

河北曹妃甸沿海海平面变化分析

董美玲, 邵 杰, 冯俊岭, 于道永, 吴 海

(中国地质调查局 自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201)

摘 要:采用回归分析方法,对曹妃甸现有海平面数据与邻近的塘沽沿海相对应的海平面数据进行相关分析,用建立的回归方程及塘沽历史海平面时间序列,推算了曹妃甸历史海平面时间序列,进而分析了曹妃甸海平面变化特征,同时预测了曹妃甸未来海平面可能上升的高度。分析结果表明:曹妃甸沿海海平面 1951—2013 年呈长期波动上升趋势,变化年速率为 3.2 mm/a;1980—2013 年上升加快,变化年速率为 6.6 mm/a,高于同期中国沿海海平面的上升速率;20 世纪 90 年代至 2013 年上升更进一步加快,变化年速率为 11.1 mm/a。可为曹妃甸沿海城市规划、滨岸工程设计和防灾减灾提供参考。

关键词:曹妃甸;海平面;回归分析;年速率;趋势预测

中图分类号:P731.3

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)03-0210-07

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.03.006

引用格式: DONG M L, SHAO J, FENG J L, et al. Analysis on the sea level changes of CaoFeidian in Hebei Province[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(3): 210-216. 董美玲, 邵杰, 冯俊岭, 等. 河北曹妃甸沿海海平面变化分析[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 210-216.

河北曹妃甸位于环渤海中心地带、唐山南部,是唐山市打造国际航运中心、国际贸易中心、国际物流中心的核心组成部分。曹妃甸“面向大海有深槽,背靠陆地有浅滩,地下储有大油田,腹地广阔有支撑”^[1],曹妃甸在建设深水大港,发展临港产业方面具备巨大优势。曹妃甸作为京津冀一体化发展的重要沿海城市,其城市规划、滨岸工程和防灾减灾工程的设计尤为重要,而曹妃甸沿岸的海平面变化分析可作为规划和工程设计的重要参考。但是曹妃甸水文气象监测站建成较晚,数据资料序列短,不利于做长趋势分析。目前,国内对验潮资料较短的沿海地区,在进行海平面调查评价时,均用邻近长期验潮站的数据直接代替。为提高数据精度,我们采用曹妃甸与塘沽相对应时段资料的回归方程和塘沽验潮站历史海平面序列资料,推算曹妃甸历史海平面序列资料,并以此为基础数据,对曹妃甸沿海海平面变化进行分析预测。

1 海平面序列回归分析

使用回归分析法,2007-01—2012-12 曹妃甸验潮站和塘沽验潮站 2007-01—2012-12 同时期的月平均海平面序列数据作分析,用曹妃甸站 2012-01—12 的海平面序列数据作回归误差检验。在对两组数据做回归分析时,用相关系数来表征 2 个线性变量的相关程度或者密切程度,相关分析指出,只有当两个变量的相关系数的绝对值达到一定数值时,才能认为相关性显著^[2]。只有当两组数据显著相关时,才能建立二者的回归方程,方可用回归直线近似表示它们之间的关系^[3]。能否用塘沽历史海平面序列推算出曹妃甸历史海平面序列,取决于能否建立曹妃甸对塘沽海平面序列的一元回归方程。

1.1 相关分析计算

将曹妃甸验潮站与塘沽验潮站 2007—2011 年相匹配的月平均海平面序列(图 1)代入相关分析计算公

收稿日期:2019-05-16

作者简介:董美玲(1986-),女,工程师,博士,主要从事地质学及海平面变化方面研究. E-mail: dml_happy@126.com

(陈 靖 编辑)

式,计算出两站月平均海平面序列的相关系数为 0.993。本次分析抽样数量为 60,自由度为 57,在相关系数显著性检验表中可查得,在 $\alpha=0.1, \alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 这 3 种显著水平下,相关系数达到显著的最小值分别为 0.216 和 0.256 和 0.333 时,才能确定两个变量的相关性显著。本文所计算的月平均海面序列的相关系数远远大于显著性最小值,为显著相关,因此可以建立曹妃甸与塘沽两站对应海平面序列的回归方程。

