

余鹰,王道胜. 渤海湾 M_2 分潮的季节变化: 增强调和分潮的应用[J]. 海洋学报, 2021, 43(5): 1–13, doi:10.12284/hyxb2021063

Yu Ying, Wang Daosheng. Seasonal variability of the M_2 constituent in the Bohai Bay: Application of enhanced harmonic analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 1–13, doi:10.12284/hyxb2021063

渤海湾 M_2 分潮的季节变化: 增强调和分潮的应用

余鹰¹, 王道胜^{1,2*}

(1. 中国地质大学(武汉)海洋学院 海洋地质资源湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: M_2 分潮的季节变化对沿海的海洋环境有着重要影响。增强调和分潮 (EHA) 既可以提取主要分潮时变的振幅和迟角, 同时可以得到其他分潮不随时间变化的振幅和迟角。本文利用 EHA 分析渤海湾两个站点的水位数据, 研究了渤海湾 M_2 分潮的季节变化。为了评估 EHA 方法的准确性, 在理想实验中设计了人造“水位数据”。利用 EHA 分析得到的 M_2 分潮时变振幅和迟角以及 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮不随时间变化的振幅和迟角均比其他方法得到的结果更接近给定值, 表明了 EHA 的有效性和可用性。当使用 EHA 分析渤海湾实际海平面观测数据时, 得到的 M_2 分潮振幅具有明显的季节变化特征: 夏季较大, 冬季较小。敏感性实验表明, 分析所得渤海湾 M_2 分潮振幅的季节变化趋势不受实验设置的影响, 是鲁棒的, 能够反映该海域真实的 M_2 分潮季节变化。此外, 渤海湾 M_2 分潮振幅的季节变化可能是东亚季风通过影响平均海平面、层化和涡动黏性系数的季节变化而引起的。

关键词: M_2 分潮; 季节变化; 增强调和分潮; 渤海湾

中图分类号: P722.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)05-0001-13

1 引言

由于海洋物理性质和海岸形态的变化, 潮汐存在多个时间尺度的变化^[1], 尤其是沿海和极地地区的 M_2 分潮^[2]。前人研究表明, 英国海岸^[3]、西北欧大陆架^[4]、黄海和东海^[5]、哈得孙河口^[6]和东南亚海岸^[7]等沿海地区, M_2 分潮都存在着季节变化。此外, 相关研究表明极地地区 M_2 分潮也存在季节变化^[2, 7-8]。

为了分析 M_2 分潮的季节变化, 传统上将观测的水位数据分段, 并对每一段进行经典调和分潮 (Classical Harmonic Analysis, CHA), 该方法可以通过 MATLAB 中的 T_TIDE 工具包来实现^[9]。上述过程称为分段调和分潮 (Segmented Harmonic Analysis, SHA), 该方法在前人研究中得到广泛使用^[2, 5, 10-13]。当直接使

用 SHA 时, 得到的振幅和迟角是离散的, 需要对其进行插值以得到连续的结果。如果采用时间窗滑动的方式, 一些峰值和快速变化的信号会被平滑, 若某些分段中存在较多缺测, 则可能导致计算结果不准确。除此之外, 在使用 SHA 进行月度分析时, 一些无法分辨的潮汐成分也需谨慎处理。Jin 等^[10]提出了增强调和分潮 (Enhanced Harmonic Analysis, EHA) 方法, 可以直接得到内潮不同潮汐成分时变的振幅和迟角。Pan 等^[14]基于 EHA 方法开发了 S_TIDE 工具包, 并利用 S_TIDE 研究了哥伦比亚河口的潮汐-河流相互作用。根据 Pan 等^[14]所述, 在 S_TIDE 中如何针对分析的潮汐成分选择合适的独立点数是一项相对复杂的工作, 应通过一系列敏感性试验来测试, 以避免产生虚假的结果。

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-05-07。

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2020B1111020005); 广东省基础与应用基础研究基金 (2020A1515110339); 深圳市基础研究资助项目 (JCYJ20200109110220482)。

作者简介: 余鹰 (1995—), 男, 湖北省云梦县人, 主要从事数据分析、潮汐变化特征研究。E-mail: yuying6d1p@163.com

* 通信作者: 王道胜, 硕士生导师, 副教授, 主要从事浅海动力学、数据同化研究。E-mail: dswangouc@163.com

在 SHA 和 EHA 中,所有潮汐成分的调和常数均被认为是随时间变化的。然而,潮汐季节变化的原因错综复杂^[15],在大多数情况下,只有主要分潮(如 M_2 分潮)的时间变化是显著并需要关注的,而其他分潮的时间变化比较微弱且可以忽略不计。EHA 认为所有分潮的振幅和迟角都是随时间变化的,一方面增加了计算的复杂度和需要的计算机内存,另一方面显著减少了能够分辨的分潮数量。Wang 等^[16]对 EHA 进行了改进,使其不仅能得到主要分潮时变的振幅和迟角,同时也能得到其他分潮不变的振幅和迟角。为便于对 EHA 改进前后的效果进行对比分析,改进前的 EHA,即:假定所有潮汐成分的调和常数均随时间变化的 EHA,被记为 OEHA(Original EHA),而改进后的 EHA 则简记为 EHA。本文使用渤海湾的水位观测数据,通过设计理想实验,构建人造“水位数据”验证 EHA 的可行性和有效性,并利用 EHA 得到了渤海湾 M_2 分潮振幅的季节变化,同时讨论了渤海湾 M_2 分潮振幅季节变化的原因。

2 方法与数据

2.1 EHA

海平面高度由多个因素决定,可表达为^[16-18]

$$\zeta(t) = \zeta_0 + \zeta_{\text{tide}}(t) + \zeta_{\text{meteorology}}(t), \quad (1)$$

式中, $\zeta(t)$ 代表海平面高度(即:水位),右边 3 项分别是平均海平面高度(Mean Sea Level, MSL)、潮汐引起的海表面高度、气象因素导致的海表面高度。在不考虑节点调制的情况下,潮汐的计算通常是 k 个分潮之和,即

$$\zeta_{\text{tide}}(t) = \sum_k a_k \cos(\omega_k t - \varphi_k), \quad (2)$$

式中, ω , a 和 φ 分别代表每个分潮的角速度(单位: rad/s),振幅(单位: m)和迟角(单位: rad)。在 OEHA 中, ζ_0 , a 和 φ 均被认为是随时间变化的^[10, 14], 即

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= \zeta_0(t) + \zeta_{\text{tide}}(t) \\ &= \zeta_0(t) + \sum_i \{a_i(t) \cdot \cos[\omega_i t - \varphi_i(t)]\}. \end{aligned} \quad (3)$$

在 OEHA 的基础上, Wang 等^[16]进行了改进。在改进后的 EHA 中,只有几个主要分潮的振幅和迟角是时变的,而其他分潮的振幅和迟角仍然是常数^[16]。因此,海平面高度的表达式为

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= \zeta_0(t) + \zeta_{\text{tide}}(t) \\ &= \zeta_0(t) + \sum_i \{a_i(t) \cdot \cos[\omega_i t - \varphi_i(t)]\} + \\ &\quad \sum_j [a_j \cdot \cos(\omega_j t - \varphi_j)], \end{aligned} \quad (4)$$

式中,具有时变振幅和迟角的分潮数量为 i ,而振幅和迟角是常数的分潮数量为 j , $\zeta_0(t)$ 包含气象因素导致的

海表面高度^[16]。类似于 Jin 等^[10]和 Pan 等^[14],改进后的 EHA 在求解时变的平均海平面高度、振幅和迟角时,引入了独立点方案和三次样条插值法,而上述的时变量和等号右边第三项中的常数振幅和迟角可以用最小二乘法同时求解。此外,误差评估算法与 Jin 等^[10]和 Pan 等^[14]相同。改进后的 EHA 已更新到 S_TIDE 中,可以从以下网站获取: <https://www.researchgate.net/project/A-non-stationary-tidal-analysis-toolbox-S-TIDE>。

2.2 数据来源

本文采用的数据是中国渤海湾的两个站点 E1 和 E2 的逐时水位数据(已减去平均水位),观测数据的时间跨度为 2013 年 11 月 1 日(世界时,下同)到 2014 年 11 月 1 日,图 1 标注了 E1 和 E2 站点的位置。如图 2 所示, E1 站点有大约 1/4 的数据缺测,而 E2 站点的数据是连续的, E1 和 E2 的海平面振幅大多小于 2 m。

