

南海风暴潮对风场和外围海水敏感性研究

李 健, 刘清容, 阮成卿, 阎忠辉, 冀承振

(国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 为探索来自西北太平洋台风风暴潮与南海局地生成台风风暴潮不同, 本研究在假设两种台风气象条件相同情况下, 研究随台风而来外围海水所形成增水对南海沿岸的影响。以 0814“黑格比”强台风风暴潮为基础, 使用 ROMS(regional ocean modeling system)模式进行数值模拟并通过设计对比试验方法进行研究, 研究发现在台风登陆时引起的增水最大, 最大增水出现在台风路径右侧, 其中在沿岸区域, 外围海水形成增水约占总增水 10%, 且大约 3 h 后出现增水回震现象。同时, 设计对比试验, 研究来自西北太平洋台风风暴潮对台风路径、台风强度、台风移动速度和流入角等气象条件敏感性, 并获得与前人一致的结果。

关键词: 风暴潮; 移动路径; 流入角; 外围海水

中图分类号: O141.4; P444 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)02-0099-09

DOI: 10.11759/hyxx20160923001

风暴潮模拟研究已有多年发展历史, 早在 1954 年, Kivisild 首次用手摇计算机对美国 Okeechobee 湖的风暴潮做了数值计算; 1956 年德国的 Hansen 首次用电子计算机对欧洲北海的风暴潮做了数值模拟^[1], 1970 年, Jelesnianski 建立一个三维风暴潮模式并利用模型风场进行风暴潮模拟研究, 1979 年我国学者孙文心发表了第一篇风暴潮数值模拟文章, 开辟了我国数值模拟的道路, 此后 1985 年王喜年建立了一个类似于美国 SPLASH 模式的动力数值模式; 随着海浪以应力形式加入风暴潮模拟, 浪潮流耦合的研究层出不穷, 如 Xie 等^[2], Feng Xingru 等^[3]、赵昊辰等^[4]的研究, 值得一提的是 2012 年 Orton 等^[5]针对纽约市沿海风暴潮进行数值模拟研究, 其利用数值模拟及敏感性分析量化了各个因素对风暴潮影响。

南海是位于中国南部的陆缘深海, 为西北太平洋的一部分^[6], 其资源丰富, 有丰富油气储存^[7]、优良渔场^[8]和大型核电站, 是我国重点关注和开发区域之一, 同时也是台风风暴潮多发区域, 因此研究南海台风风暴潮有其重要性。南海常年遭受西北太平洋台风入侵^[9], 相比于南海局地生成台风, 西北太平洋入侵台风风速更大, 破坏力更强, 其中以西北路台风造成风暴潮灾害最为严重。为了探索由西北太平洋进入南海台风引起的风暴增水比南海局地生成台风引起的风暴增水明显的现象, 本文在不考虑台风强度等气象要素差异的情况下, 重点研究随西北太平洋生成台风进入南海的外围海水变化对沿岸

的影响, 尤其是在未来海平面上升, 台风强度增加^[10], 极端水位升高^[11]背景下, 外围海水变化研究更具有意义。早在 2005 年, Moon^[12]就发现外围海水变化为小量, 但没有设计有效对比试验, 本文利用数值模式 ROMS(regional ocean modeling system)设计对比试验, 将局地增水和外围涌入增水进行有效的分离并试图探索其所占比例, 选取的代表台风为 0814 号“黑格比”强台风(以西北路径进入南海, 登陆时最大风力 15 级)^[13]。此外, 本文还研究了此类台风风暴潮对台风路径、台风强度、台风移速和模型风场流入角的敏感性。通过上述研究, 实现局地风与外围风引起增水的有效分离, 对比探索了南海局地台风与西北太平洋台风引起增水不同, 对今后研究和预报具有参考意义。

1 方法介绍

1.1 模型风场

本文采用模型风场是 2003 年 Willoughby 等^[14]在总结台风断面观测数据基础上获得模型, 具体公

收稿日期: 2016-09-23; 修回日期: 2017-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1402000); 中国科学院海洋环境与波动重点实验室开放研究基金(KLOCW1608)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2016YFC1402000; Open Fund of the Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, the Chinese Academy of Sciences, No.KLOCW1608]

作者简介: 李健(1986-), 男, 内蒙古通辽人, 工程师, 理学硕士, 主要从事风暴潮预报与研究, 电话: 15376903579, E-mail: ylijian7@126.com

式和参数如下。

DUAL 模型风场公式:

$$v = V_c = V_s + V_{\max} \left(\frac{r}{R_{\max}} \right)^n, (0 \leq r \leq R_1) \quad (1)$$

$$v = V_s + V_c(1 - w) + V_0 w, (R_1 \leq r \leq R_2) \quad (2)$$

$$v = V_0 = V_s + V_{\max} \left[(1 - A) \exp \left(-\frac{r - R_{\max}}{X_1} \right) \right] + A \exp \left(-\frac{r - R_{\max}}{X_2} \right), (R_2 \leq r) \quad (3)$$

