

长江口潮位变化规律及其工程应用*

徐汉兴

(上海航道局设计研究所)

提要 长江口北槽航道水深较浅,为提高航道与疏浚的经济效益,本文研究了航道维护疏浚、测量工程中关键的潮位变化规律,及其在工程上应用的关系。按浅水潮波理论与长江口区11个测站1年的典型潮及地形资料,详细分析了全区潮波运动的一般周期性变化规律,随时、空的非线性演变规律,物理机制及其对各地点潮位变化的制约。结果解释了重要的水文物理现象,提出了确定控制水位的新方法等,为工程需要提供了依据。

长江口北槽航道扼上海港之门户,是大型船舶出入长江口的主要航道。但航道水深较浅,维护航深的疏浚工程量大。近年来又常出现疏浚后水深比浚前还浅的问题,这与疏浚回淤、测量误差等原因有关,一般认为,其中测量控制水位的误差可能是主要的。有关部门对新设立的“北槽中”验潮站控制性和潮位记录的可靠性,以及关于本区“沿程水位不合理分布”等问题十分关切。本文研究结果解释了本区重要的水文物理现象,即水位“套帽”问题;对工程上控制水位的确定,提出了“波面参数插值”新方法;论证了新建立的北槽中验潮站的重要控制性等,为工程实用的需要提供了依据。

一、北槽潮位变化规律及分析

(一) 资料概况

长江口北槽河段位于铜沙浅滩与九段沙浅滩之间,从横沙至九段东呈西北-东南走向,全长约37 km,地理位置与验潮站位见图1。

北槽河段的潮位受制于长江口区的总体潮波运动,因此取本区11个测站近期1年的潮位资料及有关地形资料进行了综合分析。研究区域范围为 $121^{\circ}28'$ — $122^{\circ}40'$ E, $30^{\circ}44'30''$ — $31^{\circ}26'$ N,坐标原点取 $121^{\circ}28'00''$ E 与 $30^{\circ}44'30''$ N 两线的交点。各站间距离按相应测站的经纬度算出。验潮站的选用除考虑北槽地区的横沙、北槽中和九段东等站外,还考虑了北槽地区的横沙、北槽中和九段东等站外,还考虑了吴淞、长兴、中浚、余山、鸡骨礁、大戢山、绿华山和芦潮港等。潮位资料取近期有代表性的,即以1986年2,5,8月的实测潮位分别代表枯、平、洪水期所采用的预报潮位,分别按63或128个分潮算出^[3],从中再确定出典型的大、中、小潮来作为具体分析之用。

* 参加本课题工作的还有于福生、樊连法和孙家荣同志,谨此志谢。
收稿日期: 1988年10月25日。

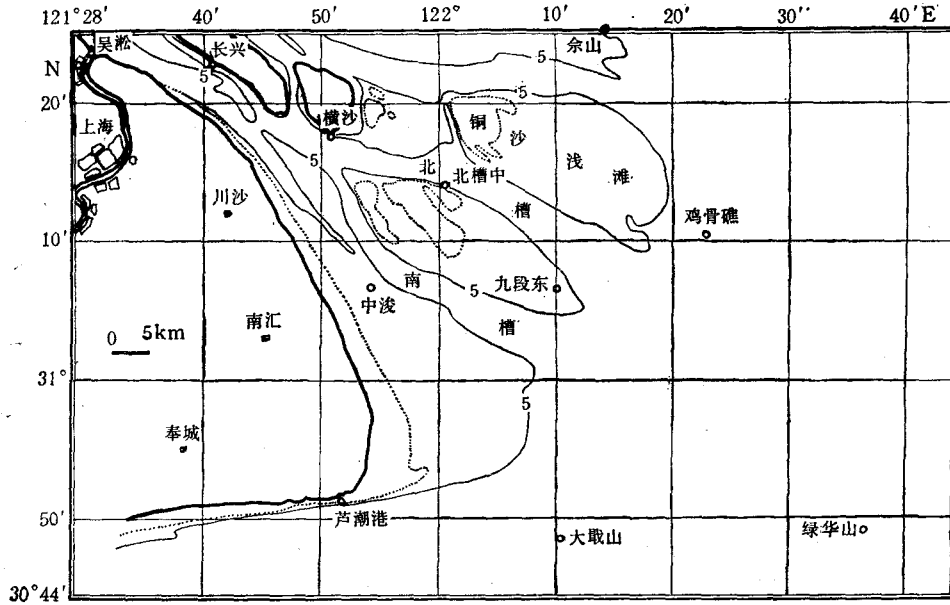


图1 长江口北槽航道与验潮站位置

Fig.1 Position of the north passage and tidal stations in Changjiang Estuary
0m; ——5m.

