

刘倩,孙小淇.青岛港潮汐的调和分析与预报[J].海洋气象学报,2022,42(2):99-106.

LIU Qian, SUN Xiaoqi. Harmonic analysis and forecast of tides in Qingdao Port[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(2): 99-106. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.011. (in Chinese)

青岛港潮汐的调和分析与预报

刘倩,孙小淇

(青岛大学数学与统计学院,山东 青岛 266071)

摘要:用 T_TIDE 潮汐分析工具对青岛港口 2019 年 1—12 月逐时潮高资料进行不同时段调和分析,计算其调和常数,并总结该港口潮汐特征。从 2019 年全年的调和结果中选择不同分潮建立调和预报模型,对 2019 年 1 月的潮高进行预测,通过相对误差、判定系数结果分析,确定最优调和预报模型。结果表明:青岛港口为正规半日潮港,以太阴主要半日分潮 M_2 分潮为主,其次为太阳主要半日分潮 S_2 、太阴主要半日分潮 N_2 、太阴-太阳赤纬全日分潮 K_1 和太阴赤纬全日分潮 O_1 等分潮;对比不同时间长度的分潮振幅及平均海平面,可知其与用于调和的分潮资料长度几乎无关。分潮由 5 个增加至 24 个可明显改进预报效果,再增加几乎没有改进,故选用 24 个分潮为最优的调和预报模型。为验证模型具有良好的实用性,对五号码头的实测潮汐数据进行分析预报,进而可知建立的模型能够较好地预报青岛港附近海域的潮汐变化。

关键词:青岛港口; T_TIDE 潮汐分析工具; 调和分析; 潮汐预报

中图分类号: P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)02-0099-08

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.011

Harmonic analysis and forecast of tides in Qingdao Port

LIU Qian, SUN Xiaoqi

(School of Mathematics and Statistics, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract The tidal analysis tool T_TIDE is used to harmonically analyze the hourly tide height data of Qingdao Port from January to December 2019. The harmonic constant is calculated and used to analyze the tidal characteristics of the port. Afterwards, different tidal components are selected from the results of the harmonic analysis in the whole year of 2019 to establish a harmonic forecast model, which is utilized to predict the tide height in January 2019. Through analyzing the results of relative errors and coefficients of determination, an optimal harmonic forecast model is determined. The result shows the tide in this area is characterized by regular semi-diurnal tide, which is dominated by M_2 tidal component and followed by S_2 , N_2 , K_1 , and O_1 tidal components. Comparing the amplitude of tidal component and average sea level of different time lengths, it can be seen that it has almost nothing to do with the length of the tide level data used for harmonic analysis. The prediction accuracy tends to increase when the tidal components increase from 5 to 24, while there is little further improvement by including more tidal components in the prediction, so 24 tidal components are selected for the optimal harmonic forecast model. In order to verify the practicability of the model, the measured tidal data of Pier 5 are analyzed and used for prediction.

收稿日期:2021-11-11; 修订日期:2022-02-07

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2019PA007)

第一作者:刘倩,女,硕士研究生,主要从事人工神经网络和海洋预报研究,2019020137@qdu.edu.cn。

通信作者:孙小淇,女,博士,副教授,主要从事神经网络研究,sunxiaoqi@live.com。

Furthermore, it can be seen that the model can better predict the tidal changes in the sea areas near Qingdao Port.

Key words Qingdao Port; tidal analysis tool T_TIDE; harmonic analysis; tidal prediction

引言

海洋表面因受天体运动产生的引潮力的作用,海水会出现周期性涨落的现象,称此现象为潮汐^[1]。潮流的变化会影响海上船舶的进出、货物的进出口作业和施工计划的制定等。青岛港口涉及到运输、系泊和沉放等相关业务,都与潮汐直接相关。

青岛港位于黄海西海岸,半岛南岸西部的胶州湾口附近,港内水域宽阔,为我国著名的天然良港。对潮汐的调和分潮即找出影响某地潮汐的若干主要分潮,从而分析该处潮汐特性,或对该处潮汐变化进行预报。近代海洋潮汐学产生于17世纪后半叶,其任务是研究海洋潮汐的成因,分析潮汐特征及其随时间的变化规律,并作出预报^[2-5]。平衡潮理论于1687年由牛顿提出。1868年,开尔文设计了用于预报的调和分潮法,并发明潮汐预报机。DARWIN^[6]最早采用调和分潮法预报潮汐,之后DOODSON^[7-8]改进了调和分潮法,提高了计算精度。HORN^[9]最早用计算机进行潮汐调和分潮的计算。近年来,我国学者改进原有理论方法,并应用到本国实际情况中。郑有任等^[10]采用T_TIDE程序对南海北部进行调和分潮分析,总结海域潮汐特征,并利用结果预测潮高,比较全年和分季节的结果,统计分析预测结果与实测数据的残差。程诚和郑小萌^[11]应用潮汐资料分析T_TIDE程序,对比连云港站点的调和分潮结果与实测数据的误差,并根据计算的调和分潮常数进行潮位预测分析。尹朝晖等^[12]对工程施工海域的潮汐资料进行调和分潮分析,并探究不同分潮个数对预报精度的影响。

