

## 日本海及其海峡通道潮汐与潮流特征分析

王宁, 陈诗尧, 汪浩笛, 张永垂\*

(国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 利用验潮站数据和有限元解潮汐模型 FES2014 数据集对日本海及其海峡通道的潮汐和潮流分布特征进行了系统分析, 并对不同分潮流在海峡内分布的成因进行了一定的动力分析。结果表明: 由于日本海的半封闭特性, 除了海峡通道的潮汐振幅和潮流较大外, 海盆内部均较小。所有分潮中,  $M_2$  分潮振幅最大。朝鲜海峡北部和鞆海峡南部各有 1 个半日潮无潮点, 朝鲜海峡北部、津轻海峡和宗谷海峡内存在日潮无潮点。朝鲜海峡潮流强流区位于海峡西南部和对马岛南北两侧海域, 半日潮流西水道强于东水道, 日潮流东西水道相当,  $M_2$  分潮流最强, 可达 60 cm/s。津轻海峡和宗谷海峡的  $K_1$  和  $O_1$  分潮流较强。进一步分析发现, 海峡内分潮流的分布与地形及分潮的同潮时分布密切相关。日本海内部潮汐和潮流类型均以不正规半日潮为主, 朝鲜海峡主要为正规半日潮汐和不正规半日潮流, 津轻海峡和宗谷海峡主要为不正规半日潮汐和正规日潮流。

**关键词:** 日本海; 海峡通道; 潮汐; 潮流

**中图分类号:** P731.23 P722.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-0239(2023)02-0045-11

### 0 引言

日本海是位于西北太平洋的一个边缘海, 被亚洲大陆、库页岛和日本诸岛所包围, 面积约为 100 万平方公里, 最大深度超过 3 700 m。日本海是一个半封闭的海盆, 它通过 4 个浅且狭窄的海峡与外海相通: 南部通过约 150 m 深的朝鲜海峡与黄海和东海相通; 东部通过约 200 m 深的津轻海峡与西北太平洋相通; 东北部和北部通过约 80 m 深的宗谷海峡和不到 20 m 深的鞆海峡与鄂霍次克海相通。朝鲜海峡和津轻海峡分别是对马暖流的入口和主要输出口<sup>[1-3]</sup>。值得注意的是, 尽管日本海是一个相对较小的边缘海, 但它具有许多大洋特征, 如中尺度涡、副极地锋和经向翻转流等。

对于半封闭的边缘海, 大洋潮汐的外部强迫及其与地形的相互作用是导致局地潮汐特征的主要因素。ODAMAKI<sup>[4]</sup>利用日本海洋数据中心 (Japan

Oceanographic Data Center) 的多种数据和简单一维模型, 较系统地分析了日本海及其海峡通道的潮汐特征, 发现日本海由于具有半封闭性, 其内部潮汐的振幅较小, 半日潮的无潮点位于日本海南北两端, 朝鲜海峡和宗谷海峡则存在全日潮无潮点。此外, 基于锚系海流计测得的海流数据, ODAKAKI 还对日本海海峡通道的潮流进行了研究, 发现朝鲜海峡潮流流速的大值区位于对马岛南北两侧,  $M_2$  潮流振幅可以达到 51 cm/s,  $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  潮流振幅可达 35 cm/s; 津轻海峡日潮流强于半日潮流,  $K_1$  和  $O_1$  潮流振幅可达 51 cm/s 左右; 宗谷海峡同样是日潮流较强, 振幅约为 41~82 cm/s。

朝鲜海峡是连接日本海与外界的最宽的海峡, 也是开阔大洋影响日本海潮汐的最重要通道<sup>[5]</sup>。经朝鲜海峡进入日本海的半日潮和日潮能量分别占总能量的 98% 和 78%<sup>[6]</sup>, 且对马岛东西两侧振幅相差很大, 西侧高于东侧<sup>[5]</sup>, 海峡北侧存在日潮和半日

收稿日期: 2021-07-16; 修回日期: 2022-08-22。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604100)。

作者简介: 王宁 (1988-), 男, 讲师, 博士, 主要从事海洋中小尺度过程研究。E-mail: wangning19@nudt.edu.cn

\*通信作者: 张永垂 (1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋环流动力学和海洋中尺度涡研究。E-mail: zyc@nudt.edu.cn

潮的无潮点<sup>[7-10]</sup>。依据二维长波方程,FANG等<sup>[7]</sup>和杨景飞等<sup>[8]</sup>使用有限差分方法计算了朝鲜海峡的半日潮和全日潮,发现朝鲜海峡潮流以半日潮为主, $M_2$ 潮流大小约为 $K_1$ 和 $O_1$ 之和。基于对马岛南北两侧布置的两套潜标上的声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP)数据,TEAGUE等<sup>[11]</sup>研究了朝鲜海峡的潮汐与潮流特征,发现对马岛南侧潮汐振幅可达300 cm,但北侧振幅只有70 cm; $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 是朝鲜海峡内的主要分潮,整层平均的正压潮流在对马岛西北侧以 $M_2$ 分潮为主,流速在17~25 cm/s之间,对马岛东南侧潮流则以 $M_2$ 和 $K_1$ 为主,两者流速相当,约为13~23 cm/s, $K_1$ 分潮的流速在25~40 m层达到流速峰值。TAKIKAWA等<sup>[12]</sup>利用船载ADCP数据分析了朝鲜海峡的潮流情况,发现 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 和 $O_1$ 4个主要分潮流对平均动能的贡献可达56%,西水道强度是东水道的1.4~2.1倍,4个分潮正压潮流之间的速度比为1:0.45:0.59:0.51,潮流椭圆的方向为东北—西南走向。BOOK等<sup>[13]</sup>通过数值模式同样发现 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 是朝鲜海峡中正压潮流振幅最大的几个分潮。此外,朝鲜海峡北部到日本海内部的地形突变为内潮的产生提供了良好的条件<sup>[1,14]</sup>。PARK等<sup>[14]</sup>在朝鲜海峡北口观测到半日内潮的产生,并发现中尺度涡对于半日内潮的产生和传播具有重要影响。ISODA等<sup>[15]</sup>利用数值模式同样在朝鲜海峡北口发现半日内潮的产生,并指出由于海水层化的季节性变化,内潮的产生和传播距离具有明显的季节变化。

津轻海峡连接日本海与太平洋,其中有两个宽度小于20 km的狭窄“颈部”区域(见图1),呈现出独特的潮汐特征。海峡内振幅半日潮大于日潮,但潮流却相反,半日潮小于日潮<sup>[2,15-16]</sup>。ONISHI等<sup>[2]</sup>利用1999年10月—2000年3月断面上船载ADCP数据研究了津轻海峡的潮流特征,分析了4种主要分潮( $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ )的潮流,结果发现主要潮汐成分几乎都是正压的,半日潮振幅大于日潮振幅,而潮流则相反,日潮大于半日潮。ISODA等<sup>[15]</sup>利用数值模型,发现 $K_1$ 分潮在津轻海峡的两个“颈部”区域的正压潮流流速可达90 cm/s。LUU等<sup>[16]</sup>利用正压模型研究了津轻海峡的潮汐和潮流,首次发现了津轻海峡日潮无潮点的存在,并指出在两个狭窄的“颈部”区域存在较强潮流。随后,朱学明等<sup>[9]</sup>在利用海洋