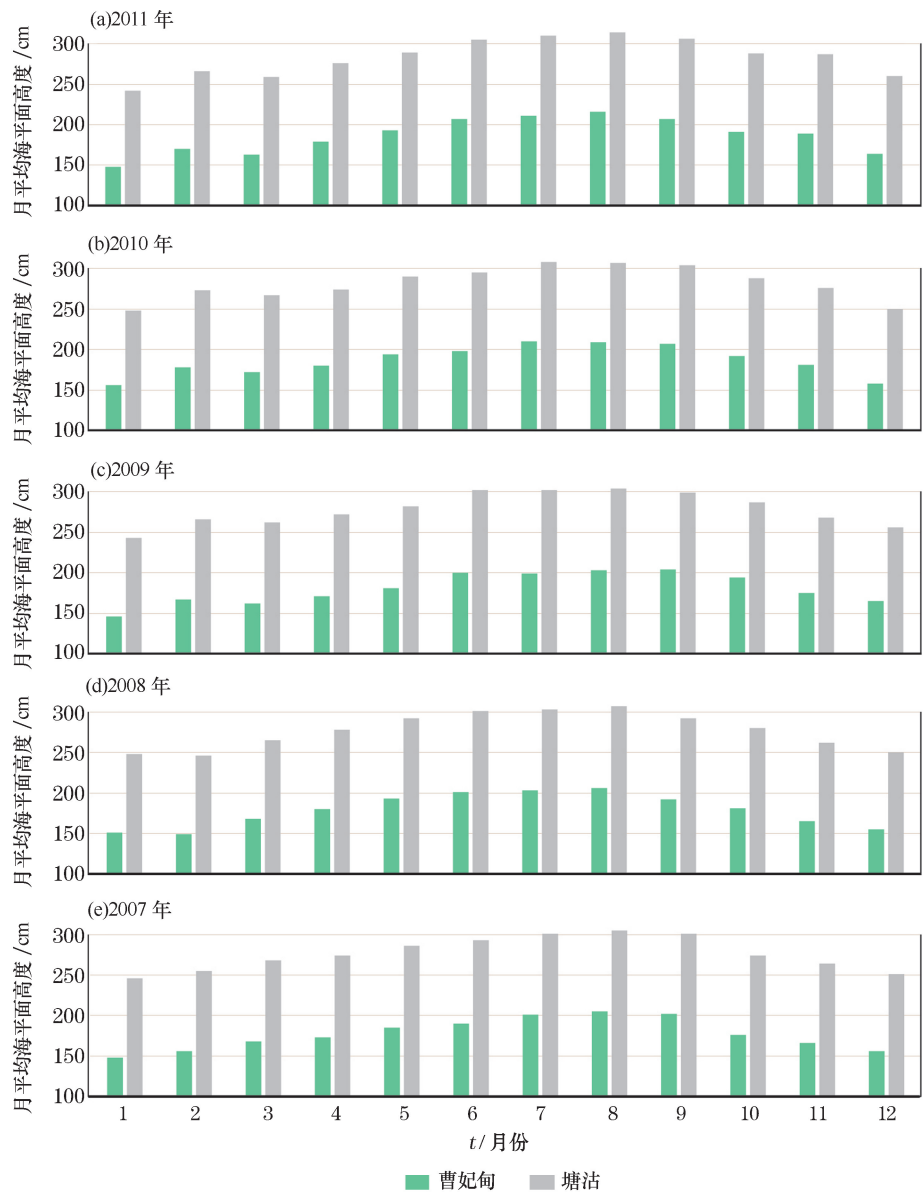


图 1 2007—2011 年曹妃甸和塘沽月平均海面数据对比

Fig.1 Comparison of the monthly mean sea level between the Caofeidian and the Tanggu coastal areas from 2007 to 2011

