

钦州湾台风浪的多年一遇极值推算

江丽芳^{1,2,3}, 尹毅¹, 齐义泉¹, 张志旭¹

1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 国家海洋局南海分局预报中心, 广东 广州 510301

摘要: 利用 WAVEWATCH (WW3) 和 SWAN 海浪模式模拟了 1949—2005 年间对钦州湾海域影响较大的台风浪。以模拟结果为基础, 利用皮尔逊 (P-) 频率适线法推算了钦州湾湾外深水的累积频率波高和平均波周期(T_m)的多年一遇极值, 同时模拟了其间的百年一遇高潮水位条件下的台风浪, 以及在百年一遇高潮水位、百年一遇风暴潮增水共同作用下对钦州湾影响较大的台风产生的波浪场。使用 P- 法推算了在极端天气下, 钦州湾湾内统计点的累积波高和平均波周期的多年一遇极值。研究表明, 由于湾内浅滩较多, 波浪在传播过程中水体底部摩擦使能量耗损明显, 所以湾内波高较小, 湾口处的波高大于内湾处的波高。近岸海区的波浪耗散、破碎等物理过程比较强烈, 因此近岸统计点 C_1 处的波高极值最小, 其最大波高向岸边快速减弱并沿东向传播。在极端天气情况下, 波浪在传播过程中发生破碎, 波高衰减显著。

关键词: 钦州湾; 海浪模式; 皮尔逊 (P-) 频率适线法; 多年一遇

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2012)04-0008-09

The extreme wave parameters in the Qinzhou Bay during typhoon passages

JIANG Li-fang^{1,2,3}, YIN Yi¹, QI Yi-quan¹, ZHANG Zhi-xu¹

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. South China Sea Marine Prediction Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China

Abstract: This study uses the WAVEWATCH- (WW3) and SWAN to simulate typhoon waves, which have greater influence on the Qinzhou Bay. The simulations are for the period during 1949–2005. Based on the simulation, the authors use the Pearson (P-) method to calculate the extreme wave parameters for return periods in deep water outside the Qinzhou Bay. They also simulate the typhoon waves that have greater influence on the Qinzhou Bay under the condition of high tide with return period of 100 years and under the condition of high tide with return period of 100 years plus storm surge with return period of 100 years in the Qinzhou Bay. The P- is again used to calculate the extreme wave parameters for the return periods of the statistical points in the inner Qinzhou Bay in these simulations. The result shows that because of many shallow basins in the Qinzhou Bay, the wave energy is lost significantly due to the bottom friction during the wave propagation, the wave height in the bay mouth is bigger than that in the inner Bay. The physical processes including the wave dissipation and wave transformation are more intense in the inner Qinzhou Bay. The statistical point C_1 is near the shore, so its wave parameter is the smallest. The maximum wave height rapidly weakens shoreward and spreads along the eastern shoreline. Under the condition of extreme weather, the ocean wave is breaking and the wave height is damped significantly during the wave propagation process.

Key words: Qinzhou Bay; wave model; P- method; extreme for return period

收稿日期: 2010-12-27; 修订日期: 2011-03-07. 孙淑杰编辑

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB013701); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2008AA09A404-3)

作者简介: 江丽芳(1983—), 女, 福建省龙岩市人, 在读博士研究生, 目前从事海浪和台风数值模拟。E-mail: lifangjiang@scsio.ac.cn

广西钦州湾位于北部湾顶部, 由内湾(茅尾海)和外湾(钦州湾)构成, 中间狭窄, 两端宽阔, 东、西、北三面为陆地所环绕, 南面与北部湾相通, 是一个半封闭天然海湾。钦州湾是我国西南部主要的入海通道, 现有 3 万吨级航道。钦州湾的通航条件、泥沙淤积预报、建筑物防浪强度和泊稳条件等分析均需要考虑波浪因素的影响。由于钦州湾的波浪观测资料较少, 仅以观测资料不足以推算其波浪要素的极值特征, 利用海洋数值模拟来获取海浪参数的空间和时间分布则可弥补实测海浪数据不足的缺陷。刘月红^[1]利用三娘湾海洋站的风浪资料推算出外海波浪要素, 应用抛物型缓坡方程和 Boussinesq 方程对钦州湾港内的波浪场进行了模拟, 推算了 50 年一遇的波浪要素极值。然而缓坡方程并不适用于小尺度较急剧变化地形, 也不易反映底坡反射作用; Boussinesq 方程从浅水波导出, 不适用于推算大范围、长距传播的波浪场^[2]。因为近岸波浪受地形影响较大, 但是已有的研究中没有使用精确的地形^[1], 且其选用的模型也存在一些缺陷, 所以其研究中模式的选择和地形因素在一定程度上会影响模拟结果的准确性。已有的研究主要集中于对钦州湾常年的波浪条件分析, 尚未涉及到台风条件下的波浪场研究, 特别是在考虑天文潮增水和风暴潮增水情况下的波浪场研究。根据 1985—2005 年间钦州湾湾内龙门站的逐时预报潮位统计, 钦州湾的多年平均潮位为 0.56m, 最高天文潮位和最低天文潮位分别为 3.52m 和 -1.92m(国家 85 高程潮高基面为 1.99m)。钦州湾一带的风暴潮增减水量值一般在 0.8—1.00m 左右, 在强台风影响下风暴潮增减水可达到 1.50m 左右, 历史上最大的一次风暴潮增水超过 2m^[3]。若台风登陆时, 正遇天文大潮、风暴潮增水和台风浪“三碰头”现象, 钦州湾将遭受严重破坏。对钦州湾的台风浪及极端天气下的台风浪的研究, 可以进一步推进对钦州湾波浪因素的研究, 为环钦州湾沿岸工程的设计提供较为合理的波浪设计参数。因此本文利用 WAVEWATCH (WW3)和 SWAN 模式模拟了 1949—2005 年间对钦州湾海域影响较大的台风浪; 以模拟结果为基础, 使用皮尔逊 (P-) 频率适线法推算了钦州湾湾外深水区累积频率波高和平均波周期(T_m)的多年一遇极值; 同时模拟了其间在百年一遇高潮水位条件下的台风浪, 以及在百年一遇高潮水位、百年一遇风暴潮增水共同作用下对钦州湾影响较大的台风所产生的波浪场。本文还基于 P- 法推算了极端天气下钦州湾湾内统计点的累

