋(台风)、温带气旋和寒潮的作用下形成的,能够掀翻海上的船只,摧毁海洋和海岸工程,给一切海上活动带来巨大的危害。在岸边,灾害性海浪不仅会冲击、摧毁各类建筑物,还会对人类生命财产安全、农作物生产、水产养殖品的存活造成威胁。最终海浪所导致的泥沙运动会使海港和航道淤塞,对海上作业船只的出行造成不便和威胁。因此,需要精准的海浪预报以保障船只和人员的安全,并指导以沿海城市为核心的生产、生活活动,如海水浴场、滨湖旅游区以及渔场等。

经过科研工作者多年的努力,海浪预报方法取得了很大的进展,预报精度不断提高,在不同场景得到了较好的应用。但目前的预报方法对于数据实时性大多要求较高。由于远离大陆,深海海域难以设置观测站,观测数据需要远洋信息传递,实时性难以保障。本文对比分析了现有海浪预报方法的优缺点,以及海浪预报的发展趋势,展望了未来大数据、人工智能等新技术在海浪预报研究领域的应用前景。

1 研究现状

已有的海浪预报方法主要可以分为3类:半经验半理论预报法、经验统计预报法、数值预报法^[2-3]。19

基金项目: 河海大学海岸灾害与防护教育部重点实验室开放基金(20150009);江苏省自然科学基金(BK20191298)

作者简介: 刘凡(1988—),男,教授,博士,主要从事计算机视觉、机器学习、多媒体分析与理解研究。E-mail: fanliu@hhu.edu.cn

引用本文: 刘凡,陆小敏,徐丹,等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):387-393.

LIU Fan, LU Xiaomin, XU Dan, et al. Research progress of ocean waves forecasting method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 387-393.

世纪初,由于军事需要,英国海军根据多年观测的海面状况资料,制成了海面风力海况表^[4],海浪预报就此诞生。但由于预报理论和预报技术发展缓慢,很长一段时间,海浪预报研究停步不前。直到 20 世纪 40 年代,美国空军海洋部的科学家们提出了依据海浪的风要素预报海浪要素的半经验半理论预报模型。同时,由于海浪现象的随机性,国内外海洋研究学者提出了一种基于海洋观测资料的经验统计预报模型,该模型计算简单,预测结果可靠。到 20 世纪 60 年代,随着计算机、卫星遥感和传感器的广泛应用,海浪预报理论得到了进一步的发展,海浪的数值预报方式随之产生。时至今日,随着海洋经济的不断发展以及为了满足海洋工程的需要,海浪预报方法也得到了不断的发展和完善。

1.1 半经验半理论预报法

半经验半理论预报法是一种根据风要素(风速、风时及风区)预报风浪和涌浪的海浪预报方法。依据计算海浪要素(风浪、涌浪以及浅水风浪)的波谱公式不同可以划分为 3 种:(a)由 Sverdrup 等^[5]提出的最早的半经验半理论预报方法,即有效波预报方法。该方法的特点是分别考虑风时和风区,有效波高取决于其中的较大值。后由 Bretschneider^[6]对有效波预报方法进行改进,提出一种 SMB 法,其主要特点是在有效波预报方法的基础上,添加风速要素来实现海浪要素的预报。(b)由 Pierson 等^[7]提出的 PNJ(pierson neumann james)波谱预报方法,其主要计算涌浪,特点是依据海浪的谱要素得出海浪要素。(c)文圣常教授^[8-9]于 20 世纪 60 年代初提出的能量平衡导出谱预报方法,其主要特点是结合了两种方式,由波浪的能量要素和谱要素配合计算风浪要素。

1.2 经验统计预报法

由于海浪现象规律性难寻,目前还没有理论上完善的海浪预报方法,只能依赖一些经验统计预报方法。虽然这些方法大部分理论依据不足,但它们是直接基于实际观测数据拟合得到的,并且在台风浪的预报中取得了预期效果,所以海浪经验统计预报法依然是实际生产生活中不可或缺的预报方法之一。其中常用的几种预报方法是:(a)Wilson 经验预报法^[10]。该方法依据波速变量、风区长度变量和风速变量,由 Wilson 经验预报公式计算出海浪的波高。该方法不仅能应用于深水、浅水的海浪要素预报,还能预报远洋和近海的海浪要素,是目前在海浪经验预报方面应用最为广泛的方法之一。(b)Bretschneider 经验预报法^[11]。该方法以有效波方法为理论基础,其主要特点是使用已有资料推算出最大风速。(c)宇野木经验预报法^[12]。该方法通过观测大量的台风资料,解释了台风浪的分布状态与台风气压和大风半径之间的关系,目前仍是主要的台风浪预报方法之一。(d)井岛经验预报法^[13]。该方法是井岛等以 Wilson 经验预报法理论为基础提出的一种台风浪经验统计预报方法,同样也是根据风区长度变量、风速变量以及周期计算出波高。许富祥等^[14-16]于 20 世纪 90 年代对中国近海及其邻近海域的灾害性海浪分布进行了统计分析,结果表明基于经验统计的预报方法在中国海域也具有较好的适用性。

