

SWAN 模式对黄渤海海域浪高的模拟能力试验

李 燕^{1, 2}, 薄兆海²

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730001; 2. 大连市气象台, 大连 116001)

摘 要: SWAN 模式即第三代浅水波浪数值预报模式, 不仅能仔细考虑能量平衡方程式中的各项源函数, 而且对近海海域(浅水)以及复杂地形海域的浪高有很好的模拟能力。本文在简述我们从青岛海洋大学“九·五”国家重点科技攻关项目中引进的 SWAN 模式的基础上, 详细论述了 T213 和 MM5 两种风场资料在 SWAN 模式中的应用及对对比验证。发现 MM5 海平面上空 10m 处风场资料优于 T213 的 1 000 hPa 风场资料, 用在 SWAN 模式对黄渤海海域浪高模拟中预报结果较好。

关键词: SWAN 模式; 风场资料; 浅水波浪数值预报; MM5; 浪高

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2005)3 - 0075 - 08

1 引言

以前我们进行海浪预报总是基于风的预报, 所对应的风套浪经验浪高作为海浪预报值, 没有考虑能量输入、能量损耗、折射、绕射、浅化及反射等机理的作用, 因此具有很大的局限性。对此, 我们引进了青岛海洋大学(现中国海洋大学)“九·五”国家重点科技攻关项目^[1]—海浪数值预报研究中的 SWAN 模式^[2], 它是应用当今最新波浪研究成果发展起来的, 并经过若干理论及现场观测资料验证的第三代浅水波浪数值预报, 我们根据其特点和性能, 选取了两个风场资料(T213 的 1 000 hPa 风场和 MM5 海平面 10m 处的风场)进行模式运算, 预报出黄渤海海域的波浪场浪高值。经黄渤海沿岸气象台站实况风场所对应的风套浪经验浪高验证, 表明 MM5 海平面上空 10m 处风场资料符合模式要求, 对黄渤海海域浪高有一定的预报能力。结束了我台风套浪经验预报法, 开创了我台海浪数值预报新方法。

2 基本概念

2.1 “浅水”的定义

浅水是一个相对的概念, 当水深大于波长的一半, 我们说相对于这种波长的波是无

限深水；当水深小于波长的一半，那么相对于这些波，该水深是浅水。

2.2 波浪数值预报模式近况^[3]

波浪数值预报模式历经三代：第一代波浪模式（60年代末70年代初），没有考虑能量的完全守恒，没有考虑波波相互作用，认为波的各个分量在风的作用下独立的达到充分成长状态，它低估了波波相互作用，而过高估计了风输入；第二代波浪模式（70年代），认识到波波相互作用的重要性，考虑了能量的完全守恒，但由于计算量太大，它对海浪谱和非线性波波相互作用进行了参数化，相对比较可靠，只是在处理突变风场是不合理的；第三代波浪模式八十年代后期开始研究开发，包括深水波模式和浅水波模式（SWAN 模式）。

3 SWAN 模式简介

3.1 SWAN 模式的特点

第三代波浪数值预报适用于风浪、涌浪及混合浪的预报，最大的优点是对谱形不作事先假定，更多地考虑能量平衡方程式中源函数各项因素，更具有理论优势。其中 SWAN 模式能合理预报计算域中波高变化规律，同时由于模式中包括三相波相互作用，也能合理预报计算域内波周期、波长、波陡、波浪行进方向、近底水质点的运动速度、波能传播方向及能量耗散率、单位水面面积所受波力等海岸工程所需的重要参数；由于应用近年来最新科研成果，合理计入浅水波浪破碎效应，和其他模式相比，该模式尤其能对于破波带适用，即使在很浅水域，起始时间步长也可以很大（例如网格步长 10m 时时间步长可长达 0.5h）。黄渤海深浅不一，海底地形复杂，因此用 SWAN 模式比较适合。

3.2 动谱能量平衡方程及数值算法

SWAN 不是以二维能谱密度而是以二维动谱表示随即波，因为在流场中，动谱密度守恒，而能谱密度不守恒，动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 为能谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 与相对频率 σ 之比。 $N(\sigma, \theta)$ 随时间、空间而变化。在笛卡尔坐标系下，动谱能量平衡方程可表示为：

$$\frac{\partial}{\partial t} N - \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

