海浪综合应用与集约化建设*

郑崇伟[1,2]

（1. 解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101；2. 海军大连舰艇学院 大连 116018）

摘 要：伴着“辽宁”舰下水，国人的航母梦得以实现。认知海洋、利用海洋，方可为我国的全球战略提供坚实的科技支撑。海浪作为重要的海洋水文要素之一，对海战场环境建设、全球气候变化、海洋工程、航海、防灾减灾等都有着重要影响。文章在此就海浪对军事和民用活动的影响、海浪预报、波候（海浪气候态）统计、波浪能开发、海浪对掠海飞行的威胁等方面展开讨论，抛砖引玉，期望可以为海浪综合应用与集约化建设提供参考，为“海之梦”、迈向深蓝尽绵薄之力。

关 键 词：海浪预报；波候；波浪能；海浪武器

海洋是人类生命的摇篮，全球气候变化的重要调节器，海洋同样是一个巨大的资源宝库。海浪作为海洋环境中一个极其重要的要素，对人类的生产、生活有着重要影响，是国防和军事（如，舰载机的起降、抢滩登陆、布设鱼水雷、导弹出水姿态、海上搜救等）、海洋能开发、海洋水文保障、海洋工程等极为关注的海洋要素。通过对近 10 年的《中国海洋灾害公报》统计发现，海浪灾害所造成的人员伤亡在所有海洋灾害中居首位，常造成严重的经济损失、人员伤亡[1-2]。大浪常带来巨大的危害，尤其是海浪中的涌浪，能量巨大、破坏力惊人，常造成非战斗减员，能使舰船发生中拱、中垂、螺旋桨空转失速、触底搁浅等现象，会给舰船造成严重损伤，甚至损毁[3]。但如果能深入把握涌浪的内在规律，充分依据涌浪稳定性好、能量大等优点，进行波浪能资源开发，将给人类带来福祉，前景广阔[4]。海浪发电是波浪能开发利用的主要方式，也是目前各发达国家追逐的焦点之一。近年来，我国在新能源领域也不断取得新的突破，郑崇伟等[5]在 2012 年首次实现了整个全球海域风能资源的系统型评估、等级区划，该项研究的实现意味着我国在海上风能资源评估方面走在了世界前列[6]。

随着我国由“黄水迈向蓝水，蔚蓝迈向深蓝”的步伐不断迈进，深入了解我国近海乃至整个全球海域的海洋环境特征已迫在眉睫，做到“迈向深蓝，海洋环境研究和风险评估先行”的原则，方可有效避免盲目开发和不必要的损失。建立海浪的综合应用系统，是人类高效开发利用海浪的先决条件。本研究在此就海浪对军事和民用活动的影响、海浪预报、波浪能开发、海浪对掠海飞行的威胁等方面展开讨论，抛砖引玉，期望可以为“海之梦”、“中国梦”、迈向深蓝尽绵薄之力。

1 海浪对军事、民用活动的影响

海浪对军事、民用活动都有着重要的影响。台风浪的危害已被大家熟知，人们往往容易忽视冷空气大浪所造成的影响。实际上冷空气的危害也不亚于台风浪，而且发生频率还远远高于台风。1979 年 11 月，我国“渤海 2 号”钻井船受寒潮大风浪袭击而沉没；1999 年 11 月，“大舜号”客混船从烟台驶往大连途中，遭遇寒潮大风浪而倾覆，全船 304 人仅 22 人生还，直接经济损失达 9 000 余万元；2011 年 12 月，强冷空气大浪造成的俄罗斯鄂霍次克海石油平台沉没，造成了巨大的损失。海浪对军事活动同样有着重要影响：1999 年 8 月，台湾空军 3 架飞机遭遇台风浪损毁，其中含两架高性能的 F—

* **基金项目**：国家重点基础研究发展规划项目（2012CB957803）.

16 战斗机；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；2012 年 3 月，台湾一架海鸥直升机救人时，遭遇恶劣海况而撞击海面[7]。上述事例还有很多，我国位于西太平洋边缘，夏季常常遭受台风的侵袭，冬季冷空气频发，深入研究海浪的影响具有实用价值。

1.1　海浪对舰艇、舰载武器的影响

1.1.1　对舰艇活动的影响

海浪对舰艇活动的影响主要是使舰艇发生偏摆（纵摇或横摇）、中垂、中拱、淹埋振荡、螺旋桨空转失速等。海浪较大时还会造成舰艇的倾覆，大涌能使近岸活动的舰艇触底搁浅。大浪能使航行中的舰艇航向和航速发生改变，能使锚泊的舰艇发生漂移。

海浪还会制约反潜舰艇的机动性能和作战性能，猎潜艇一般在 3～5 级海况下能有效使用武器，5～7 级海况下能安全航行。驱逐舰和护卫舰可在 8～10 级风浪中安全航行。

1.1.2　对舰载机的影响

舰载机的起降对海况的要求却很高。美海军规定，航母舰体必须在 6 级海浪以下（＜4.0 m）、纵倾小于 2～3 度、横摇小于4～6 度的情况下才能起降舰载机。一旦风力达到 8 级，海浪达 6～7 级，大部分舰载机便难以起飞。还会影响直升机的悬停。

