

# $M_2$ 分潮对夏季长江冲淡水扩展影响的 数值研究\*

朱首贤 朱建荣<sup>†</sup> 沙文钰

(解放军理工大学军事气象系 南京 211101)

<sup>†</sup>(华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

**摘要** 利用 $\sigma$ 坐标系下的斜压浅海环流模式,研究 $M_2$ 分潮对夏季长江冲淡水扩展的影响。在“准定常流”作用下,模拟出能反映夏季长江冲淡水扩展的盐度场,并模拟出与黄、东海实测资料相符的 $M_2$ 分潮。在此基础上,用两种方案讨论 $M_2$ 分潮对冲淡水的影响。第一种方案,仅考虑 $M_2$ 分潮,计算它对冲淡水扩展的影响;第二种方案,将 $M_2$ 分潮和“准定常流”耦合,计算冲淡水扩展的变化。结果表明, $M_2$ 分潮对冲淡水扩展有一定影响,其中包括潮混合和定向输运。

**关键词**  $M_2$ 分潮 长江冲淡水 潮混合 定向输运

**学科分类号** P731

夏季长江冲淡水出口门后,先向东南方向运动,随后在 $122^\circ 10' - 122^\circ 30' E$ 之间很快转向东北济州岛方向(毛汉礼等, 1963)。对夏季长江冲淡水转向机制,不同学者研究过的影响因子包括长江径流量、台湾暖流、风应力、海底地形、斜压效应、底摩擦、苏北沿岸流、东海北部冷涡、黑潮等(浦永修, 1983; 乐肯堂, 1986; 赵保仁, 1991), 但各个因子起怎样的作用,尚无一致看法,分歧很大。

潮混合有助于海水中溶解物质的扩散,浅海潮流产生较强的潮余流,对物质也有定向输运的作用。在黄、东海, $M_2$ 分潮是主要的天文潮,关于 $M_2$ 分潮对冲淡水的影响,研究很少。现利用一个 $\sigma$ 坐标系下的斜压浅海环流模式,借助数值计算的方法,研究 $M_2$ 分潮对夏季长江冲淡水扩展的影响。

## 1 模式及计算方案

计算模式建立在 $\sigma$ 坐标系下,采用C网格,垂向分层可变。时间积分用ADI(Alternating Direction Implicit)方法,垂向涡动粘滞、水位梯度引起的水平压强梯度、连续方程中的辐合辐散项隐式处理。盐度和温度方程平流项采用迎风格式,垂向对流和涡动扩散也是隐式处理(本文不计算温度的变化)。朱建荣等(1997)对模式作过详细介绍。

计算区域包括渤、黄、东海,水平分辨率为 $7.5' \times 7.5'$ (经纬度),垂向分11层,表层和

\* 华东师范大学河口海岸国家重点实验室开放基金项目和总参气象局资助项目。朱首贤,男,出生于1972年3月,硕士, Fax: 0086-025-2417609

收稿日期: 1997-09-08, 收修改稿日期: 1998-09-01

底层 $\Delta\sigma = 0.05$ ,其余各层 $\Delta\sigma = 0.1$ 。参考赵保仁等(1991)对实测资料的分析,渤、黄、东海和外界海水交换主要集中在长江口、台湾海峡、台湾以东黑潮入口、大隅-吐噶喇海峡、对马海峡和朝鲜海峡。计算“边界力”(即边界流量)、风应力和斜压效应作用下的“准定常流”(考虑盐度的变化时,盐度场一直处于调整状态,盐度的斜压效应使流场也处在微调状态,因此把这种准定常流加注引号),以这几个通道为开边界。计算 $M_2$ 分潮时,台湾以东黑潮入口至大隅-吐噶喇海峡也有外海潮波传入,当作开边界。

## 2 “准定常流”作用下盐度场的模拟

数值试验的目的是模拟出一个能反映夏季长江冲淡水扩展形式的盐度场,为考虑 $M_2$ 分潮的影响提供盐度初始场和比较场。除黑潮流经区外,计算区水深一般小于200m;而观测资料表明,黑潮流系的高流速区出现在表层和次表层,700—800m处的流速很微弱。计算“准定常流”,如果完全采用实际地形,地形变化剧烈时,模式引入较大的计算误差,因此计算时实际水深大于1200m的均当作1200m处理。

