

渤海海峡潮流能高分辨率数值估算*

吴伦宇^{1,2}, 王兴³, 熊学军^{1,2*}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛 266061; 2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东青岛 266061; 3. 国家海洋局北海环境监测中心, 山东青岛 266033)

摘要:利用非结构化网格有限体积方法的海洋模式 FVCOM 建立了一个高分辨率的渤海潮汐潮流模型, 通过与历史结果和实测资料的对比证明了模型的可靠性, 然后描述了渤海海峡的潮波运动状况, 以模型垂向平均流速为基础对渤海海峡的潮流能进行了估算。结果表明, 渤海海峡的潮流以往复流为主; 最大可能流速的最大值出现在老铁山西角, 为 3.3 m/s; 对于平均能流密度大于 100 W/m² 的海区, 老铁山角附近达 515.9 km², 比登州水道大一个量级, 而登州水道比其余诸水道均大一个量级。

关键词:渤海海峡; 潮流能; FVCOM

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2013)01-0012-10

潮流能指潮流做水平运动所具有的动能, 属于海洋可再生能源的一种。对潮流能的利用, 就是使用发电装置将潮流能转化成电能的过程。受装置的机械效率、装置本身对潮流的削弱等因素影响, 总的潮流能蕴藏量只有部分是可以被开发利用的。吕忻等^[1]对潮流能的开发利用现状进行了综述并对我国的潮流能开发提了几点建议。吕新刚等^[2]对国际国内潮流能资源评估方法进行了综述, 对潮流能资源的评估主要有 FARM、FLUX、动力分析以及国内郑志南的方法, 众多各有利弊的方法并存也说明了潮流能资源评估的复杂性。但简单来说, 各种方法最终实际上确定了一个可开发量与总蕴藏量的比例系数。例如基于 FLUX 方法, 美国 EPRI 的 TISEC (Tidal In-Stream Energy Conversion) 计划将比例系数取为 15%。也就是说潮流能的实际可开发量比蕴藏量要小了近一个量级。

渤海海峡是渤、黄海之间的潮流通道, 散布于其中的大大小小的岛屿将海峡分割成了诸多水道, 因此这里是长江口以北的中国海域潮流能资源最为丰富的区域, 另外这里受山东半岛的掩护, 波浪也较小, 适合电站的建设。对渤海海峡的潮流能资源进行估算首先要对渤海海峡的潮流状况有所认识。目前我们掌握了老铁山水道南部以及长山水道两个锚系站一个月的海流资料, 但相对整个渤海海峡来说资料仍缺乏, 用仅有的资料难以勾勒出渤海海峡的潮流分布整体状况, 为此本研究建立了一个高分辨率的潮流模型, 通过两个海流测站的数据对模式进行可靠性验证之后, 利用模式结果对渤海海峡的潮流以及潮流能状况进行了分析。

1 渤海海峡地形

渤海海峡指辽东半岛南端老铁山西角和东角至山东半岛北岸蓬莱登州头一带海域(图 1), 南北宽约 106 km, 最大水深 86 m。庙岛群岛散布在海峡中, 把渤海海峡分割成 10 个主要水道。各水道的宽度和深度差异较大, 但总的趋势是北面的水道宽而深, 南面的窄而浅。自北而南诸水道依次为老铁山水道、隍城水道、大钦水道、小钦水道、北砣矶水道、南砣矶水道、高山水道、猴矶水道、长山水道和登州水道(根据海军航保部海图)。

* 收稿日期: 2011-12-20

资助项目: 财政部海洋可再生能源专项——潮汐能和潮流能重点开发利用区资源勘查与选划(GHME2010ZC11); 我国近海海洋综合调查与评价专项——我国近海物理海洋与海洋气象调查研究(908-ZC-I-01)

作者简介: 吴伦宇(1982-), 男, 山东莱州人, 助理研究员, 主要从事海洋数值模拟方面研究. E-mail: wuly@fio.org.cn

* 通讯作者, E-mail: xiongxi@fio.org.cn

(杜素兰 编辑)

