

大连老虎滩海域潮汐调和分析

许秀娥¹, 张容榕², 韦冬妮²

(1. 国家海洋局东港海洋环境监测站, 辽宁 丹东 118000; 2. 国家海洋局大连海洋环境监测中心站, 辽宁 大连 116015)

摘要: 利用 T_TIDE 工具箱对老虎滩验潮站 1 a 及 3 M 逐时潮位资料进行调和分析。结果表明: 1 a 潮位能调和分析出较多的天文分潮和浅水分潮, 按振幅大小排列, 前 6 个主要分潮分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 、 SA 、 N_2 和 O_1 。对 3 M 潮位数据进行调和分析时, 为保证获取足够的分潮, 需要利用主分潮和随从分潮的差比关系来推算随从分潮, 并添加必要的浅水分潮。利用 1 a 逐时潮位资料计算得出的调和常数进行 2019 年天文潮预报, 实测与预报对比得出的潮高残差整体服从正态分布, 残差均值小于 10^{-2} m, 置信区间长度小于 10^{-2} 。将天文潮预报值与潮汐表数据进行比较, 对比发现两者差异较小, 进一步证实利用 T_TIDE 开展天文潮预报的可行性。

关键词: 调和分析; 天文分潮; 天文潮预报

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)04-0016-08

1 引言

潮汐现象是指海水在天体(主要是月球和太阳)引潮力作用下产生的周期性运动, 习惯上把海水垂直方向的涨落称为潮汐, 水平方向的流动称为潮流。在人类活动比较频繁的近海, 海水养殖、海洋运输和海洋工程等涉海产业均与潮汐息息相关, 因此开展潮汐运动规律的研究对物理海洋学的发展和国民生产有重要意义。此外, 潮汐能也是一种可持续利用的清洁能源, 潮汐能的开发利用有助于实现碳中和目标。中国近海的潮汐能开发利用潜力以东海最佳, 黄海次之。在第四次中国近海可再生能源调查与研究中, 辽宁省近海有 24 个站址入选装机能量达 500 kW 以上的潮汐能站址备选资源, 仅次于福建、浙江及上海^[1]。

大连湾位于黄海北部辽东半岛南端, 是我国北方重要的港口。老虎滩验潮站位于大连湾湾口西南, 针对渤海开展的潮汐潮流数值模拟大部分以大连外海为开边界, 或者利用该站的数据进行验

证^[2-4]。因此, 通过老虎滩验潮站的实测数据分析掌握潮汐运动规律, 提高潮汐预报的精度, 对于近海海洋活动的安全保障和防灾减灾等具有重要意义。

2 数据及方法

2.1 观测数据

研究数据来源于国家海洋局大连海洋环境监测站老虎滩验潮站的逐时观测潮位。潮位观测资料的时间长短对于其调和和分析的结果影响较大, 通常只有当观测时段的长度不短于任意两个分潮的会合周期时, 这些分潮才能彼此分离。由于不同亚群分潮之间的会合周期最长为一个回归年, 所以当观测时段的长度显著短于 1 a 时, 我们就认为记录是不完整的, 因此, 潮汐分析时通常选用的时间长度大于 1 a^[5]。

为此, 选取时间长度大于 1 a 的潮位观测数据开展潮汐调和分析, 时间范围为 2017 年 1 月 1 日—2018 年 1 月 4 日共 369 d, 时间序列中共包含 8 857

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2021-12-25。

基金项目: 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM)。

作者简介: 许秀娥(1978-), 女, 工程师, 本科, 主要从事海洋观测与海洋生态预警监测。E-mail: xuxiue1978@163.com

通讯作者: 张容榕(1984-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋调查与监测。E-mail: zrrsuper@msn.com

个逐时潮高^[6]。同时,为了对比短期(3 M)潮位资料与长期(1 a)潮位资料调和分析结果的差异,又选用了2017年3月1日—5月31日3 M的潮位观测资料进行分析。对潮位观测数据进行质量控制,异常值或缺测值进行线性插值,进而获取逐时无缺测的完整数据样本,并将时间序列调整为世界时。

本研究采用Foreman程序的自动选取分潮功能进行分潮选取,对于不足1 a的资料,采用差比法推算随从分潮,将信噪比大于1的分潮作为显著分潮。在获得两个不同时间长度资料的调和常数后,分别对2019年的天文潮进行预报,并与2019年的潮位观测资料和国家海洋信息中心发布的潮汐表数据进行对比分析和残差检验。