参考赵保仁等(1991)和王辉(1996)的研究,对长江口、台湾海峡、台湾以东黑潮入口、大隅-吐噶喇海峡、对马海峡和朝鲜海峡这几个开边界的流量,分别取为0.09、2、30、29、2.09、1Sv( $10^6\text{m}^3/\text{s}$ ),并参照中日黑潮调查资料给出的各开边界垂直断面流速分布,给定流速,作为“边界力”。风场利用COADS资料。由于缺乏详细准确的温盐资料,要如实地考虑斜压效应是困难的,但如果不考虑斜压效应,则不能模拟出与实测相似的流场及反映冲淡水扩展的盐度场,因此构造一个理想的黄海冷涡来探讨斜压效应,即在黄海中部放置10m层以下温度随水深增强的南北走向的椭圆型冷涡,其余水域的温度均取为 $28^\circ\text{C}$ 。整个海区盐度取为33,不考虑盐度的变化,由静止开始,计算出在“边界力”、风应力和黄海冷涡作用下稳定的流场。然后,长江口盐度取为10,其它开边界取流入定常,流出无梯度,考虑盐度的变化及其对斜压效应的影响,继续积分。需要说明的是,盐度变化是慢过程,要想在渤、黄、东海积分出稳定的盐度场,至少要以为时间尺度,就本文的研究目的来说,这样做并没有多大的意义。事实上,对于这样慢的物理过程,海洋的实际响应很难维持稳定状态,所以计算时没有积分出稳定的盐度场。考虑盐度变化后,再积分两个月,给出积分45天和60天的盐度分布。

冲淡水主要覆盖于海水表层2—3m,冲淡水影响到的区域深度基本小于100m, $\sigma = -0.025$ 层的深度小于2.5m,其盐度场能描述冲淡水的扩展。10m层插值盐度场能反映冲淡水向底层的扩展。图1基本体现了冲淡水指向济州岛方向的特征。冲淡水低盐水舌出口门先向东南,然后在 $122^\circ-123^\circ\text{E}$ 之间转向东北。模拟的冲淡水转向没有实测资料明显,主要原因是实测资料的夏季盐度场遗留有其它季节盐度场的信息,而模拟是以均匀盐度场为初始场,没有考虑其它季节盐度场对夏季盐度场的影响。

## 3 $M_2$ 分潮的模拟

渤海 $M_2$ 分潮对冲淡水影响不大,为减小模拟的难度,对 $M_2$ 分潮的计算区作调整,不包括渤海,渤海海峡作为开边界。 $M_2$ 分潮的计算采用初值法,即岸界处规定法向流速为零,开边界给出周期变化水位 $\zeta = H_{M_2} \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2})$ 。其中 $H_{M_2}$ 、 $\sigma_{M_2}$ 、 $g_{M_2}$ 分别为 $M_2$ 分潮的振幅、角速度、初位相,参考Fang(1986)的结果而给出。由静止积分,计算出稳定的潮流。