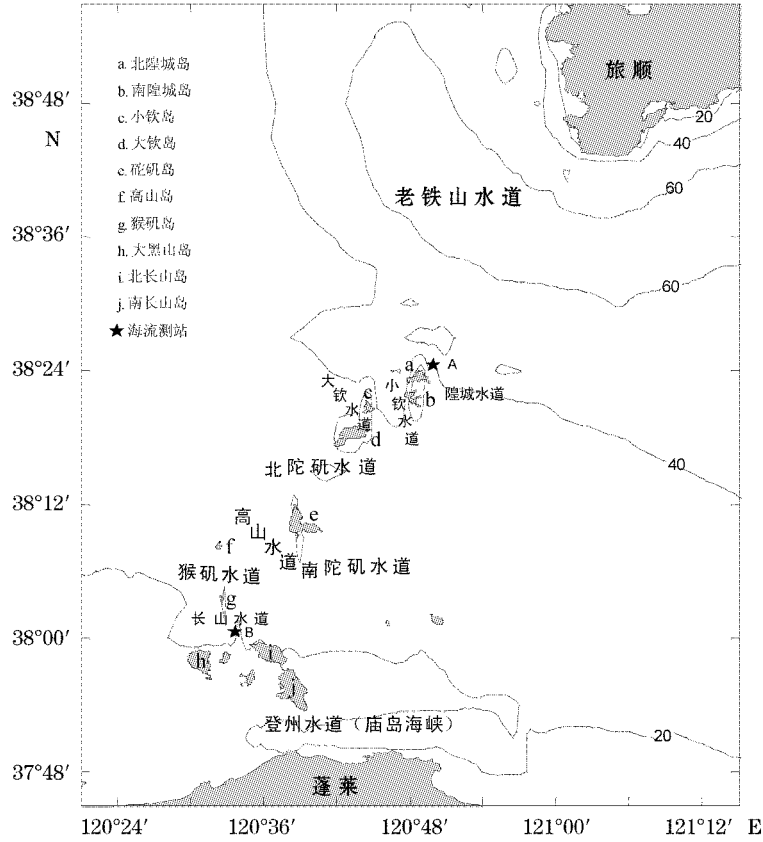


图 1 渤海海峡和庙岛群岛位置示意图

Fig. 1 A sketch map showing the locations of the Bohai Strait and the Miaodao archipelago

2 模式建立

本研究采用 FVCOM 三维海洋模型。FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model)是无结构网格的、有限体积的、三维原始方程的海洋模式。模型包含动量方程、连续方程、温盐守恒方程以及状态方程,通过采用二阶湍流封闭模型^[3]来对方程进行封闭。水平方向上是三角网格,而在垂向方向上采用的是 σ 坐标。有限体积的方法(FVM)既有有限元方法(FEM)几何拓扑结构上的灵活性,又有限差分方法(FDM)在数值离散上的简单的特点。流和温盐利用积分形式的方程中计算,这样可以更好的保证质量、动量等在复杂岸界下计算的守恒性^[4,5]。

2.1 潮流模型基本控制方程

在 σ 坐标下:

$$\frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD = -D \frac{\partial}{\partial x} (g\eta + p_{\text{atm}}) - D \int_{\sigma}^0 (D \frac{\partial \rho}{\partial x} - \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}) d\sigma + \frac{\partial \tau_x}{\partial \sigma} \quad (1)$$

$$\frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD = -D \frac{\partial}{\partial y} (g\eta + p_{\text{atm}}) - D \int_{\sigma}^0 (\frac{\partial \rho}{\partial y} - \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}) d\sigma + \frac{\partial \tau_y}{\partial \sigma} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

式中, x, y , 和 σ 分别为水平的东、北坐标和垂直方向的坐标; u, v 和 ω 是 x, y, σ 三个方向上的速度分量; D 为水深; η 为水位; ρ 为密度; P 为压力; f 为科氏参数; g 为重力加速度; p_{atm} 为大气压; $\partial\tau_x, \partial\tau_y$ 为东、北方向的底摩擦项。

2.2 开边界分潮的选取

老铁山水道 A 站潮流调和分析结果见表 1, 其中 M_2, S_2, N_2, K_1, O_1 五个分潮椭圆长轴均大于 10 cm/s , 为影响该区域的主要分潮, 因此利用这五个分潮可以较为精确的揭示渤海海峡的潮流特征。

表 1 A 站各分潮的椭圆长轴流速

分 潮	M_2	S_2	N_2	K_1	O_1
椭圆长轴/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	54.1	20.7	12.1	35.6	29.4

2.3 计算区域和网格设置

模拟海域东起北黄海, 西至整个渤海。三维计算网格平面为三角网格。垂向按 6 层划分, 海峡岛屿处的网格分辨率 $100 \sim 200 \text{ m}$, 其余部分的分辨率为 $3 \sim 6 \text{ km}$ 。网格的节点数为 20 555, 三角网格数为 38 718, 如图 2 所示。图 3 则给出放大的了的庙岛群岛海域的网格设置。

