

大沽河口水位变化特征分析

赖秋宇¹, 刘子洲¹, 翟方国¹, 顾艳镇¹, 陈 栋², 姜庆岩²

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 本文基于 2016 年 11 月 8 日—2019 年 6 月 29 日大沽河入海口水深观测数据分析了大沽河河口水位变化特征, 并结合风场、降水量、卫星高度计融合产品资料对其影响因素展开了讨论。结果表明: 1) 大沽河口水位变化由潮汐过程主导, 潮汐类型为正规半日潮, M_2 分潮占主导; 2) 余水位在 2017 年 7 月—2019 年 1 月存在周期约为 110—150 天的显著季节内变化, 主要受到纬向风的影响, 监测系统处在大沽河入海口西岸, 东向(西向)风将驱动水体向东(西)输运, 导致西岸监测系统处水量减少(增加), 从而观测到余水位下降(上升); 3) 观测期间, 余水位存在显著下降趋势, 约为 -0.53×10^{-2} m/月, 主要受到大沽河流域降水量减少的影响。

关键词: 大沽河口; 水位变化; 纬向风; 降水

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2021)01-0022-10

DOI: 10.11759/hyxx20200821002

在全球气候变暖这一气候变化背景下衍生出的全球海平面上升问题^[1], 其将增加感潮河段(特别是河口三角洲和地势低洼区域)潮位, 导致在极端天气条件(台风、强温带气旋、寒潮等)下沿海城市、港口与航道对风暴潮灾害抵御能力下降, 直接影响沿海地区人民生活水平和制约社会经济发展^[2-5]。青岛市海岸带区域人口密集导致其遭受风暴潮灾害的脆弱性较高^[6-7], 故有必要建设完善的海洋环境监测系统, 加强对海洋灾害性事件的预警预报, 利用观测水位时间序列是以往学者研究中国近海海平面变化的主要研究手段之一^[8-10]。

大沽河, 位于 $36^{\circ}10'—37^{\circ}12'N$, $120^{\circ}03'—120^{\circ}25'E$, 发源于山东省招远市境内, 于胶州湾马头村南注入胶州湾, 干流全长 179.9 km, 是胶州湾入海径流最大的河流^[11], 被称作青岛市的“母亲河”。大沽河流域处在华北暖温带季风气候区, 气候具有夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥的特点, 流域降水集中于每年 6—9 月的汛期, 7、8 月的降水量在全年总降水中占主导, 且呈现下降趋势^[12], 以往学者对大沽河口的研究多集中在生态环境^[13-16]、水质^[17-18]、水沙输运^[19-20]、地下水交换^[21-22]等方面。关于大沽河口水动力过程的研究相对较少。尹则高等^[23]通过建立潮流和径流作用下大沽河口水动力数学模型, 研究了潮位、潮流变化在不同径流条件下的响应。李兆钦等^[24]在讨论潮汐过程对大沽河口底层溶解氧浓度变化时, 基

于 2016 年 11 月 6 日—2017 年 6 月 20 日水深观测资料指出了大沽河口潮汐类型为正规半日潮。受限于缺乏观测资料和观测资料的时间长度, 以往学者未能揭示大沽河口水位较低频时间尺度变化, 对其变化趋势和影响因素讨论也较少, 故有必要利用更长观测资料做进一步研究讨论。

本文基于放置于大沽河口的监测系统在 2016 年 11 月 8 日—2019 年 6 月 29 日期间的水深观测数据, 分析了大沽河口水位变化特征及其变化趋势, 并结合风场、降雨量、外海水位等数据对影响水位变化的原因做出了讨论。

1 监测系统与数据集

1.1 监测系统概况

2016 年 11 月在青岛市海洋环境监测系统项目下

收稿日期: 2020-08-21; 修回日期: 2020-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776012); 国家重点研发计划(2019YFD0901305); 浙江省重点研发计划(2020C03012); 三亚崖州湾科技城管理局重大科技项目(YZ2019ZD0X)

[Foundation: National Science Foundation of China, No. 41776012; National Key Research & Development Program of China, No. 2019YFD0901305; Key Research & Development Project of Zhejiang Province, No. 2020C03012; Major Science and Technology Project of Sanya YZBSC, No. YZ2019ZD0X]

作者简介: 赖秋宇(1995-), 男, 广西桂林市人, 硕士研究生, 主要从事海洋水动力研究, E-mail: QYordinary@163.com; 刘子洲, 通信作者, 男, 山东省淄博人, 实验师, 主要从事海洋调查及近海海洋环境问题的教学和研究, E-mail: lzz2013@ouc.edu.cn

建设的一套海洋环境有缆在线监测系统, 位于大沽河入海口东北—西南向河道西岸, 坐标为 $36^{\circ}11'44.15''\text{N}$, $120^{\circ}7'0.57''\text{E}$, 具体位置如图 1 中红色五角星所示。温度、盐度、pH、溶解氧、浊度、叶绿素等生态要素数据由系统搭载的加拿大 AML 公司 Metric X 50160 水质仪观测得到, 观测间隔为 1 min。压力、流速、流向、波浪数据由声学波浪流速剖面仪(Acoustic Wave and Current Profiler, AWAC)观测得到, 观测间隔为 1 min, 压力的精度为 0.01%, 分辨率为 10^{-8} 。

1.2 数据

用于分析水位变化的水深数据由压力观测数据根据 Fofonoff 和 Millard 公式^[25]换算得到, 时间间隔为 1 min, 本文选取 2016 年 11 月 8 日—2019 年 6 月 29 日期间数据, 剔除缺测天数, 有效数据长度为 931 d。