本文对青岛港2019年全年逐时潮位资料进行调和分潮分析,之后从2019年逐时潮高的调和分潮结果中选择不同分潮建立调和分潮模型,进而对2019年1月的潮高进行预测,通过对相对误差、判定系数结果进行分析,确定最优调和分潮模型。

1 分析原理与数据

1.1 调和分潮法

潮汐静力理论(或称平衡潮理论)^[13]是研究海

水在引潮力作用下产生潮汐过程的理论,仅分析潮汐现象变化的基本规律和特点,不能获得具体的潮汐变化规律。为研究青岛港口潮汐的规律,据观测的实时潮汐水位数据进行调和分潮分析,得到其主要分潮的调和分潮常数,然后进行潮汐预测。

调和分潮法^[14]是根据实测潮位数据计算各分潮的调和分潮常数,即分潮振幅和分潮迟角,然后应用两者预测潮位。为降低调和分潮模型预报产生的偏差,研究人员常选取振幅较大的分潮进行预测。根据潮汐周期性运动的特点,调和分潮法将潮汐视为若干个余弦函数的叠加,故潮汐水位可由下式表示:

$$h(t) = \sum_{k=1}^n f_k H_k \cos(\sigma_k t + v_k + u_k - g_k) + H_0 \quad (1)$$

式中: n 为分潮数量, f_k 为交点因子, H_k 为分潮振幅, σ_k 为分潮角速度, v_k 为分潮初相位角, u_k 为天文相角的交角订正角, g_k 为迟角, H_0 为海平面,故每个分潮为 $f H \cos(\sigma t + v + u - g)$ 。其中 $f, \sigma, (v + u)$ 均已知,故只需求出每个分潮的 H 和 g ,则此分潮便可求出。 H 和 g 称为调和分潮常数。

传统的潮汐调和分潮常采用FOREMAN and NEUFELD^[15]基于FORTRAN程序编写的软件进行,但古典潮汐计算理论忽略了对近日点的调制。2002年,PAWLOWICZ et al.^[16]在FOREMAN and NEUFELD^[15]程序的基础上进行改进,发表了T_TIDE潮汐处理软件包。相比于FOREMAN and NEUFELD^[15]的程序,T_TIDE程序可对整年或较短的潮汐资料进行调和分潮分析,还可解释未确定的潮汐成分,所得分析结果包含置信区间^[17-20]。此外,T_TIDE程序也允许少量的缺测存在。t_predic.m利用t_tide.m得到的调和分潮常数预测未来某时刻的潮汐水位。本文利用T_TIDE工具箱对青岛港口区域进行潮汐的调和分潮分析。

1.2 资料来源与处理方法

文中收集了2019年1月1日—12月31日青岛港验潮站逐小时的潮位观测资料。青岛港验潮站位于胶州湾口东北方,座落于青岛大港一号码头,即36.08°N,120.32°E,港池由防波堤环抱而成,其入口呈喇叭形向西南敞开,最窄处宽约270 m,港池内水深一般为5~13 m。该港池为大型固定码头,此

次仿真实验数据来源于中国港口网 (<http://www.chinaports.com/tidal>)。

使用 T_TIDE 程序包执行带有节点校正、推理的古典调和分析,选择传统的最小平方法求解青岛港的调和常数值,并用 Matlab 加载和分析时间序列,对青岛港每日不同时刻的潮位情况数据进行分析。其中 `t_tide.m` 用于分析, `t_predic.m` 用于潮汐预报。具体步骤如下:

(1)数据预处理。对原始资料的奇异点进行滤波处理,去掉毛刺。在处理极少部分缺测资料时,利用 GIL and DE TORO^[21]介绍的最小二乘插值法进行插值,并使用格林尼治标准时。

(2)程序实现。首先,读取原始潮位数据。接着,使用 `t_tide` 分析逐时的潮位资料,得到输出参数分潮的符号(name)、振幅(amp)、迟角(pha)、信噪比(snr)、回报的潮位(xout)等。一般认为信噪比 $V_{snr} > 2$ 的分潮是显著的。