(二) 原理与方法

由于长江口区的总体潮波运动的年变化控制着北槽地区的潮位变化全过程。因此,根据浅水潮波理论,从1年的代表性资料入手,分析了整个长江口区的潮波传播演变过程,各季潮波在特定时刻的变化形势,来说明长江口与北槽地区的潮位变化关系和特殊现象发生的原因等。

1. 基本原理^{[1-4],1)}

按浅水潮波理论,潮波自河口上溯,其传播与变形规律,对沿程测站潮位的变化具有决定性作用²⁾。

2. 方法步骤

按上述原理,根据典型资料绘制了吴淞、长兴、横沙和九段东各站在2,5,8月份实测的潮位月变化综合过程线。确定出对应枯、平、洪水期的大、中、小潮典型日变化过程。对典型潮变化较大的一个周期,绘制逐时潮波水面剖面线沿程变化图^{[2-4],1)}。在特定的涨、落急时刻,或者高、低潮附近,绘制波高、波陡、波速和波向等潮波要素的区域分布图^[1]等。据此分析了长江口区的潮波传播和变形特征及其与北槽潮位变化规律的关系。

(三) 主要结果

1. 潮波演变与水位变化规律

1) Report No.2, On the hydrography of the Wangpoo. Shanghai, 1918.

2) 徐汉兴, 1977. 潮汐理论与应用(下册)。上海航道局, 172—257 页。

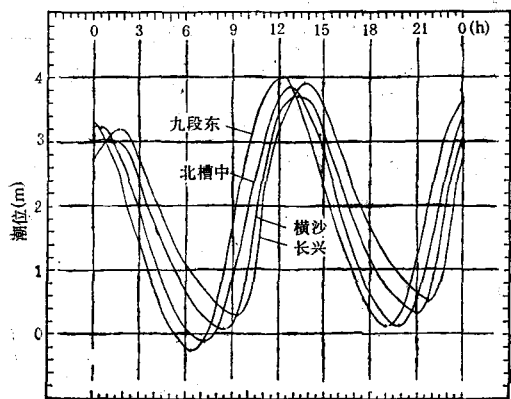


图 2 枯季大潮各站潮位综合曲线

Fig.2 Series of spring tidal curves from Jiuduandong to Changxing during low water period

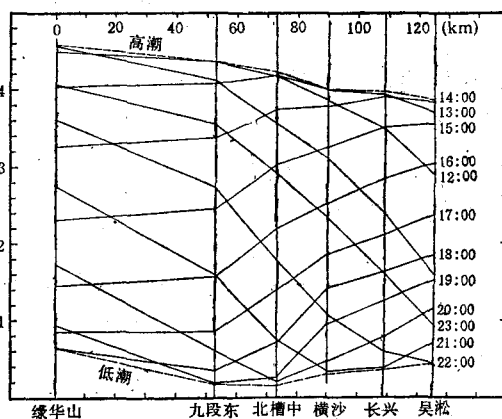


图 3 枯季大潮逐时水面线

Fig.3 Profiles of spring tide hourly water surface during low water period

经 1986 年长江口各站潮位资料的综合分析,表明本区潮汐日不等现象较显著。大潮和小潮日不等较中潮大。在洪水期,小潮日不等最显著,有时一天仅出现一次涨潮,另一潮则近乎消失。

根据 1986 年 2 月 26 日(农历一月十八日)各站潮位资料绘制综合过程线(图 2)。从图 2 可看出,从九段东至长兴,高、低潮潮时逐渐推迟,低潮位逐渐升高;高潮位除长兴外,依次下降。表明一般有较强的时序性规律。而小潮期,这种规律性较差,并常出现水位“套帽”现象¹⁾。

