

江苏省辐射沙洲海域理论最低低潮面的计算

吴德安^{1,2,3}, 严以新^{1,2}, 李瑞杰^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学交通学院、海洋学院, 江苏 南京 210098 3. 河海大学海洋环境实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 利用 M. Foreman 改进的 G. Godin 潮汐调和程序对江苏省辐射沙洲海域 21 个验潮站潮位资料进行调和, 得到了 11 个分潮的调和常数及相应平均海平面. 利用 Delft3D 数值模型计算研究该海域 8 个分潮的调和常数. 对 21 个站位理论最低低潮面、可能最低低潮面、略最低低潮面及英国海图深度基准面的空间分布特征及关系进行了计算分析, 拟合得出了辐射沙洲海域理论最低低潮面的经验关系式, 利用该关系式计算分析了江苏省辐射沙洲海域理论最低低潮面值及其空间分布特征.

关键词 辐射沙洲 平均海平面 理论最低低潮面 可能最低低潮面

中图分类号 P731.23 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)05-0572-06

1 研究背景

在进行海洋测绘、航道测量、工程施工等生产活动时, 陆地高度、潮位和水深的度量均必须有一个统一起算面, 即所谓的基准面. 我国已于 1987 年 5 月开始启用 85 国家高程基准, 1956 年黄海高程系同时废止. 海图深度基准面 1957 年之后统一采用前苏联弗拉基斯基的低潮面, 即所谓的理论深度基准面^[1]. 该基准面在平均海面以下, 与平均海面的距离称为基准深度. 潮高基准面是验潮站潮位升降的起算面. 潮高基准面至平均海面的高度, 称为平均海平面. 验潮站的潮高基准面与海图深度基准面如果一致, 则实际水深等于海图上标定的深度加上潮汐表上的潮高预报值, 但实际上潮高基准面、海图深度基准面一般不在同一个面.

南黄海辐射沙洲海域是南黄海旋转潮波系统与东海前进潮波系统相遇之处, 基本上由沙脊及其间的深槽构成. 整个沙洲南北长约 200 km, 东西宽约 90 km, 大致以 港为中心, 呈辐射状分布在南黄海西南部^[2]. 据实测资料, 南黄海西南部存在着辐射状潮流场, 表现为半日潮流椭圆长轴方向指向 港, 即以 港为顶点, 具有涨潮时向顶点辐聚、落潮时向海域辐散的潮流特征^[3]. 本文对图 1 所示的 21 个验潮站实测资料进行调和, 结合辐射沙洲海域动力数值模拟研究该海域的理论最低低潮面. 所使用的调和分析及预报程序是 M. Foreman 在 G. Godin 原潮汐调和分析及预报程序基础上修订、改进而来的^{[4], ①}.

2 验潮站测量潮位的调和分析及对比验证

对图 1 所示各站位的潮位资料(半月到 1 月的 1 h 取样分辨率连续资料)利用调和程序进行调和, 得出 11 个分潮, 即 $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_4, M_6, MS_4$ 的调和常数和平均海平面 Z_0 . 利用 Delft3D 数值模型^{[5], ②}对江苏省辐射沙洲海域潮汐动力进行计算($12^\circ 29' 30'' E \sim 122^\circ E, 32^\circ N \sim 33^\circ 36' N, 0.5' \times 0.5'$ 平均空间分辨率), 得出海域 8 个主要分潮调和常数. Delft3D 是一完全的三维水动力-水质模型系统, 包含水流、水动力、波浪、泥沙、水质、生态等 6 个模块, 各模块之间可动态耦合. 计算采用 Delft 计算格式, 快速而稳定.

收稿日期 2005-12-07

基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(50339010) 国家自然科学基金资助项目(40476039)

作者简介 吴德安(1968—), 男, 江苏徐州人, 博士, 主要从事海岸动力和数值模拟研究.

① GODIN G, FOREMAN M. 潮位、潮流调和程序说明手册. 1996 4-67.

② W L. Delft3d-flow user's manual. Delft hydraulics August. 2001.

