

# 利用 WW3 模式实现中国海击水概率数值预报

郑崇伟 潘 静 黄 刚

(中国人民解放军 92538 部队, 大连 116041) (中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 海浪对掠海飞行有着重要影响, 以 T639 预报风场驱动 WW3 (WAVEWATCH-III) 海浪模式, 对 2013 年 3 月发生在中国海的一次冷空气海浪场进行数值模拟. 结合飞行高度探测的标准差、海浪浪高的标准差, 进一步实现了击水概率的数值预报, 为低空飞行器的航迹规划提供科学依据. 主要计算了 5 m 高度、10 m 高度、15 m 高度的击水概率, 并对不同飞行高度击水概率的差异. 结果表明, 以 T639 预报风场驱动 WW3 海浪模式, 可以较好地预报中国海海浪场、击水概率场. 在冷空气影响下, 中国海的击水概率出现明显增幅. 飞行高度低于 10 m 时, 海浪会对掠海飞行器的安全造成很大威胁.

**关键词:** WW3 模式; 中国海; 击水概率; 数值预报

中图分类号: P 79; P 731

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2014)03-0314-07

## Forecasting of the China Sea ditching probability using WW3 wave model

Zheng Chongwei

(Unit 92538 of People's Liberation Army, Dalian 116041, China)

Pan Jing Huang Gang

(Institute of Atmospheric Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The ocean wave has a significant influence on the ditching probability. Comprehensively considering the standard deviation of the flying height of the sea-skimming aircraft, standard deviation of the ocean wave, the numerical forecasting of the ditching probability was developed, by using WW3 (WAVEWATCH-III) wave model and T639 forecasting wind field data. The results provide a scientific reference for the route planning of sea-skimming aircraft. The ditching probabilities of 5 meters, 10 meters and 15 meters above the sea surface were calculated and contrasted. Results show that the WW3 wave model can forecast the China Sea wave field and ditching probability properly, with T639 forecasting wind field data as the driving field. Under the influence of the cold air, the China Sea ditching probability increases significantly. The ocean wave would cause a great threat to the security of sea-skimming aircraft when the flying height is below 10 meters.

**Key words:** WAVEWATCH-III wave model; China Sea; ditching probability; numerical forecasting

随着我国军地海洋建设的快速发展, 舰载机、无人机、巡航导弹、海洋权益维护和抢险救灾使用的直升机等飞行器在军事活动、非战争军事行动中应用越来越广泛<sup>[1]</sup>. 为了达到更优的效果, 往往需要低空或超低空飞行, 但飞行高度过低容易撞击海面, 威胁飞行器的自身安全(如 2004 年 12

月, 美国海岸警卫队直升机在执行救援任务时遇到恶劣海况坠毁). 这就需要对接水概率(掠海飞行时撞击海面的概率)做出准确分析, 为低空飞行的航迹规划提供定量的科学依据<sup>[2-3]</sup>.

前人就海浪要素影响下的击水概率做了很多工作和很大贡献. 英国民用航空管理局(CAA,

收稿日期: 2013-05-08; 网络出版时间: 2013-12-31 14:50; DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2013. 0247

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131231.1450.001.html

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2012CB957803); 公益行业(气象)科研专项资助项目(GYHY201306026)

作者简介: 郑崇伟(1983-), 男, 四川宜宾人, 工程师, zhengzhang\_xia@163.com.

Civil Aviation Authority)<sup>[4]</sup>、英国 Kelly 咨询公司<sup>[5]</sup>曾指出,海浪对击水概率有着重要影响,并就不同海况下直升机救援的危险程度、应对方案进行过研究。统计了北海不同季节不同海况出现的频率,对直升机在不同季节的救援方案做出规划,并制作相应的手册。雷小龙等人<sup>[6]</sup>曾利用有限的海浪观测数据,对反舰导弹的击水概率问题进行过研究,发现飞航导弹在较恶劣的海况下,击水概率值大大增加。秦志明等人<sup>[7]</sup>根据海上阵风、海浪以及巡航导弹垂直平面内飞行和高度控制等数学模型,给出了阵风、海浪的仿真方法,在此基础上提出计算巡航导弹生存能力的计算方法,并画出了计算流程图。结果表明该模型对于巡航导弹飞行仿真也是适用的,能够为巡航导弹海上飞行的其他相关研究提供帮助。郑崇伟等人<sup>[1]</sup>在2012年将击水概率与海浪模式相结合,在国内率先实现了击水概率的数值模拟,可以就中国海乃至全球海域等大范围海域的击水概率进行数值模拟,结果可为航迹规划提供依据。以往对击水概率的分析多是采用后报的方法,或是利用极为有限的观测资料,对单站、局部小范围海域的击水概率进行分析,目前为止尚未实现击水概率的预报,而在航迹规划中,对预报的需求则更为迫切。

