

较大尺度下潮流物模试验理论可行性的数值研究^{*}

刘学海^{1,2}, 袁业立^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要:以渤海及其局部海域为例,通过数值模拟量化地转缺失对水动力过程的影响,评价不同空间尺度下实施潮流物理模型试验的理论可行性。结果表明,对整个渤海、辽东湾这么大尺度的海域实施物模试验理论上是不可行的;对90 km尺度的渤海湾,地转缺失使模拟结果存在较大偏差;对莱州湾61 km尺度的海域可进行物模试验。研究确定60 km为实施潮流物模试验一般的理论允许尺度。

关键词:物模试验;潮流;数值模拟;尺度;科氏力

中图分类号:P731.2

文献标志码:A

文章编号:1671-6647(2012)02-0163-08

物理模型试验是海洋科学和海洋工程中一个重要的研究手段,在用于近海环境治理研究时一般需对较大海域的水动力及污染物扩散过程进行模拟。日本早在20世纪70年代就专门对濑户内海建立了全尺度的大型物模实验水池,研究了该海域的水动力、污染物扩散和水体交换规律,达到了濑户内海污染防治的预期目的^[1]。国内近年相继开展了较大尺度海域的物模试验,如杭州湾金山以内的模型区涵盖水体面积约2 200 km²,湾口南北宽约45 km,东西长约60 km^[2]。此外,还有目前国内规模最大的珠江口模型^[3]等。

对较大尺度海域进行物模试验,需要考虑一个基本问题:由于试验中地转作用在技术上难以实现,而实际上潮流受地转引起的偏向力的影响,流速、流向发生着变化,特别是开阔海域形成旋转潮流,那么地转缺失对模拟结果会有多大影响呢?在水流动力方程中,如果科氏力项与惯性项、重力项、粘性项等相比量值不可忽略,则模拟的仿真性理论上就可能不符合精度要求。作为世界上最大的水动力实验室,濑户内海模型长230 m,宽100 m,水面面积为7 500 m²,原型长460 km,宽200 km,水域面积为30 000 km²,但水域由几个湾和水道组成,较为狭长,模型忽略了地转效应^①。而金山以内的杭州湾潮差大,水深浅,有资料^[4]认为科氏力不占主导地位。

目前,对较大尺度海域物模试验的地转效应研究尚少。本研究采用尺度分析的方法对多大的尺度理论上允许实施物模试验进行了初步探讨^[5]。由于数值模型能够方便地在模拟中考虑或不考虑科氏力的作用,采用数模的方法可对该问题进行有效的评价,目前尚没有查到利用该方法分析地转缺失会产生多大试验偏差的文献。

本研究以渤海及其局部海域为研究对象,通过数值试验研究较大海域物模允许的尺度范围。分别在考虑地转和不考虑地转的情况下,模拟若干不同尺度海域的潮流过程,比较两情况下得到的水位的振幅和迟角、余流、涨潮落潮时的流场分布等,评价在多大的尺度下考虑地转与不考虑地转的差别在物模试验的允许范围内,该尺度即为物模的允许尺度。

^{*} 收稿日期:2010-07-21

资助项目:国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项——较大海域潮流物模试验的理论可行性及复合模拟技术研究(2007G24);国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费项目——胶州湾海水动力物理模拟实验研究(200705012);国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费项目子课题——海洋监测设备动力环境实验水槽关键技术研究;浪、流、风等现场动力环境研究(201005027-5)

作者简介:刘学海(1973-),男,山东东明人,副研究员,博士,主要从事海洋环境及生态动力学模型方面研究. E-mail: liuxh@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

① 顾伟浩译. 濑户内海大型水理模型实验经过. 中国科学院海洋研究所, 1978.

1 数值试验的模型配置

数值计算采用 Princeton Ocean Model, 水动力过程只包含单个分潮 M_2 。由于大尺度海域的物模试验均为变态模型, 仅要求各物理量沿垂直方向的平均值满足相似理论, 经相似变换得到的模型只在平面二维方向上满足水流运动相似条件, 因此本试验采用二维模型。

首先对渤海整体海域进行模拟, 模型的网格分辨率为 $4' \times 4'$, 计算的时间步长为 600 s。闭边界采用光滑固壁假设, 初始流速为零, 开边界采用水位强迫约束。开边界取烟台—大连附近的连线, 开边界的潮汐调和常数取自图集^[6]。

