

A Brief Instruction to the Latest Version WAVEWATCH Ocean Wave Model and a Case

Xuan Chen¹, Chongwei Zheng^{2,3}, Xiaoguang Liu³, Wei Sun², Fan Gao⁴

¹No. 75822 of PLA, Guangzhou Guangdong

²People's Liberation Army University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu

³Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning

⁴No. 92853 of PLA, Xingcheng Liaoning

Email: chzffx@qq.com

Received: Mar. 17th, 2016; accepted: Apr. 10th, 2016; published: Apr. 13th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

As a typical representative of the third generation wave models, WAVEWATCHIII (WW-III) is applied widely as forecast and research tools for waves in ocean by many marine departments such as NOAA. And in 2014, WW-III was updated to version 4.18. In the new version, some important processes are added, the installation of WWIII is more detailed, and the analysis of ocean wave is also more specific. This paper briefly expounds the differences between the version 3.14 and 4.18, at last, we set up a model based on v4.18, and simulated a wave process in August 2015.

Keywords

WWIII, Version 4.18, Wave Model

最新版WAVEWATCH海浪模式机理简介及 个例

陈璇¹, 郑崇伟^{2,3}, 刘晓光³, 孙威², 高凡⁴

¹解放军75822部队, 广东 广州

²解放军理工大学, 江苏 南京

³海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连

⁴解放军92853部队, 辽宁 兴城
Email: chzffx@qq.com

收稿日期: 2016年3月17日; 录用日期: 2016年4月10日; 发布日期: 2016年4月13日

摘要

作为第三代海浪模式的典型代表, WAVEWATCHIII (WWIII)应用广泛, 被诸多海洋部门用作预报模式, 其版本已于2014年更新至4.18版。新的版本中添加了诸多过程, 且安装方案更为细致, 对于海洋波浪要素的分析也更为具体。本文简要阐述了WWIII v4.18和v3.14的不同点, 同时以建立v4.18的版本模型, 计算2015年8月份的一次海浪过程。

关键词

WWIII, 4.18版本, 海浪模式

1. 引言

我国滨临太平洋, 有逾 300 万平方公里的海上疆域和 1.8 万余公里的海岸线, 所属海区地处中低纬度带, 该区域台风活动频繁, 台风巨浪对东南沿岸的经济、军事等领域影响甚巨。对于海浪的研究和模拟, 多以经验统计或动力等方案为主, 随着计算机的出现, 数值模拟成了解决这一问题的有力手段。WAM模式的诞生标志着第三代海浪模式的出现, 此后, 海浪的模拟和研究多以第三代海浪模式为主要参考。

随着计算方案和物理过程的不断更新, 以 WAM、WW-III 和 SWAN 为代表的第三代海浪模式也不断发展, 作为较为成熟的海浪计算和预报手段, WW-III 应用广泛[1]-[5]。其稳定性及预报能力已经获得了广泛的认可, 并广泛的应用于大浪生成传播[5]-[7]、波浪能资源评估[8]等方面。WW-III 的优越的性能能为我国的“21 世纪海上丝绸之路”战略的推进、拓展海上活动范围和提升远海保障能力提供支撑和参考[9]。

2. WW-III 控制方程

作为第三代海浪模式的代表, WW-III 从波作用量出发, 模式综合考虑了地形、海流、海气温差、波浪浅水形变等多种要素, 其基本方程[10]如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k} \cdot \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma} \\ \dot{x} = \mathbf{c}_g + \mathbf{U} \\ \dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \\ \dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中 N 为波作用的密度谱, S 为输入源函数, t 表示时间, ∇_x 为水平拉普拉斯算子, k 为波数, θ 为波向, σ 为圆频率, \mathbf{c}_g 为波包群速, \mathbf{U} 为环境流速, d 为水深, s 与波向同向, m 与 s 垂直, 方程与 v3.14 版本的基本不变, 式中正体为矢量, 算子“ \cdot ”表示 $\frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{c}_g + \mathbf{U}) \cdot \nabla_x$ 。较为不同的是方程(1)中第四式与

v3.14 版本在等式右端中括号内符号相反，在 3.14 [11]中，该项等式为：

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - k \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (2)$$

该处的推导过程如下：

$$\begin{cases} \omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U} \\ \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + \nabla_x \omega = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对流场考虑不可压近似，同时将考虑 $\sigma = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)$ 以及 $\frac{\partial k_{x_1}}{\partial x_2} = \frac{\partial k_{x_2}}{\partial x_1}$ 关系式：

$$\nabla_x \omega = \nabla_x \sigma + \nabla_x (\mathbf{k} \cdot \mathbf{U}) \quad (4)$$