为了讨论影响大沽河口水位变化的影响因素, 本文还采用以下数据: 由欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的天平均 ERA-Interim 再分析资料^[26], 主要使用经向风应力(Meridional Wind Stress, MWS)和纬向风应力(Zonal Wind Stress, ZWS)数据, 空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 时间范围为 2016 年 1 月 1 日—2019 年 7 月 1 日, 利用双线性插值法, 可以获得观测系统处的风应力时间序列; 欧盟哥白尼海洋环境监测服务中心

(E.U. Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS) Unidata Dataset Discovery v1.0 (<http://marine.copernicus.eu/web/27-service-commitments-and-licence.php>)多卫星(Altika Drifting Phase, Cryosat-2, Haiyang-2A, OSTM/Jason-2)融合格点数据集。主要结果采用海平面异常(Sea Level Anomaly, SLA)数据, 时间分辨率为 1 天, 空间分辨率 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 时间范围为 2016 年 1 月 1 日—2019 年 5 月 13 日; 降水数据来自亚洲—太平洋数据研究中心(Asia Pacific Data Research Center, APDRC)(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>)的 Climate Prediction Center (CPC)全球月气候格点数据集^[27-28], 该数据集由美国国家海洋大气管理局(National Oceanic and Atmosphere Administration station, NOAA)的气候预报中心提供。数据通过插值第 2 版全球历史气候数据网和异常气候监测系统站点观测数据, 并考虑时空变化和地形影响, 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 能够反映我国降水的时空特征^[29], 时间跨度为 2016 年 1 月—2019 年 12 月。本文选取包括山东半岛在内大范围降水数据, 以获取降水分布特征及长期降水趋势。

