第 37 卷 第 9 期 海 洋 学 报 Vol. 37, No. 9
2015 年 9 月 Haiyang Xuebao September 2015

江兴杰,杨永增,王道龙,等. 浅水环境下波浪能能流密度计算方法研究[J]. 海洋学报,2015,37(9):1－9,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.09.001

Jiang Xingjie, Yang Yongzeng, Wang Daolong, et al. Study of wave power density computation in finite depth[J]. Haiyang Xuebao, 2015,37(9):1－9,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.09.001

浅水环境下波浪能能流密度计算方法研究

江兴杰[1,2],杨永增[2],王道龙[2],孙盟[1,2]

(1.中国海洋大学 海洋环境学院,山东 青岛 266061;2.国家海洋局 第一海洋研究所 海洋环境与数值模拟研究室,山东 青岛 266061)

摘要: 本文列举了 3 种波浪能能流密度计算方法,通过实测资料和数值模拟的实验,分析了 3 种方法在浅水环境中的适用性。分析得知,定义方法对浅水环境中的海浪特征考虑最为周全,计算结果最准确,但强烈依赖海浪谱的存在,适用面较窄;经验方法仅依赖常规海浪参数,对各种基础资料几乎都适用,但对波能能流密度的估计往往偏低,且不能明显反应出地形抬升对波能能流密度的汇聚效应;修正方法考虑了浅水的影响,通过适当的选取参数,可以给出较准确的结果,但对于大的波能能流密度值存在过高估计的问题。3 种计算方法各有优劣,可以根据实际需要适当选择。

关键词: 波浪能能流密度;浅水;群速度;资源评估

中图分类号: P731.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2015)09-0001-09

1 引言

随着环境污染问题的日益严峻以及传统石化资源的逐步枯竭,人们开始寻找清洁的可持续开发的新能源以维持经济的发展及人类的稳定生活。其中海洋可再生能源自 20 世纪 70 年代开始就受到各沿海国家,特别是发达国家的重视。波浪能是一种重要的海洋可再生能源,部分风能以波浪运动的形式存储在海洋中。海洋波浪运动的能量密度非常高且传播广泛,即使远离波浪生成区域数千千米远的地方也能开发和利用波浪的能量,具有巨大的开发潜力。

为实现波浪能资源利用的最大化和经济性,在开发前需开展资源评估工作,以确定开采时间、位置以及开采方式等。波浪能资源评估是一项综合性的工作,需考虑波浪能能流密度的大小及稳定性、能级频率、有效时间等诸多因素[1—2]。同时,波浪能资源评估也是一项复杂的工作,一方面评估所用的基础资料来源广泛,形式不一;另一方面资源评估所关注的地理位置多样,水文环境复杂。

从评估所使用的基础资料来看,由于现场观测资料尤其是海洋台站资料的积累比较丰富,很多早期的评估工作都是围绕着这类实测资料展开的[3—6];而随着海浪模拟技术的发展,海浪场数值模拟产品在时间和空间上均展现出良好的准确性与连续性,并能够提供丰富的海浪谱信息,近年来的评估工作大多围绕数值模拟数据展开[1—2,7—8];此外,卫星遥感和数值模拟的再分析数据也提供了与现实更为接近且时间跨度较长的波浪场资料,很多评估研究也得以基于长期的历史数据展开[9—11]。从评估关注的地理位置来看,既包含对全球大洋或大陆沿海资源储量的战略性评估[7,9—10];也有针对岛屿及沿岸等海域的实用性评估[12—16]。

收稿日期: 2014-12-26;**修订日期:** 2015-04-26。

基金项目: 国家海洋局海洋可再生能源专项资金(GHME2011ZC07);国家海洋局青年基金(2012245)。

作者简介: 江兴杰(1984—),男,江苏省南京市人,助理研究员,主要从事海浪数值模拟方向的研究。E-mail:jiangxj@fio.org.cn

波浪能能流密度，又称波能功率密度，是整个资源评估中的主要考察对象，直接体现资源的富集程度。鉴于评估工作的复杂性，波能能流密度的计算也存在多种方式(详见本文第 2 节)，尤其是在近岸浅水的复杂环境下，各种计算方式的结果可能存在差异。近岸浅水海域由于距离能源消耗地近，波浪能转换装置的建造、维护成本低，是波能资源评估工作优先关注的区域。在浅水环境中，一方面波浪传播的群速度增加，另一方面，在复杂地形的调制下，海浪谱多呈现双峰或多峰的结构。鉴于浅水波浪的这些特点，本文试图开展波能能流密度计算方法在浅水环境中的适用性分析研究。

中国近海的渤、黄、东海近岸区域水深适中且变化平缓，是开展浅水波浪研究的理想环境。本文利用在该区域实测得到的海浪参数及对应海浪谱，以及第三代海浪模式 MASNUM-WAM[17—19] 的数值模拟数据对不同波能能流密度计算方法进行比较，对各种方法在浅水条件下的适用性、准确性给予分析和验证。

2 理论背景

2.1 波能能流密度计算方法

波能能流密度定义为波浪在传播方向上单位时间内通过单位波峰宽度上的能量，记为 P，单位：kW/m。根据它的定义，以海浪谱的形式可写为[20]：

$$P = \rho g \int_0^{2\pi}\int_0^{\infty} C_g(f,h) S(f,\theta) \mathrm{d}f \mathrm{d}\theta, \tag{1}$$

