doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2022.03.010

舟山海域潮汐特征及调和分析精度研究

石景元[1]，张功瑾[2]

（1. 东海航海保障中心，上海　200090；2. 南京水利科学研究院，江苏　南京　210029）

摘　要：浙江舟山海域岛屿多、地形复杂，潮波受影响因素多。本文基于舟山海域多年实测潮汐资料，采用最小二乘法进行潮汐调和分析发现，舟山海域 M_2 分潮在潮位中占主导地位，近岸振幅大、离岸振幅小，自舟山海域西南侧东门岛至东北方向中块岛，振幅逐渐减小；舟山海域调和分析精度离岸距离越远精度越高，自西南海域至东北海域调和分析精度逐渐增大；各月度余水位分布规律不明显，各月度呈交错状态，但整体来说，舟山海域的余水位相对较小。

关键词：舟山海域；分潮；调和分析；余水位

中图分类号：P714.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003-2029（2022）03-0083-07

海岸附近和河口地区潮汐现象显著，潮位的观测、分析是研究海平面变化最基本、最直接的方法，潮汐预报意义重大[1]。CARTWRIGHT D E 等[2-3]针对 DARWIN G H[4]提出的调和分析方法不断改进，建立了调和分析的基本方法。调和常数作为潮汐的一个重要特征参量，在潮汐预报方面应用广泛[5-7]。随着技术的发展和计算效率的提高，许多学者采用数值模拟的方法对研究海域的分潮进行模拟计算。如王凯等[8]对东中国海的潮波运动形式进行了数值模拟；于克俊等[9]通过对渤海的潮波模拟，给出了潮波的垂向结构；刘鹏霞等[10]利用调和分析方法研究了鲁海丰海洋牧场海域海流的时间变化规律和空间结构特征。

浙江沿海岸线曲折，港湾众多，近岸岛屿星罗棋布；沿海地区资源丰富，人口密集，是工农业生产的重要基地。浙江沿海的潮振动是由太平洋潮波引起的协振动和天体在本海区直接引起的独立潮组成。来自西北太平洋的潮波传经琉球群岛岛间水道，以几乎平行的行波形式，进入东中国海，大部分经东海传向黄海，小部分沿西北偏西方向进入浙江沿海。由于本海域面积小，故本区潮振动主要为太平洋潮波的协振动，所以浙江外海的潮波属前进波。近岸水域，特别是港湾、河口区，由于碰到岸壁、河床产生反射，故逐渐丧失了前进波性质而具有前进驻波或者驻波性质。受海洋地理位置等影响，舟山境内海域主要为不规则半日潮。半日潮波是太平洋潮波进入东海后向西北方向接近浙江沿海，潮差外海小，愈近沿岸愈大。由于浙江舟山海域岛屿多，岸线复杂，潮波受反射的干扰因素多；其次舟山海域水深条件复杂，滩槽高程差异大，潮波也易受地形影响。通过收集舟山海域潮位数据，采用调和分析方法研究舟山海域分潮特征、调和分析精度及余水位特征，对掌握舟山海域潮波运动规律有重要意义。

1　研究方法与区域

潮汐调和分析的目的是根据潮汐观测资料计算各个分潮的调和常数。调和分析首先需要选择分潮，即基于强迫振动原理和小振动叠加原理，将实际潮汐分成许多有规律的分振动，被分离出的具有一定周期、振幅的分振动称为分潮。

收稿日期：2021-05-24

基金项目：江苏省海洋科技创新专项项目（JSZRHYKJ202001）

作者简介：石景元（1984—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为潮汐观测和分析预报。E-mail：26218428@qq.com