实际上,水位“套帽”不只限于落潮时发生,涨潮时,也可出现上游站水位反比下游站高的现象。若前者称为“下套帽”,后者则称为“上套帽”。并且上、下套帽多数发生在涨、落急附近。在小潮期,有时整个涨、落过程,横沙水位曲线可偏低北槽中站的同期曲线,达 30cm 左右。据资料分析,由于在涨、落急附近,潮波的传播与变形受水流动力条件和地形的影响最显著。瞬时潮波水面剖面线的沿程变化率也最大。这时如果其剖面线“拐点”或者峰、谷位置落在上、下两测站之间,则可产生这种特殊的水位“套帽”现象。所以,这种现象并非是“沿程水位不合理分布”,而是潮波运动的自然结果。

用图 2 同一资料,以时间为参数,绘制的逐时潮波水面剖面线沿程变化图(图 3),即 11—23 时一个周期内逐时潮波水面剖面线的演变过程。反映出潮波传播过程中,其随时间和空间变化的另一种规律性。即以方便、直观的方式,显示出从九段东至长兴的沿程水位分布与瞬时波面不均匀演变规律。一般在南、北槽,分别在中浚和北槽中附近,波面线曲折较显著。因此,这两站的水位,在工程上均有较好的控制作用。

根据 1986 年 8 月 30 日(农历七月二十五日)0—12 时潮高资料,绘制的逐时潮波剖面线变化图(图 4)。图 4 表明在小潮期,整个北槽水位变化都较平缓,逐时波线几乎成直

1) 曹永芳, 1986。长江口区验潮站水位控制问题。上海航道科技,第 3 期。

线。因而,其测量作业控制水位的确定也较容易,这将是测量作业的一个良好机会。

综上所述,长江口区的潮波运动在 1 年中各不同季节,对应的大、中、小潮变化既有一定的相似性,又各有特点。最明显的是大潮变幅最大,时空变化最复杂,而其规律性与特征最清楚、直观。其中,北槽在枯水期的中潮变幅比大潮明显减小,而小潮变化更小;在平水期,其大、中、小潮变化介于洪、枯两季之间;洪水期的大、小潮逐时波面线变化的特征,与枯水期的大体相同。

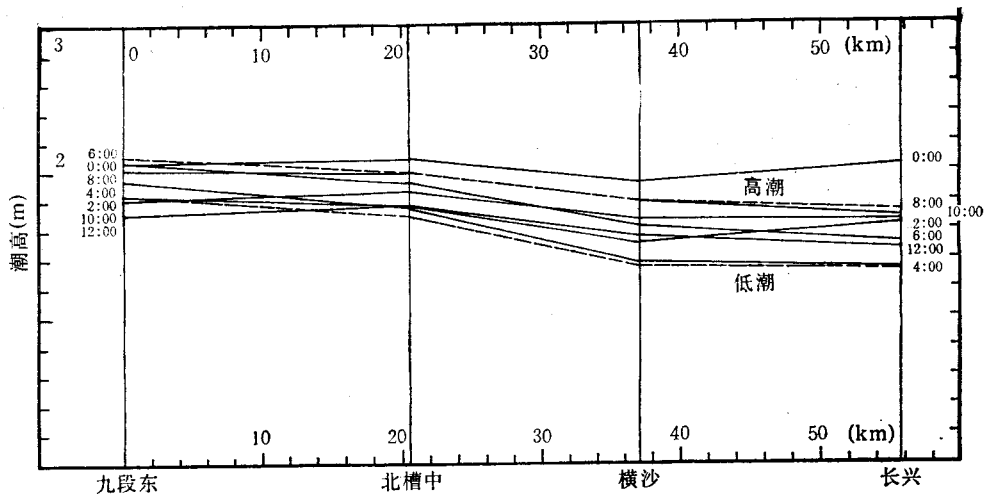


图4 洪季小潮逐时水面线

Fig.4 Profiles of near tide hourly water surface during flood period

2. 潮波要素与水位特征规律

对长江口研究区域 11 个验潮站,在枯季大潮(1986 年 2 月 26 日)涨、落急附近的典型潮资料,所绘制的潮高、波陡、波速和波向等潮波要素的区域分布图,进一步说明了其潮波运动机制及其与北槽错综复杂的潮位变化密切相关的规律性。