对渤海全海域模拟结果进行调和分析, 得到各局部海域(渤海湾、辽东湾及莱州湾三个海域)湾口处的潮流调和常数, 采用流速控制的方式分别进行三个海域潮汐潮流的模拟。

渤海湾模型区为 $118^\circ 45'$ 以西海域, 辽东湾模型区为 $49^\circ 30'$ 以北海域, 两海域模型的网格分辨率均为 $2' 2'$, 莱州湾的计算区域为 $37^\circ 50'$ 以南海域, 网格分辨率东西为 $2'$ 、南北为 $1'$, 三个海域的计算时间步长均为 600 s。

2 数值试验结果分析

2.1 渤海整体海域的模拟

图 1 给出在地转作用和地转缺失的情形下模拟的整个渤海的 M_2 分潮等振幅线和等迟角线的分布, 可看出两种情况的差别显著。在科氏力和地形的共同作用下, M_2 分潮在渤海形成 2 个旋转潮流系统; 而科氏力缺失的情况下, 则没有形成旋转潮流系统, 特别是在 3 个海湾中, 水位等振幅线和等迟角线由湾口向湾内平行分布, 表现为往复潮流的特征。可见, 地转对渤海潮汐系统的形成有很大贡献, 对整个渤海进行物模试验理论上显然是不可行的。

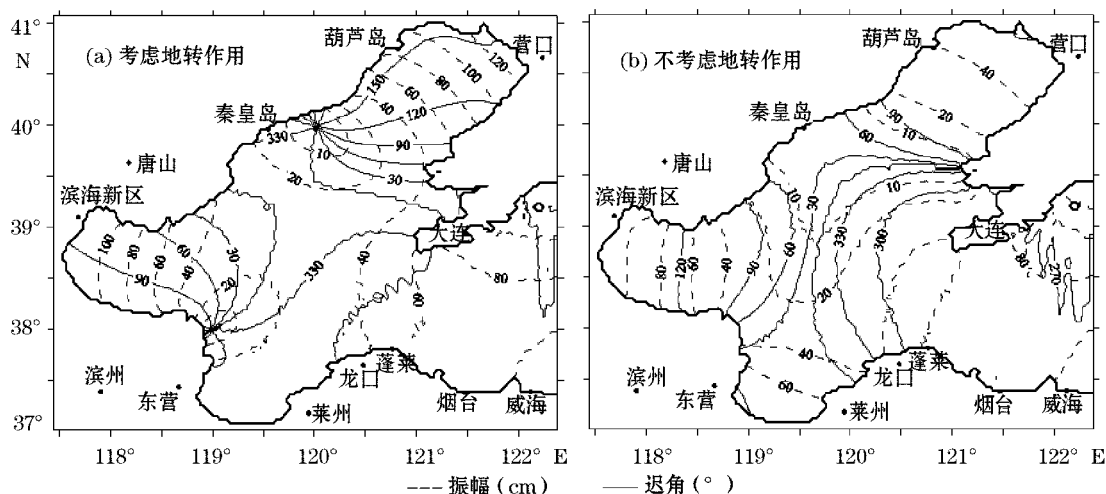


图 1 模拟渤海 M_2 的振幅和迟角

Fig. 1 Simulated distributions of co-amplitude and co-phase lag lines of M_2 in Bohai Sea

2.2 渤海湾的模拟

比较图 2 中考虑地转作用和不考虑地转作用 M_2 分潮的模拟结果。二者的振幅平均差别为 5.7%, 迟角平均差别为 13%。水位的振幅均为由湾口向湾内逐渐增大, 等振幅线基本呈南北向, 二者差别不大, 只是不考虑地转模拟的振幅在湾顶处略小, 等振幅线略直。二者的等迟角线在渤海湾内的形状和分布明显不一样: 地转情况下, 等迟角线自东北向西南呈逆时针旋转增大, 而地转缺失模拟的结果是, 由湾外向湾内逐渐增加, 说明潮流是往复流。