所对应的参数:

$$X_1 = 317.1 - 2.026V_{\max} + 1.915\varphi \quad (4)$$

$$n = 0.406 + 0.0144V_{\max} - 0.0038\varphi \quad (5)$$

$$w = \frac{nX_1}{nX_1 + R_{\max}} \quad (6)$$

$$A = 0.069 + 0.0049V_{\max} - 0.0064\varphi \quad (7)$$

$$R_{\max} = 46.4 \exp(-0.0155V_{\max} + 0.0169\varphi) \quad (8)$$

其中, v 代表实际风速, V_s 代表移动风速, V_{\max} 为最大风速, R_{\max} 为最大风速半径^[14], r 为与台风中心距离, φ 为纬度。

由于风场 Dual 在区间 (R_1, R_2) 上时, 会出现超过最大风速情况, 因此本文对 Dual 公式进行修正, 具

体如下:

$$v = V_s + V_c(1 - w) + V_{\max} w, (R_1 \leq r \leq R_{\max}) \quad (9)$$

$$v = V_s + V_{\max}(1 - w) + V_0 w, (R_{\max} < r \leq R_2) \quad (10)$$

利用权重 w 误差最小条件, 确定区间 (R_1, R_2) 的范围, 公式如下:

$$w(\varepsilon) = 126\varepsilon^5 - 420\varepsilon^6 + 540\varepsilon^7 - 315\varepsilon^8 + 70\varepsilon^9 \quad (11)$$

$$\varepsilon = (r - R_1)/(R_2 - R_1) \quad (12)$$

其中流入角的设置详见李健^[15]。

1.2 模式介绍和设置

本文采用三维 ROMS 模式对风暴潮增水进行模拟验证及敏感性分析。ROMS 是由 Rutgers 大学与 UCLA(University of California)共同开发的三维、自由表面、地形跟随、有限差分的区域性海洋模式, 现已被应用于风暴潮的数值模拟研究中^[3]。

模式网格的分辨率是 $1' \times 1'$, 垂直分为 16 层, 最大深度为 1 000 m, 外模态时间步长为 8 s, 内模态时间步长为 120 s, 模拟区域以及使用网格见图 1。

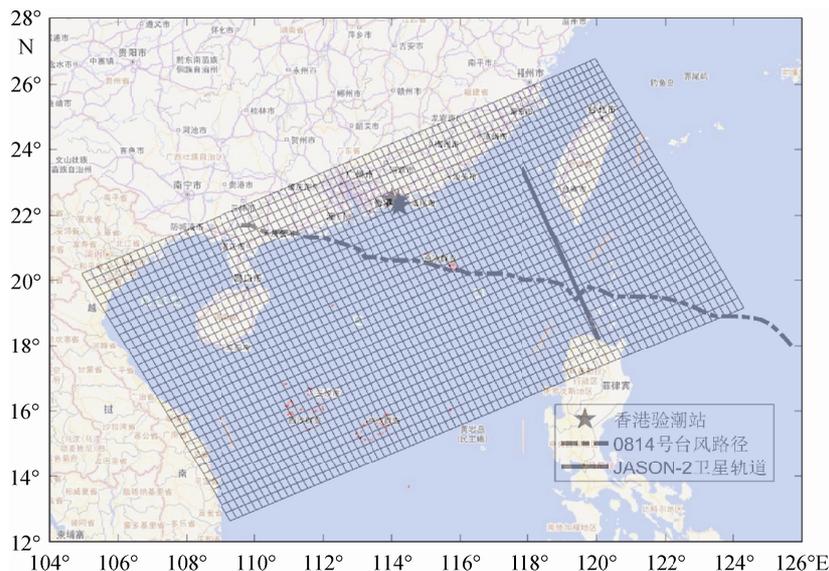


图 1 模式网格、台风路径、香港验潮站位置和 JASON-2 卫星轨道

Fig. 1 Grid of model, trace of typhoon, location of Hong Kong observatory and trace of JASON-2

台风相关数据来自温州台风网(<http://www.wz121.com/Index.htm>), 地形数据是由 etopo1 和 etopo2 进行加权平均获得; 稳定初始条件是由 CCMP 数据提供强迫风场, 利用 ROMS 运行 20 d 后形成的; 温度为逐层线性变化温度, 其中最上层(海表面层)值为 28°C 、最下层值为 20°C , 盐度为常值 34.5, 强迫风场为第一部分的模型风场, 南边界和东边界为开边界, 其余边界为闭边界^[15]。

2 结果

2.1 模式验证

利用 ROMS 模式对 0814 号“黑格比”台风引起的风暴潮进行数值模拟, 模拟结果与香港天文台(<http://gb.weather.gov.hk/contentc.htm>)提供验潮站数据进行对比, 见表 1。