积波高和平均波周期的多年一遇极值。

1 模式及数据介绍

1.1 模式介绍

WAVEWATCH (WW3)^[4-5]和 SWAN 模式为当今国际上第三代海浪模式的代表, 它们具有稳定性好、计算精度高等特点。目前它们已经成功运用于全球尺度和区域尺度的海浪业务预报上^[4-9]。本文中所运用的 WW3 海浪模式是美国 NOAA/NCEP 环境模拟中心海洋模拟小组近年在 Delft 技术大学和美国航天航空局 Goddard 空间飞行中心分别开发的 WAVEWATCH^[10-11]和 WAVEWATCH^[12]的基础上新开发的一个全谱空间的第三代海浪模型。SWAN 是荷兰 Delft 科技大学专门为浅海、湖泊以及河口海浪模拟而开发的第三代海浪数值计算模型^[13-14]。WW3 和 SWAN 两个海浪模型均在考虑非线性物理过程的情况下, 求解了方向谱的谱行为密度平衡方程。WW3 模式在运用 JONSWAP 谱的条件下, 主要考虑了风能输入、非线性波波相互作用、底摩擦作用、白冠耗散。SWAN 模式除了考虑 WW3 模式包含的物理过程外, 还更完善地考虑了深度诱导破碎引起的能量耗散及三波相互作用。理论上讲, SWAN 模式更适用于浅海海域的应用。

对某特定海区的海浪场进行模拟之前, 通常需要根据该海区的空间范围、地形特征和所需要的分辨率来确定采用何种模式。对于用于航海、渔业等天气尺度的大范围低分辨率的海浪场的模拟, 均可采用 WAM 或 WW3 模式^[15]; 但是对于岛屿、河口、航道和海岸工程等小范围近岸海域的高分辨率海浪的模拟则需要使用 SWAN 模式。由于海浪场传播的空间尺度很大, 例如台风产生的涌浪可以传播数百公里^[16], 因此模拟特定海区的高分辨率海浪场, 需考虑大范围海区波浪场的传播和影响, 这样就会出现计算区域与计算效益的矛盾, 通常的解决办法就是使用模式嵌套。由于 WW3 和 WAM 模式在近岸高分辨率条件下模拟精度较低, 而 SWAN 模拟大范围海区海浪场则比较耗时, 因此采用 WW3 或 WAM 嵌套 SWAN 模式联合运行是较为合理的方案^[17]。

1.2 模式设定

为了最大限度地提高研究海域的海浪模拟精度和效率, 我们采取三重嵌套方案去研究钦州湾湾外深水处和湾内的波浪条件, 模式区域设置及嵌套的具体方案如下。

1) 为充分考虑南海的台风产生的巨大涌浪场的

传播和影响,我们将整个北部湾作为大的计算区域,区域范围为 $105^{\circ}30'—112^{\circ}\text{E}$ 、 $15^{\circ}—23^{\circ}\text{N}$ (图 1a),模式空间分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 。

2) 为考虑外围海区的海浪从深水区传入浅水区时由变浅效应引起的波浪场变化,且为验证嵌套模式的准确性和计算钦州湾湾外深水处的极值波高,将涠洲岛以北的海域当作第二计算区域,为钦州湾更小网格的计算区域提供精确的嵌套边界条件。第二模拟区域的范围为 $106^{\circ}30'—110^{\circ}\text{E}$ 、 $20^{\circ}48'—22^{\circ}\text{N}$ (图 1b),空间分辨率为 1000m 。

3) 钦州湾作为模式嵌套的最终目标,区域范围设置为 $108^{\circ}24'—108^{\circ}48'\text{E}$ 、 $21^{\circ}30'—21^{\circ}48'\text{N}$ (图

1c),空间分辨率是 100m 。

WW3 和 SWAN 模式的波数空间的分割数均取 25,频率 $0.041—0.412\text{Hz}$,波向方向采用 15° 的分辨率。嵌套海域采用国家 85 高程地形数据,WW3 模式采用全球陆地海洋 $5'$ 高程数据和国家 85 高程地形数据的融合数据作为模式的地形数据。利用 WW3 输出第二计算区域边界上的能量谱,将该能量谱作为 SWAN 模式计算的边界条件。第二计算区域中,SWAN 模式输出第三区域边界上的能量谱作为第三计算区域的边界条件。本文利用该嵌套方案模拟了 1949—2005 年之间对研究海域影响较大的台风浪过程,模式的输出变量包括有效波高和平均波周期等。