表 1 为主要分潮 M_2, K_1 调和与分析结果与模拟计算结果的对比. 表中实测值为调和与分析结果, 计算值为 Delft3D 模拟计算结果. 相应振幅差最大值为 7.0 cm, 迟角差最大值为 6° , 可见调和与分析结果基本一致. 而前 3 个站位(沿岸验潮站)调和与分析结果也得了到其他研究结果的验证^[2]. 江苏沿海主要受两大潮波的支配, 这两股相反方向运动的潮波在 港至庄家沙一带海域辐合, 是形成江苏沿海辐射状沙洲的主要因素. 大潮差区、平均高潮位的最大值均出现在这一潮波辐合带中, 而小洋港至小洋口外海域正处于这一辐合海域内, 且处于喇叭口状潮流水道的尾部. 潮水受水道地形影响, 使得该海域成为强潮差区. 实测小洋口以东最大潮差达 928 cm^[6]. 表 1 小洋港 M_2 分潮实测振幅为 254 cm, 与相邻小洋口外站 M_2 分潮实测振幅值 207 cm 接近, 计算迟角值分别为 15.0° 和 21.5° , 也相差不大.

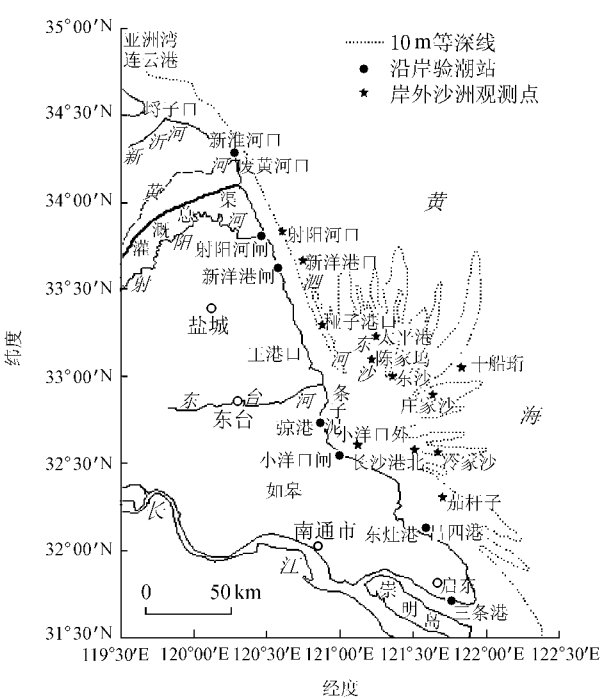


图 1 江苏省辐射沙洲海域验潮站分布
Fig.1 Location of tidal stations in radial sand ridge sea area of Jiangsu Province

表 1 部分站位调和常数计算值和实测值的比较

Table 1 Comparison of calculated and measured data of harmonic constants for some tidal stations

验潮站	北纬	东经	M_2 分潮				K_1 分潮				计算 - 实测			
			实测		计算		实测		计算		振幅 / cm		迟角 / ($^\circ$)	
			振幅 / cm	迟角 / ($^\circ$)	振幅 / cm	迟角 / ($^\circ$)	振幅 / cm	迟角 / ($^\circ$)	振幅 / cm	迟角 / ($^\circ$)	振幅 / cm	迟角 / ($^\circ$)	振幅 / cm	迟角 / ($^\circ$)
射阳河口	33°49′	120°30′	90	290.0	92	297.0	2.1	4.0	23	44.0	22	44.1	-1.4	0.1
陈家坞	33°06′	121°13′	157	342.0	157	351.0	-0.1	3.0	19	81.0	19	79.8	-0.2	-1.2
小洋港	32°36′	120°56′	254	9.0	256	15.0	1.9	6.0	21	123.0	21	122.5	-0.4	-0.5
射阳口外	33°48′	120°20′	95	292.3	101	295.4	6.0	3.1	53	316.1	54	317.2	1.0	1.1
新洋港外	33°40′	120°45′	108	311.1	108	316.3	0.0	5.2	46	104.0	52	99.2	6.0	-4.8
柃子港口	33°18′	120°53′	119	342.3	120	345.7	1.0	3.4	7	167.7	11	165.0	4.0	-2.7
太平港	33°14′	121°15′	171	350.9	177	353.1	6.0	2.2	17	37.8	24	35.8	7.0	-2.0
十船玢	33°03′	121°50′	189	354.6	191	350.0	2.0	-4.6	14	34.8	11	38.4	-3.0	3.6
东 沙	33°00′	121°21′	202	8.4	197	8.9	-5.0	0.5	27	67.6	28	70.0	1.0	2.4
庄家沙	32°54′	121°38′	215	8.0	211	3.6	-4.0	-4.4	25	74.2	26	76.0	1.0	1.8
小洋口外	32°38′	121°08′	207	16.4	200	21.5	-7.0	5.1	27	204.7	29	209.6	2.0	4.9
长沙港北	32°35′	121°31′	218	10.1	221	7.2	3.0	-2.9	56	297.1	53	299.6	-3.0	2.5
冷家沙	32°34′	121°40′	188	1.6	193	2.0	5.0	0.4	37	171.9	32	170.6	-5.0	-1.3
茄杆子	32°18′	121°42′	205	1.6	201	2.1	-4.0	0.5	52	134.3	58	131.4	6.0	-2.9