另外，高海况下变深声呐和拖曳声呐很难放下和回收，对直升机搜潜和反潜将带来极大的困难。

1.1.3　对导弹的影响

水面舰艇常规导弹：海浪直接影响到掠海飞行器的击水概率（即撞击海面的概率），海浪能对雷达形成强烈的反射，当海浪杂波的强度超过一定程度时，就会使对海导弹末制导雷达产生虚警，捕捉并跟踪海浪，从而失去真正的目标。当导弹逆着或顺着海浪飞行时，导弹还会受到由海浪上下抽动空气引起的非定常垂直阵风的影响，易被海浪淹埋；非定常气动效应还可能引起导弹弯曲或颤振，弯曲或颤振现象若出现在舵执行机构、速率陀螺和加速计带宽内的频率上，可扰乱自动驾驶仪的激励，从而严重影响导弹巡航性能。在较高海况下，垂直阵风可能会造成较大的导弹高度变化，因而产生控制问题。因此，掠海飞行导弹的预定飞行高度应根据海况确定。

潜射导弹：海浪较大时会影响导弹的出水姿态，发射导弹应选择海况等级较低的时候。海浪对导弹出水姿态有影响，主要取决于海浪传播方向、波高、波级和导弹出水时所处的波浪相位。在波高、波向一定的情况下，导弹出水姿态随出水相位而变化。在波峰和波谷附近出水姿态最大；在逆浪波谷和顺浪波峰处出水时，影响导弹的横向速度减小了，导致导弹攻角减小，形成较小的出水姿态。纵浪只影响导弹的俯仰状态，而横浪则是引起导弹偏航和滚动姿态变化的主要干扰因素。

1.1.4　对舰炮、鱼雷、水雷的影响

一般在 5 级海况以下才能保证舰炮正常射击。鱼雷耐波性能较差，只能在近岸和 4 级海况下使用。大的海浪能使水雷漂离预定位置，从而影响布雷的准确性。

1.1.5　声呐

波浪会对声呐浮标的探测性能产生极大的影响，3.04 m 高的波浪将使声呐浮标的传输信息损失 75%，4.57 m 高的波浪几乎使声呐浮标的传输信息完全丧失。

1.1.6　登陆作战

海浪较大时影响舰船靠岸、登陆兵力的换乘、登陆兵力的抢滩、造成卸载和舰艇退滩的困难，在登陆编队庞大的情况下，易发生碰撞和混乱，直接影响上陆阶段的编队和冲击，海况差时甚至会造成严重的非战斗减员，拍岸浪较大时，部队不易登陆。诺曼底登陆，总的来说是成功的，但大的风浪造成了大量舰艇、坦克、人员的损失。

1.1.7　非战斗减员

高海况会使得作战人员发生晕动病，造成精力和体力下降，严重时会引起非战斗减员，影响海上作业、训练和作战效果。据研究一般风浪时人员晕船的发生率在 10%～30%，大风浪时高达 60%，未经训练的人晕船率为 50%～90%。

1.2 海浪对民用活动的影响

1.2.1 海洋能开发

随着人类的不断发展，对能源的需求日益加大，在常规能源（煤、石油等）日益紧缺的今天，发展清洁能源显得尤为迫切。目前，风能和太阳能已实现业务化，但受地域限制严重；核能能量巨大，但危险性较大，如 2011 年 3 月日本的核泄漏造成了严重危害；而海洋能具有无污染、可再生、储量大、分布广的优点，海浪发电必将发挥其独特的优势，据联合国教科文组织出版的《海洋能开发》认为，全球各种海洋能的理论可再生功率约为 7.66×10^{10} kW，其中各类海洋能的数量级以盐差能和温差能最大，各为 10^{10} kW；波浪能和潮汐能次之，各为 10^{9} kW；海流能最小，为 10^{8} kW。目前波浪发电的装置可为海水养殖场，海上灯船，海上孤岛，海上气象浮标，石油平台等提供能源，还可以并入城市电网提供工业或民用的能源，全球波浪能的发展趋势已转向以为海岛供电的中小型实用性、商业化电站为目标，海浪发电也是目前各发达国家追逐的焦点之一，在边远海岛实行海浪发电、海水淡化必将具有广阔前景。

1.2.2 海上施工

大浪对海上施工会带来影响，严重时甚至会将施工平台损毁，海洋工程中对极值波高都较为关注。

1.2.3 渔业

高海况会给捕鱼带来负面效果，但海浪会促进海水上下层的混合，使混合后的水层定富有氧气，满足海中鱼类和其他动植物的需要，利于渔业。

1.2.4 海上搜救

高海况会对舰船、飞机等的海上救援活动带来严重影响，使得救生器材、设备无法正常使用。

2 海浪的研究进展

2.1 海浪的定义及分类

海浪是指发生在海洋中的一种海水波动现象，是水质点离开平衡位置，作周期性振动，并向一定方向传播而形成的一种波动，是海面起伏形状的传播，由波高、周期和波长等要素组成，是海水运动的主要形式[8]。一般指的海浪是由风产生的波动，其周期范围通常为 0.5～25 s，波长为几十厘米到几百米，有效波高（SWH——Significant Wave Height）一般为几厘米到 20 m，在极其罕见的情况下 SWH 可达 30 m 以上。