2 研究结果

观测期间, 大沽河口观测系统处水深变化范围为 2.50~7.17 m, 平均水深为 4.62 m。如图 2(a)所示, 水深

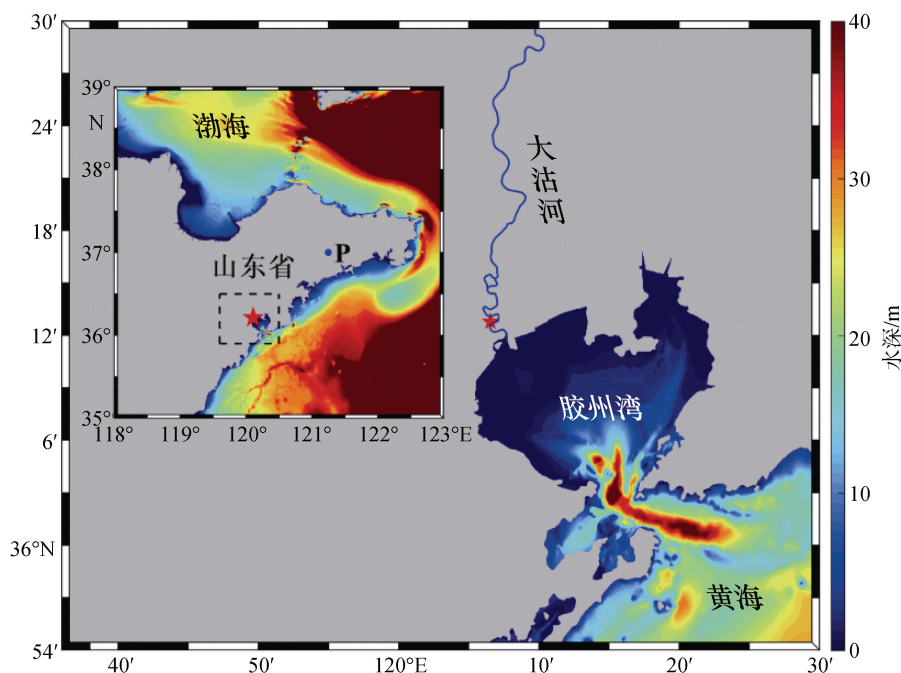


图 1 大沽河口外地形

Fig. 1 Topography outside the Dagou River estuary

注: 图中红色五角星为监测系统的位置; 蓝色实线为大沽河河道; 水深图像由海图数据绘制; P 点为 CPC 降水数据其中一个站点

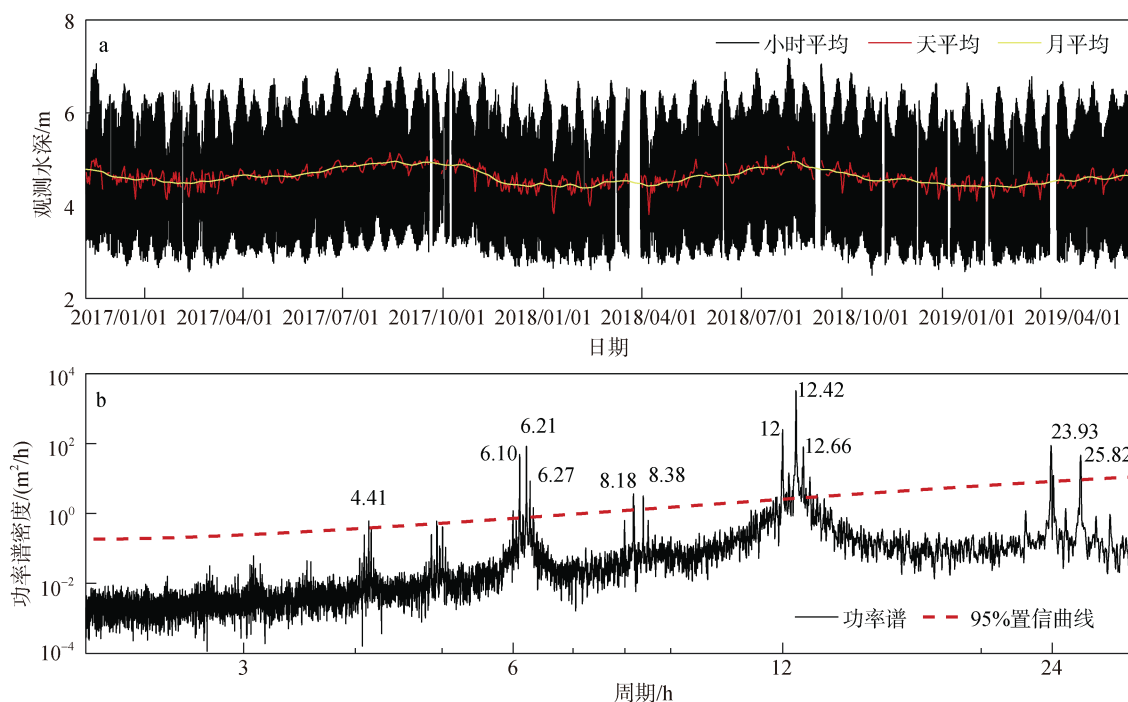


图2 2016年11月8日至2019年6月29日小时平均、天平均、月平均水深时间序列(a), 小时平均水位异常功率谱密度(b)
Fig. 2 Time series of hourly, daily, and monthly mean water levels from November 8, 2016 to June 29, 2019 (a) and power spectral density of hourly mean water level anomaly (b)

呈现出多种时间尺度的变化, 小时平均水深变化显示出明显的高频潮汐信号, 大小潮过程显著; 天平均水深变化也存在多时间尺度变化; 在季节尺度上, 水深自每年2月份开始增大, 至同年8月份上升至峰值, 于次年1月下降至谷值, 这表明水深的季节变化与流域丰水期和枯水期的交替变化相一致, 丰水期水深较大, 枯水期水深较小; 通过比较各月平均水深可以发现水深还呈现一定下降趋势。综上所述, 河口处水深变化在一定程度上受到入海径流量和胶州湾潮汐的影响。水深时间序列减去观测期间内平均水深可得到水深异常, 近似等于水位异常。为获取水位异常的显著变化信号, 本文选取整个观测期间小时平均水位异常时间序列进行功率谱分析^[30], 结果如图2(b)所示, 水位异常功率谱存在多个显著峰值, 其中最大谱值对应周期为12.42小时, 对应 M_2 分潮的周期; 在4、6、12、24小时附近谱值较显著, 分别与浅水分潮族、半日分潮族、全日分潮族的周期相近。上述结果表明, 大沽河口水位变化以潮信号为主。

2.1 潮汐

为查看水位变化中的显著分潮信号, 本文利用T_TIDE程序对水位异常时间序列进行调和分析, 图3分别以2017年、2018年、2019年5月为例展示了

回报水位异常和观测水位异常的时间序列, 二者的振幅和相位对应一致, 相关系数为0.98, 方差解释率为97.2%, 说明调和和分析能够很好地解释大沽河口的潮汐过程; 从图3中还可以看出水位变化在一个月里存在两个大潮过程和两个小潮过程。主要分潮的调和常数如表1所示, 以半日分潮(例如: M_2 、 S_2)振幅占主导, 其中 M_2 分潮的振幅最大, 达到1.23 m; 全日分潮(例如: K_1 、 O_1)与浅水分潮(例如: M_4 、 MS_4)振幅相当, 振幅在0.15~0.23 m范围内; 潮汐特征值 $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} \approx 0.32$, 故

大沽河口潮汐类型为正规半日潮。李兆钦等^[24]曾指出大沽河口水深变化以潮汐过程为主, 潮汐特征值为0.36, 与本文结果一致。

2.2 季节内变化

观测水位异常与回报水位异常的差异可以表征余水位(Residual Water Level, RWL)异常变化^[31], 图4(a)展示了观测期间RWL异常的天平均时间序列, 其变化范围为-0.62~0.40 m, 标准差为0.07 m。本文通过Morlet小波变换方法^[32], 分析RWL异常时间序列的显著变化周期, 由图4(b)展示结果可知, RWL异常在2017年7月—2019年1月存在110~150天的显著季节内变化。前人研究^[31, 33]指出:

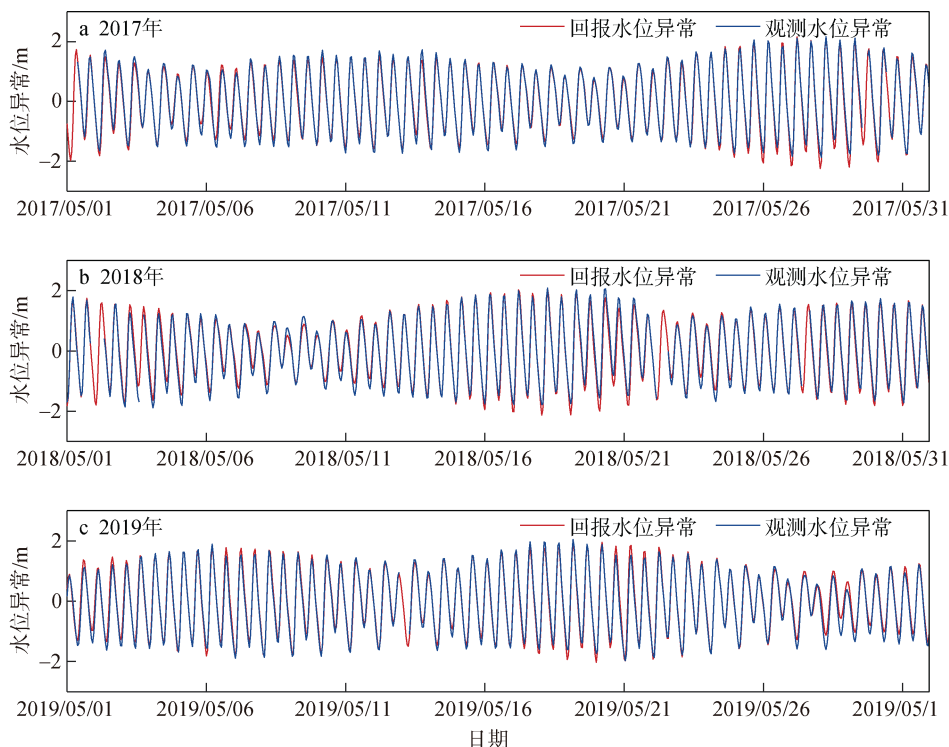


图3 观测水位异常与回报水位异常时间序列

Fig. 3 Time series of the observed and reconstructed water level anomalies

表1 大沽河口主要分潮调和常数

Tab. 1 Major tidal harmonic constants of the Dagu River estuary

分潮	周期/h	振幅/m	振幅误差/m	迟角/ $^{\circ}$	迟角误差/ $^{\circ}$	信噪比
M ₂	12.42	1.233 7	0.008	129.2	0.38	2 700
S ₂	12	0.358	0.008	174.65	1.21	1 800
K ₁	23.93	0.228	0.006	355.47	1.48	1 600
M ₄	6.21	0.200 8	0.005	171.25	1.61	1 400
O ₁	25.81	0.169	0.006	293.61	1.99	930
N ₂	12.65	0.218 8	0.008	102.63	1.93	770
MS ₄	6.1	0.155 9	0.006	233.58	2.22	770
MN ₄	6.26	0.067 8	0.005	150.53	5	160
K ₂	11.96	0.112 6	0.009	168.41	4.69	140
P ₁	24.06	0.060 6	0.005	355.62	4.68	140
L ₂	12.19	0.054 3	0.006	165.16	6.55	80
MU ₂	12.87	0.063 5	0.008	261.35	7.44	72
Sa	8 764.24	0.21	0.025	222.41	6.83	71
NU ₂	12.62	0.061 2	0.008	114.21	6.84	60

注: 表中所有结果均由 T_TIDE 程序运行得到

河口水位除受到外海潮汐影响外, 还受到风速、风向的影响。

通过相关性分析 ZWS 异常与 RWL 异常存在显著

的负相关, 相关系数为-0.54, $P<0.05$; RWL 与 MWS 和 风应力旋度间相关性较差。通过对 ZWS 的 Morlet 小 波变换分析结果[图 4(c)]可知其存在约 5 个月左右的

显著变化周期, 与 RWL 的显著周期对应。以上分析说明 RWL 对纬向风的影响较为敏感, 本文通过带通滤波分别获取 RWL 和 ZWS 异常的 110~150 天季节内变化信号, 结果如图 4(d)所示, 二者相关系数为 -0.6 ,

$P < 0.05$ 。综上所述, RWL 季节内变化主要受纬向风的影响, 监测系统处在大沽河入海口西岸, 西(东)风将驱动水体向河口东(西)岸输运, 西岸出水量减少(增加), 致使监测系统观测到 RWL 下降(上升)。