2.3 EHA 的验证

在分析实际水位数据时,分潮振幅和迟角的真实值并不清楚,无法验证方法的准确性。因此,本文首先通过理想实验来验证 EHA 方法的可行性和有效性。

2.3.1 人造“水位数据”

根据 E2 站的水位数据来构造理想实验中的人造“水位数据”。图 3 呈现了 E2 站点水位数据的功率谱密度,很明显,水位的波动主要受半日潮(如 M_2 和 S_2)影响;同时, M_2 分潮的能量最强,全日潮(如 K_1 和 O_1)也很显著。由于半日潮和全日潮的非线性相互作用和平流作用^[19], MK_3 和 M_4 分潮的频率同样出现谱峰。低频部分也出现了一些谱峰,不失一般性,选择 0.235 cpd 和 0.392 cpd 两个频段的水位信号作为低频代表,分别标记为 LF1 和 LF2。

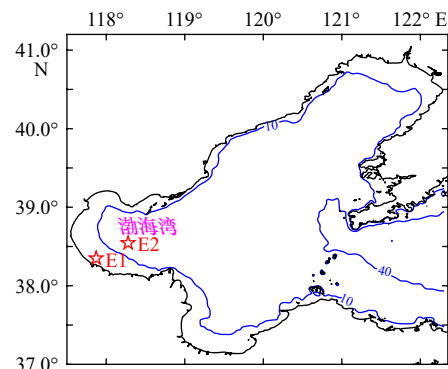


图 1 渤海湾观测站 E1 和 E2 的位置(红星),以及 10 m 和 40 m 水深线

Fig. 1 The locations of the observation stations (E1 and E2, red stars) in the Bohai Bay, and the isobathymetric lines at 10 m and 40 m

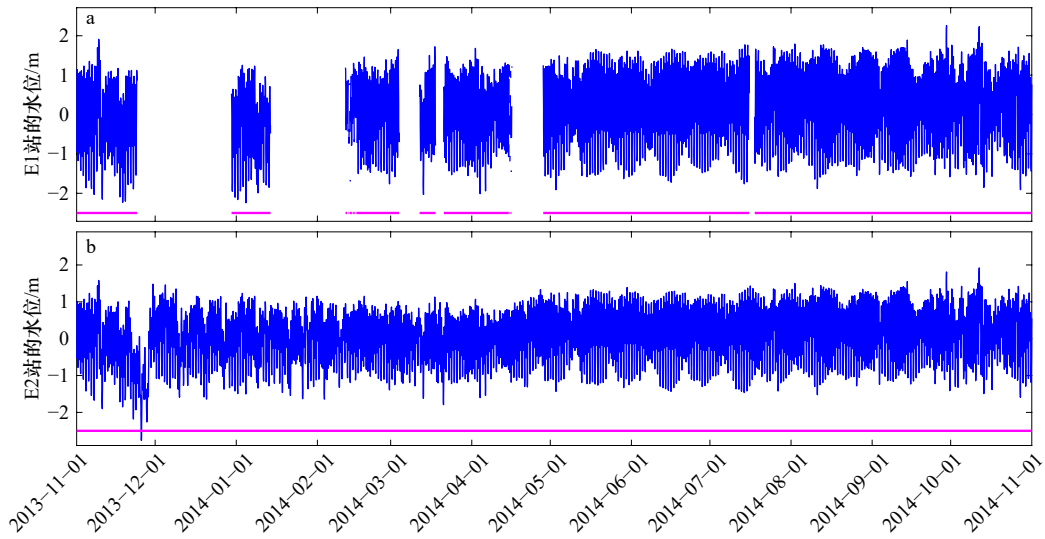


图 2 E1(a)和E2(b)站的水位观测数据

Fig. 2 The observed sea level at E1(a) and E2(b) stations

洋红色实线描述了观测的时间段

The magenta solid lines describe the temporal locations of the observations

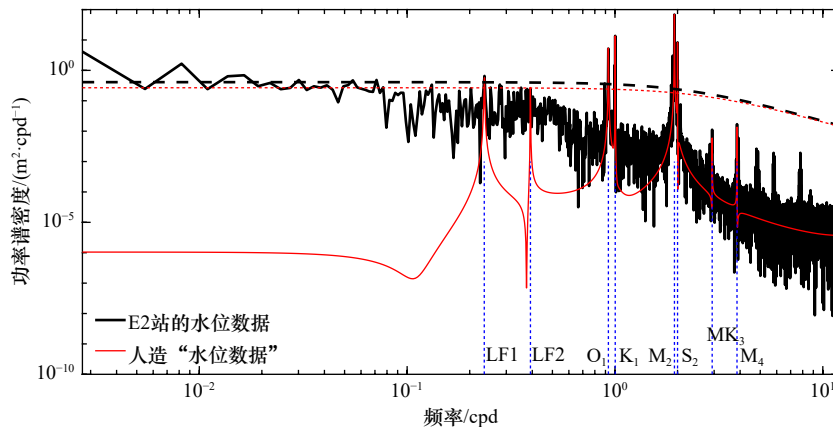


图 3 E2 站水位数据和人造“水位数据”的功率谱密度

Fig. 3 The power spectral densities of the observed sea level at E2 Station and the artificial sea level

黑色和红色虚线表示相应的 95% 置信值

The black and red dashed lines designate the corresponding 95% significance level against red noise

假定 MSL 为 0, 故人造“水位数据”将由潮频信号 (包括 M₂、S₂、K₁、O₁、MK₃ 和 M₄) 和低频信号 (包括 LF1 和 LF2) 组成, 如下式所示:

$$\zeta = \zeta_{M_2} + \zeta_{S_2} + \zeta_{K_1} + \zeta_{O_1} + \zeta_{MK_3} + \zeta_{M_4} + \zeta_{LF1} + \zeta_{LF2}. \quad (5)$$

在人造“水位数据”中, 假设 M₂ 分潮的振幅和迟角是随时间变化的, 而其他信号的振幅和迟角均是常数。另外, MK₃、M₄、LF1 和 LF2 被视为噪声, 不估计其振幅和迟角。为了获得 M₂ 分潮振幅和迟角较为真实的时间变化, 在不考虑节点调制的情况下, 通过 SHA 分析了 E2 的真实水位数据, 如图 4 所示。结果表明, M₂ 分潮的振幅和迟角存在明显的时间变化。为了获得更加平滑的时间变化特征, 利用正弦函数对 SHA

方法所得 M₂ 分潮振幅和迟角进行了拟合。图 4 中的红线展示了拟合结果, 拟合公式如下:

$$a'_{M_2}(t) = 0.0875 \sin(0.0151t - 1.1377) + 0.7638, \quad (6)$$

$$\varphi'_{M_2}(t) = 5.7849 \sin(0.0151t - 35.0883) + 281.9893, \quad (7)$$

式中, t 表示从世界时 0 年 1 月 0 日起经过的时间 (即 MATLAB 中的“datenum”值), 单位: d; 此外, t 的范围为 2013 年 11 月 1 日至 2014 年 11 月 1 日, 与 E2 站实际水位观测数据的时间范围相同; a'_{M_2} 是 M₂ 分潮的时变振幅, 单位: m; φ'_{M_2} 为 M₂ 分潮的时变迟角, 单位: (°)。参考 CHA^[9], 由 M₂ 分潮引起的水位变化的表达式为下

$$\zeta_{M_2} = a'_{M_2}(t) \cdot \cos[\omega_{M_2} \cdot (t - t_{mid}) - \varphi'_{M_2}(t) \cdot \pi/180], \quad (8)$$