海洋中波动从不同的角度有不同的分类方法，按成因可分为：风浪（wind sea）、涌浪（swell）和近岸浪（又称拍岸浪）、风暴潮（又称风暴海啸）、海啸（又称地震波）、气压波、内波、潮汐波。风浪：当地风产生，且一直处在风的作用下的海面波动状态。风浪分布很不规律，波峰尖削，波面较陡（背风面比迎风面陡），周期较小，波峰线短，波峰附近常伴有白色浪花或大片泡沫，风浪的成长与大小，主要取决于风速、风时、风区和水深。涌浪：海面上由其他海区传来的或者当地风力迅速减小、平息，或者风向改变后海面上遗留下来的波动。涌浪的波面光滑，周期和波长比较大，波峰线长，在海上的传播较规则，涌浪在传播过程中没有能量补充，随着其传播会逐渐消衰，波高变小，波长变长，周期变大，波速变快。在实际海洋中，涌浪往往具有惊人的破坏力，能使舰船发生中拱、中垂等现象，会给舰船造成严重损伤；由于涌浪能量的稳定性，近年来国际上对涌浪发电十分重视，对涌浪的研究正成为全球新的热点。近岸浪：由外海的风浪或涌浪传播到近岸，受到地形影响而改变波动性质的海浪。近岸浪的波速和波长随水深变浅而减小，波峰线会逐渐与等深线平行，波峰前侧较陡，后侧较平波面随水深变浅而越加不对称，直至卷到破碎。

2.2 海浪的研究现状

远古时代的人类就开始知道利用海浪的动力，也积累了许多关于海浪研究的经验，但真正对海浪进行系统的研究，却始于第二次世界大战期间。当时由于军事上的需要，美国空军气象局海洋部委托斯克里普斯海洋研究所的科学家斯韦尔德鲁普和蒙克探索海浪预报的方法，最后得到了根据风要素预报海浪要素的半经验半理论的方法。海浪是一种极为复杂的随机现象，其物理机制的研究进展也较缓慢，实际运用中提出了一些计算方法，大致分为三类：半

经验半理论方法、利用观测资料建立统计方法、数值模拟。

（1）半经验半理论方法：比较有代表性的有 PNJ 波谱法、有效波方法、我国的港口水文设计规范海浪计算方法。这些方法虽然理论上不是十分严谨，但计算结果与实测资料较为一致，使用也较为方便，有的至今仍被广泛运用。

（2）利用观测资料建立统计方法：直接利用实测资料建立经验统计方法，如有 Wilson 公式、Bretschneides、井岛、宇野木等提出的计算公式，这种方法应用方便，被很多应用部门广泛采纳。缺乏严格的物理和数学基础。

（3）数值模拟：1957 年起，以 Gelci 为首的研究小组完成了基于二维谱传输方程的海浪数值模式的开发研究工作，自此开创性的工作以来，人们已经建立了采用二维海浪谱的基本传输方程的若干海浪数值预报模式。之后海浪数值模拟发展迅速，到目前的第三代海浪数值模式，以 WAM、SWAN（Simulating WAves Nearshore）、WW3（WAVEWATCH－III）为典型代表，海浪数值模拟日趋成熟。

2.3　海浪数据

海洋研究离不开丰富的海洋数据，否则便会出现“巧妇难为无米之炊”的尴尬局面。常用的海浪资料有人工观测数据、浮标观测资料、船舶报数据、海洋调查船观测数据、卫星资料反演的海浪数据、数值模拟海浪数据和同化数据等[9－10]。随着人们的海洋意识不断增强，越来越多的先进设备、方法运用于海浪数据的获取，即便如此，相对整个全球广袤的海洋而言，海洋资料仍显得极为稀缺，这种困境在我国尤为突出。

我们努力收集整理了各种珍贵的观测资料，主要包括来自韩国、日本、美国等国家和地区的风、浪、流、温、盐等要素。此外，还收集整理了来自欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium－Range Weather Forecasts，ECMWF）、美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Adnimistration，NASA）等机构的海浪模拟数据、同化资料等。还利用具有高精度、高分辨率、长时间序列的多平台交叉校正（Cross－Calibrated，Multi－Platform，CCMP）风场，驱动 WW3 海浪模式，首次模拟得到长时间序列、高精度、高时空分辨率的中国海海浪场，并建立数据库，期望可以为我国科研人员提供数据支撑。

3　海浪预报

3.1　短期数值预报

在前人的巨大贡献下，海浪数值模拟已发展至今天的第三代数值模式，以 SWAN 和 WW3 为典型代表，这两个模式在很多国家已经业务化运行。但目前我国的海浪数值预报存在军地、军队内部、地方内部的重复建设现象。在没有消耗国家任何经费的情况下，利用 WW3 海浪模式、预报风场、1′×1′的 Etopo1 资料水深数据，建立了中国海海浪场的短期数值预报系统[11]，期望可以为国家海洋建设提供借鉴，避免相关工作重复建设和资金浪费。

以 1307 号台风“苏力”所致的台风浪预报为例（图 1 至图 3）。将预报效果与韩国、日本、我国台湾的海浪浮标资料进行对比，无论定性地观察预报值与观测值的曲线走势，还是定量的计算相关系数（CC）、偏差（Bias）、均方根误差（RMSE），预报的海浪场具有较高可信度。