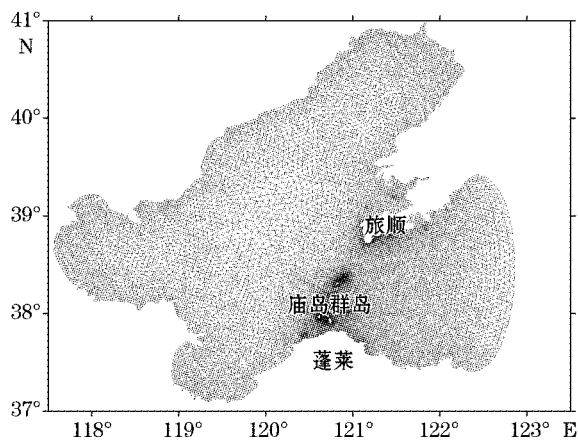


图 2 计算网格设置

Fig. 2 The configuration of computing grids

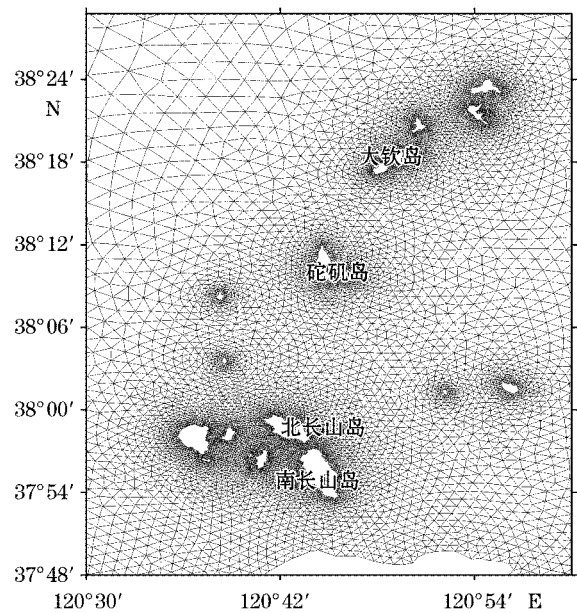


图 3 庙岛群岛附近计算网格设置

Fig. 3 The configuration of computing grids near the Miaodao archipelago

3 计算结果分析

3.1 模式结果验证

我国近海物理海洋与海洋气象专项调查于 2006-08 在老铁山水道南部(A 站, 水深 61 m)和长山水道(B 站, 水深 31 m)获得的两个定点海流观测数据(站点位置见图 1)。该观测采取的是坐底式观测方式, 观测层

厚 2 m,观测仪器采用美国 RDI 公司生产的 Work Horse 300K 声学多普勒剖面流速仪(ADCP),流速测量范围为 0~500 cm/s,精度为 0.5%,流向测量精度为 $\pm 2^\circ$ 。虽然观测与模型都是三维的,但由于潮流能的利用并不是针对某个水层来进行的(例如 Seaflo 发电机的涡轮直径为 11 m),而是对整段水层的利用,所以用垂向平均的潮流来讨论比较合适。由于观测的海流不光包含潮流,仍有一部分余流,利用 T_tide 调和程序^[6]对海流序列进行调和和分析去掉余流后再与模式对比,时间上包含了两个大小潮过程,对比结果如图 4 和图 5 所示。其中 A 站流速的平均相对误差 11.4%,流向的平均绝对误差是 16.8°;B 站流速的平均相对误差 10.9%,流向的平均绝对误差是 17.2°。