数值模式FVCOM(Finite - Volume Coastal Ocean Model)研究西北太平洋潮汐特征时确认了津轻海峡中日潮无潮点的存在。基于海峡东侧“颈部”区域一个观测点15 d的海流数据,WADA等<sup>[17]</sup>发现该处半日潮流的谱能量超过了日潮流,这与传统结论相反。但由于只有一个观测点,其结论可能并不具有代表性。

宗谷海峡连接日本海与鄂霍次克海,是宗谷暖流的出口。基于验潮站数据和10 m的海流计数据,ODAMAKI<sup>[18]</sup>研究了北海道沿岸鄂霍次克海的潮汐与潮流特征,其中宗谷海峡 $K_1$ 和 $O_1$ 两个日潮流速较大,可达约35 cm/s,主要是由鄂霍次克海和日本海潮汐振幅和位相的差异产生。AOTA等<sup>[19]</sup>通过两年多20 m层的海流数据发现,宗谷海峡附近 $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 和 $S_2$ 潮流的平均最大流速可达29.9 cm/s、28.3 cm/s、10.4 cm/s和3.7 cm/s,潮流椭圆的位相和方向在不同阶段都比较一致。

以上结果表明,之前日本海潮汐研究多以利用模式(模型)数据或少量观测数据对某一海峡进行分析为主。尽管先前的研究揭示了日本海及其海峡通道的部分潮汐特征,但由于使用的观测资料和研究区域的限制,难以形成对整个日本海及其海峡潮汐与潮流精细特征的系统性认识。此外,对日本海几个海峡通道潮流的研究大多是描述其分布特征,对其成因分析较少。本文拟利用一种精细的潮汐数据集,对日本海及其海峡通道潮汐与潮流特征进行系统分析,并对海峡内潮流分布的成因开展一定的分析,这对于我国认识日本海的水文特征及开展海上运输和军事活动都有重要意义<sup>[8]</sup>。

## 1 数据

本文使用的两种数据包括日本海及其海峡通道沿岸的验潮站数据(网址:<https://uhslc.soest.hawaii.edu/>),以及法国 Aviso(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)数据中心提供的有限元解潮汐模型2014版(Finite Element Solution 2014, FES2014)潮汐数据集(网址:<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html>)。

FES2014是有限元解潮汐模式的最新版本,由

FES2012(Finite Element Solution 2012)模式改进而来。同FES2012相比,FES2014利用了更长的高度计时间序列和新的高度计标准,改进了建模和数据同化技术,应用了更精确的海洋水深和更精细的浅水区网格。因此,FES2014的性能得到了显著改善,特别是在浅水区和北极部分地区。与其他全球海洋潮汐数据集相比,FES2014在全球大多数海洋区域的去除混叠性能得到了改善<sup>[20]</sup>。FES2014是全球提供分潮数量最多的潮汐数据集,包含34个分潮的振幅和迟角、潮流经向和纬向的振幅和迟角数据,水平分辨率为 $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ <sup>[20]</sup>。

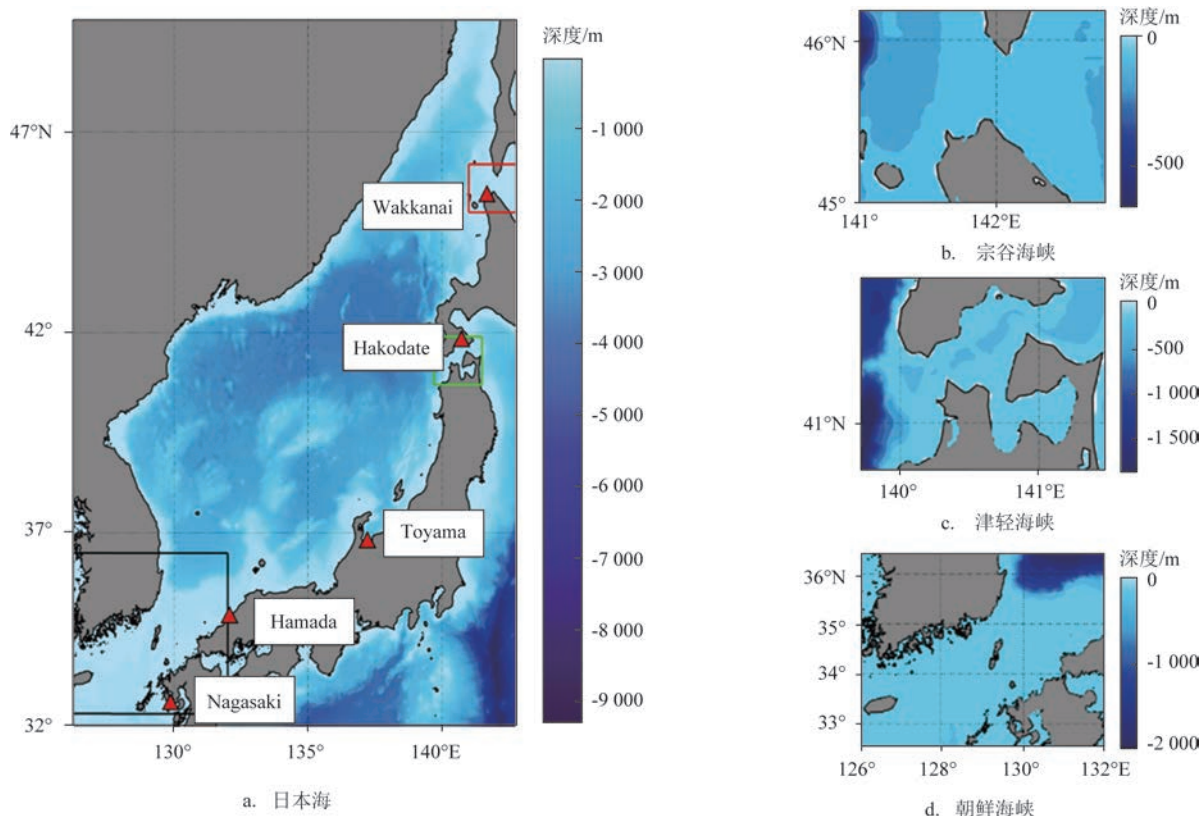
验潮站数据使用位于日本海及其海峡通道沿岸的5个验潮站记录的逐小时高频水位数据。验潮站位置如图1所示,由南至北分别分布于朝鲜海峡外(Nagasaki站)、日本海东海岸(Hamada站和Toyama站)、津轻海峡(Hakodate站)和宗谷海峡沿岸(Wakkanai站)。该数据主要用于对FES2014潮