展开可得：

$$\nabla_x \omega = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \cdot \nabla_x d + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{k}} \cdot \nabla_x \right) \mathbf{k} + (\mathbf{k} \cdot \nabla_x) \mathbf{U} + (\mathbf{U} \cdot \nabla_x) \mathbf{k} + (\mathbf{k} \times \nabla_x) \times \mathbf{U} + (\mathbf{U} \times \nabla_x) \times \mathbf{k} \quad (5)$$

式(5)可以化为：

$$\nabla_x \omega = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \cdot \nabla_x d + (\mathbf{c}_w \cdot \nabla_x) \mathbf{k} + (\mathbf{k} \cdot \nabla_x) \mathbf{U} + (\mathbf{k} \times \nabla_x) \times \mathbf{U} + (\mathbf{U} \times \nabla_x) \times \mathbf{k} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{c}_w = \mathbf{c}_g + \mathbf{U}$ ，同时考虑 $\mathbf{k} = k \cdot \mathbf{s}$ ， $\mathbf{s} = (\cos(\theta), \sin(\theta))$ ， θ 为波数的方向角， $\mathbf{m} = (-\sin(\theta), \cos(\theta))$ ：

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} = \frac{\partial k}{\partial t} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{m} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(3)第二式：

$$\frac{\partial k}{\partial t} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{m} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial d} \cdot \nabla_x d + (\mathbf{c}_w \cdot \nabla_x) \mathbf{k} + (\mathbf{k} \cdot \nabla_x) \mathbf{U} + (\mathbf{k} \times \nabla_x) \times \mathbf{U} + (\mathbf{U} \times \nabla_x) \times \mathbf{k} \quad (8)$$

此时，等式两边同时乘以 \mathbf{s} 或者 \mathbf{m} ，即可得到式(1)的第三、四式。

此外，在 v3.14 中，源函数的输入项为：

$$S = S_{in} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{xx} \quad (9)$$

在 v4.18 当中，相较于(9)，源函数的输入项为：

$$S = S_{in} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{xx} \quad (10)$$

式(10)相较于式(9)多出了 S_{ice} 与 S_{ref} 两项，两项分别涉及海冰和近岸及冰山对海浪的作用。

此外，相较于 3.14 版本，v4.18 许多过程都有了改进，这些改进使得海浪的分析更为具体，海底和海气及表层对海浪的影响也更为直观，同时，尤为值得注意的是，v4.18 版本增加了潮汐分析的过程，这将有利于风暴潮的研究。

3. V4.18 版本特点

相较于 3.14 [11]等早期版本，v4.18 [10]不仅提供了传统的安装方式，还提供了更为流行的 svn 安装手段[12]，相较于 v3.14，新版 WWIII 在安装上显得更为人性化，同时也有利于使用者对版本进行更新。

3.1. 数据接口

在 3.14 版本中，外强迫场输入一般采用十进制文件的形式，同时在 inp 文件中配置网格、时间步长

等信息，inp 文件中还含有对外强迫场的输入文件的描述信息；此外，文件的输入和配置一般是比较让人头疼的，而在新版本当中，对于输入的强迫场数据形式增加 netcdf 的选项，同时在 WWIII 编译的过程当中提供了 NetCDF 的编译选项，下面，我们将介绍这一新增的数据输入方案。

WWIII 所支持的 NetCDF 版本包括 NetCDF version 3.x 及 4.x 两个系列，在模式当中分别被简写成 NC3 和 NC4，在编译前，使用者所要做的是设置一个描述型的环境变量 WWATCH3_NETCDF，其值为 WWATCH3_NETCDF=NC3 或者 NC4。当选取 NC3 时，在环境变量当中需要包含 NETCDF_LIBDIR 和 NETCDF_INCDIR 这两个变量，两个变量的值分别对应 NetCDF-3 的 libraries 和 include 的位置；当选取 NC4 时，NETCDF_CONFIG 为所需设置的环境变量，该信息对应 NetCDF-4 的“nc-config utility program”路径信息。

在此基础之上，模式编译完成后的数据接口便是基于 NetCDF 数据格式的。相较于 3.14 版而言，v4.18 增加了 NetCDF 数据输出的选项，这一功能为数据发布和共享以及耦合接口等的编辑提供了一个较为便捷的处理方式。

WWIII 提供 NetCDF 接口功能的位置包括 ww3_bound 边界处理程序，其 inp 文件名称为 ww3_bound.inp，在 inp 文件当中边界文件可以写为 SPECTRA_NC/ww3.62163_spec.nc，这一处理过程在 v4.18 当中可以独立处理。