某时刻的潮高可以表示如下。

$$\zeta(t)=a_0+\sum_{j=1}^{m}f_jH_j\cos[\sigma_jt+(V_0+u)-g_j] \quad (1)$$

式中，a_0 为观测期的平均海面；H_j 为分潮振幅；f_j 为分潮迟角因子；$(V_0+u)-g_j$ 为分潮的初位相；σ_j 为角速度；m 为分潮的个数。令 $fH=R$，$(V_0+u)-g_j=-\theta_j$，潮汐为多个分潮叠加而成，则有

$$\zeta(t)=a_0+\sum_{j=1}^{m}R_j\cos(\sigma_jt-\theta_j) \quad (2)$$

取 $a=R\cos\theta$，$b=R\sin\theta$，得到式(3)。

$$\zeta(t)=a_0+\sum_{j=1}^{m}(a_j\cos\theta_jt+b_j\sin\theta_jt) \quad (3)$$

用计算所得的预报潮位 $\zeta'(t)$ 逼近实测值 $\zeta(t)$，按最小二乘法原理，使得 $D=\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}[\zeta(t)-\zeta'(t)]^2\mathrm{d}t$ 的值最小，求得 a、b，利用 $H=R/f$，$g=V_0+u+\theta$，求得调和常数 H、g。用实测值减去预报值得到自报余差 r，利用自报余差的均方差方法来判断预报精度，见式(4)。

$$\delta=\sqrt{\frac{\sum[\zeta(t)-\zeta'(t)]^2}{N}} \quad (4)$$

在忽略观测误差时，余水位是指从实测水位中去除天文潮位和平均海面之后的剩余部分，t 时刻余水位的数学表达式如下。

$$S(t)=h(t)-MSL-T(t) \quad (5)$$

式中，S 为余水位序列；h 为实测水位序列；MSL 为平均海面；T 为天文潮位，由调和分析或响应分析获得。一般认为，造成水位异常的因素主要包括天气因素（主要是风）造成的短期水位异常；气候因素造成水位季节性变化异常；天文潮推算误差的影响。

舟山海域岛屿多，岸线复杂，潮波受反射的干扰因素多，且水深条件复杂，滩槽高程差异大，潮波易受地形影响。本文收集了舟山及附近海域20个长期潮位站的潮位资料进行计算分析，其中中块岛站、东极岛站、外洋鞍站位于舟山海域东侧靠近外海区域，自北向南鱼腥脑站、老塘山站、条帚门站、六横站、大蚊虫岛站、东门岛站位于舟山海域南侧靠近内海区域，国华电厂站、乌沙山站、钱仓站位于象山港上游区域。各潮位站的潮位资料长度均为2年，即2017年1月1日0:00—2018年12月31日23:00，本文选择11个分潮采用最小二乘法进行调和分析（分潮选取的原则为，相邻的两个分潮角速度差大于360/N，N 为资料长度。如：1个月资料，角速度差大于0.5°；1年资料，角速度差大于0.041°），部分站点的调和分析结果如表1所示。

表1 部分潮位站调和分析结果表(分潮振幅 H;分潮迟角 f)

分潮	外洋鞍		大蚊虫岛		东极岛		东门岛		钱仓		鼠浪湖		中块岛	
	H/cm	f/(°)	H/cm	f/(°)	H/cm	f/(°)	H/cm	f/(°)	H/cm	f/(°)	H/cm	f/(°)	H/cm	f/(°)
O_1	19.4	160.1	20.7	164.0	18.4	158.0	22.0	75.9	21.3	76.5	19.4	58.1	18.8	58.4
Q_1	3.2	141.6	3.5	144.8	3.0	142.4	4.3	193.2	4.2	192.8	3.8	166.1	3.5	168.3
P_1	8.7	199.0	9.1	203.7	8.8	196.4	9.2	162.1	9.0	167.0	8.9	150.4	8.7	146.9
K_1	28.6	199.9	29.8	204.1	28.5	197.0	29.0	197.2	29.2	201.6	28.8	185.5	27.4	182.5
N_2	21.4	237.3	22.8	234.1	20.8	247.7	26.7	259.4	22.8	278.0	18.8	287.5	20.5	273.4
M_2	116.8	256.6	126.6	254.0	114.9	266.3	156.5	136.7	134.5	153.4	99.3	165.3	110.1	151.4
S_2	50.5	300.7	54.3	299.2	51.0	309.5	59.7	235.7	51.1	255.8	44.6	267.8	48.8	251.7
K_2	14.6	297.0	15.5	295.4	14.4	307.2	16.5	268.2	14.3	288.5	12.5	298.8	13.7	282.8
M_4	4.1	76.9	6.1	105.5	4.0	58.1	0.9	353.1	5.4	302.9	4.5	226.9	2.1	229.5
MS_4	0.4	247.6	0.9	246.9	0.3	259.6	0.5	64.0	1.7	238.5	0.8	197.2	0.4	186.2
M_6	3.0	123.1	4.2	143.6	3.2	105.6	0.3	156.6	4.2	37.8	4.4	329.8	2.1	327.7