汐数据在日本海的准确性进行验证。

## 2 潮汐特征

### 2.1 验潮站结果

对5个验潮站1a的逐小时水位数据进行调和与分析,得到每个验潮站59个分潮的调和常数,去除信噪比 $<2$ 的不显著分潮后,对每个验潮站的分潮按振幅大小进行排序。5个验潮站的浅水分潮 $M_4$ 、 $M_6$ 和 $MS_4$ 均不显著,前8个最大的分潮均为 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 和 $Q_1$ (不同验潮站振幅大小顺序有所区别),8个分潮的振幅之和占潮汐振幅的82%以上,因此,下文基于这8个主要分潮对FES2014潮汐数据进行验证。表1给出了5个验潮站和FES2014数据8个分潮的振幅和迟角,以及两种数据之间的量化差异。从表1可以看出两者的振幅和迟角基本一致。和验潮站数据相比,FES2014数据8个分潮



注:红色三角形为验潮站位置;图b—d为图a中3个海峡通道的细化海底地形,红色方块海域为“陆奥湾”位置

图1 日本海及其海峡通道地形分布

Fig.1 Topography of the Japan Sea and its channels



的振幅和迟角的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)均比较小。均方根误差最大的是 $M_2$ 分潮(1.4 cm),这可能与 $M_2$ 分潮本身振幅较大有关,但其平均绝对误差(0.3 cm)和相对误差仍较小(1.1%)。迟角的均方根误差和平均绝对误差基本都在 $10^\circ$ 以内。以上对比结果表明,FES2014潮汐数据在日本海准确性较好。

表1中分潮振幅分布还有几个明显特点:①5个验潮站均是 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 分潮振幅较大, $K_1$ 和 $O_1$ 分潮振幅相当,其他分潮相对较小;但Wakkanai站 $P_1$ 分潮的振幅也较大,甚至大于 $S_2$ 分潮。②最南端Nagasaki站的振幅远大于其他验潮站,尤其是最大的分潮 $M_2$ 振幅达到83.3 cm,而其他验潮站 $M_2$ 振幅最大只有22 cm,这表明日本海内部潮汐振幅远小于外部大洋,这一结论与前人研究结果一致。③津轻海峡沿岸Hakodate站的振幅也相对较大,半日潮振幅大于日潮,可能是由于津轻海峡与太平洋相通,容易受由其传来潮波的直接影响。④日本海东海岸Hamada站和Toyama站的潮汐振幅较小,半日

潮 $M_2$ 的振幅略大于日潮 $K_1$ 及 $O_1$ 。⑤最北端宗谷海峡沿岸Wakkanai站的潮汐振幅最小,其中 $K_1$ 和 $O_1$ 振幅最大,其他分潮振幅均较小。⑥验潮站各分潮振幅表明,随着纬度的增加,日潮振幅占比大致呈逐渐增大趋势,如 $K_1$ 和 $O_1$ 是最北端Wakkanai站最主要的分潮。

## 2.2 振幅与同潮时分布

验潮站的结果表明,日本海及其海峡通道主要分潮为 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 和 $O_1$ ,以下主要针对这4个主要分潮进行分析。图2和图3分别给出了这4个主要分潮的振幅与同潮时分布。从图中可以看出,所有分潮在日本海内部的振幅均远小于外部邻近海域,这一特征同前人及验潮站数据(见表1)结果一致,这可能是由于日本海具有半封闭性,来自大洋的潮波在通过海峡通道进入日本海时大部分能量衰减造成的。此外,日本海内部同潮时线稀疏(见图2),表明潮波在日本海的深海盆内传播较快,整个日本海内部达到高低潮的时间相近。在4个主要分潮中, $M_2$ 分潮振幅最大,在日本海内部呈现西高东低的态势,即靠近欧亚大陆一侧海域振幅较高(6~8 cm),靠近

表1 验潮站数据与FES2014数据调和常数对比结果

Tab. 1 Compared results of the harmonic constants between tide station data and FES2014 data

地名	数据来源	分潮							
		$M_2$	$S_2$	$N_2$	$K_2$	$K_1$	$O_1$	$P_1$	$Q_1$
Nagasaki	验潮站	83.3/329.9	36.9/355.4	16.7/324.2	10.3/348.8	25.8/77.2	20.1/57.0	8.3/73.1	4.2/45.3
	FES2014	86.3/329.5	38.3/358.0	16.6/324.1	11.0/348.3	25.6/76.5	19.7/56.6	8.3/72.1	4.3/40.6
Hamada	验潮站	8.4/90.6	4.1/101.9	2.0/89.1	1.1/94.6	6.9/217.4	8.3/195.7	2.2/213.9	2.2/175.7
	FES2014	7.5/87.4	4.2/101.9	2.2/94.2	1.2/89.1	7.3/209.9	7.2/182.9	2.4/203.1	2.0/163.2
Toyama	验潮站	6.2/171.9	2.3/197.2	1.5/151.2	0.8/194.5	5.2/211.8	5.2/184.3	1.7/212.4	1.2/164.6
	FES2014	6.0/166.8	2.2/186.6	1.5/150.5	0.6/191.5	5.3/214.6	5.3/184.6	1.8/210.7	1.4/165.7
Hakodate	验潮站	22.0/188.5	9.9/226.1	3.2/166.4	2.8/221.1	13.0/35.2	10.2/19.9	4.0/32.6	2.1/13.6
	FES2014	21.5/186.9	10.1/224.2	2.9/166.5	2.7/220.6	13.5/36.3	11.5/22.8	4.5/36.9	2.5/13.2
Wakkanai	验潮站	2.5/190.7	2.0/220.8	0.5/211.3	0.8/199.3	6.6/233.8	6.3/208.9	2.1/226.3	1.3/192.7
	FES2014	2.4/199.7	1.8/220.9	0.6/227.3	0.6/215.0	6.8/226.3	6.4/197.2	2.6/225.2	1.6/171.8
	RMSE	1.4/4.9	0.7/4.9	0.2/7.5	0.3/7.6	0.3/4.9	0.8/7.9	0.3/5.3	0.3/11.1
	MAE	0.3/-0.3	0.3/-1.9	-0.1/4.1	0.1/1.3	0.2/-2.3	0.0/-4.3	0.3/-2.1	0.2/-7.5
	MRE	1.1/-0.1	2.5/-0.9	-1.2/2.2	2.1/0.6	1.7/-1.5	0.1/-3.3	7.9/-1.4	6.9/-6.3

注:“/”左为振幅(单位:cm),右为迟角(单位:°)