(1) 潮高分布 从图 5 a 看出涨急时,长江口外的潮高超过 3 m,并向口内递减,至长兴和吴淞一带,已减低至小于 0.5 m;等值线分布,从九段东至长兴和吴淞一带,为逐渐凸向上游,从九段东至北槽中和横沙一带则相反,为越来越凹向上游,以致在横沙附近形成一个特殊的半封闭“低窝”状水面,并口朝西北。从图 5 b 看出落急时,在中浚、北槽中、余山和九段东地区的潮高等值线分布较密集,且自吴淞向口外递减,由 2.25 m 减至 0.75 m 以下;由吴淞至中浚和九段东一带的等值线形状为凸向下游,而横沙至北槽中和九段东一带则为凹向下游,以致在鸡骨礁附近形成另一个特殊的半封闭“低窝”状水面,而口朝东北。

两个“低窝”状水面正处北槽河段上、下两端。这里是南、北槽水流的辐聚与辐散之地,水流动力的集中,不仅在水面形成了两个特殊的“低窝”,而且在海底也产生了相应的两个特殊的“深潭”(据 1979 年 3 月 4 日长江口海底地形卫星照片)。由此看出水面“低窝”与海底“深潭”之间存在着密切联系,而河道水流在其中起着主导的桥梁作用。

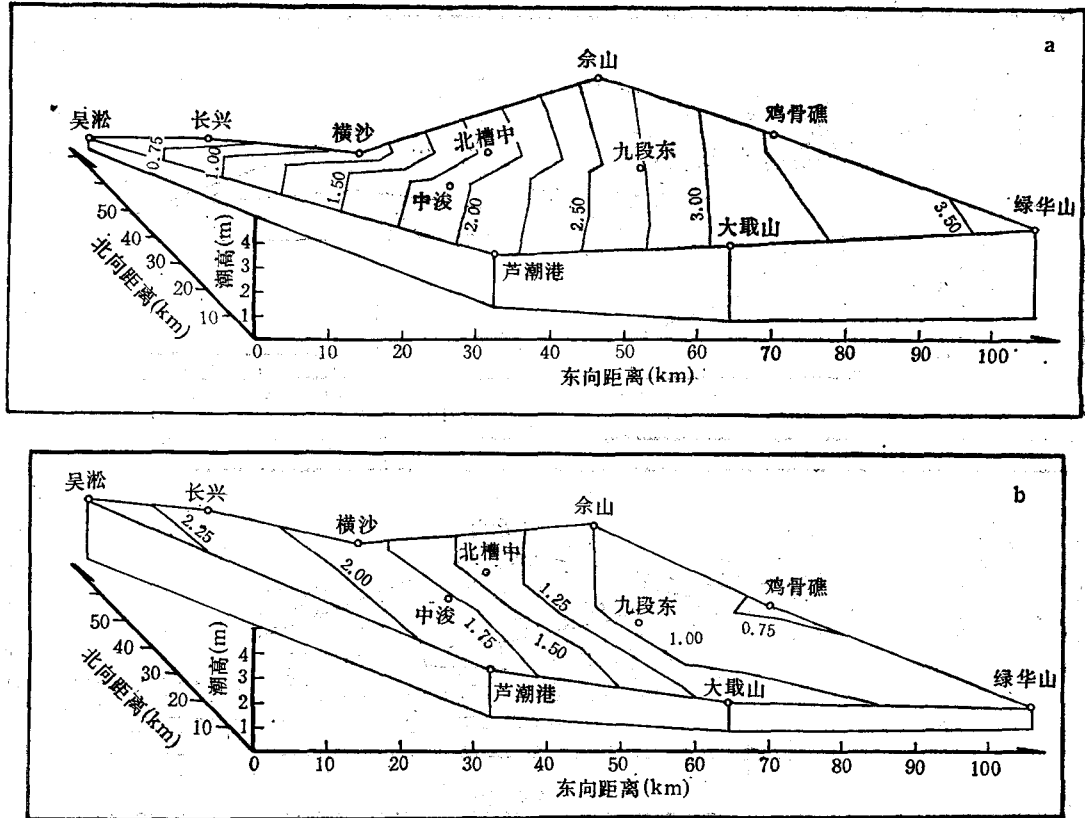


图 5 枯季大潮涨、落急潮高分布

Fig.5 Distribution of spring tidal heights, near-maximum flooding ebbing velocity during low water period