1.2. 建立回归方程

曹妃甸与塘沽海平面序列二者关系符合线性方程,根据最小二乘法原理^[4-5],由 2007—2011 年曹妃甸和塘沽验潮站月平均海平面序列数据,计算得出曹妃甸对塘沽月平均海面的回归方程:

$$y = -79.59 + 0.94x \tag{1}$$

图 2 是曹妃甸站相对塘沽站月平均海平面散点图。由图 2 可以看出,曹妃甸月平均海平面随塘沽月平均海平面的增大而增大,且它们之间大致成线性关系,月平均海平面回归直线斜率为 0.94,当塘沽月平均海面每增加 1 cm 时,曹妃甸月平均海面将增加 0.94 cm,由此可见,在同等条件下,塘沽的风暴潮将比曹妃甸风暴潮更加猛烈一些。

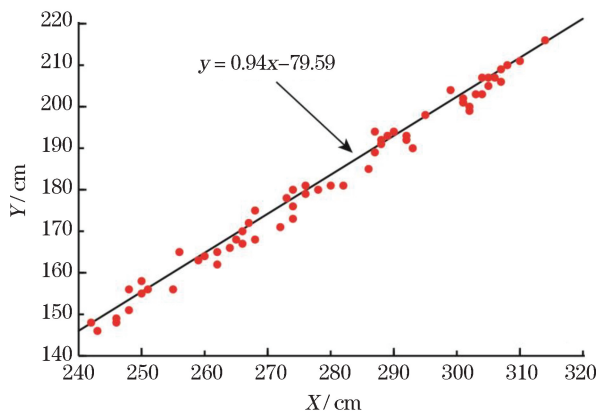


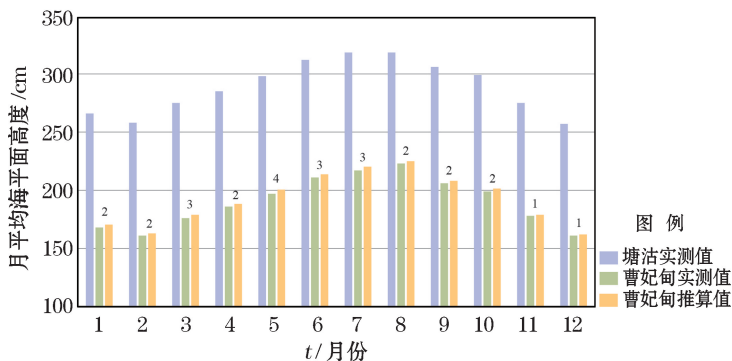
图 2 曹妃甸与塘沽月平均海平面序列散点图及回归直线

Fig.2 The scatter plots and regression lines of monthly mean sea level in the Cao Feidian and the Tanggu coastal areas

2 回归分析误差检验

2.1 月平均海平面序列误差检验

用塘沽验潮站 2012 年月平均海平面数据及回归方程式(1),推算出曹妃甸 2012 年月平均海平面序列,并与实测值进行对比(图 3)。由图 3 可知,实测值与推算值二者相差较小,差值范围为 1~4 cm,平均误差为 2.3 cm,推算值比实测值平均偏高 2.3 cm。计算了 2012 年年平均海面,实测值为 190 cm,推算值为 193 cm,二者差 3 cm。绘出了曹妃甸沿海月平均海平面变化曲线(图 4),可知推算值与实测值吻合较好。



注:图中数字表示实测值与推算值差值

图 3 2012 年曹妃甸月平均海面实测值与推算值对比

Fig.3 Comparison of between the measured and the calculated monthly mean sea level values in the Cao Feidian coastal area in 2012