2 分潮特征分析

2.1 分潮特征分析

分潮主要有全日分潮、半日分潮、长周期分潮和浅水分潮等。

（1）半日分潮

引潮力场可以分解为许多分场，每一分场都为一谐和振动，每一分振动（即每一谐和振动），称为一个分潮。太阴主要半日分潮，以符号 M_2 表示，

周期 12.420 6 h；太阳主要半日分潮，以符号 S_2 表示，周期 12.000 0 h；经过调和分析，M_2 分潮在潮位中占主导地位，舟山海域潮位站的 M_2 分潮振幅平均在 1.2 m 以上，约是第二个主要分潮 S_2 的 2~3 倍。受舟山海域岛屿及地形的影响，各潮位站的 M_2 分潮的初位相（迟角）相差较大，从东门岛的 137° 至鱼腥脑的 332°。通过绘制 M_2 分潮的同潮时线和等振幅线（图 1），舟山海域的半日潮波基本以平行等深线的方向传播，在传播至舟山本岛附近时同潮时线随即分为两条路径呈八字形向南北两侧伸展，分别进入杭州湾和宁波湾；从振幅的分布特征来看，近岸振幅大、离岸振幅小，自舟山海域西南侧东门岛至东北方向中块岛，振幅逐渐减小。

（2）全日分潮

太阴—太阳赤纬全日分潮，以符号 K_1 表示，周期 23.934 5 h。经过调和分析，如图 2 所示，K_1 分潮基本以平行等深线的方向传播，分潮迟角鱼腥脑最大 212°，鼠浪湖最小 186°，分潮迟角比较稳定。从振幅的分布特征来看，舟山海域 K_1 分潮振幅变化幅度较小。