本文以 T639 预报风场驱动 WW3 (WAV-EWATCH-III) 海浪模式,首次实现击水概率的数值预报。传统的应对危险天气多是以规避为主,而实际上危险天气是一把双刃剑,本文期望通过实现击水概率的数值预报,有效利用危险天气,为无人机、巡航导弹、舰载机的掠海飞行航迹规划提供定量的科学依据,提高其生存能力、隐蔽突防能力。

## 1 模拟方法

2013年3月中旬,有一次较为强劲的冷空气过程影响中国海,本文以 T639 预报风场驱动 WW3 海浪模式,对这次冷空气过程所致海浪场进行模拟,进而实现击水概率的数值预报。所用的地形数据来自 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的 ETOPO1 高分辨率全球地形数据集 ( $1' \times 1'$ ),海岸线数据来自 GSHHS 全球高分辨率海岸线数据库。模式计算范围:北纬  $0.125^\circ \sim 41.125^\circ$ ,东经  $100.125^\circ \sim 140.125^\circ$ ,海浪谱网格为  $24 \times 25$ ,波向共 24 个,分辨率为  $15^\circ$ ,频率分为 25 个频段,从  $0.0418 \sim 0.4056 \text{ Hz}$ ,各频段关系为:空间分辨率取  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ,计算时间步长取为 300 s,每小时输出一次结果,计算时

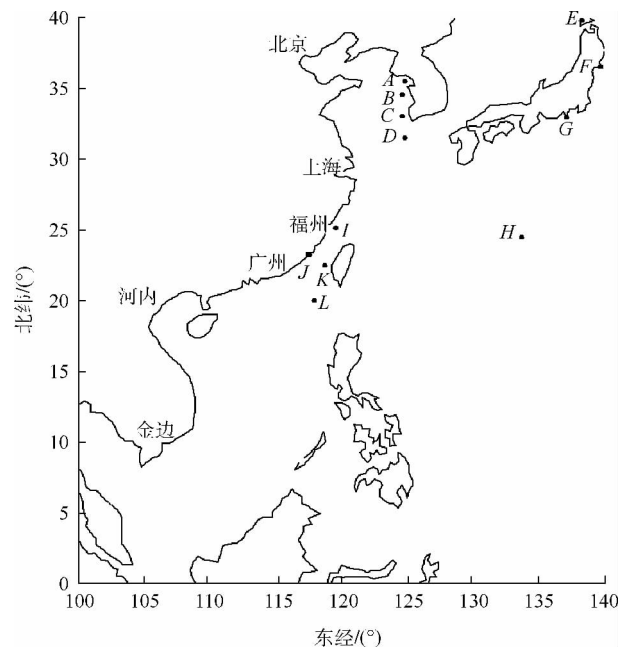
间为 2013-03-11T00:00—2013-03-15T06:00。

## 2 资料验证

### 2.1 观测海浪资料

由于我国海浪观测资料较为稀缺且不易获取,卫星资料反演的有效波高虽然精度得到了广泛认可,但卫星轨道在中国海较少,重复周期也很长(如 TOPEX/Poseidon 卫星高度计周期为 10 d),这就导致卫星资料反演的有效波高 (SWH, Significant Wave Height) 数据在中国海范围的空间分辨率、时间同步性等方面都有很大缺陷<sup>[8]</sup>。

鉴于此,本文充分收集了来自朝鲜半岛、日本、台湾的海浪浮标资料,用于验证模拟海浪数据的有效性,同时也期望这种方法可以为同行提供参考,为海浪研究进展做出贡献。浮标站位置如图 1 所示。



A—22101; B—22108; C—22102; D—22107;  
E—上国; F—唐桑; G—石廓崎; H—经岬;  
I—马祖; J—金门; K—澎湖; L—东沙岛。