式中，$S(f,\theta)$ 即为二维海浪能谱，ρ 为海水密度，g 为重力加速度，C_g 群速度是波浪能量的传播速度，与水深 h 有关：

$$C_g(f,h) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)\sqrt{\frac{g}{k}\tanh(kh)}, \tag{2}$$

$k(f)$ 为频率对应波数：

$$(2\pi f)^2 = gk\tanh(kh). \tag{3}$$

在浅水条件下，波能能流密度可以近似写为[7]：

$$P \approx \frac{\rho g}{16} H_s^2 C_g(T_e,h), \tag{4}$$

式中，$T_e = 2\pi\, m_{-1}/m_0$ 为能量周期，$m_n = \iint \omega^n S(f,\theta)\mathrm{d}f\mathrm{d}\theta$ 是海浪谱的 n 阶矩。另一种可用于浅水环境的能流密度计算方法带有经验系数：

$$P = 0.42 \times H_s^2 \times T_p, \tag{5}$$

式中，0.42 为经验系数，由二参数的 Bretschneider 谱模拟实验中得出，但该系数可能在 0.3～0.5 之间变化，由浪、涌能量所占的比重和海浪谱的形状所决定[21]。

式(1)、(4)和(5)均可用于浅水波能能流密度的计算，为方便表述，分别称为“定义方法”、“修正方法”和“经验方法”。由于当今的第三代海浪模式可以直接模拟海浪谱的变化过程，因此可以很方便的使用定义方法计算波能能流密度[13—14]。而在常规的台站资料、遥感数据、再分析资料，甚至是部分模拟数据中，海浪谱是未知的：一方面由于数据获取手段的基本原理并不支持获得海浪谱，另一方面由于完整的海浪谱记录需要比一般海浪参数大得多的存储空间，不便于存储。针对这种海浪谱缺失的情况，可采用经验方法式(5)或其变换形式，如 $P \approx 0.49 \times H_s^2 \times \overline{T}$，其中 $\overline{T}$ 为平均周期，来计算波能能流密度[1—2]。在海浪谱不可知时，修正方法中的能量周期通常也需要通过其他参数来估计，如谱峰周期，不妨设：

$$T_e = \alpha T_p, \tag{6}$$

式中，α 的取值并不固定，有如 $\alpha=1$[22]、$\alpha=0.90$[7] 以及 $\alpha=0.86$[23] 等。

从上述 3 种波能能流密度的计算表达式中可以看出，其主要的区别在于对于群速度刻画程度：其中式(1)所代表的定义方法充分的考虑了群速度随水深的变化，式(4)所代表的修正方法在一定程度上对群速度进行了修正，而式(5)所代表的经验方法将群速度的效应涵盖在了经验系数中。由于定义法中式(2)可以计算任意水深下的群速度，因此定义法对于各种水深都是适用的；且定义方法由波能能流密度的定义直接给出，且充分考虑了浅水环境下海浪能量在方向和频率中的分布状况，因而可认为该方法的计算结果是准确的。本文在下面的实验中，将以定义方法计算的能流密度作为比对的“标准”。

2.2 水深环境的划分

对于海浪来说，深水与浅水是相对于波长而言的。一般而言，当水深 h 大于波长 L 的一半时，海浪的波高等性质就会受到水深的影响[24]。依据小振幅波动理论，波长

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh(kh), \tag{7}$$

式中，g 为重力加速度，T 为特征周期；对于实际的海浪场来说，波浪能量基本集中在谱峰处，因此 T 取谱峰周期。综上，当局地水深 $h < 0.5L$ 时即认为符合“浅水”环境条件，反之则为“深水”环境。

3　对比分析

3.1　通过实测资料

选用 2012 年 4 月至 2013 年 1 月间,在渤海近岸区域两个观测点的现场观测数据,进行对比实验。观测仪器选用挪威 Nortek 公司的 AWAC "浪龙"(600 kHz)声学多普勒波浪流速剖面仪(以下简称"浪龙"仪)。"浪龙"仪利用声学表面跟踪(AST)技术可生成一个水面高程的时间序列,由此得到波高和周期数据;结合 AST 数据和靠近水表的流速运动轨迹阵列,使用 MLMST 方法来处理四点阵列数据,可生成精确的波向谱。在本实验中"浪龙"仪取样频率为 1 Hz,每次采样的样本数为 1 024,每次采样的时间间隔为 30 min。使用"Storm"后处理软件对原始数据进行反演处理,在本实验中,所涉及到的观测参数包括水深、有效波高、谱峰频率以及对应的海浪频率谱。

本实验的观测站点信息如表 1 所示,其中 1～4 号记录来自渤海海峡长山岛附近,5～8 号记录来自烟台芝罘岛附近的套子湾(图 7 中的"+"标记处),所有观测点的平均水深均约为 15 m 左右。由于是近岸观测,所设观测点距离岸界较近,但在现场设置中尽量使观测仪器面向开阔海域,附近的岛屿地形基本对海浪无遮挡影响。从"浪龙"仪测得数据来看,谱峰周期的均值约为 4.6 s,其概率密度分布如图 1 所示;由式(7)算得的平均波长约为 33.7 m,说明各观测点所在位置满足 2.2 节中所提到的"浅水"条件。