图2a较好地模拟出了黄东海的 $M_2$ 分潮。两个无潮点的位置分别为成山角外( $37^\circ$

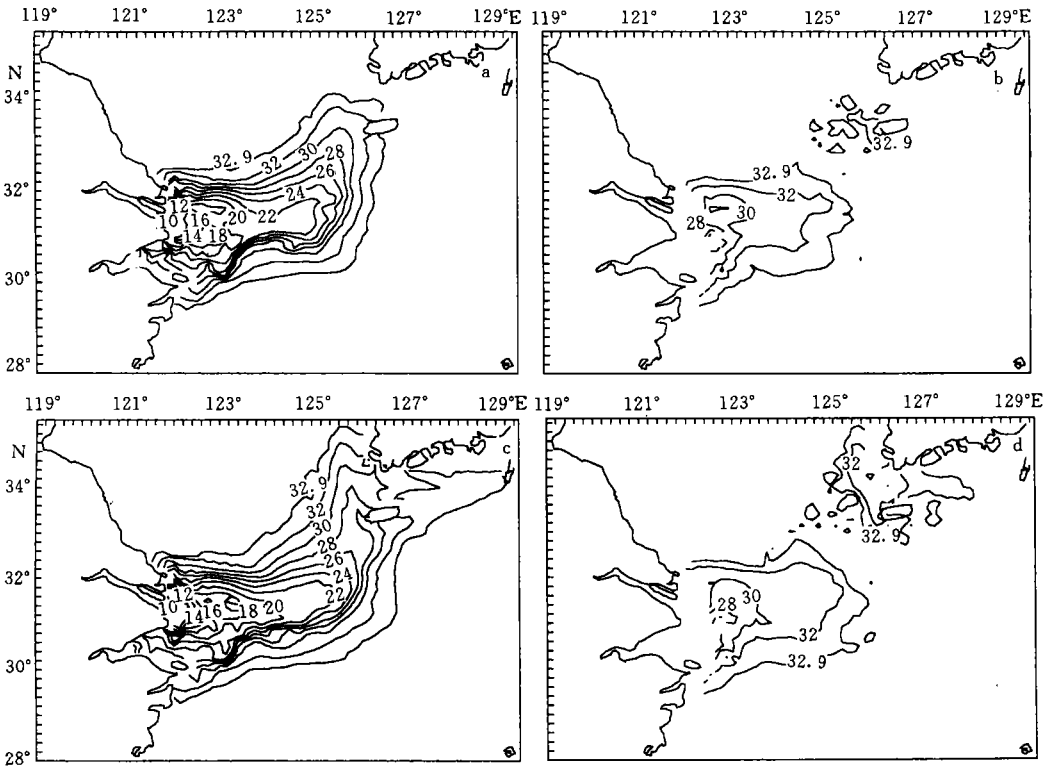


图1 “准定常流”作用下的盐度场

Fig.1 The salinity field induced by the “quasi-steady” current

- a. 积分45天的盐度场( $\sigma = -0.025$ 层);
- b. 积分45天的盐度场(10m层);
- c. 积分60天的盐度场( $\sigma = -0.025$ 层);
- d. 积分60天的盐度场(10m层)

40', 123°7.5')和连云港外(34°45', 121°20')。为帮助后面分析  $M_2$ 分潮对冲淡水的影响,还用质点跟踪法计算了 Lagrange 余流(平均速度)。图 2b 显示 Lagrange 余流在苏北沿岸、长江口和杭州湾附近、西朝鲜沿岸及朝鲜海峡较强,达 5cm / s 左右,局部达每秒十几厘米。在海区中部较深的地方余流很弱。本文计算结果和汤毓祥(1990)<sup>1)</sup>的模拟相似。

#### 4 仅考虑 $M_2$ 分潮的冲淡水扩展

设计这一组数值试验,目的是考察  $M_2$ 分潮对夏季冲淡水的这种盐度场分布形式是否存在影响。在计算出稳定的  $M_2$ 分潮(相邻两个潮周期流场演变一样)的基础上,以“准定常流”作用下积分 45 天的盐度场作为初始盐度场,计算在  $M_2$ 分潮的流场作用下(包括盐度产生的斜压效应在内的其它各种力都不考虑)盐度的变化。积分 15 天,并在最后一个潮周期对盐度作周期平均,结果见图 3。

如果没有潮流的平流和对流作用,在湍流扩散作用下,盐度场也会发生变化。为了估计这种扩散效应。以“准定常流”作用下积分 45 天的盐度场作为初始盐度场,仅考虑湍流扩散作用,计算盐度的变化,积分 15 天,结果见图 4。