1.3 数值预报法

从第一台通用计算机诞生以来,计算机的计算能力得到飞跃式的提升,推动了数据预报的发展。随着 20 世纪 70 年代“联合北海开发计划”的启动,海浪的预报方法转向海浪的数值预报方法。经科研工作者多年的努力,海浪的数值预报方法开始在欧洲国家实际应用。通过对海浪数值预报的深入研究,GROUP 小组^[17]将海浪数值预报法的发展划分为 3 代。

第一代模式:19 世纪 60 年代至 70 年代初发展起来,即谱的能量平衡方程式。该模式的主要特点是在能量平衡方程式的基础上假定变量波之间相互独立,并且在每一组波充分成长时,立即停止增长。

第二代模式:19 世纪 70 年代后。该模式可以分成两部分:(a)使用非线性耦合和线性耦合作为预报风浪和涌浪的耦合混合模型,简称 CH(coupled hybrid)模式;(b)直接使用非线性耦合作用,同时预报风浪和涌浪的耦合离散型模型,简称 CD(coupled discrete)模式。第二代模式的主要特点是以风浪和涌浪作为海浪要素的直接观测法,与第一代模式不同的是考虑了波与波之间的相互关系而非相互独立。

第三代模式:20 世纪末,随着计算机的快速发展,西欧的海洋研究人员迎来了第三代模式,即 WAM(wave modeling group)模式^[18]。其主要特征是直接计算波与波之间的非线性能量传输作用,考虑能量平衡方程中的各个项,模型的预报结果与实际值吻合较好,是一种能够广泛应用于全球浅水、深水的数值预报方法^[19-20]。

此后,海浪的模拟和研究多以第三代数值预报模式为主要参考,SWAN(simulating waves nearshore)模式

和 WW3(WAVE WATCH III)模式都是基于第三代数值预报模式建立的。SWAN 模式是由荷兰科学家 Booij 等^[21]提出的、一种能广泛应用于近海岸的数值预报方法。相对于 WAM 模式,SWAN 模式是一种隐式的数值模型,该模式的传播方案具有较强的扩散性且更经济,适用于沿海和近海区域的波浪预报^[22-23]。WW3 模式是由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)的科学家 Tolman 等^[24]提出的一种数值预报方法。作为第三代海浪数值预报方法的典型代表,WW3 模式从波作用量出发,综合考虑了地形、海流、海气温差、波浪浅水形变等多种要素。与 WAM 模式不同,WW3 模式基于完全不稳定的频谱作用密度方程,以便考虑到大规模波流的相互作用。与 WAM 模式相比,该模式能更真实地描述波高的变化,具有相似或更小的随机误差、更好的相关系数和回归斜率。WW3 模式应用广泛^[25-30],其稳定性及预报能力已经获得了广泛的认可,并广泛应用于大浪生成传播^[31-33]、波浪能资源评估^[34]等方面。

20 世纪 70 年代中期,我国科研工作者研发了能够应用于我国海域的海浪数值预报方法。文圣常^[35]较为详细地讨论了海浪模式和海浪理论,为中国海洋数值模拟研究提供了可靠的理论依据。接着,文圣常^[36]又研制了新的混合型模式,该模式与 CH 模式的不同点在于:一是将风浪部分进行采样并将其参数量化,二是通过谱风浪方法对涌浪部分采样。王文质等^[37]介绍了一种能够应用于深、浅海的海浪数值预报方法,该方法的预报值与实际值之间误差较小,应用广泛。隋世峰等^[38-39]提出了应用于台风浪的数值预报方法,该方法的特点是在原有的数值预报模式中添加了一项风浪成长参数,即平均波龄,其优点是可以使风浪充分成长为谱模式,继而有效地计算出波高。袁业立等^[40]引入更加复杂的区域性海浪模式和特征嵌入的数值预报模式,即 LGFD(laboratory of geophysical fluid dynamics)模式,该模式以能量平衡方程式为基础,预报数据与实际值误差较小,在我国南海区域得到了很好的应用。夏璐一等^[41]依据台风移动路径与有效波高距离成反比的关系提出一种数值预报模型,其预报数据与实际值吻合较好,为海浪预报研究提供了参考依据。