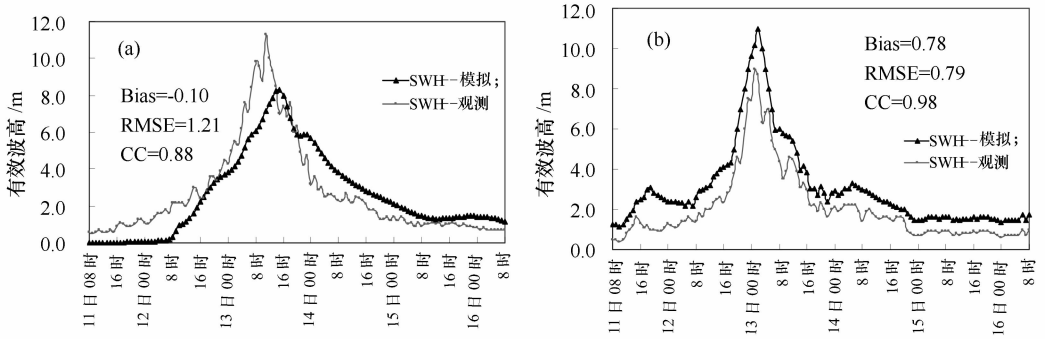

图 1　a－b：1307 号台风“苏力”期间马祖浮标站、苏澳浮标站的观测 SWH 与预报 SWH

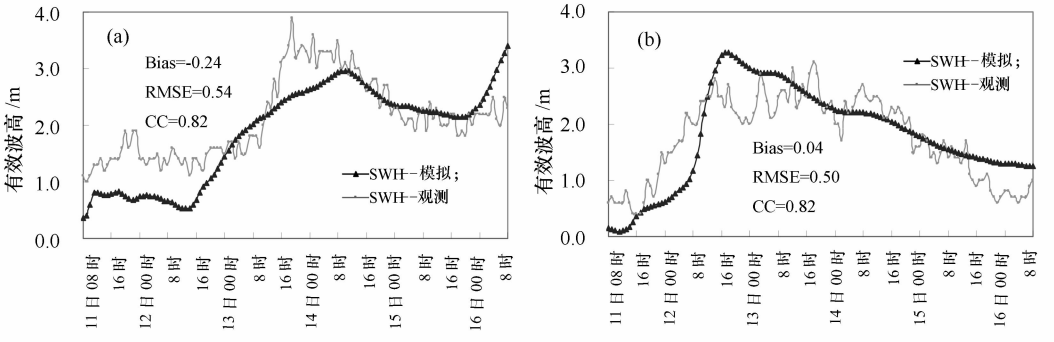

图 2 a—b：1307 号台风“苏力”期间韩国 22107 浮标站、日本屋久岛浮标站的观测 SWH 与预报 SWH

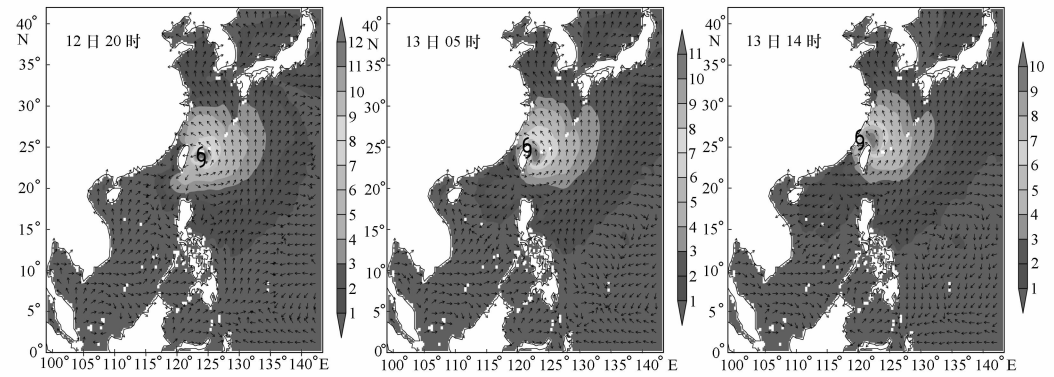

图 3 1307 号台风“苏力”期间中国海及周边海域的预报海浪场

3.2 波候统计

海浪短期数值预报通常为 3～7 天，无法为中长期计划提供指导；进入陌生海域执行任务，航海人员也没有太多经验可以借鉴，这就需要对中国海乃至整个全球海域的波候（海浪气候态）特征进行系统性统计，为中长期计划、全球战略提供科学指导[9,12-13]。前人对我国的波候特征做过很多工作，但由于受到资料稀缺、工作量巨大等问题的限制，以往多是利用极为有限的观测资料，在单站或局部小范围展开的统计，即使是大范围海域的海浪统计，在空间分辨率方面也很粗糙，数据精度等方面都存在的缺陷，不利于实用。

笔者以巨型机为运行平台，采用并行高效计算方法，利用 CCMP 风场驱动 WW3 海浪模式，模拟得到中国海海浪场。充分利用各种先进的气候学统计方法，对中国海的波候特征进行了精细化统计分析，绘制了覆盖整个中国海及周边海域的海浪场气候图集，具有覆盖范围广、空间分辨率高、数据精度高、实用性强等优点。主要内容包括：海浪场（含波高、波向）的月变化特征，年平均有效波高的分布特征；有效波高逐年、逐春季、逐夏季、逐秋季、逐冬季的变化趋势；波浪等级频率（尤其是大浪频率）；波向频率；极值波高（主要计算了 30 年一遇极值波高、50 年一遇极值波高、100 年一遇极值波高）；重点海域有效波高的月变化特征；重点海域有效波高的日变化特征；利用 Nino3 指数辅助中国海大浪频率、有效波高的中长期预测；海浪场短期数值预报；海浪短期数值预报与中长期预测的有机结合。部分产品见图 4、图 5。