图1 浮标站位置分布图

### 2.2 模拟有效波高的精度

对比模拟 SWH 与观测 SWH 的曲线走势,可以较为直观地看出模拟数据的精度,如图 2 ~ 图 4 所示。

朝鲜半岛周边海域(图 2):从模拟值和观测值的曲线走势来看,二者在 4 个站点处均保持了很好的一致性,模拟值也能很好地展现冷空气所引起的大浪过程。站点由于 22101 位置比较偏北(位于黄海中部),海域相对狭小,海浪尚未充分成长时冷空气已经南下,所以此处冷空气引起的

最大波高仅 2.0 m 左右;当冷空气南下至黄海南部时,海域变得开阔,海浪得以充分成长,在 22102、22107、22108 处的最大波高都可以达到 4.0~5.0 m 左右。

日本周边海域(图 3):模拟值和观测值在站点 经岬、石廊崎、唐桑处均保持了很好的一致性,冷空

气所引起的大浪过程也非常明显,在 经岬、石廊崎 的最大波高可接近 4.0 m,唐桑的最大波高可接近 2.5 m;在站点上国处,11—13 日期间的观测波高与模拟波高保持了很好的一致性,但 14 日的大浪过程中,模拟值比观测值明显偏大。整体来看,WW3 模式对日本周边海域的 SWH 具有较强的模拟能力。