1.4 对比分析

不同的海浪预报方法,其预报的精度和可操作性也会不同。表 1 对 3 类主要海浪预报方法的相关参数、优缺点、可靠性以及适用性等进行了对比。

表 1 海浪预报方法对比分析
Table 1 Comparative analysis of ocean wave forecasting methods

海浪预报方法	方法比较参考因素				
	相关参数	优点	缺点	可靠性	适用性
半经验半理论预报法	浪高、周期、风速等易于观测的时空特征	易于得到,计算量小,预报速度快	理论基础不足,区域化显著,缺少广泛性	高	使用不方便,区域化显著且应用有局限
经验统计预报法	浪高、周期、风速、波频率、传播方向、位置等时空特征	预报精度提高,预报速度快	经验统计模型应用有局限		
数值预报法	第一代模式	简化计算步骤,对计算机容量和速度要求较低,容易实现,非常经济	理论依据不太充分	不高,粗略计算	航海事业、海洋水域生产作业等对精度有很高要求的领域
	第二代模式	浪高、周期、风速等时空特征和(波、风、地形)消衰、涡动黏性等非线性特征	模型结果不仅在理想情况的特性较好,实际情况也较准确	较高,模型不断完善	
	第三代模式	精准度高,具有一定广泛性,能适用于全球深水和浅水	计算量大,模型建立困难	高	

半经验半理论预报法提出最早,由于观测数据需求较少,缺少充分的理论作为支撑,对于海浪的成因缺少充分的考虑,虽在局部地区有较好的适用效果,但缺乏广泛性,对于部分场景的精度难以满足需求;经验统计预报法基于较长时间观测数据,运用数学建模的思想来预报海浪,预报精度较高,但是对于数据来源有依赖性,广泛性不足;数值预报法考虑了海浪形成的各种因素,根据流体力学原理计算波浪,在深海和浅海都有很好的应用,但是计算成本大,复杂度高。

2 发展趋势

2.1 基于大数据的海浪预报

能够引起灾害性海浪的潜在因素很多,如热带气旋(台风、飓风)、温带气旋、寒潮的强风作用等,如何从

中找到最相关的影响因子是海浪预报的关键。近年来,随着大数据的发展,大数据技术可以从海量数据中挖掘关键因子,并揭示数据之间隐藏的关系模式,其在天气精准预报、用户行为预报、城市物价预报、灾害灾难预报等领域获得了广泛的应用。Booz 等^[42]开发了基于大数据的神经网络天气预报系统,引入滑动窗口机制对输入端数据进行控制,用过去 10 年、30 年、50 年、70 年的历史数据作为训练集验证 2010—2017 年的天气。结果表明,基于大数据的海浪预报模型所得结果与实际值吻合度较高。张蔺廉等^[43]使用大数据技术分析得知在海洋气象中风浪之间的关系呈准线性分布,且多次预报检验显示,基于大数据分析的有效浪高预报结果在波浪等级上完全正确,数值上最大相差 0.4 m,取得了较好的预报结果。

海洋大数据相比于传统意义上的海洋数据具有海量性、多样性、时效性和低价值密度性等特点。利用大数据分析技术能够优化流程,实时处理海量的多样化数据,为提高海浪预报精度提供重要的数据参考。因此,为了提高海浪预报的准确性,可以有效结合目前海浪预报方法和大数据技术,构建如图 1 所示的基于大数据的海浪预报系统,为海洋与渔业的科学管理提供强有力支撑。