表 1　观测站位信息表

Tab. 1　Information of observation sites

序号	纬度	经度	开始时间(北京时)	结束时间(北京时)	平均水深/m
1	38.058 8°N	120.654 0°E	2012 年 4 月 6 日 12:00:00	2012 年 5 月 15 日 07:00:00	15.6
2	38.058 6°N	120.654 1°E	2012 年 7 月 4 日 17:00:00	2012 年 8 月 14 日 12:00:00	15.1
3	38.057 7°N	120.653 3°E	2012 年 10 月 19 日 12:01:01	2012 年 12 月 20 日 10:01:01	14.6
4	38.058 3°N	120.652 4°E	2012 年 12 月 20 日 14:59:00	2013 年 1 月 29 日 09:59:00	14.1
5	37.630 6°N	121.319 6°E	2012 年 4 月 9 日 12:00:00	2012 年 5 月 15 日 12:00:00	15
6	37.629 0°N	121.324 4°E	2012 年 7 月 3 日 11:00:00	2012 年 8 月 21 日 06:00:00	15.2
7	37.628 2°N	121.322 8°E	2012 年 10 月 12 日 14:00:00	2012 年 11 月 20 日 08:00:00	15.3
8	37.628 2°N	121.323 9°E	2012 年 12 月 6 日 12:01:01	2013 年 1 月 19 日 12:01:01	15.4

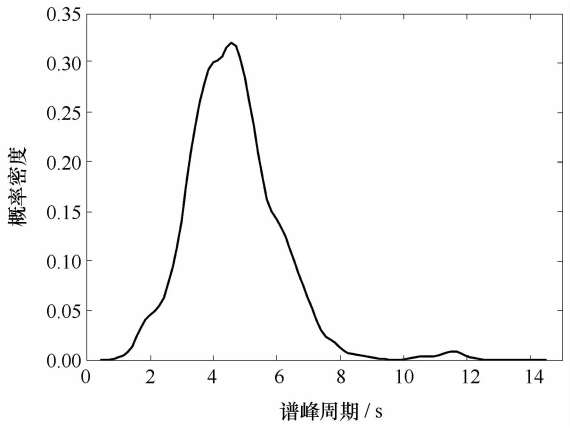

图 1　"浪龙"仪观测谱峰周期的概率密度分布

Fig. 1　Probability density distribution of the peak periods observed by AWAC

观测时间方面,两个观测点基本实现"准同步",选取各季节的代表月进行为期 1 个月的连续观测,由此两个观测点 4 个季节的观测数据共 8 个记录。为不失一般性,本文对所有观测记录一同进行比较:经过初步的质量控制,有效数据样本共 16 812 个;其中记录的海浪谱频率范围为 0.02～0.99 Hz,分辨率 0.01 Hz。

3.1.1　定义法和经验法的对比

由于得到的海浪谱为离散的频率谱,要使用定义法则首先需要计算在不同深度下每个频率所对应的群速度;由式(3)可知,在浅水条件下波数 k 可以通过频率 f 隐式表示,即:

$$F(k_{i,j}) = (2\pi f_{i,j})^2 - gk_{i,j}\tanh(k_{i,j}h_j), \quad (8)$$

通过迭代求解得到使得 $F(k_{i,j}) = 0$ 的 $k_{i,j}$,即第 j 时刻与第 i 个频率所对应的波数。这里,每个时刻所对应的水深 h_j 均是由"浪龙"仪实时观测得到的。将 $k_{i,j}$ 代入式(2)中即可求得对应的群速度 $C_{g;i,j}$ 。对于离散的海浪频谱,定义法可按下式计算波能能流密度:

$$P_j = \rho g \sum_{i=1}^{N} C_{g,i,j} S(f_i) \Delta f, \qquad (9)$$

式中，N 为离散频率总网格点数，本实验中为 98；$\Delta f = 0.01$ Hz 为频率网格间隔，$S(f_i)$ 即为后处理得到的离散频率谱。对于经验方法，可直接将对应的有效波高、谱峰周期代入式(5)获得波能能流密度计算值的时间序列；为补充对比，将经验系数 0.42 设为其理论的上限 0.5 和下限 0.3，获得另外两个时间序列的波能能流密度计算值。