- a. 涨急时(按 1986 年 2 月 26 日 22 时潮高绘制);
- b. 落急时(按 1986 年 2 月 26 日 17 时潮高绘制)。

(2) 最大波陡 若两站潮高差与距离之比取为波陡,以百万分之一计之。则与图 5 对应的涨急时刻,北槽的最大波陡发生在九段东至北槽中这一河段。枯、平、洪各季的波陡大小分别为 45.5, 47.4 和 44.5; 南槽的最大波陡则发生在九段东至中浚这一河段,其各季对应值均小于北槽。落急时,南、北槽发生最大波陡的河段与涨急时对应相同,其各季的对应值在北槽依次为 25.9, 18.6 和 21.0; 在南槽依次为 38.7, 16.0 和 23.2。

波陡区域分布反映出潮波的传播与变形特征,及其与特定地点水位变化密切联系的规律。

(3) 高、低潮同潮图 图 6 为高、低潮同潮时线与等潮高线构成的同潮图。图中可看出,高、低潮越向上游,潮时越推迟。据枯、平、洪各季资料,高潮等高线上的最大值,分别为 4.50, 4.75 和 5.00 m; 低潮等高线上的最小值分别为 0.25, 0.50 和 0.75 m, 两者从枯季到洪季都逐渐增大。这是长江径流随季节变化,流量不断加大,底水位相应抬高的结果。由图 6 可大体上看出高、低潮传播的速度与方向。图 6b 中 0.25 m 的一条闭合线包