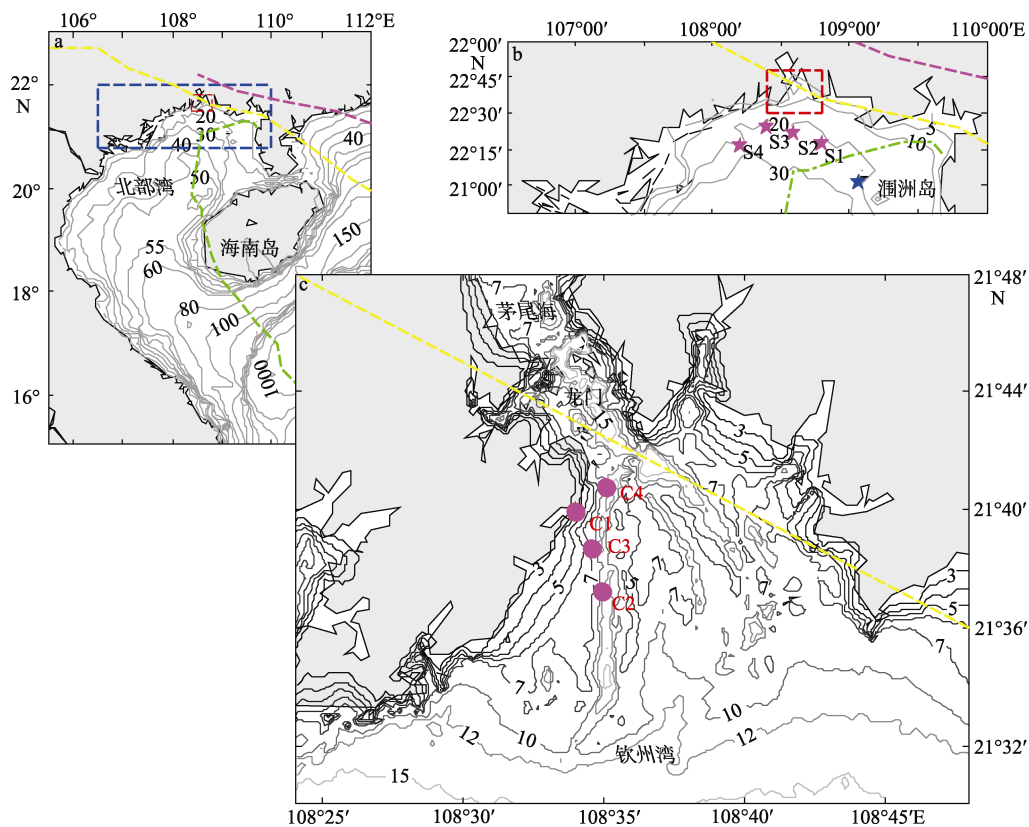


图 1 模式计算区域的地形和台风路径

a. 南海北部湾的地形图,蓝框代表第二计算区域,红框代表第三计算区域; b. 第二计算区域的地形图,其中蓝色五角星代表涠洲岛海洋站所在位置,粉红色五角星(S1—S4)代表钦州湾湾外深水处统计点位置; c. 第三计算区域的地形图,其中粉红色圆点(C1—C4)代表钦州湾湾内统计点位置。其中绿色点虚线代表台风“米克拉”的路径,黄色点虚线代表台风“玉兔”的路径,粉红色点虚线代表台风“榴莲”的路径

Fig. 1 Topography of the model domain and the path of typhoon. a) Topography of the Beibu Gulf, with the blue frame showing the second model domain and the red frame presenting the third model domain. The green, yellow, and magenta dotted-dash lines present the passages of Typhoon Mekkhala, Typhoon Yutu, and Typhoon Durian, respectively. b) Topography of the second model domain, with the blue star for the location of the Marine Station in the Weizhou Island and the magenta stars (S1—S4) for the locations of the deep water outside the Qinzhou Bay. c) Topography of the third model domain, with the magenta dot (C1—C4) for the location of the point in the Qinzhou Bay

1.3 数据介绍

1.3.1 风场数据

本文采用美国环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合推出的再分析资料的风场

数据驱动海浪模式。该风场数据为高斯网格分布,经向 192 个网格,纬向 94 个网格,时间分辨率为 $6\text{h}^{[18]}$ 。由于台风中心风速和风向的快速变化,NCEP/NCAR 再分析风场严重低估了台风中心附近

的最大风速^[19]。利用 NCEP/NCAR 数据作为海浪模式的输入风场模拟台风期间海浪的变化特征具有一定的局限性。为此, 本文基于中国台风年鉴 (<http://www.typhoon.gov.cn>) 提供的台风参数, 以 NCEP/NCAR 再分析资料的风场数据为背景风场, 使用 Holland 经验台风模型^[20]重新构造台风, 并利用三次样条插值方法对重构风场进行时空插值, 使之与 WW3 和 SWAN 模式的时间及空间分辨率相匹配。

1.3.2 实测数据

本文主要是推算台风期间, 钦州湾湾外深水处和钦州湾湾内的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值。由于未收集到钦州湾的波浪观测资料, 因此我们利用钦州湾外的涠洲岛海洋站(21°0'36"N, 109°4'12"E)的波浪参数资料去验证嵌套模式的可行性。该站资料包括 2001 年台风 Durian(榴莲)、2001 年台风 Yutu(玉兔)和 2002 年台风 Mekkhala(米克拉)活动期间的最大波高和平均波周期。

1.4 统计方法介绍

就目前而言, 国内外在极端海洋水文气象参数的分析中, 公认较为出色的是皮尔逊 (P-) 分布模型^[21], 该模型在多种海洋水文气象灾害预测中得到应用^[22]。我国的《海港水文规范》^[23]也规定: 对于年极值波高与其对应周期的理论频率曲线, 一般采用 P- 曲线。因此本文将采用 P- 法推算多年一遇极值。P- 概率密度分布曲线通用式可表示为^[21]:

$$dy/dx = (x+d)y/(b_0 + b_1x + b_2x^2) \quad (1)$$

式中 d 为偏差半径; b_0 、 b_1 、 b_2 等为待定参数, 可以用资料中的各阶矩来代替。模式输出提供有效波高值, 根据港口工程波浪计算的规范, 累积波高可由下式进行换算^[23]:

$$H_F = \bar{H} \left[\frac{-4}{\pi} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} H^* \right) \ln F \right]^{\frac{1-H^*}{2}} \quad (2)$$