改动较大的是强迫场的输入，在 v3.14 当中，输入文件处理程序为 ww3_prep，这一处理程序在 v4.18 被保留下来，同时，增加了含有相同功能的 ww3_prnc 处理程序。其 inp 文件对于变量的描述也较为简洁，例如：文件当中需要描述维度名称信息，如 longitude 和 latitude，对于所需变量也需进行描述；当所需的是文件当中的风矢量时，只需给出对应 NetCDF 当中的名称，如 U 及 V；最后只需给出文件的名称，如“wind.nc”即可。

对于输出文件的处理，v4.18 增加了与 ww3_outf 功能相似的输出为 NetCDF 格式的 ww3_ounf 处理程序，及 ww3_ounp 处理程序。程序及数据流程见图 1。

V4.18 在模式输出的变量种类上也较 v3.14 丰富，v3.14 的输出变量包含：波高、平均波长(周期/波向)等海浪信息，而 v4.18 的输出则包含有上述信息，同时还对涌浪、平均波周期进行了更为细致的划分，此外还包含能流、风能输入、白冠破碎、波浪辐射应力、斯托克斯输运等信息，这些信息对于海浪分析和工程应用有着重要的意义。

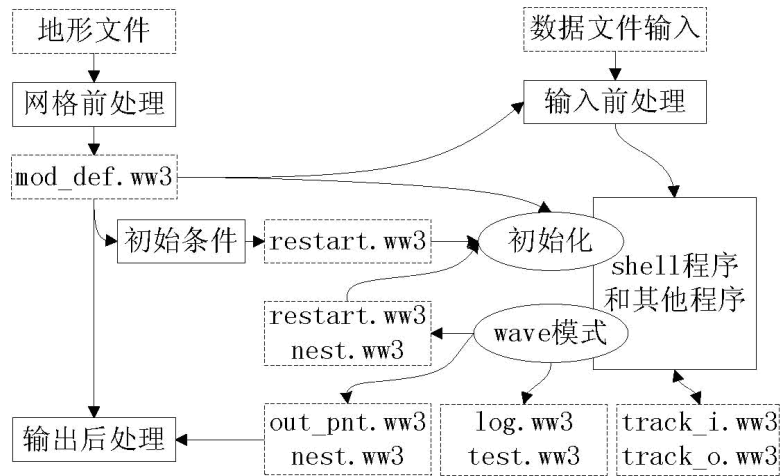


Figure 1. Basic program elements and data flow
图 1. 基本过程及数据流

3.2. Switch

在早期版本中, 网络的设置采用编译和 `ww3_grid.inp` 相结合的方式, 当在 `switch` 当中选择 `LLG` 时, 则采用经纬度网格坐标; 而在 v4.18 中, 这一处理过程被从 `switch` 当中移出, 改在 `ww3_grid.inp` 进行设置, 设置选项包括 `RECT`(正交)和 `CURV`(曲线)两种网格, 其中还存在经纬网格和笛卡尔网格的调整, 此外, 还在设置当中加入了闭合条件。

同时, 新版 `WWIII` 提供了多种方案, 在传播方案中增加了二阶和三阶方案; 在通量计算中增加了新的拖曳系数计算方案, 其计算公式如式(11):

$$C_d \times 10^4 = 8.058 + 0.967U_{10} - 0.016U_{10}^2 \quad (11)$$

对于输入和耗散项的处理, v4.18 提供了 `ST4` (Ardhuin *et al.* (2010) source term package)和 `ST6` (BYDRZ source term package)两种方案, 对于非线性相互作用的过程则提供了广义多步 `DIA` 算法, 选项对应于 `NL3`。底摩擦项则增加了 `SHOWEX bottom friction formulation` 等处理方案, 较原来的处理过程更为丰富。

模式还新增了海冰对海浪的影响, 在 `switch` 当中增加了海冰过程选项, 及折射选项, 这些选项的加入使得 `WWIII` 对于近岸的海浪折射现象和海冰对海浪影响等物理过程的描述更为细致。新增的 `switch` 选项还包括 `TIDE`(潮汐)的相关选项。

4. v4.18 模拟个例

4.1. 模拟区域、风场数据及个例简介

在此, 我们利用 4.18 版本建立经纬度范围为(100°E~140°E, 0°~40°N)的中国近海区域, 网格采用正交经纬度网格, 模拟区域地形数据采用 `Etopo5` 地形, 地形如图 2 所示。模拟区域包含渤海、黄海、东海、南海及西太平洋海区部分海区, 模拟区域内 `ETOPO5` 识别最大水深为 9383 m, 平均水深为 2695 m 左右。模拟区域模式空间分辨率为 0.25°, 可以较好的反映模拟区域的地形特点。