(3)潮汐预报。调和分析结束后,用 `t_predic` 进行潮汐的预报,得到不含计算数据平均值的预报潮位。

2 结果与分析

采用 PAWLOWICZ et al.^[16]编写的 T_TIDE 软件包进行验潮站潮位资料的调和分析 and 预报。首

先,分析青岛验潮站一号码头 2019 年全年潮汐水位数据的性质。其次,为研究潮位资料长度与分潮振幅、平均海平面的关系,将全年资料分成不同的时间长度,对比分析仿真结果的变化。之后,选择不同分潮建立调和预报模型,通过 2019 年 1 月潮位的回报检验模型可靠性,确定最优调和预报模型。最后,用改进的模型预报五号码头 2019 年 8 月的潮位变化,结合观测资料检验调和预报效果。

2.1 调和分析潮汐的性质

选用青岛港验潮站 2019 年 1 月 1 日—12 月 31 日全年间隔 1 h 的潮位资料进行调和分析, T_TIDE 中设置开始时间为 2019 年 1 月 1 日, 纬度为 36.08°N , 信噪比为 2, 并添加 M_{10} 分潮(太阴浅水 1/10 日分潮)。各观测站利用所有的逐时观测节点,用 K_1 分潮(太阴-太阳赤纬全日分潮)推 P_1 分潮(太阳赤纬全日分潮),用 S_2 分潮(太阳主要半日分潮)推 K_2 分潮(太阴-太阳赤纬半日分潮),置信度为 95%。而其他参数按文献[16]中确定的取值不变,计算出该站点处的调和常数。使用青岛港 1 a 长时间序列数据能够消除各个主要分潮的相互影响,故能得到代表性良好的调和常数。最终得到 67 个分潮的振幅、迟角、信噪比以及年平均海平面(239 cm),主要分潮的振幅贡献如图 1 所示。

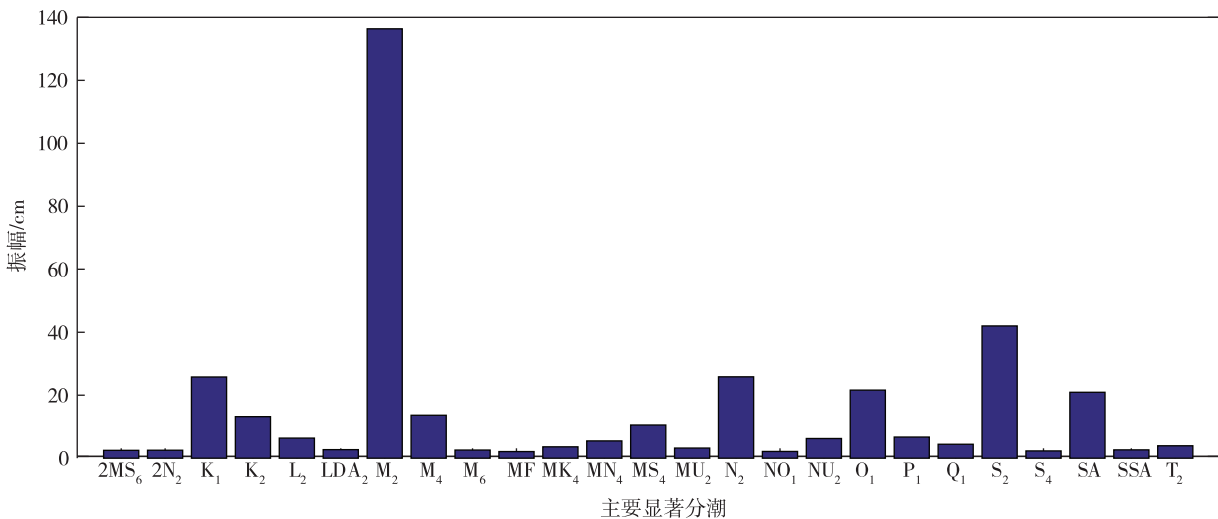


图 1 青岛港主要显著分潮振幅

Fig.1 Amplitude of main significant tidal components in Qingdao Port

由图 1 可以看出,青岛港潮汐以 M_2 分潮(太阴主要半日分潮)为主,其振幅高达 136.4 cm。其次是 S_2 分潮和 N_2 分潮(太阴主要椭圆半日分潮),振幅分别为 42.0 cm 和 25.9 cm。 K_1 分潮和 O_1 分潮(太阴赤纬

全日分潮)的振幅分别为 25.8 cm 和 21.6 cm; SA 分潮(太阳年周潮)的振幅为 20.1 cm; M_4 分潮(太阴浅水 1/4 日分潮)和 MS_4 分潮(太阴-太阳浅水 1/4 日分潮)的振幅为 13.6 cm 和 10.6 cm。