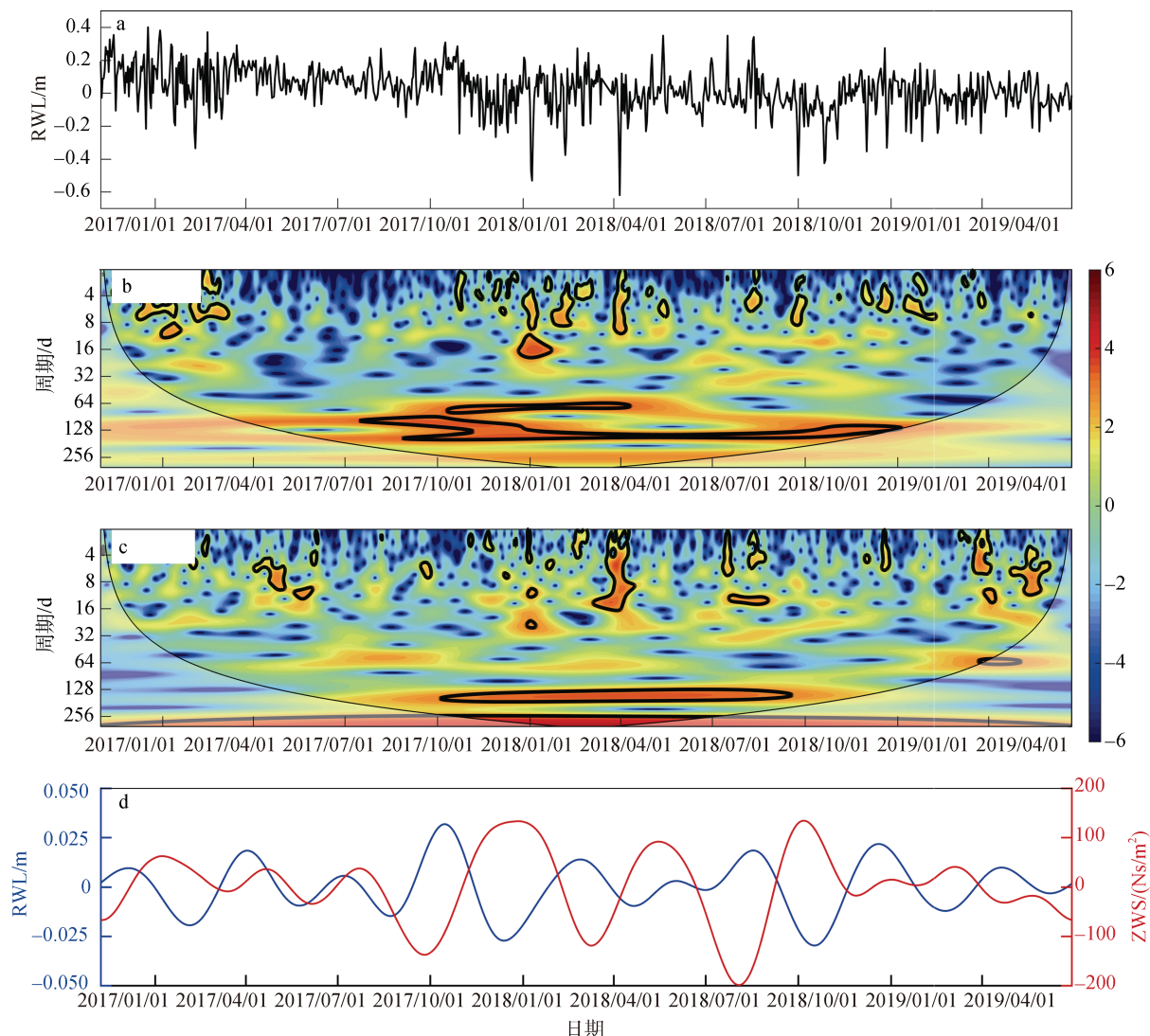


图 4 天平均 RWL 时间序列(a), 天平均 RWL 小波系数实部(b), ZWS 小波系数实部(c)和 110~150 天 RWL 和 ZWS 的带通滤波信号(d)

Fig. 4 Time series of the daily mean RWL (a), real part of the wavelet coefficients of the daily mean RWL (b), real part of the wavelet coefficients of the ZWS (c), and 110–150 day bandpass signal of the RWL and ZWS (d)

本节中还计算了 RWL 的季节内变化同流域内 P 点(36.75°N, 121.25°E, 图 1)降水量异常的相关性, 二者间相关系数为 -0.13 , 表明降水量的变化并非影响 RWL 季节内变化的主要原因。

2.3 线性趋势

图 5(a)展示了将观测期间内天平均 RWL 进行逐月平均处理后得到的月平均 RWL 时间序列, 其呈现

出显著的下降趋势, 约为 -0.53×10^{-2} m/月, 通过显著性水平为 0.05 的 Mann-Kendall 趋势检验^[34]。前人研究指出风场、外海相对海平面、流域径流等因素影响河口水位的变化^[31, 35-38], 高宗军等^[11]曾利用历史资料分析指出大沽河降水与径流间存在较好的正相关关系, 故在缺少径流数据的情况下, 本节将研究风场、外海水位、大范围降水等因素对 RWL 趋势的影响。

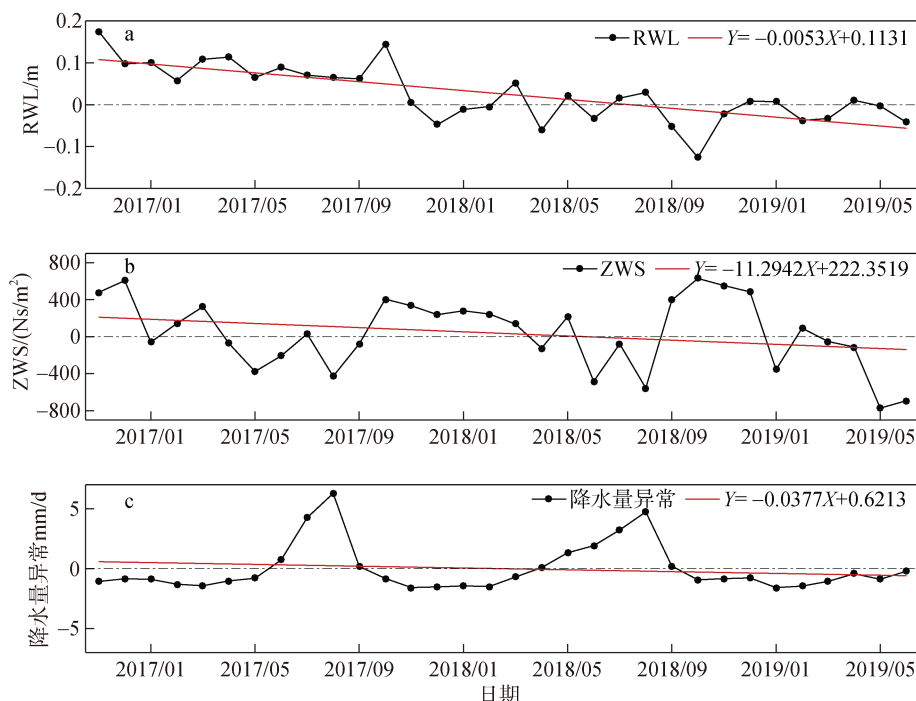


图 5 观测期间, 月平均 RWL 及其趋势(a), 月平均 ZWS 及其趋势(b), P 站降水量异常时间序列(c)

Fig. 5 Monthly mean RWL and its linear trend (a), monthly ZWS and its trend (b), and precipitation anomaly and its trend at P station (c) during the observation period

图 5(b)展示了 ZWS 异常的时间序列及其趋势, 其下降趋势约为 $-11.29 \text{ Ns}/(\text{m}^2 \text{ 月})$, 对应东风在观测期间有增强的趋势, 在 3.2 节中分析可知东风对 RWL 的贡献主要是使得 RWL 升高, 与观测 RWL 变化趋势不符, 所以在观测期间内, 纬向风的变化趋势(东风增强)并非是 RWL 呈下降趋势的主要原因。图 6(a)展示了观测期间外海 SLA 的趋势分布, 结果显示胶州湾外海水位在观测期间呈现上升趋势, 外海水位上升将使得更多外海海水进入胶州湾, 致使湾内包括大沽河口区水位整体上升, 这与观测结果不符。通过讨论局地风场(纬向风)和外海 SLA 的变化对 RWL 的影响, 二者并非观测期间大沽河口 RWL 呈下降趋势的主要影响因素, 故作者推测致使 RWL 呈下降趋势的影响因素更多来源于大沽河口上游。于是作者计算了观测期间中国东部大范围降水趋势分布, 如图 6(b)所示, 观测期间山东半岛降水量普遍呈现下降趋势, 图 5(c)以大沽河周边的 P 测站降水量异常时间序列为例展示了观测期间的降水变化及其趋势, 同前人^[40]研究结果一致, 降水极值集中于汛期(7~8 月), 其趋势约为 $-0.037 \text{ mm}/\text{月}$, 相似的变化趋势在大沽河流域周边站点同样存在。流域降水减少使得进入大沽河补充径流的水体减少, 另