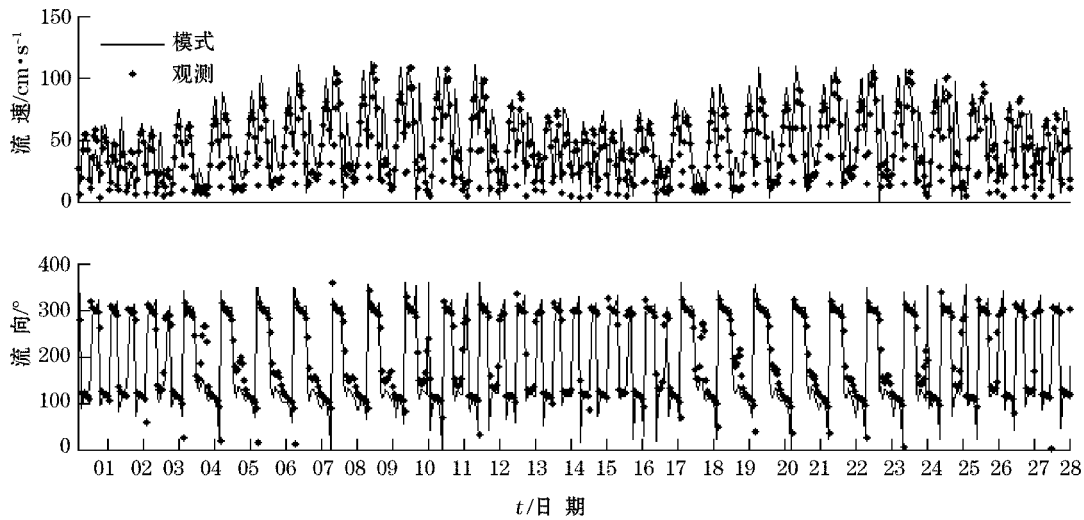


图 4 A 站潮流对比曲线

Fig. 4 Contrast of tide current at ADCP station A

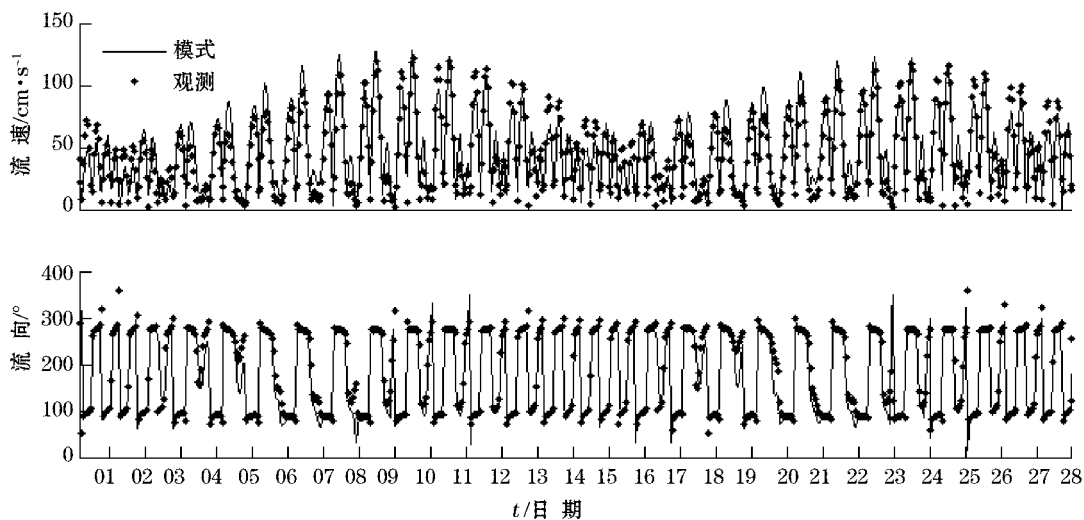


图 5 B 站潮流对比曲线

Fig. 5 Contrast of tide current at ADCP station B

3.2 主要分潮同潮时线图

渤、黄、东海的潮波运动较早便有许多数模研究论文^[7-8],这些工作得出了各主要分潮潮波的基本运动规律,总的来说各分潮同潮时线的基本面貌是一致的,后期的工作主要是利用各种方法将实测资料包括验潮站

和卫星遥感资料同化到数值模式中,从而提高数值模拟的精度,例如王永刚等^[9]在数值模式中使用了松弛同化的方法,取得了较好的效果。图 6 给出了主要的半日分潮 M_2 和全日分潮 K_1 的同潮时线图, M_2 潮波由外海经渤海海峡传入渤海,其振幅在 0.5 m 左右,迟角 300 度左右,而 K_1 分潮的重要特征是在渤海海峡南部存在一个无潮点,形成了一个逆时针旋转的潮波系统,这与王永刚等^[9]的工作是比较一致的。