式中, t_{mid} 是 t 的中值。

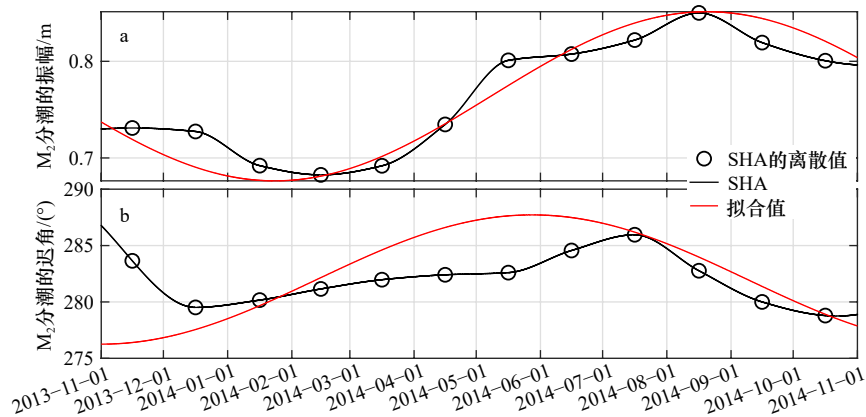


图4 使用SHA分析E2站水位观测数据所获得 M_2 分潮时变的振幅(a)和迟角(b)及其拟合值

Fig. 4 The temporally varying amplitude (a) and phase lag (b) of the M_2 constituent obtained by analyzing the observed sea level at E2 Station using SHA and their fitting values

为了获得其他潮汐信号较为真实的振幅和迟角,在不考虑节点调制的情况下,使用CHA分析了E2处的海平面数据,得到的常数形式的振幅和迟角如表1所示。LF1和LF2的迟角设置为4个主要分潮的平均迟角,并根据功率谱密度的结果,通过反复试验得到了振幅值,见表1。由上述信号引起的水位变化与 M_2 分潮引起的水位变化具有类似的形式(即式(8)),此处不再赘述。

从人造“水位数据”的功率谱密度(图3)可以看出,人造“水位数据”成功地再现了E2站 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 MK_3 、 M_4 、LF1、LF2等信号,且不包含其他频段的信号,表明由已知的振幅和迟角构造的“水位数据”可以作为E2站真实水位观测数据的替代品。

2.3.2 实验和结果

在理想实验中,不考虑节点调制,采用CHA、SHA、OEHA和EHA分析人造“水位数据”,以获得 M_2 、 S_2 、

表1 理想实验中的潮汐成分及其常数形式的振幅和迟角
Table 1 The prescribed constant amplitudes and phase lags of the constituents in ideal twin experiments

| 分潮 | 给定值 | |
|--------|-------|--------|
| | 振幅/cm | 迟角/(°) |
| S_2 | 20.69 | 273.88 |
| K_1 | 27.19 | 75.46 |
| O_1 | 20.45 | 14.70 |
| MK_3 | 0.83 | 314.20 |
| M_4 | 1.02 | 246.79 |
| LF1 | 6.00 | 161.73 |
| LF2 | 4.00 | 161.73 |

K_1 和 O_1 4个主要分潮的振幅和迟角,除此之外,人造“水位数据”中的其他信号,被视作噪声^[20]。在使用SHA时,每个月的数据作为一段进行分析,根据瑞利准则,区分上述4个主要分潮的最小周期为14.8 d^[21],因此,只有当该段数据长度大于15 d时,SHA才对该段数据进行分析。此外,采用3次样条插值法对每段所得离散的振幅和迟角进行插值以获得连续的结果。Pan等^[14]指出,在不同独立点数下,EHA得到的时变振幅和迟角代表了不同时间尺度上的变化。根据Jin等^[10]的研究结果,在下面的理想实验中,OEHA和EHA的独立点数被设为5,比季节数(春、夏、秋、冬)多1。

如图5所示,SHA、OEHA和EHA得到的 M_2 分潮时变的振幅和迟角几乎等于给定值;CHA得到的结果是恒定的,不能捕捉到 M_2 分潮的时间变化,而SHA、OEHA和EHA可以得到 M_2 分潮的时间变化特征。

对于 S_2 分潮而言,EHA分析所得振幅和迟角比CHA所得结果更接近给定值(图6a和图6b),而SHA的结果与给定值相差甚远,尤其是迟角(图6b),这主要是因为 M_2 分潮和 S_2 分潮的频率很接近,当同时被假定为随时间变化时,分析结果可能会互相影响。使用OEHA时,除2014年10月和11月外, S_2 分潮的迟角几乎都等于给定值;此外,得到的 S_2 分潮的振幅是时变的,与给定值有一定的偏差。对于 K_1 分潮(图6c和图6d)和 O_1 分潮(图6e和图6f),CHA和EHA所得结果几乎等于给定值,而OEHA得到的振幅和迟角整体上接近给定值,但在端点处差距较大,SHA分析所得振幅和迟角具有明显的时间变化特征,与给定值相差较大。总的来说,虽然SHA、OEHA和EHA均能成功估计 M_2 分潮的时间变化特征,但EHA所得其他3个主要分潮的振幅和迟角与给定值吻合最好。

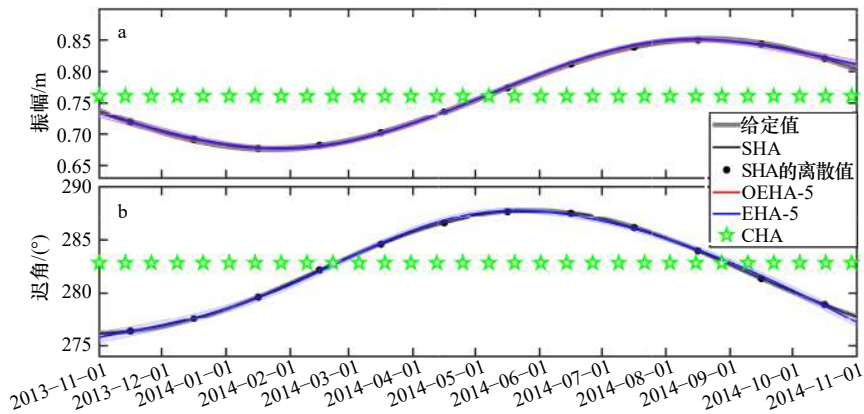


图 5 理想实验中给定的 M₂ 分潮振幅(a)和迟角(b), 以及使用 SHA、采用 5 个独立点的 OEHA、采用 5 个独立点的 EHA 和 CHA 得到的结果

Fig. 5 The amplitude (a) and phase lag (b) of the M₂ constituent prescribed in ideal experiments and the estimated values using SHA, OEHA with 5 independent points, EHA with 5 independent points, and CHA

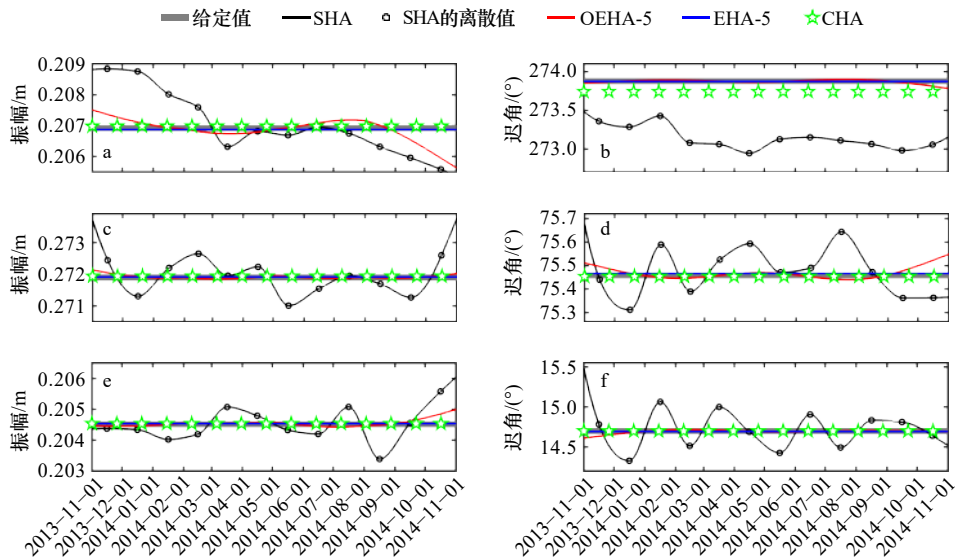


图 6 理想实验中给定的 S₂ 分潮(a, b)、K₁ 分潮(c, d)和 O₁ 分潮(e, f)的振幅和迟角, 以及使用 SHA、采用 5 个独立点的 OEHA、采用 5 个独立点的 EHA 和 CHA 得到的结果

Fig. 6 The amplitude and phase lag of the S₂ (a, b), K₁ (c, d) and O₁ (e, f) constituent prescribed in ideal experiments and the estimated values using SHA, OEHA with 5 independent points, EHA with 5 independent points, and CHA