1) 汤毓祥, 1990. 东海和南黄海潮余流的数值模拟. 黑潮调查研究论文选(一). 33—34

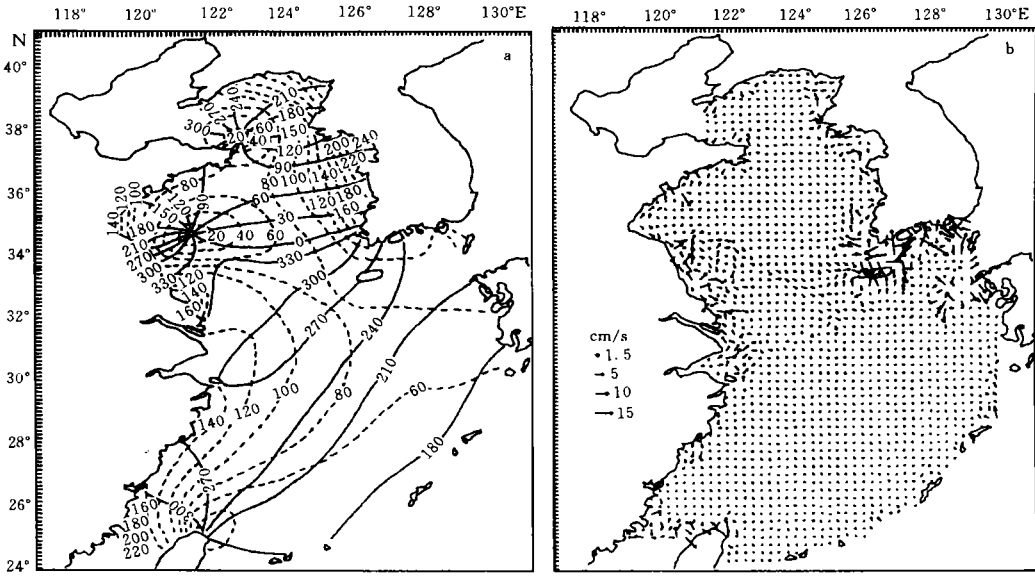


图2  $M_2$ 分潮的模拟图

Fig.2 The simulated  $M_2$  tide

a. 模拟的同潮图; b. 模拟的深度平均Lagrange余流  
 --- 等振幅线; ——等位相线

将图 3、图 4 与图 1 对比,其盐度场的差别可以提供  $M_2$ 分潮对夏季冲淡水扩展影响的一些信息,图 4 与图 1a、b 差别不明显。而图 3a,  $\sigma = -0.025$  层低盐水的范围大小基本不变,但盐度升高; 32.9 等值线包围的范围明显扩大,而且各向都扩大,32.9 与 32 等盐度线包围范围也明显扩大。32.9 等值线能反映冲淡水出口门后,低盐水外围在黄、东海的扩散,它本身包围范围及与 32 等盐度线包围范围的变化能分析潮混合作用的某些信息。图 4 表明湍流作用下的自由扩散有限,潮混合作用加强了水平扩散,使得图 3a 中的水平扩散很强。

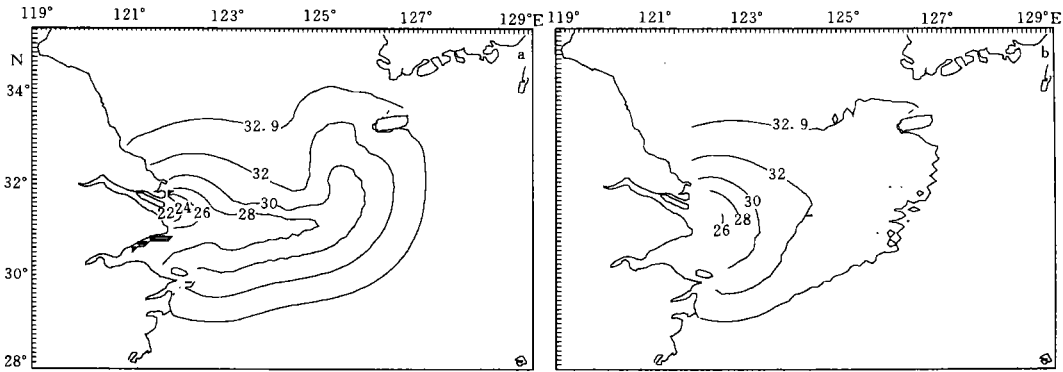


图3  $M_2$ 分潮影响下的盐度场

Fig.3 The salinity field affected by the  $M_2$  tide

a.  $\sigma = -0.025$ 层盐度场; b. 10m层插值盐度场

图 3a 的低盐水舌走向也有明显的变化,  $122.4^\circ\text{E}$  以西向南偏转程度减小, 而在  $123^\circ - 124.7^\circ\text{E}$  有较强的向南偏转, 这种变化与前面计算的潮余流吻合。图 3b 显示 10m 层 32.9 等值线范围扩大, 低盐水舌转向有类似表层的特征, 但不很明显。