图 2 是柃子港站位的调和与分析结果代入预报程序所得潮位与实测潮位的对比验证. 该段时间内预报值与实测值相差 - 33.0 ~ 32.0 cm, 差值平均值为 - 3.2 cm, 差值的标准偏差为 12.0 cm. 从时间过程曲线变化趋势来看, 二者吻合较好.

3 平均海平面的计算

表 2 是根据上述调和与分析程序计算得到的江苏省辐射沙洲海域 6 个验潮站和 4 个闸口验潮站的平均海

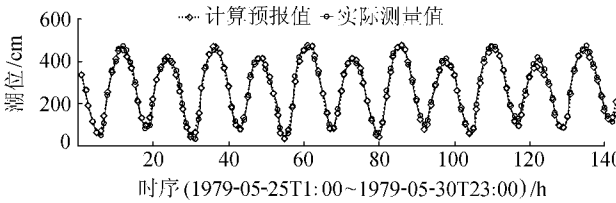


图 2 柃子港潮位计算预报值与实测值时间过程曲线对比
Fig.2 Comparison of predicted tidal level and measured data for Yazigang tidal station

平面计算结果.平均海平面 1 为调和分析结果,平均海平面 2 为文献[7]中的数据.由表 2 可见,6 个验潮站的平均海平面 1 与平均海平面 2 的值一致程度较好.

表 2 岸上验潮站海平面计算值和潮汐表值

Table 2 Calculated results of mean sea level and corresponding tidal table for tidal stations on sea shore										cm
类 别	射阳河口	新洋港	陈家坞港	港	小洋港	吕四港	射阳河闸	新洋港闸	小洋口闸	三条港
平均海平面 1	169.8	193.5	299.8	309.3	448.8	314.6	41.3	53.6	116.2	221.9
平均海平面 2	171	200	300	301	449	310				

表 3 是对岸外沙洲各验潮站的等时间间距(1 h)潮位资料进行调和分析得到的各站位相应平均海平面值.其中,射阳河口外站及东沙站平均海平面值分别为 594.2 cm 和 852.0 cm,是由于潮位测量(1979 年 5 月)潮高基准面设置较低缘故.

表 3 岸外验潮站海平面计算结果

Table 3 Calculated result of sea level for tidal stations outside sea shore											cm
类 别	射阳河口外	新洋港外	柘子港口	太平港	十船珩	东沙	庄家沙	小洋口外	长沙港北	冷家沙	茄杆子
平均海平面	594.2	196.8	247.1	270.5	321.1	852.0	354.6	430.2	376.7	335.5	376.7

4 辐射沙洲海域海图深度基准面的计算与分析

- 历史上常采用的海图深度基准面主要有以下计算形式^[1]：
- a. 海图理论深度基准面,即前苏联弗拉基斯基的低潮面(理论最低低潮面) 其是考虑 8 ~ 11 个分潮的最低低潮面.我国在 1957 年之后海图深度基准面统一采用该基准面.根据具体情况可分为 考虑 8 个分潮的半日潮港和全日潮港计算 ;考虑 8 个分潮的混合潮港计算 ;考虑浅水分潮 11 个分潮的计算.根据相关理论^[1,8]可计算理论最低低潮面.
- b. 可能最低低潮面：

$$L = A_0 - 1.2(H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_2})$$

(1)

式中: $H_{M_2}, H_{S_2}, H_{K_2}$ —— M_2, S_2, K_2 分潮的振幅; A_0 ——平均海平面在潮高基准面上的高度.该基准面适合于正规半日潮港且平均海面季节改正系数很小的地区.法国的海图采用该基准面.