此外，笔者还利用来自 ECMWF 的 ERA－40 海浪再分析资料，系统性地统计了全球海域波候特征，制作了《全球海域风浪、涌浪、混合浪波候图集》[1]，期望可以为全球战略提供参考和辅助决策。

3.3 利用 nino3 指数辅助海浪的中长期预测

短期数值预报可为短期计划提供很好的依据，波候特征也可以较好地为中长期计划提供

参考，但波候只能反映不同季节的大概特征，季节特征虽然整体稳定，但不同年份肯定会出现一定的差异，就如某些年份是暖冬，而某些年份是寒冬一样。笔者利用模拟得到的 1988 年 1 月—2010 年 12 月逐月（共 276 个月）的中国海海浪数据，分析了中国海的有效波高与 nino3 指数的同期、超前、滞后相关，结果表明滞后 8 个月后的有效波高与当月 nino3 指数表现出很好的一致性（图 6 和图 7）。笔者的研究还发现中国海的大浪频率和 nino3 指数也存在密切的相关，还具有共同的 3.5－4.7 年的显著性变化周期，以及 7 年的长周期变化[14]。作者拟根据这个显著性相关建立回归方程，实现中国海大浪频率、SWH 的中长期预测。

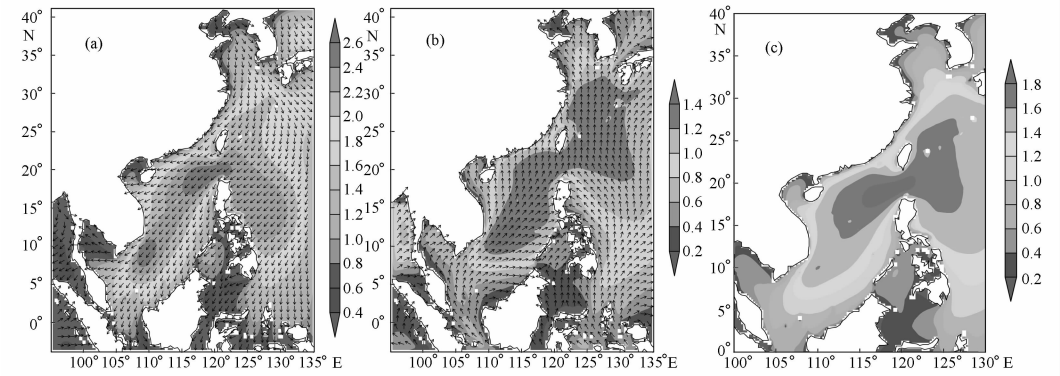

图 4　a－c：中国海及周边海域 1 月、7 月的海浪场及年平均有效波高
为了便于观察，以背景色代表波高大小（单位：m），以矢量箭头代表波向

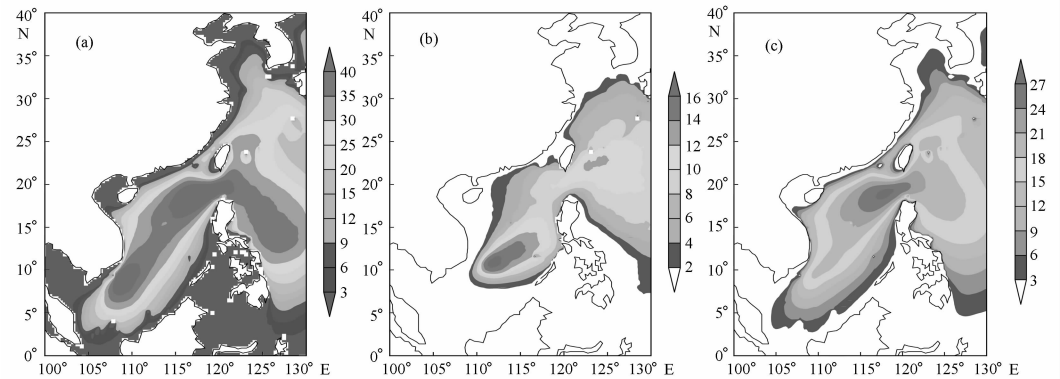

图 5　a－c：中国海及周边海域 1 月、7 月及全年 2.5 m 以上大浪出现频率，单位：%

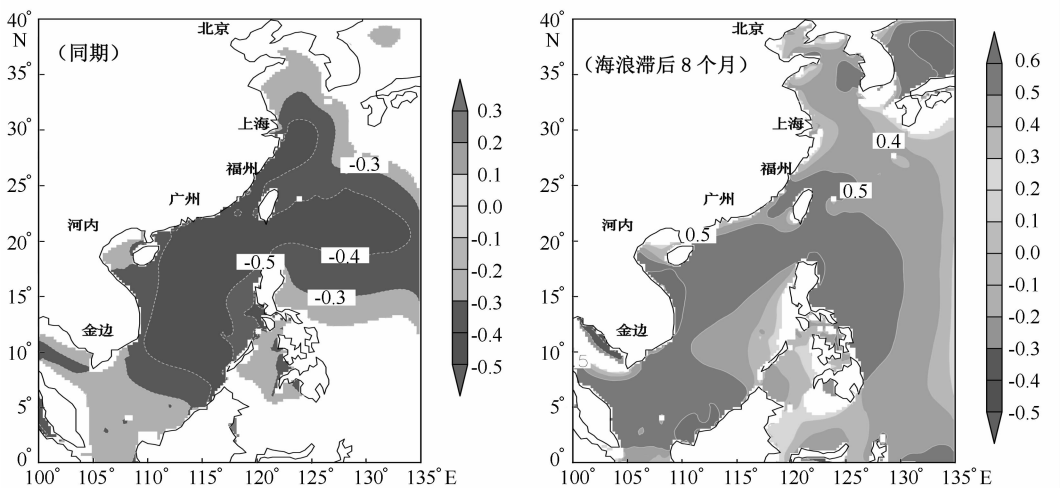

图 6　同期、滞后 8 个月的中国海 SWH 与当月 nino3 指数的相关

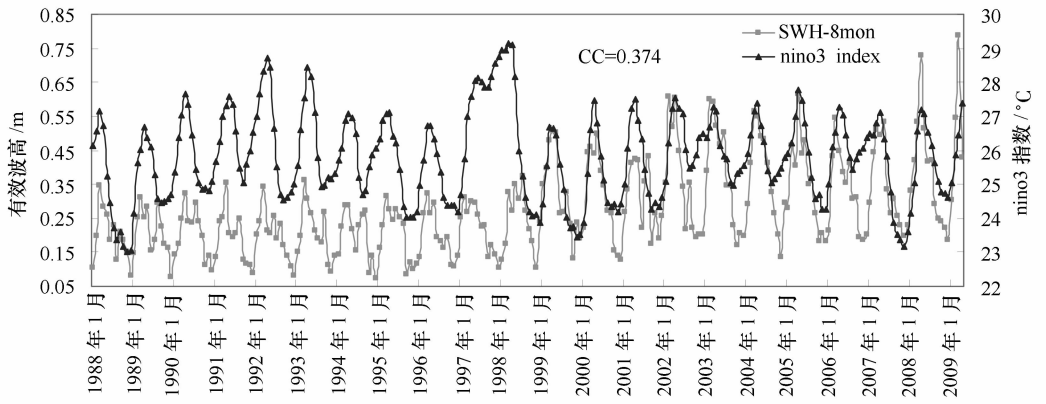

图 7 滞后 8 个月的中国海有效波高与当月 nino3 指数的相关

4 波浪能

前人对海浪研究做了很多工作和很大贡献，但提到海浪，传统观念更多的是联想到台风浪、冷空气大浪的巨大破坏性，进而想到怎么做好海浪的短期预报，这主要是就防灾减灾而言。人类要发展，就不能仅仅停留在防灾减灾，而是需要不断进步，充分利用海浪造福人类。在煤、石油等常规能源日益紧缺、环境危机、资源危机严重困扰人类的当今世界，发展清洁能源是应对气候变化和缓解能源危机的有效途径[15,5-6]。为应对能源危机，我国采取了“西气东输”、“西电东送”、大力开发核电等新能源的发展战略，即便如此，电力供应仍有很大的缺口。我国拥有 300 万 km^2 余的海洋国土，岛屿众多，有居民海岛能源十分紧张，严重制约海岛的经济活动。

