

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220407

近岸海域地形复杂性对潮汐特征的影响研究 ——以南黄海及东海北侧海域为例

张功瑾¹, 柳志会², 罗小峰¹, 路川藤¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部珠江水利委员会水文局, 广东 广州 510611)

摘要:南黄海及东海北侧海域近岸地形复杂,受地形影响其潮位预报精度低,研究近岸地形复杂度对潮汐特征的影响对提高预报精度很有必要。基于系列长期验潮站实测潮位和近岸地形等基础数据,采用调和分析及相关性分析等方法分析了近岸潮汐特征对地形复杂度的响应。研究发现,验潮站周围地形越复杂,K1分潮振幅越小、M2、M4分潮振幅越大;随着地形复杂程度的提高,海域的潮汐变形越显著,潮时不等现象越显著,表明南黄海海域的地形复杂程度是其潮汐变形和潮时不等现象的主要因素;验潮站附近海域地形越复杂,其调和分析的精度越差,其绝对余水位越大,说明地形也是影响验潮站潮位精度和余水位的主要因素。探讨了基于地形复杂度修正的调和分析方法,并经验证各验潮站调和精度均有不同程度的提高。

关键词:南黄海;潮位特征;地形特征;调和分析

中图分类号:P731.23

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)05-0084-05

0 引言

东中国海位于西北太平洋的中间纬度部分(纬度范围约为24°N至41°N,经度范围约为120°E至129°E),由渤海、黄海及东海三个海区组成,呈南北向狭长状。东中国海区域的地形复杂且特殊^[1]。尤其在南黄海及东海北侧区域尤为明显,南黄海辐射沙脊群大体上心淤港为顶点、以黄沙洋为主轴,自岸至海呈展开的褶扇状向海辐射,由多条沙脊和分隔沙脊的潮流通道组成。而在东中国海海区潮汐类型中,黄海海域以正规半日潮为主,但山东半岛及连云港外海又存在不正规半日潮现象,东海海域长江口附近以正规半日潮为主,但杭州湾口南部又存在不正规半日潮现象^[1]。

潮汐作用主要受天体引力控制,其作用力与地形本身无关,然而复杂的地貌形态有时会放大亦或是削弱潮汐作用^[3],如在海湾地区,涨潮会把大量的水带到一个小区域,所以在海湾的尽头处会经历一个特别高的涨潮^[4]。

有些海域还由于生物群落群的影响,如红树林、海草床或者珊瑚礁等等,对涨落潮流速产生不对称影响,从而影响涨落潮历时^[5]。因此海域地貌的差异性会导致局部潮位特征的不同,复杂地形对潮汐的影响可不忽略。地貌形态受地球板块运动、地震作用以及火山作用等多种内外动力地质作用控制^[9-10],海底地貌复杂度作为描述海底地貌形态起伏与皱褶程度的评判标准,被广泛应用于海洋测绘、海洋水动力研究与海洋地质探测等领域。描述海底地貌形态的因子,如坡度、坡向、坡长、剖面曲率、平面曲率、地面起伏度以及地表粗糙度等^[11],在经过数学分析后可以综合反映地形地貌特征。

学者对于潮汐特征的影响多集中在分析气候因素,如风、浪、流等动力对潮汐变形的影响^[12-13],而对于地形对潮汐特征的影响主要集中在地形变化对某局部区域潮汐过程的影响^[14]。对于大范围地形复杂度对近岸潮汐特征的影响分析则相对较少,本文以东中国海中南黄海以及东海北侧近海区域为典型,研究近岸潮

收稿日期:2022-10-20

网络首发日期:2023-10-23

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20231020.1353.008.html

基金项目:江苏省自然资源发展专项资金(海洋科技创新)(JSZRHYKJ202001);澳门科技发展基金(0089/2020/A)