模式所采用的风场为欧洲中心高分辨率风场, 其空间分辨率为 0.25°, 时间分辨率为 6 小时, 所选取时间段为 2015 年 8 月 14 日 08 时至 26 日 02 时(北京时), 该时段为台风“天鹅”的活动期, 时间步长分别设为 900 s、950 s、900 s、300 s。其余设置采用基本设置。

台风“天鹅”: 台风“天鹅”为 2015 年第 15 号台风, 8 月 12 日于西太平洋低纬海区生成的热带扰动, 于 14 日发展成热带低压, 15 日 17 时在马里亚纳群岛附近加强为热带风暴, 并被命名为“天鹅”。台风“天鹅”经历了三次增强和三次减弱, 三次增强的时间分别为 17 日、19 日、23 日, 且三次均达到超强台风级。台风路径也较为异常: 21 日移向右偏近 90°, 台风后期, 在高纬区域路径发生较为少见的西折现象。本次台风过程, 沿海区域降水较为显著, 例如: 台风“天鹅”影响期间, 上海嘉定曾录得日降水量 170.1 mm, 小时雨强则达 58.2 mm, 其大风对于近岸风浪影响较为显著, 是近年来较为少见的台风。

4.2. 模拟效果检验分析

本文的对比数据采用多卫星融合资料的有效波高数据, 数据来源于 `AVISO` (Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)的有效波高资料, 该资料利用 `Loess` 滤波方案和空间平滑外插得到 1° × 1° 的全球海浪每日一次的有效波高数据, 资料下载地址:

<http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/wind-waves-products/mswhmwind/index.html>。周水华等利用该资料分析对比浮标站资料发现, 该资料精度与浮标站资料相当[13]。

由于 AVISO 资料空间分辨率较低, 有些区域资料缺失, 在此, 我们将 21 日至 23 日有效波高分布绘制如图 3 (图中黑色实线为 4 m 波高线):