潮汐是各分潮叠加而形成的,实际中常用振幅较大的分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 作为潮汐类型的判据^[18]。潮汐类型的判别公式如下^[22]：

$$\text{规则半日潮: } 0 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} \leq 0.5 \quad (2)$$

$$\text{不规则半日潮: } 0.5 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} \leq 2.0 \quad (3)$$

$$\text{不规则全日潮: } 2.0 < \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} \leq 4.0 \quad (4)$$

$$\text{规则全日潮: } \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} > 4.0 \quad (5)$$

其中, H_{K_1} 、 H_{O_1} 和 H_{M_2} , 分别为分潮 K_1 、 O_1 和 M_2 的平均振幅。在青岛港口中, 分潮 S_2 的振幅小于 M_2 , 故可用此划分标准。

通过公式(2)—(5)可以得到, 该海域潮型数约为 0.35, 潮汐特征为规则半日潮, 符合青岛港属于正规半日潮港的事实。

2.2 不同时段数据的调和与分析

利用 T_TIDE 的调和与分析程序, 研究不同潮位资料长度与分潮振幅、平均海平面的关系。为探究月资料和季节资料(即时间段长度为 3 个月)调和与分析结果的关系, 将 2019 年的潮汐水位数据逐时资料分成 12 个月和 3 个季节(春季: 3 月 1 日—5 月 31 日; 夏季: 6 月 1 日—8 月 31 日; 秋季: 9 月 1 日—11 月 30 日)。同时, 进一步探究季节资料和整年资料调和与分析结果的关系。由 Matlab 仿真实验数据结果, 绘制出 12 个月、3 个季节资料长度的主要分潮对比图(图 2、3)以及各月平均海平面高度对比图(图 4)。此外, 还得到了 3 个季节资料长度的平均海平面高度, 分别为 236 cm、257 cm、245 cm。

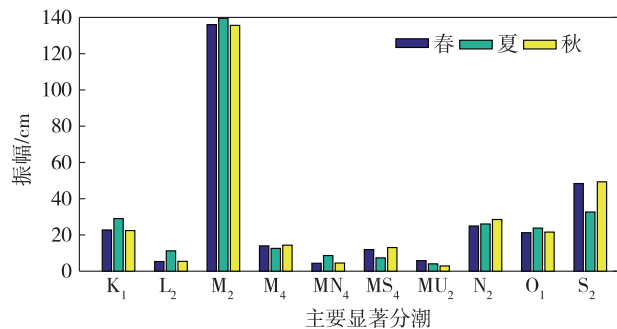


图 2 青岛港各季节主要显著分潮振幅比较
Fig.2 Comparison of amplitude of main significant tidal components in each season in Qingdao Port

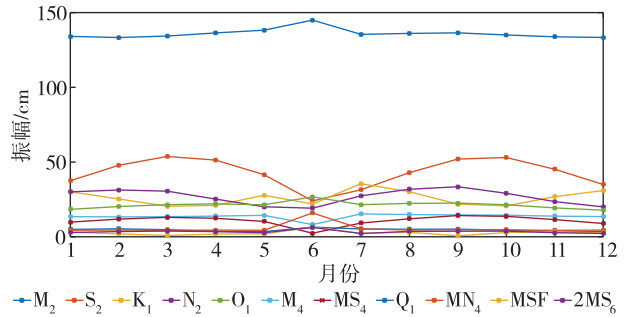


图 3 青岛港各月主要显著分潮振幅比较
Fig.3 Comparison of amplitude of main significant tidal components in each month in Qingdao Port

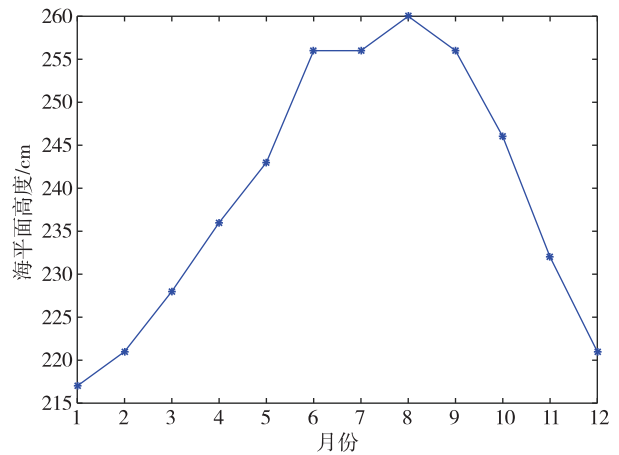


图 4 青岛港各月平均海平面比较
Fig.4 Comparison of monthly average sea level in each month in Qingdao Port