- c. 略最低低潮面：
- $$L = A_0 - (H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_1} + H_{O_1})$$

(2)
- 该基准面由达尔文考察印度洋潮汐时提出,既考虑主要半日分潮,又考虑主要日分潮,但未考虑浅水分潮,且日分潮取其平均状态,未按其天文组合考虑.目前,印度和日本等国采用该基准面.
- d. 英国海军部海图深度基准面：

$$L = A_0 - 1.1(H_{M_2} + H_{S_2})$$

(3)

英国海军部测量世界部分的海图采用该基准面.

上述各海图深度基准面都是以潮高基准面为基准面的计算结果.为方便比较分析,本文转换为以平均海平面为基准面进行计算,并取平均海平面以下为正,则理论深度基准面值定义为 L_0 ,式(1) ~ (3)分别转换为

$$L_1 = 1.2(H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_2})$$

(4)

$$L_2 = (H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_1} + H_{O_1})$$

(5)

$$L_3 = 1.1(H_{M_2} + H_{S_2})$$

(6)

4.1 21 个测潮站各潮面(基准面)空间分布特征及相互关系

由上述各海图深度基准面计算 21 个站位的基准面,根据纬度值将各站位由北向南排列,所得结果如图 3 所示.图 4 是各基准潮面多项式形式的空间分布趋势曲线.

在本文的研究海域,各处平均海平面的高度相差不大,大约 3.0 cm,相对于上述 4 种深度基准面的计算值而言可忽略不计,认为研究海域平均海平面高度是一致的,因而可利用各站平均海平面为起算面的结果来比较各基准面的空间变化.由图 3 可见,江苏省辐射沙洲海域地形及潮流较复杂,导致各站间计算基准面相

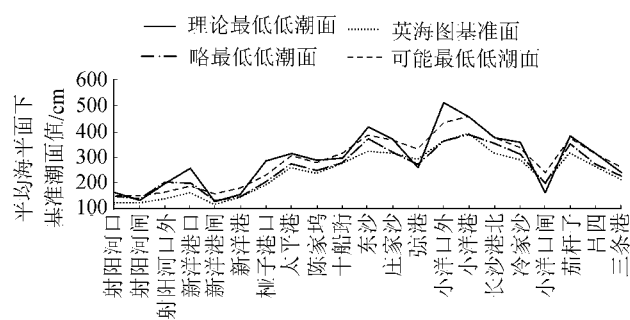


图 3 21 个站位基准潮面的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of four depth data at 21 tidal stations

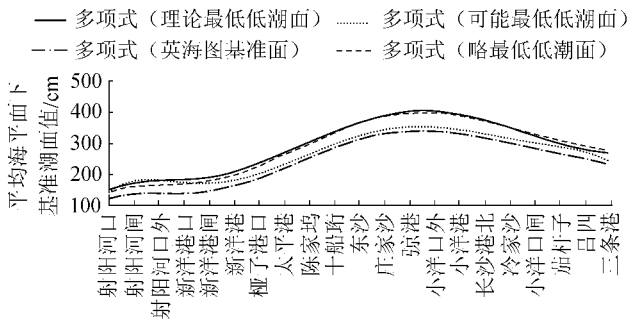


图 4 21 个站位各基准潮面的空间趋势分布

Fig.4 Tendency of spatial distribution of four depth data at 21 tidal stations

差较大,而以新洋港口、港、小洋口站所在海域较为特殊. 闸口站位各基准面相对较浅,应是闸口径流及高程较大对潮位的影响结果. 从图 4 可见,从北向南,各基准面逐渐降低(以平均海平面为基准的基准面值增大),在庄家沙—港—小洋口—长沙港附近海域各基准面值较大(较深),尤以小洋口附近海域为最大. 小洋口站向南各基准面计算值总体又逐渐减小. 由图 4 可见,江苏省辐射沙洲海域理论最低低潮面和可能最低低潮面计算结果较为接近,略最低低潮面与英国海图深度基准面计算结果趋近. 理论最低低潮面值比可能最低低潮面值略大(较深). 英国海图深度基准面计算值相对最小(最浅). 在该海域用可能最低低潮面来代替理论最低低潮面,误差相对较小.

4.2 辐射沙洲深水海域各基准潮面计算值关系

利用 Delft3D 数值模型只得到模拟海域(120°29' 30"E ~ 122°E, 32°N ~ 33°36'N, 0.5' × 0.5' 平均空间分辨率)8 个分潮的调和常数分布. 根据模拟结果,计算海域为正规半日潮特征. 对深水海域($H_{M_4} + H_{M_6} + H_{MS_4}$ 小于 20 cm 的海域)计算可得理论最低低潮面 L_0 ,并计算 L_1, L_2, L_3 相应值,建立如图 5 所示的对应关系.