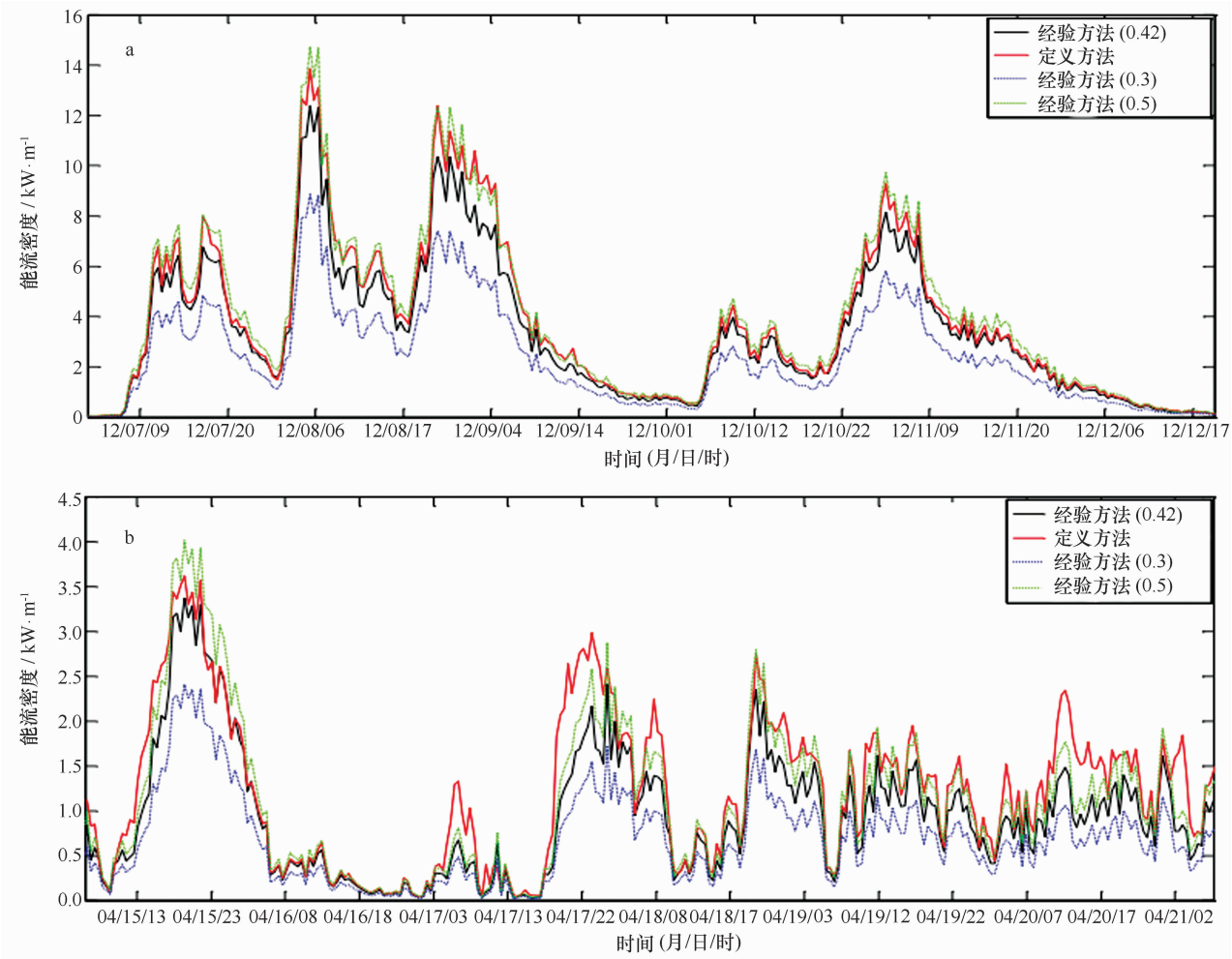

图 2 定义法和经验法计算结果的时间序列(片段)

Fig. 2 Time series diagram of the results of the deterministic and experimental method (part)

图 2 所示的是一个片段的经验方法与定义法的计算结果比较(实测资料数据量较大仅选择片段展示，下同)。对比发现，经验系数取 0.42 时(黑色实线)，经验方法的计算结果一般小于定义法(红色实线)；定义法的估计结果一般在经验系数取 0.3～0.5 的范围内(蓝、绿色虚线)，如图 2a 所示；但在某些时刻，定义法求得的能流密度大小也可能超出经验系数 0.3～0.5 的范围，如图 2b 所示。这是谱的多峰形态和浅水效应共同作用的结果，另一方面也说明经验系数 0.42 或是 0.3～0.5 的取值范围仅是实验室理论估计的结果，虽能够满足绝大部分的海况，但对于一些特殊情况的描述是不足的。可见，经验公式一般情况下会低估浅水波能能流密度，并且对复杂的浅水海况反应不灵敏。

图 3 所示的是对所有样本点，考察定义法(Spectral Integral)与经验方法(系数取 0.42)的比例关系。按照能流密度的大小将其分为几个能级段分别考察，其中虚线的斜率(k=经验法能流密度/定义法能流密度)的计算结果。可见，经验法在近岸浅水环境中估计能流密度较定义法平均要小 10%左右；在能流密度较大时，两种方法的计算偏差也更大，这说明了不

可变的经验系数对海况变化的反应不敏感,并不适于高精度的波能能流密度描述。

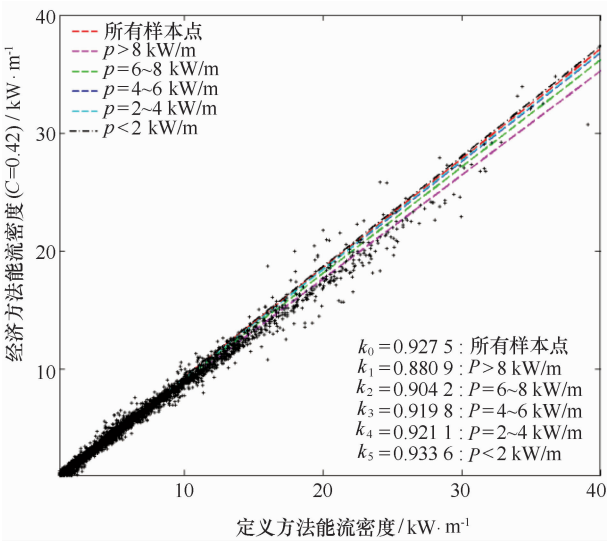

图 3　定义法和经验法计算结果散点图

Fig. 3　Scatter diagram of the results of the deterministic and experimental method

3.1.2　修正方法与定义方法、经验方法的对比

修正方法式(4)考虑了浅水效应带来的误差,因此增加了群速度项,但其中的参数 T_e 是未知的,需通过式(6)中的待定系数 α 及测得的谱峰周期 T_p 求得。在本实验中,由于海浪谱已知,可试通过海浪谱的零阶矩和一阶矩求得 $T_e=2\pi\, m_{-1}/m_0$,通过对所有样本点的 T_e/T_p 求平均 $\alpha=\overline{T_e/T_p}\approx 0.91$;将第 j 时刻的能量周期 $T_{e,j}=0.91T_{p,j}$ 通过类似 3.1.1 节中的方法求得所对应的群速度,通过式(4)即可得到"修正的"能量密度;对所有样本点,修正方法与定义方法计算结果比值的平均值为 1.025 2,如图 4a 所示。