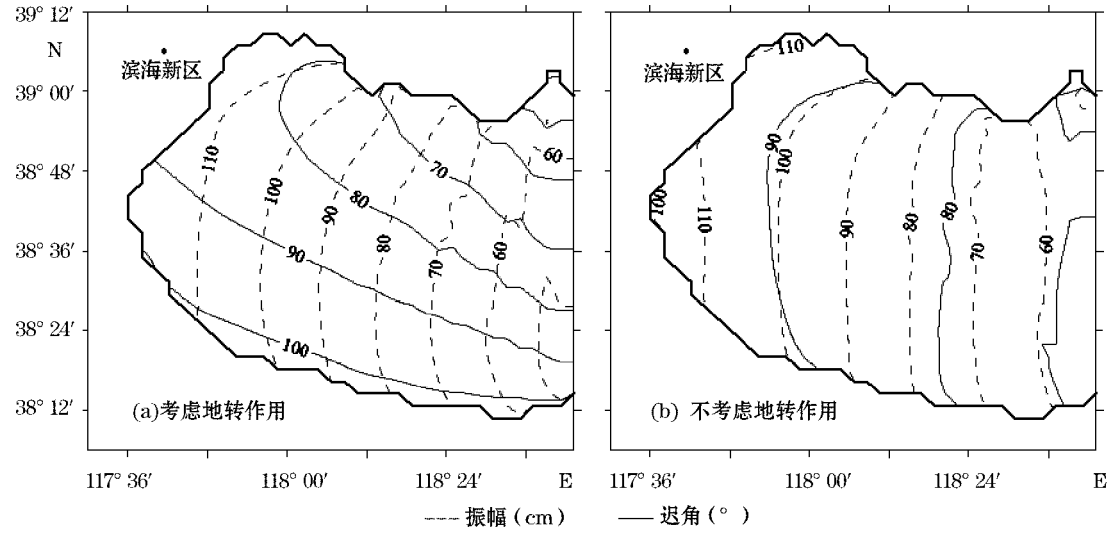


图 2 模拟渤海湾 M_2 的振幅和迟角

Fig. 2 Simulated distributions of co-amplitude(dotted, cm) and co-phase lag(solid, °) lines of M_2 constitute in Bohai Bay