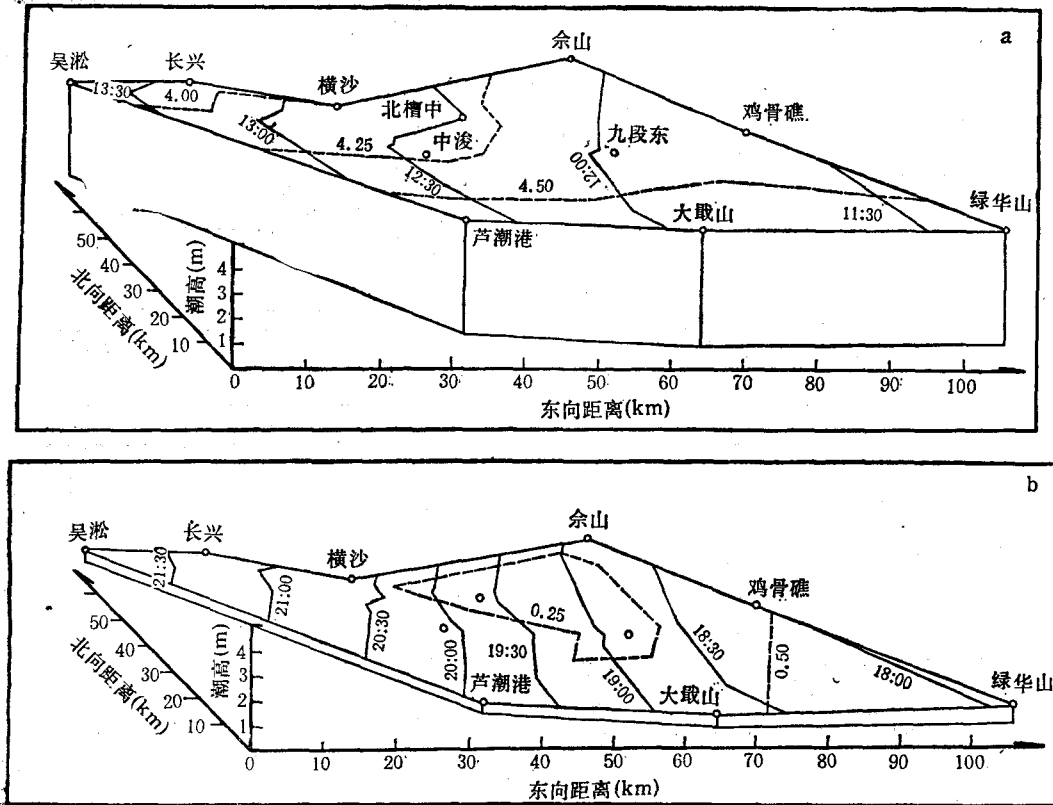


图6 长江口高、低潮同潮图

Fig.6 Co-tidal and co-range lines for high and low water levels in Changjiang Estuary

- a. 高潮(按1986年2月26日11—14时高潮绘制);
- b. 低潮(按1986年2月26日17—22时低潮绘制)。
- 同潮时线; ---等潮高线。

围着北槽中至九段东一带的低值区。

(4) 波速、波向 由图6的高、低潮资料,计算绘制了长江口枯季大潮峰、谷速度及波向分布。图7仅为波峰传播速度与波向分布,其波向一般自河口上溯,而在口外则有明显的横向传播运动;波谷速度较小(见表1),波向分布相似。

从表1可算出南槽枯、平、洪各季波峰速度平均值为北槽的1.64倍,北槽各季波谷速

表1 长江口各季大潮波峰、波谷传播速度(km/h)比较

Tab.1 Comparisons of wave crest and wave trough speed in each season, in Changjiang Estuary

	波峰速度				波谷速度			
	枯季	平季	洪季	均值	枯季	平季	洪季	均值
北槽: 九段东—北槽中	36.1	37.2	43.8	39.0	25.6	30.7	15.7	24.0
南槽: 九段东—中浚	62.6	71.6	57.9	64.0	18.2	19.1	22.4	19.9

度平均值为南槽的 1.21 倍。因此,北槽潮波变形比南槽大,潮位变化亦较急剧、复杂。

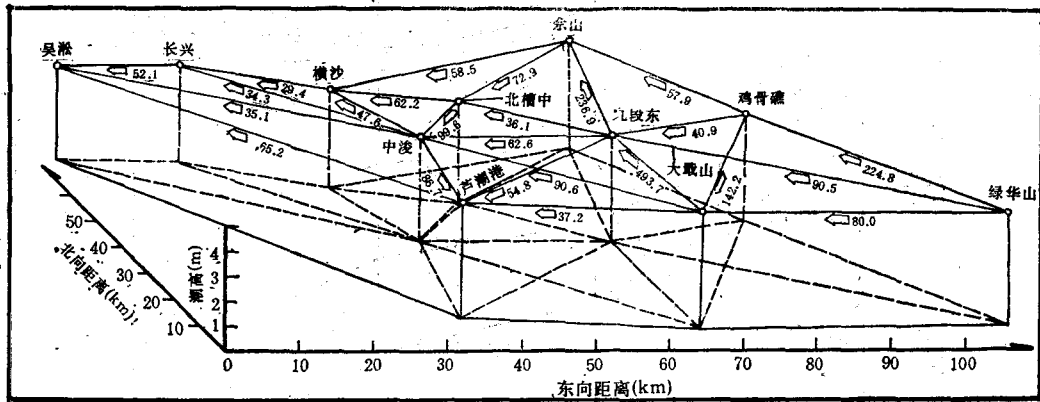


图 7 枯季大潮波峰速度及波向

Fig.7 Velocity and direction of spring tidal wave crest propagation during low water period