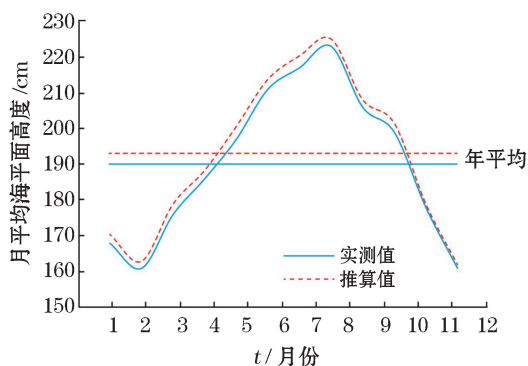


图 4 2012 年曹妃甸沿海月平均海面变化对比

Fig.4 A comparative map of monthly mean sea level change in the Cao Feidian coastal area in 2012

2.2 回归分析检验

由回归分析检验可得出结论:本文所建立的曹妃甸站对塘沽站月平均海平面序列的回归方程可以信赖,依据此方程和塘沽站历史海平面序列数据推算的曹妃甸历史海平面序列数据与实测值比较接近,因此,以此推算数据为依据所做的海平面变化分析与预测是可信的,可作为城市规划、滨岸工程设计和防灾减灾的依据。

3 曹妃甸沿海海平面变化分析

将塘沽验潮站 1951—2006 年年平均海平面序列(图 5)代入回归方程式(1),就可推算出曹妃甸站相应时段的年平均海平面序列,连同 2007—2013 年实测年平均海面,就可得到曹妃甸验潮站 1951—2013 年年平均海面序列(图 5)。

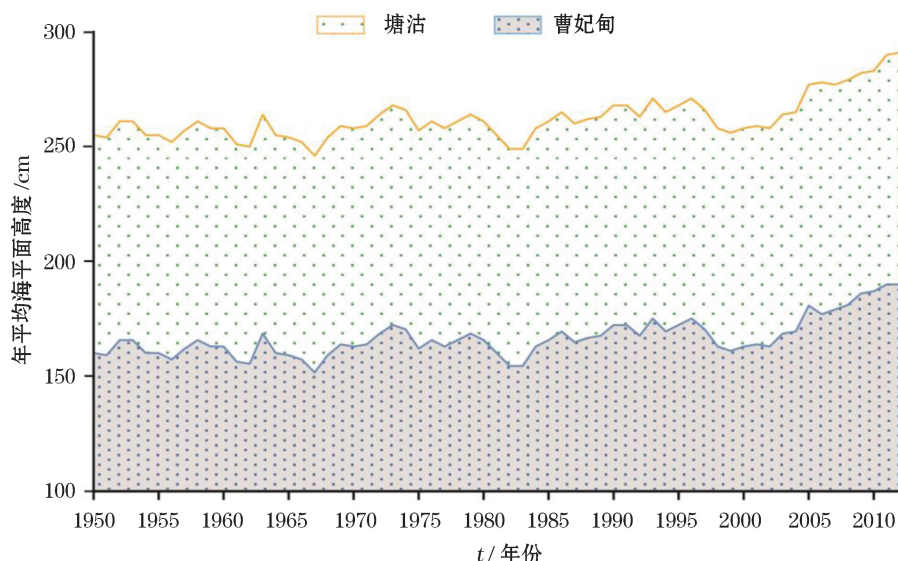


图 5 1951—2013 年塘沽和曹妃甸年平均海平面序列

Fig.5 The time series of annual mean sea level in the Tanggu and the Cao Feidian coastal areas from 1951 to 2013

以曹妃甸 1951—2013 年的年平均海平面为样本,并看作是时间的函数,根据最小二乘法原理,线性变化年速率可由一元回归方法求得^[4-5],通过对不同时间段海平面序列的线性回归分析,得出相应时间段的线性变化模型为:

- 1) 1951—2013 年, $H(t) = -10.08 + 0.32t$, 计算出的海平面长期变化年速率为 3.2 mm/a;
- 2) 1980—2013 年, $H(t) = -11.61 + 0.66t$, 计算出的海平面长期变化年速率为 6.6 mm/a;
- 3) 1994—2013 年, $H(t) = -11.65 + 1.11t$, 计算出的海平面长期变化年速率为 11.1 mm/a。