式中 H_F 为累积率为 F 的波高, \bar{H} 为平均波高, H^* 为考虑水深因子的系数, 其值为 \bar{H}/d , F 为累积率。

2 模式验证

由于本文是基于嵌套模式的结果推算钦州湾湾外深水处及钦州湾湾内的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值, 所以应先验证嵌套模式的准确性。为此我们收集到涠洲岛海洋站在 2001 年台风“榴莲”、台风“玉兔”和 2002 年台风“米克拉”期间的波浪要素资料。该站提供的波浪要素是最大

波高, 而嵌套模式输出结果为有效波高, 所以根据有效波高和最大波高之间的关系^[23], 通过有效波高计算出其最大波高。

图 2a—c 分别为 2001 年台风“榴莲”、“玉兔”和 2002 年台风“米克拉”期间观测的最大波高以及 WW3 嵌套 SWAN 的模拟结果的对比图。从图 2 可以看出, 在台风“榴莲”期间, 2001 年 7 月 2 日以后, 模拟结果转换的最大波高的整体变化趋势和观测结果大体一致, 模式模拟的最大波高的最大值为 2.61m, 而观测的最大波高的最大值为 2.70m, 模拟结果转换的最大波高的最大值出现时刻滞后于观测的最大波高的最大值出现时刻约 6h; 在台风“玉兔”期间, 从 7 月 23 日至 7 月 31 日, 模拟结果转换的最大波高的变化趋势也和观测的变化趋势大体一致, 模拟结果转换的最大波高的最大值为 2.59m, 观测最大波高的最大值为 2.60m, 然而这次台风过程中, 观测的最大波高的最大值出现时刻滞后于模拟的最大波高的最大值出现时刻约 6h; 在台风“米克拉”过程中, 因该台风经过涠洲岛海洋站附近的海域, 9 月 25—28 日期间, 模拟结果转换的最大波高的变化趋势和观测的最大波高的变化趋势吻合最好, 两者之间的平均误差仅为 0.07m, 相关系数达 0.91, 其中模式模拟结果转换的最大波高的最大值为 3.41m, 观测最大波高的最大值为 3.30m。总的来看, 模式模拟结果转换的最大波高和观测值的变化趋势相一致, 模拟效果较好。由此可见, 模拟结果与实测较为一

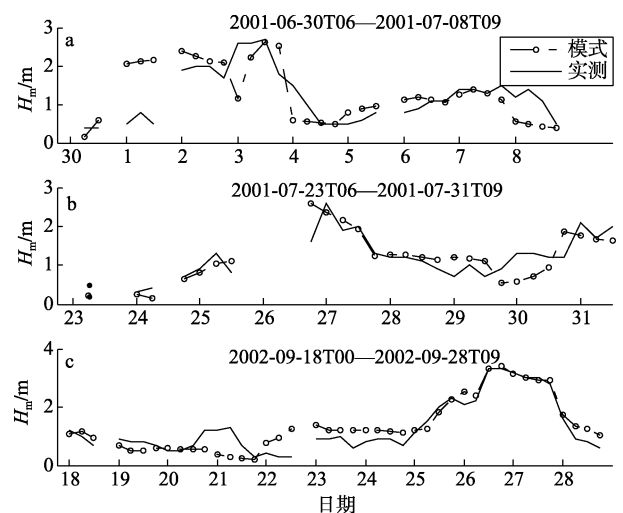


图 2 台风“榴莲”(a)、“玉兔”(b)和“米克拉”(c)期间模拟结果转换的最大波高(H_m)和观测的最大波高的对比图

Fig. 2 Comparisons between the maximum wave heights from the models and the observations during the three typhoons' passages

致, 因此利用 Holland 模型重构的台风可作为模式的输入风场, 也可采用该嵌套方案模拟研究海域的台风浪过程, 进而推算波浪参数的多年一遇极值。

3 台风浪的多年一遇极值推算

波浪条件包括波浪的重现期和波列的累积频率这两个方面^[24]。对钦州湾台风浪的波浪条件的研究, 可以进一步推进对钦州湾的波浪因素的研究。合理提供准确可靠的波浪条件, 既可避免钦州湾沿岸的海洋工程因设计标准过低而使海洋工程遭到摧毁和破坏的危险, 又可避免设计标准过高而增大工程造价、影响经济效益的不合理情况, 也为钦州湾的通航条件、泥沙淤积预报、建筑物防浪和泊稳条件等分析提供一定的参考。各种传统经验性的海浪极值推算都建立在长期、连续的观测资料基础上^[25-28], 然而就我国目前的情况来讲很难做到这一点, 长期、连续的观测资料的缺失限制了各海域的波浪条

件的研究。因此本文利用第三代海浪预报模式 WW3 和 SWAN 模拟了 1949—2005 年间对钦州湾影响较大的台风海浪场, 弥补了实测海浪数据不足的缺陷。

本文采用 P- 分布模型统计钦州湾湾外深水处的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值, 参考宋运法等^[29]利用 P- 分布模型计算的钦州湾湾内百年一遇高潮水位和百年一遇风暴潮增水, 在波浪模式中加入百年一遇高潮水位和百年一遇风暴潮增水, 模拟了百年一遇高潮水位下对钦州湾影响较大的台风浪及百年一遇高潮水位、百年一遇风暴潮增水和对钦州湾影响较大的台风浪同时发生时的波浪场。表 1 为钦州湾湾外深水统计点及钦州湾湾内统计点的坐标及相应水深。钦州湾湾外深水处统计点(S1—S4)是基于《海港水文规范》^[22]和已有研究^[1]来选取的; 湾内统计点是基于研究不同水深和离湾口不同位置的波浪要素的多年一遇极值情况来选取的。

表 1 钦州湾湾外深水处统计点及钦州湾湾内统计点的位置

Tab. 1 Location of the deep water points outside the Qinzhou Bay and the engineering point in the Qinzhou Bay