总之,北槽错综复杂的潮位变化规律与整个长江口区的潮波运动密切相关。实际上,北槽的潮位年变化过程是不同季节各潮波要素变化有机结合的结果。

二、结果与应用

由长江口潮波运动规律分析,解释了水位“套帽”现象,提出了“波面参数插值法”,论证了北槽中验潮站控制性,选择了测量作业良好时机等,为工程上实用需要提供了依据。

1. 对于水位“套帽”现象

北槽地区潮波受浅水影响,在水流动力条件、地形、汉道和浅滩等因素作用下,常可出现水位上、下“套帽”现象。一般在小潮期,落急后的低潮附近,易出现下“套帽”,而其数值较小。例如 1986 年 2 月 16 日(农历一月初八)枯季小潮,横沙站落潮水位反比北槽中低,即出现了下“套帽”,其大小不超过 15 cm。在大潮期涨急后的高潮附近,有时横沙水位比北槽中高,即也可出现上“套帽”现象。例如,同年 5 月 24 日(农历四月十六日)平季大潮,横沙部分涨潮曲线反比北槽中同期水位曲线高。

2. 关于“波面参数插值法”

它可简称为“波面法”,是根据瞬时潮波水面剖面线的沿程变化规律,即一般以逐时潮波水面剖面线为参数,按不同精度要求,在相邻两线之间作线性分割,求得特定时间和地点的水位插值。它对上、下“套帽”或者在高、低潮附近均可适用。图 8 中 A 点处的三种水位插值,即是上“套帽”和高、低潮附近插值的一例。高、低潮附近的插值线,仍以相邻逐时线为准绘制准平行线而得。应注意,两反向插值线相交点的最高或最低位置不得超过对应的高、低潮线。设测点 A 位于九段东上游约 14.5 km 处,其插值在 21:30 为 3.14 m; 18:30 为 0.39 m; 23:30 为 4.52 m。若按 10 min 或 6 min 精度要求,在 21 时至 22 时之间插值时,其潮高差可进一步细分为 6 或 10 等分,以求得所需插值。

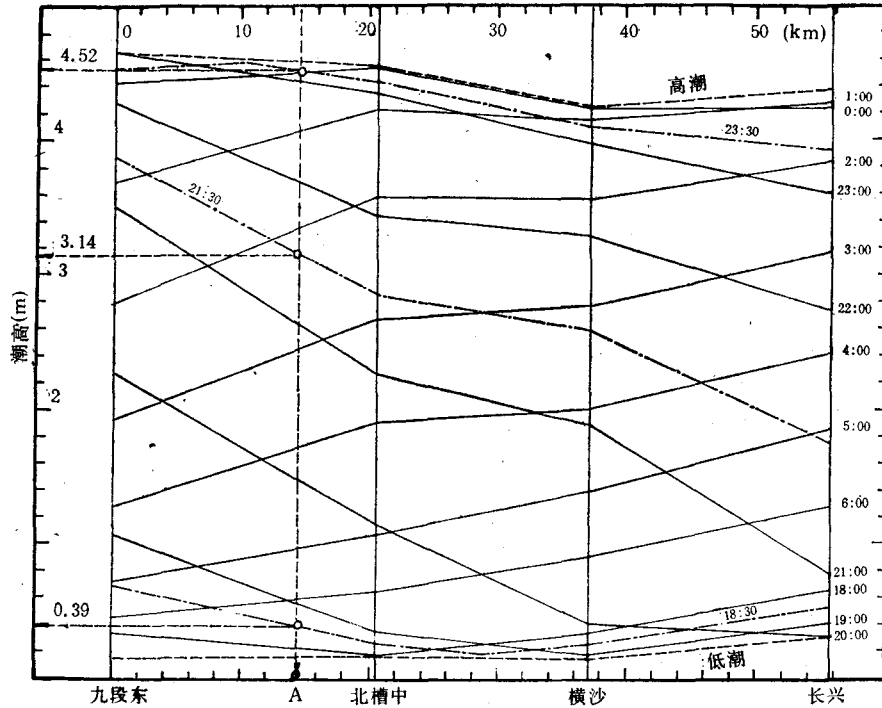


图8 长江口北槽潮高插补示意图

Fig.8 Schematic diagram of tidal heights interpolation for the North Passage in Changjiang Estuary

[按1986年5月24—25日(农历四月十六—十七日)潮高绘制]

3. 关于北槽中验潮站的控制性

该站设于北槽河段的中部,涨急时在横沙“低窝”的边缘(见图5a),又处于北槽最大波陡的转折处;高潮等值线在此发生最大弯曲(见图6a),且在低潮等值线闭合圈以内,潮高比横沙还小(见图6b)。由此地形和水力条件来看,这里是设立验潮的一个较理想的位置,其验潮记录对北槽地区有较好控制作用。