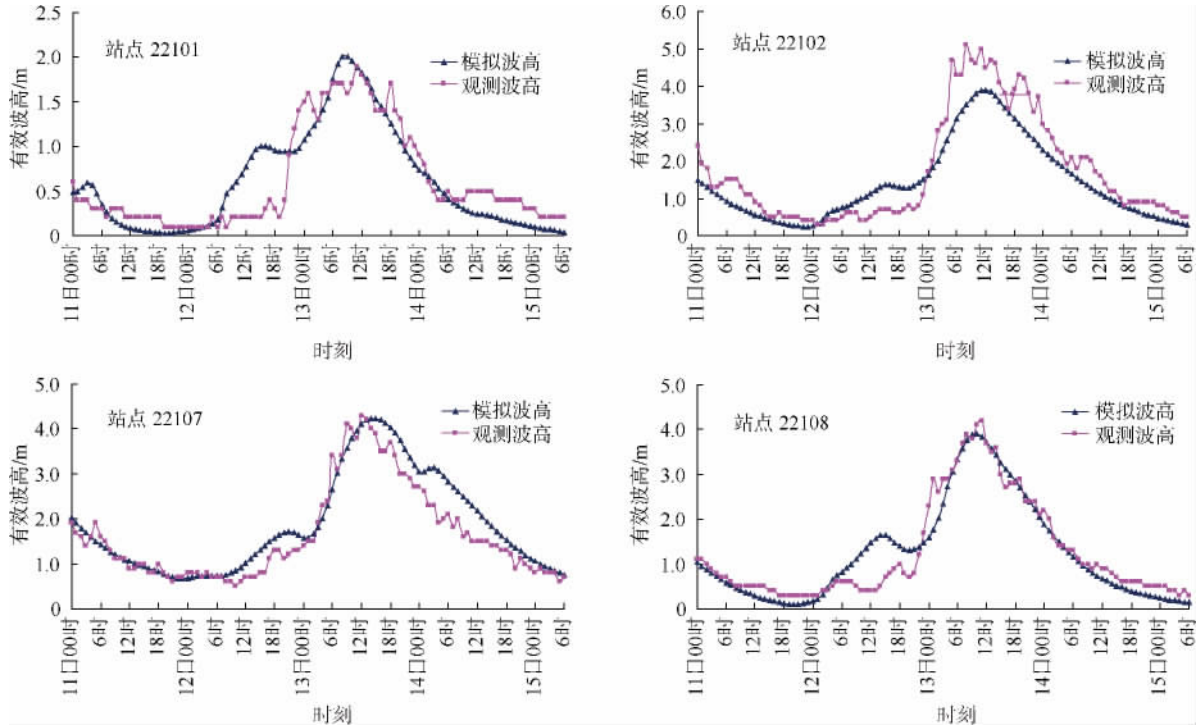


图 2 朝鲜半岛西部海域的观测波高与模拟波高

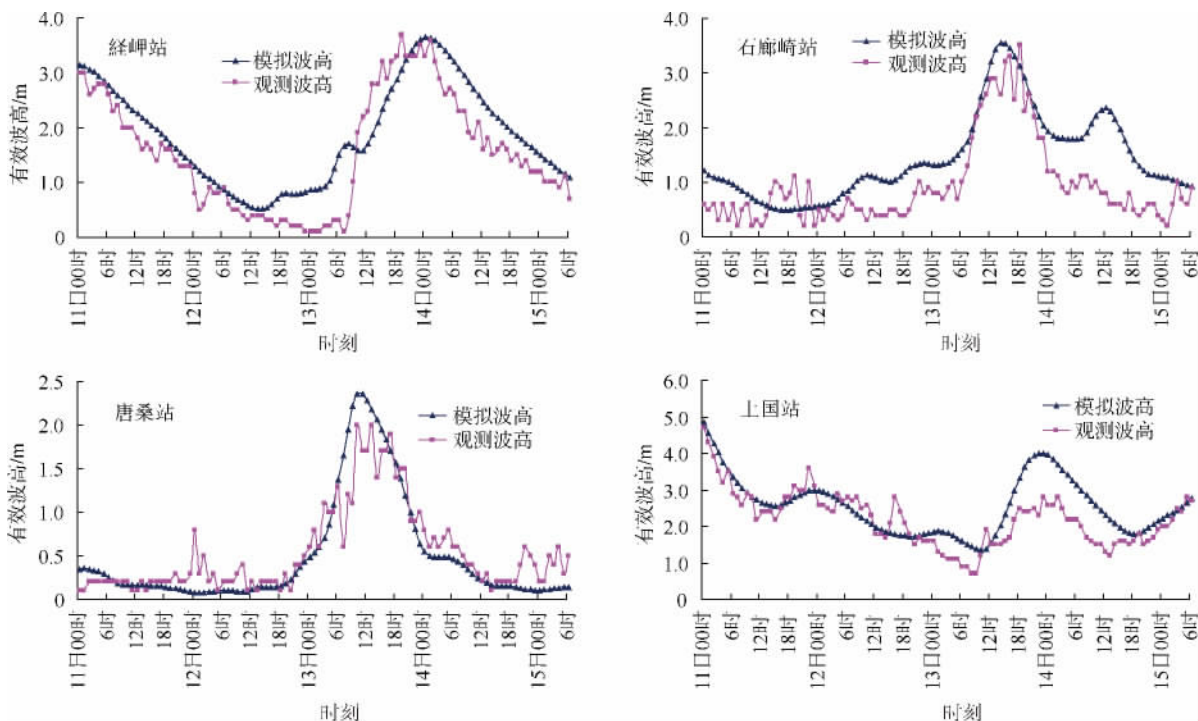


图 3 日本周边海域的观测波高与模拟波高

台湾周边海域(图 4): 冷空气到来之前, 模拟波高与观测波高保持了很好的一致性, 但冷空气到来之后, 模拟波高虽然也有明显的增大过程, 但却和观测值出现一定程度的差异, 仅在东沙岛附近保持了非常好的一致性; 观测波高