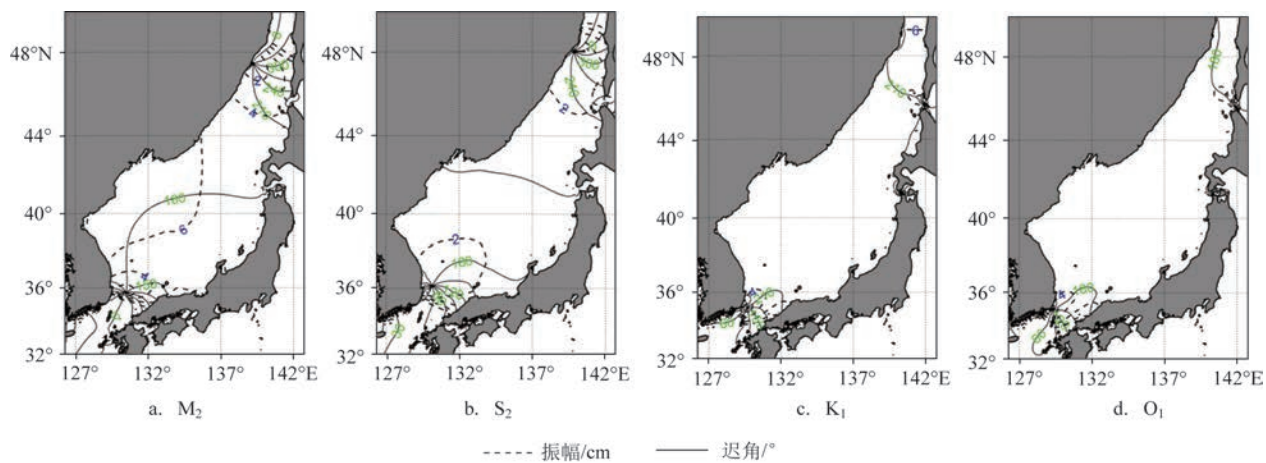


图2 日本海主要分潮的同潮图

Fig.2 Cotidal chart for major constituents of the Japan Sea

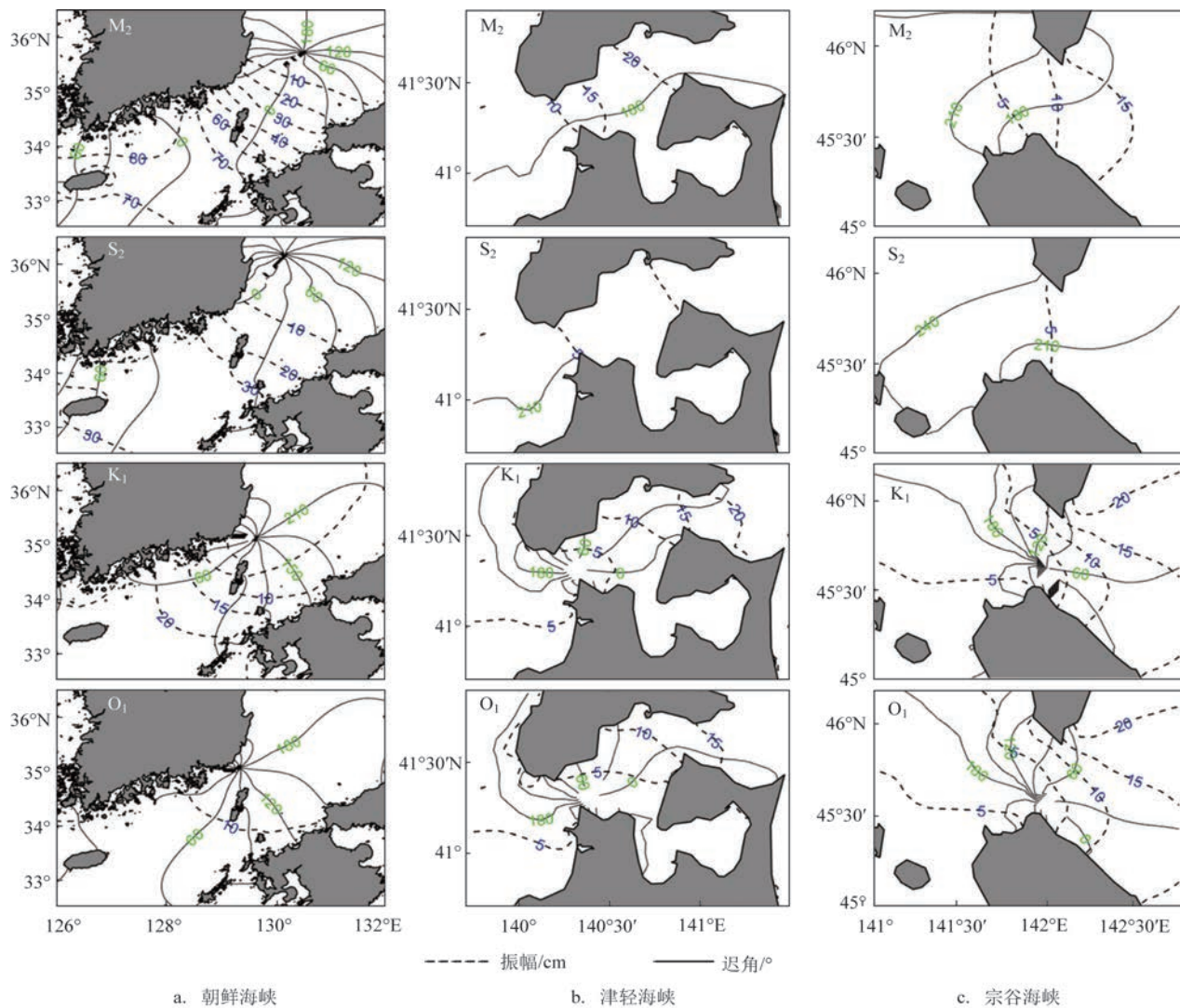


图3 日本海不同海峡主要分潮的同潮图

Fig.3 Cotidal chart for major constituents in different strait of the Japan Sea

日本一侧海域振幅较低(4~6 cm)。S<sub>2</sub>分潮振幅最小,且在日本海内部分布比较均匀(2~4 cm)。K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>两个分潮不仅无潮点位置相近,振幅在日本海内部分布同样相似,均介于4~6 cm。

需要指出的是,虽然各分潮振幅在日本海内部均较小,但在几个海峡内却较大。图2和图3表明,各分潮由外向内通过海峡时振幅逐渐减小,海峡内外振幅差异较大,如M<sub>2</sub>分潮的振幅在朝鲜海峡南侧靠朝鲜半岛一侧可达100 cm,但在朝鲜海峡北侧只有20 cm左右。从总体上看(见图3和表2),朝鲜海峡各分潮振幅最大,津轻海峡次之,宗谷海峡最小。就海峡中各分潮而言,M<sub>2</sub>分潮振幅在各海峡中最大。其他几个分潮在不同海峡中的表现略有不同,S<sub>2</sub>分潮振幅在朝鲜海峡大于K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>分潮,但在津轻海峡和宗谷海峡小于K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>分潮;K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>分潮振幅在各海峡中基本相当,但朝鲜海峡和津轻海峡的K<sub>1</sub>分潮振幅略大于O<sub>1</sub>分潮。