表 1 模拟与实测增水对比表

Tab. 1 Diagram of contrast between the model and measured

验潮站	验潮站位置	测量时刻 (年月日 T 时:分)	增水高度/m		增水绝对 误差/m	误差 百分比/%
			实测	模拟		
大埔滢	114.20°E, 22.44°N	20080923T 23: 45	1.77	1.47	0.30	17.95
鯽魚涌	114.23°E, 22.29°N	20080924 T 00: 54	1.43	1.21	0.22	15.38
尖鼻咀	114.01°E, 22.49°N	20080924 T 04: 16	1.46	1.17	0.29	19.86

表 1 显示误差百分比在 15%~20%，主要引起差异的原因是模式中未考虑气压场、远程天气状况等因素影响。根据 Orton^[5]研究表明：(1)气压使得总增水增加 3%~11%；(2)远程天气状况使增水增加 7%~17%；(3)径流对增水有加强作用以及潮汐非线性作用等。因此，当前模式引起的误差在 20%以内，若滤去气压等因素的影响，近似认为模式设置是合理的。

利用欧空局 JASON-2(<http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products.html>) 卫星运行轨道数据验证，卫星轨道数据测量时间是 2008 年 9 月 22 日 13:00—2008 年 9 月 22 日 13:02，是下行轨道数据(从北到南)，模式验证对比采用的是同时间最近距离的卫星轨道实测数据与模拟网格点数据对比方法进行，从图中发现模式模拟的海表面距平与卫星实测的海表面距平的变化趋势较为一致。

2.2 敏感性试验

2.2.1 最大增水位置到台风中心距离研究

据 0814 号“黑格比”台风风暴潮模拟发现，在台

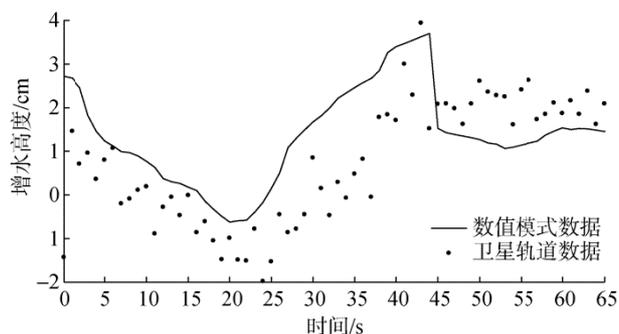


图 2 数值模拟与卫星实测海表面距平时间序列图

Fig. 2 Simulated and observed (JASON-2) time series of sea surface height anomaly(SSHA)

风登陆时，最大增水点距离台风中心点的距离是此时最大风速半径的 2~2.5 倍，见图 3。

为了进一步确定最大增水位置与最大半径关系，本文采用平移台风路径的方法进行试验，具体如下。

确定目标点：数值模拟原型为 0814 号“黑格比”台风风暴潮，选取研究位置为验潮站闸坡(21.82°N, 111.58°E)站附近。因为受网格分辨率、地形、mask 等

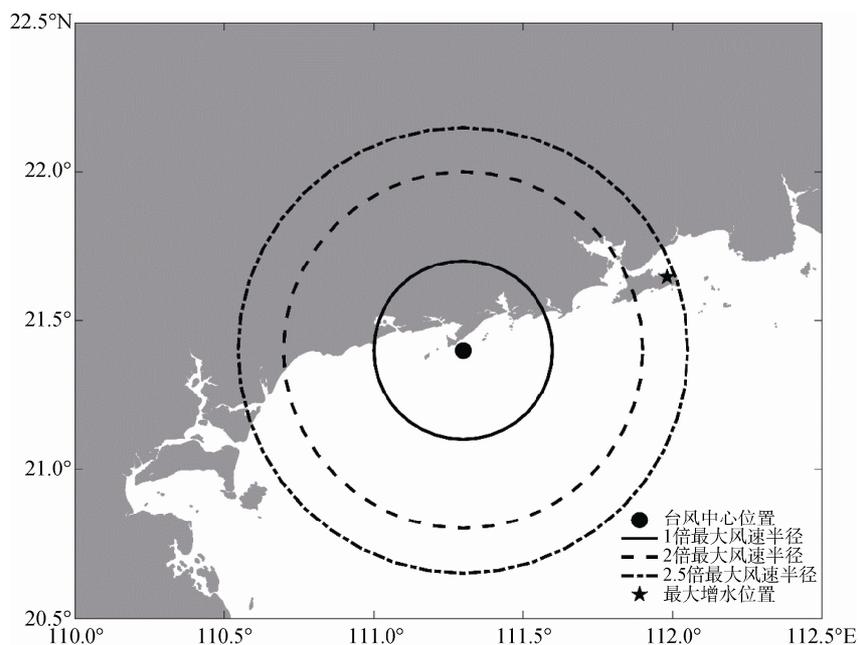


图 3 黑格比台风最大增水点位置分析图

Fig. 3 Analysis of the maximum storm surge location

因素影响, 所以选取验潮站附近点(21.56°N, 111.79°E)作为研究目标点。此处理不仅明确了目标点, 还将台风移动到南海北部开阔区域减少海南岛等区域的影响。