的跳跃现象更为明显, 而模拟波高的走势则显得更为光滑。

为了定量地分析模拟 SWH 的精度, 本文还计算了相关系数、偏差、均方根误差以及平均绝对误差, 定量地计算模拟数据的精度, 如表 1 所示。

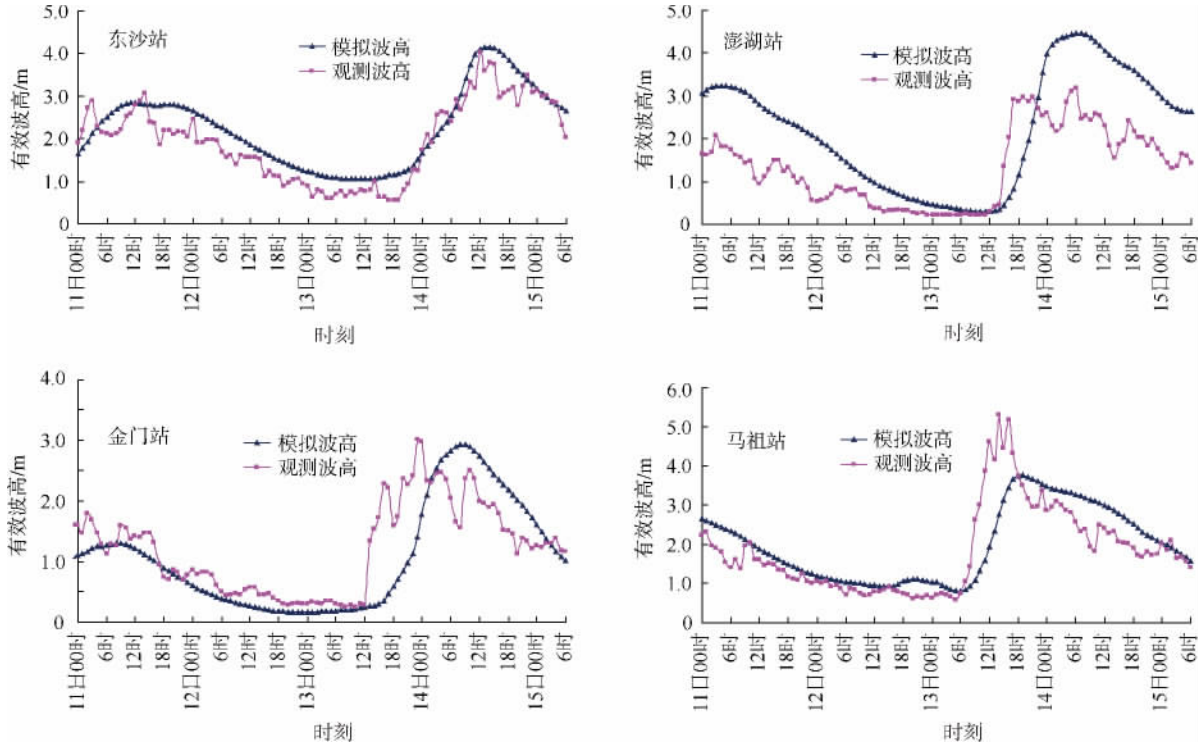


图 4 台湾周边海域的观测波高与模拟波高

表 1 中国海模拟有效波高的精度

海域	站点	站点位置/(°)		相关系数	偏差	均方根误差	平均绝对误差
		北纬	东经				
朝鲜半岛 周边海域	22101	37.3	126.0	0.88	0.004	0.28	0.21
	22102	34.7	125.8	0.95	-0.29	0.60	0.50
	22107	33.1	126.0	0.95	0.23	0.40	0.30
	22108	36.3	125.8	0.94	-0.01	0.37	0.26
日本 周边海域	上国	41.8	140.1	0.77	0.36	0.63	0.49
	唐桑	38.4	141.6	0.90	-0.04	0.27	0.19
	石廊崎	34.6	138.9	0.85	0.51	0.66	0.57
	经岬	25.7	135.3	0.92	0.33	0.53	0.45
台湾 周边海域	马祖	26.4	120.5	0.77	0.17	0.71	0.50
	金门	24.4	118.4	0.75	-0.13	0.59	0.41
	澎湖	23.6	119.6	0.79	0.89	1.23	1.06
	东沙岛	21.0	118.8	0.94	0.32	0.46	0.40

从数据精度的区域型差异方面来看, 台湾海峡的数据精度整体上稍低于其余区域, 这应该是由于台湾海峡的复杂地形所致. 文献 [9] 的研究也发现台湾海峡内某些海域在复杂气象条件下, 波浪产生及传播过程更加复杂, 容易造成海峡内某些海域波浪混乱.

从相关系数来看, 无论朝鲜半岛周边海域、日本周边海域, 还是台湾岛周边海域, 预报波高与观

测波高具有很好的相关性, 相关系数都在 0.75 以上, 都通过了 99% 的信度检验, 6 个站点的相关系数甚至达到 0.90 以上.

从偏差、均方根误差和平均绝对误差来看, 仅澎湖站的误差相对偏大, 偏差 0.89, 均方根误差 1.23, 平均绝对误差 1.06, 其余大部分站点的误差都较小; 在站点 22102、22108、唐桑、金门处, 偏差为负, 表明这 4 个站点的模拟波高略小于观测

波高,其余8个站点的偏差为正,即其余站点的模拟波高略大于观测波高,除澎湖外的其余站点的偏差绝对值较小。

从整体来看,模拟的海浪数据具有较高精度。文献[10-13]的研究也表明了WW3模式对中国海的海浪场具有较强的模拟能力,结合本文的验证结果表明:以T639预报风场驱动WW3模式,可以较好地预报冷空气影响下的中国海SWH。