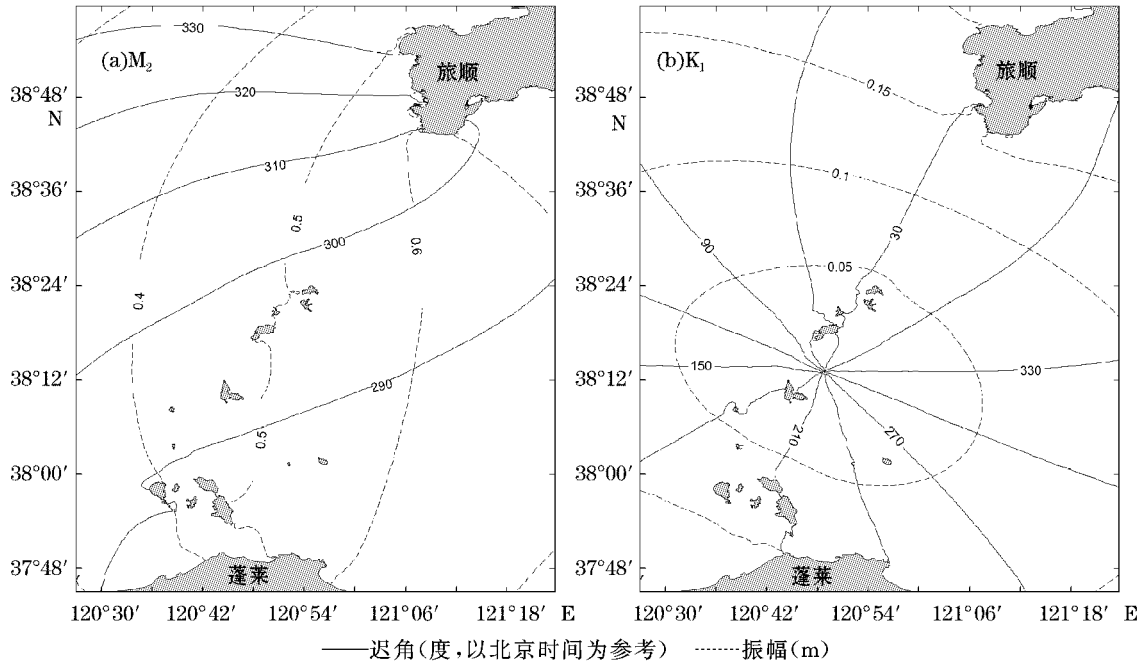
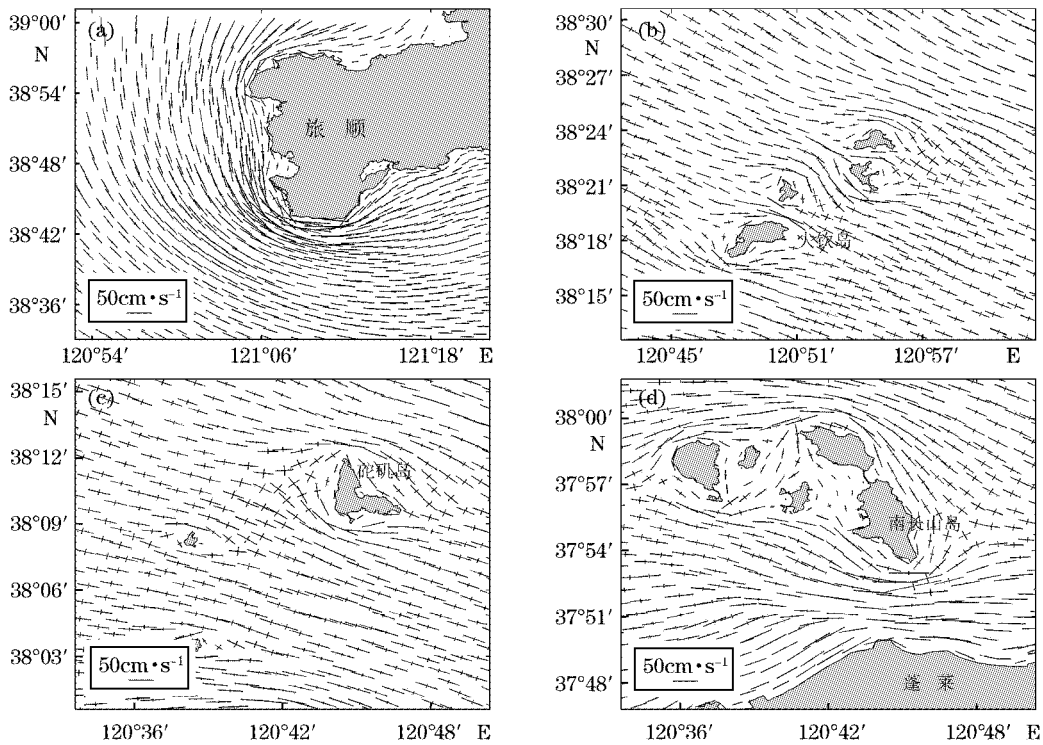


图 6 M_2 (a) 和 K_1 (b) 分潮同潮图

Fig. 6 Cotidal chart of tidal constituent M_2 (a) and K_1 (b)

3.3 潮流椭圆

一般来说,往复流区的潮流能便于集中开发利用。由于渤海海峡的潮流以正规半日潮和不正规半日潮为主^[10](本研究模式计算得到的潮流形态数分布与文献^[10]中结果基本一致,图略),因此以 M_2 分潮潮流椭圆为主来讨论渤海海峡潮流的往复性。为了详细的表达各水道潮流情况,将渤海海峡从北向南分四部分来画图表示(图 7),整体来看,整个渤海海峡的潮流以往复流为主,旋转流只占很少一部分。老铁山角的西侧凹处稍偏向于旋转流(图 7a)。南、北隍城岛和大、小钦岛的水道以往复流为主,其中小钦水道往复性不如大钦水道和皇城水道(图 7b)。砣矶岛、高山岛、猴矶岛之间的水道呈较明显的旋转特性,在砣矶岛的西南角有一片往复流区(图 7c)。长山水道以往复流为主,但北长山岛北端凹处出现旋转流。登州水道除了南长山岛南端存在旋转流区,其余均为往复流(图 7d)。