2.2 分析方法

最初的潮汐分析方法是将潮汐涨落与天体运动直接建立相关关系,这类方法称为非调和方法^[7]。Newton^[8]应用万有引力定律也对地球的潮汐现象进行了解释。根据物理学有关原理可知,任何一种周期性的运动都可以由许多简谐振动组成。潮汐变化是一种非常近似的周期性运动,因而也可以分解为许多固定频率的分潮波,进而求得分潮的调和常数(振幅和迟角),这种分析潮汐的方法称为潮汐调和分析。Darwin等^[9]此后发展了调和方法,通过对引潮力进行调和展开,得到了主要的潮汐分潮频率。Doodson^[10]将引潮势进一步展开为纯调和分潮,引用了月球运动的Brown系数和Newcomb表,使引潮势的展开结果更为精准^[7]。近年来,随着计算机运算性能的迅速提高,潮汐调和分析的能力和预报的速度得到大幅提升,调和分析法成为潮汐分析和预报的主要方法,非调和方法退居次要地位。此后,从计算量中解放出来的科学家更加致力于提升分析和预报的准确度。Amin^[11]放弃了传统的交点因子的假设,对19 a的观测资料进行了分析。方国洪等^[12]采用准调和浅水分潮来表示潮汐的高频部分。王晓东等^[13]对厦门和东山的潮位资料进行谱分析,求出调和常数,利用分析结果回报两港的潮位,验证了潮汐谱分析对潮汐预报具有一定的应用价值。

Foreman^[14]在1977年开发了一套潮汐分析与预报的Fortran程序,2002年Pawlowicz等^[15]将该程序改写成Matlab程序,命名为T_TIDE工具箱(以

下简称T_TIDE)。T_TIDE用复数算式代替了传统的实数算式,并增加了随从分潮的推算和非线性误差分析等一些用户自定义界面。2013年,Matte等^[16]在研究潮汐受河流入流影响产生河潮(river tides)而出现的非平稳信号时,在T_TIDE基础上改进程序从而诞生了NS_TIDE。2018年,Pan等^[17]利用潮汐调和分析的新方法EHA,开发了工具包S_TIDE。该工具包既可以分析平稳潮,还能分析非平稳潮,进一步完善了潮汐调和分析方法。

老虎滩验潮站位于辽宁省大连市老虎滩渔人码头海港内,北纬38°52′,东经121°41′,四周没有河流汇入,以规则半日潮平稳信号为主,因此用T_TIDE来分析该验潮站数据。

T_TIDE基于调和分析法可以解析分离一组潮位观测数据中的潮汐和非潮汐信号,最多能分离出45个天文分潮和101个浅水分潮,保留了Foreman程序中的自动筛选分潮的方法,用户可根据需要自行添加浅水分潮。T_TIDE主要针对1 a及少于1 a的观测资料进行分析,对于少于1 a的观测资料,用户还可以根据同一群分潮中主分潮与随从分潮之间的振幅比和迟角差,选择利用主分潮来推算随从分潮,例如利用 K_1 推算 P_1 , S_2 推算 K_2 。对于1 a以上的时间序列,T_TIDE进行的交点因子订正计算会不够准确。

T_TIDE在潮位观测资料分析^[18]和模式结果潮汐调和分析^[19-20]等方面有着较为广泛的应用。本文利用T_TIDE对大连老虎滩验潮站一年期和一个季度期两种时间长度的潮位观测数据进行了调和分析,并利用得出的调和常数进行天文潮预报,最后将天文潮预报结果与潮位资料及潮汐表数据进行对比。

3 结果与讨论

3.1 水位功率谱分析结果

谱分析是时间序列在频域上进行分析的方法,亦称频谱分析或波谱分析。考虑到海洋运动无论是时间上还是空间上均存在各种尺度的波动现象,所以频谱分析是分析海洋各种波动现象的常用方法,被广泛应用在海浪谱分析、潮汐和潮流统计预报、海平面长期变化和气候变化研究等各

个方面。

利用 Matlab 提供的 pwelch 程序对老虎滩站 2017 年的水位做功率谱分析。pwelch 为常用的功率谱分析函数,相关的参数设置如下:窗函数类型选择 hanning 窗,傅里叶变化点数为 256 个,窗口重叠数为傅里叶变化点数的一般为 128 个,采样频率为 60 min,功率谱分析结果如图 1 所示。