### 3 击水概率数值预报

击水概率是指飞行器在掠海飞行时(低空或超低空飞行)撞击海浪的概率,是影响掠海飞行器生存能力的重要指标之一<sup>[16-17]</sup>,具体的计算方法为

$$P = \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2)$$

式中 $h$ 为飞行器的飞行高度; $\sigma$ 为与击水概率有关的高度标准差; $\sigma_1$ 为飞行高度探测的标准差; $\sigma_2$ 为海浪浪高的标准差。

利用模拟得到的海浪数据,根据击水概率计算公式,计算得到2013-03-11T00:00—2013-03-15T06:00时逐时的中国海击水概率场,分别计算了飞行高度为5,10,15m时的击水概率,分析冷空气对击水概率的影响,为掠海飞行的航迹规划(如飞行高度、路线的调整等)提供数据支撑。

飞行高度为5m时的击水概率(简称5m高度击水概率):整体来看,当飞行高度为5m时,整个中国海海域的击水概率都在60%以上,尤其是冷空气影响的区域基本都在68%以上,属于低空飞行危险区域,低空或超低空飞行时应特别重视。13日00时(图略),冷空气进入渤海和黄海北部,虽然使得击水概率也出现明显增幅,但由于海域狭小,海浪尚未充分成长冷空气已经南下,因此浪高、击水概率的增幅并不是特别剧烈。在地形效应的影响下,相对大值中心分布于渤海海峡和成山头附近海域,5m高度击水概率在64%左右。13日12时(图5a),冷空气进入黄海中南部,击水概率迅速增大,黄海中南部大部分海域的5m高度击水概率在62%以上,高值中心可达72%以上,这应该是由冷空气进入黄海南部后,海域变得开阔,海浪相对渤海能够得以充分成长所致。14日00时(图5b),冷空气继续南下进入东海,整个东海、黄海南部海域的5m高度击水概率都在66%

以上,但70%以上大值区的范围较冷空气在黄海时明显缩小,琉球群岛附近海域、台湾海峡为击水概率的高值区,基本在68%以上。14日12时(图略),冷空气正在穿越台湾岛向南海移动,台湾周边海域的击水概率也出现了较为明显的增幅,整个台湾岛周边海域的5m高度击水概率都在66%以上,台湾海峡和吕宋海峡为相对高值区,能达到68%以上。15日00时(图5c),冷空气进入南海北部海域,给南海带来了明显的冷涌,击水概率也出现明显增幅,东沙群岛大面积海域的5m高度击水概率在62%以上,整体来看,冷空气进入南海低纬度海域后,强度已经明显不如中高纬度,因而冷空气给南海海域造成的击水概率小于冷空气给东海造成的击水概率。

10m高度击水概率(图5d~图5f):分布特征与5m高度击水概率大体一致。冷空气影响的区域10m高度击水概率在20%~28%之间,较5m高度击水概率降低了约40%,也就是说,当飞行高度从5m升高至10m,击水概率大为降低。冷空气以外的大部分海域的10m高度击水概率基本都在16%以内。

15m高度击水概率(图5g~图5i):分布特征与5m高度击水概率、10m高度击水概率大体一致,但数值上却大为降低,整个中国海的15m高度击水概率都在6%以内。冷空气影响的区域15m高度击水概率在4%~6%之间,较5m高度击水概率降低了约65%,即飞行高度从5m升高至15m,击水概率急剧降低。冷空气以外的大部分海域的15m高度击水概率基本都在2%以内。

传统的应对危险天气多是以规避为主,或是尽可能地抬升飞行高度从而降低击水概率。本文通过精确计算发现:

- 1) 当飞行高度为5m时,整个中国海的击水概率都在60%以上,会对掠海飞行器的自身安全造成很大威胁;
- 2) 当飞行高度抬升至10m时,击水概率较5m高度普遍降低45%;
- 3) 当飞行高度抬升至15m时,击水概率剧烈降低,较5m高度普遍降低65%。

也就是说,在此次冷空气的影响下,以10~15m的高度进行掠海飞行是比较安全的,而不是一味地抬升飞行高度、或远离恶劣海况区域。在直升机海上救援时,舰载机、无人机、巡航导弹低空或超低空飞行时,有定量的击水概率作为科学依据,将能有效提高其生存能力、隐蔽突防能力。