利用上述海浪谱资料,还可通过枚举法的方式确定 α 的值:保留 2 位有效数字,将 α 从 0.85 到 1.00 按 0.01 的间隔分别取值,按上述方法考察 α 取不同值的时候式(4)与式(1)计算结果比值的平均值;当取 $\alpha=0.89$ 时,比值平均值最接近 1,约为 0.999 3,如图 4b 所示。

可见,修正方法所得到的结果至少从平均值上可以很好的符合定义法的所得的"标准"结果;参数 α,实质上是 T_e 的选择会影响到计算的准确性,如图 4 所示,即使完全由实测数据来确定参数,或是满足了总体平均值与"标准"值的高度一致,对于较大的能流密度,修正方法有过高估计的倾向;另一方面,在实际应用中 T_e 和"标准"值都是无法预知的,修正方法的效果仍然依赖于参数 α 的取值。

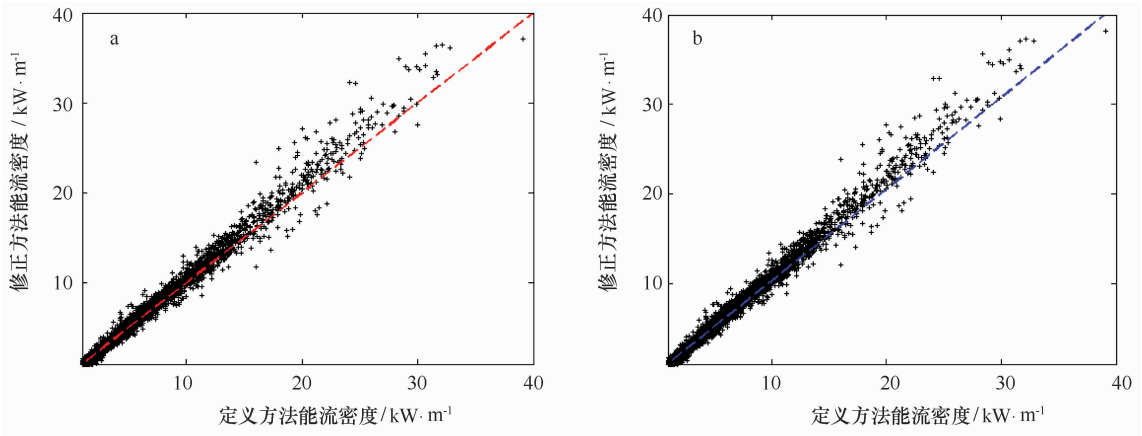

图 4　修正方法与定义方法计算结果散点图(a 图中 $\alpha=0.91$,b 图中 $\alpha=0.89$)

Fig. 4　Scatter diagrams of the results of the deterministic and correctional method ($\alpha=0.91$ in a, $\alpha=0.89$ in b)

但与经验方法相比,修正方法在一定程度上能够反映出水深变浅的影响,明显更接近于定义法的评估结果,如图 5 所示。从实用的角度看,修正方法不依赖海浪谱的观测,仅需知道有效波高、谱峰周期及水深这些常规观测要素,是一种可行的较准确的估计浅水波能能流密度的方法;另外,修正方法中的能量周期 T_e 也可以根据其他周期或波高要素获得[23—25],其计算结果的准确性尚有进一步提高的可能。

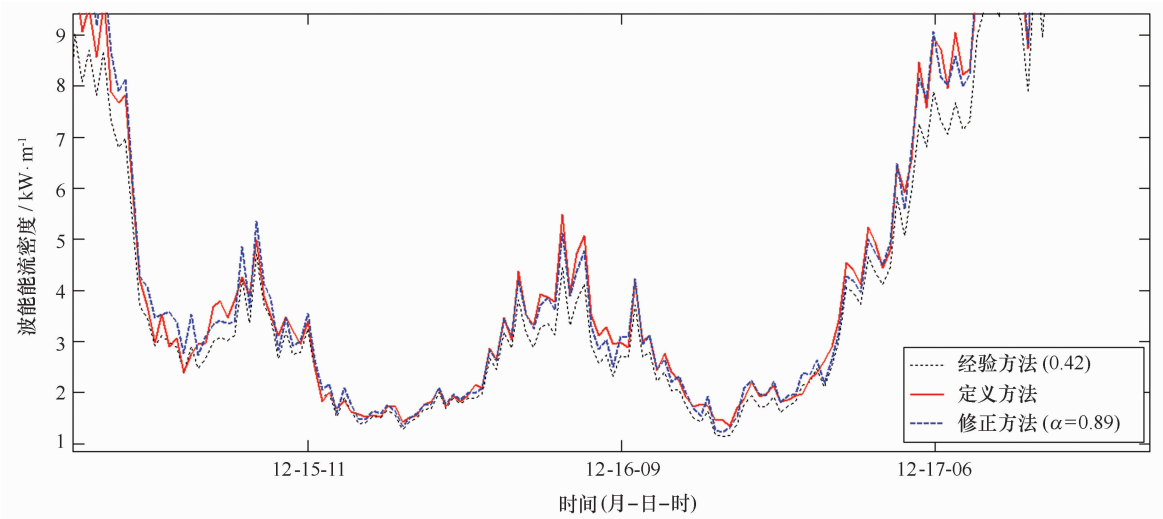

图 5 定义法、经验法和修正法计算结果的时间序列(α=0.89)