海浪发电同样具有广阔的军事前景，如某些远离大陆的岛礁，电力供应紧张，基本只能靠舰船补给的柴油进行发电，在海况恶劣时，补给相当困难，这就严重制约海岛的军事和经济活动。如果在这些岛礁大力实施海浪发电，不仅可以解决驻军的电力困境，淡水困境也随之解决。而且海浪发电具有很强的战时防破坏能力，设备位于水面以下，不易被发现，大面积散点布设，只要还有一小部分装备处于工作状态，即可保证电力供应。美军已经在夏威夷展开海浪发电实验，并利用其隐蔽性好的优点为潜艇充电，这样潜艇可以不用浮出水面，减少了被发现的概率。因此，充分发挥波浪能的资源优势，进行海浪发电、海水淡化、供热、制氢等，将具有广阔前景。

4.1 波浪能系统性评估、等级区划

资源开发，评估先行。波浪能资源的系统性评估、资源等级区划等工作可以为波浪能开发（如海浪发电）的选址提供指导。前人对波浪能资源评估做了很大贡献，但以往多是单单就波浪能流密度的大小展开的讨论，且由于受到资料、技术等问题的限制，以往多是针对单站、或局部小范围海域展开的资源评估。Zheng 等[16-17]将资源评估与海浪数值模拟相结合，实现了大范围海域波浪能资源的数值模拟，定义了波浪能资源开发的可用波高，综合考虑能流密度的大小、能级频率、可用波高出现频率、能流密度的稳定性和长期变化趋势，精确计算了单位面积的波浪能资源总储量、有效储量、技术开发量，对全球海域的波浪能资源进行了系统性评估、资源等级区划，还对中国海的波浪能资源进行了精细化评估，结果可为资源开发的选址提供指导。部分资源评估要素见图 8。

4.2 波浪能预报

发电装置安装好之后，在实际的开发过程中，往往更关注某个具体站点的波浪能变化情况，实现能流密度的数值预报显得尤为重要，可为发电装置提供日常保障，以提高装备的采集、转换效率。目前为止，国内尚未实现波浪能流密度的数值预报，我们以预报风场驱动 WW3 海浪模式，在国内首次实现了波浪能流密度的数值预报[18]。

以一次冷空气期间的波浪能预报为例（图9）。由预报效果可以发现：一次中等强度的冷空气能够使其影响区域的波浪能流密度高达60 kW/m以上，大值中心甚至在100 kW/m以上，而冷空气在冬季频繁影响中国海，且规律性较强，充分做好冬季冷空气带来的波浪能流密度预报，将会有效促进波浪能的采集于转换。同理，中国海夏季受西南季风影响显著，同样也会带来丰富而又稳定的波浪能资源。综上，做好波浪的预报具有很强的实用性。