功率谱表现出几个特征:周期介于 2~48 h 内出现了几个明显的谱峰,其中周期在 24 h 或 12 h 左右的谱密度较高,12 h 左右的谱密度最高,略高于 24 h 的谱密度,这说明该海域半日潮占优。周期在 8 h、6 h 和 4 h 左右也出现了谱峰,但峰值明显低于 12 h 和 24 h。

3.2 1 a 潮位资料分析主要分潮振幅

本文首先对老虎滩验潮站 369 d 的逐时潮位进行调和分潮,筛选分析出 67 个分潮,其中包含 42 个

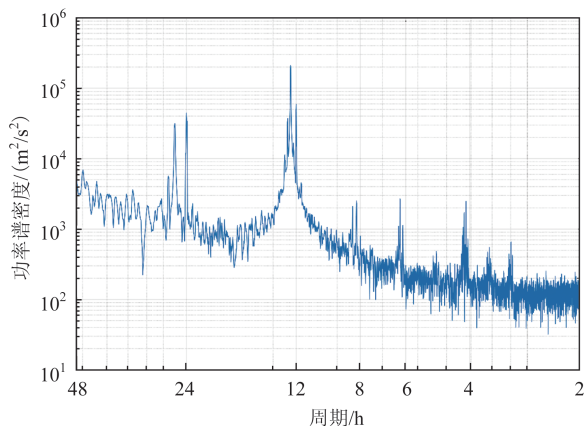


图 1 2017 年观测数据谱分析结果

Fig.1 Spectral analysis result of 2017 observation data

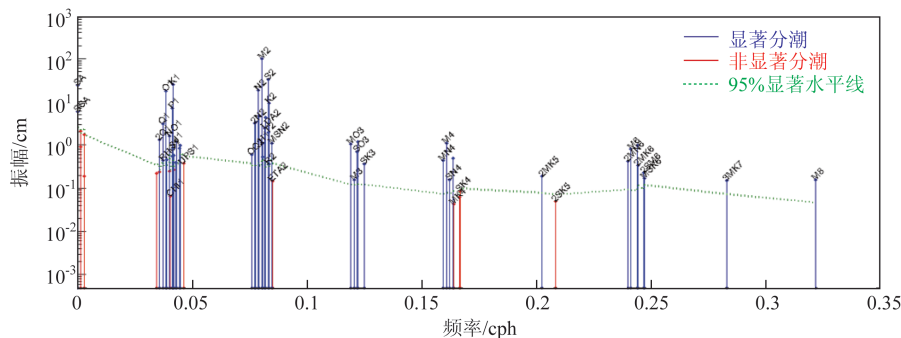


图 2 老虎滩 1 a 潮位资料潮汐频谱图

Fig.2 Frequency spectrum of one-year tidal level data in Laohutan station

天文分潮和 25 个浅水分潮。

图 2 为调和分潮得到的各分潮的频谱图,振幅大于 95% 显著线的为主要分潮,振幅小于显著线的则为次要分潮。结果表明,67 个分潮中有 52 个分潮为主要分潮(蓝色),其中包括 31 个天文分潮和 21 个浅水分潮,其他 15 个则为不显著的次要分潮(红色)。

图 2 中频率大于 0.1 cph (cycle per hour) 的高频分潮多为浅水分潮,多数低频分潮集中在 0.08 cph (半日潮) 和 0.04 cph (日潮),这与水位功率谱分析的结果基本一致。1 a 周期分潮 SA 和 0.5 a 周期分潮 SSA 也是显著分潮,但周期为 1 M 和 0.5 M 的低频分潮并不显著。老虎滩潮汐振幅最大的前 6 个主要分潮(按振幅大小)分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 、SA、 N_2 和 O_1 。

潮汐类型以全日分潮和半日分潮的振幅比为量化指标,我国采用以下公式计算^[7]:

$$F = (H_{k1} + H_{o1}) / H_{m2} \quad (1)$$

式中, H 表示分潮的振幅。我国判断潮汐类型的标准为:当 $0 < F \leq 0.5$ 时,为规则半日潮;当 $0.5 < F \leq 2.0$ 时,为不规则半日潮;当 $2.0 < F \leq 4.0$ 时,为不规则全日潮;当 $F > 4$ 时,为规则全日潮。经计算,老虎滩潮汐类型值为 0.429 1,为规则半日潮海区。

3.3 3 M 潮位资料分析主要分潮振幅

对于 3 M 的短期潮位资料,由于时间长度较短,部分分潮无法分辨,调和分潮得出的分潮数会有很大不同。图 3 是对老虎滩验潮站短期观测潮位数据的频谱图,未引入差比关系计算随从分潮,也未添加任何浅水分潮。对于短期观测资料,共分析出 35 个