外降水减少还将使得流域内人类生产生活对大沽河河水汲取量增加, 以上两个过程导致大沽河流域径流的减少, 致使大沽河口监测系统观测到 RWL 的下降。

3 结论与展望

本文通过分析大沽河口监测系统 2016 年 11 月 8 日—2019 年 6 月 29 日的水深观测数据, 对水位变化的潮汐过程、季节内变化、观测期间变化趋势等特征, 以及影响因素展开了分析讨论, 得到了以下结论:

1) 大沽河口水位变化由潮汐过程主导, 每月都存在两个大潮过程和两个小潮过程; 潮汐类型为正规半日潮, 其中 M_2 分潮的振幅最大, 达 1.23 m , 浅水分潮(K_1 、 O_1)和全日分潮(M_4 、 MS_4)的振幅相当, 二者振幅在 $0.15\sim 0.23 \text{ m}$ 范围内。

2) 纬向风变化与日平均 RWL 呈显著相关, 具体表现为 ZWS 异常与 RWL 异常间存在显著负相关, 相关系数为 -0.54 , $P < 0.05$; 通过 Morlet 小波变化分析方法得知 RWL 异常在 2017 年 7 月—2019 年 1 月存在 $110\sim 150$ 天左右的显著季节内变化, 用同样的方法可以发现 ZWS 在 2017 年 10 月—2018 年 10 月

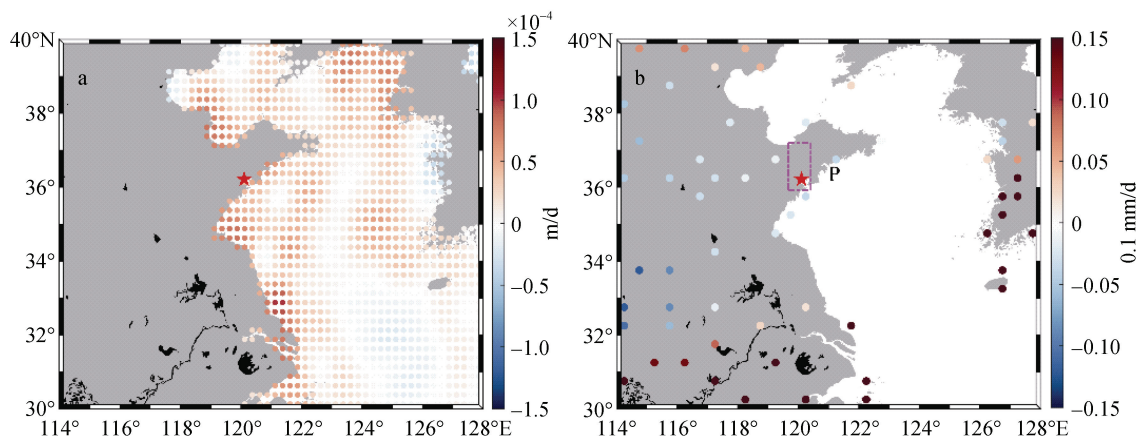


图 6 观测期间, 海平面异常趋势分布(a), 地面降水量趋势分布(b)

Fig. 6 Distribution of sea level anomaly trend (a) and surface precipitation anomaly trend (b) during the observation period

注: 子图 a、b 中红色五角星为监测系统位置, 子图 b 中品红色虚线框内区域代表大沽河流域

期间存在约 5 个月左右的显著变化周期, 与 RWL 的变化对应, 进一步通过带通滤波分别获取 RWL 和 ZWS 异常 110~150 d 信号, 二者相关系数为-0.60, $P < 0.05$ 。RWL 的季节内变化主要受纬向风的影响, 西(东)风将驱动水体向河口东(西)岸输运, 西岸出水量减少(增加), 致使监测系统观测到 RWL 下降(上升)。

3) 在观测期间, 月平均 RWL 还呈现显著下降趋势, 约为 -0.53×10^{-2} m/月, 主要受到大沽河流域内降水减少的影响, 本文推测降水量的减少对 RWL 下降的影响可以分为两方面: 其一是降水减少直接导致流域内径流减少, 另外降水减少还将使得流域内人类生产生活对大沽河河水汲取量增加。

本文通过对大沽河口长期、连续水深观测的研究, 揭示了河口的潮汐过程, 发现了观测期间水位呈现的季节内尺度变化以及水位的变化趋势, 针对影响水位变化的动力因素得到了一些初步结论, 受到观测资料时间长度和分析数据种类的限制, 需进一步结合观测资料分析探究。

参考文献:

- [1] Alley R B, Clark P U, Huybrechts P, et al. Ice-sheet and sea-level changes[J]. Science, 2005, 310(5747): 456-460.
- [2] 王芳. 海平面上升的影响及损失预测[J]. 上海环境科学, 1998, 17(10): 9-11.
Wang Fang. Impact of sea level rise and loss forecast[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1998, 17(10): 9-11.
- [3] 韩小燕, 潘晓东, 马林芳, 等. 温州沿岸平均海平面变化特征分析[J]. 海洋预报, 2011, 28(1): 66-71.
Han Xiaoyan, Pan Xiaodong, Ma Linfang, et al. Analysis on