Fig. 5 Time series diagram of the results of the deterministic, experimental and correctional method with α=0.89

3.2 通过数值模拟

本文利用第三代海浪模式 MASNUM-WAM[17—19]对中国近海渤、黄、东海区的海浪场进行模拟;重点关注山东半岛以南及苏、沪、浙沿岸的浅水海域,该区域水深在 50 m 以内,距离岸界向外延生约 150～200 km,最远延生至长江口以东约 380 km。模式模拟区域设置为 27°～41°N,118°～128°E;模式分辨率设置为 5′×5′,数据来源为全球 ETOPO 1′×1′数字地形。模式的驱动风场使用 WRF 模式风场,范围覆盖所有模拟区域,分辨率为 0.1°×0.1°,风场时间间隔 6 h。在模拟前,使用实测风速、风向资料对驱动风场予以检验,发现模拟风场与实测值符合良好,如图 6 所示。

使用 Jason－2 卫星高度计数据,对海浪模拟结果做检验;由于卫星高度计对近岸 30～50 km 内的观测结果不可靠,因此在检验中滤掉了该范围内的数据样本;检验数据来自 2012 年 4、7、10 和 12 月,检验的对象为有效波高。检验结果如表 2 所示,全年平均误差约为 0.26 m,相对误差在 30%以内;考虑到该海域受水深限制,波浪并不大,因此模拟结果还是基本与实际相符的。

表 2 卫星高度计数据检验有效波高模拟结果

Tab. 2 Validation for the simulated SWH with the satellite altimeter data

	2012 全年	2012 年 4 月	2012 年 7 月	2012 年 10 月	2012 年 12 月
平均误差/m	0.25	0.31	0.22	0.31	0.20
绝均差/m	0.39	0.42	0.35	0.40	0.48
均方根误差/m	0.59	0.60	0.49	0.66	0.67
相对误差/%	28.9	37.6	36.6	28.2	26.3

对 2012 年全年的波浪场做逐时模拟,通过定义方法直接依据各时刻各计算网格点上的海浪谱计算波能能流密度;对输出的有效波高 H_s 和跨零周期 T_z,通过经验方法计算波能能流密度;跨零周期 T_z 与谱峰周期 T_p 的关系可近似表示为[26]:

$$T_p = 1.41T_z. \tag{10}$$

用式(5)的变换形式:

$$P = 0.592 \times H_s^2 \times T_z, \tag{11}$$

计算网格点上能流密度。将定义方法与经验方法所计算的波能能流密度逐时相减,图 7 中的黑色等值线即为逐时相减结果的平均值。

将 2012 年全年谱峰周期的平均值代入式(7)中即求得平均波长的分布。令 $s = d/L$,即局地水深与波长的比值,将 $s<0.5$ 的区域认为是满足 2.2 节中

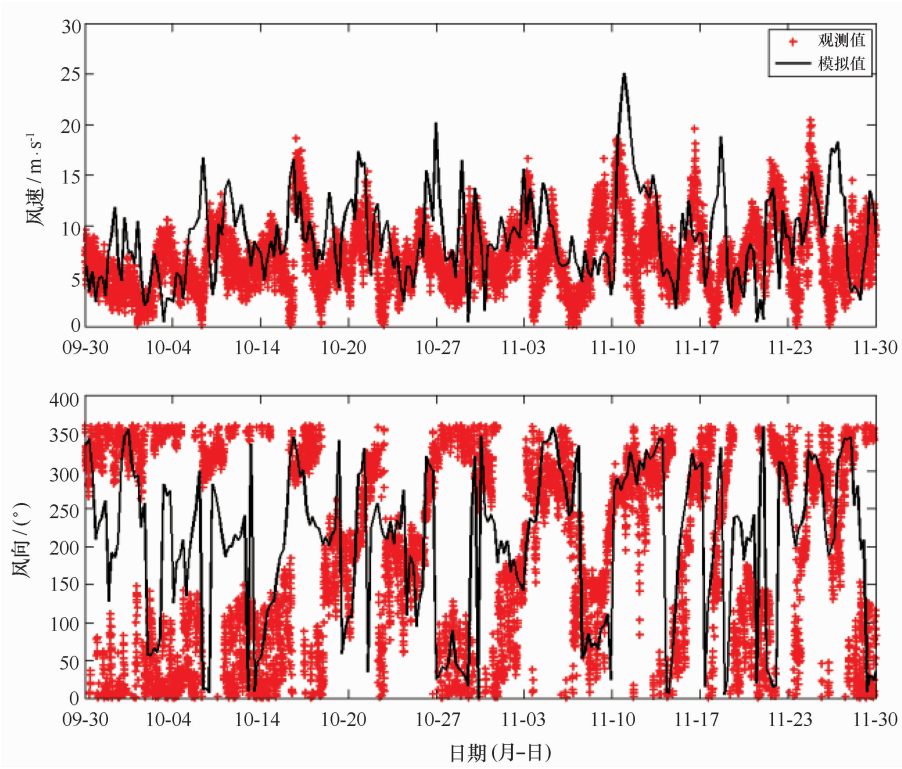

图 6　2012 年 9—11 月观测数据检验模式驱动风场

Fig. 6　Validation for the driven wind of the wave model with observed data during September to November 2012