移动台风路径: 将“黑格比”台风路径, 平移到目标点, 平移规则是保证登陆点为目标点(21.56°N, 111.79°E), 其余按此距离移动。

对比试验设计: 利用平移后的路径, 按照最大风速半径距离倍数进行左右平移, 分别平移的距离

是-3, -2.5, -2, -1.5, -1, 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 倍最大风速半径, 其平移后的路径图见图 4。

图 5 显示, 引起目标点发生最大增水的台风路径, 位于其左侧 2 倍最大风速半径处, 这与国家海洋环境预报中心在广东沿岸开展“908”专项调查模拟结果相一致^[16]。但最大增水时间延后一个小时, 出现此现象的原因可能是因台风移动, 使其登陆时刻存在一定的差异。

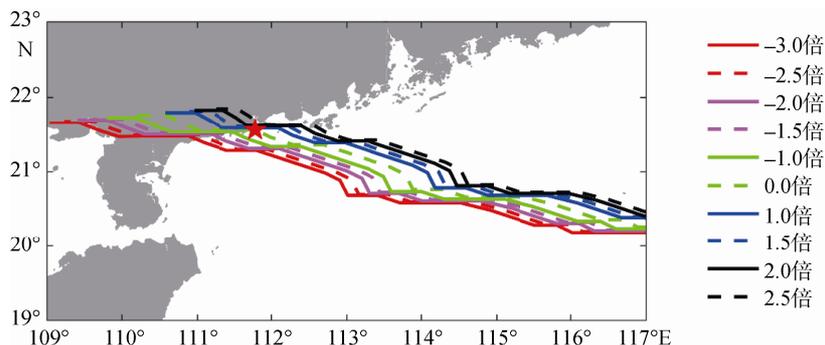


图 4 移动台风路径图

Fig. 4 Typhoon moving paths

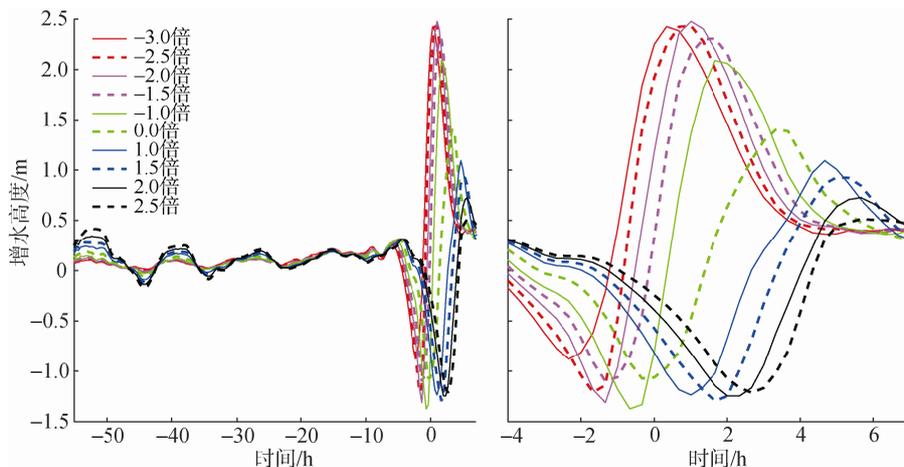


图 5 不同路径在目标点引起增水随时间变化图

Fig. 5 Time-series of simulated surges induced by typhoon moving paths on the target

图注: 图中坐标原点处是原台风(0814“黑格比”)登陆时刻

Legend: The origin of the coordinates is the moment of typhoon landing (0814 “Hagupit”)

综合两种试验结果, 本文认为台风引起最大增水位置, 位于台风右侧 2~2.5 倍最大风速处, 这与国家环境预报中心数值模拟结果相同^[16]。

2.2.2 风暴潮对台风要素敏感性研究

风场是引起风暴增水的主要因素, 不同信息的风场导致不同程度的风暴增水。风场因素通常有风的强度, 移动速度, 辐散程度(流入角度变化), 最大风速半径等等, 这些因素的变化将导致不同风暴潮

的出现。Weisberg^[17]研究 Tampa Bay 区域认为强度变大只会增大增水, 不会影响其他因素; 而移速过快会使得表面海水不能及时响应, 从而导致增水下降; 同时指出最大风速半径变大可能会使得增水变大, 但未模拟说明。

为了探索南海台风风暴潮对风场的敏感性, 本文以 0814“黑格比”台风风暴潮为基础进行研究, 具体设计的数值试验见下表(表 2)。

表 2 风场变化引起增水对比的实验设计

Tab. 2 Experimental design of different wind

试验名称	试验设计说明
标准试验	正常台风模拟, 且温盐都是常数(不考虑斜压等因素影响)
移速加快	台风移动速度是标准试验移动速度 2 倍
流入角变大	流入角在标准试验的基础上增加 10°
强度统一	将标准试验中台风强度都设定为“0814”台风最大强度
半径变大	台风最大风速半径在标准试验的基础上增加 10 km