由图 2 和图 3 知, 3—11 月和 3 个季节资料长度的仿真结果都主要受半日分潮 M_2 的影响, 其次受分潮 S_2 、 N_2 、 K_1 和 O_1 影响。其中 M_2 分潮振幅在 3 月、4 月、5 月和春季分别为 134.33 cm、136.43 cm、138.25 cm 和 136.04 cm, 将 3—5 月结果与春季对比知, M_2 分潮振幅的平均差值为 1.44 cm, 其余分潮振幅的差值均在 2.55 cm 上下波动, 其中存在 2 个较大差值, 即在 3 月 N_2 分潮处的 7.77 cm 和在 5 月 S_2 分潮处的 6.83 cm。对比 6—8 月和夏季的结果, 其中 M_2 分潮振幅在 6 月、7 月、8 月和夏季分别为 144.97 cm、135.44 cm、136.09 cm 和 139.53 cm, 其余分潮振幅差值的平均值为 4.51 cm, 同时也出现了 2 个较大差值, 即在 6 月 N_2 分潮处的 9.92 cm 和在 8 月 S_2 分潮处的 10.30 cm。对比 9—11 月和秋季的结果, 在 N_2 分潮处出现了 1 个较大差值。由图 1、2 可知, 3 个季节和整年资料长度的结果也主要受分潮 M_2 、 S_2 的影响。对比其分潮振幅结果发现, 其振幅的最大差值均出现在半日分潮 S_2 处。由此可

见,不同潮位资料长度对半日分潮 S_2 、 N_2 的振幅影响较大,但差值均小于 11 cm,故所选取潮位资料长度对分潮振幅的影响较小。

青岛港逐月平均海平面高度如图 4 所示,3 个季节资料长度的平均海平面高度分别为 236 cm、257 cm、245 cm,年平均海平面高度为 239 cm。逐月海平面高度表现为“偏峰型”特征,峰值出现在 8 月,与季节海平面高度峰值出现在夏季(6—8 月)相契合,而此时正值青岛地区的台风期。9 号台风“利奇马”于 2019 年 8 月 11 日 17 时在青岛市南偏西方向约 10 km 的海面上(35.2°N,120.1°E)登陆,致使外围最大风力有 9 级(风速达 $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)^[23]。正是因为受台风影响,不同潮位资料长度的平均海平面的最大差值出现在 8 月和夏季。

对比 1 个月、3 个月和整年的分潮振幅及平均海平面高度数据可知,仿真结果与所选取潮位资料长度几乎无关。但为建立最优的预报模型,下文使用由整年潮位资料长度得到的仿真结果进行分析预报。

2.3 潮汐调和与分析效果检验

理论上,在进行潮汐调和预报时选取的分潮个数越多,预测的精度越高。但实际应用中发现大部分分潮的振幅很小,因此可以忽略不计。为了定量分析分潮个数对调和和回归效果的影响,选取由 2019 年全年调和与分析所得的不同分潮个数,通过分析 2019 年 1 月的预测结果,确定最优的调和预报模型。

为评价不同预报模型仿真测试结果的性能,引入 2 个指标:(1)相对误差(E),指测量的绝对误差(即预测潮水位与实测潮水位的差值)与实测的潮水位之比,它能更好地反映测量的可信程度;(2)判定系数(R^2),指统计学中“相关系数”的平方,用以表征两个变量的相关程度。其具体结果由公式(6)和公式(7)计算所得。

$$E_i = \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\left(n \sum_{i=1}^n \hat{y}_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{\left[n \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]} \quad (7)$$

式中: n 为采集的数据数量, \hat{y}_i 为第 i 个数据的预测数值; y_i 为第 i 个数据的真实数值。其中相对误差越小,表明构建的潮汐水位预报模型越好。判定系数取值范围是 $[0, 1]$, 从 0 到 1, 表明模型的拟合性

能越来越好。

采用增加、减少分潮数的方法建立最优回归模型,先将平均振幅从大到小进行排列,然后依次选取分潮数(5, 10, 15, ……)进行仿真实验。选取 5 个分潮时,调和预报相对误差为 0.205 8,判定系数为 0.872 5;增加到 25 个分潮之后,调和预报相对误差降到 0.106 6,判定系数增至 0.969 4,预报效果可以得到明显提高;但是从 25 个分潮增加到 50 个时,则几乎没有改进(表 1)。

表 1 不同分潮个数调和预报的性能评价指标

Table 1 Performance evaluation index of harmonic forecast with different numbers of tidal components

分潮数	判定系数	相对误差	去极值的相对误差
5	0.872 5	0.205 8	0.155 0
10	0.908 9	0.188 1	0.142 7
15	0.935 3	0.126 7	0.114 3
20	0.947 9	0.122 0	0.106 0
25	0.969 4	0.106 6	0.089 6
30	0.968 1	0.093 5	0.070 8
40	0.967 6	0.133 3	0.095 4
50	0.968 3	0.093 3	0.070 3