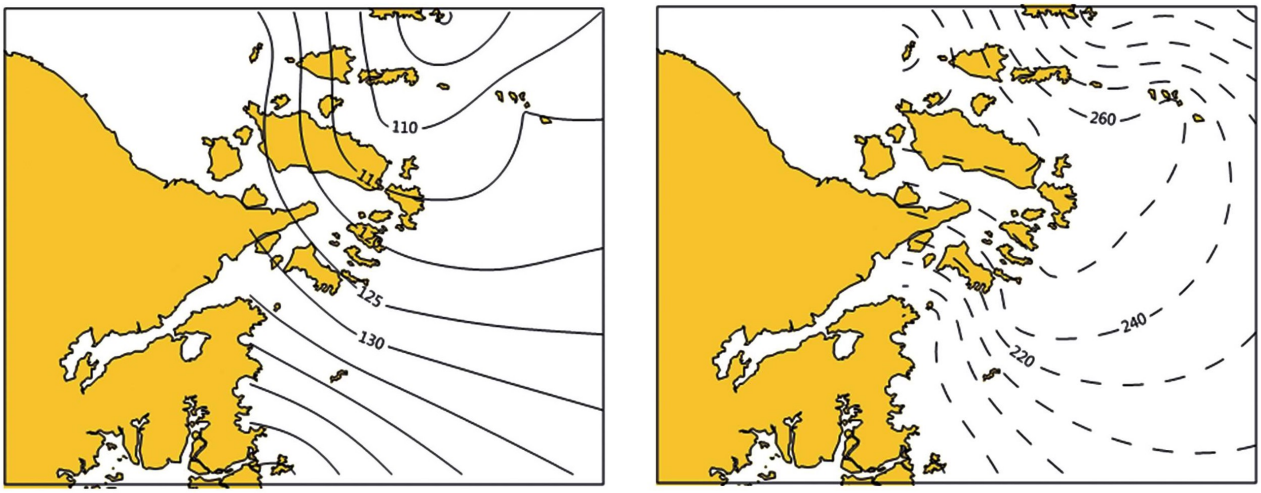

图 1　M_2 分潮等振幅线（cm）和同潮时线

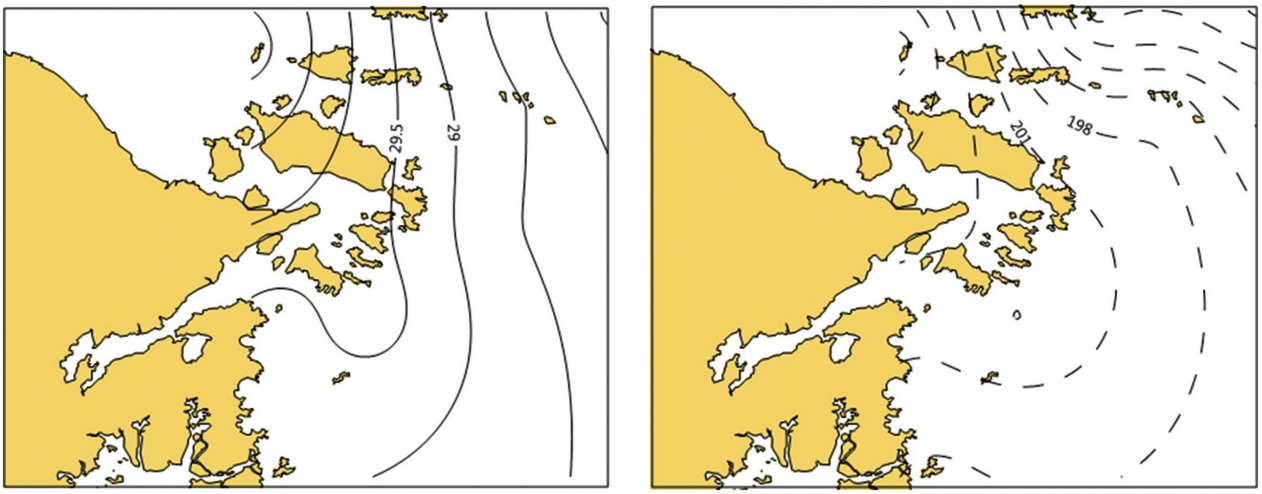

图 2　K_1 分潮等振幅线（cm）和同潮时线

（3）浅水分潮

浅水分潮为高次简谐项，其周期为主要分潮的几分之一。常用的浅水分潮有 M_4（太阴浅水 1/4 日分潮），M_6（太阴浅水 1/6 日分潮）和太阴太阳浅水 1/4 日分潮。经过调和分析，如图 3 所示，浅水分潮 M_4 分潮的迟角变化较大，东极岛仅为 58°，东门岛达到 353°。从振幅的分布特征来看，舟山海域自南向北 M_4 分潮振幅逐渐增大，自杭州湾、宁波

