

文章编号:1001-8166(2008)04-0331-06

我国潮汐潮流区域预报的发展*

方国洪,魏泽勋,王永刚

(国家海洋局第一海洋研究所,山东 青岛 266061)

摘要:简要回顾了我国潮汐潮流区域预报的发展过程。1959—1964年期间按前苏联杜瓦宁方法编制的永久潮流表是第一代预报产品,该产品提供了我国近海若干站点5 m层潮流预报资料。1970—1978年期间按方国洪提出的方法而研制的永久预报图表集是第二代预报产品,提供了基本上覆盖我国近海的多层潮流预报资料;这两代产品均以纸质图表为载体。2005—2006年期间方国洪等研制了第三代预报产品,覆盖了我国近海各海区,分辨率达到 $5' \times 5'$,垂向10层,并可自动内插到任意点和任意水层。同时介绍了三代产品的研发过程及基本原理。

关键词:潮流;潮汐区域预报;中国近海

中图分类号:P731.34 **文献标志码:**A

1 引言

传统的潮汐预报采用每年出版潮汐表的方式给出重要港口的潮高预报值。这种潮汐表有的(如英国海军部潮汐表和我国国家海洋信息中心编、海洋出版社出版的潮汐表)也提供重要航道上少数站点的潮流预报。这种预报资料对于外海活动是不够的,需要一种区域性的预报。20世纪50年代末我国海洋学家引入前苏联杜瓦宁(А. И. Дуванин)的非调和法,进行“潮流大面积预报”,并于1958—1960年全国海洋综合调查及前后一段时间内编制了“潮流永久预报表”,提供了我国近海若干站点5 m层的潮流预报资料。这种预报表可称为我国潮汐潮流区域预报的第一代产品(这个产品中不包括潮汐)。1970—1978年由中国科学院海洋研究所、国家海洋局海洋科技情报研究所(现国家海洋信息中心)、中国科学院计算研究所和中国科学院南海海洋研究所组成“潮流预报协作小组”,采用方国洪提出的一种新的预报方法,编制成渤海、渤海海峡、黄海、朝鲜海峡、东海、舟山海区、南海北部和北部湾各个海区的“中国近海潮流永久预报图表集”。预报

站基本上覆盖整个海区,每个站点给出了5层预报结果。这种图表集可称为第二代产品。这两代产品均以纸质图表为载体。2005—2006年期间,我们开展了微机化的潮汐潮流区域预报。这种微机化的预报系统可称为第三代产品。本文将对上述三代预报产品的研发过程及基本原理作一简略介绍。

2 50年代末至60年代初的大面积潮流预报

这一时期潮流区域预报所依据的方法基本上是前苏联杜瓦宁的方法。历史上潮汐的预报方法就有调和与非调和法之分。最初的潮汐预报都采用非调和法,自从调和法发展并成熟起来之后,它就成了潮汐预报方法的主流。50年代杜瓦宁把非调和法更加科学化,成为一种在某些情况下可与当时调和法相抗衡的方法。对某些特殊港口(如浅水效应很强的港口),其准确度甚至可以超过当时的调和法。因为潮汐潮流系由月球和太阳的引潮力所引起,而月球相对于地球的运动具有29.53天(朔望月)的周期,太阳相对于地球的运动具有365.24天(回归年,即阳历年的平均长度)的周期。

* 收稿日期:2008-02-26;修回日期:2008-03-25.

* 基金项目:国家自然科学基金项目“中国近海及邻近海区海洋与地球潮汐相互作用研究”(编号:40676009)资助.