增水模拟结果见表 3(从登陆前 2 h 开始统计研究, 主要研究登陆时刻的增水变化)。

表 3 标准试验和对比试验模拟增水变化表

Tab. 3 Storm surge of comparison test and the standard test

试验名称	最大增水/m		最大减水/m		滞后时间/h	
	登陆时刻	整个过程	登陆时刻	整个过程	增水滞后	减水滞后
标准试验	2.7	2.7	1.26	2.42	0	2
移速增大	2.17	2.17	0.51	1	-1.33	2.67
流入角增大	2.93	2.93	1.11	2.11	0	1.67
强度统一	2.89	2.89	1.17	2.4	0	2
半径增大	3.01	3.01	1.49	2.58	0	2

从表 3 中发现, 移速加快使得最大增水和减水均减少; 其余对比试验增水增加, 但减水各异, 最大增水常出现在台风登陆时刻。

从对比试验与标准试验在台风登陆时刻的空间差异分布图(图 6)发现, (1)移速增大试验的最大增水

点与标准试验的最大增水点不同, 导致在标准试验最大增水点附近两者增水存在明显差异, 其余地方增水都有不同程度的增加, 尤其是在标准试验的减水区域增加较多。(2)流入角增大试验使得登陆点附近增水增加, 减水减少, 幅度大约占标准试验增水的

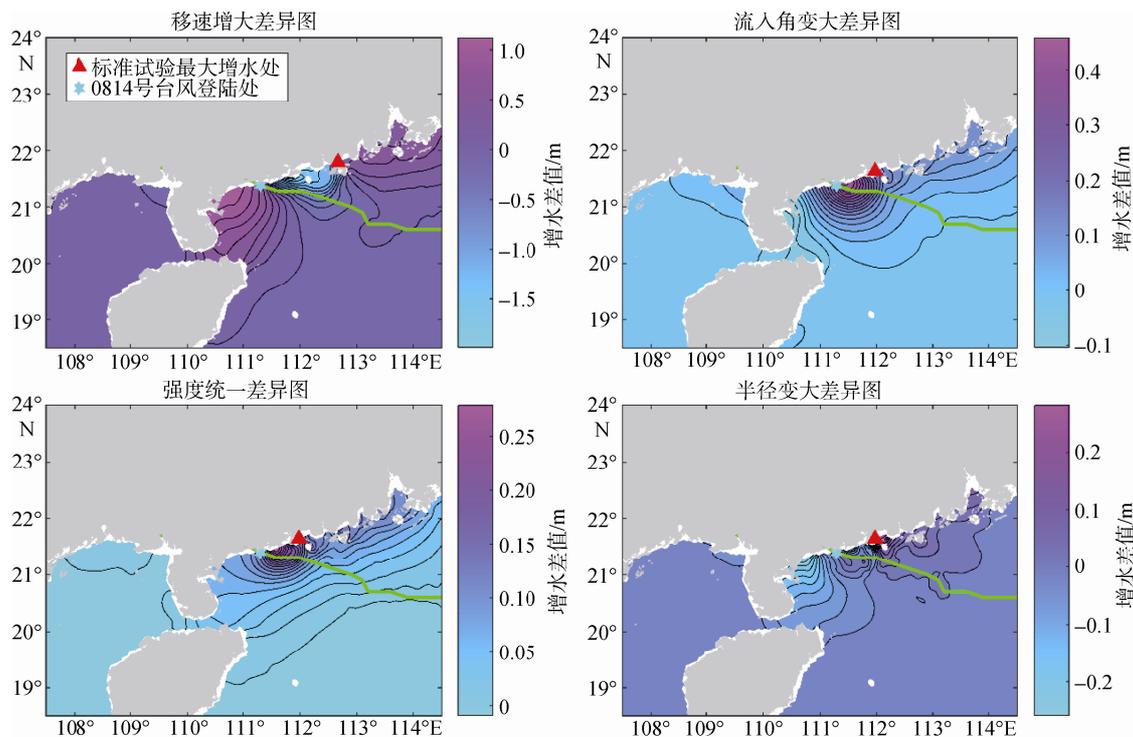


图 6 对比试验与标准试验差异图

Fig. 6 Difference of storm surge between comparison test and the standard test

16.3%，外围增水略有减少，但是幅度较小。(3)强度统一试验使增水增加，但幅度较小，只有在登陆点附近增水提升较多；值得一提的是标准试验登陆强度与强度统一试验的登陆强度一致，所以此差异是由于外围风场强度不同而引起的增水变化，变化幅度约占标准试验 7%，一定程度上说明外围风场差异引起增水相对于局地风引起增水变化为小量。(4)半径变大试验使得增减水都增大，幅度较小，在登陆点附近变化较大，约占标准试验的 8%。风场移速，强度以及最大风速半径研究结果均与 Weisberg^[17]研究结果一致。

2.2.3 外围海水形成增水变化情况

因为海水是液态的，所以台风从西北太平洋进入南海必将伴随海水涌入，这部分海水形成增水相对于南海局地台风(假设其气象条件均与西北太进入南海台风一致)引起增水是多少呢，它有怎样变化呢?Moon^[12]研究表明外围环流变化相对于局地增水变化为小量，说明当台风未影响到沿岸区域时，外部风场引起环流对增水作用可以忽略，但其研究海域为开阔海域，且未受台风影响。为了研究随西北太平洋台风进入南海的海水所形成风暴增水及其变化情况，以 0814“黑格比”台风风暴潮为基础，设计对比试验。