需要注意的是, E1 站的实际水位观测数据存在部分缺测, 这可能会对分析结果造成影响。在理想敏感实验中, 根据 E1 站的缺测时段, 剔除了人造“水位数据”中相应的数据, 进而利用 CHA、SHA、OEHA、EHA 对其进行了分析。虽然大约 1/4 的时段没有“水位数据”, 但是 OEHA 和 EHA 所得结果很好地捕获了 M₂ 分潮给定振幅和迟角的时间变化特征(图 7a 和图 7b)。相反, SHA 所得 M₂ 分潮的振幅和迟角与给定值略有偏差, 特别是在 2013 年 11 月至 2014 年 2 月期间, 这主要是因为 2013 年 12 月和 2014 年 1 月的缺测较多, 导致这两个月的“水位数据”没有被分析而无法获得 M₂ 分潮振幅和迟角值。EHA 分析得到的 M₂ 分潮所引起的水位变化与给定的 M₂ 分潮所导

致的水位变化之间的绝对均差为 0.19 cm; 而 SHA 所得绝对均差为 0.28 cm, 约为没有缺测时的 4.5 倍。对于 S₂、K₁ 和 O₁ 分潮, CHA 分析所得振幅和迟角值与给定值之间的差距比理想实验中的差距更大, 如图 8 所示; 此外, “水位数据”的缺测对 SHA 和 OEHA 的结果也有很大的影响, OEHA 分析所得 3 个分潮的振幅和迟角与给定值之间的误差变得更大。相反, EHA 得到的 S₂ 和 K₁ 分潮的振幅和迟角仍然接近给定值。虽然 EHA 对 O₁ 分潮的分析结果与给定值略有偏差, 但差异明显小于 CHA、SHA 和 OEHA 的结果。由此可见, EHA 总体上优于 CHA、SHA 和 OEHA。

总体而言, 无论“水位数据”中是否存在缺测, 在利用 EHA 进行分析时, M₂ 分潮时变振幅和迟角以及

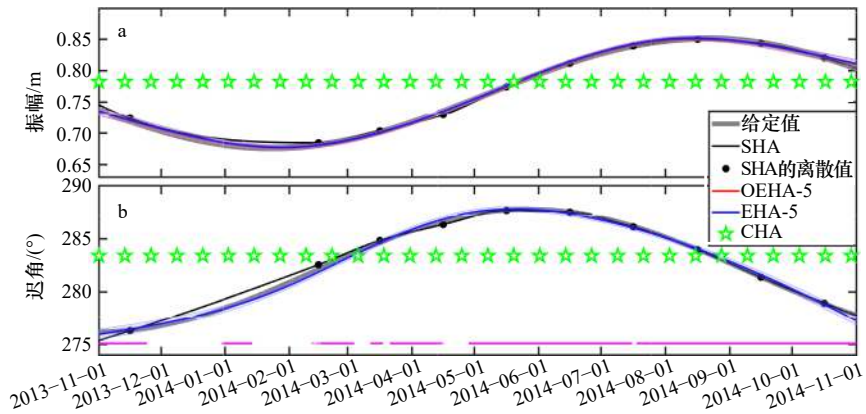


图 7 理想敏感实验中给定的 M_2 分潮振幅(a)和迟角(b), 以及使用 SHA、采用 5 个独立点的 OEHA、采用 5 个独立点的 EHA 和 CHA 得到的结果

Fig. 7 The amplitude (a) and phase lag (b) of the M_2 constituent prescribed in ideal sensitivity experiments and the estimated values using SHA, OEHA with 5 independent points, EHA with 5 independent points, and CHA

b 中的洋红色实线描述了理想敏感实验中人造“水位数据”的时间段

The magenta solid line in b describes the temporal locations of the artificial sea level observations in the ideal sensitivity experiment

其他分潮调和常数的给定值都能被准确反演, 说明 EHA 能有效分离具有不同变化特征的潮汐信号, 可用于实际实验中 M_2 分潮的季节变化研究。

3 EHA 在渤海湾 M_2 分潮季节变化研究中的应用

3.1 基准实验

为了确定基准实验中所需分析的潮汐成分, 利用 CHA 对 E1 和 E2 站的水位观测数据进行了调和分

析, 根据信噪比的大小^[9, 22] 选择了 M_2 、 K_1 、 S_2 和 O_1 4 个最重要的成分作为进行分析的分潮。利用 EHA 进行数据分析时, 独立点数设置为 5, 仅将 M_2 分潮的振幅和迟角假定为随时间变化。

CHA 和 EHA 所得 E2 站 M_2 分潮振幅的分析结果如图 9b 所示。从图中可以看出, EHA 分析所得 M_2 分潮振幅具有明显的季节变化特征, 其平均值与 CHA 分析所得常数形式的 M_2 分潮振幅几乎相等, 说明了 EHA 所得分析结果的合理性。

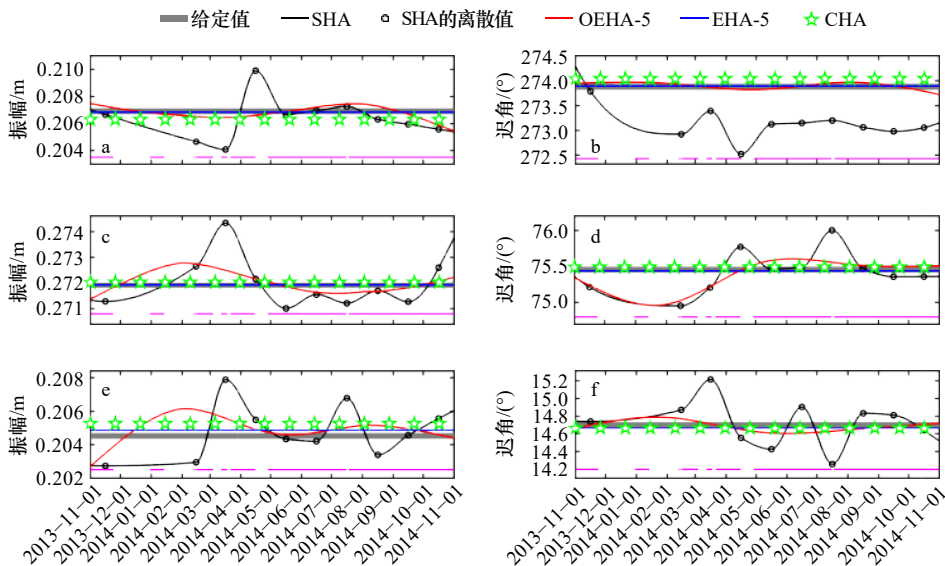


图 8 理想敏感实验中给定的 S_2 分潮(a, b)、 K_1 分潮(c, d)和 O_1 分潮(e, f)的振幅和迟角, 以及使用 SHA、采用 5 个独立点的 OEHA、采用 5 个独立点的 EHA 和 CHA 得到的结果

Fig. 8 The amplitude and phase lag of the S_2 (a, b), K_1 (c, d) and O_1 (e, f) constituent prescribed in ideal sensitivity experiments and the estimated values using SHA, OEHA with 5 independent points, EHA with 5 independent points, and CHA

每个子图中的洋红色实线描述了理想敏感实验中人造“水位数据”的时间段

The magenta solid lines in each panels describe the temporal locations of the artificial sea level observations in the ideal sensitivity experiment

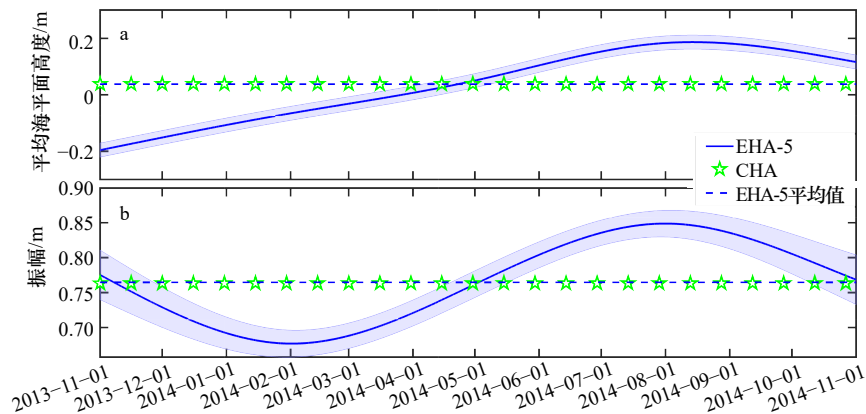


图9 E2站基准实验的实验结果

Fig. 9 The results of benchmark experiment at E2 Station

蓝色实线展示了采用5个独立点的EHA得到的平均海平面高度(a)和M₂分潮振幅(b)的时变值,蓝色虚线为采用5个独立点的EHA得到的平均海平面高度(a)和M₂分潮振幅(b)的平均值,绿色星号表示常数形式的平均海平面高度(a)和M₂分潮振幅(b),蓝色阴影表示相应的95%置信区间