钦州湾湾内统计点	经度	纬度	深度/m	钦州湾湾内统计点	经度	纬度	深度/m (85 高程)
S1	108°48'E	21°16'48"N	20	C1	108°33'58"E	21°39'57"E	3.1
S2	108°36'E	21°21'22"N	20	C2	108°34'55"E	21°27'16"E	7.8
S3	108°24'E	21°24'1"N	20	C3	108°34'33"E	21°38'42"E	6.3
S4	108°12'E	21°16'15"N	20	C4	108°35'4"E	21°40'47"E	8.8

3.1 钦州湾湾外深水处的累积频率波高和平均波周期多年一遇极值的推算

本文利用 WW3 嵌套 SWAN 模式的模拟结果推算了钦州湾湾外 20m 处的有效波高、平均波周期和 $H_{1\%}$ 、 $H_{4\%}$ 和 $H_{13\%}$ 8 个方向的多年一遇(5 年、10 年、25 年、50 年及 100 年)极值。研究表明, 20m 水深处的累积频率波高的高值主要分布在东向、东南向、南向和西南向。鉴于文章篇幅的限制, 本文中只讨论 4 个强浪向的 $H_{1\%}$ 、 $H_{13\%}$ 和与强浪向的累积波高相对应的平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值的统计结果(表 2)。

利用公式 2.2 计算出累积频率波高, 基于 P- 分布模型推算了波浪要素的多年一遇极值。表 2 为钦州湾湾外 20m 水深处的 4 个强浪向的 $H_{1\%}$ 、 $H_{13\%}$ 和与累积波高相对应的平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值, 其中钦州湾湾外每个统计点的东南向的累积波高和与累积波高相对应的平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值最大, 东南向次之, 西南向的累积波高和与累积波高相对应的平均波周

期的多年一遇极值最小。点 S4 和 S1 东向的各累积波高和平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值相等, 其东向的 $H_{1\%}$ 、 $H_{13\%}$ 和东向的平均波周期的百年一遇极值分别为 7.0m、5.0m 和 8.7s。虽然点 S4 东南向、南向和西南向的累积波高和与累积波高相对应的平均波周期多年一遇极值和点 S1 对应的极值相差不大, 相互之间 3 个方向的累积波高重现期极值相差 0.1—0.2m, 而平均波周期的各向重现期极值则相差 0.1s 左右。点 S2 和 S3 的东向的各累积波高和平均波周期的百年一遇极值相等。4 个统计点的有效波高多年一遇极值均相差不大, 相互之间累积频率波高重现期极值相差 0.1m 左右, 而平均波周期的各个重现期极值则相差 0.1s 左右。

总的来说, 钦州湾湾外 20m 水深处的有效波高 100 年一遇极值约为 5.1m, $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 50 年一遇极值分别约为 6.4m 和 4.5m, $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 100 年一遇极值分别约为 6.9m 和 4.9m; 平均波周期 50 年和 100 年一遇极值为 8.3s 和 8.6s。钦州湾湾外每个统计点的东向累积波高和与东向的累积波高相对应的

表 2 钦州湾湾外 20m 水深处波浪要素的多年一遇极值

Tab. 2 The extreme wave parameters for return periods of the points at 20-m depth outside the Qinzhou Bay

20m 水深 统计点	波浪要素	50 年一遇极值				100 年一遇极值			
		波向				波向			
		SW	S	SE	E	SW	S	SE	E
S1	$H_{1\%}/m$	4.9	5.7	5.8	6.4	5.7	6.2	6.3	7.0
	$H_{13\%}/m$	3.4	4.0	4.1	4.5	4.0	4.3	4.4	5.0
	T_m/s	7.5	7.8	7.9	8.3	7.8	8.1	8.2	8.7
S2	$H_{1\%}/m$	4.9	5.4	5.8	6.2	5.3	5.8	6.2	6.6
	$H_{13\%}/m$	3.4	3.8	4.1	4.3	3.7	4.1	4.3	4.7
	T_m/s	7.3	7.6	7.9	8.1	7.5	7.9	8.1	8.4
S3	$H_{1\%}/m$	4.9	5.5	6.0	6.0	5.3	6.0	6.5	6.6
	$H_{13\%}/m$	3.4	3.9	4.3	4.3	3.7	4.3	4.6	4.7
	T_m/s	7.3	7.7	8.0	8.0	7.5	8.0	8.3	8.4
S4	$H_{1\%}/m$	5.2	5.5	6.0	6.4	5.7	6.0	6.5	7.0
	$H_{13\%}/m$	3.6	3.9	4.3	4.5	4.0	4.3	4.6	5.0
	T_m/s	7.5	7.7	8.0	8.3	7.8	8.0	8.3	8.7

平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值最大，东南向次之，西南向的累积波高和与西南向的累积波高相对应的平均波周期的多年一遇极值最小。东向 $H_{1\%}$ 、 $H_{13\%}$ 的 100 年一遇极值分别为 6.8m 和 4.9m，东向平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值分别为 8.3s 和 8.7s，而东南向、南向和西南向的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 重现期极值之间的差值呈阶梯性递减。

3.2 钦州湾湾内的累积频率波高和平均波周期多年一遇极值的推算

3.2.1 百年一遇高潮水位情况下的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值的推算

因雷州半岛和海南岛的阻挡，北部湾湾顶海域与一般台风来向相背，所以直接登陆广西的台风对该区域的影响较小。对研究海区影响较大的台风主要来自于登陆海南岛和雷州半岛进入北部湾的热带气旋，而台风登陆以后再进入北部湾时强度已经大大减弱。虽然进入北部湾的台风一般较弱，但由于钦州湾位于北部湾湾顶部海域，该海域受风暴潮的影响较大^[3]。广西沿海的台风增水多介于 0.50—0.99m 之间，出现频率约为 35.1%—49.5%。从 1993 年以前的历史最大增水来看，仅铁山港和防城港就出现过大于 2m 的增水。而钦州湾一带风暴潮增减水量值一般在 0.80m 和 1.00m 左右，但在强台风影响下风暴潮增减水可达到 1.50m 左右，历史上曾有风暴潮增水超过 2m^[3]。根据 1985—2005 年钦州湾内的龙门站的逐时预报潮位统计，该近岸海域的最高天文潮位和最低天文潮位分别为 3.52m 和 -1.92m，多年平均潮位为 0.56m。天文大潮属正常的天文潮汐现象，一般情况下不会引发灾害，但是在特定环境下会构成水害。而风暴潮则可能会导致潮

