

我国东部沿海地区理论最低潮面 与平均潮差关系研究*

杨同军^{1, 2, 3} 王义刚¹ 黄惠明^{1, 2} 袁春光¹

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 南京 210029;
3. 中国电力工程顾问集团 东北电力设计院 长春 130021)

提要 基于理论最低潮面与平均潮差的内在联系, 利用我国东部沿海 17 个验潮站连续 369 天的逐时潮位资料, 进行调和与分析得到相应的调和常数, 并计算理论最低潮面。藉此, 就理论最低潮面与年平均潮差及月平均潮差之间的关系进行统计分析。结果表明, 理论最低潮面与年平均潮差及月平均潮差之间均具有较高的相关性, 实际工程中可以利用此关系近似地确定当地理论最低潮面。

关键词 理论最低潮面; 平均潮差; 平均海平面; 调和与分析; 统计分析

中图分类号 P731.23

在进行大地测量、海洋测绘、海岸带开发利用等各项生产活动时, 测得的高程或者潮位数据必须有一个固定的起算面, 这个面就称为“基准面”。基准面的选取与实际需要直接相关, 海图深度基准面(刘雁春, 2000; Van Der Wal *et al.*, 2003; 暴景阳等, 2006)便是为了保证航海的安全和航道的通行而选取的, 它与平均海平面的距离叫做基准深度(梁振英, 1999; 吴德安等, 2006)。海图上标明的数值, 就是当地理论可能最小水深, 而大多数情况下, 实际水深往往是大于这个值的。海图深度基准面对通航安全、海道测量等活动影响甚大, 稍有差错, 可能造成巨大事故损失。我国在 1956 年之前曾采用过多种海图深度基准面, 1956 年以后统一采用“理论最低潮面”(旧称“理论深度基准面”)作为海图深度的基准面(董鸿闻, 1997; 吴德安等, 2006)。

我国 1998 年发布的《海道测量规范》中规定的海图深度基准面为 13 个分潮组合的理论最低潮面, 对于具体的算法, 由于规范中并没有具体说明, 很多

学者进行了深入的研究。殷晓冬(2001)、吴华林等(2002)、王骥等(2002)、暴景阳(2003, 2006, 2009)等分别就规范中定义的理论最低潮面进行了计算模型的探讨分析及模型精度的检验, 得到了较好的结果; 汪家君(1986a, b)、陈楠(1999)、王艳玲(2000)、吴德安等(2006)利用回归分析的方法, 建立了理论最低潮面与其他深度基准面或部分分潮振幅的线性关系, 得到的相关系数较高, 可用于确定理论最低潮面的位置。但是, 上述方法中前者求解长周期分潮 S_a 、 S_{Sa} 需要有较大时间尺度的观测资料; 后者的分潮振幅或深度基准面的关系若无长期实测资料也难以确定, 加之我国海岸带区域广阔, 海岸线绵延曲折, 潮波特征复杂多变, 各地区的理论最低潮面往往存在较大差异, 且后者主要对局部地区的理论最低潮面进行探讨, 存在一定的区域局限性, 相应理论最低潮面与其它基准面或分潮振幅的关系在其它区域的适用性还有待进一步检验。根据《海道测量规范》中的定义, 理论最低潮面是 13 个分潮组合下的潮水位最低值, 即

* 国家科技支撑计划课题, 2012BAB03B01 号; 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目, 2010CB429002 号; 河海大学中央高校基本科研业务费项目, 2011B06014 号; 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项, YN912001 号; 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放基金: 长江口北槽深水航道整治工程对盐水入侵影响研究。杨同军, 硕士, E-mail: xiaofeizaochong@163.com

通讯作者: 黄惠明, 博士, 副研究员, E-mail: hhm8053@126.com

收稿日期: 2011-12-05, 收修改稿日期: 2012-04-07

理论最低潮面与潮差之间存在内在联系。

现阶段,我国沿海的常设验潮站的数量相当有限,且受制于工期、投资、保密等各方面因素的制约,海洋工程实际中长期的验潮资料尤其是 1 年以上的潮位资料往往难以获得。本文基于理论最低潮面与平均潮差之间内在的联系,利用中国东部沿海 17 个验潮站的潮位资料,定量分析了理论最低潮面和平均潮差之间的关系,并对结果进行精度分析及检验。

1 资料及理论方法

根据《海道测量规范》中对理论最低潮面的定义,13 个分潮组合下的理论最低潮面的原始表达式为:

$$L = -\min \left[\sum_{i=1}^{13} f_i h_i \cos(\sigma_i t + V_{0i} + u_i - g_i) \right] \quad (1)$$