图 7 渤海海峡 M_2 分潮潮流椭圆分布Fig. 7 Distribution of M_2 ellipse in the Bohai Strait

3.4 最大可能流速

一般说来,最大潮流超过 2 m/s 的海区才比较有开发利用潮流能的价值。最大可能潮流流速按下式计算:对于规则半日潮流海区,用 $1.29 W_{M_2} + 1.23 W_{S_2} + W_{K_1} + W_{O_1}$ 计算式;对于规则全日潮流海区,用 $W_{M_2} + W_{S_2} + 1.68 W_{K_1} + 1.46 W_{O_1}$ 计算;对于不规则半日潮流和不规则全日潮流区,则取上述两式计算结果中的最大值^[11]。图 8 给出了渤海海峡最大可能流速分布。

从图 8 看,大流速区域出现在水道和岬角处,在海岛的东、西两端往往存在着低流速区域,而在岛的南、北两端的顶点处往往出现流速极大值,且如果对面也有岛(即形成水道),其大流速区范围将扩大,这是由于渤海海峡的潮波基本呈东西走向的缘故。

具体来说,在老铁山水道北侧的老铁山角附近海域,存在着大片超过 2 m/s 的海区,甚至有的区域超过了 3 m/s,最大值为 3.3 m/s,这也是渤海海峡模拟的最大流速。武贺等^[12]指出老铁山北侧近岸海域最大可能流速约 2.5 m/s,这与本研究差异较大。为此作者查阅了最新的渤海海峡的海图(海图一般根据实测资料绘制),在老铁山西角标有流速 6.3 kn(合 3.2 m/s),这支持本研究观点。同样超过 3 m/s 的海区还有海峡最南部登州水道靠北长山岛一侧。其次在北隍城岛的北部、南隍城岛的南部(最大达 1.8 m/s)以及二者之间的隍城水道(超过 2 m/s)也出现流速较大区域。小钦水道两个岛东西错落,离得较远,因此大潮流区域比大钦水道要小。砣矶岛、高山岛、猴矶岛之间的南、北砣矶水道、高山水道、猴矶水道最大也只有 1.5 m/s 左右。另外两个大流速区出现在长山水道北侧以及登州水道西部区域,最大值在 1.5~1.8 m/s 之间。

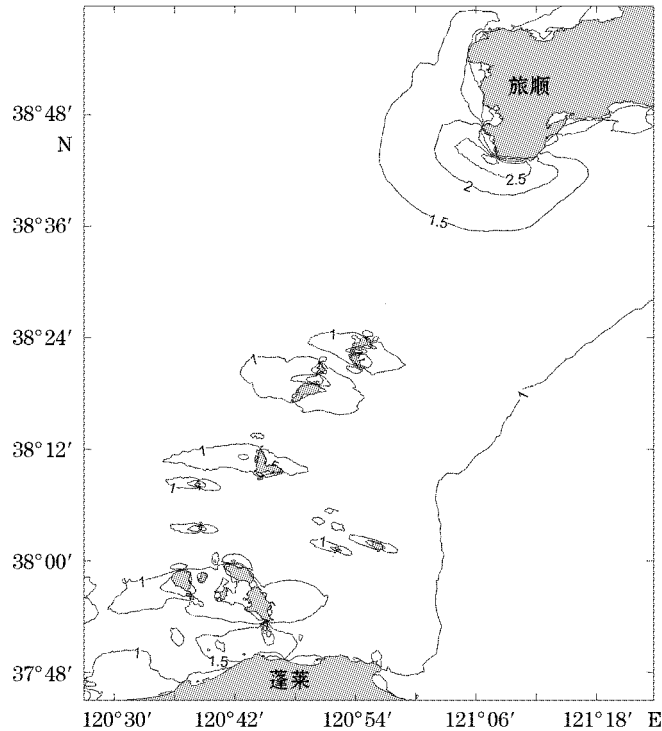


图 8 渤海海峡最大可能流速分布($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Distribution of the possible maximum velocity of tidal current in the Bohai Strait ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

4 渤海海峡潮流能资源分析

主要从流速、能流密度、潮流往复性等方面来讨论渤海海峡的潮流能情况。

1) 潮流流速大小直观的反应了潮流能大小。由图 8 可以看出老铁山水道北部和登州水道流速都超过了 3 m/s , 是渤海海峡潮流能最为丰富的地方, 其中老铁山水道北部的大流速区海域面积最广。其余超过 2 m/s 的海区包括: 隍城水道、小钦水道、大钦水道、大黑山岛和北长山岛北部顶端。