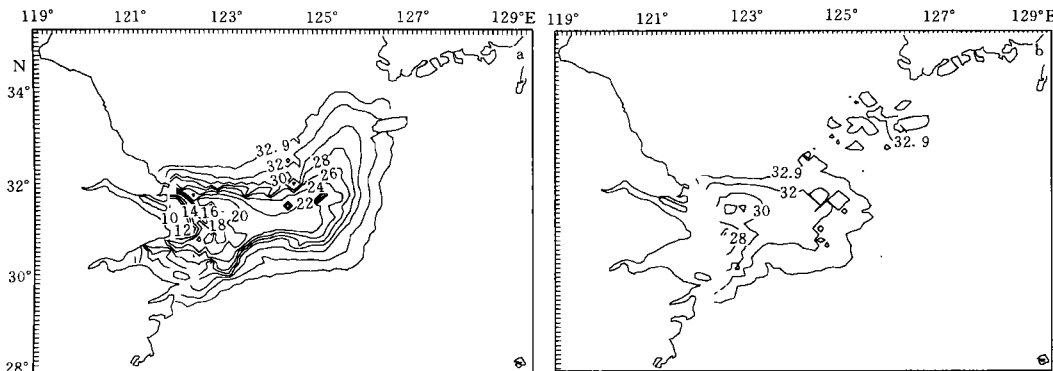


图4 湍流影响下的盐度场

Fig.4 The salinity field attacted by the turbulence

a.  $\sigma = -0.025$ 层盐度场; b. 10m层插值盐度场

综合起来,  $M_2$ 分潮对反映冲淡水扩展的盐度场有两点影响: (1) 潮混合作用加强了低盐水(冲淡水)向各个方向的水平扩散; (2) 对低盐水(冲淡水)有定向输运作用, 影响其扩展方向, 在长江口门附近抑制低盐水(冲淡水)向南扩展, 远离口门则抑制低盐水(冲淡水)向北扩展, 到济州岛附近这种抑制作用才不明显。

### 5 $M_2$ 分潮和“准定常流”耦合作用下冲淡水的扩展

非线性作用下, “准定常流”和  $M_2$ 分潮不是简单叠加, 对物质的输运和扩散作用也不是简单合成。设计这一组试验的目的是, 在  $M_2$ 分潮和“准定常流”耦合下, 考察  $M_2$ 分潮对夏季长江冲淡水扩展的影响。

前面计算“准定常流”, 对局部地形作了简化。但是计算  $M_2$ 分潮时, 重力外波的传播速度与深度有关, 采用实际地形。两者耦合计算, 缩小计算区域, 避开对地形作过简化的区域, 不包括渤海和黑潮区的深槽。开边界, 西边为渤海海峡和长江口, 南边  $28^\circ\text{N}$ , 东边界  $126.5^\circ\text{E}$ 。

先计算稳定的耦合流场。以前面积分 45 天的“准定常流”的流场和水位场为初始流场和初始水位场, 保持风应力、黄海冷涡和盐度场产生的斜压力不变, 开边界由  $\zeta = \zeta_0 + H_{M_2} \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2})$  给出水位, 其中  $\zeta_0$  为初始水位, 不计算盐度的变化, 积分计算出“准定常流”和  $M_2$ 分潮作用下的稳定流场(相邻两个周期流场变化相同)。然后加入盐度变化方程, 和流场一起计算, 继续积分 15 天, 对盐度作潮周期平均。

比较图 5 和图 1。图 5 显示了  $M_2$ 分潮和“准定常流”的耦合作用下“准定常流”定向输运、湍流扩散及  $M_2$ 分潮作用对盐度的影响; 而图 1c, d 只包含“准定常流”定向输运、湍流扩散对盐度的影响。两者的差别能反映  $M_2$ 分潮对冲淡水扩展的影响。图 1c, d 中, 在“准定常流”作用下, 冲淡水保持前 45 天的趋势继续向济州岛方向扩展。图 5 中, “准定常流”和

$M_2$ 分潮耦合下,大约在 122.7°E 以西,低盐水主轴明显向北偏;在 122.8°E 以东,低盐水主轴明显向南偏,受其影响,图 1a, b 中向济州岛方向、靠近济州岛附近的低盐水得不到持续补充,盐度升高,由图 5 可见该区不再呈现明显的低盐水特征。图 5 中,向济州岛方向靠近济州岛的低盐水得不到持续补充,盐度升高,会影响到 32.9 等盐度线的变化,即  $M_2$ 分潮和“准定常流”耦合下的定向输运对 32.9 等盐度线也有很大的影响。但是潮混合作用对低盐水扩散的影响仍能分析出来,图 1c, d 中,32.9 等盐度线和 32 等盐度线紧靠在一起;而图 5 中,32.9 等盐度线和 32 等盐度线包围的范围明显加大。定向输运的改变,只能使 32.9 等盐度线和 32 等盐度线包围的范围某些方向加大,某些方向减小,图 5 的各向加大显然是因为  $M_2$ 分潮的潮混合作用加强了低盐水在各个方向的扩散。