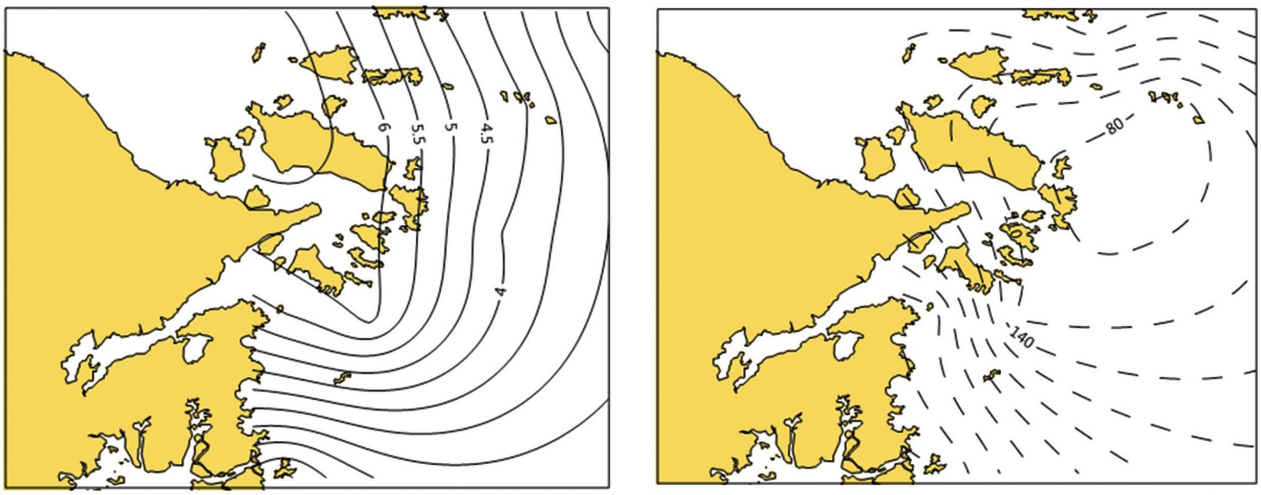

图 3 M_4 分潮等振幅线(cm)和同潮时线

湾湾口至外海振幅逐渐减小。

2.2 潮汐特征分析

(1) 潮高日不等现象分析

潮高日不等现象与月赤纬变化相关潮高日不等现象可依以下公式计算[11-12]。

$$T_1 = H_{S_2}/H_{M_2} \tag{6}$$

$$G_1 = g_{M_2} - (g_{K_1} + g_{O_1}) \tag{7}$$

当 T_1 的值大于 0.40，则潮高日不等现象明显。根据半日分湖与全日分潮迟角差值的大小 G_1 来判断潮高日不等现象的类型，当此差值为 0°（或 360°）、180°、270°左右时则分别表示该处潮位呈现出高潮日不等、低潮日不等、高潮和低潮均日不等的现象[13]。

各站位日潮不等现象的计算结果见表 2，由统计结果可知，各站的 T_1 多处于 0.32~0.35 之间，因此该地区潮高日不等现象不明显。G_1 值处于 228°~297°，该处海域 G_1 值多接近于 270°，呈现出既有高潮日不等也有低潮日不等的现象。

表 2 部分潮位站潮汐特征统计结果

潮汐特征	外洋鞍	大蚊虫岛	东极岛	东门岛	钱仓	鼠浪湖	中块岛
T_1	0.34	0.34	0.33	0.32	0.35	0.32	0.33
G_1/(°)	256.6	246.5	270.5	228.1	249.0	296.8	280.0
T_2	0.03	0.05	0.04	0.05	0.07	0.04	0.03
G_2/(°)	78.7	39.2	111.9	37.2	351.7	151.4	87.7

(2) 涨、落潮历时分析

涨、落潮历时日不等现象是由于浅水分潮显著所造成的，依据下列公式进行计算[11-12]。

$$T_2 = H_{M_4}/H_{M_2} \tag{8}$$

$$G_2 = 2g_{M_2} - g_{M_4} \tag{9}$$

涨、落潮历时日不等现象是由于浅水分潮显著造成的，其差值可由 T_2 的值判断，比值越大则差值就越大。例如当比值为 0.04 时，涨、落潮历时相差 30 min。涨、落潮历时孰长孰短可由分潮迟角差 G_2 来判定，当分潮迟角差为 90°时，落潮历时长于涨潮历时；当分潮迟角差为 270°时则相反。

表 2 的 T_2 计算结果显示，除钱仓外，各站涨落潮历时相差均接近于 30 min，钱仓涨落潮历时差接近于 1 h。G_2 值表明除钱仓外，落潮历时大于涨潮历时，钱仓涨潮历时大，落潮历时小。