式中: L 为理论最低潮面在平均海平面以下的距离; h_i 、 g_i 分别为分潮的振幅和迟角,即调和常数; f_i 为分潮的交点因子; σ_i 为分潮的角速率; $V_{0i} + u_i$ 为分潮的初相角。

由式(1)可知, L 的变化受多个天文因素的影响,其中 $\cos(\sigma_i t + V_{0i} + u_i - g_i)$ 是引起分潮周期性波动的项,各分潮的叠加效应引起潮差随时间的变化, $f_i h_i$ 则决定着潮差的大小,由此可见,理论最低潮面的大小主要取决于各分潮的振幅大小,各分潮的叠加结果的外在表现就是潮差,即理论最低潮面与潮差之间有内在联系,并且理论最低潮面位于平均海平面以下,即 L 的大小与半潮差直接相关。一般情况下, L 大于年平均潮差的一半。

文章用来建立模型的验潮站均匀分布于渤海、黄海、东海地区,具体位置见图 1,并将秦皇岛、烟台等附近存在分潮无潮点的站点纳入模型计算中,充分考虑了旋转潮波系统对模型精度的影响。各站点位于海岸地区或者远离河口口门的外海,径流的洪枯季节变化对其影响不大。

利用我国东部沿海地区 17 个验潮站连续 1 年以上的逐时潮位观测资料,运用潮汐调和分析(Foreman, 1977; Godin, 1991; 龚政等, 2003)的方法对各个验潮站逐时潮位资料进行调和分析,计算对应分潮 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_4 、 MS_4 、 M_6 、 S_a 、 S_{sa} 的调和常数(振幅 h 及迟角 g)以及相应的平均海平面。藉此,根据《海道测量规范》中给出的方法,利用得到的 13 个分潮的调和常数推算相应验潮站的平均海平面下的理论最低潮面的值。由于理论最低潮面与半潮差直接相关,即与潮差也是直接相关的,因此,

根据实测资料统计年平均潮差及月平均潮差,由此,利用回归分析的方法,就理论最低潮面和平均潮差之间的关系进行统计,给出理论最低潮面和平均潮差之间的函数关系,并就理论最低潮面和不同时间间隔内的潮汐特征值之间的相关程度进行比较分析。

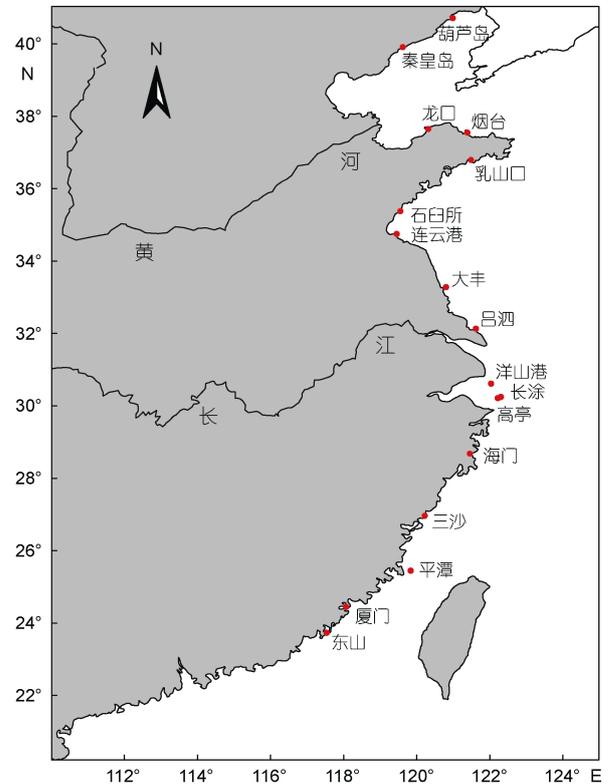


图 1 我国沿海验潮站分布图

Fig.1 Distribution map of tide gauges along China coast

2 理论最低潮面与平均潮差关系

2.1 理论最低潮面与年平均潮差关系

利用我国东部沿海地区 17 个验潮站连续 369 天的逐时实测潮位资料,运用调和分析法得到各个验潮站 13 个分潮的调和常数,并由此推算理论最低潮面在当地平均海面下的值,同时,根据相应实测资料推求各个验潮站的年平均潮差及各月平均潮差。计算过程中均以当地平均海平面作为基准面,结果见表 1,其中,各站月平均潮差仅列出冬季 2 月份和夏季 8 月份的结果。