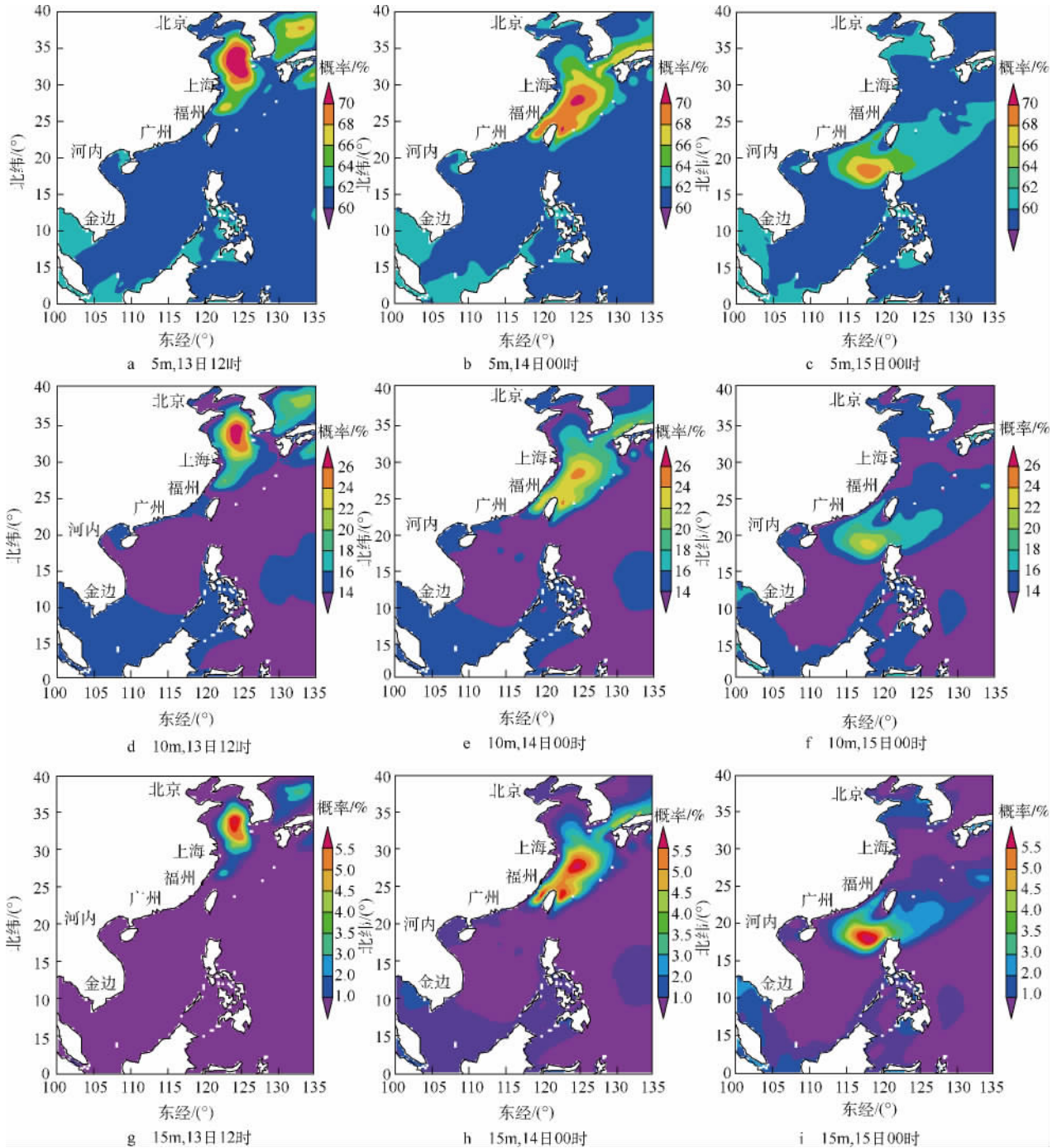


图5 冷空气期间不同高度、不同时间的击水概率

### 4 结论

1) 以 T639 预报风场驱动 WW3 海浪模式, 可以较好地预报冷空气影响下的中国海有效波高. 无论朝鲜半岛、日本, 还是台湾周边海域, 预报波高在走势上与观测波高保持了很好的一致性. 从相关系数、偏差、均方根误差、平均绝对误差等定量地分析发现, 预报波高具有较高精度, 各个站点处的模拟波高与观测波高的相关系数较高, 均通过了 99% 的信度检验; 除了澎湖站的误差相对偏大, 其余 11 个站点处的预报值误差都比较小.

利用 T639 预报风场驱动 WW3 海浪模式来实现击水概率的数值预报是可行的.