- the characteristics of the average sea level change along the coast of Wenzhou[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(1): 66-71.
- [4] 于华. 气候变暖背景下风场对江苏近海海平面的影响研究[D]. 江苏南京: 南京信息工程大学, 2014.
Yu Hua. Research on the influence of wind field on the sea level of Jiangsu coast under the background of climate warming[D]. Nanjing, Jiangsu Province: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.
- [5] 宗虎城, 章卫胜, 张金善. 海平面上升对黄浦江风暴潮水位影响研究[J]. 人民长江, 2014, 45(9): 1-3.
Zong Hucheng, Zhang Weisheng, Zhang Jinshan. Research on the impact of sea level rising on the storm surge level of the Huangpu River[J]. Yangtze River, 2014, 45(9): 1-3.
- [6] 徐晓晓. 海岸带地区风暴潮灾害风险研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2015.
Xu Xiaoxiao. Research on the disaster risk of storm surge in coastal zone[D]. Qingdao, Shandong Province: Ocean University of China, 2015.
- [7] 王舒鸿, 郭越, 李逸超, 等. 城市海岸带环境管理模式优化研究——以青岛市胶州湾为例[J]. 中国环境管理, 2019, 11(2): 69-75, 79.
Wang Shuhong, Guo Yue, Li Yichao, et al. Research on optimization of urban coastal zone environmental management mode—Taking Jiaozhou Bay in Qingdao as an example[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(2): 69-75, 79.
- [8] 周天华, 陈宗镛, 田晖, 等. 近几十年来中国沿岸海面变化趋势的研究[J]. 海洋学报(中文版), 1992, 14(2): 1-8.
Zhou Tianhua, Chen Zongyong, Tian Hui, et al. Research on the changing trend of China's coastal sea surface in recent decades[J]. Haiyang Xuebao, 1992, 14(2): 1-8.
- [9] 周中刚, 蒋国荣, 沈春, 等. 中国近海平均海平面计算方法的分析与比较[J]. 海洋预报, 2013, 30(5): 37-43.

- Zhou Zhonggang, Jiang Guorong, Shen Chun, et al. Analysis and comparison of the calculation methods of the Coast Areas in China mean sea level[J]. *Marine Forecasts*, 2013, 30(5): 37-43.
- [10] 刘聚, 暴景阳, 许军, 等. 中国香港验潮站 1962-2017 年水位相对变化分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(7): 1065-1072.
- Liu Ju, Bao Jingyang, Xu Jun, et al. Analysis of the relative change of water level at tide gauge station in Hong Kong, China from 1962 to 2017[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1065-1072.
- [11] 高宗军, 宋翠玉, 蔡玉林, 等. 大沽河流域水文要素监测体系建设与实践[M]. 北京: 水利水电出版社. 2017: 1-133.
- Gao Zongjun, Song Cuiyu, Cai Yulin, et al. Construction and practice of hydrological elements monitoring system in Dagou River basin[M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press. 2017: 1-133.
- [12] 盛茂刚, 黄修东, 左林远, 等. 大沽河流域近 60 年降水量时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(2): 65-68.
- Sheng Maogang, Huang Xiudong, Zuo Linyuan, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of precipitation in Dagou River basin for recent 60 years[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27(2): 65-68.
- [13] 王艳玲, 崔文连, 刘峰, 等. 青岛市大沽河河口区生态环境现状研究[J]. *中国环境监测*, 2007, 23(3): 77-81.
- Wang Yanling, Cui Wenlian, Liu Feng, et al. Study on the ecological environment status of Dagou River Estuary in Qingdao[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(3): 77-81.
- [14] 柳新伟, 秦志华. 大沽河河口滩涂植被群落动态特征研究[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 27(3): 241-243.
- Liu Xinwei, Qin Zhihua. Study on dynamic characteristics of tidal flat vegetation communities in Dagou River Estuary[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University(Natural Science)*, 2010, 27(3): 241-243.
- [15] 张晓红, 汪进生, 刘旭东. 2014 年秋季大沽河河口浮游植物多样性研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(7): 129-131.
- Zhang Xiaohong, Wang Jinsheng, Liu Xudong. Study on phytoplankton diversity of Dagou River estuary in autumn 2014[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(7): 129-131.
- [16] 刘娜, 印萍, 朱志刚, 等. 胶州湾大沽河河口表层沉积物中多环芳烃分布特征、来源及生态风险评价[J]. 2016, 35(6): 831-837.
- Liu Na, Yin Ping, Zhu Zhigang, et al. Distribution characteristics, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Dagou River estuary, Jiaozhou Bay[J]. 2016, 35(6): 831-837.
- [17] 娄安刚, 王学昌, 吴德星, 等. 胶州湾大沽河口邻近海域海水水质预测[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(1): 54-56.
- Lou Angang, Wang Xuechang, Wu Dexing, et al. Prediction of sea water quality in the adjacent sea area of Dagou River estuary in Jiaozhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(1): 54-56.
- [18] 韩彬, 曹磊, 李培昌, 等. 胶州湾大沽河河口及邻近海域海水水质状况与评价[J]. *海洋科学*, 2010, 34(8): 46-49.
- Han Bin, Cao Lei, Li Peichang, et al. Status and evaluation of sea water quality at Dagou River estuary in Jiaozhou Bay and adjacent seas[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(8): 46-49.
- [19] 韩树宗, 赵瑾, 魏福宝, 等. 胶州湾大沽河口洪水期三维水沙数值模拟研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(5): 689-694.
- Han Shuzong, Zhao Jin, Wei Fubao, et al. Three-dimensional numerical simulation of water and sediment in Dagou estuary of Jiaozhou Bay in flood period[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(5): 689-694.
- [20] 徐统. 径流、潮流耦合作用下大沽河河口悬沙输移扩散数值研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Xu Tong. Numerical study on suspended sediment transport and diffusion in the Dagou River estuary under the coupling action of runoff and tidal current[D]. Qingdao, Shandong Province: Ocean University of China, 2014.
- [21] 郭迢. 海湾河口泥质滩涂海水—地下水相互交换定量化研究—以胶州湾大沽河河口某剖面为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- Guo Tiao. Quantitative study on the exchange of seawater and groundwater in the muddy tidal flat of the gulf estuary-taking a section at the mouth of Dagou River in Jiaozhou Bay as an example[D]. Beijing: Geoscience University of China, 2017.
- [22] Xiong G, An Q, Fu T, et al. Evolution analysis and environmental management of intruded aquifers of the Dagou River Basin of China[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 719: 137260.
- [23] 尹则高, 徐统, 王振鲁, 等. 潮流和径流作用下大沽河河口区水动力特性研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2015, 45(7): 119-124.
- Yin Zegao, Xu Tong, Wang Zhenlu, et al. Dagou estuary hydrodynamic characteristic research under the coupled action of runoff and tide[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(7): 119-124.
- [24] 李兆钦, 李欣, 孙利元, 等. 大沽河河口底层海水溶解氧浓度分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(9): 23-33.
- Li Zhaoqin, Li Xin, Sun Liyuan, et al. Analysis of the