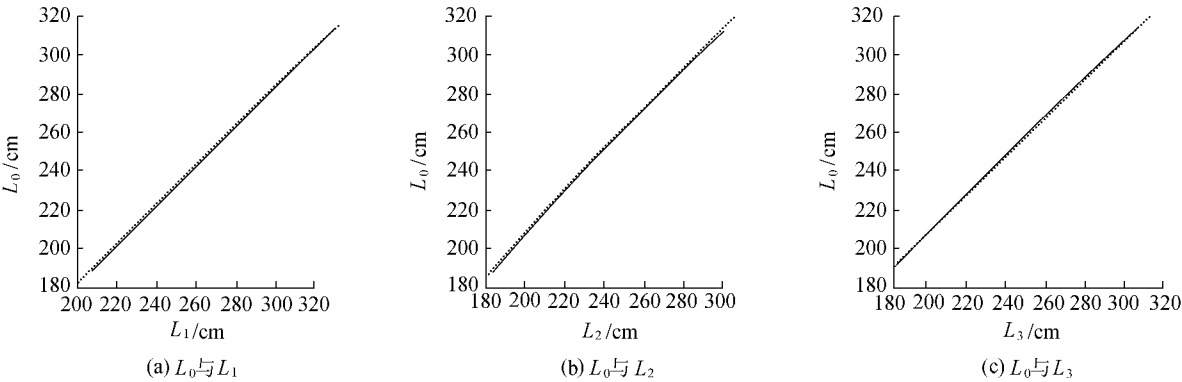


图 5 深水 L_0 与 $L_1 \sim L_3$ 之对应关系

Fig.5 Relationship between L_0 and $L_1 \sim L_3$

拟合关系为

$$L_0 = 1.0117L_1 - 20.01 \quad R = 1 \quad (L_1 - L_0) \text{平均值} = 16 \text{ cm} \quad (7)$$
$$L_0 = 1.1445L_2 - 18.5 \quad R = 1 \quad (L_2 - L_0) \text{平均值} = -17.0 \text{ cm} \quad (8)$$
$$L_0 = 1.1833L_3 - 21.9 \quad R = 1 \quad (L_3 - L_0) \text{平均值} = -25.0 \text{ cm} \quad (9)$$

在深水海域,各基准面计算值相关性都较强. 平均来看,理论最低低潮面在可能最低低潮面以上 16.0 cm,在略最低低潮面以下 17.0 cm,在英国海图深度基准面以下 25.0 cm. 在深水海域,理论最低低潮面可以用可能最低低潮面、略最低低潮面或英国海图深度基准面的线性关系表示.

4.3 理论最低低潮面与调和常数间的多元拟合

利用深水海域模拟结果加 21 个站位计算数据,对理论最低低潮位 L_0 进行多元拟合统计分析得

$$L_0 = 0.724H_{M_2} + 2.715H_{S_2} + 1.020H_{K_1} - 16.1 \quad (10)$$

$R^2 = 0.97$,标准偏差估计 9.0 cm. 同时拟合可得 L_0 的另一表达形式:

$$L_0 = 0.625H_{M_2} + 2.105H_{S_2} + 1.228H_{N_2} + 1.018H_{K_1} - 3.6 \pm 3.5$$

(11)

$R^2 = 0.98$, 标准偏差估计 7.3 cm. 分析发现 式(11)比式(10)的计算精度要好.

式(11)在 21 个站位的验证结果见图 6(a). 拟合结果由式(12)计算可得:

$$L_{0\text{理论计算值}} = 1.0095L_{0\text{经验计算值}} \quad R^2 = 0.962$$

(12)

在新洋港闸、小洋口闸相对误差较大, 分别达 11%, 30%, 其余站位相对误差绝对值的平均值为 3.0%.

式(11)在深水海域验证结果见图 6(b), 拟合结果为

$$L_{0\text{理论计算值}} = 1.002L_{0\text{经验计算值}} \quad R^2 = 0.998$$

(13)

平均绝对误差为 1.9 cm.