分潮,其中包括19个天文分潮和16个浅水分潮,比1 a期潮位资料获得的67个分潮数少32个。

由图3可以看出,短期潮位资料调和分析出的频谱图与长期潮位资料的频谱图分布较类似,半日潮和全日潮振幅较大, M_2 、 S_2 、 O_1 和 K_1 4个分潮最大,振幅基本一致,这也说明利用长期或短期资料均能调和出其主要分潮;主要的差异在于分离出的分潮数,短期资料分离出的高于绿色显著线的分潮有24个,包括11个天文分潮和13个浅水分潮。长周期分潮(比如1 a周期的SA和0.5 a周期的SSA)均未见,得出的周期为1 M和0.5 M的低频分潮不显著。

对小于1 a的潮位资料进行分析时,需要通过引入差比关系分析随从分潮,还可根据需要添加浅水分潮。这里根据给出的主分潮和随从分潮的差比关系推算出3 M分潮中所缺的半日和全日随从分潮,如随从分潮 σ_1 、 P_1 、 π_1 、 K_2 、 $2N_2$ 和 λ_2 可分别由主分潮 O_1 、 K_1 、 K_1 、 S_2 、 N_2 和 M_2 推出,添加的浅水分潮有 SO_3 、 MK_4 、 SK_4 、 $2MK_6$ 、 MSK_6 和 MSN_2 等。

图4是引入差比关系和浅水分潮的分析结果。与未引入差比关系的结果相比,引入差比关系后分析出的分潮增加了14个天文分潮和8个浅水分潮,其中信噪比大于1的显著分潮有9个(见图4标注的分潮),其它的13个都是非显著的次要分潮。在9个新增的显著分潮中有3个浅水分潮,其中 MSN_2 分潮的频率是0.085 cph,是半日潮性质, SO_3 和 $2MK_6$ 是高频浅水分潮。9个分潮中,振幅最大最显著的分潮是半日潮 K_2 ,其次为全日潮 P_1 ,浅水分潮 SO_3 的振幅虽然不是很大,但是其信噪比仅次于 K_2 和 P_1 。

综上所述,1 a和3 M潮位观测资料的调和分析结果有较大区别,3 M潮位资料得出的分潮数显然比1 a资料得出的分潮数要少很多,虽然可以通过差比关系推算出其他随从分潮的调和常数,但是尚有部分主分潮无法从3 M潮位数据中分析出来。因此,为了保证预报的准确性,本文利用1 a潮位数据分析出的调和常数进行2019年的天文潮预报,并与老虎滩验潮站的实测潮位数据和天文潮数据(潮汐

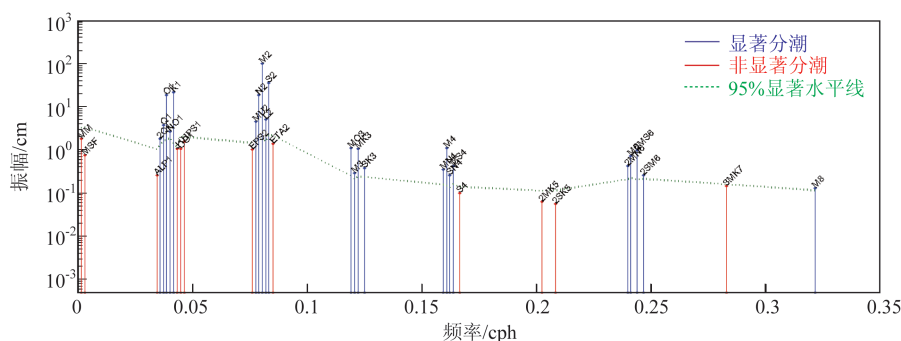


图3 老虎滩3 M潮位资料潮汐频谱图(未引入差比关系和浅水分潮)

Fig.3 Frequency spectrum of three-months tidal level data in Laohutan station (difference ratio and shallow-water tidal component are not introduced)