3 调和精度分析

采用 2017 年 1 年、2018 年 1 年、2017—2018 年 2 年的潮位资料，对舟山海域 20 个潮位站分别进行调和分析，对比不同资料长度对调和精度的影响，并以 2018 年潮汐资料的调和分析结果分析

舟山海域调和分析精度及其分布特征。

如图 4 所示，相比采用 2017—2018 年 2 年潮位资料进行调和分析，采用 2018 年全年潮位资料进行调和分析时余水位最小，即调和分析精度最高，其次为采用 2017 年全年潮位资料，说明调和分析选取的资料并非越长越好，而应选取合适的时段。

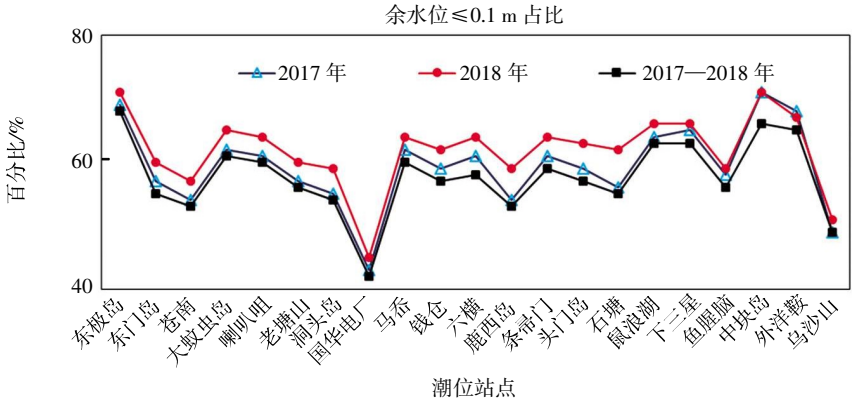

图 4　舟山海域不同资料长度调和精度对比

如表 3 所示，根据 2018 年资料调和分析结果，舟山海域调和分析精度总体较好，除洞头岛站、国华电厂站、鹿西岛站、鱼腥脑站、乌沙山站余水位小于等于 0.1 m 占比在 60%以下，分析原因在于站点靠岸较近，受地形影响较大；其他站点余水位小于等于 0.1 m 占比在 60%以上，小于等于 0.2 m 占比在 85%以上，小于等于 0.3 m 占比在 95%以上。

表 3　2018 年全年潮位资料调和分析精度统计

单位：%

站名＼余水位	≤0.1 m	≤0.2 m	≤0.3 m
东极岛	0.71	0.93	0.98
东门岛	0.60	0.87	0.96
苍南	0.57	0.85	0.95
大蚊虫岛	0.65	0.90	0.97
喇叭咀	0.64	0.89	0.97
老塘山	0.60	0.87	0.95
洞头岛	0.59	0.86	0.95
国华电厂	0.45	0.75	0.90
马岙	0.64	0.89	0.96
钱仓	0.62	0.88	0.96
六横	0.64	0.89	0.96
鹿西岛	0.59	0.86	0.95
条帚门	0.64	0.89	0.96
头门岛	0.63	0.89	0.96
石塘	0.62	0.88	0.96
鼠浪湖	0.66	0.91	0.97
下三星	0.66	0.91	0.97
鱼腥脑	0.59	0.86	0.95
中块岛	0.71	0.93	0.98
外洋鞍	0.67	0.92	0.97
乌沙山	0.51	0.81	0.93

从分布来看，近岸的站点调和分析精度较低，如国华电厂站调和分析余水位小于等于 0.1 m 的占比仅有 45%，离岸距离越远，调和分析精度越高，如东极岛站调和分析余水位小于等于 0.1 m 的占比超过 70%，这是由于近岸受地形影响潮波变形较大；在舟山海域附近，自西南海域至东北海域调和分析精度逐渐增大。