作者简介:张功瑾(1988—),男,河南濮阳人,高级工程师,主要研究方向为河口潮流泥沙及环境工程。E-mail:gjzhang@nhri.cn

汐对地形复杂性的响应,对进一步研究潮汐与地形之间的作用机制是十分必要的。

1 研究方法

1.1 潮位调和与分析

潮汐调和与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。调和与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^[2]。分潮主要有全日分潮、半日分潮、长周期分潮和浅水分潮等。其中太阴-太阳赤纬全日分潮,以符号K1表示;太阳赤纬全日分潮,以符号O1表示;太阴主要半日分潮,以符号M2表示;太阳主要半日分潮,以符号S2表示;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M4(太阳浅水1/4日分潮)。

一般说来,分潮的调和常数是由海区的深度、地形、沿岸外形等自然条件决定的^[6-7]。如果海区自然条件相对稳定,那么对不同时期观测资料的分析结果的分潮振幅与相位应该基本相同,在这个意义上称之为“常数”。其实,各个海区自然条件是不断地在变化着。特别在地形复杂的区域尤为显著,因此分潮调和常数将随之发生改变^[8]。为分析近岸海域地形复杂性对潮汐特征的影响,根据对研究区域已收集的地形资料及对应潮位资料进行研究,选择东中国海近岸海域2017年实测地形资料,对应采用2017年(2017年1月1日—2017年12月31日)东中国海近岸海域沿程大戢山、鸡骨礁、洋口、绿华、车牛山、大丰6个验潮站(图1)的逐时潮位进行分析。根据对2017年各验潮站潮位调和与分析结果,如表1和图2所示,研究海域M2分潮占绝对主导地位,各验潮站M2分潮振幅占比在53%~64%,其次为S2分潮占比在17%~27%,O1、K1分潮振幅占比约为3%~12%,M4分潮占比在1%~7%左右;对于M2分潮振幅,鸡骨礁最小,洋口站最大;对于M4分潮,除大丰站较高外,其余站点分潮振幅均较小。

根据潮汐类型计算公式:

$$F = (H_{K1} + H_{O1})/H_{M2} \quad (1)$$

式中: H_{K1} 、 H_{O1} 、 H_{M2} 为各分潮振幅。根据K1、O1、M2这3个分潮各自振幅之间的关系确定了潮汐类型,经计算,大戢山、鸡骨礁、洋口、绿华、车牛山、大丰6个验潮站的潮汐类型值均小于0.5,这表明属于正规半日潮。

表1 各验潮站主要分潮振幅(m)

Table 1 Main tidal amplitude of each tide gauge station (m)						
分潮	车牛山	大丰	洋口	鸡骨礁	绿华	大戢山
O1	0.219 5	0.171 3	0.098 2	0.147 2	0.162 6	0.171 8
K1	0.278 4	0.242 8	0.195 6	0.262 5	0.270 3	0.292 6
M2	1.427 7	1.727 3	2.114 3	1.142 3	1.171 5	1.371 9
S2	0.410 9	0.618 9	0.881 6	0.551 7	0.534 2	0.572 2
M4	0.057 9	0.208 4	0.027 4	0.054 5	0.036 4	0.059 6