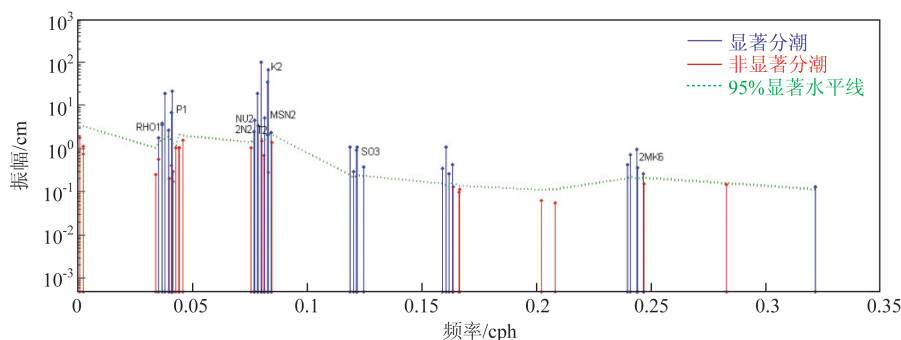


图4 老虎滩3 M潮位资料潮汐频谱图(引入差比关系和浅水分潮)

Fig.4 Frequency spectrum of three-months tidal level data in Laohutan station (difference ratio and shallow-water tidal component are introduced)

表数据)进行对比分析。

3.4 基于 T_TIDE 调和分析的潮汐预报结果验证评估

图 5a 是 T_TIDE 得出的 2019 年老虎滩天文潮预报值与验潮站实测值的对比。图 5b 是 2019 年国家海洋信息中心发布的老虎滩潮汐预报值与验潮站实测值的对比图。图 5c 是潮汐表预报值与 T_TIDE 预报值的对比。为了更清晰地进行对比,我们选取了 800 h 的结果对比绘图,并统一其起算面。

从对比结果来看,观测潮位(实测值)中除了含天文潮外,还包括由温带气旋和热带气旋等引起的余水位。由图 5a 可以看出,观测水位与 T_TIDE 预报的天文潮在某些时间差异较大,在第 700 h 左右能明显看出较大的余水位。同样的现象也出现在潮汐结果上(见图 5b)。利用 T_TIDE 预报的天文潮与潮汐表的预测结果接近,差异较小,最大差值仅 17.6 cm(见图 5c)。

为了更清晰地看出本文的分析结果与实际水

位的差异,我们选取了 2019 年全年的数据进行对比。图 6 是 2019 年老虎滩 T_TIDE 预报潮高与实测潮高的散点图,其中横轴为验潮站的实测值,纵轴是 T_TIDE 的预报结果,红线代表预报值与实测值相等。图 7 是预报值与实测值的分位数图,横轴为实测分位数,纵轴为预报分位数,图中的红线是两者完全重合的理论线。由两图可见,在整个潮高变动区间内,尤其是潮高在 100~400 cm 以内时,两者总体符合良好,而在实测值小于 100 cm 和大于 400 cm 时, T_TIDE 的预报结果偏高。

平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)是衡量变量精度的两个常用指标,可以用来衡量预报值与观测值之间的偏差。两者定义分别如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |(H_1 - h_1)| + \dots + |(H_n - h_n)| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (H_1 - h_1)^2 + \dots + (H_n - h_n)^2}{n}} \quad (3)$$