图 6 绘制了曹妃甸 1951—2013 年年平均海面变化情况。从图 6 中可知,1951—2013 年,曹妃甸沿海海平面呈长期波动上升趋势,变化年速率为 3.2 mm/a;1980—2013 年,上升加快,变化年速率为 6.6 mm/a,高于 2013 年中国海平面公报中公布的同期中国沿海海平面的上升速率 2.9 mm/a。20 世纪 90 年代至 2013 年上升更进一步加快,变化年速率为 11.1 mm/a。曹妃甸海平面变化与塘沽同时段海平面变化具有一致性,从年际起伏波动到长期变化趋势基本相同,只是量值略有差异。

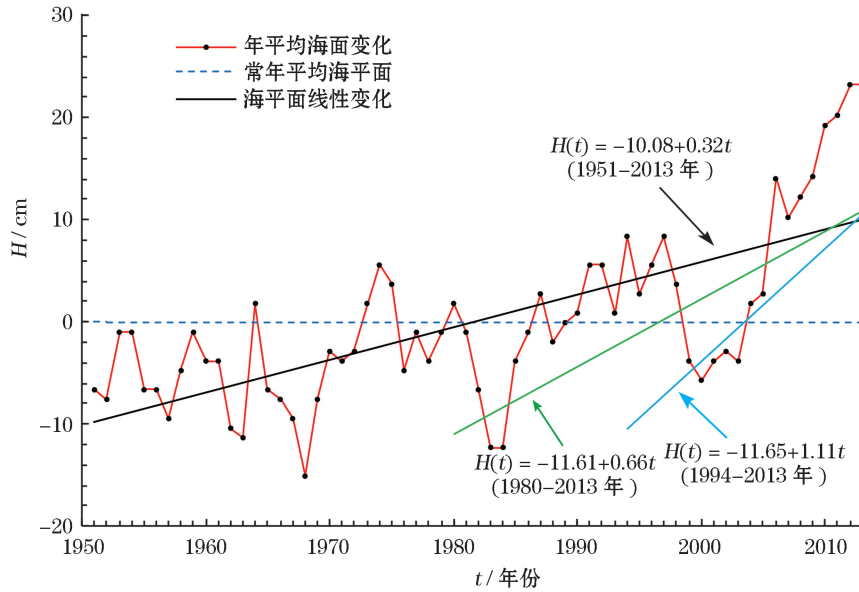


图6 曹妃甸沿海年平均海平面距平变化分析图

Fig.6 The anomaly analysis of annual mean sea level change in the Caofeidian coastal area

4 曹妃甸海平面变化预测

4.1 预测模型

张锦文从温室效应引起的海洋热膨胀和中国沿海海平面的趋势性变化两个方面提出未来的海平面变化的预测模型^[6]:

$$H(t) = Z(t) + \zeta(t'), \quad (2)$$

式中: $Z(t)$ 为某一时间段的海平面上升或下降的量值, 选用 Wigley 等^[7]提出的海平面预测方程计算:

$$Z(t) = [4.13 + 2.65F(t)]T(t)K^{0.221}, \quad (3)$$

式中: K 为海洋热扩散系数, 取值范围为 $0.5 \sim 3.0$, 本研究取 $0.634, 1.2, 2.0$ 和 3.0 , 单位是 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $F(t)$ 为温室效应作用下的辐射强迫量; $T(t)$ 为 CO_2 排放浓度增加引起的温度变化。 $F(t)$ 和 $T(t)$ 可写为 CO_2 排放浓度 $C(t)$ 的函数^[6]:

$$F(t) = a_0 + b \ln[C(t)/270.0], \quad (4)$$

式中: $a_0 = 1.81 \text{ W/m}^2$; $b = 2.95 \text{ W/m}^2$ 。

$$T(t) = \beta t \ln[\gamma t C(t)/270.0] - 0.5, \quad (5)$$

式中: $\beta = 0.00593$; $\gamma = 0.0114$ 。

$$C(t) = C_0 \exp[Bt \exp(\alpha t)], \quad (6)$$

式中: $B = 5.59 \times 10^{-4}$; $\alpha = 8.69 \times 10^{-3}$; $C_0 = 270.0 \times 10^{-6}$; t 为自 1850 年后的年序数。