The blue solid line shows the time-varying values of mean sea level (a) and M₂ constituent amplitude (b) obtained by EHA at 5 independent points, the blue dotted line shows the average value of mean sea level (a) and M₂ constituent amplitude (b) obtained by EHA at 5 independent points, and the green stars describe the constant mean sea level (a) and M₂ constituent amplitude (b), the blue shadings indicate the corresponding 95% confidence intervals

EHA 所得随时间变化的 M₂ 振幅在夏季(大约7-8月)达到最大值,在冬季(大约1-2月)达到最小值,夏季 M₂ 分潮振幅比年平均值大 8.42 cm(约 11.01%),而冬季值比年平均值小 8.76 cm(约 11.46%),其季节变化幅度远大于在观测期内由 18.6 a 的节点调制引起的振幅变化(不超过 1%)。表 2 列出了 CHA 和 EHA 在 E2 站分析所得其他分潮的振幅值,可以看出, EHA 和 CHA 分析所得其他 3 个主要分潮的常数形式的振幅值之间的绝对差最大仅为 0.07 cm,进一步表明 EHA 不仅可以准确提取 M₂ 分潮振幅的季节变化特征,也能准确得到其他分潮的常数形式的振幅。

CHA 和 EHA 分析所得 E2 站 MSL 如图 9a 所示。可以看出, EHA 分析所得随时间变化的 MSL 的平均值几乎等于 CHA 分析所得常数形式的 MSL,进一步表明 EHA 的结果是合理的。但是需要注意的是, EHA 分析所得 E2 站处 MSL 在 1 年内的变化约为 0.4 m,远大于传统上 MSL 的全球平均变化(约为 0.001 m/a)^[23-24],这主要是因为 EHA 中随时间变化的 MSL 包含气象因素导致的水位变化(式(3))。如 Lü等^[18]所述,风速和气压等气象因素均会影响到低频水位的变化,因此包含了气象因素影响的 MSL 在 2013 年 11 月和 2014 年 11 月存在一定的差异,该现象在 E1 站同样存在。EHA 分析所得时变 MSL 的最大值出现在夏季,而最小值出现在冬季。与 M₂ 分潮振幅的时间变化特征相似, EHA 分析所得 MSL 的时间变化比较平稳,且不存在季节变化之外的信号。

CHA 和 EHA 分析所得 E1 站 MSL 和 M₂ 分潮振幅的结果如图 10 所示。可以看出, EHA 分析所得随时间变化的 M₂ 分潮振幅比较平滑,且与 E2 站具有相同的变化趋势。在夏季, M₂ 分潮振幅增加了约 6.05%,而在冬季则减少了 3.85%,这比在观测期内由 18.6 a 节点调制引起的不超过 1% 的振幅变化大得多。从表 2 中可以看出, EHA 分析所得其他 3 个分潮的常数形式的振幅与 CHA 分析所得结果非常接近。此外, EHA 分析所得随时间变化的 MSL 在夏季达到最大

表 2 基准实验中 CHA 和 EHA 分析所得 4 个主要分潮的振幅(单位: cm)

Table 2 The amplitudes of four main tidal constituents obtained by CHA and EHA in the benchmark experiment (unit: cm)

| 站点 | 分潮 | CHA | EHA |
|----|----------------|--------|--------|
| E1 | M ₂ | 103.53 | 102.96 |
| | K ₁ | 29.04 | 29.14 |
| | S ₂ | 29.49 | 29.50 |
| E2 | O ₁ | 22.89 | 22.90 |
| | M ₂ | 76.33 | 76.46 |
| | K ₁ | 27.19 | 27.21 |
| | S ₂ | 20.69 | 20.62 |
| | O ₁ | 20.45 | 20.44 |

注: 由于 M₂ 分潮的振幅是假定随时间变化的, 因此使用 EHA 时列出其平均值。

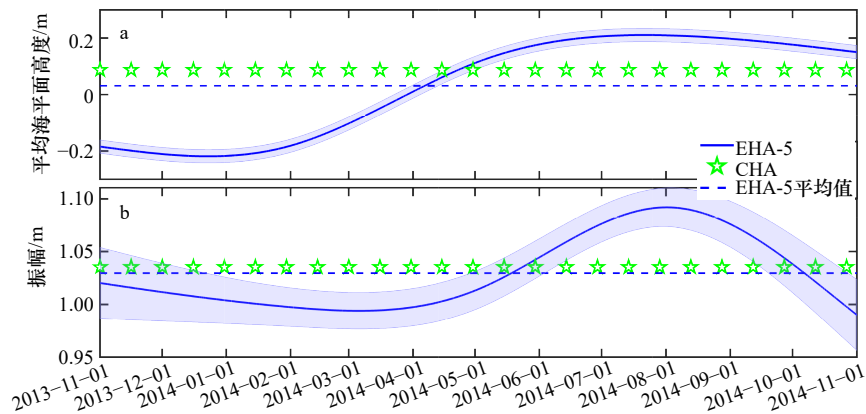


图 10 E1 站基准实验的实验结果

Fig. 10 The results of benchmark experiment at E1 Station

蓝色实线展示了采用 5 个独立点的 EHA 得到的平均海平面高度(a)和 M_2 分潮振幅(b)的时变值, 蓝色虚线为采用 5 个独立点的 EHA 得到的平均海平面高度(a)和 M_2 分潮振幅(b)的平均值, 绿色星号表示常数形式的平均海平面高度(a)和 M_2 分潮振幅(b), 蓝色阴影表示相应的 95% 置信区间

The blue solid line shows the time-varying values of mean sea level (a) and M_2 constituent amplitude (b) obtained by EHA at 5 independent points, the blue dotted line shows the average value of mean sea level (a) and M_2 constituent amplitude (b) obtained by EHA at 5 independent points, and the green stars describe the constant mean sea level (a) and M_2 constituent amplitude (b), the blue shadings indicate the corresponding 95% confidence intervals

值, 在冬季达到最小值, 与 E1 站 M_2 分潮的季节变化特征相同。需要注意的是, E1 站和 E2 站相距较近, 但对比图 9a 和图 10a 发现, E1 站和 E2 站的平均海平面的年变化并不完全一致, E2 站 MSL 的最小值出现在 11 月, 而 E1 站 MSL 的最小值出现在 1 月, 这是由于 E1 站 2014 年 1 月和 2 月的数据存在缺测, 会给该时间段的平均海平面的计算带来偏差, 从而影响最小 MSL 出现的月份, 但并没有显著影响两站的 M_2 分潮振幅和 MSL 的变化趋势, 表明 EHA 在即使存在缺测的 E1 站, 也可以得到相对合理的结果。

综上所述, EHA 在 E1 站和 E2 站分析所得 M_2 分潮振幅具有相同的季节变化特征: 夏季大, 冬季小。E2 站 M_2 分潮振幅的相对变化约为 11%, 在 E1 站约为 5%,

这与 Foreman 等^[11]、Huess 和 Andersen^[4]的结果 (6%), 以及 Müller 等^[2]根据模型和观测数据所分析的结果 (5%~10%) 相近。此外, EHA 在 E1 站和 E2 站分析所得时变 MSL 具有与 M_2 分潮振幅相同的季节性变化, 这表明 MSL 可能是导致 M_2 分潮振幅季节变化的因素之一, 因为潮波的传播受到水深的影响^[13]。

3.2 对分潮选择的敏感性实验

在基准实验中, 选择了 4 个主要分潮进行评估, 并且假定只有 M_2 分潮的振幅和迟角随时间变化。当其他分潮也被分析或其他分潮振幅和迟角也被假定为随时间变化时, M_2 分潮的分析结果可能会受到影响。因此, 对 E2 站的数据进行了一些新的实验来测试 EHA 分析所得的 M_2 分潮振幅季节变化特征对分潮