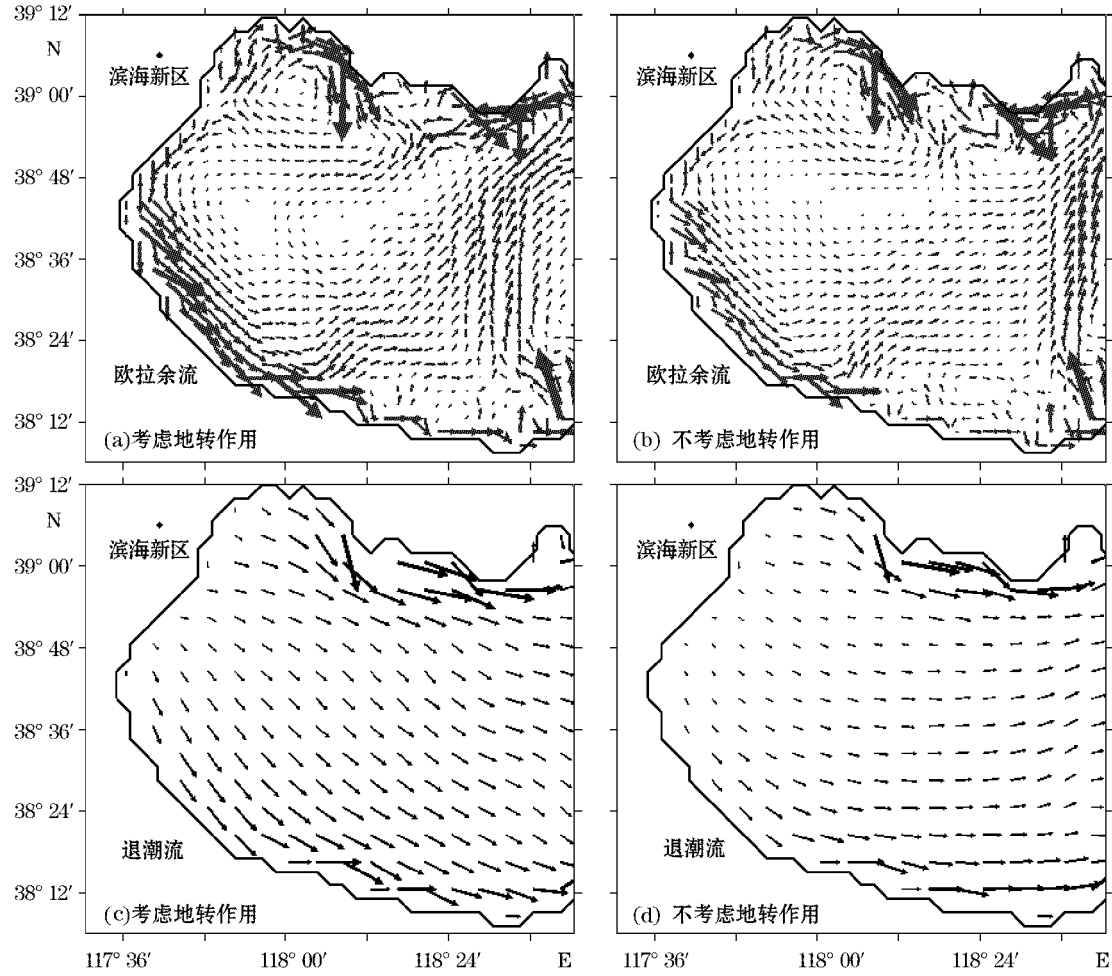


图 3 渤海湾潮余流(a,b)及潮流(c,d)

Fig. 3 Simulated distributions of tide-induced residual current(a,b) and ebb current(c,d) of M_2 constitute in Bohai Bay

从图 3 看出,两种情况均在湾的西北部存在顺时针环余流,湾顶均存在逆时针环流,在湾口处(接近黄河口)存在顺时针的余流,且在湾口总体上具有南进北出的分布特征。但比较可见,考虑地转作用的欧拉余流相对不考虑地转作用更加明显,特别是湾顶和中部海域存在的逆时针余流,这是在地转作用下湾内产生的逆时针的旋转潮流所致。图 3 以退潮时的流场分布给出两种情况下同一时间的潮流差别,可见,若不考虑地转的影响,落潮时湾内的潮流南北分布更加均匀,潮流方向总体是东西向,而在地转作用下,潮流有向南偏转的趋势,两种情况存在着明显的差别。

渤海湾模型区的尺度是南北约 130 km、东西约 90 km,以上分析可见,对该尺度的渤海湾实施物理模型试验时,地转缺失将使模拟结果产生较大的偏差。因此,必须缩小模拟尺度才可对该湾进行物模试验。

2.3 辽东湾的模拟

比较图 4 可以看出,在考虑和不考虑地转作用两种情况下模拟的 M_2 分潮的等振幅线和等迟角线有着显著差别。地转作用下,在秦皇岛附近海域出现一个无潮点,围绕此点在辽东湾形成一个旋转潮波系统;而如果没有地转作用,湾内则没有出现无潮点,等振幅线和等迟角线在湾中由外向内基本平行递增,很明显表现为往复流的特征。比较图 5 两种情形下的潮致余流:地转作用下秦皇岛附近无潮点周围出现较强的顺时针环流,而若没有地转作用该位置的环流则显得零乱且没有余流的旋转中心;另外,湾北部海域的水流在地转作用下其逆时针的余流相对不考虑地转作用更加明显。

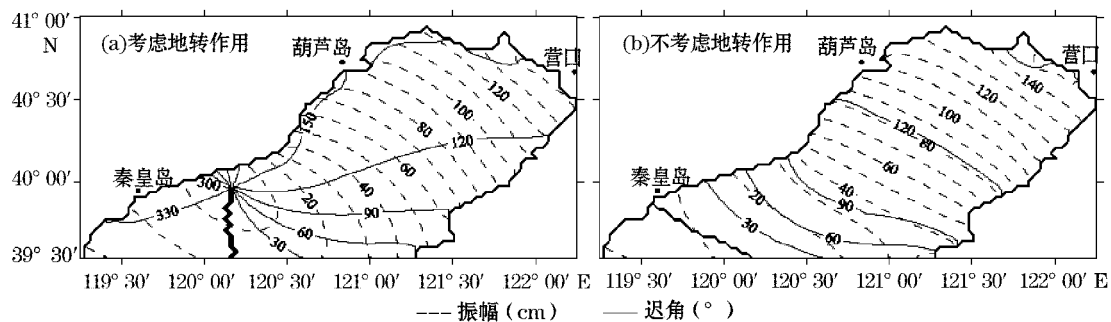


图 4 辽东湾 M_2 的振幅和迟角

Fig. 4 Simulated distributions of co-amplitude and co-phase lag lines of M_2 constitute in Liaodong Bay