表2 日本海不同海峡内主要分潮振幅大致范围(单位:cm)

Tab.2 Approximate ranges of major tidal amplitudes in different strait of the Japan Sea (unit: cm)

海峡名称	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
朝鲜海峡	20~100	10~50	5~25	5~20
津轻海峡	5~25	3~15	0~20	0~15
宗谷海峡	3~12	3~6	0~12	0~12

日本海及其海峡通道存在2个半日潮波系统和3个日潮波系统,皆为逆时针旋转。在朝鲜海峡北部靠朝鲜半岛一侧存在M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>4个主要分潮的潮波系统(见图2),它们由北上潮波与沿朝鲜半岛东岸南下的潮波相互迭加形成<sup>[8]</sup>。无潮点位置与之前研究<sup>[21-22]</sup>基本一致。半日潮和日潮无潮点位置存在差异,M<sub>2</sub>和S<sub>2</sub>分潮的无潮点位置接近,相对偏北,位于朝鲜半岛东北方向海域,K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>位置接近,相对偏南,紧靠朝鲜半岛。此外,M<sub>2</sub>和S<sub>2</sub>分潮在鞆海峡南部海域还各有一个无潮点,其位置紧靠欧亚大陆,与朱学明<sup>[22]</sup>给出的无潮点位置接近,但与更早的研究<sup>[4,21]</sup>相比,本研究得到的无潮点位置明显偏西,说明随着时间的演变,半日潮无潮点位置向西偏移。在津轻海峡西部的“颈部”海域和宗谷海峡中线偏南海域则存在K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>分潮的无潮点(见图

3)。之前仅有少量研究<sup>[9,16]</sup>发现津轻海峡存在日潮无潮点,而本文利用高分辨率数据再次确认了该无潮点的存在。

### 2.3 潮汐类型

根据分潮振幅可以计算出潮型系数,进而判断潮汐类型。潮汐潮型系数A定义如下:

$$A = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} \quad (1)$$

式中:H表示分潮振幅,下标表示分潮名称。根据潮型系数A的值,可将潮汐分为4种类型,即0.0 < A ≤ 0.5为正规半日潮,0.5 < A ≤ 2.0为不正规半日潮,2.0 < A ≤ 4.0为不正规日潮,A > 4.0为正规日潮。图5给出了日本海及其海峡内潮型系数的分布。从图中可以看出,日本海内部大部分海域为不正规半日潮。南北海域各有一片不正规日潮海域,其中南部海域紧邻朝鲜海峡,北部海域位于北海道与欧亚大陆之间。两个不正规日潮海域中又各有一小块正规日潮海域,分别对应半日潮的2个无潮点(见图2)。其原因是这两个地方的M<sub>2</sub>振幅接近于0,K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>振幅相对较大,因而表现出典型的正规日潮特征。在不同海峡中,朝鲜海峡由于M<sub>2</sub>分潮振幅较大,以正规半日潮为主;津轻海峡和宗谷海峡基本为不正规半日潮,但海峡中分别存在一片非常小的

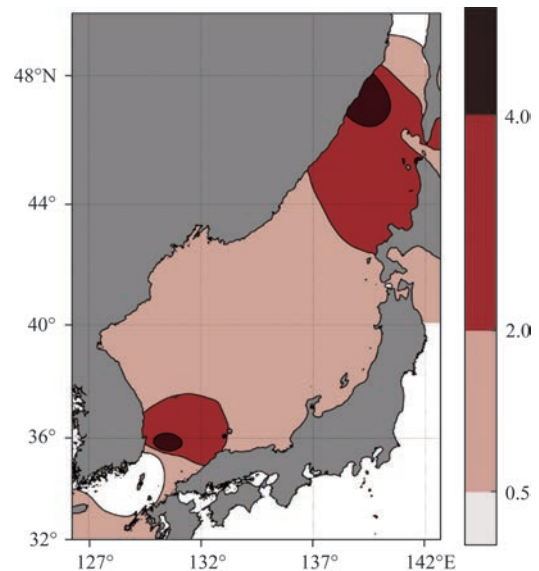


图4 日本海及其海峡通道潮型系数

Fig.4 Coefficient of tidal type of the Japan Sea and its channels



正规半日潮海域,对应 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮无潮点所在位置,这两处 $K_1$ 和 $O_1$ 振幅非常小,导致潮型系数较小,因此表现出正规半日潮特征。

### 3 潮流特征

#### 3.1 流速及潮流椭圆

已有研究<sup>[2,6,9]</sup>表明,日本海内部潮流较小,海峡通道潮流相对较大,因此,本文主要分析海峡通道的潮流。根据调和原理,利用s\_tide工具包<sup>[23]</sup>,由分潮频率、潮流振幅和迟角求得日本海海峡通道的潮流椭圆参数,并绘制朝鲜海峡、津轻海峡和宗谷海峡 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流的最大流速和潮流椭圆分布。从图5可以看出,朝鲜海峡 $M_2$ 分潮流最强,同图3中朝鲜海峡 $M_2$ 振幅最大这一特征一致,

而津轻海峡和宗谷海峡 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流较强,且强于朝鲜海峡 $M_2$ 分潮流。海峡中潮流椭圆长轴基本沿海峡走向,潮流椭圆大多以顺时针方向旋转,尤其是朝鲜海峡和宗谷海峡。各分潮强流区分布大体一致,但并不完全相同,同类型的分潮之间更为接近,在3个海峡中(尤其是津轻海峡和宗谷海峡), $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的最大流速和潮流椭圆表现出较高的一致性,如潮流椭圆的大小、形状、旋转方向等。潮流椭圆的走向和强流区的一致分布表明地形会对潮流起制约作用。不同分潮强流区分布的差异主要是由于不同分潮的传播方向不同,波长不同,因此对海岸线和地形的折射及反射情况也不一样;由于决定分潮波长的是其周期,因此同类型分潮之间(即 $M_2$ 与 $S_2$ 、 $K_1$ 与 $O_1$ 之间)的空间差异较小。以下对各海峡中不同分潮的潮流特征进行具体分析。