水漫溢，冲毁海堤，使海水倒灌，甚至引发海啸，破坏力极大。台风登陆时，大多会引起风暴潮，而较强的风暴潮增水一般也是由台风引起的。风暴潮遇上天文大潮时，如果两者潮位叠加在一起，成灾的可能性就较大，如果最大风暴潮潮位恰与天文大潮的高潮相叠，则会发生特大潮灾。而台风浪会影响海岸工程和沿岸设施，有时海浪还会携带大量泥沙进入海港、航道，造成淤塞等灾害。若台风登陆时正遇天文大潮、风暴潮增水和台风浪“三碰头”现象，沿岸设施将可能遭受严重破坏。为了防患于未然，我们需考虑各种极端天气情况下的钦州湾海浪场的变化，既考虑百年一遇天文大潮和台风浪同时发生的情况，还考虑百年一遇的天文大潮、百年一遇的风暴潮增水和台风浪同时发生的情况，因此本文在模拟台风浪的时候，加入了百年一遇高潮水位和百年一遇风暴潮增水。本文推算了钦州湾湾内 10 个统计点在百年一遇高潮水位情况下的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值，及在百年一遇高潮水位和百年一遇风暴潮增水同时发生情况下的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值。鉴于篇幅限制，本文仅对其中 4 个统计点的结果进行分析。

表 3 给出了百年一遇高潮水位情况下统计点的 4 个强浪向的累积频率波高和与波高相对应的平均波周期的多年一遇极值。其中点 C2 的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值最大，其 $H_{1\%}$ 的百年一遇极值达 5.0m，点 C4 次之，点 C1 的重现期极值最小。4 个统计点的累积波高的多年一遇极值高值主要分布在东向、东南向、南向和西南向，其中点 C2 和 C3 东南向的累积波高的多年一遇极值最大，

东向浪的极值次之;而点 C4 和 C1 的东向浪的极值最大,东南向浪的极值次之。4 个统计点的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 相同重现期对应的极值之间相差值呈阶梯性递减,每个重现期极值中,点 C2 对应的极值比 C4 的大 0.3—0.4m 左右,点 C4 比 C3 大 0.3—0.4m 左右,点 C3 比 C1 大 0.2—0.4m 左右,点 C1 的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 50 年一遇极值分别为 4.5m 和 3.3m, $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 100 年一遇极值分别为 4.7m 和 3.5m。点 C1 的平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值分别为 6.4s 和 6.5s。4 个点的平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值在 6—6.5s 之间,而点 C1 和 C3 两者的平均波周期重现期相差不多,50 年一遇极值均为 6.0s,100 年一遇极值分别为 6.2s 和 6.1s。

表 3 统计点在百年一遇高潮水位下的累积波高和平均周期的多年一遇极值

Tab. 3 The extreme wave parameters for return periods of the points during the high tide with return period of 100 years

钦州湾湾内 统计点	波浪要素	50 年一遇极值				100 年一遇极值			
		波向				波向			
		SW	S	SE	E	SW	S	SE	E
C1	$H_{1\%}/\text{m}$	2.9	3.1	3.5	3.6	3.1	3.3	3.7	3.8
	$H_{13\%}/\text{m}$	2.1	2.2	2.5	2.6	2.2	2.4	2.7	2.8
	T_m/s	5.3	5.3	5.7	5.7	5.3	5.5	5.8	5.9
C2	$H_{1\%}/\text{m}$	3.7	3.9	4.6	4.5	3.9	4.6	4.9	4.8
	$H_{13\%}/\text{m}$	2.6	2.8	3.3	3.2	2.8	2.9	3.6	3.5
	T_m/s	5.7	5.8	6.3	6.2	5.8	5.9	6.5	6.5
C3	$H_{1\%}/\text{m}$	3.3	3.4	4.0	3.7	3.4	3.6	4.2	4.1
	$H_{13\%}/\text{m}$	2.3	2.4	2.8	2.7	2.4	2.6	3.0	2.9
	T_m/s	5.4	5.5	5.9	5.7	5.5	5.7	6.1	6.0
C4	$H_{1\%}/\text{m}$	3.4	3.7	4.1	4.1	3.7	3.8	4.4	4.5
	$H_{13\%}/\text{m}$	2.4	2.6	3.0	3.0	2.6	2.7	3.1	3.2
	T_m/s	5.5	5.7	6.0	6.0	5.7	5.7	6.1	6.2

3.2.2 百年一遇高潮和百年一遇风暴潮增水和台风浪同时发生下的波浪要素多年一遇极值的推算

为认识更极端的情况,我们计算了百年一遇的天文大潮、百年一遇的风暴潮增水和台风浪同时发生情况下的钦州湾波浪场。因此我们在模拟台风浪时,加入了百年一遇高潮水位和百年一遇风暴潮增水。基于模拟结果,利用 P- 法推算了钦州湾湾内 10 个统计点的 8 个方向的累积波高和与累积波高相对应的平均波周期的多年一遇极值。限于文章篇幅,本文给出其中 4 个统计点的结果进行分析。