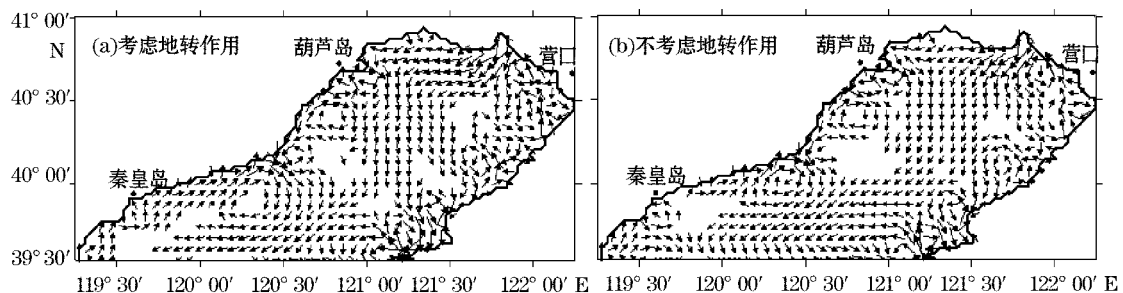


图 5 辽东湾潮余流

Fig. 5 Simulated distributions of tide-induced residual current of M_2 constitute in Liaodong Bay

基于以上分析可见,对辽东湾这么大尺度的海域,地转对该海域水动力特征的形成起着非常重要的作用,若对其进行平面水池的物理模型试验,地转的缺失将使得模拟的潮汐潮流较大程度地偏离实际。辽东湾模型区南北约 150 km、东西约 160 km,若对该湾进行物模试验,必须减小模型尺度。以下讨论尺度较小的莱州湾。

2.4 莱州湾的模拟

图 6 分别给出地转作用与地转缺失下 M_2 分潮水位的振幅和迟角的分布,两情况下模拟的振幅平均差别为 6.3%,地转缺失下模拟的振幅较大,特别在湾顶较明显;两情况下迟角平均差别为 4.8%,两值差异不大,且都在 $330^\circ \sim 340^\circ$ 左右,但湾内等迟角线的走向有较大的不同。差别在于:在地转作用下受湾口处旋转潮波系统的影响,迟角由西北向东南逐渐增加;而如果缺失地转作用,随着莱州湾由湾口向湾顶的伸入,迟角则基本呈东北至西南增加的趋势,表现出湾顶为往复流的潮波特性。

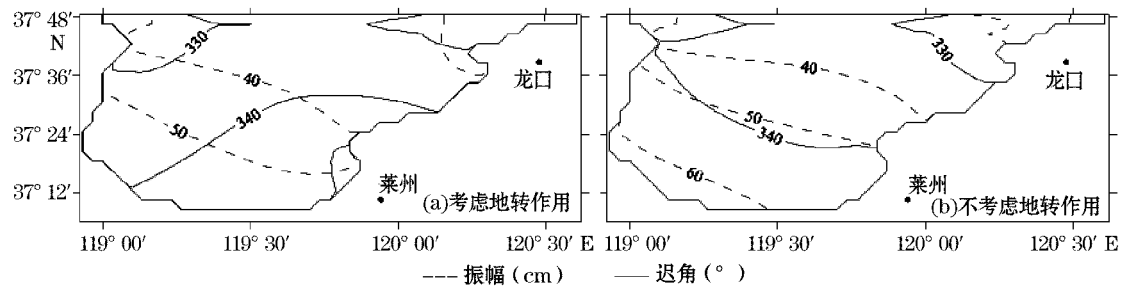


图 6 模拟莱州湾 M_2 的振幅和迟角

Fig. 6 Simulated distributions of co-amplitude and co-phase lag lines of M_2 constituent in Laizhou Bay