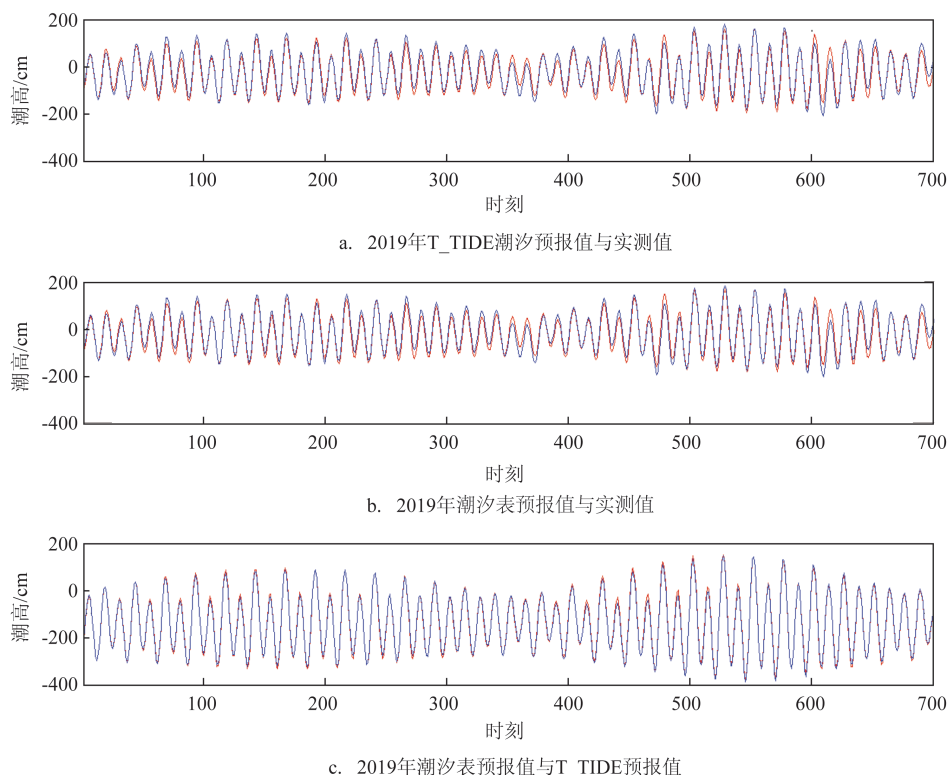


图5 T_TIDE 预报值、实测值及潮汐表预报值两两对比图

Fig.5 Comparison diagrams of T_TIDE predicted value, measured value and predicted value by tidal table

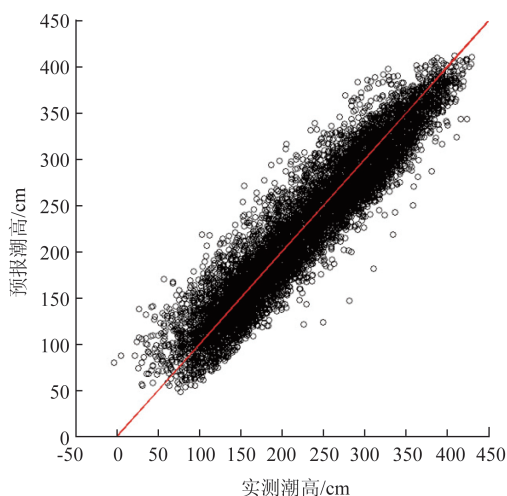


图6 老虎滩2019年T_TIDE预报潮高与实测潮高散点图
Fig.6 Scatter diagram of T_TIDE prediction and observation of year 2019 in Laohutan station

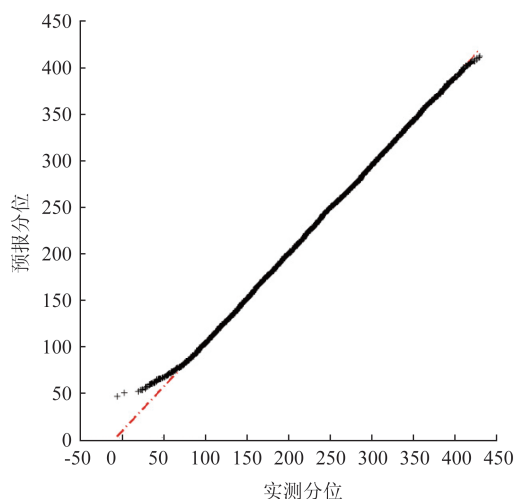


图7 老虎滩2019年T_TIDE预报潮高与实测潮高分位
Fig.7 Quantile of T_TIDE prediction and observation of year 2019 in Laohutan station

式中, H 表示实测值, h 表示预报值, 这两个值均会随着样本个数 n 的增大而增大。当预报值和实测值偏离不大时, 这两个值的比值接近于 1。如果预报值中有偏离实测值很大的值存在, 那么 RMSE 会将偏离的误差二次平方放大, 最终导致 RMSE 的值比 MAE 偏大。

表 1 是根据式(2)和(3)分别计算的潮汐表预报值及 T_TIDE 预报值的 MAE 和 RMSE。从表中能看出 MAE 和 RMSE 相差不大, 两者的 MAE : RMSE 都接近于 1, 说明潮汐表和 T_TIDE 预报值中没有异常

值。T_TIDE 的 MAE 和 RMSE 比潮汐表的偏小, 表明 T_TIDE 预报值对实测值的累计误差少, T_TIDE 的预报结果略优于潮汐表的预报结果。

表 1 潮汐表与 T_TIDE 对实测值的精度指标

Tab.1 Precision indexes of Tide Table and T_TIDE predictions to observation

分类	潮汐表	T_TIDE
MAE	229.660 7	229.615 4
RMSE	230.308 9	230.305 8

为了进一步对比 T_TIDE 和潮汐表的预报效果, 将两者预报的潮差最大值、最小值和实测值进行对比(见表 2)。从潮差结果也可以发现 T_TIDE 的预报效果略好。

表 2 潮汐表、T_TIDE 及实测值潮差对比(单位:cm)

Tab.2 Tidal range comparison between tide table, T_TIDE and observation(unit:cm)