和“准定常流”耦合下,  $M_2$ 分潮对反映冲淡水扩展的盐度场的影响,也体现在潮混合的扩散作用和定向输运上,作用的性质和仅考虑  $M_2$ 分潮单一因子的情况差不多,但大小和形式有一些差别,耦合作用下,其影响似乎更大。

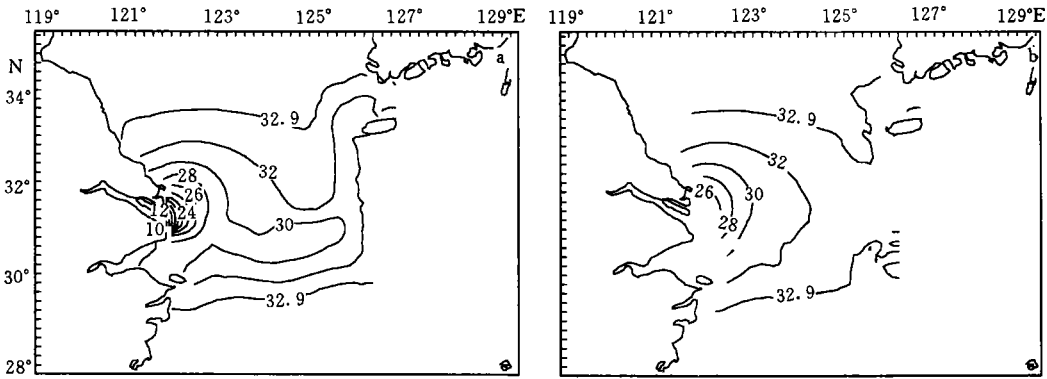


图5  $M_2$ 分潮和“准定常流”作用下的盐度场

Fig.5 The salinity field induced by the  $M_2$  tide and the “quasi-steady current”

a.  $\sigma = -0.025$ 层盐度场; b. 10m层插值盐度场

## 6 结果和讨论

综合上述试验,  $M_2$ 分潮对夏季长江冲淡水的扩展有一定影响,包括以下两点。

(1) 潮混合作用的扩散效应,各个方向都存在,它使长江口出来的淡水迅速从各个方向向东海和黄海扩散。

(2) 定向输运作用,在长江口外向北,它有利冲淡水向北转向,远离长江口,向南输运,不利冲淡水向北转向,在济州岛附近又有利向北转向。

$M_2$ 分潮对冲淡水扩展的影响与黄、东海本身的盐度分布形式有关,即其作用的形式和大小与影响冲淡水扩展的其它因子有关。本研究表明,  $M_2$ 分潮会改变夏季盐度场的分布形式,在其它因子作用的抵消下,长江冲淡水才能保持向济州岛的扩展形式。因此,夏季冲淡水扩展的模拟,最好能综合考虑包括潮流在内的各种因子。如能以某一个季节或时次的温盐和流场为初始场,考虑各个因子(包括潮流)的作用,模拟出渤、黄、东海温盐和流场的季节或年季循环,再研究  $M_2$ 分潮的影响,结论会更合理,这是今后努力的方向。

## 参 考 文 献

- 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳, 1963. 长江冲淡水及其混合问题的初步研究. 海洋与湖沼, 5(3): 183—205
- 王 辉, 1996. 东海和南黄海夏季环流的斜压模式. 海洋与湖沼, 27(1): 73—78
- 乐肯堂, 1986. 关于长江冲淡水路径的若干问题. 海洋科学集刊, 27: 221—228
- 朱建荣, 沈焕庭, 朱首贤, 1997. 一个三维陆架模式及其在长江口外海区的应用. 青岛海洋大学学报, 27(2): 250—263
- 赵保仁, 方国洪, 1991. 东海主要水道的流量估算. 海洋学报, 13(2): 169—178
- 赵保仁, 1991. 长江冲淡水的转向机制问题. 海洋学报, 13(5): 600—610
- 浦永修, 1983. 夏季长江冲淡水扩展机制的初析. 东海海洋, 1: 43—51
- Fang Guohong, 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. C J Oceanol Limnol, 4(1): 1—16