基于大数据的海浪预报系统架构包括以下 4 个功能层次:

a. 海洋数据多源感知与探测。随着各类新型技术和设备的不断更新应用,海洋观测体系已发展成为包括卫星遥感、海洋调查船、观测站、浮标阵列等在内的全球化多尺度、多学科要素的综合立体化数据采集方式,可以获取海量多源异构的海洋数据。

b. 数据存储计算。在实时海浪预报过程中,由于海浪数据来源范围广、时间跨度长、时序数据多维性、影响因素多等特征,导致数据冗余,数据处理和挖掘困难。所以,在调用原生数据之前,需要对数据进行集成、清洗、变换、规约的预处理,通过分布式存储系统(DSS)实现数据存储。

c. 数据模型。利用大数据基础架构实现数据快速读取与计算,凭借大数据挖掘分布式框架中的协同过滤算法,根据不同的任务要求,从海浪数据中剔除不相关的特征数据,然后采用成熟的数值预报模型获取有价值的预报结果,从而提高系统的处理速度和精度。

d. 数据应用。大数据应用为各种海洋部门和普通用户提供业务管理、决策支持、公共服务以及其他个性化服务,提升对人民群众人身财产安全的保障能力。

2.2 基于人工智能的海浪预报

在过去 10 年中,人工智能方法越来越多地被应用于灾害性海浪预报中,如王华等^[44]提出了基于 BP 人工神经网络的海浪预报模型,可以处理海浪数据的非线性关系,满足实际预报要求。Deo 等^[45]利用神经网络算法预测有效波高,与自回归模型(autoregressive model, AR)相比,神经网络的波高预测与其实际观测值的协方差更高。朱智慧等^[46]使用 BP 神经网络法预测有效波高和平均波向,结果表明,对近岸浮标,BP 神经网络法的预报准确度比 WW3 有明显的提高。Sinha 等^[47]采用遗传算法(genetic algorithm, GA)对孟加拉湾进行波高预测,发现 GA 在更长的时间范围内表现更好。Nikoo 等^[48]首次提出将人工免疫识别系统(artificial immune recognition system, AIRS)用于美国北部苏必利尔湖有效波高的预测,其预报结果优于人工神经网络(artificial neural network, ANN)、贝叶斯网络(Bayesian networks, BN)以及支持向量机(support vector machines, SVM)等方法。Wu 等^[49]提出了集成经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法和反



图 1 基于大数据的海浪预报系统架构
Fig.1 Framework of ocean wave forecasting system
based on big data

向传播神经网络(BPNN)的海温预测法,该方法通过聚合各系列固有模式函数的预报数据,得到最终的海温预测结果,应用于北太平洋海温的实例分析表明,该模型能有效预报时间序列海温。Ali 等^[50]利用改进的极限学习机(extreme learning machine,ELM)模型,将有效波高的历史滞后序列作为模型的预测因子来预测未来的有效波高,具有较高的准确性。James 等^[51]分别使用多层感知机(multilayer perceptron,MLP)和支持向量机(SVM)进行波高的回归分析和特征周期的分类分析,结果表明,这两种机器学习模型的预报结果准确且计算效率高。

通过长时间连续的视频监测可以弥补传统监测手段实时性和便捷性的不足,更精准地掌握海浪出现的规律。但是通过视频监测获取的海浪数据量大、特征复杂,人工提取特征困难。传统的机器学习方法需要人工提取先验知识,使海浪图像的分类识别变得困难。随着大数据深度学习时代的来临,人工智能领域产生了非常深刻的变革,能够实现运算量指数级的增加,并且能够克服底层特征提取的困难,提高分类和预报的准确性,在视频及图像处理领域得到了广泛应用。如 Zhang 等^[52]将经典深度信念网络(deep belief network,DBN)中的受限玻尔兹曼机(restricted Boltzmann machine,RBM)替换为包含时间信息的条件受限玻尔兹曼机(conditional restricted Boltzmann machine,CRBM),建立 CRBM-DBN 模型。该模型利用粒子群算法确定的关键模型参数来预报有效波高,有良好的短期和极端事件预报能力。郝剑波^[53]提出使用卷积神经网络(convolutional neural networks,CNN)对视频监测的海浪数据进行海浪等级划分,为近海岸海浪预警预报提供理论支撑。因此,利用海浪大数据,研究有效的深度学习海浪预报模型可以较好地克服已有预报方法的不足,为灾害性海浪预报提供新的解决思路。