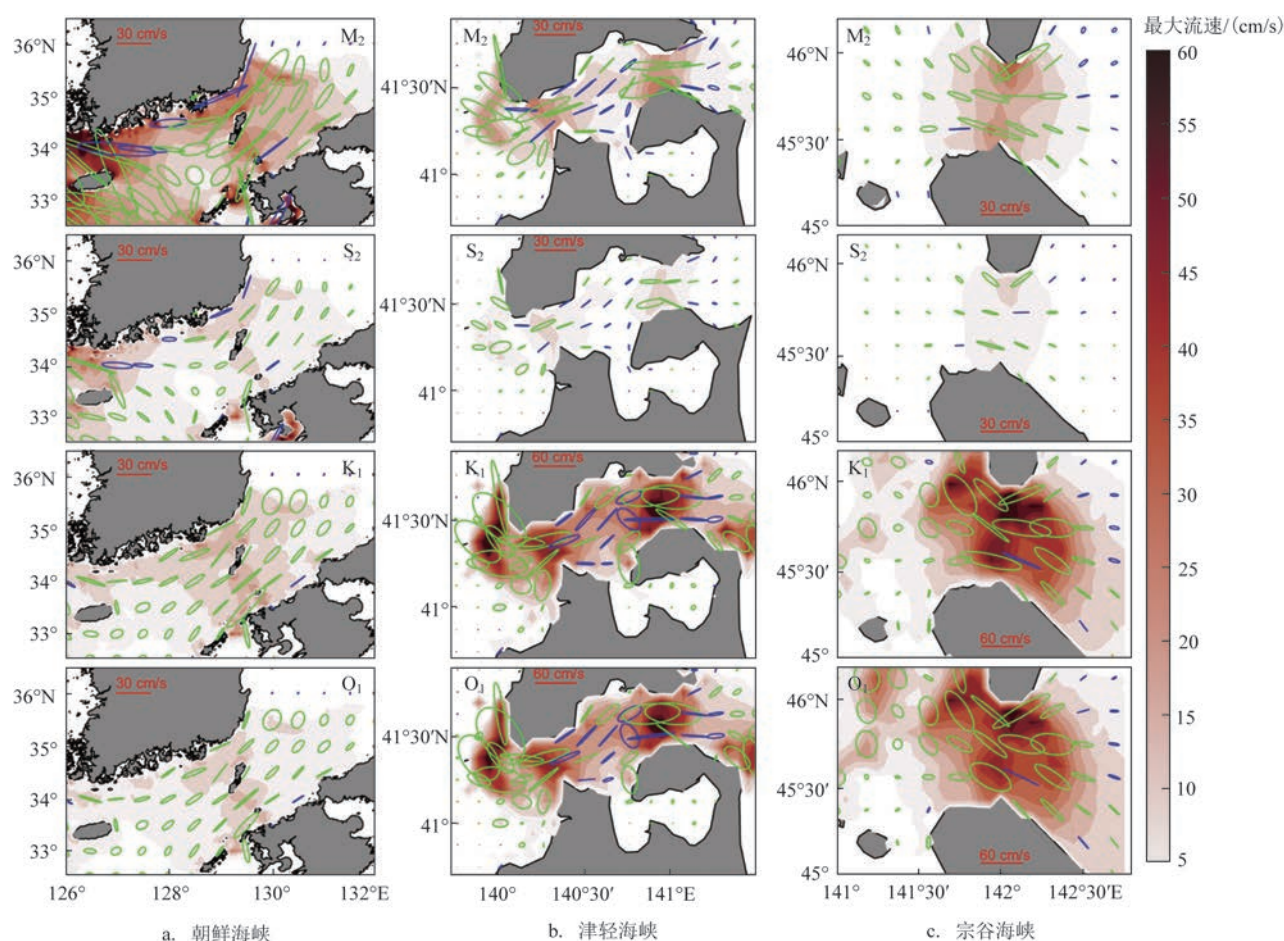


图5 日本海不同海峡主要分潮最大流速和潮流椭圆

Fig.5 The maximum tidal current velocity and tidal current ellipse for major constituents in different strait of the Japan Sea

朝鲜海峡内各分潮强流区均位于济州岛与朝鲜半岛之间、对马岛南北两侧海域(见图5a)。这些地方水深相对较浅、水道狭窄(见图1),从而导致潮流较急<sup>[9-10]</sup>。而在海峡北口水深超过200m的地方,潮流迅速变弱。海峡内 $M_2$ 和 $S_2$ 分潮流在西水道大于东水道,这一结果在之前研究<sup>[7]</sup>中也有提及, $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流在东西水道基本相等,表明半日潮潮流在西水道较大,日潮潮流在东西水道相当。在4个主要分潮中, $M_2$ 分潮流速最大,这一特征与潮汐振幅相对应(见图3)。同潮时线表明朝鲜海峡南部和北部几乎同时达到高低潮,但 $M_2$ 分潮的振幅梯度远大于其他分潮,所以分潮流较强,其中 $M_2$ 分潮流速在济州岛与朝鲜半岛之间海域可达60cm/s以上,在对马岛南北两侧超过30cm/s,与之前一些研究结果<sup>[18,24]</sup>相当。 $S_2$ 分潮流同 $M_2$ 的分布特征基本一致,但在大部分海域内, $S_2$ 分潮流速约为 $M_2$ 分潮的一半,在西南海域流速较强,最大约为30cm/s。 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流速在海峡中部对马岛两侧较大,在海峡两端较小,最大约为20cm/s, $K_1$ 分潮流速略大于 $O_1$ 分潮。 $M_2$ 和 $S_2$ 分潮流椭圆以狭长形状为主,尤其是在强流区,表明这两个分潮最大潮流振幅和最小潮流振幅相差较大,潮流以往复流为主。 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流椭圆在整个海峡中基本呈东北—西南走向,但不同位置的形状有差异,在海峡南北两端较接近圆形,在海峡中间强流区则比较狭长。另外,朝鲜海峡内逆时针旋转的各分潮流椭圆主要出现在海峡两侧, $M_2$ 和 $S_2$ 分潮出现较多, $K_1$ 和 $O_1$ 分潮较少。

津轻海峡内各分潮流分布形态类似(见图5b),强流区均位于两个狭窄的“颈部”海域,但流速大小相差较大。 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流速较大且两者基本相当,最大可达60cm/s; $M_2$ 和 $S_2$ 分潮流速较小,最大分别只有25cm/s和10cm/s。以上结果表明,虽然津轻海峡内 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的潮汐振幅小于 $M_2$ 分潮(见图3b),但流速远大于 $M_2$ 分潮,这一特征与前人研究结果<sup>[12,15-16]</sup>一致,与海峡中各分潮的同潮时分布有关。 $M_2$ 分潮的同潮时线呈一条直线(见图3),表明海峡内同时达到高低潮,因而伴随的潮流较小;而 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的同潮时线中东部和西部的迟角相差约180°,即一侧为高潮时另一侧正好为低潮,因此造成了较大的海表面高度差,从而产生较强的潮流。此外,津轻海峡内各分潮流在陆奥湾内(位置见图1)