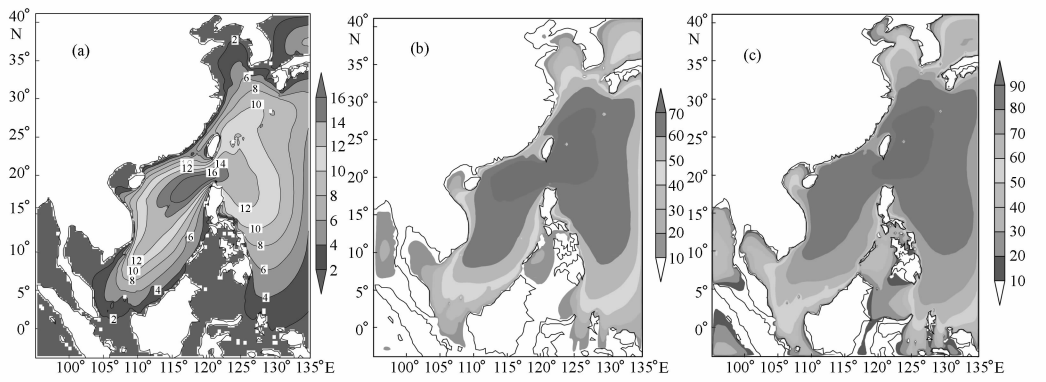

图 8　a—c：中国海及周边海域的年平均波浪能流密度（单位：kW/m），2 kW/m 以上能流密度出现频率（单位：%），波浪能资源开发的可用波高出现频率（单位：%）

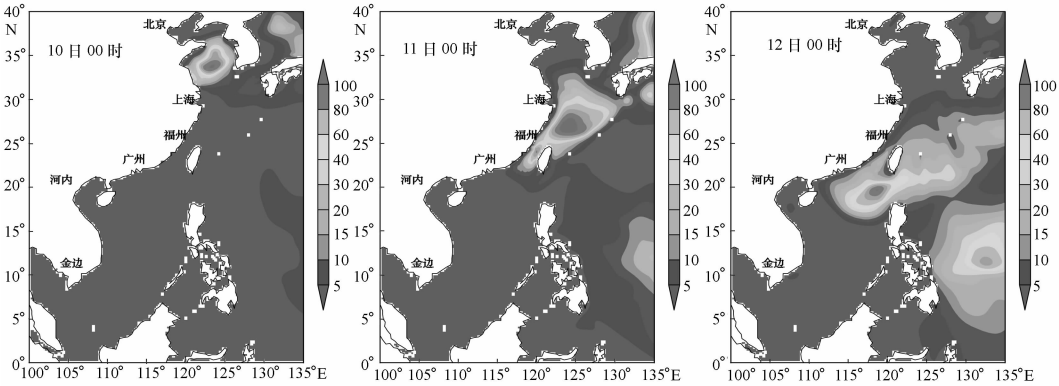

图 9　2013 年 3 月一次冷空气期间的波浪能流密度，单位：kW/m

5　海浪对掠海飞行的威胁

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。笔者期望可以通过精确计算、合理规划，有效利用台风浪、冷空气大浪等危险天气，使海上搜救任务达到更优的效果，也可以使掠海飞行器达到隐蔽突防的效果[7,19]。

随着我国军地海洋建设的快速发展，无人机、舰载机、巡航导弹、救援直升机等飞行器在海战场环境建设、海洋矿产勘探、非战争军事行动中应用越来越广泛，有时为了达到更优的效果，会要求低空或超低空飞行，飞行过低则容易撞海，导致任务失败。这就需要对击水概率（撞击海面的概率）做出精确分析，以提高掠海飞行器的生存能力。

5.1　击水概率数值预报

由于受到资料、运算量等问题的限制，以往对击水概率的研究多是基于极为有限的观测资料，在单站、局部小范围海域展开，尚未实现大面积海域的击水概率研究。我们将海浪数值模拟与击水概率相结合，实现了大面积海域击水概率场的数值分析。在实际的应用中，对预报的需求则更为迫切，我们首次实现了击水

概率的数值预报，可为提高掠海飞行的航迹规划等提供科学指导。击水概率的数值预报效果图见图 10、图 11。计算、对比了不同飞行高度的击水概率，在保证掠海飞行器自身安全的情况下，尽可能降低飞行高度，达到出其不意的攻击效果。