所提到的“浅水”环境;在图 7 中红色实线是 $s=0.5$ 的等值线,该曲线与岸线间的海域均满足“浅水”环境条件,以下的分析将针对该区域展开。值得注意的是,就全年海浪场来说,有相当多的波浪能聚集在比上述“平均谱峰周期”更高的频段内,这些波具有更长的波长,相对来说受到水深影响的范围则更大。

从图 7 中可以看出,两种方法计算结果差别较大的区域基本沿 50 m 等深线分布;尤其是在长江口以东约 220 km 处,平均差值可达 3.6 kW/m;而在苏、沪、浙近岸 20～40 m 水深的范围内,计算结果之差也能达到 1～3 kW/m;在山东半岛以南及苏、沪、浙近岸,朝鲜半岛近岸 20 m 等深线以内的海域,计算结果之差 0.5～1 kW/m 不等。图中的差值均为正值,且等于“定义方法－经验方法”,说明经验方法低估的浅水中的能流密度大小。

由于近岸的地形抬升导致波浪群速度加快,使得单位时间内通过单位长度的波浪能量变多,波浪能能流密度会出现明显的汇聚;地形汇聚效应会导致波浪能资源呈现富集的状态,这一点在波能资源开发利用区选划中是极其重要的。使用经验方法计算时是无法明显体现这种汇聚特点的,相比之下定义法则很好地描述了群速度随水深的变化,进而将波能资源富集的特点展现出来。

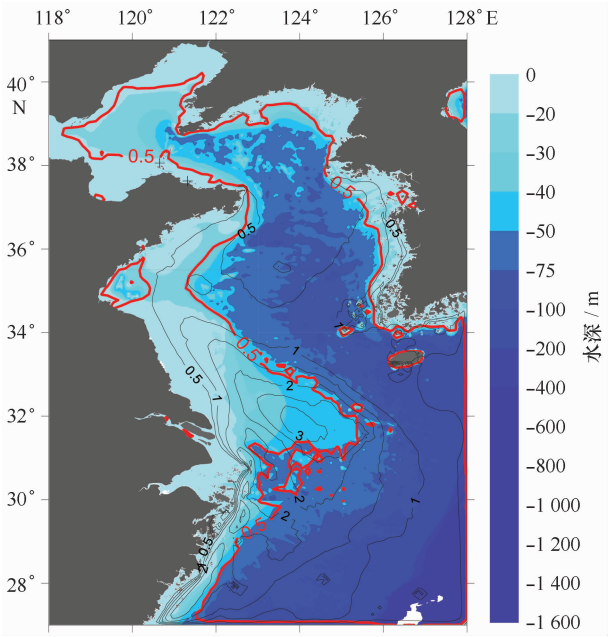

图 7　模拟区域与定义法和经验法的计算结果差

Fig. 7　Modeling area and difference value between the results of deterministic and experimental method

4 结论

本文通过在中国渤、黄、东近岸现场实测资料和数值模拟试验，比较了常用的 3 种方法计算波能能流密度的差异，对浅水环境下波能能流密度计算方法的适用性进行了分析，结果如下：

(1)定义法包含了完整的海浪谱信息，充分考虑了浅水环境下的海浪特征，是最准确的计算方法。当今第三代海浪模式可以直接模拟海浪谱的变化，因此基于模式使用定义法计算波能能流密度是十分方便的；但对于再分析资料等海浪谱缺失的情况，定义法不适用。

(2)经验方法仅依赖常规的波浪参数就可以计算波能能流密度，对于各类基础资料的适用性强。但固定的经验系数对浅水环境的变化不敏感，容易低估浅水波能能流密度；另一方面，经验方法无法明显的体现出地形抬升对波能能流密度的汇聚作用。

(3)修正方法考虑了浅水对群速度的影响，在一定程度上提升了估计值的准确性。通过选取合适的参数计算群速度，虽然可以在总体上与定义法的计算结果高度一致，但修正方法对较大的波能能流密度有过高估计的情况；另一方面，修正方法的参数选取存在一定的不确定性。

综上所述，计算浅水环境下的能流密度，在有海浪谱记录的情况下，我们推荐采用如式(1)的定义法；在缺乏海浪谱记录的情况下，作为近似估计可使用经验方法；而在条件允许的情况下，使用修正方法能够进一步的提高波能能流密度的计算精度。3 种计算方法各有优劣，可以根据实际需要谨慎选择。

致谢：感谢中国海洋大学高山红为本文海浪数值模拟提供驱动风场。本文海浪数值模拟实验均在上海超算中心“魔方”超级计算机上运行，对工作人员所提供的支撑服务表示感谢！

参考文献：

[1] 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.
Zheng Chongwei，Li Xunqiang. Wave energy resources assessment in the China Sea during the last 22 years by using WAVEWATCH －Ⅲ wave model[J]. Periodical of Ocean University of China，2011，41(11)：5－12.

[2] 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.
Zheng Chongwei，Su Qin，Liu Tiejun. Wave energy resources assessment and dominant area evaluation in the China Sea from 1988 to 2010[J]. Haiyang Xuebao，2013，35(3)：104－111.

[3] Barstow S F，Haug O，Krogstad H E. Satellite altimeter data in wave energy studies[C]//Ocean Wave Measurement and Analysis(1997). ASCE，1998：339－354.

[4] 高祥帆. 海洋波浪能量的估算[D]. 广州：中国科学院广州能源研究所，1980.
Gao Xiangfan. The estimation of ocean wave energy[D]. Guangzhou：Guangzhou Institute of Energy Conversion，Chinese Academy of Sciences，1980.