3 结 语

精准的海浪预报对保障沿海人民生活生活安全和航海事业具有重要作用。目前在海浪预报方法中大数据、人工智能等新技术应用并不广泛,但这些技术能够优化流程、实时处理海量的多样化数据,并因对非线性数据的不敏感而被广泛应用于各种预报研究领域,对于预报因子多、关系复杂的气象和海洋预报,同样具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 邢闯,李本霞. 中国近海 2012 年灾害性海浪分析及 2013 年预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,30(3):1-8. (XING Chuang,LI Benxia. Analysis of disastrous wave of China seas in 2012 and prediction for 2013[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,30(3):1-8. (in Chinese))
- [2] 许富祥,许林之. 海浪预报方法综述(一)[J]. 海洋预报,1989(3):33-43. (XU Fuxiang,XU Linzhi. Summary of wave forecast methods I [J]. Journal of Marine Forecasts,1989(3):33-43. (in Chinese))
- [3] 许富祥,许林之. 海浪预报方法综述(二)[J]. 海洋预报,1989(4):50-58. (XU Fuxiang,XU Linzhi. Summary of wave forecast methods II [J]. Journal of Marine Forecasts,1989(4):50-58. (in Chinese))
- [4] 宇田道隆. 海洋科学史[M]. 金连缘,译. 北京:海洋出版社,1984:251-261.
- [5] SVERDRUP H U,MUNK W H. Wind, sea and swell: theory of relations for forecasting[M]. Washington DC: Hydrographic Office,1947.
- [6] BRETSCHNEIDER C L. Revised wave forecasting relationships[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1951 (2): 1-5.
- [7] PIERSON W J,NEUMANN G,JAMES R W. Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics[M]. California:University of California Libraries,1958.
- [8] 文圣常. 普遍风浪谱及其应用[J]. 山东海洋学院学报,1960(0):15-43. (WEN Shengchang. Generalized wind wave spectra and application[J]. Journal of Shandong College of Oceanology,1960(0):15-43. (in Chinese))
- [9] 文圣常. 我在海浪理论及应用领域的研究工作[J]. 中国科学院院刊,1996(2):135. (WEN Shengchang. My research work in wave theory and application[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,1996(2):135. (in Chinese))
- [10] WILSON B W, Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December,1959[J]. Deutsche Hydrografische Zeitschrift,1965,18(3):114-130.
- [11] BRETSCHNEIDER C L. Wave variability and wave spectra for wind-enerated gravity waves[R]. Washington DC: Corps of Engineers Washington DC Beach Erosion Board,1959.
- [12] TSYPLUKHIN V F,KHASKHACHIKH G D,SAMARIN V G. US army castal engineering research center[J]. Hydrotechnical

Construction,1971,5(9):860-863.