由图3看出,在19时和20时潮波水面剖面线的低谷点分别处于九段东和北槽中附近。这时北槽中站的潮位若由九段东和横沙两站来直接插补,与实测值的最大误差分别为35和33cm。若利用北槽中站的实测潮位来控制,在九段东与横沙之间的非线性插值最大误差约2—3cm,在实用中可忽略不计。12时潮波水面剖面线高峰是在九段东附近,由九段东与横沙直接插值的最大误差约8cm,11时的插值误差近于零。可见,北槽中站对低潮附近的控制作用比高潮更重要。该站的控制作用,对小潮仍不可忽视。据枯季小潮,即1986年2月18日(农历一月初十)资料分析,由于小潮时一个周期的水位变幅远较大潮时小,低潮附近12时线的低谷点在靠近横沙处,在九段东与横沙之间插补水位,若不用北槽中的实测水位作控制,则可产生17cm的插值最大误差。因此在小潮期,虽然整个北槽地区的水位变化都较平缓,而北槽中站的实测潮位仍有着重要的控制作用。

平季大潮的控制性与枯季大潮的重要性约相同。例如,由图8看出,在21时北槽中

站的水位偏低约 36 cm, 若在九段东与横沙之间直接插值, 将产生这样的最大误差。若利用北槽中站的实测潮位来控制, 在北槽中和横沙两站之间的非线性插值最大误差仅约为 6 cm, 可忽略不计。

4. 测量良好时机的选择

在小潮期或在高、低潮前后, 因水位变幅小, 且变化平缓, 其控制水位的插值误差亦较小。因此, 这往往是测量作业的良好时机。在大潮和涨、落急前后, 因水位变幅大, 每小时升降最大可达 1 m 以上。若控制水位精度要求 ± 10 cm 以内, 则无论用何种插值方法, 不仅插值内业工作量相应增加, 同时测量外业工作的难度也增大。所以, 为了省时、省力和保证测量精度, 必要时应予以避免为好。

参 考 文 献

- [1] 平野敏行编, 1983. 海の环境科学. 恒星社厚生阁, 东京, 3—130 页。
- [2] Defant, A., 1961. *Physical Oceanograph*. Vol. II. Pergamon Press, pp. 170—176.
- [3] Xu Hanxing, 1984. A method for prediction of shallow water tides. *Chin. Jour. Oceanol. and Limnol.* 2(1):34—48.
- [4] А.А. Дмитриева, 1963. Методы Расчета и Предвычисления Приливных Течений. Издательство Ленинградского Университета, pp. 86—119.

VARIATION BEHAVIOUR OF TIDAL STAGES IN CHANGJIANG RIVER ESTUARY AND ITS ENGINEERING SIGNIFICANCE

Xu Hanxing

(Design and Research Institute of Shanghai Waterways Bureau)

ABSTRACT

The navigation channel through the North Passage in Changjiang River Estuary is the doorway for large vessels calling the Port of Shanghai. The channel is relatively shallow with a huge volume of maintenance dredging. In an effort to improve cost-effectiveness of the channel and the dredging works, analysis has been made on the variation behaviour of key stages in relation with dredging and survey works and on the engineering significance and application of such behaviour.

The propagation process and deformation characteristics of the tidal waves in Changjiang Estuary have been analyzed in details, based on the theory of shallow water tidal waves, data of one-year typical tides of 11 tidal stations and morphology. Also described are the general periodical variation and the non-linear variation with time and location, physical mechanism and their influence (controlling function) on the variation behaviour of tidal stages at different locations.

Results of above analysis indicate that the important hydrological-physical phenomenon, i.e. the water stage "cover" (the tidal hydrodynamic set-up) in this area is the natural results of tidal wave movement, instead of an unreasonable distribution of tidal stages with distance.

A new method of "interpolation by hourly tidal wave profile" is proposed to determine the control stage. Also demonstrated is the significant controlling function of the North Passage Middle Tidal Station, which has established some kind of operational basis for engineering purpose.