利用式(6)计算的 CO_2 排放浓度与 Wigley 等^[8-10]估计出的结果是一致的。根据 Wigley 等^[7]估计, 工业革命前 CO_2 排放浓度为 270.0×10^{-6} , 当时的温度比 1980 年前后的温度低 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 为了计算海平面变化, 把 1980 年的温升视为零, 便于计算相对于 1980 年的海平面升高值。

$\zeta(t')$ 为局部岸段因地壳垂直变化和地面沉降因素引起的相对海平面变化, 计算式为:

$$\zeta(t') = (K' - 1.8)t', \quad (7)$$

式中: K' 为某一地点(或岸段)相对海平面变化速率, 采用曹妃甸 1951—2013 年的年速率 3.2 mm/a ; 参数

1.8 为全球海平面上升速率,单位为 mm/a^[11], t' 为自 1980 年后的年序数。

将式(3)、式(7)代入式(2),可得某一地点(或岸段)相对海平面上升的预测模型:

$$H(t) = [4.13 + 2.65F(t)] T(t)K^{0.221} + (K' - 1.8) t'.$$
 (8)

4.2 预测结果

用联合模型式(8)计算的曹妃甸相对于 1980 年海平面上升预测值见表 1 和图 7。曹妃甸沿海未来海平面上升趋势仍将延续,到 2020 年,将较 1980 年海平面上升 12~15 cm;到 2030 年,将上升 16~20 cm;到 2050 年,将上升 25~32 cm;到 2100 年,将上升 65~85 cm。

表 1 未来曹妃甸海平面上升预测值(cm)
Table 1 The prediction of the sea level rising in the Caofeidian coastal area in the future (cm)

K	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
0.634	12.1	16.0	25.3	64.9
1.2	13.1	17.3	27.6	72.1
2.0	14.0	18.5	29.7	78.8
3.0	14.8	19.6	31.6	84.6

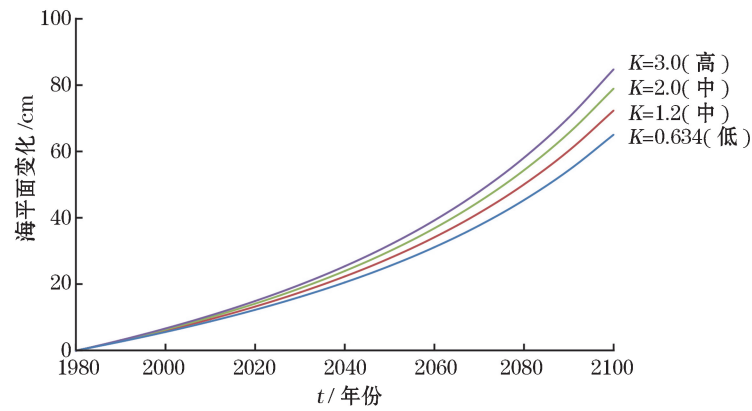


图 7 未来曹妃甸沿海海平面上升预测曲线
Fig.7 Curves of the predicted sea level rising in the Caofeidian coastal area in the future

5 结 论

通过分析曹妃甸和塘沽两验潮站相对应时段的海平面数据,预测了曹妃甸沿海海平面高度变化,得出结论:

- 1)曹妃甸与塘沽实测海平面序列回归分析与误差检验表明,推算的曹妃甸历史海平面序列可信度较高,可作为基础数据,进行海平面变化分析与预测。
- 2)曹妃甸沿海 1951—2013 年海平面呈波动上升趋势,平均上升速率为 3.2 mm/a,20 世纪八九十年代上升进一步加剧。
- 3)曹妃甸沿海未来海平面上升趋势仍将延续,到 2030 年,将较 1980 年海平面上升 16~20 cm;到 2050 年,将上升 25~32 cm;到 2100 年,将上升 65~85 cm。