由表 1 可以看出,以平均海面为基准,我国的理论最低潮面总体呈现“南低北高”的趋势,但受地形等各方面因素的影响,各地理论最低潮面值的差异还是较大的。年平均潮差及月平均潮差的分布也总体呈现南部大、北部小的态势,与理论最低潮面的变化趋

表 1 各验潮站的理论最低潮面与平均潮差

Tab.1 Lowest normal low water and mean tidal range of each tide gauge

验潮站	理论最低潮面(m)	平均潮差(m)		
		1 年	2 月	8 月
葫芦岛	1.344	2.024	1.978	2.036
秦皇岛	0.580	0.458	0.417	0.549
龙口	0.751	0.839	0.842	0.888
烟台	1.004	1.576	1.584	1.578
乳山口	2.333	2.378	2.324	2.418
石臼所	2.817	2.945	2.976	2.926
连云港	3.250	3.467	3.500	3.357
大丰	2.131	3.040	2.691	3.373
吕四	3.049	3.764	3.722	3.802
洋山港	2.039	2.683	2.706	2.760
长涂	2.046	2.174	2.268	2.132
高亭	1.745	2.075	2.063	2.155
海门	2.900	3.825	3.762	3.853
三沙	3.590	4.162	4.196	4.207
平潭	3.629	4.186	4.160	4.214
厦门	3.036	3.931	3.917	3.974
东山	1.973	2.247	2.228	2.276

势基本一致, 秦皇岛、龙口、烟台由于受渤海半封闭式型态及分潮无潮点(叶安乐等, 1995)的影响, 潮差与其它区域相比明显偏小, 且潮型规律性亦相对较差。

进一步根据得到的理论最低潮面和年平均潮差的值, 对我国东部沿海 17 个验潮站的理论最低潮面与年平均潮差进行回归分析, 结果如图 2 所示。

考虑当年平均潮差为 0 时, 海面没有升降, 因此回归分析式中截距设为 0, 即理论最低潮面与平均海面重合。

由此, 得理论最低潮面与年平均潮差的关系为:

$$L_0 = 0.832H \quad R = 0.962 \quad (2)$$

式中: L_0 为理论最低潮面在年平均海面以下距离; H 为年平均潮差; R 为相关系数; 式中各量单位为 m 。

表 2 理论最低潮面与各月平均潮差拟合公式

Tab.2 Fitting formulas between lowest normal low water and each monthly mean tidal range

月份	拟合关系(m)	相关系数 R	月份	拟合关系(m)	相关系数 R
1 月	$L_0=0.855H_1$	0.968	7 月	$L_0=0.840H_7$	0.954
2 月	$L_0=0.841H_2$	0.970	8 月	$L_0=0.820H_8$	0.948
3 月	$L_0=0.841H_3$	0.970	9 月	$L_0=0.817H_9$	0.950
4 月	$L_0=0.845H_4$	0.966	10 月	$L_0=0.831H_{10}$	0.945
5 月	$L_0=0.842H_5$	0.961	11 月	$L_0=0.842H_{11}$	0.958
6 月	$L_0=0.837H_6$	0.956	12 月	$L_0=0.849H_{12}$	0.967

注: 式中 H_i ($i=1, 2, \dots, 12$) 分别为 i 月平均潮差

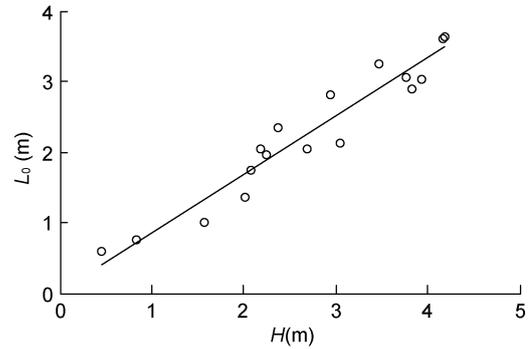


图 2 理论最低潮面与年平均潮差关系拟合线

Fig.2 Fitting line between lowest normal low water and annual mean tidal range

由式(2)可以看出, 理论最低潮面与年平均潮差 H 的相关性很强, 相关系数 R 在 0.96 以上。实际的工程应用中, 若不知道当地理论最低潮面的位置, 则可根据上式由年平均潮差快速地推算当地理论最低潮面的位置。