- dissolved oxygen concentration in bottom of seawater in the estuary of Dagu River[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(9): 23-33.
- [25] Fofonoff N P, Millard R C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater[J]. Unesco Technical Papers in Marine Science, 1983, 44: 1-53.
- [26] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [27] Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on gauge observations[J]. Journal of Hydrometeorology, 2002, 3(3): 249-266.
- [28] Fan Y, Dool H. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948—present[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D1): JD008470.1-JD008470.7.
- [29] 吴炯, 黄伟, 陈发虎. 1951—2012 年中国大陆 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$ 高分辨率月气温和降水量格点数据集的建立及其初步应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(2): 213-220.
Wu Xian, Huang Wei, Chen Fahu. Construction and application of monthly air temperature and precipitation gridded datasets with high resolution ($0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$) over China during 1951—2012[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(2): 213-220.
- [30] 姚武川, 姚天任. 经典谱估计方法的 MATLAB 分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(4): 45-47.
Yao Wuchuan, Yao Tianren. Analyzing classical spectral estimation by MATLAB[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2000, 28(4): 45-47.
- [31] 裴文斌, 牛桂芝, 董海军. 余水位及潮汐差分方法[J]. 水道港口, 2007, 28(6): 439-443.
Pei Wenbin, Niu Guizhi, Dong Haijun. Residual water level and tide difference method[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(6): 439-443.
- [32] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [33] 鲍道阳, 朱建荣. 近 60 年来长江河口河势变化及其对水动力和盐水入侵的影响 II. 水动力[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 1-15.
Bao Daoyang, Zhu Jianrong. The effects of river regime changes in the Changjiang Estuary on hydrodynamics and salinity intrusion in the past 60 years II. Hydrodynamics[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(2): 1-15.
- [34] Sneyers R. On the statistical analysis of series of observations, WMO Technical Note No. 143[R]. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1990.
- [35] Piecuch C G, Bittermann K, Kemp A C, et al. River-discharge effects on United States Atlantic and Gulf coast sea-level changes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(30): 7729-7734.
- [36] Jay D A, Leffler K, Degens S. Long-term evolution of Columbia River tides[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011, 137(4): 182-191.
- [37] Ralston D K, Talke S, Geyer W R, et al. Bigger tides, less flooding: Effects of dredging on water level in the Hudson River estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(1): 196-211.
- [38] 杨昊, 欧素英, 姚鹏, 等. 河口区斜压梯度对余水位的累积影响及其机制探讨[J]. 海洋学报, 2019, 41(1): 21-31.
Yang Hao, Ou Suying, Yao Peng, et al. The cumulative effect of baroclinic pressure gradient on residual water level in estuary area and its mechanism[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(1): 21-31.
- [39] 姜德娟, 王晓利. 胶东半岛大沽河流域径流变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 965-972.
Jiang Dejuan, Wang Xiaoli. Variation of runoff volume in the Dagu River Basin in the Jiaodong peninsula[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 965-972.

Analysis of the characteristics of water level variation in Dagu River estuary

LAI Qiu-yu¹, LIU Zi-zhou¹, ZHAI Fang-guo¹, GU Yan-zhen¹, CHEN Dong²,
JIANG Qing-yan²

(1. College of Ocean and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Received: Aug. 21, 2020

Key words: Dagu River estuary; water level variation; zonal wind; precipitation

Abstract: This study analyzed the characteristics of water level variation in the Dagu River estuary and its influencing factors combined with the wind field, precipitation, and satellite altimetry data based on the depth observation data of Dagu River estuary from November 8, 2016 to June 29, 2019. Results showed that (1) the water level variation in Dagu River estuary was dominated by a normal semidiurnal tidal process and the M2 subtidal was dominant. (2) The residual water level (RWL) had a significant intraseasonal period of approximately 110–150 days, which was mainly affected by zonal wind, i.e., the eastward (westward) wind would drive water transport to the east (west), decreasing (increasing) the water volume at the west bank at which the monitoring system was located, leading to the decrease (increase) in RWL. (3) During the observation period, the RWL exhibited a significant downward trend, approximately -0.53×10^{-2} m/month, which was mainly affected by the decrease in precipitation in the Dagu River basin.

(本文编辑: 赵卫红)