作者简介:方国洪(1939-),男,浙江瑞安人,研究员,主要从事海洋潮汐、海洋环流和海洋数值建模研究. E-mail:fanggh@fio.org.cn

对月球引潮力而言,朔和望的效果是一样的,故月球引潮力的基本周期是半个朔望月,即 14.765 天。半朔望月与回归年不正好成整数倍:12 个朔望月等于 354.36 天,比回归年少 10.88 天;12.5 个朔望月等于 369.125 天,比回归年多 3.885 天。此外,月球的运动并不是匀速的,月相从朔到望或从望到朔并不都等于 14.765 天。杜瓦宁引进一个“天文指标” N ,它与月相对应,12 个 N 值表示半个朔望月。为了反映引潮力的年变化,他先取一个辅助天文指标 N' 从 0 到 300(可取小数),相当于 25 个半朔望月,它既反映了月相的变化又反映了太阳位相的年变化。由于回归年不等于半朔望月的整数倍,对于同一个 N' 值,不同年份的太阳位相会略有差别,这个差别不会大于 10.88 天,与年周期相比,是一个小量,所引进的误差不大。用 N' 作指标,需要给出 7 500(300×25)对流速和流向值。对半日潮为主海区,为了进一步减少 N' 的数目,杜瓦宁把 N' 从 0 到 287 的每 36 个 N' 合并成 12 个 N ,如把 $N' = 0 \sim 11$, $12 \sim 23$ 和 $24 \sim 35$ 合并到 $N = 12 \sim 23$,并用天文指标 $N = 0 \sim 11$ 来表示。这样一来,对太阳位相而言进一步会有半个朔望月的误差,不过天文指标数目可减少到 108 个^[1,2]。此外,月球还有视差,即月一地距离的变化,它可影响月球引潮力的大小,范围约为 $\pm 20\%$ 。杜瓦宁用订正系数 C 来代表这一变化。杜瓦宁并编制出 1936—1960 年每天的 N 和 C 值^[1]。

尽管非调和方法在反映太阳位相中引入一些误差,如果观测资料足够多,使用这个方法时可不必要通过潮汐调和与分析这一步骤,而直接对潮汐观测资料进行统计,并且不必通过调和预报而直接用统计结果作预报。在没有电子计算机的年代,调和分析和预报是一项非常繁重的工作,并且对浅水效应显著的港口,浅水分潮非常多,分析和预报足够多的浅水分潮在当时是不可行的,因而非调和方法有一定的应用价值。

将杜瓦宁的方法用到潮流预报时,由于潮流观测资料很少,直接统计是不可行的。于是这个方法又必须与调和方法结合起来,计算出对应各 N 值的各天文分潮的位相和振幅系数(称为天文变量)。在实际应用时,要把各测站调和常数分析出来,并推算出对应各 N 值的逐时潮流值,编制成潮流永久预报表。50 年代末至 60 年代初,中国科学院海洋研究所尤芳湖等^[2]及国家科学技术委员会海洋组办公室由郑文振领导的研究组曾编制出版过永久潮流

表。这些永久潮流表可视为我国潮流区域预报的第一代产品。在这些表中对于每一个潮流预报站的一个层次需给出总共 2 700(半日潮流区)至 7 500(全日潮流区)组潮流流速和流向值。其篇幅仍然很大。由于篇幅大、计算量大且海流观测区域受限制,当时的永久潮流表只给出为数有限个站点 5m 层的预报资料,而且这些站点仅限于 124°E 以西海域。我们没有见过有关这些预报表的使用情况的报导。

3 70 年代的中国近海潮流永久预报图表集

60 年代后期电子计算机开始应用于我国海洋研究。方国洪认为有可能给出全区域性、多层次的潮流永久预报数据。在他倡议下,成立了潮流预报协作研究组,开始由中国科学院海洋研究所(以下简称海洋所)、国家海洋局海洋科技情报研究所(以下简称情报所)和中国科学院计算研究所(以下简称计算所)组成,后来中国科学院南海海洋研究所(以下简称南海所)亦参加进来。这项研究大约始于 1969 年,终于 1978 年,主要进行了下述 4 项工作。

3.1 实测海流资料的收集和调和与分析

资料来源主要仍是 1958—1960 年全国海洋综合调查资料(其中北部湾还包含中越合作调查资料),其次是 1972—1976 年国家海洋局东海分局和第二海洋研究所在 124°E 以东东海陆架区的海流观测资料,部分 1960—1969 年期间的海岸带调查资料,及国内外历史资料。此外南海所还提供了南海和北部湾的若干个站点的海流资料。测流的站位分布见图 1。分析时所采用的方法是准调和分潮方法^[3-5],计算工作在计算所的计算机上进行。计算所、情报所、海洋所和南海所均投入大量人力进行资料整理、数据输入、程序编制、计算和计算结果整理。

3.2 数值模式的研制

由图 1 可见,在中国近海存在着许多潮流资料空白区域。要补足空白区域的潮流信息,依靠实际观测是做不到的,因为空白区域很大,需投入巨大人力和物力;特别有些区域无法进入以实施调查。