均较小,可能是由于两侧地形的阻挡造成潮汐能量难以传入。津轻海峡内部潮流椭圆长轴基本平行于海峡走向,只是在海峡西口 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流椭圆长轴以垂直于海峡为主。海峡内主要分潮流椭圆虽然也以顺时针旋转为主,但也存在相当数量的逆时针旋转,主要位于海峡两个“颈部”之间的内部海域。

宗谷海峡各分潮流在海峡处最强,海峡内外两侧较弱(见图5c)。与津轻海峡类似,宗谷海峡同样是日潮( $K_1$ 和 $O_1$ 分潮)流速远大于半日潮( $M_2$ 和 $S_2$ 分潮), $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的最大流速可达60cm/s, $M_2$ 和 $S_2$ 分潮的最大流速约为25cm/s和10cm/s。这一特征也可以用海峡内各分潮的同潮时分布来解释。图3表明,虽然宗谷海峡内 $M_2$ 分潮振幅与 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮相当,但 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的同潮时在海峡东西两端接近反位相,因此造成海峡两端大的海表面高度差,从而产生强潮流;而 $M_2$ 和 $S_2$ 分潮在海峡东西两端的迟角差异仅为30°左右,即海峡两端达到高潮的时间间隔仅为约1h,故海峡两端很难有大的海表面高度差,无法产生强潮流;又因海峡内 $M_2$ 分潮振幅梯度强于 $S_2$ 分潮,所以 $M_2$ 分潮流相对较强。宗谷海峡内潮流椭圆长轴大多呈东南—西北走向,只有少数几个逆时针旋转的潮流椭圆。

### 3.2 潮流类型

潮流类型可根据分潮最大流速计算的潮流类型系数进行判断。潮流类型系数 $B$ 定义如下:

$$B = \frac{W_{K_1} + W_{O_1}}{W_{M_2}} \quad (2)$$

式中: $W$ 表示分潮最大流速,下标表示分潮名称。根据潮流类型系数 $B$ 的值,可将潮流分为4种类型,即 $0.0 < B \leq 0.5$ 为正规半日潮流, $0.5 < B \leq 2.0$ 为不正规半日潮流, $2.0 < B \leq 4.0$ 为不正规日潮流, $B > 4.0$ 为正规日潮流。图6为日本海及其海峡通道潮流类型系数的分布。日本海内部大多数潮流系数介于0.5~2,表明大部分海域为不正规半日潮流。在潮流较强的几个海峡中,朝鲜海峡为不正规半日潮流,津轻海峡和宗谷海峡及其附近海域为正规日潮流,其原因是海峡内 $K_1$ 和 $O_1$ 这两个日潮流速远大于半日潮 $M_2$ 的流速(见图5b和5c)。



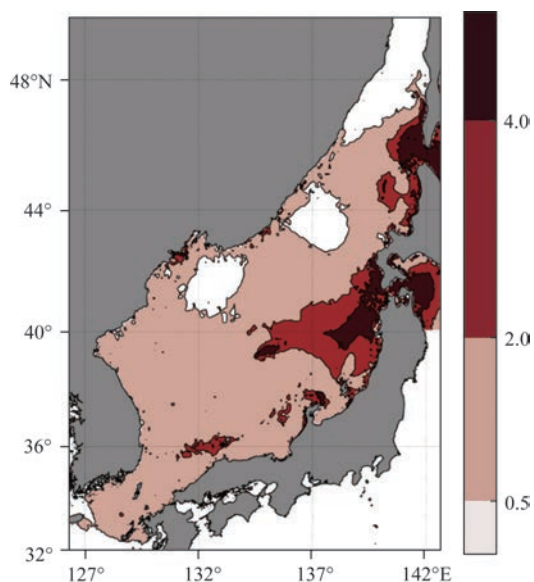


图6 日本海及其海峡通道潮流类型系数

Fig.6 Coefficient of tidal current type of the Japan Sea and its channels

## 4 主要结论

本文利用FES2014潮汐和验潮站数据,对日本海及其海峡通道 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 和 $O_1$ 这4个主要分潮的潮汐与潮流的精细特征进行了系统分析。结论如下:

①通过与日本海沿岸验潮站数据对比发现,FES2014数据在日本海准确性较好。

②日本海内部潮汐振幅较小,海峡通道潮汐振幅相对较大。 $M_2$ 分潮是日本海及其海峡通道振幅最大的分潮,但在日本海内部振幅不超过8 cm,而 $M_2$ 分潮在朝鲜海峡的振幅远大于其他海峡,最大可达100 cm; $S_2$ 分潮振幅在朝鲜海峡大于 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮,在津轻海峡和宗谷海峡小于 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮。

③朝鲜半岛东北侧海域存在4个分潮的无潮点,半日潮无潮点比日潮无潮点偏东、偏北;鞆海峡南侧海域存在 $M_2$ 和 $S_2$ 分潮的无潮点,同之前的研究相比,该处无潮点略向西偏移;津轻海峡和宗谷海峡则存在 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的无潮点,其中津轻海峡的日潮无潮点仅在之前少数研究中有提及。

④日本海内部潮流流速极小,海峡通道潮流较强,且潮流椭圆以顺时针旋转为主。朝鲜海峡 $M_2$ 分

潮流速最大,最大可达60 cm/s, $M_2$ 和 $S_2$ 分潮流速在西水道强于东水道,但 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流速在2个水道相当,津轻海峡和宗谷海峡 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮流速最大,最大可达60 cm/s, $M_2$ 分潮流速次之, $S_2$ 分潮流速最小。

⑤海峡中潮流分布特征与地形和同潮时分布密切相关,强流区多位于水深较浅且水道狭窄的区域。朝鲜海峡 $M_2$ 潮流流速最强,主要是由于 $M_2$ 分潮振幅最大从而导致水位梯度最大,在津轻海峡和宗谷海峡内,虽然 $M_2$ 分潮的振幅大于或等于 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮,但由于同潮时线分布的差异,这两个海峡中 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的潮流流速远大于 $M_2$ 分潮。同潮时线分布不同主要是由于不同分潮的传播方向和波长不同,因此对海岸线和地形的折射及反射情况不一样。

⑥潮汐类型方面,在南北两个 $M_2$ 分潮无潮点附近各存在一片正规日潮和不正规日潮海域,朝鲜海峡主要以正规半日潮为主,日本海其他海域及津轻海峡和宗谷海峡均为不正规半日潮;潮流类型方面,津轻海峡和宗谷海峡及其附近海域表现为正规日潮流,日本海其他海域及朝鲜海峡主要为不正规半日潮流。