表 3 实际实验中的详细实验设置

Table 3 The detailed experimental settings of the practical experiments

| 实验名 | 分析的分潮 | 具有时变特征的分潮 | 有无缺测 |
|-----------|--|----------------------|-----------|
| 基准实验 | M_2, K_1, S_2, O_1 | M_2 | 无 |
| SE11 | M_2, K_1, S_2, O_1 | M_2, K_1 | 无 |
| SE12 | M_2, K_1, S_2, O_1 | M_2, K_1, S_2 | 无 |
| SE13 | M_2, K_1, S_2, O_1 | M_2, K_1, S_2, O_1 | 无 |
| SE21 | $M_2, K_1, S_2, O_1, N_2, K_2, P_1, Q_1$ | M_2 | 无 |
| SE22 | $M_2, K_1, S_2, O_1, N_2, K_2, P_1, Q_1$ | M_2, K_1 | 无 |
| SE23 | $M_2, K_1, S_2, O_1, N_2, K_2, P_1, Q_1$ | M_2, K_1, S_2 | 无 |
| SE24 | $M_2, K_1, S_2, O_1, N_2, K_2, P_1, Q_1$ | M_2, K_1, S_2, O_1 | 无 |
| SE31 | M_2, K_1, S_2, O_1 | M_2 | 有(同E1) |
| SE32-SE35 | M_2, K_1, S_2, O_1 | M_2 | 有(大约占1/4) |

选择的敏感性。如表3所示,在敏感性实验SE11–SE13中,对M₂、K₁、S₂和O₁4个分潮进行分析,这与基准实验相同,但具有时变振幅和迟角的分潮不同;在敏感性实验SE21–SE24中,与基准实验不同的是,将对M₂、K₁、S₂、O₁、N₂、K₂、P₁和Q₁8个分潮进行分析,且振幅和迟角随时间变化的分潮也发生了变化。

上述敏感性实验中,EHA分析所得随时间变化的MSL和M₂分潮振幅如图11所示。可以看出,当具有时变特征的分潮发生改变时(SE11–SE13),EHA分析所得随时间变化的M₂分潮振幅和MSL几乎与基准实验的结果完全一致。当分析的分潮数目发生变化时(SE21–SE24),EHA分析所得随时间变化的MSL与基准实验的结果几乎完全一致(图11c);此外,虽然随时间变化的M₂分潮振幅与基准实验结果不完全相同,但整体变化趋势是一致的(图11d)。值得注意的是,SE21–SE24中随时间变化的M₂分潮振幅几乎彼此相等,这与SE11–SE13所得结论一致。上述结果表明,EHA中被分析的分潮和具有时变特征的分潮的选取并不会影响分析所得M₂分潮振幅和MSL的时间变化趋势和季节变化特征。

3.3 对数据缺失的敏感性实验

时变M₂分潮振幅和MSL的分析结果也可能会受到数据缺失的影响。因此,利用E2站的数据进行了一系列实验以测试EHA分析结果对数据缺失的敏感性。如表3所示,在敏感性实验SE31中,根据E1点缺测情况,相应地剔除了E2站水位观测数据。E1站水位数据中存在大约1/4的缺测,因此,为了进一步检验数据缺失的影响,将E2站水位观测数据平均分为

4份,并将这4份水位观测数据分别作为SE32–SE35中的缺测数据。其他实验设置与基准实验完全相同。

敏感性实验SE31–SE35的结果如图12所示。可以看出,由于SE31–SE35的水位观测数据存在约1/4的数据缺失,因此EHA分析所得M₂分潮振幅和MSL均与基准实验中的值不完全相同。对比实验SE31和基准实验中分析所得E2站MSL的结果,可以看到当E2站数据在2014年1月和2014年2月出现缺测时,虽然MSL的最小值出现的月份在2013年11月,但是这种现象并没有数据无缺测时那么显著,并且2013年11月至2014年2月的分析结果与无缺测时的分析结果存在明显的差异,说明了数据缺失是导致E1站和E2站MSL最小值出现月份不同的原因。但是,SE31–SE35中所得M₂分潮振幅和MSL的变化趋势与基准实验中的相同:夏季大,冬季小。实验结果表明,数据在某一月份的集中缺测会给该月的计算结果带来影响,但不会显著影响EHA分析所得M₂分潮振幅和MSL的季节变化特征,并进一步论证了EHA所得E1站的M₂分潮振幅季节变化是合理、可信的。

3.4 对独立点数的敏感性实验

Jin等^[10]指出,如何选择EHA中的独立点是一个需要进一步研究的问题。而Pan等^[14]则指出,EHA在不同独立点数时所得到的分析结果代表了不同时间尺度上的振荡。同样地,选择合适的独立点数对EHA的表现也非常重要,尤其是对于E1站非连续的水位数据。因此在新的敏感性实验中尝试了4个、6个、7个和8个等不同的独立点数。

如图12d所示,当独立点数取为季节数的两倍

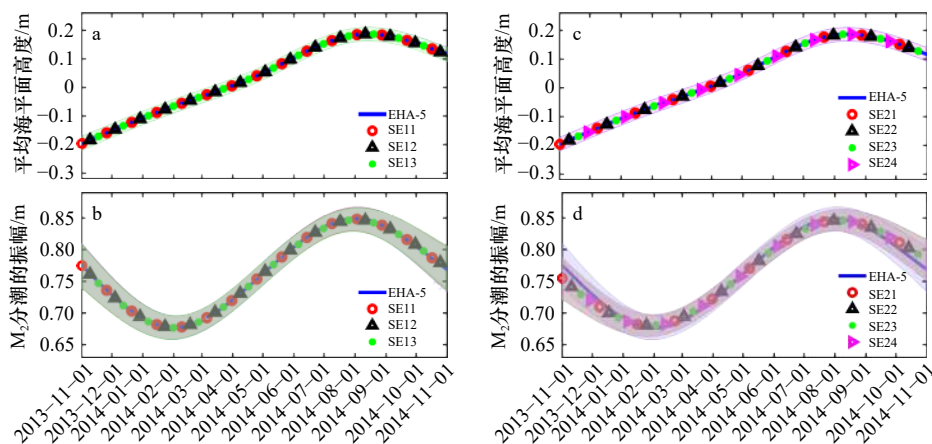


图11 分潮选择的敏感性实验结果

Fig. 11 The results on the sensitivity of tidal constituent selection

蓝色实线表示采用5个独立点的EHA在基准实验中的结果。带颜色的阴影表示相应的95%置信区间

The blue solid line represents the results of EHA with 5 independent points in the benchmark experiment.

The shadings with colors indicate the corresponding 95% confidence intervals

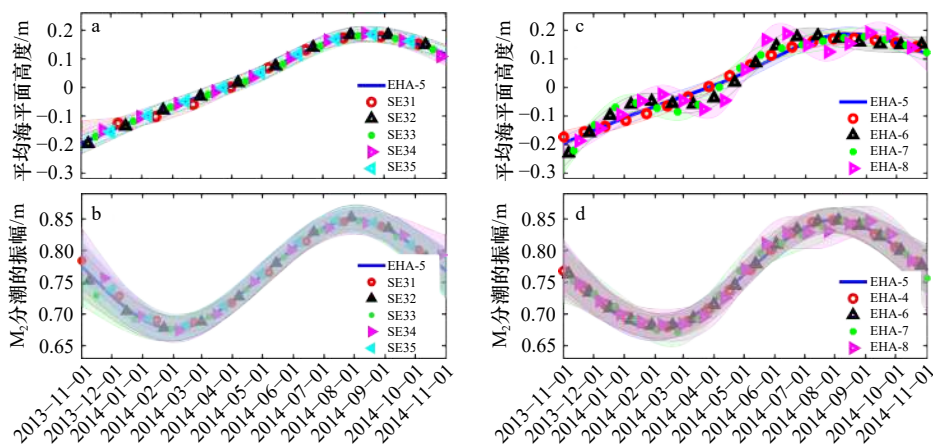


图 12 数据缺失和独立点数的敏感性实验结果

Fig. 12 The results on the sensitivity of missing data and independent points

蓝色实线表示采用 5 个独立点的 EHA 在基准实验的结果。带颜色的阴影表示相应的 95% 置信区间

The blue solid line indicates the results of EHA with 5 independent points in the benchmark experiment.