电子计算机的发展为我们提供了数值模拟的工具。1970 年方国洪等^[6]首先采用二维线性方程计算得出黄海东部的潮流。当时所采用的数值计算方案是德国汉森^[7]的格式。随后方国洪等^[8-11]对台湾海峡、朝鲜海峡、渤海和东海东部建立了二维潮汐潮流模式。另外他们还研制了一个垂向一维潮流模

式用以计算潮流垂直分布。计算所得的潮流调和常数均用于潮流永久预报图表集的推算。由于“文化大革命”这些结果直到80年代才陆续在期刊上发表。1970年方国洪^[12]还提出了一种变分数值模式。这个模式将离散化的潮波方程和实测值放在一起,按最小二乘法求出最优解。这实质上是潮汐同化模式的最早尝试。由于计算量大,当时只计算了黄海的潮汐潮流,未能推广到其它海区。

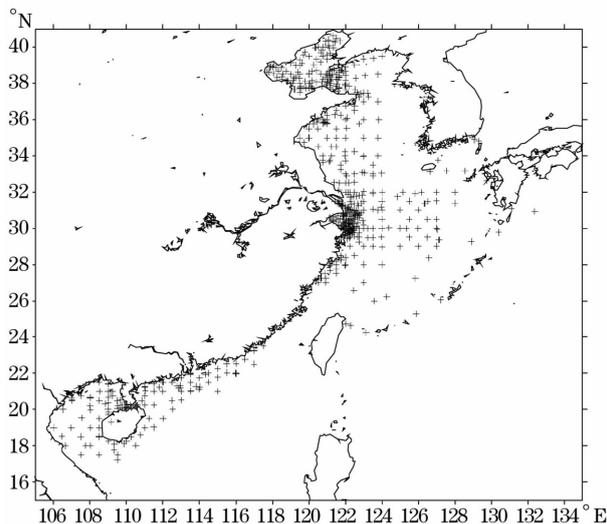


图1 中国近海潮流观测站分布图

Fig. 1 Distribution of tidal current observation stations in the seas adjacent to China

3.3 潮汐潮流永久预报的新方法

1970年方国洪提出了潮汐潮流永久预报的一个新方法^[13,14],其基本原理可简述如下:

太阳(月球)引潮力的主要项可表示为^[14]:

$$F = \frac{3}{2}gU(R/\bar{R})^{-3}\sin 2\phi\sin 2\delta\cos A + \frac{3}{2}gU(R/\bar{R})^{-3}\cos^2\phi\cos^2\delta\cos 2A \quad (1)$$

其中 g 为重力加速度, $g \approx 9.81\text{m/s}^2$; U 为与月地质量比和平均距离比有关的常数, $U = 0.56 \times 10^{-7}$; R 为月地距离, \bar{R} 为月地平均距离; ϕ 为观测点的地理纬度; δ 为月球赤纬,变化于 $0 \sim 28.6^\circ$ 之间,平均周期为回归月(27.32天); A 为月球相对于观测点的视角,平均每一太阴日(24.84小时)增加 360° 。 $\cos A$ 和 $\cos 2A$ 是每太阴日变化一个和两个周期的余弦函数,代表了太阴引潮力的全日和半日分量。 $\cos A$ 和 $\cos 2A$ 前面是缓慢变化的量,可视为振幅。这里特别值得注意的是太阴引潮力的全日分量的相角正好是半日分量相角的一半,由后者可决定前者。

全日和半日分量的振幅比为 $4\tan\phi\tan\delta$ 。其中 ϕ 对一定地点其值不变,随时间变化的量为 $\tan\delta$ 。 $\tan\delta$ 变化于 $0 \sim 0.545$ 。如果把平均值 0.2725 作为常数(这里只说明原理,实际采用的常数略有不同)合并到前面项中,则全日分量和半日分量的振幅比变化于 $0 \sim 2$ 之间。把区间划分为若干段,如 5 段,即 $0 \sim 0.4$, $0.4 \sim 0.8$, \dots , $1.6 \sim 2.0$, 并取每段中间值代表各段,则全日分量会引入相对于平均值的最大 20%, 平均 10% 的误差。这样做所带来的好处是,我们可以只用 5 种不同的变化类型代表所有太阳引潮力的变化。引入太阳引潮力(其值平均为太阳引潮力的 46%)后,全日分量的相角不再正好是半日分量的一半,会有所分散,但会集中在半附近;全日分量和半日分量的振幅比也不只限于 $0 \sim 2$, 有时 would 超过 2。但振幅和相角关系会分布在一个有限范围内。这时仍然可以把合成引潮力进行分类,只不过要想保持前述的准确度,潮汐类型要增加。对于黄海的情况,其类型要增加到 11 种。为了能覆盖 $0 \sim 24.84$ 小时,每种需给出 $0 \sim 25$ 小时的每小时值,故每种类型给出 26 个小时的数值,总共有 286 对流速和流向值。每一对用一个天文指标 T 代表,即 $T = 0, 1, \dots, 285$ 。与前面杜瓦宁方法相比,其数量大约是前者的 10.6%,这就大大缩减了预报表的篇幅。为了使用这种表,需算出与每天每小时的 T 值对相应的半日分量振幅系数值(记作 D)。全日潮流区的预报要复杂一些,潮汐类型也要多一些(如对北部湾,共有 24 种类型,预报篇幅约为杜瓦宁方法的 8.3%)。