2) 潮流的能流密度是指通过单位面积的潮流能量, 定义为:

$$e = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (5)$$

式中, U 为潮流流速; ρ 为海水密度。

能流密度是表征某一海域潮流能量强弱或潮流能资源丰富程度的重要指标。 e 越大, 表明该处的潮流能量越高, 资源越丰富。潮流能的蕴藏量定义为 $P = e \cdot A$, A 为潮流所通过的截面面积。如本文章前言所述, 实际的可开发量国际上至今也没有统一的方法, 对于不同的海湾、水道不同的发电机或是不同的布放密度、布放方式其比例系数如何确定, 也是个难题, 因此本研究不去做各种方法的可开发量的计算和比较, 而是直接从能流密度上讨论渤海海峡的潮流能资源的分布情况。吕新刚等^[13]指出计算潮流能平均蕴藏量, 以 1 a 以上的资料为宜, 这是因为潮流的变化有半日、全日、月、年等周期, 最长的周期为 18.6 a。图 9 给出了根据 2006 年的潮流后报资料计算的平均能流密度分布场。由于能流密度是流速的三次方, 因此其分布情况与最大流速分布基本一致, 而等值线更集中。从能流密度的大小来看, 水道、岛屿南北端点处一般都会超过 100 W/m^2 , 而老铁山水道北部和北长山岛北部的能流密度超过了 300 W/m^2 。表 2 给出了渤海海峡能流密度大于 100 W/m^2 的海区位置及相应的面积。从表中看出对平均能流密度大于 100 W/m^2 的海区来讲, 老铁

山角最大,为 515.9 km^2 , 这比登州水道的 40 km^2 要大一个量级,而登州水道要比其余各个水道的面积也分别大了一个量级。

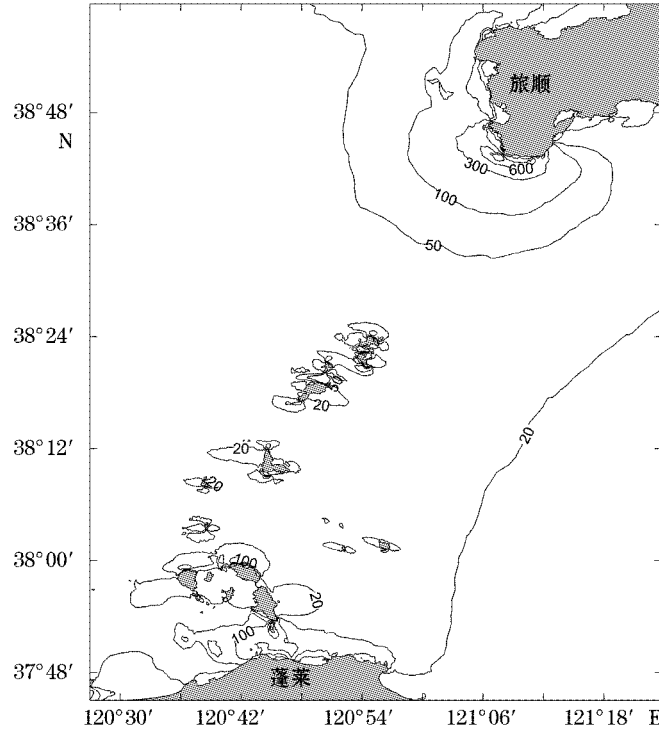


图9 渤海海峡平均能流密度分布($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 9 Distribution of mean power density in the Bohai Strait ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

表2 渤海海峡能流密度大于 100 W/m^2 的海区及对应的面积

Table 2 The regions where the power density is larger than 100 W/m^2 and their corresponding areas in the Bohai Strait

海区位置	老铁山角	北城隍岛北	隍城水道	小钦水道	大钦水道	北陀矶水道	长山水道	登州水道
面积/ km^2	515.9	1.6	1.3	2.6	3.7	1.5	6.8	40.0

注:高山水道、猴矶水道、北陀矶水道大于 100 W/m^2 的面积之和不超过 0.6 km^2 , 表略。

3)从潮流往复性来看,老铁山角的东侧和外海(30 m 等深线以深)以往复流为主,西侧靠岸部分往复性不明显。登州水道大流速区的北侧往复性也不明显,而水道南部流速相对较小的海域是纯正的往复流。另外几个流速大于 2 m/s 的水道或者岛的顶端,均是典型的往复流。

综上所述,渤海海峡水道众多,其潮流能的开发潜力大,其中以最北部老铁山角周边以及最南部的登州水道潮流能最为可观,而老铁山水道北部高能区面积最广,其中超过 100 W/m^2 的区域高达 515.9 km^2 。因此作者认为老铁山东角近岸海域适合进行大规模的潮流发电站建设。