2.2 理论最低潮面与月平均潮差关系

海洋工程建设中, 1 年潮位资料的获取相对较为困难, 短期如 1 个月的潮位资料往往相对较为容易获取, 由此, 便可推求相应的月平均潮差。与上述同理, 可得理论最低潮面与月平均潮差的关系, 由于不同季节的潮汐过程往往存在差异, 因此, 表 2 分别给出了理论最低潮面与各月平均潮差的关系。

与式(2)比较, 同时, 综合表 2 中各月平均潮差与理论最低潮面的相关性可知, 理论最低潮面与春、冬季 12 月至来年 4 月期间的月平均潮差的相关性最高, 与年平均潮差的相关性次之, 与夏、秋季 5 月至 11 月的相关性最低。分析原因, 主要是由于理论最低潮面反映的是某个地区一个相当长时期内理论上可能出现的最低潮位, 且由其理论计算公式可知, 天文分潮占有主导因素, 其是一个相对较为稳定的面, 然而, 由于我国东部沿海属于亚热带季风气候区, 夏季及秋季期间, 沿海潮汐过程易受气象因素变迁的影响,

如风暴增减水作用等,而春季及冬季期间,沿海潮汐过程受外界因素的干扰作用相对较弱,因此,冬季及春季的潮汐特性更接近于理论最低潮面所反映的可能最低潮位的内涵,而年平均潮差虽然能反映潮汐过程的长期变化,但受夏季及秋季潮汐过程的影响,年平均潮差与理论最低潮面的相关性有所弱化。此外,由表 2 可知,虽然理论最低潮面与各月平均潮差的相关性存在一定差异,但相关系数 R 均达 0.948 以上,相关性较高,因此,工程实际中,在缺少 1 年潮位资料的前提下,利用表 2 给出的月平均潮差与理论最低潮面的关系式作为确定理论最低潮面的依据仍不失为一个有效的方法。

3 分析和讨论

3.1 拟合公式精度检验

由于上述采用的验潮站位置相对较为均匀地分布于我国东部沿海,因此,各式均可用于近似估算东部沿海地区理论最低潮面的位置,然而由各式的相关系数 R 可知,各式之间依然存在差异。为此,利用集中系数 b_p 、偏离系数 b_x (黄惠明等, 2010), 比较由 1 年逐时潮位资料通过调和与分析推算得到的理论最低潮面和利用各式估算得到的理论最低潮面之间的差异。

如果以利用 1 年实测资料通过调和与分析推算得出的理论最低潮面为横坐标,对应的利用拟合公式计算得出的理论最低潮面为纵坐标建立坐标系,数据散点越靠近 45° 线,说明利用调和与分析得到的理论最低潮面与拟合值之间的偏差越小。集中系数 b_p 用来表征两个变量总体趋于 45° 线的程度,当集中系数趋近于 1 时,两者比值趋近于 1; 偏离系数 b_x 则表征两个变量总体偏离 45° 线的程度,偏离系数越小,两者偏差越小。二者的计算公式分别为:

$$b_p = \frac{1}{n} \sum \frac{L_{0i}}{L'_{0i}} \quad (3)$$

$$b_x = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{L_{0i} - L'_{0i}}{(L_{0i} + L'_{0i})/2} \right| \quad (4)$$

式中: L_{0i} 为利用 1 年实测资料推算得出的理论最低潮面; L'_{0i} 为利用拟合关系计算出的理论最低潮面; n 为

验潮站个数。

根据公式(2)及表 2 中的公式,分别计算出利用实测资料和公式求得的理论最低潮面的集中系数和偏离系数,结果见表 3。

由表 3 可知,各式的集中系数变化幅度不大,均在 1 附近,且都大于 1,说明实测资料调和与分析得到的理论最低潮面总体来说略大于拟合公式推算得到结果;同时,各式的偏离系数也相对较小,均在 0.1 左右,这表明利用拟合公式近似估算理论最低潮面的精度均较高。

3.2 利用实测资料检验公式的合理性

为进一步检验公式的合理性,分别利用如东、响水地区两个验潮站连续 369 天的实测潮位资料,通过调和与分析推算得到当地理论最低潮面;同时,根据两地的年平均潮差及月平均潮差,利用本文中得到的拟合公式,也可估算出两地的理论最低潮面。由此,就二者的差异进行比较和分析。根据 1 年的实测潮位资料通过调和与分析的方法,推算得如东和响水两站的理论最低潮面分别在当地平均海平面下 2.953m、2.262m。