方程左边第一项为 N 随时间的变化率；第二项和第三项表示动谱密度在空间 x 、 y 方向上的传播；第四项表示由于流场和水深所引起的动谱密度在 σ 空间的变化；第五项表示动谱密度在 θ 空间的传播，亦即水深及流场而引起的折射；方程右边的 S 代表以谱密度表示的源汇项，包括风能输入、波与波之间非线性相互作用和由于底摩擦、白浪、破碎等引起的能量损耗；其中 C_x 、 C_y 、 C_σ 和 C_θ 分别代表在 x 、 y 、 σ 和 θ 空间的波浪传播速度。

方程采用全隐式有限差分格式，在五维空间（时间、二维地理空间、频率空间和方向空间）上进行数值离散，然后在 4 个象限中用迭代的方法进行求解。至于各项详细的差

分格式,如何迭代求解以及前面各个物理过程源函数的具体表示形式请参见 SWAN 手册^[4]。

3.3 源汇项的处理方法

风能输入项根据 Cavaleri 和 Malanotte-rizzoli、Komen 等的研究成果,可以分为线性增长和指数增长两部分。底摩擦项根据 JONSWAP (联合北海波浪项目研究)、Collins 和 Madsen 分别由 JONSWAP 实验、拖曳理论和涡粘理论得到底摩擦模型,由波浪的发展状态(成长或充分发展)、波浪类型(风浪、涌浪和混合浪)选择相应模型。波浪在向浅水域行进时,由于水深变浅导致破碎,基于 Miche 准则, Battjes 和 Stive 根据大量试验数据及现场资料,认为在浅水域,对于不同类型的地貌,随机波的最大破碎波高 H_m 与水深 d 的关系可表示为: $H_m=rd$, 其中 r 为破碎系数。白浪损耗根据 Hasselmann 提出的脉动平均模型进行处理。在随机波成分波之间,因不同频率间非线性相互作用而发生能量交换,三相波相互作用引起的能量交换采用 R C Ris 等的研究成果,四相波相互作用的处理根据 Hasselmann 等的离散迭代近似法。

4 SWAN 的使用简介

4.1 模式流程设计

可视化海浪预报采用 SWAN 模式实现数值计算, MATLAB 实现可视化。程序主要包括两部分, SWAN 模式和 MATLAB 程序。为了方便应用,将 SWAN 模式嵌入 MATLAB 程序中,实际计算时,只需要在 MATLAB 环境下运行 MATLAB 程序(见图 1)。