3.4 永久预报图表的编制

利用实测海流分析及数值模拟所得的调和常数,采用新的永久预报方法,研究组编制了渤海、渤海海峡、黄海、朝鲜海峡、东海、舟山、南海北部和北部湾的永久潮流表,其中大部分海区还编制了潮流图。这些图表均由国家海洋局海洋科技情报研究所出版。图 2 示出所有预报站的站位,每站包含 5 层预报值;这些图表可视为我国潮汐潮流区域预报的第二代产品。

4 微机化的潮汐潮流区域预报系统

在 70 年代及以前,电子计算机仍未普及,故第一和第二代的潮汐潮流预报产品只能采用纸质图表为载体。与第一代产品相比,第二代产品的覆盖范围已得到极大的扩展。然而由于篇幅的限制,其分辨率仍然较低。同时查算、内插都需通过人工计算

进行,使用不方便,且容易发生计算错误。

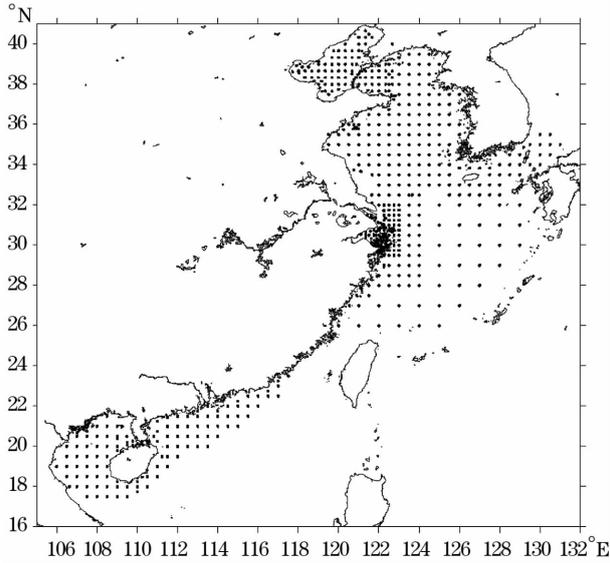


图 2 中国近海潮流永久预报图表集预报站分布图
Fig. 2 Distribution of prediction stations in the Atlas of perpetual tide and tidal current prediction for China adjacent seas

近年来电脑功能大大增强,在便携式电脑上已能够实现潮汐潮流的预报。因此,只要获得足够准确的潮汐潮流调和常数便可以用调和预报方法在便携式电脑上预报出任意时刻的潮汐和潮流。

卫星高度计已能提供长系列、覆盖除南、北极区域外全球海域的海面高度资料。以美国、法国合作的 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 高度计为例,从 1992 年 9 月开始即可提供准确度达到 3 cm 的海面高度资料,资料的观测间隔为 9.9156 天。卫星轨道覆盖南纬 66.15°至北纬 66.15°范围内几乎全球的区域。在中国近海其轨道如图 3。方国洪等^[15]利用 TOPEX/Poseidon 1992 年 9 月至 2002 年 9 月的观测资料提取了渤、黄、东海潮汐调和常数。他们采用了调和方法提取潮汐参数,基本方程为:

$$h_n = X_0 + \sum_{l=1}^L f_l(t_n) H_l \cos[\omega_l t_n + (v_{o,l} + u_l(t_n)) - g_l] + \varepsilon_n \quad (2)$$