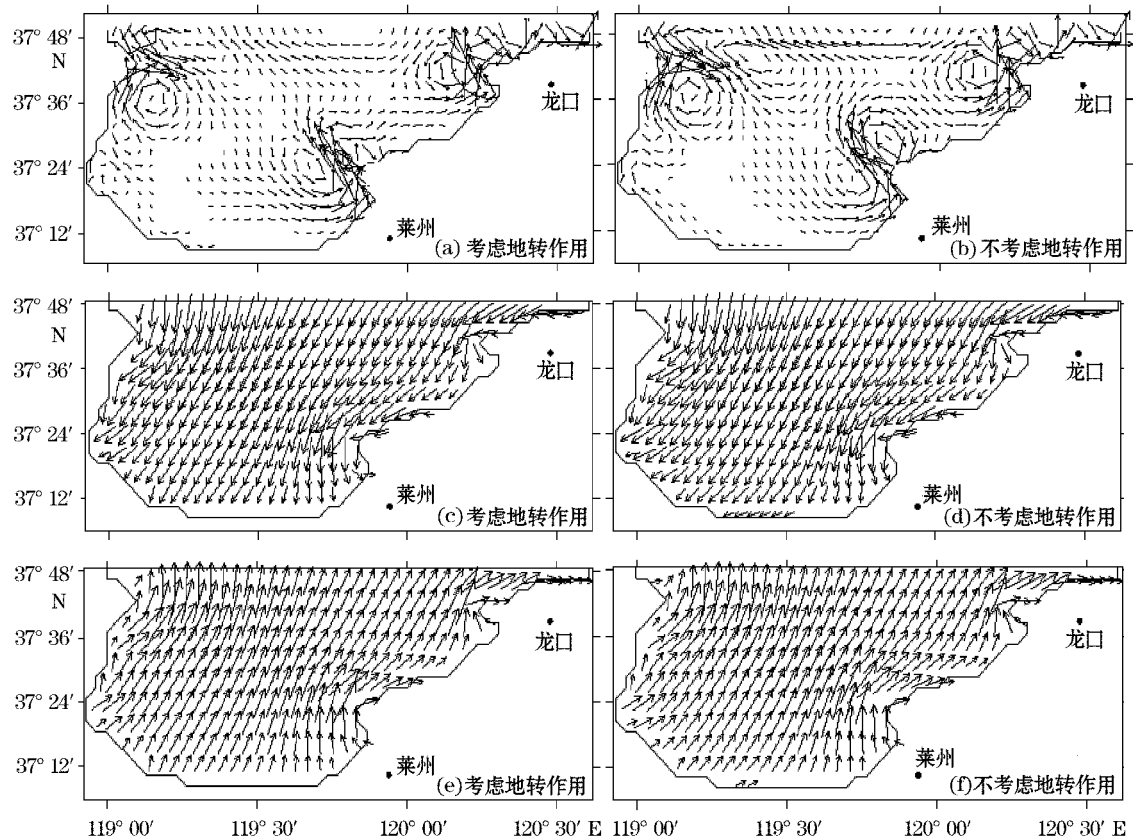


图 7 莱州湾 M_2 潮余流(a,b)、涨潮流(c,d)、退潮流(e,f)

Fig. 7 Simulated distributions of tide-induced residual current(a,b), flood current(c,d) and ebb current(e,f) of M_2 constituent in Laizhou Bay

比较图 7 中考虑地转和不考虑地转分别模拟的潮流结果。对 M_2 分潮的欧拉余流,两种情况下,黄河口

附近都存在顺时针环流,东北部的湾口都存在逆时针环流,均存在由湾西北流向东南海域的较弱余流,并在莱州港(图 6~9 中莱州湾西南部岸线凸入处)以西海域形成逆时针环流。较明显的差别在于:如果没有地转作用则在莱州港以北还存在一个更为显著的顺时针余流;在地转作用下湾的西南部存在东南向的余流,而没有地转作用则为顺岸的反向流。另外,两情况下的涨潮流(涨急时刻)及退潮流(落急时刻)的差别不明显。

本模型区南北长约 76 km,东西宽约 110 km,由以上分析可知,该尺度下地转对水动力的影响总体来说仍是不可忽视的,若进行莱州湾的物模试验,可以适当缩小模拟的海域尺度。

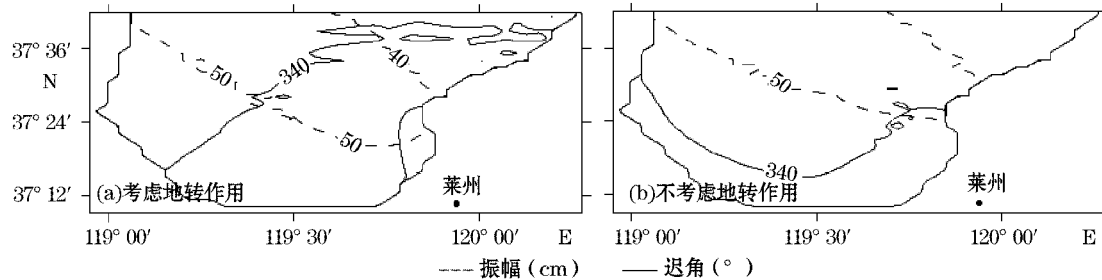


图 8 模拟莱州湾(较小尺度) M_2 的振幅和迟角

Fig. 8 Simulated distributions of co-amplitude and co-phase lag lines of M_2 constituent for a smaller area of Laizhou Bay