但是,对于量化研究而言,时间序列数据中存在异常值,故必须要对相对误差数据作预处理,使仿真数据更加客观,以便于更好地探究潮水位的规律。本文采取去极值的方法,用以降低极值对相对误差的影响,提升数据结论的准确性。选取 5 个分潮时,于 1 月 25 日 15 时出现一个极大值,数值为 5.710 5,剔除后的相对误差为 0.155 0;当增加到 25 个分潮之后,同样于 1 月 25 日 15 时出现一个极大值,数值为 2.945 5,剔除后的相对误差为 0.089 6;但是从 25 个分潮增加到 50 个时,由去极值方法得到的相对误差波动幅度很小。

为确切地得到最优的调和预报模型,接着选取 21、22、23 和 24 个分潮进行调和预报,绘制出当分潮数为 21、22、23 和 24 个时的青岛港潮汐预测图(图 5)。由图 5 可见,仿真结果和青岛港口的实际潮位基本一致。对比其相对误差,都在 0 附近上下起伏,但在 16 h、40 h 和 132 h 起伏较大。而 16 h 和 40 h 分别对应 1 月 25 日 15 时和 26 日 15 时,此时青岛的风力达到 5 级,温度日变量为 $7 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[24],故潮汐预测精度可能受大风、涌浪等非潮汐因素的影响。

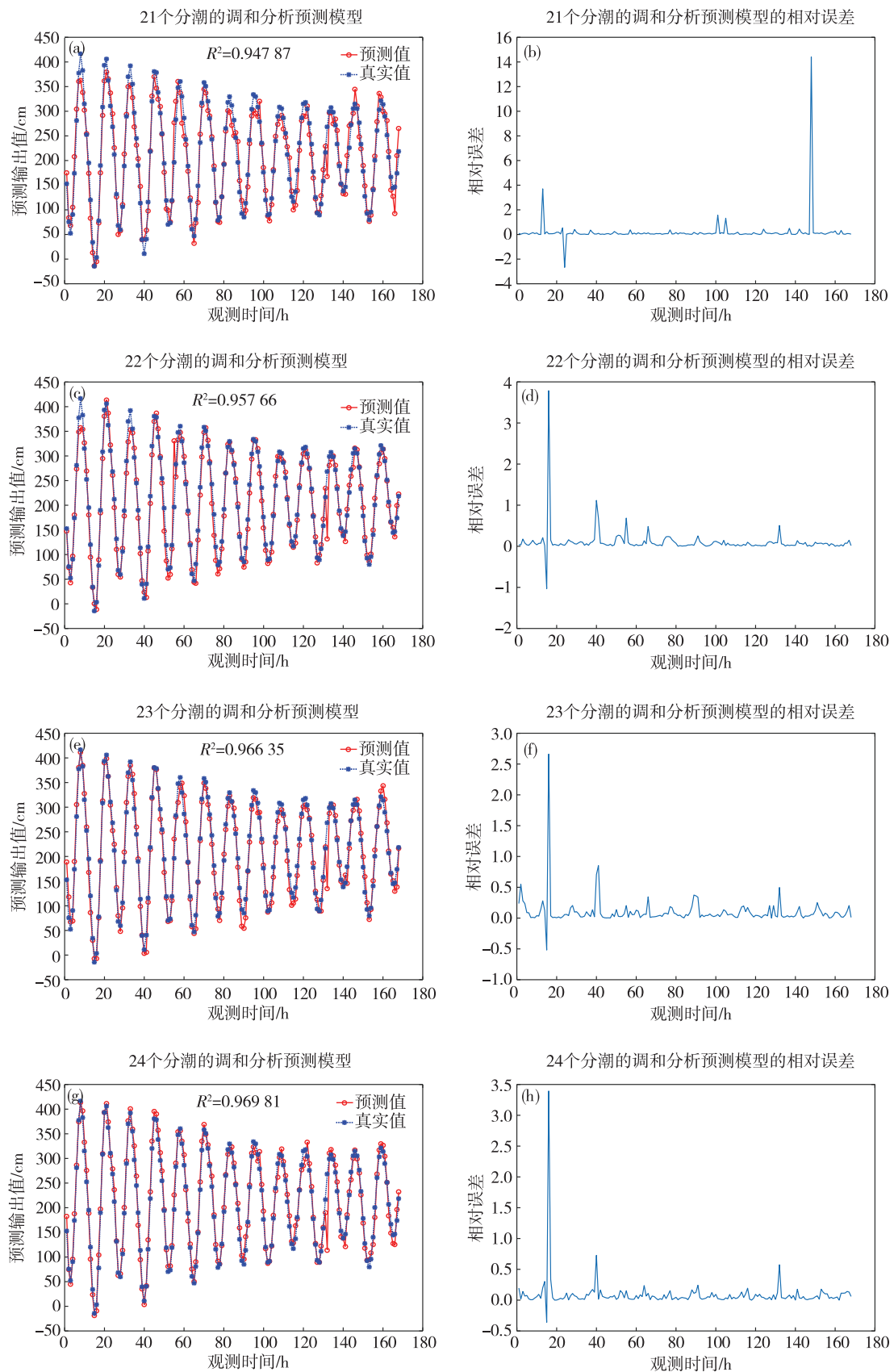


图5 取21、22、23和24个分潮时的调和预报模型(a、c、e、g)及其相对误差(b、d、f、h)