SWAN 部分主要完成数值计算,它包括 SWAN 主程序和可执行文件、地形文件、指

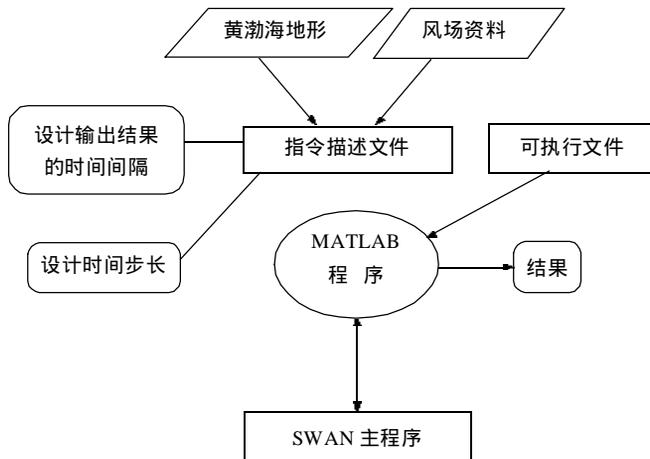


图 1 流程图

令描述文件。在指令描述文件中设计时间步长、输出结果的时间间隔,描述风场资料以及黄渤海地形文件的路径及格式。

MATLAB 程序主要是将 SWAN 的预报结果定期制成可视化的浪高图形场,保存后便于分析。

程序运行只需要风场,输出为定期波浪场的分布图。

4.2 边界条件处理

SWAN 要求有边界条件输入,如果没有边界条件输入,模式会自动假定计算网格周围的区域为陆地点,成为封闭区域。对于没有观测作为边界条件的南边界为自由边界。

4.3 初值问题

海浪过程是一个受迫系统,在经过足够长时间后会对初值失去记忆,最终取决于风场。所以初值的选取对后来的结果没有影响。

SWAN 的“九·五”模式假定风时(为 6h)对各个格点赋予初值,这与缺省初值是等价的。

4.4 模式运算及结果

指令描述文件可以设计数据间隔、时间步长和输出结果的时间间隔,由此可以调整模式计算的精度和时间。根据工作需要,设计数据间隔 36h,设计计算的时间步长为 2h,模式共运算 18 次,共需要大约 20 分钟,每 17h 输出一次结果,共输出 3 个小时次黄渤海海域 ($36^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $117.5^{\circ}\sim 125.5^{\circ}\text{E}$) 波浪场分布图,例如:2003052508-1.jpg (2003 年 5 月 25 日 08 时~20 时浪高值)、2003052508-2.jpg(25 日 20 时~26 日 08 时浪高值)、2003052508-3.jpg (26 日 08 时~26 日 20 时浪高值)。

4.5 预报结果与实况对比

用黄渤海沿岸几个代表气象台站实况风场最大值所对应的风套浪经验浪高作为浪高,与输出的 3 张波浪场分布图浪高最高值进行比较,预报值只要在代表站实况风场最大值所对应的风套浪经验浪高范围内,就算预报准确。

其中,渤海以瓦房店、营口、锦州、乐亭、惠民县五个代表站风速最大值对应的风套浪经验浪高作为实况浪高;渤海海峡以大连、龙口两个代表站风速最大值对应的风套浪经验浪高作为实况浪高;黄海北部以丹东、海洋岛、成山头三个代表站风速最大值对应的风套浪经验浪高作为实况浪高;黄海中部以青岛代表站风速最大值对应的风套浪经验浪高作为实况浪高。具体风套浪经验关系见表 1。

表 1 风套浪经验关系

名称	浪高 h (m)	风级 (级)
微波	$h < 0.3$	1~2
小波	0.3 $h < 0.8$	3
轻浪	0.8 $h < 1.3$	4
中浪	1.3 $h < 2.0$	5
大浪	2.0 $h < 3.5$	6
巨浪	3.5 $h < 6.1$	7~8
狂浪	6.1 $h < 8.6$	9
狂涛	8.6 $h < 11.0$	10~11
非凡现象	$h > 11.0$	12

5 SWAN 模式模拟能力的对比验证

由于模式只需要风场资料,因此不同的风场资料对模式模拟结果会有一些影响。我们选取了 T213 的 1 000hPa 和 MM5 海平面 10m 处两种风场资料,进行模式运算,预报出黄渤海域的波浪场浪高值,用黄渤海沿岸气象台站实况风场所对应的风套浪经验浪高进行对比验证。

5.1 用 T213 的 1 000hPa 的风场资料进行模拟能力试验

用 T213 的 1 000hPa 的 08 点或 20 点实况风场以及未来 18h、36h 的预报风场的 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点值进行模式运算,范围为: $30^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ 、 $100^\circ \sim 130^\circ \text{E}$ 。

用 2003 年 1 月至 5 月 T213 的 1 000hPa 的风场资料进行模式运算,得出的波浪场与黄渤海沿岸气象台站实况风场最大值所对应的风套浪经验浪高作比较,结果预报偏小的较多,渤海为 83.3%,渤海海峡为 50.0%,黄海北部为 66.7%,黄海中部为 33.3%;而结果偏大的较少,只有黄海中部为 33.3%;预报准确率较小,为 16.7%~50.0%,但浪高增强或减弱的趋势还能很好的反映出来。各海域预报准确率(见表 2)。

表 2 T213 的 1 000 hPa 的风场资料进行模式运算各海域预报准确率

海域	渤海	渤海海峡	黄海北部	黄海中部
预报准确率 (%)	16.7	50.0	33.3	33.3

5.2 用 MM5 的高空 10m 风场资料进行模拟能力试验

我们用中尺度数值预报模式(MM5)对风场进行模拟,我们采用了两重嵌套网格,格点中心为 (117°E , 42°N),大网格格点数 75×65 ,格距为 60km,小网格中心以渤海为中心 (123.335°E , 40.105°N),格点数 58×55 ,格距为 20km。垂直方向上采用了 σ 坐标,从 1000hPa 到 100hPa 分为 19 层。模式以 T106 的分析/预报场作为背景场和边界条件,使用地面和高空资料再分析。物理过程包括了 MRF 行星边界层物理方案, Kuo-Anthen 积云