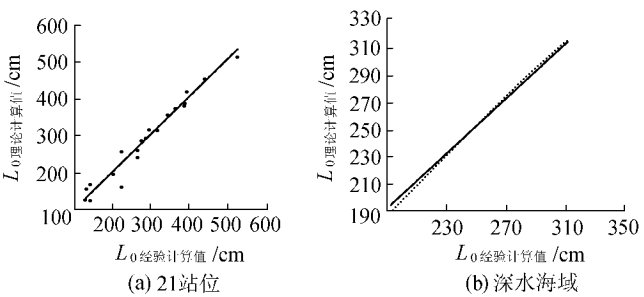


图 6 L_0 理论计算值与 L_0 经验计算值之对比
Fig. 6 Comparison of theoretical value of L_0 and calculated result by the empirical formula

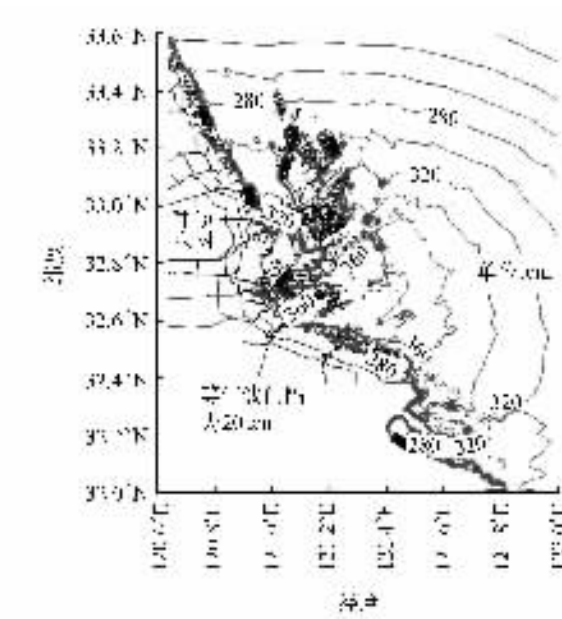


图 7 平均海平面下理论最低低潮面 L_0 分布
Fig. 7 Distribution of TDD L_0

海域辐聚辐散的特征. 在 港—小洋口附近海域理论最低基准面最低, 1979 年几次实测资料也表明该海域是江苏沿海潮差最大的区域. 长沙港北测得的最大潮差为 764 cm, 小洋口测得的最大潮差达 928 cm^[6]. 在沙洲、沙脊海域, 理论最低低潮面受浅海地形的影响较为明显, 等值线较密集, 空间变化较大, 等值线大致与地形等深线平行.

图 8 是辐射沙洲海域 L_0 以 L_1 为基面理论最低低潮面的分布, 正值表示理论最低低潮面 L_0 在 L_1 潮面以上, 负值则表示 L_0 在 L_1 潮面以下. 在沙洲外海海域, 二者差值等值线由 0 cm 向外平缓增大过渡到 10 cm, 10 cm 等值线以东的深水海域 $L_1 - L_0$ 之值的空间变化甚小, 平均值在 17 cm 左右. 0 cm 等值线以西水域, $L_1 - L_0$ 之差为负值, 即 L_0 低潮面在 L_1 低潮面下部, 差值大小总体上呈现出向海岸、沿潮流水道主泓向沙洲中心区域增大的趋势特征. 在岸滩、沙滩浅水海域, 由于受地形影响, $L_1 - L_0$ 又体现出和上述总体趋势有所不同的空间变化特征: 等值线较密集, 大

4.4 理论最低低潮面的空间分布

根据上述模拟结果, 利用式(11)计算江苏省辐射沙洲海域理论最低低潮面空间分布, 见图 7.

总体上, 理论最低低潮面由外海向辐射沙洲中心逐渐增大, 即理论深度基准面由外海向沙洲内部相对于平均海平面逐渐降低.

南黄海海域为半日潮型. 涨潮时, 潮流自北、东北、东和东南方向涌向 港海岸; 落潮时, 潮流以 港为中心, 呈 150°的扇面向外逸散, 形成以 港为中心的放射状潮流场. 沙脊群的地形与潮流场完全吻合^[9]. 从等值线梯度方向可以