5 结 语

本研究基于 FVCOM 模式,建立了渤海海峡高分辨的潮流模型,并通过两个长期定点 ADCP 测流资料对模式的可靠性进行了验证。利用模型结果详细的描述了渤海海峡的潮流状况,包括潮流椭圆,最大可能潮流等。以模型结果为基础,绘制了能流密度图,并结合流速、潮流的往复性讨论了渤海海峡潮流能分布情况。对平均能流密度大于 100 W/m^2 的海区面积来讲,老铁山角比登州水道要大一个量级,而登州水道要比其余

各个水道的面积也大了一个量级。最后建议在老铁山角东部近岸海域适合进行大规模的潮流发电站建设。本文章仅从水动力的角度对渤海海峡潮流能资源进行了评估,实际建站之前还应综合考虑海底底质、军事用海、航行、对生态环境影响等各种因素。另外需要指出的是发电机在海底建成之后特别是建设规模较大时,会影响到潮流场,从而影响到能流密度的计算,如何考虑它们之间的相互作用从而对潮流能资源进行更为合理的评估是我们仍需进一步研究的问题。作者的下一步工作,将在潮流模式中考虑发电机对潮流场的影响,并选定某一海区进行深入的潮流能资源评估研究。

参考文献(References):

- [1] LV X, GUO P F. Review of china's tidal energy development [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2011, (1): 26-30. 吕忻, 郭佩芳. 我国潮流能资源开发评述[J]. 海洋湖沼通报, 2011, (1): 26-30.
- [2] LV X G, QIAO F L. Advances in Study on Tidal Current Energy Resource Assessment Methods [J]. Advances In Marine Science, 2008, 26(1): 98-108. 吕新刚, 乔方利. 海洋潮流能资源估算方法研究进展[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(1): 98-108.
- [3] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20: 851-875.
- [4] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model FVCOM user manual [M]. New Bedford: SMASST/UMASSD, 2006.
- [5] CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 159-186.
- [6] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [7] ZHAO B R, FANG G H, CAO D M. Numerical modelling of tide in the bohai, yellow and east china seas[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(5): 1-10. 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(5): 1-10.
- [8] WAN Z W, QIAO F L, YUAN Y L. Three-dimensional numerical modelling of tidal waves in the Bohai, Yellow and East China seas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica. 1998, (29)6: 611-616. 万振文, 乔方利, 袁业立. 渤、黄、东海三维潮汐运动数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 611-616.
- [9] WANG Y G, FANG G H, CAO D M, et al. Tides of the Bohai, Yellow and East China Seas by Assimilating Gauging Station Data Into A Hydrodynamic Model[J]. Advances In Marine Science, 2004, 22(3): 253-274. 王永刚, 方国洪, 曹德明, 等. 渤、黄、东海潮汐的一种验潮站资料同化数值模式[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(3): 253-274.
- [10] CHEN D X. Atlas of Bohai Sea, Esat China Sea, South China Sea-Hydrology[M]. Beijing: Ocean Press, 1992. 陈达熙主编. 渤海、黄海、东海海洋图集-水文分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [11] JTJ-98 Technical Regulation Of Harbor Engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 1987. JTJ-98 港口工程技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [12] WU H, ZHAO S M, ZHANG S, et al. Preliminary assessment of tidal energy in Lao Tieshan channel[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3): 310-314. 武贺, 赵世明, 张松, 等. 老铁山水道潮流能初步估算[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 310-314.
- [13] LV X G, QIAO F L, ZHAO C, et al. Numerical Evaluation Of Tidal Stream Energy Resources In The Ocean: A Case Study In Jiaozhou Bay Mouth[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(2), 137-143. 吕新刚, 乔方利, 赵昌, 等. 海洋潮流能资源的数值估算-以胶州湾口为例[J]. 太阳能学报, 2010, 31(2): 137-143.

Assessment of Tidal Stream Energy in the Bohai Strait Using A High Resolution Model

WU Lun-yu^{1,2}, WANG Xing³, XIONG Xue-jun^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical modeling, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *North China Sea Environmental Monitoring Center, SOA, Qingdao 266033, China)*

Abstract: A high resolution tide current model of the Bohai Sea is built based on an unstructured grid, finite volume method ocean model (FVCOM). The results from the model agree well with previous studies and field data. The tidal waves in the Bohai Strait is described and the tidal stream enering is estimated based on the vertically averaged currents derived from the model. The results show that the tidal current is mainly rectilinear and the maximal value of the possible maximum velocity of the tidal current reaches 3.3 m/s at the west of the Laotieshan Cape. The sea area where the power density is larger than 100 W/m² can reach to 515.9 km² near the Laotieshan Cape. This is one order greater than that in the Dengzhou Channel, while the Dengzhou Channel is one oder larger than the rest channels.

Key words: Bohai Strait; tidal stream energy; FVCOM

Received: December 20, 2011