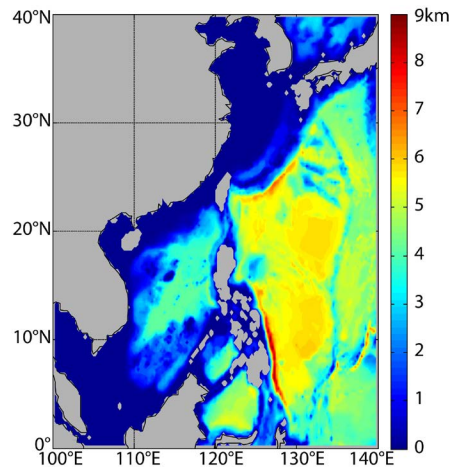


Figure 2. Topography of the simulation region

图 2. 模拟区域地形

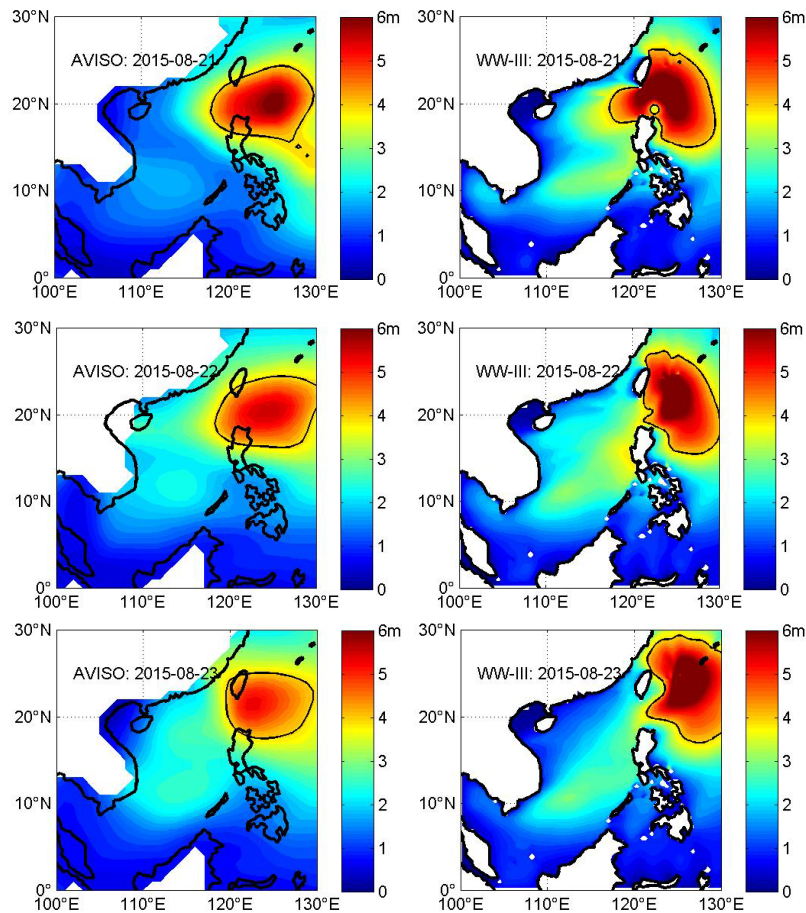


Figure 3. Significant wave height between AVISO and WW-III simulation (left: AVISO, right: WW-III)

图 3. 实况有效波高与模拟有效波高对比(左侧为实况, 右侧为模拟)

在这里,我们将模式输出的数据采用逐日平均与 AVISO 数据进行比对,从图 3 可以看到,本次模拟基本还原了模拟区域的台风浪过程。由于 AVISO 数据来自多星融合,且时空分辨率存在优化,所以该数据所反映的实况可以反映当天海浪的分布状态,由于卫星轨道及分辨率等问题,AVISO 数据无法完整还原海浪过程,这点我们从图 3 当中的陆点数据可以看出。在 20 日 08 时,台风抵近巴士海峡,南海西南部地区受西南季风影响,有明显大浪区生成;此后,受西南季风和台风抽吸作用,南海南部风浪逐渐加大和台风涌的传入,南海海区海浪逐渐增大;至 23 日 08 时,南海西北部海区海浪逐渐减小,南海海区海浪回落,东南部受季风影响依然维持一个较强的海浪场。

5. 结论

相较于 WWIII v3.14, v4.18 考虑了更为详尽的物理过程,在模式控制方程上,修改了存在于手册上的一个错误,同时,简化了初始网格生成的编译和设置问题,将曲线网格引入模式当中。在数据接口和输出上,采用了气象海洋上较为常用的 NetCDF 格式,并支持多种格式输出。在处理涉及海浪的物理过程上,增加了海冰过程和反射作用等涉及高纬海区和近岸的物理过程,考虑更为详尽,输出的参数更为详细。在未来的研究中,可将先进海浪模式应用于“21 世纪海上丝路”建设[14]-[18]、南海岛礁建设[19]-[21]等,为迈向深蓝、人类的共同繁荣进步作贡献。

参考文献 (References)

- [1] 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(自然科学版), 2014, 40(3): 314-320.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 梅婵娟,赵栋梁,史剑. 两种海浪模式对中国黄海海域浪高模拟能力的比较[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 92-98.
- [5] 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.
- [6] 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, 2012, 31(3): 36-40.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 郑崇伟,潘静,孙威,等. 经略 21 世纪海上丝路之海洋环境特征系列研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(7): 4-9.
- [10] Tolman, H.L. (2016) The WAVEWATCHIII Development Group. User Manual and System Documentation of WAVEWATCHIII Version 4.18. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf>
- [11] Tolman, H.L. (2016) The WAVEWATCHIII Development Group. User Manual and System Documentation of WAVEWATCHIII Version 3.14. http://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn276/MMAB_276.pdf
- [12] Tolman, H.L. (2016) The WAVEWATCH III Development Group. WAVEWATCHIII Development Best Practices. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf>.
- [13] 周水华,俞胜宾,冯伟忠,等. 基于多卫星融合资料的南海浪高时空分布特征研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(10): 71-77.
- [14] 郑崇伟,高占胜,张雨,等. 经略 21 世纪海上丝路之海洋环境特征: 极值风速、极值波高[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(11): 4-8.
- [15] 郑崇伟,孙威,黎鑫,等. 经略 21 世纪海上丝路: 重要航线、节点及港口特征[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(1): 4-13.
- [16] 郑崇伟,黎鑫,陈璇,等. 经略 21 世纪海上丝路: 地理概况、气候特征[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(2): 3-10.
- [17] 郑崇伟,黎鑫,陈璇,等. 经略 21 世纪海上丝路: 海洋资源、相关国家的海洋开发状况[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(3): 3-8.

- [18] 郑崇伟, 李崇银, 杨艳, 等. 瓜达尔港的风能开发可行性论证[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(2): 131-136.
- [19] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 重点岛礁的风候、波候特征分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(9): 1-6.
- [20] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 风力发电、海浪发电[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(9): 7-14.
- [21] 郑崇伟, 陈璇, 李崇银. 朝鲜半岛周边海域波候观测分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(9): 21-27.