表 4、表 5 给出了利用上述公式结合年平均潮差及月平均潮差推算得到的理论最低潮面的结果。

由表 4 可知,在如东验潮站,理论最低潮面的拟合结果非常好,利用拟合公式估算的结果跟利用调和与分析方法得到的结果偏差很小,平均偏差仅为 -0.064m ,误差保持在厘米数量级内。在拟合结果中,仅有夏季几个月的偏差绝对值超过了 0.1m ,这主要是因为受到夏季气温高、风暴过程等因素的影响。

从统计结果还可以看出,如东站利用调和与分析方法得到的理论最低潮面普遍小于利用拟合公式得到的估算值。分析原因,主要是在验潮站附近,东海前进潮波系统与黄海旋转潮波系统的波峰线交汇,引起当地潮差普遍增大(黄惠明等, 2011),从而使拟合的理论最低潮面略偏大。拟合结果的偏大在一定程度上也增大了船只通航等的安全保证率,结果相对较为合理。

与如东站相比,响水站的拟合结果则相对较差,

表 3 利用实测资料和公式求得的理论最低潮面的集中系数和偏离系数

Tab.3 Concentration factors and deviation coefficients of lowest normal low water calculated by using measured data and formulas

判别数	式(2)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
集中系数	1.027	1.029	1.031	1.036	1.028	1.034	1.029	1.016	1.014	1.027	1.042	1.033	1.024
偏离系数	0.125	0.119	0.117	0.119	0.123	0.132	0.131	0.120	0.123	0.135	0.150	0.130	0.112

由表 5 可知, 利用调和分析方法得到的理论最低潮面与利用拟合公式得到的估算值的平均偏差为 0.269m, 而且大部分偏差在 0.25m 以上, 部分公式拟合结果偏差甚至大于 0.3m。原因主要是受到附近分潮无潮点

的影响(叶安乐等, 1995), 潮波特征复杂多变, 从而使估算值存在较大的误差。因此, 在无 1 年实测资料的前提下, 用上述拟合公式估算无潮点附近海域的理论最低潮面依然具有一定的精度。

表 4 如东验潮站利用调和分析方法和利用公式求得的理论最低潮面比较

Tab.4 Comparison of lowest normal low water between using harmonic analysis and formulas at Rudong tide gauge

时间段	1 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
平均潮差	3.633	3.510	3.460	3.708	3.544	3.535	3.534	3.653	3.731	3.812	3.613	3.562	3.522
本文公式计算	3.023	3.001	2.910	3.118	2.995	2.976	2.958	3.069	3.059	3.114	3.002	2.999	2.990
差值	-0.070	-0.048	0.043	-0.165	-0.042	-0.023	-0.005	-0.116	-0.106	-0.161	-0.049	-0.046	-0.037

注: 差值=利用实测资料通过调和分析得到的理论最低潮面-利用本文公式推算得到的理论最低潮面

表 5 响水验潮站利用调和分析方法和利用公式求得的理论最低潮面比较

Tab.5 Comparison of lowest normal low water between using harmonic analysis and formulas at Xiangshui tide gauge

时间段	1 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
平均潮差	2.392	2.391	2.387	2.456	2.374	2.385	2.335	2.362	2.395	2.420	2.391	2.303	2.329
本文公式计算	1.990	2.044	2.007	2.065	2.006	2.008	1.954	1.984	1.964	1.977	1.987	1.939	1.977
差值	0.272	0.218	0.255	0.197	0.256	0.254	0.308	0.278	0.298	0.285	0.275	0.323	0.285

注: 差值=利用实测资料通过调和分析得到的理论最低潮面-利用本文公式推算得到的理论最低潮面

4 结论

统计表明, 我国东部沿海理论最低潮面和平均潮差之间均具有较高的相关性, 冬季各月相对夏季潮位较低, 与理论最低潮面的拟合结果比较好。由于夏季月平均潮差容易受气温、风暴过程等外部因素的影响, 其与理论最低潮面之间的相关性相对较弱。

另外, 上述给出的理论最低潮面与平均潮差的关系式为线性关系, 不仅避免了以往根据 1 年实测资料推算理论最低潮面时需要进行复杂的调和分析的过程, 同时, 也可在缺乏 1 年资料的情况下充分利用短期的月平均资料来推算相应的理论最低潮面。并且, 由于所采用的验潮站分布的范围较广, 不仅包括半日潮和全日潮海域, 而且无潮点海域也包括在内, 因此上述拟合公式基本可反映我国东部沿海各个海区理论最低潮面 and 不同时间段内平均潮差之间的关系。