看出, 理论深度基准面的变化可以体现出 2 个潮波系统在 港附近

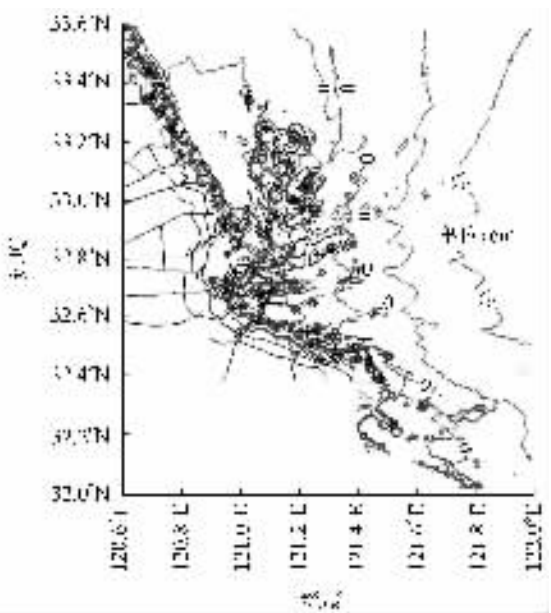


图 8 以 L_1 为基面的理论最低低潮面分布
Fig. 8 Distribution of TDD L_0 with L_1 taken as the base level

致沿沙滩边缘等深线走向,且沿等深线梯度方向反向向滩由负值向正值变化,达到正值后往往先增后减,直至 0 cm 附近.局部水域变化幅度在 - 40 ~ + 50 cm 之间.上述分析表明,在辐射沙洲中心海域,理论最低低潮面可以用可能最低低潮面近似表示,在外海其关系也相对较为稳定,但也要注意局部水域二者相差较大.

5 结 语

- a. 对 21 个站位的理论最低低潮面、可能最低低潮面、略最低低潮面、英国海图深度基准面进行了计算和分析,得出其空间分布规律.理论最低低潮面与可能最低低潮面较接近.
 - b. 根据模拟结果对江苏省辐射沙洲深水海域的理论最低低潮面与可能最低低潮面、略最低低潮面、英国海图深度基准面的关系进行了数据拟合研究,初步得出了上述各基准面间的对应关系.
 - c. 拟合得出了江苏省辐射沙洲海域理论最低低潮面的多元拟合经验关系式,并用该关系对江苏省辐射沙洲海域的理论最低低潮面进行了计算和分析.
- 由于部分验潮站实测潮位资料时间序列有限,不可避免地对研究结果的精确性造成一定的影响.

参考文献:

[1] 沈焕庭.长江河口物质通量[M].北京 海洋出版社,2001 42-51.
[2] 林琨,闫国年,宋志尧.东中国海潮波系统与海岸演变模拟研究[M].北京 科学出版社,2000 1-99.
[3] 诸裕良,严以新,薛鸿超.南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究- I 潮流运动平面特征[J].中国科学(D 辑),1998,28 (5) 403-410.
[4] GODIN G.潮汐分析[M].李身铎,译.北京 海洋出版社,1980 1-174.
[5] 储麇.DELFT3D 在天文潮与风暴潮耦合数值模拟中的应用[J].海洋预报,2004,3(6) 29-35.
[6] 黄易畅,汤毓祥.江苏沿海潮汐状况初步分析[J].海洋研究,1981,10(2) 66-69.
[7] 国家海洋信息中心.2001 年潮汐表[M].北京 海洋出版社,2000 316-495.
[8] 徐汉兴.珠海区九州港理论深度基准面计算[C]//第一届潮汐与海平面学术讨论会论文集.北京 海洋出版社,1986 110-117.
[9] 任美镠.江苏海岸带和海涂资源综合调查[M].北京 海洋出版社,1986 122-135.

Calculation of theoretical depth datum of radial sand ridge sea area in Jiangsu Province

WU De-an^{1,2,3}, YAN Yi-xin^{1,2}, LI Rui-jie^{1,3}

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
- 2. College of Traffic, College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
- 3. Laboratory of Environmental Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The tidal level data from 21 tidal stations in radial sand ridge sea area of Jiangsu Province are analyzed by use of G-Godin's tidal harmonic analysis and prediction programs revised by M Foreman, and the harmonic constants of 11 constituents and corresponding mean sea level are obtained. The Delft3D numerical model is also used for calculation of the harmonic constants of 8 constituents in this area. Moreover, the theoretical depth datum (TDD), the possible lowest tidal level, and the Indian spring low tidal level of 21 tidal stations, as well as their depth datum on British marine charts are analyzed, and an empirical formula for the TDD of this area is fitted by SPSS software. With the formula, the TDD and its spatial distribution of this area were calculated.

Key words radial sand ridge ; mean sea level ; theoretical depth datum ; possible lowest tidal level