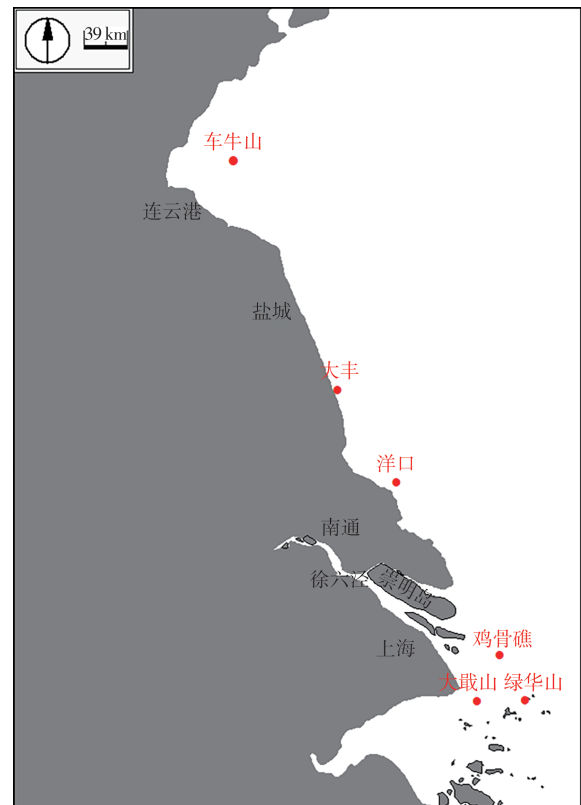


图1 研究区域验潮站分布示意图

Fig.1 Distribution of stations in the study area

1.2 海域地形复杂性分析

形状指数(S)是定量分析景观空间格局与景观异质性特征的一个重要指标,它从宏观角度显示区域生态环境状况。形状指数是计算某一斑块形状与相同面积的圆形或正方形之间的偏离程度^[17]。

$$S = \begin{cases} \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} & \text{(以圆为参照)} \\ \frac{0.25P}{\sqrt{A}} & \text{(以正方形为参照)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为斑块周长; A 为斑块面积。形状指数的值可以反映景观斑块的大小和复杂程度。S越大,斑块越复杂多样。本研究基于2017年东中国海近岸地形数据,使用圆形(直径10 km)参考对象测量并对比各验

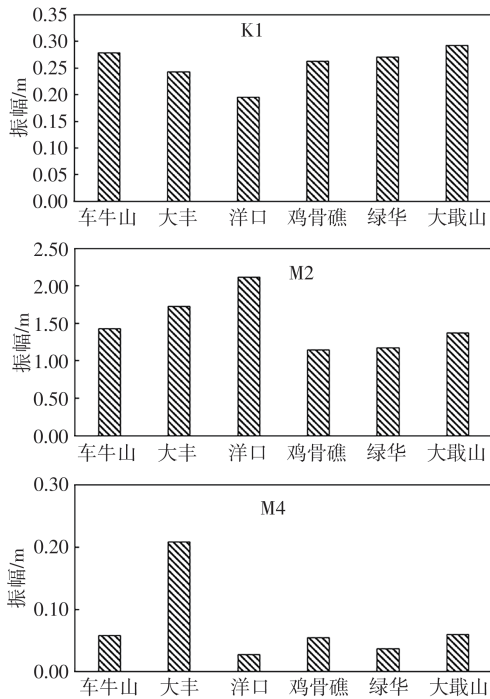


图2 各验潮站主要分潮振幅分布

Fig.2 Distribution of main tidal amplitudes at each station

潮站周围海域的地形指数,探究地形复杂性。分析发现(图3),苏北海域近岸地形均比较复杂,平均地形复杂性达到1.5以上,其中位于辐射沙洲附近的大丰和洋口站地形最为复杂。

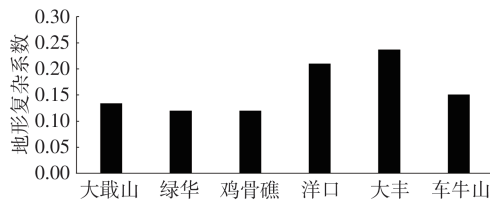


图3 各验潮站附近地形复杂度

Fig.3 The terrain complexity near the station

2 结果分析

2.1 地形复杂性对分潮振幅的影响

通过对各验潮站点附近地形复杂度与各分潮振幅之间的相关性,如图4所示,K1、M2、M4分潮振幅与验潮站附近地形复杂度相关性较好,验潮站周围地形越复杂,K1分潮振幅越小、M2、M4分潮振幅越大,其中南黄海海域K1分潮振幅受地形影响程度较小,原因在于南黄海辐射沙洲附近区域潮汐类型主要为半日潮,因此半日分潮M2、浅水分潮M4受地形因素影响较大,从绿华站到大丰站,M2分潮振幅提高了1.47倍,M4分潮振幅提高了5.73倍。