Fig.5 Harmonic forecast models (a/c/e/g) with 21, 22, 23, and 24 tidal components and their relative errors (b/d/f/h)

为更加直观地对比数据,将图 5 汇总成表 2。其中,选取 21 个分潮时,由图 4 可见,于 148 h (1 月 31 日 03 时) 出现一个极大值,为 14.404 1,剔除后的相对误差为 0.112 5;当增加到 22、23、24 个分潮之后,由图 5 可知,均于 16 h (1 月 25 日 15 时) 出现一个极大值,分别为 3.787 6、2.661 6、3.394 3,剔除后的相对误差分别为 0.078 2、0.084 4、0.068 3。

表 2 取 21、22、23 和 24 个分潮时的调和预报的性能评价指标

Table 2 Performance evaluation index of harmonic forecast with 21, 22, 23, and 24 tidal components

分潮数	判定系数	相对误差	去极值的相对误差
21	0.947 9	0.197 6	0.112 5
22	0.957 7	0.100 3	0.078 2
23	0.966 4	0.099 7	0.084 4
24	0.969 8	0.088 1	0.068 3

由表 2 可知,当分潮个数由 21 个增加至 24 个时,调和预报模型的判定系数提高了 0.021 9,相对误

差降低了 0.109 5,去极值的相对误差降低了 0.044 2。但其由 24 个进行增加时,判定系数、相对误差和去极值的相对误差值几乎不变。由此可见,使用 24 个分潮足以包含绝大部分的分潮信号,可以满足调和预报的需求。由 2019 年 1 月的观测潮位、调和预报潮位及其相对误差曲线可知:建立模型时,应选取 24 个分潮(即 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1 、 SA 、 M_4 、 K_2 、 MS_4 、 P_1 、 L_2 、 NU_2 、 MN_4 、 Q_1 、 T_2 、 MK_4 、 MU_2 、 LDA_2 、 SSA 、 M_6 、 $2N_2$ 、 $2MS_6$ 、 S_4 、 NO_1),其精确的振幅数值可见图 1。

2.4 潮汐预报效果对比

五号码头坐落于青岛港一号码头的西北方向,由东北向西南伸展共 12 个顺岸泊位,五号码头线总长约 2 174 m,水深约 8 m。同上节分析,选择 24 个分潮建立潮汐调和预报模型,分析预报五号码头 2019 年 8 月的潮位变化。使用相对误差和判定系数来检验回报精度,回报结果及相对误差见图 6。仿真结果(图 6)显示,潮位的回报精度为 0.941 6,相对误差仅为 0.082 7。这表明本文建立的模型可以较好地回报青岛港附近海域的潮汐变化情况。

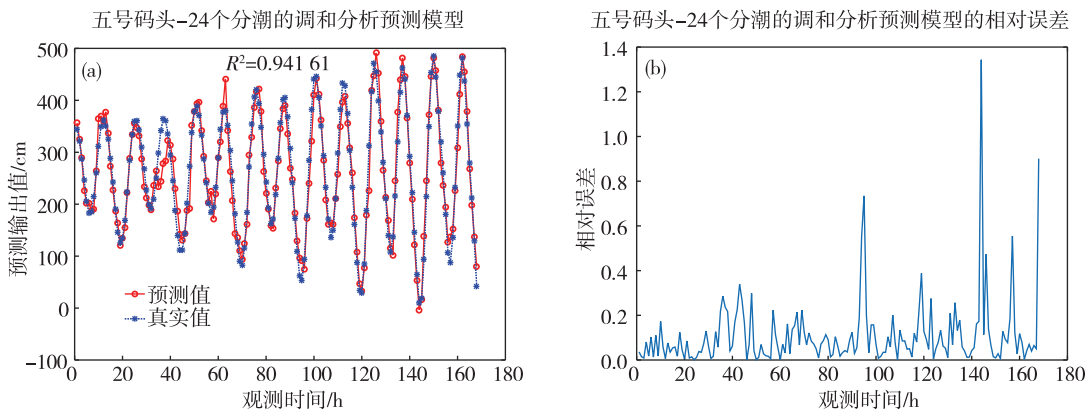


图 6 五号码头的调和预报模型(a)及其相对误差(b)
Fig.6 Harmonic forecast model (a) for Pier 5 and its relative error (b)