4　余水位特征分析

余水位具有良好的空间一致性，可用来推算长期验潮站临近海域的临时站潮位。《水运工程测量规范》(JTS 131—2012)规定，在离岸距离小于 100 km 的非河口开阔海域，可采用基于余水位订正的水位推算法求取推算点水位，替代海上定点水位站获取水位，或构建测区潮汐模型实施水位控制。

分别采用余水位和绝对余水位两种方法统计余水位。余水位统计为各时刻的余水位值叠加，若该值为正，则表示统计时段内的实测潮位值整体比天文分潮高，反之，表示统计时段内的实测潮位值整体比天文分潮低，分析余水位的目的在于明晰各站点不同月份平均水位的分布特征；绝对余水位表示不考虑余水位的正负，仅考虑余水位的绝对值，该值的大小表示天文分潮与实测潮位的平均偏差，分析目的在于了解各月份调和分析的误差大小。

经计算舟山海域各潮位站 2018 年全年各月度平均余水位均在 0.05 m 以内；各月度分布规律不明

显，各月度呈交错状态，舟山海域的余水位较小。各站绝对余水位逐月平均值统计可知，各潮位站在6月份时，绝对余水位最小，其他各月份基本相当，各月度绝对余水位基本在 0.07~0.13 m 之间。

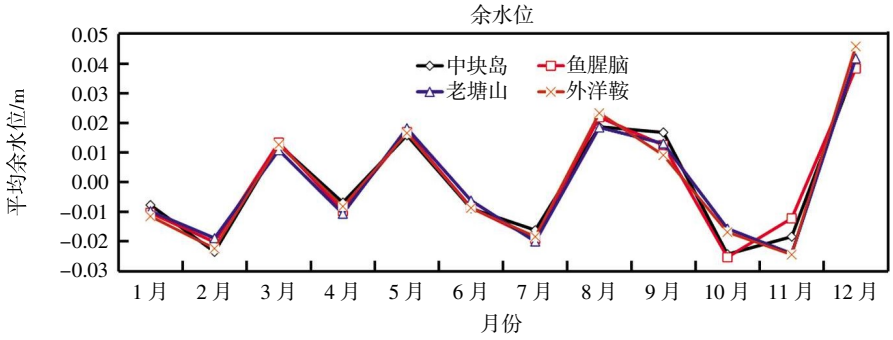

图 5 舟山海域余水位月度分布特征

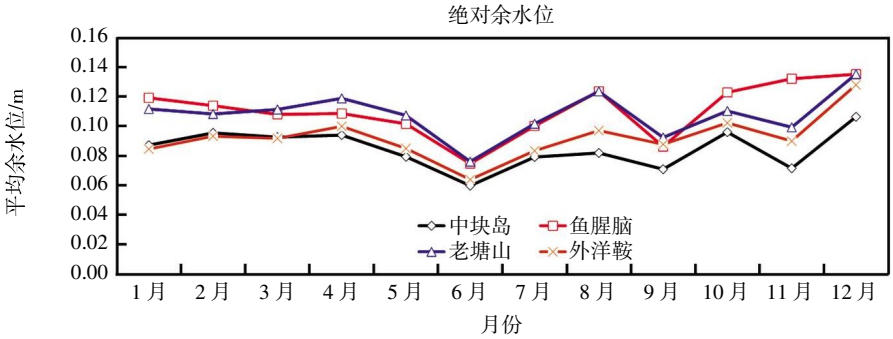

图 6 舟山海域绝对余水位月度分布特征

总体来看，各站平均余水位均在 0.05 m 以内；各月度分布规律不明显，各月度呈交错状态，但整体来说，舟山海域的余水位较小，各站不同月份绝对余水位基本 0.12 m 以内，说明调和分析精度较高。

5 结 论

基于舟山海域多年实测潮汐资料，采用最小二乘法进行潮汐调和分析、余水位特征分析，主要研究结论如下。

（1）舟山海域 M_2 分潮在潮位中占主导地位，近岸振幅大、离岸振幅小，自舟山海域西南侧东门岛至东北方向中块岛，振幅逐渐减小。各潮位站的 K_1 分潮的初位相（迟角）相差较小，M_4 分潮的初位相（迟角）相差较大。潮波在传播至舟山本岛附近时同潮时线随即分为两条路径呈八字形向南北两侧伸展，分别进入杭州湾和宁波湾。