为去除局地风产生增水的影响，设计试验：以 0814 号台风登陆后固定不动引起风暴潮代表从西

北太平洋进入南海台风风暴潮(简称固定不动台风风暴潮)和以直接在登陆点出现台风引起的风暴潮代表南海局地生成的台风风暴潮(简称直接出现台风风暴潮)。

选取原台风(0814“黑格比”台风)登陆时刻最大增水点为目标点，研究其登陆后对比试验结果见图 7。

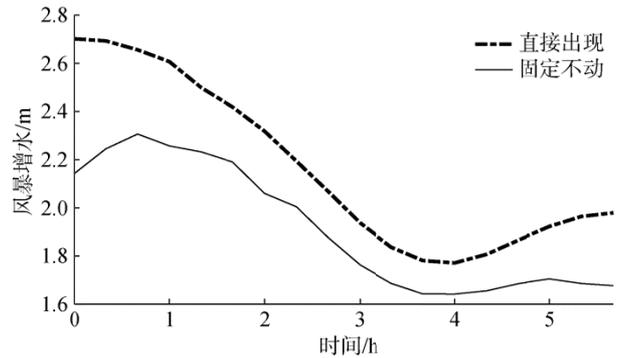


图 7 局地台风增水和固定不动风暴增水时间序列图
Fig. 7 Time-series of simulated surges induced by local typhoon and stationary typhoon

这里规定：外围海水形成增水=总增水(固定不动试验增水)-局地增水(直接出现试验增水)；外围增水占总增水比例=(外围海水形成增水÷总增水)×100%。

图 8(比例图中仅显示固定不动试验增水区域，减

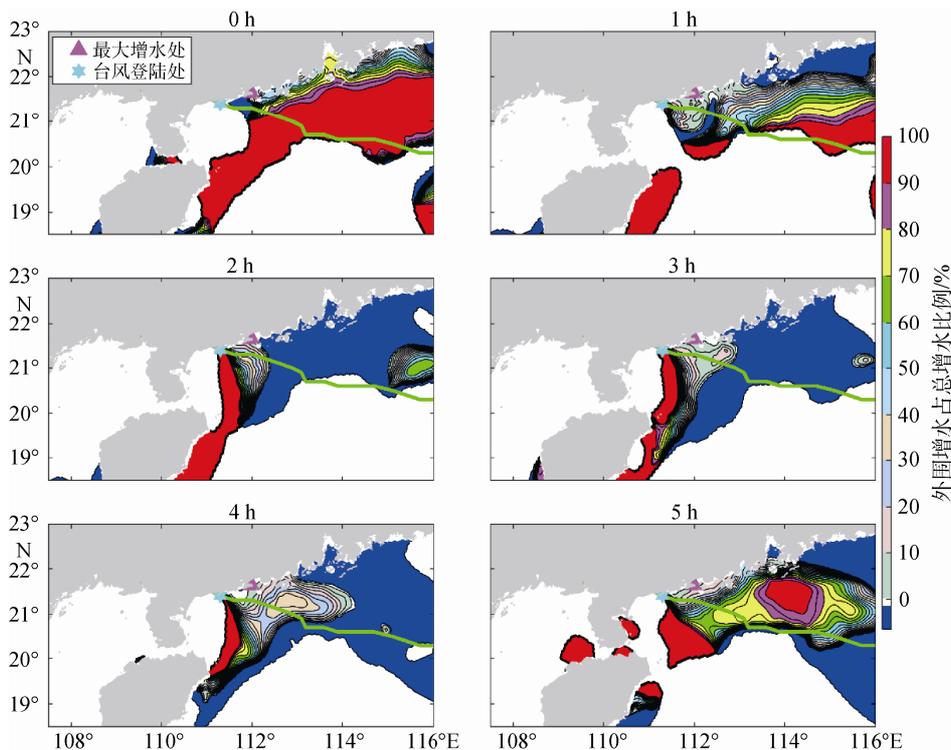


图 8 外围海水随时间变化的空间比例图
Fig. 8 Spatial evolution ratio of external seawater

水区域人为规定为零)显示,在最大增水区域附近,外围海水形成的增水约占总增水 10%左右,所以可以认为相比于局地风引起的增水,外围海水形成的增水为小量。

结合图 8 和图 9 发现外围海水形成增水变化随时间具有一定往复性且增水比例也会出现相应的变化;当台风登陆时,外围海水随西北路台风接近岸边,其中一部分随风沿着陆地向西移动,另一部分受岸边反射影响,向离岸方向移动,随后离岸部分的海水又受到风场持续影响回到岸边,两部分海水