[5] 吴碧君. 关于波力发电中波浪能量的估算[J]. 海洋工程，1985，3(1)：65－74.
Wu Bijun. On estimation of wave energy in wave power generation[J]. The Ocean Engineering，1985，3(1)：65－74.

[6] 张小刚. 波能分析及在珠江口波力试验电站初步设计中的应用[J]. 海洋科学，1987(4)：10－13.
Zhang Xiaogang. Wave energy analysis and its application in the preliminary design of a pilot wave power station at the Zhujiang River estuary[J]. Marine Science，1987(4)：10－13.

[7] Cornett A M. A global wave energy resource assessment[C]//Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference held in Canada. Canada，2008：318－326.

[8] Zheng C W，Li C Y. Variation of the wave energy and significant wave height in the China Sea and adjacent waters[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2015，43(3)：381－387.

[9] Arinaga R A，Cheung K F. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data[J]. Renewable Energy，2012，39(1)：49－64.

[10] Zheng C，Shao L，Shi W，et al. An assessment of global ocean wave energy resources over the last 45a[J]. Acta Oceanologica Sinica，2014，33(1)：92－101.

[11] 万勇，张杰，孟俊敏，等. 基于 ERA-Interim 再分析数据的 OE-W01 区块波浪能资源评估[J]. 资源科学，2014，36(6)：1278－1287.
Wan Yong，Zhang Jie，Meng Junmin，et al. Assessment of wave energy resources for the OE-W01 area based on ERA-Interim Reanalysis data[J]. Resources Science，2014，36(6)：1278－1287.

[12] Folley M，Whittaker T J T. Analysis of the nearshore wave energy resource[J]. Renewable Energy，2009，34(7)：1709－1715.

[13] Liang B，Fan F，Yin Z，et al. Numerical modelling of the nearshore wave energy resources of Shandong peninsula，China[J]. Renewable Energy，2013，57(3)：330－338.

[14] Rusu L，Guedes Soares C. Wave energy assessments in the Azores islands[J]. Renewable Energy，2012，45(3)：183－196.

[15] Iglesias G,Carballo R. Choosing the site for the first wave farm in a region: A case study in the Galician Southwest (Spain)[J]. Energy,2011,36(9):5525－5531.
[16] Stopa J E,Cheung K F,Chen Y. Assessment of wave energy resources in Hawaii[J]. Renewable Energy,2011,36(2): 554－567.
[17] Yang Yongzeng,Qiao Fangli,Zhao Wei,et al. MASNUM ocean wave numerical model in spherical coordinates and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica,2005,27(2):1－7.
[18] Yuan Yeli,Pan Zengdi,Hua Feng,et al. LAGFD-WAM wave model(I),the basic physical model[J]. Acta Oceanologica Sinica,1992,14(5):1－7.
[19] Yuan Yeli,Hua Feng,Pan Zengdi,et al. LAGFD-WAM wave model(Ⅱ),Characteristics inlaid scheme and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica,1992,14(6):12－24.
[20] John Brooke. Wave energy conversion[M]. Oxford,UK:Elsevier Science Ltd,2003:157－164.
[21] Hagerman G,Bedard R. Guidelines for preliminary estimation of power production by offshore wave energy conversion devices[J]. Electric Power Research Institute (EPRI),2003,E2I/EPRI－WP－US－001.
[22] Hagerman G. Southern New England Wave Energy Resource Potential[C]//Proceeding Building Energy 2001,Boston,USA. 2001.
[23] Burger M F,Van Gelder P,Gardner F. Wave energy converter performance standard "a communication tool"[C]//6th European Wave and Tidal Energy Conference,Glasgow. 2005.
[24] 文圣常,余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社,1984:524－525.
Wen Shengchang,Yu Zhouwen. Wave Theory and Computational Principle[M]. Beijing: Science Press,1984:524－525.
[25] Wan Y,Zhang J,Meng J,et al. A wave energy resource assessment in the China's seas based on multi-satellite merged radar altimeter data[J]. Acta Oceanological Sinica,2015,34(3):115－124.
[26] 华锋,范斌,卢燕,等. 海浪谱峰周期与跨零周期的一个经验关系式[J]. 海洋科学进展,2004,22(1):16－20
Hua Feng,Fan Bin,Lu Yan,et al. An empirical relation between sea wave spectrum peak period and zero-crossing period[J]. Advances in Marine Science,2004,22(1):16－20.

Study of wave power density computation in finite depth

Jiang Xingjie[1,2], Yang Yongzeng[2], Wang Daolong[2], Sun Meng[1,2]

(1. *College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao* 266061, *China*; 2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao* 266061, *China*)

Abstract: Experiments based on observational data and numerical simulation were carried out in this study to analyze the applicability of three different computational methods of wave power density in finite water depth. From the comparison we conclude that, the deterministic method fully considering the features of waves in finite depth yields the most accurate results, but it has a relatively narrow range of application because it strongly depends on the existence of wave spectrum; the experimental method only depends on regular wave parameters and is applicable for almost all of the basic data, but it yields the results a little lower than the deterministic method and cannot obviously describe the convergence effect of wave power density due to a uplift of the seabed; the correctional method considering the effects of finite depth can yield very accurate results if a proper parameter has been chosen, but it may overate those places with high values. Each one of the three methods has both merits and defects respectively, a proper choice is needed before taking into practice.

Key words: wave power density; finite depth; group velocity; resource assessment