影响海平面变化的因素复杂多样,本文选取的模型因受 CO₂ 和其他温室气体排放量的变化以及地壳升降变化和地面沉降等不确定因素的影响,这种对于未来海平面变化的预测也带有一定的不确定性,仅作为曹妃甸沿海城市规划、滨岸工程设计和防灾减灾的一种参考。

参考文献 (References):

- [1] LIU L H, YUE H Z. Discussion on water supply safety countermeasures in Caofeidian circular economy demonstration area[J]. Hebei Water Resources, 2011(2): 18. 刘连海, 岳洪章. 曹妃甸循环经济示范区供水安全对策探讨[J]. 河北水利, 2011(2): 18.
- [2] HE C X, LONG W J, ZHU F F. Probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 79. 何春雄, 龙卫江, 朱锋峰. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 79.
- [3] SUN W S. Statistics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 243-256. 孙文生. 统计学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 243-256.
- [4] YU D Y. Qinhuangdao sea level change and earth crust rise and subsidence[J]. Haiyang Xuebao, 1998, 20(3): 76-81. 于道永. 秦皇岛沿岸海平面变化与地壳升降[J]. 海洋学报, 1998, 20(3): 76-81.
- [5] CHEN Z Y. Tidalogy[M]. Beijing: Science Press, 1980: 224-231. 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 224-231.
- [6] ZHANG J W. Estimate model of MSL change along the coast of China[J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(4): 1-9. 张锦文. 中国沿海海平面的上升预测模型[J]. 海洋通报, 1997, 16(4): 1-9.
- [7] WIGLEY T M L, SCHLESINGER M E. Analytical solution for the effect of increasing CO₂ on global mean temperature[J]. Nature, 1985, 315: 649-652.
- [8] WIGLEY T M L, RAPER S C B. Thermal expansion of sea water associated with global warning[J]. Nature, 1987, 330: 127-131.
- [9] WIGLEY T M L. Future CFC concentrations under the Montreal Protocol and their greenhouse effect implications[J]. Nature, 1988, 335: 333-335.
- [10] WIGLEY T M L, RAPER S C B. Natural variability of the climate system and detection of the greenhouse effect[J]. Nature, 1990, 344: 324-327.
- [11] PACHAURI R K, MEYER L A, et al. IPCC 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report[R]. Geneva, Witzerland: Ontribution of Working Groups I,II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014: 151.

Analysis on the Sea Level Changes in the Caofeidian Coastal Area of Hebei Province

DONG Mei-ling, SHAO Jie, FENG Jun-ling, YU Dao-yong, WU Hai

(Cores and Samples Center of Land & Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China)

Abstract: The correlation analysis is carried out between the existing sea level data in the Caofeidian coastal area and the corresponding data in the adjacent Tanggu coastal area by means of regression analysis and a regression equation is established. By using the regression equation and the historical sea level time series in the Tanggu coastal area, the historical sea level time series in the Caofeidian coastal area is calculated and the characteristics of sea level change in the Caofeidian coastal area are analyzed. The results show that the sea level in the Caofeidian coastal area showed an undulated rising trend from 1951 to 2013, with an annual change rate of 3.2 mm/a. From 1980 to 2013 the sea-level rising accelerated and the annual change rate was 6.6 mm/a, which was higher than the rates of sea-level rising in the coastal areas of China during the same period. From the 1990s to 2013 and the sea-level rising accelerated further and the annual change rate reached to 11.1 mm/a. The possible height of the future sea level rising in the Caofeidian coastal area is predicted, which can provide a reference for city planning, coastal engineering design and disaster prevention and mitigation in the Caofeidian coastal area.

Key words: Caofeidian; sea level; regression analysis; annual rate; trend prediction

Received: May 16, 2019