其中 $\{h_m\} = \{h_1, h_2, \dots, h_N\}$ 为 $\{t_m\} = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 时刻的水位值; X_0, H_l, g_l 为待定的平均水位和调和常数, L 是分潮个数(这里 $L = 12$, 包括 $S_a, S_{sa}, Q_1, O_1, P_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2, M_4, MS_4$); ω_l 是分潮角速率,也是常数; $v_{o,l}$ 为平衡潮第 l 个分潮在 $t = 0$ 时刻的位相; $f_l(t_n)$ 和 $u_l(t_n)$ 为第 l 个分潮在 t_n 时刻的振幅交点因子和位相交点订正; ε_n 为噪声。通过

最小二乘法,可以由式(2)的 N 个方程求得平均水位和 24 个调和常数值。与地面验潮站结果相比,由卫星高度计得到的主要分潮 (S_a, O_1, K_1, M_2, S_2) 振幅偏差约为 2 cm,迟角偏差约为 5°,因而可以用于外海潮汐预报。在研制中国近海潮汐潮流区域预报系统时,上述方法被应用于更大的海区,并进一步被应用于 Jason-1 的观测资料。

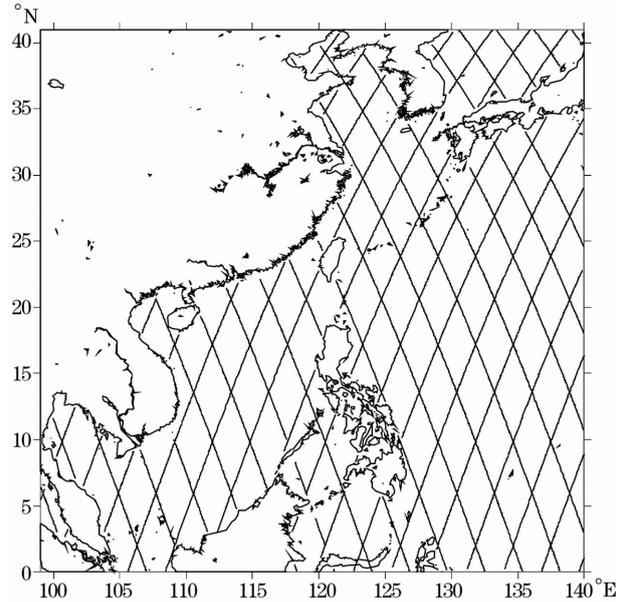


图 3 中国近海 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 卫星地面轨迹
Fig. 3 TOPEX/Poseidon and Jason-1 ground tracks in the China adjacent seas

由于卫星高度计轨道之间距离较大(在中国近海约 270 km),分析结果需内插到更细的网格点上。在该研究中采用了趋近同化方法,将高度计结果和沿岸、岛屿验潮站结果导入动力学数值模式,可获得高分辨率(5' × 5')的全海域潮汐调和常数。具体做法在连续方程的右端加上一个强迫项 F_ζ :

$$F_\zeta = \alpha \sum_m w_m (\zeta - \zeta_{obs,m}) \quad (3)$$

这里 m 为落在计算点周围影响半径之内的观测点序号, w_m 为权系数, α 为可调参数, $\zeta_{obs,m}$ 为观测值,实际上是由观测所得调和常数进行预报的 $n\Delta t$ 时刻数值:

$$\zeta_{obs,m}^n = H_m \cos(\omega n \Delta t - g_m) \quad (4)$$

其中 m 代表观测点, n 代表时间步。从内插角度来看,这种方法也可以叫做动力学内插方法。图 4 展示所得 M_2 分潮的分布。

在研制第二代潮流永久预报产品时,所用的数值模式还是比较简单的,分辨率也较低。由于计算

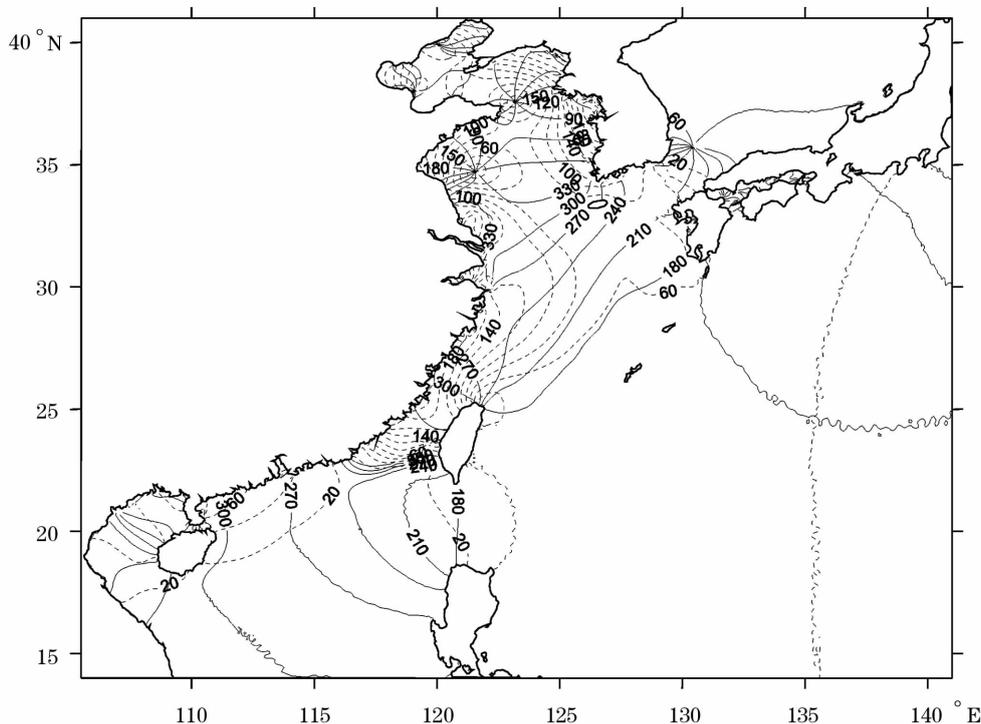


图4 由 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 卫星高度计资料及沿岸、岛屿资料提取,并通过动力内插得到的 M_2 分潮同潮图(实线为迟角,虚线为振幅)

Fig. 4 M_2 tide chart dynamically interpolated from the harmonic analysis results using TOPEX/Poseidon and Jason-1 altimetry and tide gauge records at coastal and island stations (Solid lines indicate phase-lag, dashed lines indicate amplitude)

机性的提高,在研制第三代预报产品时,采用了高分辨率($5' \times 5'$)三维数值模式。同时通过多年的动力学研究和数值模拟实践,包括伴随同化实验,对于中国近海的有关模式参数(如海底摩擦系数)已有了较好了解,因而数值模拟结果达到了较高的准确度。为了进一步提高结果的准确度,数值计算所得调和常数进一步根据实测分析结果(图1)进行校准后用于预报。

目前这一系统的预报范围覆盖了 $15^\circ \sim 41^\circ \text{N}$, $105^\circ \sim 140^\circ \text{E}$ 的中国近海和邻近西北太平洋区域。图4展示流海区最主要分潮 M_2 的振幅和迟角分布由于所获得潮汐潮流调和常数更准确、分辨率更高,而且预报模式中不必因分类而引入近似,预报的准确度更高,使用也更方便。但是需要注意的是,目前只有正压潮流是可预报的。当水深超过 100 m 时,正压潮流已不是海流中的主要成分,在水深小于 100 m 的某些潮流较弱的海区,如南海北部,正压潮流也可能不是主要成分。对于这些海区,把潮流预报结果作为总海流来使用会产生一定、甚至很大误差。在水深超过 200 m 的海区,潮流一般非常弱,潮

流预报基本上没有实际应用价值。

参考文献 (References):

- [1] Дуванин А И. Приливы в Море [М]. Гидрометеорологическое Издательство, Ленинград, 1960:1-390.
- [2] You Fanghu, Zheng Yifang. On large-area prediction of tidal currents [J]. *Oceaologia et Limnologia Sinica*, 1959, 2(3):111-135. [尤芳湖, 郑义芳. 关于潮流的大面积预报问题 [J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(3):111-135.]
- [3] Fang Guohong. Quasi-harmonic constituent method for analysis and prediction of tides I: Quasi-harmonic constituent [J]. *Studia Marina Sinica*, 1974, 9:1-15. [方国洪. 潮汐分析和预报的准调和分潮方法 I: 准调和分潮 [J]. 海洋科学集刊, 1974, 9:1-15.]
- [4] Fang Guohong. Quasi-harmonic constituent method for analysis and prediction of tides II: Analysis of short period observation [J]. *Studia Marina Sinica*, 1976, 11:33-56. [方国洪. 潮汐分析和预报的准调和分潮方法 II: 短期观测的分析 [J]. 海洋科学集刊, 1976, 11:33-56.]
- [5] Fang Guohong. Quasi-harmonic constituent method for analysis and prediction of tides III: A practical procedure for analyzing tidal streams and tidal elevations [J]. *Studia Marina Sinica*, 1981, 18:19-40. [方国洪. 潮汐分析和预报的准调和分潮方法 III:

- 潮流和潮汐分析的一个实际计算过程[J]. 海洋科学集刊, 1981, 18:19-40.]
- [6] Fang Guohong. Results of numerical computation of M_2 tidal current in the eastern part of the Huanghai Sea (Yellow Sea) with comparison to the observed data [C] // Proceedings of the First Symposium on Ocean Tides and Sea Level, 1986:45-55. [方国洪, 黄海东部 M_2 潮流的数值计算及其与观测结果的比较 [C] // 第一届潮汐与海平面学术讨论会论文集, 1986: 45-55.]
- [7] Hansen W. Hydrodynamical Methods Applied to Oceanographic Problems [R]. Mitt. Inst. Meereskd., Hamburg; University of Hamburg, 1962.
- [8] Fang Guohong, Yang Jingfei, Thao Yucui. A two-dimensional numerical model for tidal motion in the Taiwan Strait [J]. Marine Geophysical Research, 1984, 7(1):267-276.
- [9] Fang Guohong, Yang Jinfei. Modeling and prediction of tidal currents in the Korea Strait [J]. *Progress in Oceanography*, 1988, 21: 307-318.
- [10] Fang Guohong, Yang Jingfei. A numerical model for the tides and tidal currents in the Taiwan Strait [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 6(5):337-346. [方国洪, 杨景飞. 渤海潮运动的一个二维数值模型 [J]. 海洋与湖沼, 1985, 6(5):337-346.
- [11] Fang Guohong, Yang Jingfei. Numerical computation of tidal currents in the eastern and southern parts of the East China sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9(4):403-412. [方国洪, 杨景飞. 东海东部和南部潮流的数值计算 [J]. 海洋学报, 1987, 9(4):403-412.]
- [12] Fang Guohong A finite difference-least square technique for solving tidal wave equations with specific application to the modeling of M_2 tide in the Huanghai Sea [J]. *Science in China (Series B)*, 1985, 28(4):356-364. [方国洪. 潮波方程的有限差分—最小二乘方法及其对模拟黄海 M_2 潮的应用 [J]. 中国科学: B 辑, 1985, 28(4):356-364.]
- [13] Tidal Current Research Group of the Shandong Institute of Oceanology. A new method for perpetual prediction of tide and tidal current [J]. *Developments in Marine Science*, 1973, 11:2-16. [山东海洋研究所潮流组. 潮汐和潮流永久预报的一个新方法 [J]. 海洋科学动态, 1973, 11:2-16.]
- [14] Fang Guohong, Zheng Wenzhen, Chen Zongyong, et al. Analysis and Prediction of Tides and Tidal Currents [M]. Beijing: China Ocean Press, 1986;474. [方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986;474.]
- [15] Fang Guohong, Wang Yonggang, Wei Zexun, et al. Empirical cotidal charts of the Bohai, Yellow and East China Seas from 10 years of TOPEX/Poseidon altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109 (C11006), doi:10.1029/2004JC002484.

Development of Tide and Tidal Current Regional Prediction in China

FANG Guohong, WEI Zexun, WANG Yonggang

(First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: This paper reviews the development of the tide and tidal current prediction in China. The first generation prediction product was developed in 1959-1964. This product, called the Perpetual Tidal Current Tables, provided predicted tidal current data at 5 m depth at the same limited stations. These tables were compiled based on the method developed by ДУВАНИН. The second generation prediction product, called the Atlas of Perpetual Tide and Tidal Current Prediction for China Adjacent Seas, was completed during 1970-1978. This product was compiled based on the method developed by Fang Guohong. The atlas covered nearly entire sea areas adjacent to China and provided tidal current data at 5 levels in the vertical. Both the first and second generation products used printed paper as platforms. During 2005-2006 we developed the third generation prediction product. This product covered the entire China adjacent seas, with a resolution of $5' \times 5'$ and 10 levels in the vertical. The product allowed interpolation to an arbitrary location and level. The development processes and the basic principles are introduced in the present paper.

Key words: Tide; Tidal current; Regional prediction; China adjacent seas.