3 小结

对青岛港口潮汐进行调和分析,使用 T_TIDE 潮汐调和分析预报程序计算其调和常数,进而对其进行分析和预报。青岛港口潮汐性质为:潮汐为正规半日潮港,主要分潮有 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 、 K_2 、 MS_4 和 P_1 ,其中 M_2 分潮尤其显著。对比潮位资料长度为 1 个月、3 个月及整年的调和分析结果,可知各分潮的振幅、平均海表面高度与用于调和分析的潮位资料长度几乎无关。选择不同分潮数会在一定

程度上影响调和预报精度,对比实验发现,选择 24 个分潮的预报潮位和实测潮位的相对误差为 0.088 1,判定系数为 0.969 8,此时为最优选择。

利用上述结果建立调和预测模型,分析五号码头 2019 年 8 月的潮位。仿真结果显示,预测的潮位与真实的潮位基本一致,可较好地预报青岛港附近海域的潮汐变化。由仿真结果分析知,潮汐预测误差较大的情况大多是由于风、海浪、风暴潮等高频自然因素运动造成的,故在潮汐预报时考虑非潮汐和自然等因素是值得研究的方向。

参考文献:

- [1] 邱志雄.航海概论[M].北京:人民交通出版社,1999:86-95.
- [2] 张洪欣,唐声全,刘祥宇,等.基于潜标资料的中南半岛外海水文特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(1):54-66.
- [3] 刘达,王慧,黄彬,等.2021年春季海洋天气评述[J].海洋气象学报,2021,41(3):11-23.
- [4] 王楠喻,王雪,娄盼星,等.台风“利奇马”引发山东强降水成因分析[J].海洋气象学报,2021,41(1):119-128.
- [5] 张泽国,尹建川,柳成.基于Grey-GMDH的模块化实时潮汐预报[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(11):140-146.
- [6] DARWIN G H. The scientific papers of Sir George Darwin: tidal friction and cosmogony [M/OL]. New York: Cambridge University Press, 2009 [2021-11-11]. <http://www.cambridge.org/9781108004435>.
- [7] DOODSON A T. The analysis of tidal observations [J]. Philos Trans Roy Soc London, 1928, 227: 223-279.
- [8] DOODSON A T. The harmonic development of the tide-generating potential [J]. Proc Roy Soc London, 1921, 100(704): 305-329.
- [9] HORN W. Some recent approaches to tidal problems [J]. Int Hydrogr Rev, 1960, 37(2): 65-84.
- [10] 郑有任,张娟,吴日升.南海北部沿岸海域潮汐的调和分折[J].台湾海峡,2012,31(4):549-556.
- [11] 程诚,郑小萌.连云港站潮汐调和分折与预报[J].治淮,2016(2):28-29.
- [12] 尹朝晖,巢纪平,王彰贵,等.港珠澳大桥岛隧工程施
工海域潮汐调和分折与预报[J].海洋预报,2020,
37(3):1-5.
- [13] 冯士筭,李凤岐,李少菁.海洋科学导论[M].北京:高等教育出版社,1999:87-137.
- [14] 方国洪,郑文振,陈宗镛,等.潮汐和潮流的分析和预报[M].北京:海洋出版社,1986:58-100.
- [15] FOREMAN M G G, NEUFELD E T. Harmonic tidal analyses of long time series [J]. Int Hydrogr Rev, 1991, 68(1): 85-108.
- [16] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J]. Comput Geosci, 2002, 28(8): 929-937.
- [17] 何佩东,邬惠明,曹兵,等.江苏近岸海域水位变化特征分折[J].海洋预报,2020,37(2):54-59.
- [18] 陈耀祖,高磊,刘子洲,等.山东半岛海洋牧场潮汐特征分折[J].海洋与湖沼,2019,50(4):719-727.
- [19] 沈欢欢,李大刚.黄浦江干流水域潮汐特征分折[J].中国水运,2019(8):119-120.
- [20] 朱巧云,张志林,乔红杰.三峡工程蓄水前后长江河口段潮汐特征变化分折[J].水文,2019,39(3):75-79.
- [21] GIL E, DE TORO C. Improving tide-gauge data processing: a method involving tidal frequencies and inverted barometer effect [J]. Comput Geosci, 2005, 31(8): 1048-1058.
- [22] 陈宗镛.潮汐学[M].北京:科学出版社,1980:127-234.
- [23] 柳龙生,黄彬,吕爱民,等.2019年夏季海洋天气评述[J].海洋气象学报,2019,39(4):97-107.
- [24] 王靖,黄彬,聂高臻,等.2018年冬季海洋天气评述[J].海洋气象学报,2019,39(2):94-105.