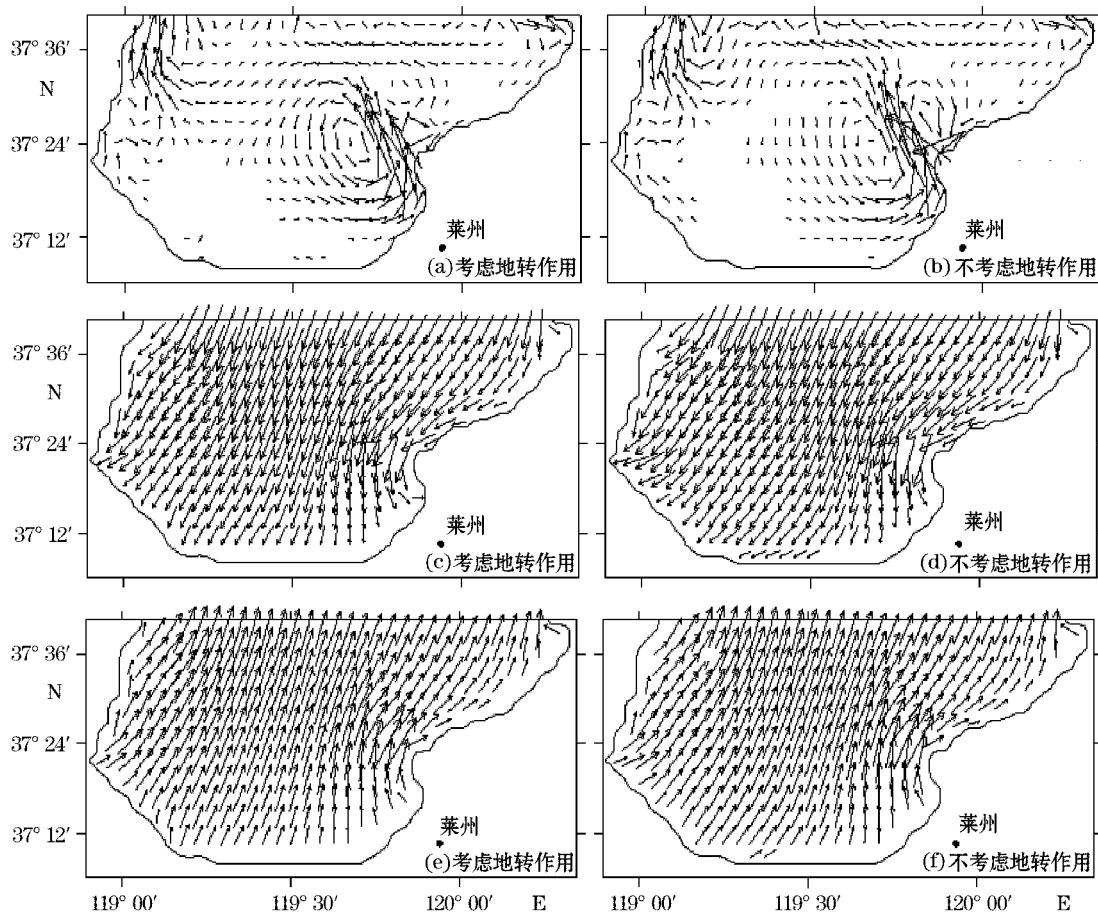


图 9 莱州湾较小尺度海域 M_2 潮余流(a,b)、涨潮流(c,d)、退潮流(e,f)

Fig. 9 Simulated distributions of tide-induced residual current(a,b), flooding(c,d), and ebbing (bottom)(e,f) of M_2 constituent in a less area of Laizhou Bay

2.5 莱州湾较小尺度海域的模拟

现将莱州湾的模拟范围缩小为 $37^{\circ}41'$ 以南海域,其东西宽 108 km、南北长 61 km。比较图 8 地转作用和地转缺失下 M_2 的潮汐模拟结果:两情况下的振幅平均差别为 3.2%,图中差别不明显,地转作用情况下的振幅在湾顶处也仅略大;模型区的迟角基本在 340° 左右,两情况下全海域的平均差别为 2.5%,不考虑地转作用得到的迟角仅在湾顶略微偏小。另外,如果用水位作为模型的控制边界条件,两情况下全海域的振幅平均相差 3%,迟角平均差别仅为 0.96%。

比较图 9 中考虑与不考虑地转作用分别模拟的潮流结果。两种情况下模拟的潮流余流,均在湾口西部存在顺时针的环余流,在莱州港以外海域有逆流的环余流,比较可见,两情况下的差别较小。另外,从图中看不出两情况下的涨潮流(涨急时刻)及退潮流(落急时刻)有明显差别。