The shadings with colors indicate the corresponding 95% confidence intervals

(即: 8)时, EHA 分析所得 E2 站的 M_2 分潮振幅的时间变化趋势与基准实验结果一致, 但存在除季节变化之外的震荡, 结果表明: EHA 中, 独立点越多并不一定会得到更真实的结果。

当独立点数大于 3 且小于 8 时, EHA 分析所得 M_2 振幅和 MSL 的结果并不完全与 5 个独立点时的结果等同, 但其季节性变化趋势相同。如 Pan 等^[14]所述, 不同独立点数得到的结果不同, 可能是因为采用不同独立点数的 EHA 得到的结果包含了不同的信号。以上所有敏感性实验的结果表明: EHA 分析所得 E2 站 M_2 分潮振幅的季节变化特征是鲁棒的, 不受实验设置的影响。

4 讨论

平均海平面、层化和涡动黏性系数的季节变化是造成沿海地区 M_2 分潮振幅呈现季节性变化的主要原因^[4, 13, 15]。渤海湾的风场不仅对平均海平面有重大影响^[18], 因受东亚季风影响而具有明显的季节变化特征^[25]。此外, 季风还可以影响层化涡动黏性系数^[26-29]。参照 Devlin 等^[1], 采用北太平洋季风指数 (WNPMI) 来表征东亚季风^[30]。WNPMI 下载网址为: <http://apdrc.soest.hawaii.edu/projects/monsoon/daily-data.html#mon>。如图 13 所示, WNPMI 与 E1 站和 E2 站 M_2 分潮振幅具有显著的正相关, 相关系数分别为 0.86 和 0.87, 表明: 东亚季风可能是造成渤海湾 M_2 分潮振幅季节性变化的内在原因。

根据前人研究结果, 我们大胆猜测, 东亚季风可能通过以下 3 个途径来影响渤海湾 M_2 分潮振幅的季节变化:

(1) 影响平均海平面的季节变化。亚洲季风导致了径流的季节性变化^[31], 使得超过 60% 的黄河水在夏季入海^[32], 也使得海河夏季的入海量是冬季的两倍左右^[33]; 与此同时, 夏季东亚季风导致的渤海上空的东南风使一部分黄河水向北输送到渤海湾^[28], 加上直接汇入渤海湾的海河入海量也增大, 使得夏季渤海湾的淡水汇入增多^[34]。另一方面, 受东亚季风影响, 夏季通过渤海海峡从渤海进入黄海的通量比冬季更小^[27]。综上, 受东亚季风影响, 夏季从黄河和海河汇入渤海湾的淡水增加, 与此同时, 从渤海流出到黄海的海水更少, 共同导致夏季渤海湾平均海平面更高。而潮波的传播受到水位的影响^[13], 因此, 受东亚季风季节变化影响的渤海湾平均海平面的季节变化导致了 M_2 分潮振幅的季节变化。

(2) 影响层化的季节变化。根据 Yanagi 等^[35]和 Jeon 等^[26]的研究, 对于渤海湾而言, 冬季从陆地到海洋的强西北风会导致海水降温, 破坏之前形成的层化并导致垂向均一的层化状态。春末夏初, 随着海水表层升温速率的增加以及黄河和海河入海量的增加, 海面风应力和底部摩擦力引起的混合不足以消耗输入的势能, 使得渤海湾层化逐渐加强^[36-37], 并在夏季达到最大值^[37]。因此, 东亚季风能够导致层化的季节变化, 进而引起 M_2 分潮的季节变化^[2]。

(3) 影响涡动黏性系数。Pohlmann^[38]发现北海的垂向涡动黏性具有显著的年周期并与海面风应力的年变化有关; 此外, 垂直涡动黏性系数依赖于层化。Maas 和 Van Haren^[39]证实了层化情况下涡动黏性系数降低的可能性。Howarth^[40]认为温跃层的存在可以

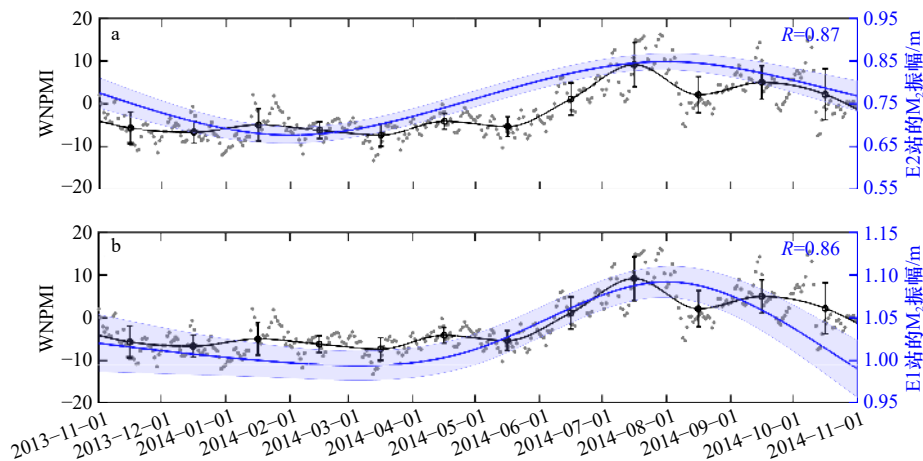


图 13 北太平洋季风指数(WNPMI)与 E1 站和 E2 站 M₂ 分潮振幅的相关性

Fig. 13 The correlation between WNPMI and M₂ constituent amplitude of E1 and E2 stations

黑点表示每天的 WNPMI, 黑圈表示 WNPMI 的月平均值, 黑线为使用三次样条插值法对 WNPMI 的月平均值进行拟合的结果, 蓝线为采用 5 个独立点的 EHA 得到的 M₂ 分潮振幅, 黑色竖线和蓝色阴影表示相应的 95% 置信区间

The black dot represents the daily WNPMI, the black circle represents the monthly average value of WNPMI, the black line is the result of fitting the monthly average value of WNPMI using cubic spline interpolation method, and the blue line is the M₂ constituent amplitude obtained by EHA with 5 independent points, the black vertical bars and the blue shadings indicate the corresponding 95% confidence intervals

降低涡动黏性系数, 除此之外, Müller 等^[2]指出, 层化可以使得水体更加稳定, 进而导致夏季的涡动黏性系数比混合均匀的夏季小几个数量级。因此, 受东亚季风影响的层结的季节变化会导致涡动黏性系数的季节变化, 进而诱发 M₂ 分潮的季节变化。

除了东亚季风可能影响渤海湾 M₂ 振幅的季节变化之外, 水深、近岸与否等原因也有可能对 M₂ 分潮振幅的季节变化造成影响。对比图 9 和图 10 可知, E1 站和 E2 站的 MSL 和 M₂ 分潮振幅的年变化并不完全一致, 这种现象一方面是由数据缺测造成的, 另一方面也可能与 E1 和 E2 两站的水深、近岸与否的差异有关。Müller 等^[2]认为, 相比远离海岸的地区, 近岸地区的 M₂ 分潮的季节变化更显著。而在渤海地区, 不同的水深和底摩擦系数也会对 M₂ 分潮的振幅带来影响^[42]。

5 结论

本文利用 EHA 分析了渤海湾 E1 站和 E2 站一年时间段的水位观测数据, 同时估计了时变的和不随时间变化的分潮振幅和迟角, 来探究渤海湾 M₂ 分潮振幅的季节变化。

参考文献:

- [1] Devlin A T, Zaron E D, Jay D A, et al. Seasonality of tides in Southeast Asian waters[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48(5): 1169–1190.