## A NUMERICAL STUDY ON THE IMPACT OF $M_2$ TIDE ON THE EXPANSION OF THE CHANGJIANG RIVER DILUTED WATER IN SUMMER

ZHU Shou-xian, ZHU Jian-rong<sup>†</sup>, SHA Wen-yu

(Military Meteorology Department of the Army Science and Technology University, Nanjing, 211101)

<sup>†</sup>(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Training College of Huadong, Shanghai, 200062)

**Abstract** The objective of this work was to study the  $M_2$  tide's impact on the expansion of Changjiang River diluted water. The calculation was done with a baroclinic and shallow water model in  $\sigma$  coordinate system. The selected domain included the Bohai, Yellow, and East China Seas. The horizontal resolution is  $7.5' \times 7.5'$ . The model had 11 layers. The quasi-steady current was simulated first, which was affected by the boundary forces, the summer wind and the baroclinic mechanism. The expansion of the Changjiang River diluted water in summer can be described by the salinity field resulted from the quasi-steady current. Then, the  $M_2$  tide in the Yellow Sea and the East China Sea was simulated. The results agreed with the observed data. Based on these studies, two ways were adopted to study the  $M_2$  tide's impact on the diluted water. The  $M_2$  tide was first considered individually to calculate its impact on the expansion of the diluted water. When the calculated current of  $M_2$  tide was steady, the salinity field induced by the quasi-steady current was taken as the initial field to be calculated with the  $M_2$  tide's current. Then, coupling  $M_2$  tide with quasi-steady current, the change of the diluted water's expansion was studied numerically. Taking the quasi-steady current as the initial field, and keeping the wind and the baroclinic mechanism, the calculation of current was carried based on the water level on the open boundaries, which was the superposition of that of the  $M_2$  tide and the quasi-steady current. When the change patterns of currents between two tidal periods were the same, the salinity was also calculated. The initial salinity field was induced by the quasi-steady current. These calculations indicated that  $M_2$  tide had

impact on the Changjiang River diluted water's expansion in summer, which involved tidal mixing and tidal transport.

Mixing accelerated the diluted water's diffusing to the Yellow Sea and the East China Sea in all directions.

Transport was northward near the Changjiang River mouth, and southward far away from the mouth, but was northward again around Jizhou Island.

**Key words**  $M_2$  tide Changjiang River diluted water Tidal mixing Tidal transport

**Subject classification number** P731

\* \* \* \* \*

### 《海洋与湖沼》学报简介

《海洋与湖沼》学报遵循科学技术要面向经济建设的宗旨,倡导不同学术观点的争鸣,开展国内外学术交流,以繁荣学术、提高研究水平;报道最新科研成果,为促进科学技术的发展和加速社会主义现代化建设服务;发挥老科学家的指导作用、中年科技人员的骨干作用,热情扶植青年学者,以利于科技人才的尽快成长,从而不断壮大科技力量。

《海洋与湖沼》学报,系海洋湖沼科技领域综合性的学术刊物,以报道基础研究、应用基础研究论文为主,同时重视应用研究,开发研究成果的发表;论文涉及水圈范围内的物理学、化学、地质学、环境学、生物学等学科及其分支学科的研究报告、研究简报、高新技术、学术争鸣、综述、学术简讯、科学家简介、书评等栏目。对于发明创造和同国计民生有重大关系的研究成果、带有崭新学术观点的论文,特别是青年学者的优秀论文,将予以优先刊登。

《海洋与湖沼》学报选登学科前沿和生长点的论文,以及发明创造、国家自然科学基金资助项目、国家重大攻关项目、各部委基金资助项目、填补空白项目的研究成果,尤其欢迎不同学术观点交锋的论文。对具重大创见性的自选课题的论文同样重视。

《海洋与湖沼》学报于1957年创刊,由中国海洋湖沼学会主办,中国科学院海洋研究所承办。第一任主编为中国科学院院士、第三世界科学院院士曾呈奎研究员,第二任主编为中国科学院院士、中国科学技术协会全国委员会委员刘瑞玉研究员,现任主编为中国科学院院士、国际第四纪委员会亚太地区副主席、中国海洋湖沼学会理事长秦蕴珊研究员。由于一向注重高水平、高质量,为学术交流、国家建设、人才成长作出引人注目的贡献,因而刊物在国内外均享有较高声誉。1988—1996年获省部级以上优秀科技期刊奖8项,最高为国家二等奖。双月刊,定价:12.00元。

全国各地邮局发行,邮发刊号 CN37-1149。

本刊编辑部