表 4 给出了百年一遇高潮水位叠加百年一遇风暴潮增水情况下钦州湾湾内统计点的 4 个强浪向的累积频率波高和与累积波高对应的平均波周期的多年一遇极值。研究结果表明,在 4 个统计点中,点 C2 的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值

总的来说,点 C2 的波浪要素的重现期极值大于其他 3 个点,主要是因为点 C2 的位置相对其他 3 个点处于更开阔的海域,水深也较深;虽然点 C4 水深大于 C2,但是点 C4 较 C2 靠近钦州湾内湾;点 C1 靠近岸边,水深最浅,仅 3.1m,该点的波浪要素的重现期极值最小;点 C2 和 C3 东南向的累积波高的多年一遇极值最大,东向浪的极值次之;而 C4 和 C1 的东向浪的极值最大,东南向浪的极值次之。由于湾内地形浅滩较多,波浪在传播过程中水体底部摩擦将使能量耗损明显,且近岸海区的波浪耗散、破碎等物理过程比较强烈,所以湾口的波高极值最大,而湾内近岸的波高极值最小,湾内近岸处的最大波高向岸边快速减弱并沿东向传播。

最大,其 $H_{1\%}$ 的 100 年一遇极值达 5.8m,点 C4 重现期极值次之,而点 C1 的重现期极值最小。4 个统计点的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 相同重现期对应的极值之间相差值呈阶梯性递减,点 C2 的极值比 C4 的大 0.3—0.4m 左右,点 C4 的极值比 C3 的大 0.3—0.4m 左右,点 C3 的极值比 C1 的大 0.2—0.4m 左右,点 C4 的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 50 年一遇极值分别为 5.5m 和 4.0m,100 年一遇极值分别为 5.8m 和 4.2m。4 个点的平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值在 6.4—7.1s 之间,其中点 C1 平均波周期的 50 年一遇和 100 年一遇极值分别为 6.4s 和 6.5s。和百年一遇天文大潮情况一样,点 C1 和 C4 的强浪向均为东向,点 C1 东向的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 100 年一遇极值分别为 4.7m 和 3.5m,点 C4 东向的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 100 年一遇极值分别为 5.3m 和 3.8m;而点 C2 和 C3 的强浪向均为东南向,

点 C2 东南向的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 百年一遇极值分别为 5.7m 和 4.1m, 点 C3 东南向的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 100 年一遇极值分别为 5.1m 和 3.7m, 东向次之, 但是点

C2 和 C3 的东南向和东向的累积波高极值和平均波周期相差不大, 波高极值相差 0.1m 左右, 平均波周期极值也相差 0.1s 左右。

表 4 统计点在百年一遇高潮叠加百年一遇风暴潮增水条件下的波浪要素多年一遇的统计结果

Tab. 4 The extreme wave parameters for return periods of the points during the condition of high tide with return period of 100 years and storm surge with return period of 100 years

钦州湾湾内 统计点	波浪要素	50 年一遇极值				100 年一遇极值			
		波向				波向			
		SW	S	SE	E	SW	S	SE	E
C1	$H_{1\%}/\text{m}$	3.6	3.7	4.3	4.4	3.7	4.0	4.5	4.7
	$H_{13\%}/\text{m}$	2.6	2.7	3.1	3.2	2.7	2.9	3.3	3.5
	T_m/s	5.7	5.7	6.1	6.2	5.7	5.9	6.3	6.5
C2	$H_{1\%}/\text{m}$	4.3	4.5	5.4	5.3	4.5	4.7	5.7	5.7
	$H_{13\%}/\text{m}$	3.1	3.2	3.9	3.8	3.2	3.3	4.1	4.1
	T_m/s	6.1	6.1	6.8	6.7	6.1	6.3	7.0	7.0
C3	$H_{1\%}/\text{m}$	3.8	4.1	4.8	4.6	4.1	4.2	5.1	5.0
	$H_{13\%}/\text{m}$	2.7	2.9	3.4	3.3	2.9	3.0	3.7	3.6
	T_m/s	5.7	5.9	6.4	6.3	5.9	6.0	6.6	6.5
C4	$H_{1\%}/\text{m}$	4.0	4.2	4.9	4.9	4.2	4.5	5.2	5.3
	$H_{13\%}/\text{m}$	2.8	3.0	3.5	3.5	3.0	3.2	3.7	3.8
	T_m/s	5.8	6.0	6.5	6.5	6.0	6.1	6.6	6.7

总的来说, 点 C2 的累积频率波高和平均波周期的多年一遇的极值最大, 点 C4 重现期极值次之, 而点 C1 的重现期极值最小, 点 C1 的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 百年一遇极值分别为 4.7m 和 4.1m。和百年一遇天文大潮情况一样, 百年一遇高潮加百年一遇风暴潮增水下的点 C1 和 C4 的强浪向均为东向, 点 C1 东向的 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 100 年一遇极值分别 4.7m 和 3.5m, 而点 C2 和 C3 的强浪向均为东南向。

4 结论

本文利用 WW3 和 SWAN 海浪模式模拟了 1949—2005 年间对钦州湾海域影响较大的台风情况下的海浪场; 采用 P- 频率适线法推算了钦州湾湾外深水处的累积频率波高和平均波周期的多年一遇极值; 还模拟了 1949—2005 年间在百年一遇高潮水位情况下对钦州湾影响较大的台风浪, 以及 1949—2005 年间百年一遇高潮水位、百年一遇风暴潮增水和对钦州湾影响较大的台风浪同时发生时的波浪场, 并进一步推算了极端天气下钦州湾湾内的累积波高和平均波周期的多年一遇极值。

研究结果表明, WW3 嵌套 SWAN 的模拟结果和涠洲岛海洋站观测资料符合较好。钦州湾湾外 20m 水深处有效波高的百年一遇极值约为 5.1m, 该处累积频率波高的高值主要分布在东向、东南向、南向和西南向, 其中东向浪有效波高的百年一遇极值最