参数化方案。模式每天积分 3 次,初始场为北京时 08 点和 20 点。运算结果为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的风场资料。

用 2003 年 5 月 MM5 的高空 10m 的风场资料进行模式运算,得出波浪场与黄渤海沿岸气象台站实况风场最大值所对应的风套浪经验浪高作比较,有 44.4%~72.2%的预报结果在实况风级所对应的浪高范围内(属风套浪经验浪高下限区域的较多),其他的预报结果都较低,浪高增强或减弱的趋势也能很好的反映出来。各海域预报准确率(见表 3)。

表 3 用 MM5 风场资料进行模式运算各海域预报准确率

海域	渤海	渤海海峡	黄海北部	黄海中部
预报准确率 (%)	44.4	61.1	72.2	44.4

6 解释应用

由于 MM5 风场资料与 T213 风场资料相比格距精细,离海平面距离 10m,比较符合模式要求,而且结果经风套浪经验浪高验证,对风浪增强、减弱的趋势以及浪高的预报都优于用 T213 风场资料进行模式运算所得结果,所以实际中决定用 MM5 风场资料进行模式运算。但 MM5 风场资料进行模式运算还存在结果略偏小的问题,因此需要进行订正。经 2003 年 5 月几个代表站实况风场最大值所对应的风套浪经验浪高与预报值的对比后,得出订正系数,代入模式进行重新运算,运算后各海域预报准确率明显增强,有一定的预报性。各海域预报准确率(见表 4)。

表 4 用 MM5 风场资料订正后模式运算各海域预报准确率

海域	渤海	渤海海峡	黄海北部	黄海中部
预报准确率 (%)	72.2	88.9	83.3	77.8

7 个例分析

2005 年 3 月 10 日 14 时~12 日 14 时,受强冷空气南下的影响,大连地区及黄渤海海域出现大风天气,平均风速海面 7~9 级,陆地 6~7 级,瞬时最大风速达 32m/s。根据风套浪经验公式,浪高值在 3.5~6.1m 之间,各海域具体情况见表 5。受大风天气影响,大连港出港客轮全部停航,造成很大的经济损失。对此次大风过程,分别用 T213 的 1000 hPa 和 MM5 海平面 10m 处风场资料,进行 SWAN 模式的浪高模拟。

表 5 风套浪经验公式计算的各海域浪高

海域	渤海	渤海海峡	黄海北部	黄海中部
风速 (m/s)	14~17	15~21	22~26	14~20
风 级	7	7~8	8~9	7~8
风套浪浪高 (m)	3.5~5.0	3.5~6.1	6.0~8.6	3.5~6.1

7.1 用 T213 的 1000hPa 风场资料的模拟结果

用 2005 年 3 月 10 日 08 时 T213 的 1000 hPa 风场资料以及 08 时的 24h 预报、36h 预

报的风场资料，对SWAN模式进行模拟试验，结果见图2(其中a为10日08时至20时的浪高值，b为10日20时~11日08时的浪高值，c为11日08时~20时的浪高值)各海域浪高值在3.9~5.5之间，与实况比较(见表5)，普遍偏小。

7.2 用 T213 的 1 000 hpa 的风场资料的模拟结果

2005年3月10日上午我们利用当天上午8点的MM5离海平面10m处风场的1h、18h、36h预报风场的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格点值进行格式转换、系数订正、模式运算，得出黄渤海海域24h的风浪预报场，见图3(其中a为10日08时~20时的浪高值，b为10日20时至11日08时的浪高值，c为11日08时至20时的浪高值)。各海域浪高值在3.9~5.5之间，与实况符合较好。