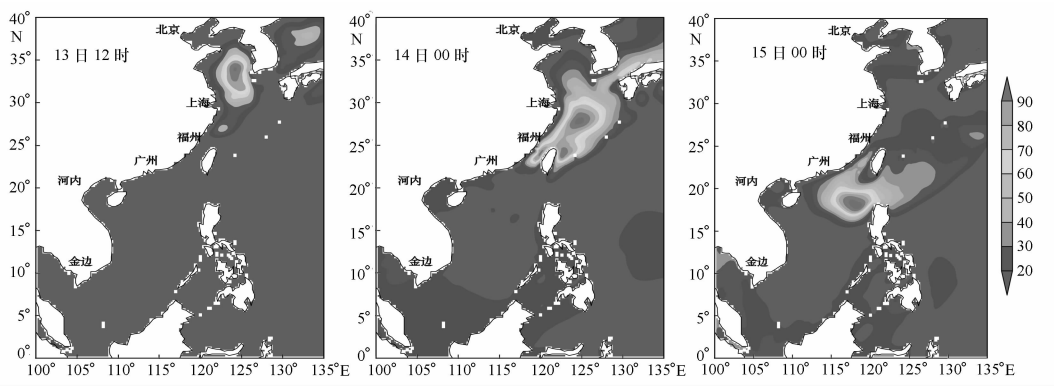

图 10 2013 年 3 月一次冷空气期间，15 m 飞行高度的击水概率数值预报，单位：%

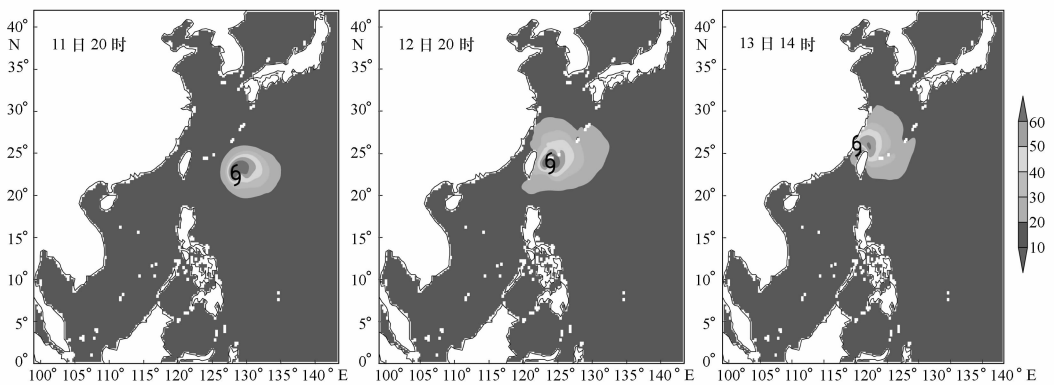

图 11 1307 号台风“苏力”期间，10 m 飞行高度的击水概率数值预报，单位：%

5.2 击水概率的气候特征

与海浪短期预报存在相似的不足，击水概率的短期预报也不能为中长期计划提供参考，这就需要采用数值模拟手段，模拟得到长时间序列、高分辨率的击水概率数据，并统计其季节特征，将击水概率的气候特征、短期数值预报进行有机结合，为掠海飞行器的航迹规划提供科学依据。

6 展望

伴着“辽宁”舰下水，国人的航母梦得以实现，我国大航海时代掀开新的一页。认知海洋、利用海洋，方可为“海之梦”、“中国梦”、我国的全球战略提供坚实的科技支撑。狂风巨浪常给人类带来巨大的危害，但同样也能给人类带来福祉，当然这必须基于人类能够深入把握海浪的内在规律，并加以灵活运用。在人们越发关注环保，而雾霾天气也越发严重的当今世界，充分开发利用海洋能，可有效缓解能源危机、环境危机，促进我国乃至整个人类社会的可持续发展。

参考文献

[1] 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.

[2] 许富祥．海浪预报现状与未来[J]．海洋预报，2005，25(增刊)：172－175.

[3] 朱福海，周立佳，邵利民，等．军事航海气象[M]．北京：海潮出版社，2002.

[4] 郑崇伟，李训强．基于 WAVEWATCH－III 模式的近 22 年中国海波浪能资源评估[J]．中国海洋大

学学报：自然科学版，2011，41(11)：5－12.

[5] ZHENG C W, PAN J. Assessment of the Global Ocean Wind Energy Resource [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 382－391.

[6] 高悦．我国海上风能资源评估获突破性进展[N]. 中国海洋报，2014－03－05(A1).

[7] 郑崇伟，潘静．基于 WW3 模式的台风浪对掠海飞行器击水概率的影响分析[J]. 解放军理工大学大学学报：自然科学版，2013，14(4)：467－472.

[8] 冯士筰，李凤岐，李少菁．海洋科学导论[M]. 北京：高等教育出版社，1999.

[9] 郑崇伟，林刚，孙岩，等．近 45 年太平洋波浪特征分析[J]. 热带海洋学报，2012，31(6)：6－12.

[10] ZHENG C W. Simulation of the wave field caused by 1307 Typhoon "Soulik"[J]. *Journal of Xiamen University*, 2014, 53(3): 257－262.

[11] 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，2014，53(2)：257－262.

[12] 郑崇伟，李训强，潘静．1957－2002 年南海－北印度洋海浪场波候特征分析[J]. 台湾海峡，2012，31(3)：317－323.

[13] 郑崇伟，林刚，邵龙潭．1988－2010 年中国海大浪频率及其长期变化趋势[J]. 厦门大学学报：自然科学版，2013，52(3)：395－399.

[14] 郑崇伟，刘铁军，钱粤海．1988－2009 年中国海海表风场、海浪场对 El Nino 的响应[J]. 云南大学学报：自然科学版，2014，36(2)：214－223.

[15] 郑崇伟，苏勤，刘铁军．1988－2010 年中国海波浪能资源模拟及优势区域划分[J]. 海洋学报，2013，35(3)：104－111.

[16] ZHENG C W, PAN J, LI J X. Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009 [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 65: 39－48.

[17] 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. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(10): 1－4.

[18] 郑崇伟．利用 WW3 模式实现中国海波浪能流密度的数值预报[J]. 亚热带资源与环境学报，2014，9(2)：1－6.

[19] 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.