- [13] 关孟儒. 台风波浪推算方法的探讨[J]. 华东水利学院学报,1981(2):17-36. (GUAN Mengru. A discussion on the calculation method of typhoon waves[J]. Journal of East China College of Hydraulic Engineering,1981(2):17-36. (in Chinese))
- [14] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报,1996,18(2):26-31. (XU Fuxiang. Temporal and spatial distribution of disastrous waves in China's offshore and its adjacent areas[J]. Acta Oceanologica Sinica,1996,18(2):26-31. (in Chinese))
- [15] 许富祥. 海浪灾害及中国海灾害性海浪分布规律[C]//论沿海地区减灾与发展:全国沿海地区减灾与发展研讨会论文集. 北京:中国灾害防御协会,1991:348-352.
- [16] 高志华,许富祥. 1994 年中国海灾害性海浪特征分析[J]. 海洋开发和管理,1995,12(4):57-59. (GAO Zhihua, XU Fuxiang. The analysis on the features of disastrous wave in China sea[J]. Ocean Development and Management,1995,12(4):57-59. (in Chinese))
- [17] The Group Sea Wave Modeling Project. Wave dynamics(book reviews;ocean wave modeling). [J]. Science,1985,229(4711):377.
- [18] GROUP W T. The WAM model:a third generation ocean wave prediction model[J]. Journal of Physical Oceanography,1988,18(12):1775-1810.
- [19] SAAD A M E. Wave and wind conditions in the Red Sea;a numerical study using a third generation wave model[D]. Bergen:The University of Bergen,2010.
- [20] TUOMI L,BJORKQVIST J V. Wave forecasting in coastal archipelagos[C]//2014 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC). Tallinn, Estonia:IEEE,2014:1-6.
- [21] BOOIJ N,RIS R C,HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions:1. Model description and validation [J]. Journal of Geophysical Research Oceans,1999,104(4):7649-7666.
- [22] LIANG B,GAO H,SHAO Z. Characteristics of global waves based on the third-generation wave model SWAN[J]. Marine Structures,2019,64:35-53.
- [23] AKPINAR A,VAN VLEDDER G P,KOMURCU M I,et al. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea[J]. Continental Shelf Research,2012,30:80-99.
- [24] TOLMAN H L,BALASUBRAMANIAN B,BURROUGHS L D,et al. Development and implementation of wind-generated ocean surface wave models at NCEP[J]. Weather and Forecasting,2002,17(2):311-333.
- [25] SWAIN J,UMESH P A. Prediction of uncertainty using the third generation wave model WAVEWATCH III driven by ERA-40 and blended winds in the North Indian Ocean[J]. Journal of Oceanography & Marine Research,2018,5(172):157-173.
- [26] BARBARIOL F,ALVES J H G M,BENETAZZO A,et al. Numerical modeling of space-time wave extremes using WAVEWATCH III[J]. Ocean Dynamics,2017,67(3/4):535-549.
- [27] SHARIFI F S,EZAM M,KARAMI K A. Evaluating the results of Hormuz strait wave simulations using WAVEWATCH-III and MIKE21-SW[J]. International Journal of Maritime Engineering,2012,2(2):163-167.
- [28] 郑崇伟,潘静,黄刚. 利用 WW3 模式实现中国海击水概率数值预报[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(3):314-320. (ZHENG Chongwei,PAN Jing,HUANG Gang. Forecasting of the China Sea ditching probability using WW3 wave model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2014,40(3):314-320. (in Chinese))
- [29] 郑崇伟,游小宝,潘静,等. 钓鱼岛、黄岩岛海域风能及波浪能开发环境分析[J]. 海洋预报,2014,31(1):49-57. (ZHENG Chongwei,YOU Xiaobao,PAN Jing,et al. Feasibility analysis on the wind energy and wave energy resource exploitation in Fishing Islands and Scarborough Shoal[J]. Acta Oceanologica Sinica,2014,31(1):49-57. (in Chinese))
- [30] 齐义泉,朱伯承,施平,等. WWATCH 模式模拟南海海浪场的结果分析[J]. 海洋学报,2003,25(4):1-9. (QI Yiquan,ZHU Bocheng,SHI Ping,et al. Analysis of significant wave heights from WWATCH and TOPEX/Poseidon altimetry [J]. Acta Oceanologica Sinica,2003,25(4):1-9. (in Chinese))
- [31] 郑崇伟. 利用 WW3 模式实现中国周边海域波浪能流密度数值预报;以 2 次冷空气过程为例[J]. 亚热带资源与环境学报,2014,9(2):18-25. (ZHENG Chongwei. Wave energy density forecast in China seas by WW3 wave model;a study based on two cold air events[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment,2014,9(2):18-25. (in Chinese))
- [32] 郑崇伟,庄卉,贾本凯,等. 基于 WW3 模式的一次台风浪过程中掠海飞行器的击水概率分析[J]. 海洋学研究,2013,31(3):36-40. (ZHENG Chongwei,ZHUANG Hui,JIA Benkai,et al. Analysis of ditching probability caused by typhoon wave using WAVEWATCH-III wave model[J]. Journal of Marine Sciences,2013,31(3):36-40. (in Chinese))
- [33] 郑崇伟,林刚,邵龙潭. 孟加拉湾一次热带气旋过程的海浪场模拟分析[J]. 海洋学研究,2013,31(4):26-31. (ZHENG