汇合后继续沿岸向西移动,然后受到地形影响产生回震。局地海水随台风涌向岸边,随后受地形产生反射。外围海水和局地海水随时间发生变化导致了台风风暴潮在登陆时刻出现最大增水,图 8 和图 9 显示在登陆时刻,台风眼附近区域以局地风引起的增水为主,而最大增水区域,由外围海水和局地风引起的增水共同组成,一定程度上解释了最大增水出现在路径右侧而不是台风眼附近的原因,其原因一方面是因为受台风廓线的影响,另一方面是因为外围海水对台风响应的存在滞后性。

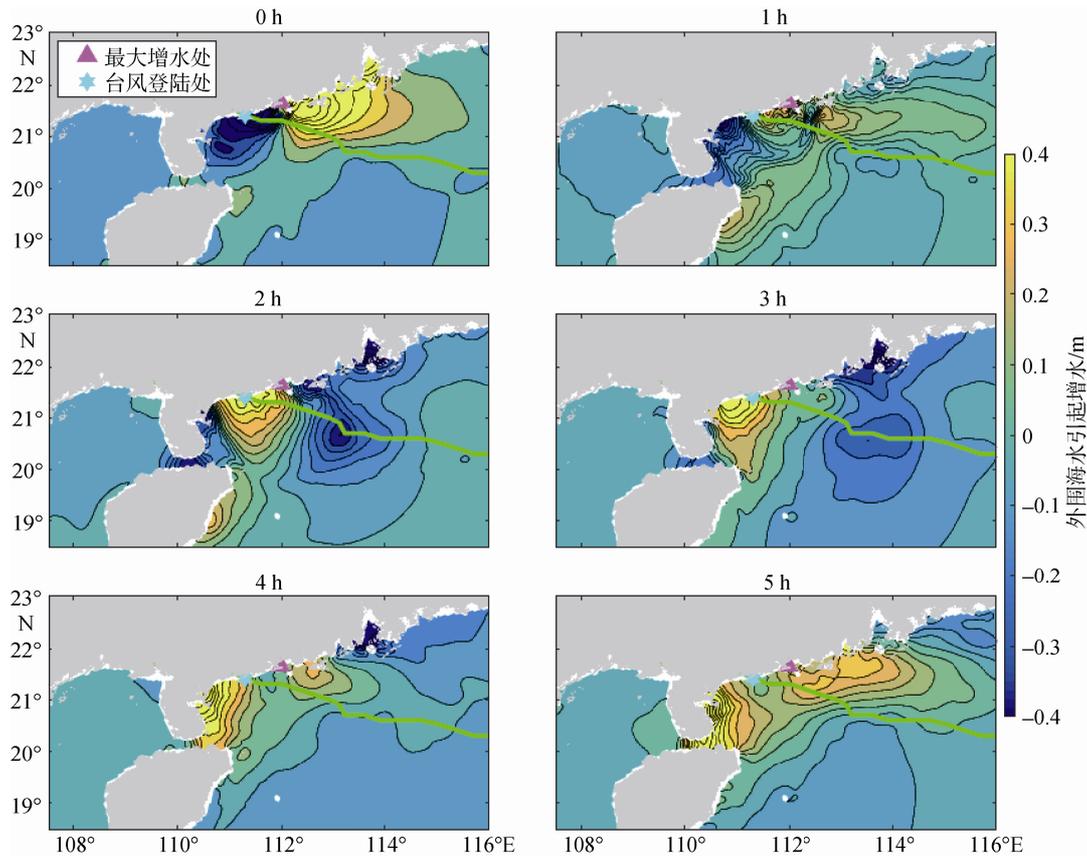


图 9 外围海水随时间变化空间图

Fig. 9 Storm surge spatial evolution of external seawater

图 9 显示外围增水将于 3 h 后开始回震,并由于试验台风仍在登陆点,所以外围海水沿着陆地回震。

3 结论

本文以 0814 号“黑格比”台风风暴潮的数值模拟为基础,对由西北太平洋进入南海的西北型台风风暴潮进行敏感性试验。通过敏感性试验发现:最大增水常出现在台风登陆时刻,其位置常出现在台风路径右侧 2~2.5 倍最大风速半径处;台风风暴潮会随着

移速增大,增水和减水都减少;随着流入角增加,增水增加,减水减少;随着外围强度变大,增水增加,减水减少,但是幅度较小,即外围台风强度对增水和减水影响较小;随着半径变大,增减水都增大。

通过设计对比试验对随西北太平洋生成台风进入南海的外围海水进行研究,从外围海水引起增水角度阐释台风在登陆时刻引起的增水最大,最大增水区域不在台风眼区域而是出现在台风路径右侧,同时描述了外围海水受沿岸地形影响出现反射和振

荡的过程, 其中在沿岸附近, 外围海水形成增水约占总增水 10%, 大约 3 h 后出现增水回震现象。

参考文献:

- [1] 杨晓君, 吕江津, 何群英, 等. 对台风“麦莎”风暴潮过程的数值模拟[J]. 广东气象, 2009, 31(3): 16-18.
Yang Xiaojun, Lü Jiangjin, He Qunying, et al. Numerical simulation of typhoon Matsa storm surge[J]. Guangdong Meteorology, 2009, 31(3): 16-18.
- [2] Xie Lian, Liu Huiqing, Peng Machuan. The effect of wave-current interactions on the storm surge and inundation in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989[J]. Ocean Modelling, 2008, 20(3): 252-269.
- [3] Feng Xingru, Yin Baoshu, Yang Dezhou, et al. The effect of wave-induced radiation stress on storm surge during Typhoon Saomai (2006) [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 3: 20-26.
- [4] 赵昊辰, 尹宝树, 冯兴如, 等. 台湾附近海域超强台风南玛都期间风暴潮对海浪影响的数值研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 127-134.
Zhao Haochen, Yin Baoshu, Feng Xingru, et al. Numerical study of influence of surge and wave interaction on waves in Waters surrounding Taiwan[J]. Marine Sciences, 2015, 39(3): 127-134.
- [5] Orton P, Georgas N, Blumberg A, et al. Detailed modeling of recent severe storm tides in estuaries of the New York City region[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: 1-17.
- [6] Metzger E J, Hurlburt H E. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 1996, 101(C5): 12331-12352.
- [7] 叶小敏, 林明森, 宋庆君, 等. 利用南海石油平台的卫星雷达高度计定标与检验[J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 135-142.
Ye Xiaomin, Lin Mingsen, Song Qingjun, et al. Calibration and validation of satellite radar altimeters in the South China Sea using an oil platform[J]. Marine Sciences, 2015, 39(12): 135-142.
- [8] 王新星, 于杰, 李永振, 等. 南海主要上升流及其与渔场的关系[J]. 海洋科学, 2015, 39(9): 131-137.
Wang Xinxing, Yu Jie, Li Yongzhen, et al. The relationship between major upwelling and the upwelling fishing grounds in the South China Sea[J]. Marine Sciences, 2015, 39(9): 131-137.
- [9] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座(第二讲 风暴潮灾害及其地理分布)[J]. 海洋预报, 2001, 18(2): 70-77.
Wang Xinian. Lectures on storm surge forecasting knowledge (second story about storm surge disasters and their geographical distribution)[J]. Marine Forecasts, 2001, 18(2): 70-77.
- [10] Trenberth K. Uncertainty in hurricanes and global warming[J]. Science, 2005, 308: 1753-1754.
- [11] Muis S, Verlaan M, Winsemius H C, et al. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels[J]. Nature Communications, 2016, 11969: 1-11.
- [12] Moon I J. Impact of a coupled ocean wave-tide-circulation system on coastal modeling[J]. Ocean Modelling, 2005, 8(3): 203-236.
- [13] 付翔, 董剑希, 马经广, 等. 0814 号强台风“黑格比”风暴潮分析与数值模拟[J]. 海洋预报, 2009, 26(4): 68-75.
Fu Xiang, Dong Jianxi, Ma Jingguang, et al. Analysis and numerical simulation of the storm surge caused by Typhoon“Hagupit” [J]. Marine Forecasts, 2009, 26(4): 68-75.
- [14] Willoughby H E, Darling R W R, Rahn M E. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part II: a new family of sectionally continuous profiles[J]. Monthly Weather Review, 2005, 134: 1102-1120.
- [15] 李健, 侯一筠, 孙瑞. 台风模型风场建立及其模式验证[J]. 海洋科学, 2013, 37(11): 95-102.
Li Jian, Hou Yijun, Sun Rui. Surge model caused by 0814 Typhoon and mold wind field established[J]. Marine Sciences, 2013, 37(11): 95-102.
- [16] 于福江. 中国近海海洋综合调查与评价专项-灾害调查和综合评价[R]. 北京: 国家海洋环境预报中心, 2012.
Yu Fujiang. Marine comprehensive survey and evaluation of offshore China - disaster investigation and comprehensive evaluation[R]. Beijing: National Marine Environmental Forecasting Center, 2012.
- [17] Weisberg R H, Zheng L. Hurricane storm surge simulations for Tampa Bay[J]. Estuaries and Coasts, 2006, 29(6): 899-913.

Study of storm surge sensitivity with typhoon and external seawater in the South China Sea

LI Jian, LIU Qing-rong, RUAN Cheng-qing, YIN Zhong-hui, JI Cheng-zhen
(North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Sep. 23, 2016

Key words: storm surge; typhoon moving paths; inflow angle; external seawater

Abstract: To explore the difference between the storm surge generated from the Pacific Northwest and that generated from the South China Sea, we studied the external seawater influence on the storm surge of the South China Sea coast under constant meteorological conditions. Regional ocean modeling system (ROMS) was used to simulate and analyze the external seawater, and a comparative test was performed. The results showed that the maximum surge appeared at the moment the typhoon landed on the right of typhoon path. The external seawater came back after 3 hours, accounting for about 10% of the total surge. Meanwhile, different model results show the same conclusions on the storm surge in terms of typhoon moving paths, change of typhoon strength, increase of typhoon moving speed, different inflow angle, and external seawater evolution.

(本文编辑: 刘珊珊)