以上模拟结果对比分析可见,对莱州湾 $37^{\circ}41'$ 以南的海域进行物理模型试验时由于地转缺失引起的理论偏差不大,因此可以对该尺度即 60 km 左右的海域实施潮流物模试验。另外,参考采用尺度分析的方法对莱州湾地转作用的评价结果^[5],也表明 60 km 的海域是实施潮流物模试验的理论允许尺度。

3 结 语

本研究以渤海及其局部海域(渤海湾、辽东湾及莱州湾)为例,分别对这些不同尺度的海域建立数值模型,在考虑科氏力和不考虑科氏力两种情况下计算了潮汐潮流过程,由数值模拟结果评价了地转与地转缺失下的实验差别,探讨了不同尺度海域进行物理模型试验的理论可行性。以主要分潮 M_2 为例的数值试验表明:

1) 科氏力作用下,在渤海形成了 2 个旋转潮波系统,而如果科氏力缺失,则形不成旋转潮波系统。地转对渤海潮波系统的形成有很大贡献,对整个渤海进行物模试验理论上是不可行的。对辽东湾这么大尺度的海域,地转对水动力特征的形成起着重要作用,付诸物理模型试验也是不可行的。对具有 90 km 尺度的渤海湾,地转的缺失理论上会使模拟结果存在较大偏差,必须缩小模拟尺度才可进行物模试验。

2) 对莱州湾分别选取 76 km 和 61 km 两个不同尺度进行评价,表明 61 km 的海域在考虑地转与不考虑地转作用的情况下模拟的结果差别不大,对该尺度的海域理论上可进行物模试验。

3) 结合数值模拟和尺度分析的评价结果,理论上确定 60 km 为实施潮流物理模型试验的一般允许尺度,对不大于该尺度的海域进行物模试验时地转缺失的影响不大。

参考文献(References):

- [1] HIROKAZU Y, ETSUO K. Environmental management of the Seto Inland Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 1991, 23: 485-488.
- [2] HAN H Q, XIONG S L, ZHU J Z, et al. The impact on the flow of Qiantang Estuary by the Hangzhou Bay major ridge[J]. Donghai Marine Science, 2002, 20(4): 58-63. 韩海骞,熊绍隆,朱军政,等. 杭州湾跨海大桥对钱塘江河口水流的影响[J]. 东海海洋, 2002, 20(4): 58-63.
- [3] WU X M, DENG J Q, WU T S, et al. Design and application of large physical model for Pear River estuary[J]. Pear River, 2002, 6: 14-16. 吴小明, 邓家泉, 吴天胜, 等. 珠江河口大型潮汐整体物理模型设计与应用[J]. 人民珠江, 2002, 6: 14-16.
- [4] CAO Y, LIN B R. Tidal characteristics of Hangzhou Bay[J]. J. of Zhejiang Wat. Cons & Hydr. College, 2000, 12(3): 14-16. 曹颖, 林炳尧. 杭州湾潮汐特性分析[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2000, 12(3): 14-16.
- [5] LIU X H, YUAN Y L. Scalar analysis and similarity conditions of marine environment physical simulation[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(3): 285-291. 刘学海,袁业立. 海洋环境动力学物理模拟的尺度分析及相似条件[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 285-291.
- [6] CHEN D X. Marine Atlas of the Bohai sea, Yellow Sea and East China Sea(Hydrology)[M]. Beijing: Ocean Press, 1992. 陈达熙. 渤海东海海洋图集——水文分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.

Numerical Study on the Theoretic Feasibility for Physical Simulation of Tidal Process in Large Sea Areas

LIU Xue-hai^{1,2}, YUAN Ye-li^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: Taking the Bohai Sea and its several local areas as the study cases, the theoretical feasibility for physical model test of tidal current is evaluated through quantitative analysis of the effects of the absence of Coriolis force on the hydrodynamic processes by means of numerical simulation experiments under the conditions with and without Coriolis force. The results show that it is theoretically unfeasible to make physical model test for such a large scale as the whole Bohai Sea or the Liaodong Bay, and that for the Bohai Bay which has a scale of about 90 km the absence of Coriolis force will give a larger bias to the results from the simulation, while for the Laizhou Bay which has a scale of 61km it could be reasonable to make the physical model test. It is therefore concluded that the spatial scale permitted theoretically for the physical model test of tidal current could be 60 km.

Key words: physical model test; tidal current; numerical simulation; scale; Coriolis force

Received: July 21, 2010