- Chongwei, LIN Gang, SHAO Longtan. Analysis of wave field caused by tropical cyclone in the Bay of Bengal[J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(4): 26-31. (in Chinese))
- [34] 郑崇伟, 游小宝, 陈晓斌, 等. 西北太平洋海域风浪、涌浪、混合浪波浪能资源特征[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 408-413. (ZHENG Chongwei, YOU Xiaobao, CHEN Xiaobin, et al. Characteristics analysis on wave energy over Northwest Pacific Ocean in the last 44 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(4): 408-413. (in Chinese))
- [35] 文圣常. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [36] 文圣常. 海浪模拟的新途径[C]//中国科学技术协会, 浙江省人民政府. 面向 21 世纪的科技进步与社会经济发展(上册). 杭州: 中国科学技术协会学会学术部, 1999: 245.
- [37] 王文质, 陈俊昌, 黎满球, 等. BSCS 海浪数值预报方法[J]. 热带海洋, 1990(4): 9-15. (WANG Wenzhi, CHEN Junchang, LI Manqiu, et al. BSCS numerical forecasting method for ocean waves [J]. Journal of Tropic Oceanology, 1990(4): 9-15. (in Chinese))
- [38] 隋世峰. 台风波浪数值预报的 CHGS 法: I. 成长过程中的海浪谱[J]. 热带海洋学报, 1988, 8(4): 9-17. (SUI Shifeng. CHGS method for numerical forecasting of typhoon waves: I. Spectrum of waves in growing process[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1988, 8(4): 9-17. (in Chinese))
- [39] 隋世峰, 蔡清贵, 陈荣裕, 等. 台风波浪数值预报的 CHGS 法: III. 风浪的成长和涌浪的消衰[J]. 热带海洋学报, 1989, 9(2): 13-20. (SUI Shifeng, CAI Qinggui, CHEN Rongyu, et al. CHGS method for numerical forecasting of typhoon waves III. Growth of wind wave and decay of swell[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1989, 9(2): 13-20. (in Chinese))
- [40] 袁业立, 潘增弟, 邹建生. LGFD 海浪数值预报方法: I. 海浪数值预报模式[J]. 黄渤海海洋, 1988(2): 1-5. (YUAN Yeli, PAN Zengdi, ZOU Jiansheng. LGFD wave numerical forecast method part I: wave numerical forecast model [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1988(2): 1-5. (in Chinese))
- [41] 夏璐一, 栾曙光, 张超. 西北行路径台风浪的特征分析[J]. 大连海洋大学学报, 2014(6): 654-658. (XIA Luyi, LUAN Shuguang, ZHANG Chao. Wave characteristics of norethwest moving path typhoon[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2014(6): 654-658. (in Chinese))
- [42] BOOZ J, YU W, XU G, et al. A deep learning-based weather forecast system for data volume and recency analysis[C]//2019 International Conference on Computing. Honolulu: Networking and Communications (ICNC), 2019: 697-701.
- [43] 张蔺廉, 陈淑琴. 大数据分析在海洋气象风浪关系研究中的应用[C]//第 35 届中国气象学会年会 S14 大数据、互联网、融媒体时代气象服务的创新与变革: 第八届气象服务发展论坛. 北京: 中国气象学会, 2018: 577.
- [44] 王华, 姚圣康, 龚茂珣, 等. 东海区域灾害性海浪长期预报方法研究[J]. 海洋通报, 2007(5): 35-42. (WANG Hua, YAO Shengkang, GONG Maoshun, et al. Study on the long-term predicting way of disastrous sea wave of East China Sea[J]. Journal of Marine Science Bulletin, 2007(5): 35-42. (in Chinese))
- [45] DEO M C, NAIDU C S. Real time wave forecasting using neural networks[J]. Ocean Engineering, 1998, 26(3): 191-203.
- [46] 朱智慧, 曹庆, 徐杰. 神经网络方法在上海沿海海浪预报中的应用[J]. 海洋预报, 2018, 35(5): 25-33. (ZHU Zhihui, CAO Qing, XU Jie. Application of neural networks to wave prediction in coastal areas of Shanghai[J]. Journal of Marine Forecasts, 2018, 35(5): 25-33. (in Chinese))
- [47] SINHA M, RAO A D, BASU S, et al. Forecasting space-time variability of wave heights in the bay of Bengal: a genetic algorithm approach[J]. Journal of Oceanography, 2013, 69(1): 117-128.
- [48] NIKOO M R, KERACHIAN R. Wave height prediction using artificial immune recognition systems (AIRS) and some other data mining techniques[J]. Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering, 2017, 41(3): 329-344.
- [49] WU Z, JIANG C, CONDE M, et al. Hybrid improved empirical mode decomposition and BP neural network model for the prediction of sea surface temperature[J]. Ocean Science, 2019, 15(2): 349-360.
- [50] ALI M, PRASAD R. Significant wave height forecasting via an extreme learning machine model integrated with improved complete ensemble empirical mode decomposition[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 104(4): 281-295.
- [51] JAMES S C, ZHANG Y, ODONNCHA F, et al. A machine learning framework to forecast wave conditions [J]. Coastal Engineering, 2018, 137(7): 1-10.
- [52] ZHANG X, DAI H. Significant wave height prediction with the CRBM-DBN model[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36(3): 333-351.
- [53] 郝剑波. 基于深度学习的近岸海浪等级分类研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.