大, 东南向浪对应的极值次之。 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 50 年一遇极值的分别约为 6.4m 和 4.5m, $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 的 100 年一遇极值分别约为 6.9m 和 4.9m; 平均波周期的 50 年和 100 年一遇极值分别为 8.3s 和 8.6s。当百年一遇天文大潮和台风浪同时发生时, 湾内点 C1 有效波高的百年一遇极值为 3.0m, 该点 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 百年一遇极值分别为 3.8m 和 2.8m, 比其他 3 个统计点的多年一遇极值都低。点 C1 和 C4 强浪向为东向, 而点 C2 和 C3 的强浪向为东南向。当百年一遇天文大潮、百年一遇风暴潮增水和台风浪同时发生时, 点 C1 有效波高的 50 年和 100 年一遇极值分别为 3.5m 和 3.7m, 该点 $H_{1\%}$ 和 $H_{13\%}$ 百年一遇极值的分别为 4.7m 和 3.5m。点 C1 点和 C4 的强浪向均为东向, 而点 C2 和 C3 点的强浪向均为东南向, 东向次之, 但是东南向和东向的累积波高极值之间相差不大, 波高极值相差 0.1m 左右。与东南向和东向的累积波高相对应的平均波周期之间相差也不大, 平均波周期极值也相差 0.1s 左右。总之, 由于湾内浅滩较多, 波浪在传播过程中水体底部摩擦使能量耗损明显, 所以湾内波高较小, 湾口处的波高大于内湾处的波高。近岸海区的波浪耗散、破碎等物理过程比较强烈, 因此近岸统计点 C1 处的波高极值最小, 其最大波高向岸边快速减弱并沿东向传播。在极端天气情况下, 波浪在传播过程中发生破碎, 波高衰减显著。

本文推算了钦州湾湾外台风浪的波浪要素的多

年一遇极值及极端天气情况下钦州湾湾内的台风浪的波浪要素的多年一遇极值。该研究结果对于海洋

工程设计和防护, 以及海上航行安全等均具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 刘月红. 钦州湾波浪条件数值模拟研究[J]. 港工技术, 2007, 10(5): 8-16.
- [2] 冯芒, 沙文钰, 朱首贤. 近岸海浪几种数值计算模型的比较[J]. 海洋预报, 2003, 20(1): 52-59.
- [3] 李树华, 夏华永, 陈明剑. 广西近海水文及水位动力环境研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 67-71.
- [4] 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.
- [5] TOLMAN H L. User manual and system documentation of WACEWATCH version 2. 22[R]. Washington, USA: NOAA/NWS/NCEP, 2002: 1-139.
- [6] TOLMAN H L. Validation of a new global wave forecast system at NCEP [M]. Washington, USA: American Society of Civil Engineers, 1998: 777-786.
- [7] WINGEART K M, REILLY W C, HERBERS T H C, et al. Validation of operational global wave prediction models with spectral buoy data[M]. Washington, USA: American Society of Civil Engineers, 2001: 590-599 .
- [8] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A third-generation wave model for coastal regions 2.Verfication[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C4): 7667-7681.
- [9] ROGERS W E, KAIHATU, J M, HSU L, et al. Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight[J]. Coastal Engineering, 2007, 54: 1-15.
- [10] TOLMAN H L. The numerical model WAVEWATCH: A third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas[R]//Communication on hydraulic and geotechnical engineering. Delhi: Delhi University of Technology., 1989, Report No.89-2.
- [11] HOLTHUIJSEN L H, TOLMAN H L. Effects of the gulf stream on ocean waves[J]. Journal of Geophysical. Research, 1991, 96(C7): 12755-12771.
- [12] TOLMAN H L. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1992, 22: 1095-1111.
- [13] BOOIJ N, HOLTHUIJSEN L H, RIS R C. The SWAN wave model for shallow water[C]// Proceeding of 24th international conference on coastal engineering. Orlando, 1996: 668-676.
- [14] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal region.Part : Model description and validation[J]. J. Geophys.Res, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [15] 张志旭, 齐义泉, 施平, 等. 波致应力对台风天气下南海上层海流的影响分析[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(1): 1-8.
- [16] 文圣长, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 127-141.
- [17] 高山, 丁平兴, 朱首贤. WaveWatch 的操作系统移植及其与 SWAN 嵌套接口的改进[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(2): 228-237.
- [18] KALNAY E, KANAMITSU M, KUSTKER R, et al. The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Am Meteorol Soc, 1996, 77(3): 437-471.
- [19] JOSEY S A, KENT E C, TAYLOR P K. Wind stress forcing of the ocean in the SOC climatology: comparisons with the NCEP-NCAR, ECMWF, UWM/COADS, and Hellerman and Rosenstein Datasets[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32: 1993-2019.
- [20] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Mon Wea Rev, 1980, 108: 421-427.
- [21] 么枕生. 气候统计[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 124-131.
- [22] 史勇军, 吴忠良, 白玲. 用皮尔逊检验分析年度地震趋势预测结果[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(2): 248-253.
- [23] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港水文规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004: 4-50.
- [24] 董胜, 孔令双. 海洋工程环境概论[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2005: 43-49.
- [25] 韩树宗, 王海龙, 郭佩芳. 利用卫星高度计资料进行多年一遇极值波高的方法研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(5): 657-664
- [26] PAN J. Discussion on long series distribution of yearly maximum waves[J]. Ocean Engineering, 1983, 2 (1): 9-37.
- [27] 潘锦娥. 年极值重现期波高的探讨[J]. 海洋工程, 1983, (2): 29-37.
- [28] HU J, JIANG H. The research on forecasting climate extreme value by Gumbell method[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1993, 23(1): 43-51.
- [29] 宋运法, 尹毅, 王昭正. 广西防城港核电报告[R]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2010: 1-378.