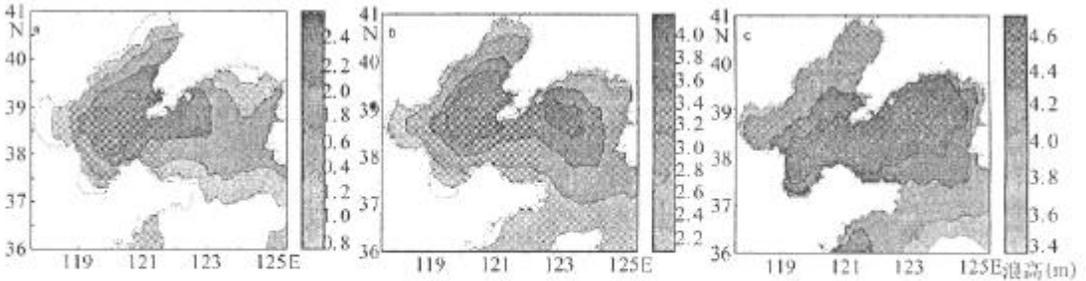


图2 用 T213 的 1 000 hPa 风场资料对 SWAN 模式的模拟试验

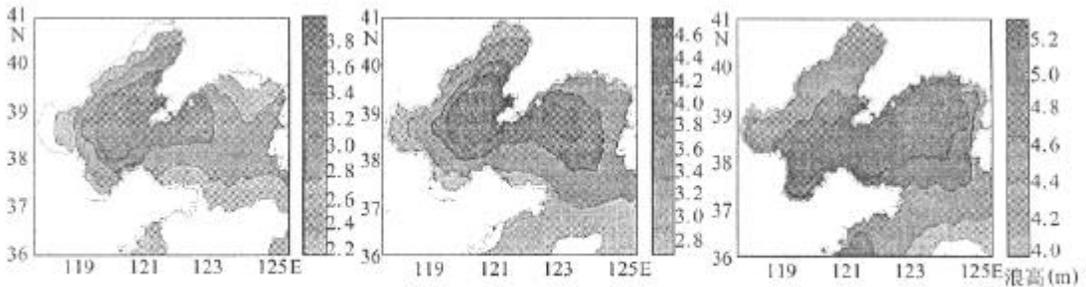


图3 用 T213 的 1 000 hPa 风场资料对 SWAN 模式的模拟结果

8 结论

第三代浅水波浪数值预报模式—SWAN 适用于风浪、涌浪及混合浪的预报，模式采用全隐式有限差分格式的传统谱波浪模型，较适合浅水域。我们用SWAN模式对大连周边海域进行风浪预报。先后选取T213的1000hPa和MM5海平面上空10m处两个风场资料进行模式运算，经比较，MM5海平面上空10m处风场资料的格距大小、高度、代

入模式进行运算后浪高值的预报以及浪高增强或减弱趋势的预报都优于 T213 的 1000hPa 风场资料。但也存在结果偏小的问题。进行系数订正后, 预报准确率明显提高, 对大连周边黄渤海域浪高有一定的预报能力。模式的开发和应用还具有极大潜力, 同时北方海域还存在实况资料缺乏等问题, 因此仍有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 青岛海洋大学. 海浪数值预报研究报告 [R]. 七·五国家重点科技攻关项目. 75-76-01-01 专题, 1995.
- [2] BOOIJN, HOLTHUIJSEN L H, RIS R C. The SWAN wave model for shallow water [A]. Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering: [C]. Orlando, 1996, 1 (1): 668~678.
- [3] 波浪数值预报. 海浪及其预报 [M]. 北京: 气象出版社. 1991, 147~189.
- [4] HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N, RIS R C, et al. SWAN User Manual (Cycle III version 40.11) [M]. Delft: Delft University of Technology, 2000.

THE SIMULATION TEST OF SWAN MODEL IN THE WAVE HEIGHT IN THE HUANG-BO SEA AREAS

LI Yan^{1, 2}, BO Zhao-hai²

(1. School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730001 China; 2. Dalian Bureau of Meteorology, Dalian 116001 China)

Abstract: The SWAN model, the model of the numerical forecast of the shallow water wave of the third generation, can take careful note of all the source functions in the Energy Balance Equation, and at the same time better simulate the wave height both in near sea areas (shallow water) and complex areas. This paper presents a brief introduction of the SWAN model lead in from “9·5” national vital technological research items in the charge of Qingdao Ocean University, and discuss in detail the respective application and their comparison of the T213 wind data and the MM5 wind data in SWAN. It is found that the MM5 wind data of ten meters above the sea level is better than the T213 wind data in 1000hpa and thus obtains a desirable forecast result when applied in the SWAN model in the simulation of the Huang-Bo Sea areas.

Keywords: SWAN model; wind data; numerical forecast of shallow water wave of third generation; MM5; wave height