⑦ $K_1$ 和 $O_1$ 分潮在日本海及其海峡通道表现出较强的一致性,如无潮点位置、振幅、最大流速分布、潮流椭圆形态等。

**致谢:**本文数据处理和绘图过程中使用了自然资源部第一海洋研究所潘海东博士编写的s\_tide工具包(<https://www.researchgate.net/project/A-non-stationary-tidal-analysis-toolbox-S-TIDE>),文章修改过程中也得到了潘海东博士的帮助,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] JEON C, PARK J H, VARLAMOV S M, et al. Seasonal variation of semidiurnal internal tides in the east/Japan Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(5): 2843-2859.
  - [2] ONISHI M, ISODA Y, KURODA H, et al. Winter transport and tidal current in the Tsugaru Strait[J]. Bulletin of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 2004, 55(2): 105-109.
  - [3] 张永垂, 汪浩笛, 陈诗尧, 等. 日本海海洋环境调查进展[J]. 海洋预报, 2022, 39(2): 92-101.
- ZHANG Y C, WANG H D, CHEN S Y, et al. Progress of marine environmental survey in the Japan Sea[J]. Marine Forecasts, 2022,

- 39(2): 92-101.
- [4] ODAMAKI M. Co-oscillating and independent tides of the Japan Sea[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1989, 45(3): 217-232.
- [5] ODAMAKI M. Tides and tidal currents in the Tsushima Strait[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1989, 45(1): 65-82.
- [6] ODAMAKI M. Tide and tidal current in Tsugaru Strait[J]. *Bulletin on Coastal Oceanography*, 1984, 22: 12-22.
- [7] FANG G H, YANG J F. Modeling and prediction of tidal currents in the Korea Strait[J]. *Progress in Oceanography*, 1988, 21(3-4): 307-318.
- [8] 杨景飞, 方国洪. 朝鲜海峡潮汐和潮流的数值计算[J]. *海洋与湖沼*, 1987, 18(2): 197-207.
- YANG J F, FANG G H. Numerical computation of tides and tidal currents in the Korea Strait[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1987, 18(2): 197-207.
- [9] 朱学明, 鲍献文, 黄必桂, 等. 西北太平洋的一种潮汐数值同化模型[J]. *海洋学报*, 2012, 34(2): 1-12.
- ZHU X M, BAO X W, HUANG B G, et al. An tidal numerical assimilation modeling in northwest Pacific[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 1-12.
- [10] 朱学明, 鲍献文, 宋德海, 等. 渤、黄、东海潮汐、潮流的数值模拟与研究[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1103-1113.
- ZHU X M, BAO X W, SONG D H, et al. Numerical study on the tides and tidal currents in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1103-1113.
- [11] TEAGUE W J, PERKINS H T, JACOBS G A, et al. Tide observations in the Korea-Tsushima Strait[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(5): 545-561.
- [12] TAKIKAWA T, YOON J H, CHO K D. Tidal currents in the tsushima straits estimated from ADCP data by ferryboat[J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59(1): 37-47.
- [13] BOOK J W, PISTEK P, PERKINS H, et al. Data assimilation modeling of the barotropic tides in the Korea/Tsushima Strait[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(6): 977-993.
- [14] PARK J H, WATTS D R. Internal tides in the southwestern Japan/East Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(1): 22-34.
- [15] ISODA Y, BABA K. Tides and tidal currents in the Tsugaru Strait [J]. *Bulletin of the Faculty of Fisheries, Hokkaido University*, 1998, 49(3): 117-130.
- [16] LUU Q H, ITO K, ISHIKAWA Y, et al. Tidal transport through the Tsugaru Strait — part I: characteristics of the major tidal flow and its residual current[J]. *Ocean Science Journal*, 2011, 46(4): 273-288.
- [17] WADA R, WASEDA T, NANJO H. Nonlinear interaction of the Tsugaru warm current and tide in the Tsugaru Strait[J]. *Ocean Dynamics*, 2012, 62(6): 923-941.
- [18] ODAMAKI M. Tides and tidal currents along the Okhotsk coast of Hokkaido[J]. *Journal of Oceanography*, 1994, 50(3): 265-279.
- [19] AOTA M, MATSUYAMA M. Tidal current fluctuations in the Soya current[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1987, 43(5): 276-282.
- [20] LYARD F H, ALLAIN D J, CANCELT M, et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance[J]. *Ocean Science*, 2021, 17(3): 615-649.
- [21] NISHIDA H. Improved tidal charts for the western part of the north Pacific Ocean[J]. *Report of Hydrographic Researches*, 1980, 15: 55-70.
- [22] 朱学明. 中国近海潮汐潮流的数值模拟与研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- ZHU X M. Numerical simulations and studies on the tides and tidal currents in the marginal seas adjacent to China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [23] PAN H D, LV X Q, WANG Y Y, et al. Exploration of tidal-fluvial interaction in the Columbia River estuary using S\_TIDE[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(9): 6598-6619.
- [24] ISOBE A, TAWARA S, KANEKO A, et al. Seasonal variability in the Tsushima warm current, Tsushima-Korea Strait[J]. *Continental Shelf Research*, 1994, 14(1): 23-35.

## Analysis of characteristics of tide and tidal current in the Japan Sea and its channels

WANG Ning, CHEN Shiyao, WANG Haodi, ZHANG Yongchui\*

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Using tidal stations and Finite Element Solution 2014 (FES2014) tidal data set, the characteristics of tide and tidal current in the Japan Sea and its straits are analyzed systematically, and the dynamical reason for the distributions of strong current of tidal components is revealed. The results show that both the tidal amplitude and

current velocity are relatively large in the Japan sea dannel and are small in the Japan sea due to the semi-closure state of the Japan Sea.  $M_2$  is the tidal constituent with the largest amplitude in the Japan Sea and its straits. There are one semi-diurnal amphidromic points located in the north of Korea Strait and the south of Tartar Strait, respectively. And there tends to be diurnal amphidromic points located in the north of Korea Strait, Tsugaru Strait and Soya Strait, respectively. In the Korean Strait, the regions of southwest of the Strait and the north and south sides of Tsushima Island show strong current. The semi-diurnal current in the western channel is stronger than that in the eastern channel, while the speed of diurnal current in the two channels is almost the same as each other.  $M_2$  is the tidal component with the largest tidal current, and its maximum current velocity can reach to 60 cm/s. In the Tsugaru Strait and the Soya Strait, the tidal currents of  $K_1$  and  $O_1$  components are stronger than that of  $M_2$  and  $S_2$  components. Further analysis shows that the distribution characteristics of tidal current in the strait are closely related to the topography and the distribution of phase-lag and amplitude. The internal Japan Sea mainly shows irregular semi-diurnal tides and tidal current, the Korean Strait is dominated by regular semi-diurnal tide and irregular semi-diurnal tidal current, and both the Tsugaru Strait and the Soya Strait mainly show irregular semi-diurnal tides and regular diurnal tidal current. The results of this study are helpful to systematically understand the tidal characteristics of the Japan Sea and its straits.

**Key words:** the Japan Sea, strait, tide, tidal current