2) 在冷空气的影响下, 中国海的击水概率出现明显的增幅. 冷空气进入渤海和黄海北部, 由于海域狭小, 海浪尚未充分成长冷空气已经南下, 因此浪高、击水概率的增幅并不是特别剧烈. 相对大值中心分布于渤海海峡和成山头附近海域, 5 m 高度击水概率在 64% 左右. 冷空气进入黄海中南部后, 击水概率迅速增大, 大部分海域的 5 m 高度击水概率在 62% 以上, 高值中心可达 72% 以上. 冷空气进入东海, 整个东海、黄海南部海域的 5 m

高度击水概率都在 66% 以上,但 70% 以上大值区的范围较冷空气在黄海时明显缩小. 冷空气穿越台湾岛时,整个台湾岛周边海域的 5 m 高度击水概率都在 66% 以上. 冷空气进入南海北部海域,东沙群岛大面积海域的 5 m 高度击水概率在 62% 以上,整体来看,冷空气进入南海低纬度海域后,强度已经明显不如中高纬度,因而冷空气给南海海域造成的击水概率小于冷空气给东海造成的击水概率.

3) 飞行高度为 5 m 时,整个中国海的击水概率都在 60% 以上,会对掠海飞行器的自身安全造成很大威胁;当飞行高度抬升至 10 m 时,击水概率较 5 m 高度普遍降低 45%;飞行高度抬升至 15 m 时,击水概率剧烈降低,较 5 m 高度普遍降低 65%. 在此次冷空气的影响下,以 10 ~ 15 m 的高度进行掠海飞行是比较安全的.

### 参考文献 (References)

- [1] 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)
- [2] Zheng C W, Zhuang H, Li X, et al. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea [J]. Science China Technology Sciences, 2012, 55(1): 163-173
- [3] 郑崇伟,潘静,田妍妍,等. 全球海域风浪、涌浪、混合浪波候图集[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 1-3  
Zheng Chongwei, Pan Jing, Tian Yanyan, et al. Wave climate atlas of wind sea, swell and mixed wave in global ocean [M]. Beijing: Ocean Press, 2012: 1-3 (in Chinese)
- [4] Civil Aviation Authority. Summary report on helicopter ditching and crashworthiness research [M]. Norwich: The Stationery Office, 2005: 14-15
- [5] Kelley D. Survival after helicopter ditching [M]. Kincardineshire: Kelley Consultancy, 2000: 9-10
- [6] 雷小龙,关世义,常伯浚. 掠海飞行导打击水概率的仿真研究[J]. 宇航学报, 1990(3): 16-22  
Lei Xiaolong, Guan Shiyi, Chang Bojun. Simulation study of ditching probability of sea skimming flying vehicle [J]. Journal of Astronautics, 1990(3): 16-22 (in Chinese)
- [7] 秦志明,王明海,湛必胜. 巡航导弹海上生存能力模型研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 71-73  
Qin Zhiming, Wang Minghai, Zhan Bisheng. A study about the model of cruise missile survivability on sea [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(3): 71-73 (in Chinese)
- [8] Zheng Chongwei, Pan Jing, Li Jiaxun. Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009 [J]. Ocean Engineering, 2013, 65: 39-48
- [9] 郑崇伟,周林,宋帅,等. 1307 号台风“苏力”台风浪数值模拟[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2013, 52(3): 395-399  
Zheng Chongwei, Zhou Lin, Song Shuai, et al. Forecasting of the wave field caused by typhoon “Soulik” [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2013, 52(3): 395-399 (in Chinese)
- [10] 周良明,吴伦宇,郭佩芳,等. 应用 WAVEWATCH-III 模式对南海的波浪场进行数值计算、统计分析和研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 1-8  
Zhou Liangming, Wu Lunyu, Guo Peifang, et al. Simulation and study of wave in South China Sea using WAVEWATCH-III [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(5): 1-8 (in Chinese)
- [11] Zheng C W, Zhou L. Wave climate and wave energy analyse of the South China Sea in recent 10 years [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(8): 1349-1356
- [12] Zheng C W, Zhou L, Huang C F, et al. The long-term trend of a sea surface wind speed and a (wind wave, swell, mixed wave) wave height in global ocean during the last 44 a [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(10): 1-4
- [13] 齐义泉,朱伯承,施平,等. WWATCH 模式模拟南海波浪场的结果分析[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 1-9  
Qi Yiquan, Peter C Chu, 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)