参 考 文 献

王 骥, 刘克修, 2002. 关于海图深度基准面计算方法的若干问题. 海洋测绘, 22(4): 10—13
 王艳玲, 2000. 用回归分析法建立近代历史海图上各种深度基准面的改正数方程. 厦门科技, (S1): 85—87
 叶安乐, 梅丽明, 1995. 渤海东海潮波数值模拟. 海洋与湖沼, 26(1): 63—70
 刘雁春, 2000. 海道测量基准面传递的数学模型. 测绘学报,

29(4): 310—316
 吴华林, 沈焕庭, 吴加学, 2002. 长江口海图深度基准面换算关系研究. 海洋工程, 20(1): 69—74
 吴德安, 严以新, 李瑞杰, 2006. 江苏省辐射沙洲海域理论最低低潮面的计算. 河海大学学报(自然科学版), 34(5): 572—577
 汪家君, 1986a. 半日潮区理论深度基准面回归分析初探. 海洋通报, 5(8): 19—24
 汪家君, 1986b. 浙江海区历史海图上各种深度基准面的改正数方程及其分布场. 杭州大学学报, 13(2): 231—239
 陈 楠, 1999. 福建半日潮区理论深度基准面值回归方程的建立. 测绘通报, (9): 28—28
 殷晓冬, 2001. 高程基准与海图水深起算面问题研究. 海洋测绘, (1): 9—14
 黄惠明, 王义刚, 尚 进等, 2011. 冬季苏北辐射沙洲水域悬沙分布及输运特征分析. 河海大学学报(自然科学版), 39(2): 201—205
 黄惠明, 王义刚, 孟 超, 2010. 曹妃甸水流挟沙力计算方法分析. 水道港口, 31(3): 175—180
 龚 政, 张东生, 张君伦, 2003. 河口海岸水文信息处理系统. 水利学报, (1): 83—87
 梁振英, 1999. 建立我国陆海统一高程/深度基准的构思模式. 测绘科技动态, (3): 20—28
 董鸿闻, 1997. 深度基准的建立及其应用. 测绘标准化, 13(4): 27—29
 暴景阳, 刘雁春, 晁定波等, 2006. 中国沿岸主要验潮站海图深度基准面的计算与分析. 武汉大学学报(信息科学版), 31(3): 224—228

- 暴景阳, 张明亮, 唐 岩等, 2009. 理论最低潮面定义和算法的应用问题分析. 海洋测绘, 29(4): 1—4
- 暴景阳, 黄辰虎, 刘雁春等, 2003. 海图深度基准面的算法研究. 海洋测绘, 23(1): 8—12
- Foreman M G G, 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Sidney: Institute of Ocean Sciences
- Godin G, 1991. The Analysis of Tides and Currents//Parker B B. Tidal Hydrodynamics. New York: John Wiley & Sons, Inc.: 675—709
- Van Der Wal D, Pye K, 2003. The use of historical bathymetric charts in a GIS to assess morphological change in estuaries. The Geographical Journal, 169(1): 21—31

RESEARCH ON RELATIONSHIP BETWEEN LOWEST NORMAL LOW WATER AND MEAN TIDAL RANGE IN EASTERN COASTAL CHINA

YANG Tong-Jun^{1,2,3}, WANG Yi-Gang¹, HUANG Hui-Ming^{1,2}, YUAN Chun-Guang¹

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, 210098;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, 210029; 3. Northeast Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Changchun, 130021)

Abstract Determination of the lowest normal low water is the basis of hydrographic surveying and charting as well as the implementation of ocean engineering. As the number of permanent tide gauges along China coast is limited, estimation of the lowest normal low water accurately and fast in the areas with no observation data or short-term observation data has always been a difficult problem. Therefore, based on the internal relations between lowest normal low water and mean tidal range, using the continuous hourly observation data of 1 year at China's 17 tide gauges along the coastal areas of East China Sea, the harmonic constants are obtained, and the lowest normal low water is calculated by using the constituents. Furthermore, relationship between lowest normal low water and annual mean tidal range or monthly mean tidal range is statistically analyzed. The results show that relationship between lowest normal low water and annual or monthly mean tidal range has good correlation. This relationship can be applied to practical engineering to estimate the lowest normal low water.

Key words lowest normal low water; mean tidal range; mean sea level; harmonic analysis; statistical analysis