（2）潮汐类型主要呈现规则半日潮，潮高日不等现象不明显，呈现出既有高潮日不等也有低潮日不等的现象。外海涨落潮历时相差接近于 30 min，落潮历时大于涨潮历时，接近河口站位附近如钱仓涨落潮历时差接近于 1 h，涨潮历时大于落潮历时。

（3）相比采用 2017—2018 年 2 年潮位资料进行调和分析，采用 2018 年全年潮位资料进行调和分析时余水位最小，调和分析精度最高。其次，舟山海域调和分析精度离岸距离越远精度越高，自西南海域至东北海域调和分析精度逐渐增大。

（4）舟山海域各站平均余水位均在 0.05 m 以内；各月度分布规律不明显，各月度呈交错状态，但整体来说，舟山海域的余水位相对较小。

参考文献：

[1] 童章龙. 潮汐调和分析的方法和应用研究[D]. 南京：河海大学，2007.

[2] CARTWRIGHT D E，EDDEN A C. Corrected tables of tidal harmonics[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society，1973，33(3)：253-264.

[3] MUNK W H，CARTWRIGHT D E. Tidal spectroscopy and prediction[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A，Mathematical and Physical Sciences，1966，259(1105)：533-581.

[4] DARWIN G H. Ocean tides and lunar disturbance of gravity[M]. Cambridge：Cambridge at the University Press，2009.

[5] 于玲，方国洪. 中国近海验潮站长期观测资料的潮汐调和分析[J]. 海洋科学进展，2010，28(2)：133-141.

[6] 张凤烨，魏泽勋，王新怡，等. 潮汐调和分析方法的探讨[J]. 海洋科学，2011，35(6)：68-75.

[7] 万猛. 象山港余流特征及其影响因素研究[D]. 杭州：浙江大学，2015.

[8] 王凯，方国洪，冯士. 渤海、黄海、东海 M_2 潮汐潮流的三维数值模拟[J]. 海洋学报(中文版)，1999，4：1-13.

[9] 于克俊，张法高. 渤海潮波运动的三维数值计算[J]. 海洋与湖沼，1987，18(3)：227-236.

[10] 刘鹏霞，刘子洲，宋新，等. 鲁海丰海洋牧场流场特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版)，2019，49(8)：10-18.

[11] 黄祖珂，黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛：中国海洋大学出版社，2005.

[12] 李少朗，崔力维，马欣. 北部湾海域潮汐特征研究[J]. 海洋湖沼通报，2020，2：72-77.

[13] 左军成. 海洋水文环境要素的分析方法和预报[M]. 青岛：中国海洋大学出版社，2006.

Research on Tidal Characteristics and Harmonic Analysis Accuracy in the Zhoushan Sea Area

SHI Jingyuan[1], ZHANG Gongjing[2]

(1. Eastern Navigation Service Center, Shanghai 200090,China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029,China)

Abstract: As the numerous islands and complex geography in the Zhoushan sea area of Zhejiang Province, the tide wave is affected by multiple factors. Utilizing the long-term measured tide data, coupling with harmonic analysis by the least square method, we propose that the M_2 tidal constituent in the Zhoushan sea area is dominant. And its nearshore amplitude is large, whereas the offshore amplitude is decreased. Therefore, from Dongmen island located on the southwest side of the Zhoushan sea area to Zhongkuai island, which is on the northeast side, the amplitude gradually reduces. Furthermore, the harmonic analysis accuracy is higher following the offshore distance and increases from the southwest sea area to the northeast. Besides, there is no significant distribution pattern of monthly residual water level, while it exhibits the alternating condition. In general, the residual water level in the Zhoushan sea area is relatively low.

Key words: Zhoushan sea area; tidal constituent; harmonic analysis; residual water level