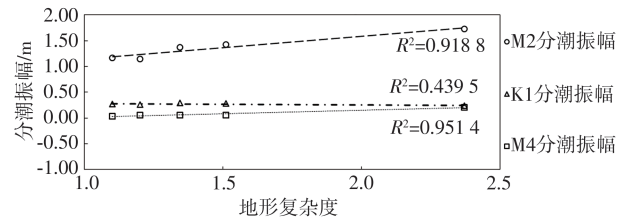


图4 分潮振幅与地形复杂性相关性

Fig.4 Correlation between tidal amplitude and terrain complexity

2.2 地形复杂性对潮波变形的影响

潮波进入河口浅水区域往往发生变形,通常用浅水分潮M4与半日分潮M2两者的振幅比值来描述河口的潮汐变形程度;通过分潮M4和M2相位差来分析潮汐不对称性的类型^[18-19]。两个参数分别称为变形系数A、G,计算公式如下

$$A = H_{M4}/H_{M2} \quad (3)$$

$$G = 2g_{M4} - g_{M2} \quad (4)$$

式中: g_{M4} 、 g_{M2} 为M4、M2分潮迟角。变形系数A越大,说明潮时不等现象越显著,而当其值小于0.01时,实际上可以不考虑浅水分潮。除大丰外,变形系数A基本处于0.1~0.5之间,潮时不等现象不显著,大丰A大于0.10,表明潮汐变形显著,受浅水分潮影响明显。相位差G除洋口外均在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间,表明各站落潮历时长于涨潮历时,洋口涨潮历时长于落潮历时。

而各验潮站的变形系数A、潮汐不对称系数G与其地形复杂程度相关性分析(图5),随着地形复杂程度的提高,海域的潮汐变形越显著,潮时不等现象越显著,表明南黄海海域的地形复杂程度是其潮汐变形和潮时不等现象的主要因素。

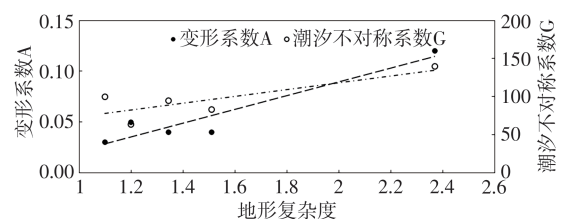


图5 潮汐变形与地形复杂性相关性

Fig.5 Correlation between tidal deformation and terrain complexity

2.3 地形对验潮站调和精度的影响

实际水位可以看作是许多调和分潮迭加的结果,不过在实际分析中只能选取其中有限个较主要的分潮,使得利用这些分潮能够得到一个良好的计算结果,这就存在一个选取分潮的问题。对于水文站的长期资料,并且分潮越多,调和精度越高。采用171个分潮对各验潮站进行调和和分析,并分析其调和精度。

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 时刻的余水位的数学表达式为:

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

式中: t 为相应时间; $S(t)$ 为余水位序列; $h(t)$ 为实测水位序列; MSL 为平均海平面; $T(t)$ 为天文潮位,由调和和分析或响应分析获得。

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。

一般认为,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是造成水位异常的主要因素^[19]。通过对各验潮站地形复杂程度与各验潮站调和精度、绝对余水位的相关性分析(图6),发现验潮站附近海域地形越复杂,其调和分析的精度越差,其绝对余水位越大,说明地形也是影响验潮站潮位精度和余水位的主要因素。

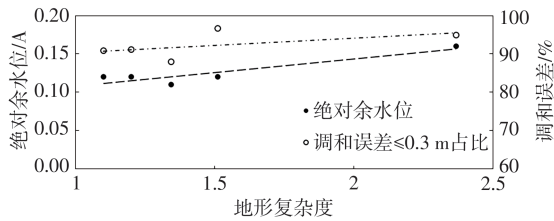


图6 调和精度与地形复杂性相关性

Fig.6 Correlation between harmonic accuracy and terrain complexity

3 讨论

基于以上研究分析发现,验潮站附近海域地形越复杂,其调和分析的精度越差,其绝对余水位越大,说明地形也是影响验潮站潮位精度和余水位的主要因素。因此探讨一种基于地形修正的调和和分析方法。

为将地形复杂性对潮汐的影响因素降到最低,首先采用实测值,进行调和和常数分析,并统计调和精度和判断调和精度与地形复杂性之间的相关性,然后以调和精度高且地形复杂性低的验潮站调和和常数为基础对其他验潮站实测资料进行修正,并重复上述步骤,最后得到受地形复杂性干扰较小的天文分潮调和和常数,计算方法如下(见图7):