在理想实验中, 根据 E2 站的水位观测数据构建了人造“水位数据”, 其中, M₂ 分潮具有时变的振幅和迟角, 而 S₂、K₁、O₁、MK₃、M₄ 分潮及 LF1 和 LF2 的振幅或迟角是常数。实验结果表明: 无论人造“水位数据”是否存在缺测, EHA 分析所得随时间变化的 M₂ 振幅和迟角以及不随时间变化的 S₂、K₁ 和 O₁ 分潮的振幅和迟角整体比 CHA、SHA、OEHA 等方法的分析结果更接近给定值, 表明 EHA 是一种行之有效的办法。

利用 EHA 分析实际水位观测数据时, 分析结果发现, E1 站和 E2 站时变 M₂ 分潮振幅具有相同的变化趋势: 夏季大、冬季小。此外, M₂ 分潮振幅的相对变化在 E2 站约为 11%, 在 E1 站约为 5%。E1 站和 E2 站随时间变化的平均海平面与 M₂ 分潮振幅随时间变化的趋势相同。EHA 分析所得其他潮汐成分 (包括 S₂、K₁ 和 O₁) 的常数形式的振幅值与 CHA 所得结果吻合较好。更重要的是, 敏感实验的结果表明, M₂ 分潮振幅和平均海平面的变化趋势是鲁棒的, 不受实验设置的影响。根据前人研究^[2-3, 11, 13, 41]猜测, 东亚季风的季节变化引起了平均海平面、层化和涡动黏性系数的季节变化, 进而诱导了渤海湾 M₂ 分潮振幅的季节变化。

- [2] Müller M, Cherniawsky J Y, Foreman M G G, et al. Seasonal variation of the M_2 tide[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(2): 159–177.
- [3] Corkan R H. An annual perturbation in the range of tide[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1934, 144(853): 537–559.
- [4] Huess V, Andersen O B. Seasonal variation in the main tidal constituent from altimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(4): 567–570.
- [5] Kang S K, Foreman M G G, Lie H J, et al. Two-layer tidal modeling of the Yellow and East China Seas with application to seasonal variability of the M_2 tide[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C3): 6-1–6-18.
- [6] Georgas N. Large seasonal modulation of tides due to ice cover friction in a midlatitude Estuary[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(3): 352–369.
- [7] Mofjeld H O. Observed tides on the northeastern Bering Sea shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, 91(C2): 2593–2606.
- [8] Kagan B A, Sofina E V. Ice-induced seasonal variability of tidal constants in the Arctic Ocean[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(6): 643–647.
- [9] 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.
- [10] Jin Guangzhen, Pan Haidong, Zhang Qilin, et al. Determination of harmonic parameters with temporal variations: an enhanced harmonic analysis algorithm and application to internal tidal currents in the South China Sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(7): 1375–1398.
- [11] Foreman M G G, Walters R A, Henry R F, et al. A tidal model for eastern Juan de Fuca Strait and the southern Strait of Georgia[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100(C1): 721–740.
- [12] Kang S K, Chung J Y, Lee S R, et al. Seasonal variability of the M_2 tide in the seas adjacent to Korea[J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(9): 1087–1113.
- [13] Tazkia A R, Krien Y, Durand F, et al. Seasonal modulation of M_2 tide in the northern Bay of Bengal[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 137: 154–162.
- [14] Pan Haidong, Lü Xianqing, Wang Yingying, 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.
- [15] Woodworth P L. A survey of recent changes in the main components of the ocean tide[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(15): 1680–1691.
- [16] Wang Daosheng, Pan Haidong, Jin Guangzhen, et al. Seasonal variation of the principal tidal constituents in the Bohai Sea[J]. *Ocean Science*, 2020, 16(1): 1–14.
- [17] Kurapov A L, Erofeeva S Y, Myers E. Coastal sea level variability in the US West Coast Ocean Forecast System (WCOFS)[J]. *Ocean Dynamics*, 2017, 67(1): 23–36.
- [18] Lü Xianqing, Wang Daosheng, Yan Bing, et al. Coastal sea level variability in the Bohai Bay: influence of atmospheric forcing and prediction[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(2): 486–497.
- [19] Xu Zhenhua, Yin Baoshu, Hou Yijun, et al. Variability of internal tides and near-inertial waves on the continental slope of the northwestern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(1): 197–211.
- [20] Holly F M, Yang J C, Schwarz P, et al. Numerical simulation of unsteady water and sediment movement in multiply connected networks of mobile-bed channels[R]. Iowa institute of Hydraulic Research: The University of Iowa, 1990.
- [21] Cao Anzhou, Wang Daosheng, Lü Xianqing. Harmonic analysis in the simulation of multiple constituents: determination of the optimum length of time series[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(5): 1112–1118.
- [22] 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.
- [23] Chen Xianyao, Zhang Xuebin, Church J A, et al. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993–2014[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 492–495.
- [24] Quartly G D, Legeais J F, Ablain M, et al. A new phase in the production of quality-controlled sea level data[J]. *Earth System Science Data*, 2017, 9(2): 557–572.
- [25] Wang Qiang, Guo Xinyu, Takeoka H. Seasonal variations of the Yellow River plume in the Bohai Sea: a model study[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C8): C08046.
- [26] 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.
- [27] Bi Naishuang, Yang Zuosheng, Wang Houjie, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 239–247.
- [28] Wang Houjie, Wang Aimei, Bi Naishuang, et al. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 17–32.
- [29] Shi Wei, Wang Menghua. Satellite views of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 2012, 104: 30–45.

- [30] Wang Bin, Fan Zhen. Choice of South Asian summer monsoon indices[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(4): 629–638.
- [31] 刘锡清. 中国海洋环境地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
Liu Xiqing. Marine Environmental Geology of China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.
- [32] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Li Yunhai, et al. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) mouth[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(6): 854–871.
- [33] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴2014[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of Chinese Rivers and Sediments 2014[M]. Beijing: China Water Power Press, 2014.
- [34] Li Fuxing, Zhang Shiyan, Chen Dong, et al. Inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon and its impact on hydrologic variables in the Haihe River Basin, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(2): 174–184.
- [35] Yanagi T, Sachoemar S I, Takao T, et al. Seasonal variation of stratification in the Gulf of Thailand[J]. *Journal of Oceanography*, 2001, 57(4): 461–470.
- [36] Van Haren H. Properties of vertical current shear across stratification in the North Sea[J]. *Journal of Marine Research*, 2000, 58(3): 465–491.
- [37] Huang Daji, Su Jilan, Backhaus J O. Modelling the seasonal thermal stratification and baroclinic circulation in the Bohai Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(11): 1485–1505.
- [38] Pohlmann T. Calculating the annual cycle of the vertical eddy viscosity in the North Sea with a three-dimensional baroclinic shelf sea circulation model[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(2): 147–161.
- [39] Maas L R M, Van Haren J J M. Observations on the vertical structure of tidal and inertial currents in the central North Sea[J]. *Journal of Marine Research*, 1987, 45(2): 293–318.
- [40] Howarth M J. The effect of stratification on tidal current profiles[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(11): 1235–1254.
- [41] Müller M. The influence of changing stratification conditions on barotropic tidal transport and its implications for seasonal and secular changes of tides[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 47: 107–118.
- [42] Kang S K, Lee S R, Lie H J. Fine grid tidal modeling of the Yellow and East China Seas[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(7): 739–772.

Seasonal variability of the M_2 constituent in the Bohai Bay: Application of enhanced harmonic analysis

Yu Ying¹, Wang Daosheng^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Research Institute, China University of Geosciences, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The seasonal variability of M_2 constituent exerts a major influence on the coastal ocean environment. The enhanced harmonic analysis (EHA) can synchronously extract the temporally varying amplitudes and phase lags of significant constituent and the constant values of the other constituents. In this study, the seasonal variability of the M_2 constituent in the Bohai Bay, China, is investigated by analyzing one-year sea level observations at two stations with EHA. In order to evaluate the accuracy of EHA, artificial "sea level" is designed in the ideal experiment. Both the estimated temporally varying amplitude and phase lag of the M_2 constituent and constant values of the S_2 , K_1 and O_1 constituents using EHA were much closer to the prescribed values than those obtained using the other methods, indicating the capability and efficacy of EHA. When the real sea level observations were analyzed using EHA, the estimated M_2 constituent amplitude has significant seasonal variability, with large values in summer and small values in winter. The sensitivity experiments show that the trend of seasonal variation of M_2 amplitude in Bohai Bay is not affected by the experimental settings, and it is robust and can reflect the real seasonal variation of M_2 constituent. The seasonal variations in the M_2 amplitude is possibly induced by the seasonally alternating Asia monsoon, as the Asia monsoon dominates the seasonality of mean sea level, stratification and eddy viscosity, which are main influence factors summarized in the previous studies.

Key words: the M_2 constituent; seasonal variability; enhanced harmonic analysis; Bohai Bay