潮差	潮汐表	T_TIDE	实测值
最大值	319	327	330
最小值	93	85	82

3.5 T_TIDE 预报余水位检验

实际观测到的潮位可写为:

$$H = \tilde{H} + r \quad (4)$$

式中, H 为实测潮位; \tilde{H} 为多个调和分潮潮位叠加值; r 为余水位或噪声, 它包括由气象等因素引起的不规则扰动、观测中存在的误差、数据处理中的误差、截断误差和被忽略的分潮等, 有时也简单地称为观测误差。如果余水位 r 的概率呈现正态分布, 则表明所得的结果更为可靠^[6]。

图 8 是 T_TIDE 预报的余水位的频率分布, 横轴代表余水位(实测-预报)的预测残差, 纵轴表示各组余水位数据发生的频率。由图 8 可以看出, T_TIDE 潮高预报的余水位服从正态分布, 即高斯分布, 这与 Powlowicz 等^[15]的结论一致。

表 3 给出了余水位的均值、方差和 95% 的置信区间。余水位均值近似为 0, 可以认为是服从均值为 0 的正态分布, 方差和区间长度小说明预报的准确度高。

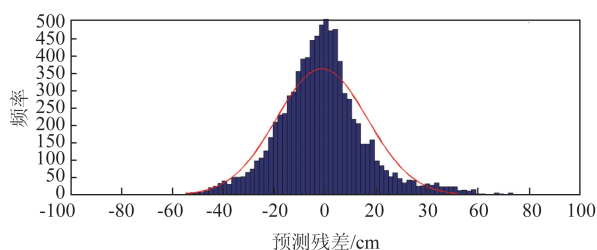


图8 老虎滩余水位(实测-预报)频率分布

Fig.8 Frequency distribution of residual water level (measured-forecast) in Laohutan station

表3 老虎滩余水位统计值

Tab.3 Statistical values of residual water level in Laohutan station

站位	总体 均值 μ	μ 的95% 置信区间	总体 方差 σ	σ 的95% 置信区间	区间 长度
老虎滩	-0.013 2	-0.016 9 -0.009 4	0.178 2	0.175 6 0.180 9	0.005 3

4 结论

本文利用T_TIDE工具箱对老虎滩验潮站1 a潮位资料和3 M潮位资料进行调和分析。结论如下:

(1) 相比3 M潮位资料分析结果,1 a潮位资料能分析出较多的天文分潮和浅水分潮。老虎滩潮汐振幅最大的前6个主要分潮分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 、 SA 、 N_2 和 O_1 ,潮汐类型属于规则半日潮。

(2) 对3 M的潮位资料进行调和分析的结果与利用1 a资料调和分析得出的结果有很大不同,少于1 a的潮汐资料不能分析出长周期的分潮以及一些主分潮,需要添加差比关系来计算随从分潮,并且添加必要的浅水分潮。

(3) 进一步利用T_TIDE将1 a潮位资料计算出的调和分潮常数进行老虎滩2019年天文潮预报,预报残差符合正态分布,残差均值小于 10^{-2} m,置信区间长度小于 10^{-2} ,且该预报结果与潮汐表潮汐预报值相差不大。

以上结论表明,调和分析工具箱T_TIDE对资料长度大于1 a的潮汐资料有较好的分析结果,并能较好地进行潮汐预报。对于资料长度太短的潮汐

资料,其不能分析出长周期分潮,以致影响后续潮汐预报。

参考文献:

- [1] 武贺,王鑫,李守宏. 中国潮汐能资源评估与开发利用研究进展[J]. 海洋通报, 2015, 34(4): 370-376.
WU H, WANG X, LI S H. Advance in the study of assessment and utilization of tidal energy resource in China[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(4): 370-376.
- [2] 袁帅,袁鹏,司先才,等. 两种不同水动力模型对渤海潮汐模拟的比较研究[J]. 海洋湖沼通报, 2019, 41(5): 34-41.
YUAN S, YUAN P, SI X C, et al. Comparison study on the simulations of tide in Bohai Sea using two hydrodynamic models[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019, 41(5): 34-41.
- [3] 罗丹,刘浩. 渤海潮汐潮流的数值研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(3): 457-464.
LUO D, LIU H. Numerical study on the tides and tidal currents in the Bohai Sea[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(3): 457-464.
- [4] 尼建军,王新怡,张凤烨,等. 基于FVCOM的渤海潮波数值模拟[J]. 海洋科学, 2013, 37(2): 89-94.
NI J J, WANG X Y, ZHANG F Y, et al. Numerical simulation of tide in the Bohai Sea based on the finite-volume coastal ocean numerical model (FVCOM)[J]. Marine Sciences, 2013, 37(2): 89-94.
- [5] 王骥,方国洪. 不完整逐时潮汐观测记录的分析[J]. 海洋学报, 1981, 3(2): 193-210.
WANG J, FANG G H. An analysis of incomplete hourly tidal records[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1981, 3(2): 193-210.
- [6] 方国洪,郑文振,陈宗鏞,等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
FANG G H, ZHENG W Z, CHEN Z Y, et al. Analysis and prediction of tides and tidal currents[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.
- [7] 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.
HUANG Z K, HUANG L. Tidal theory and calculation[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.
- [8] NEWTON I. Philosophiae naturalis principia mathematica[M]. London: The Royal Society, 1687.
- [9] DARWIN G H, TURNER H H. On the correction to the equilibrium theory of tides for the continents[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1886, 40(242-245): 303-315.
- [10] DOODSON A T. The harmonic development of the tide-generating potential[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921, 100(704): 305-309.
- [11] AMIN M. The fine resolution of tidal harmonics[J]. Geophysical

- Journal International, 1976, 44(2): 293-310.
- [12] 方国洪, 于克俊. 浅水港口潮汐预报的一个方法[J]. 海洋与湖沼, 1981, 12(5): 383-390.
- FANG G H, YU K J. A method for predicting the tides of shallow-water ports[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1981, 12(5): 383-390.
- [13] 王晓东, 蒋国荣, 王英俊. 单站潮汐的谱分析预报[J]. 海洋预报, 2008, 25(3): 53-59.
- WANG X D, JIANG G R, WANG Y J. Spectral analysis and prediction of single station tide[J]. Marine Forecasts, 2008, 25(3): 53-59.
- [14] FOREMAN M G G. Manual for tidal heights analysis and prediction[R]. Victoria: Institute of Ocean Sciences, 1977.
- [15] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [16] MATTE P, JAY D A, ZARON E D. Adaptation of classical tidal harmonic analysis to nonstationary tides, with application to river tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(3): 569-589.
- [17] 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.
- [18] 李近元, 方念乔, 张吉, 等. 海南岛西南海域的潮流和潮汐观测特征[J]. 海洋预报, 2016, 33(2): 45-52.
- LI J Y, FANG N Q, ZHANG J, et al. Characteristics of the observed tide and tidal current at the southwest of Hainan Island [J]. Marine Forecasts, 2016, 33(2): 45-52.
- [19] 吴頔, 方国洪, 崔欣梅, 等. 泰国湾及邻近海域潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 11-20.
- WU D, FANG G H, CUI X M, et al. Numerical Simulation of tides and tidal currents in the Gulf of Thailand and its adjacent area[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1): 11-20.
- [20] 黄学智. 基于FVCOM的黄渤海潮汐潮流的数值模拟[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016.
- HUANG X Z. Numerical simulation of tide and tidal current in the Bo Sea and Yellow Sea based on the FVCOM[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016.

Tidal harmonic analysis in Laohutan sea area of Dalian

XU Xiue¹, ZHANG Rongrong², WEI Dongni²

(1. Donggang Marine Monitoring Station, State Oceanic Administration, Dandong 118000, China; 2. Dalian Marine Monitoring Central Station, State Oceanic Administration, Dalian 116015, China)

Abstract: The hourly tidal level data of Laohutan tidal gauge station for one year and 3 months are used for tidal harmonic analysis (HA), respectively, by using T_TIDE toolbox. The results show that the astronomical tidal components and shallow-water tidal components can be obtained by using the one-year tidal level data, and the first six main tidal components with the largest amplitude are M_2 , S_2 , K_1 , SA , N_2 and O_1 . For the HA of the 3-months tidal level data, in order to obtain sufficient tidal components, it is necessary to use the difference ratio between the main tidal components and the accompanying tidal components to calculate the accompanying tidal components and add necessary shallow-water tidal components. The harmonic constants calculated from the one-year hourly tidal level data are used to predict the astronomical tide in 2019. The residual noise is normally distributed in general with the residual mean less than 10^{-2} m and the length of 95% confidence interval less than 10^{-2} . Comparing the predicted astronomical tide with the tide table, it is found that there is little difference between them, which proves the feasibility of T_TIDE in predicting the astronomical tide.

Key words: harmonic analysis; astronomical tidal components; astronomical tide predict