根据上述方法基于地形复杂性与余水位的相关性进行调和修正发现,如表2所示,在研究区域各验潮站 ≤ 0.20 m(%)的占比均有不同程度的提高,除洋口站以外,其他验潮站基本呈现随着地形复杂度越高,方

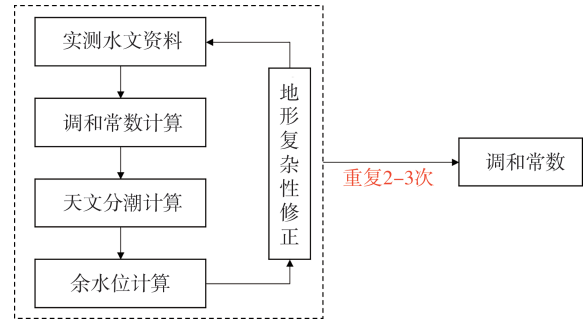


图7 基于地形复杂度修正的调和和分析方法

Fig.7 Harmonic analysis method based on terrain complexity correction

法修正后的调和精度提高度越高的趋势。采用吕四站进行本方法验证,发现吕四站调和精度提高度仅为0.65%,是由于吕四站相比于其他站点所处水深较浅,离近岸距离较近,是影响其调和精度的主要因素之一,因此,基于地形复杂度修正的调和和分析方法还应考虑验潮站所处海域水深的相似性以及其他影响因素,并进一步对其他海区验潮站调和和分析进行验证。

表2 各验潮站调和精度分析

Table 2 Harmony accuracy analysis of each tide station

分析	绿华	鸡骨礁	大戢山	车牛山	洋口港	大丰	验证点-吕四
地形复杂度	1.12	1.21	1.34	1.51	2.23	2.37	1.33
修正前 ≤ 0.20 m/%	90.68	85.98	88.01	85.51	80.35	76.86	81.58
修正后 ≤ 0.20 m/%	90.68	86.79	90.32	89.76	83.21	85.32	82.11
调和精度提高度/%	0.00	0.93	2.56	4.73	3.44	9.92	0.65

4 结论

基于东中国海海域近岸系列长期验潮站调和和分析,半日分潮振幅M2最大,其次为S2,属于正规半日潮。基于形状指数计算方法,发现南黄海苏北海域近岸地形均比较复杂,平均地形复杂性达到1.5以上,其中位于辐射沙洲附近的大丰和洋口站地形最为复杂。

(1)通过对各验潮站站点附近地形复杂度与各分潮振幅之间的相关性,发现K1、M2、M4分潮振幅与验潮站附近地形复杂度相关性较好,验潮站周围地形越复杂,K1分潮振幅越小、M2、M4分潮振幅越大。随着地形复杂程度的提高,海域的潮汐变形越显著,潮时不等现象越显著,表明研究海域的地形复杂程度是其潮汐变形和潮时不等现象的主要因素。

(2)一般认为,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

算误差的影响是造成水位异常的主要因素。通过对各验潮站地形复杂程度与各验潮站调和精度、绝对余水位的相关性分析,发现验潮站附近海域地形越复杂,其调和分析的精度越差,其绝对余水位越大,说明地形也是影响验潮站潮位精度和余水位的主要因素。

(3)探讨基于地形复杂性与余水位的相关性进行调和修正发现,研究区域各验潮站调和精度均有不同程度的提高,基本呈现随着地形复杂度越高,方法修正后的调和精度提高度越高的趋势。

(4)基于地形复杂度修正的调和分析方法还应考虑验潮站所处海域水深的相似性以及其他影响因素,并进一步对其他海区验潮站调和进行分析进行验证。

参考文献:

- [1] 王俊杰. 中国近海潮汐能估算及潮汐电站出力调控研究[D]. 南京:河海大学,2015.
- [2] 石景元,路川藤. 潮汐调和与分析与应用研究[J]. 海洋技术学报, 2019,38(6):46-50.
- [3] 刘昆. 吕宋海峡内潮生成与传播的数值模拟研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2016.
- [4] 吴岷,方国洪,滕飞,等. 基于双矩形海湾模型的泰国湾潮汐潮流研究[J]. 海洋科学进展,2013,31(4):465-477.
- [5] 李谊纯,刘世通. 红树林海湾潮汐潮流特征数值模拟研究[J]. 人民珠江,2021,42(11):66-76.
- [6] 俞明亮,王琪,周阳,等. 海平面与调和常数波动下的海图深度基准面误差分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(6):558-564.
- [7] 段福楼,李景福,卢刚,等. 提高计算准调和分潮常数精度的新方法—引入多个沿岸关系站差比系数的平均值法[C]//第十四届海洋测绘综合性学术研讨会. 中国测绘学会,2002.
- [8] 乔方利,渡边正孝,袁业立,等. 黄海和东海的环流数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),1998(2):244-254.
- [9] 里弼东. 人类对海底地貌的认识和利用[J]. 海洋测绘,1999(3):51-54.
- [10] 耿秀山. 黄渤海地貌特征及形成因素探讨[J]. 地理学报,1981(4):423-434.
- [11] 马锦绵. 地形复杂度量化研究[D]. 南京:南京师范大学,2012.
- [12] 石景元,张功瑾. 舟山海域潮汐特征及调和与分析精度研究[J]. 海洋技术学报,2022,41(3):83-89.
- [13] 陈元杰. 东中国海潮汐特征及其对海平面上升的响应[D]. 厦门:厦门大学,2019.
- [14] 盛兴民. 黄河三角洲地形改变对潮汐性质的影响[J]. 海岸工程,1987(1):53-57.
- [15] 翟京生,张冲,李兆兴,等. 海底地貌复杂度的表示与计算[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(S1):143-147.
- [16] 纪雪,周兴华,陈义兰,等. 基于BP神经网络的海底地形复杂度自动分类方法研究[J]. 海岸工程,2016,35(4):32-41.
- [17] 童朝锋,司家林,张蔚,等. 伶仃洋洪季潮波传播变形及不对称性规律分析[J]. 热带海洋学报,2020,39(1):36-52.
- [18] 张雨豪,吴心彤,童朝锋,等. 舟山群岛海域潮波传播变形和不对称性探讨[J]. 水道港口,2020,41(1):9-15.
- [19] 石景元,路川藤. 潮汐调和与分析与应用研究[J]. 海洋技术学报,2019,38(6):46-50.

Response of Nearshore Tidal Characteristics to Terrain Complexity:

Taking the South Yellow Sea and the Northern Waters of the East China Sea as Examples

ZHANG Gongjin¹, LIU Zhihui², LUO Xiaofeng¹, LU Chuanteng¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Hydrology and Water Resources Bureau of Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The tidal forecast shows low accuracy due to the complex offshore topography of the South Yellow Sea and the north side of the East China Sea, so it is necessary to study the influence of offshore topographic complexity on the tidal characteristics to improve the forecast accuracy. Based on a series of basic data such as measured tide levels from long-term tide stations and offshore topography, the response of offshore tidal characteristics to the topographic complexity was analyzed by harmonic analysis and correlation analysis. According to research findings, the more complex the topography around the tide station, the smaller the amplitude of the K1 constituent and the larger the amplitude of the M2 and M4 constituents. Tidal deformation and tidal time inequality become more pronounced with increasing topographic complexity, which indicates that the topographic complexity of the South Yellow Sea area is the main factor of its tidal deformation and tidal time inequality. As the topographic complexity of the sea near the tide station increases, the accuracy of its harmonic analysis decreases and its absolute residual water level becomes larger, indicating that the topography is also the main factor affecting the accuracy of the tide level measured by the tide station and the residual water level. The method of harmonic analysis based on the correction of topographic complexity is discussed, and it is verified that the harmonic accuracy of each tide station is improved to different degrees.

Keywords: South Yellow Sea; tide level feature; topographic feature; harmonic analysis