

Doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2013.04.003

刘宝超, 李建平, 冯立成. 垂直分辨率对长江口海域 M_2 分潮模拟的影响[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 19–28.

Liu Baochao, Li Jianping, Feng Licheng. The Effect of vertical resolution on the simulation of M_2 tide in Changjiang Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2013, 35(4): 19–28.

垂直分辨率对长江口海域 M_2 分潮模拟的影响

刘宝超^{1,2}, 李建平^{1*}, 冯立成³

(1. 中国科学院 大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要: 基于 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 模式建立了长江口及其邻近海域的三维水动力学模型, 研究模型的垂直分辨率对该海域 M_2 分潮模拟的影响。结果表明: 垂直分辨率的变化对 M_2 分潮传播方向的模拟结果影响较小, 但其可通过底摩擦和湍流耗散两个计算过程来影响潮能通量的模拟结果, 最终对长江口和杭州湾内的 M_2 分潮振幅产生显著的影响。最底层厚度较大时, 上层自由水体的高流速特征在最底层过于明显, 进而导致计算的底摩擦应力偏高, 此时提高底层的垂直分辨率会降低底摩擦对能量的耗散。另一方面, 垂直湍流混合作用会随垂直分辨率的增加而增强, 所以垂直分辨率增加到一定程度后, 上层自由水体的高流速会经由增强的湍流混合而更多的传入底层, 使计算的底摩擦应力随垂直分辨率的提高而有重新增加的趋势, 进而又增强底摩擦对潮能的耗散。

关键词: M_2 分潮; 垂直分辨率; 底摩擦; EFDC; 长江口

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2013)04-0019-10

1 引言

长江三角洲区域是我国社会经济最发达的地区之一, 其近海海域的生态环境变化对该地区的社会发展有着重要的影响。在近海海洋研究中, 数值模拟是一个重要的研究手段^[1-6]。EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 模型是由弗吉尼亚海洋科学研究所建立的、适用于多种地表水环境问题研究的综合性模型^[7-16]。在长江口及其邻近海域的应用中, 郑晓琴等^[17]利用 EFDC 成功模拟了夏季该海区的温盐分布特征; 谢锐等^[18]利用 EFDC 模拟得到的长江口地区潮位及流速能较好地反映出实测潮位与流速的

特征。严以新等^[19]和 Li 等^[20]则基于 EFDC 模型成功模拟了长江口及其邻近海域的化学需氧量(COD)和溶解氧(DO)的浓度分布与变化。这些研究工作表明, EFDC 模型是研究长江口及其邻近海域海洋问题的有效工具。

长江口及其邻近海域是一个潮汐现象非常显著的半日潮型海区, 潮汐是该海域最重要的动力因子之一, 对其模拟的准确与否决定着其他研究结果的可靠性。所以模型建立后, 必须首先利用实测资料对模型的参数进行校准, 提高模型对潮汐模拟的精度。但是随着研究问题的改变、研究目标的调整, 经常要对模型的垂直分辨率做出调整。已有的研究表明, 模式分

收稿日期: 2012-03-05; 修订日期: 2012-07-05。

基金项目: 国家海洋局项目; 国家自然科学基金重点基金“基于非均匀基流的行星波传播新理论与亚澳季风相互作用”(41030961)。

作者简介: 刘宝超(1985—), 男, 山东省临沂市人, 博士研究生, 从事近海海洋环境数值模拟研究。E-mail: lbwcnj@126.com

* 通信作者: 李建平, 研究员。E-mail: ljpl@lasg.iap.ac.cn

分辨率对数值模拟结果有着重要的影响^[21-23],因此垂直分辨率的调整势必导致潮汐的模拟精度发生变化。为确保模拟结果的准确性,垂直分辨率调整后必须对模型的各种参数进行重新校准,那么如何才能在垂直分辨率变化后快速的进行参数校准便是模型应用中一个重要的问题。如果能够知道垂直分辨率的变化会导致哪些物理过程的计算结果发生改变,以及这些物理过程的变化是如何影响潮汐模拟结果的,那么即可在参数校准过程中有的放矢,重点调整与这些物理过程有关的参数,从而在垂直分辨率变化后快速的对模型参数做出校准。本文就将基于 EFDC 模型来研究垂直分辨率是通过哪些物理过程来影响潮汐模拟结果的。

2 模型简介及模型设置

2.1 EFDC 模式简介

EFDC 耦合了水动力、泥沙、污染物输运和水质 4 个子模块,本文仅用其水动力子模块来模拟长江口及其邻近海域的潮汐现象,故这里仅对其水动力子模块的特点做简要介绍。水动力子模块的控制方程是水平正交曲线坐标系下,经过垂直准静力平衡和 Boussinesq 近似的三维原始方程组,垂直方向采用 σ 坐标。模型的垂向湍流混合采用 Mellor-Yamada 二阶湍流

闭合模型^[24]进行求解;EFDC 采用有限差分法对原始方程组进行数值求解,水平方向使用交错网格离散变量,垂直方向则采用固定分层法进行离散。为提高计算效率,模型采用模态分离法求解三维流场。关于 EFDC 模型的详细介绍见文献[7]。

2.2 模型设置

本文的研究区域包含长江口、杭州湾及其邻近海域(图 1)。区域西边界取到长江江阴站,东边界至 123°E,南边界至 29.5°N,北边界至 32.5°N。区域内的正交曲线网格总数为 141×146,其中水域格点数为 9 794。河道及河口区的网格分辨率较高,最小网格宽 100 m 左右。外海区域网格分辨率低,最大网格长 6 km 左右。

研究中进行了 4 个均匀分层的试验和两个非均匀分层试验,均匀分层试验的垂直分层数分别为 5、10、20、40 层,为描述方便,文中分别用 L05、L10、L20、L40A 来表示 4 个均匀分层试验;非均匀分层试验的垂直分层数均为 40 层,但是近地层的垂直分辨率不同,一个试验近地 10 层的单层 σ 坐标厚度为 0.01,记为 L40B。另一试验近地 10 层的单层 σ 坐标厚度为 0.001,记为 L40C。适当增加两试验上部分层的厚度,使 σ 坐标系下的总厚度为 1。

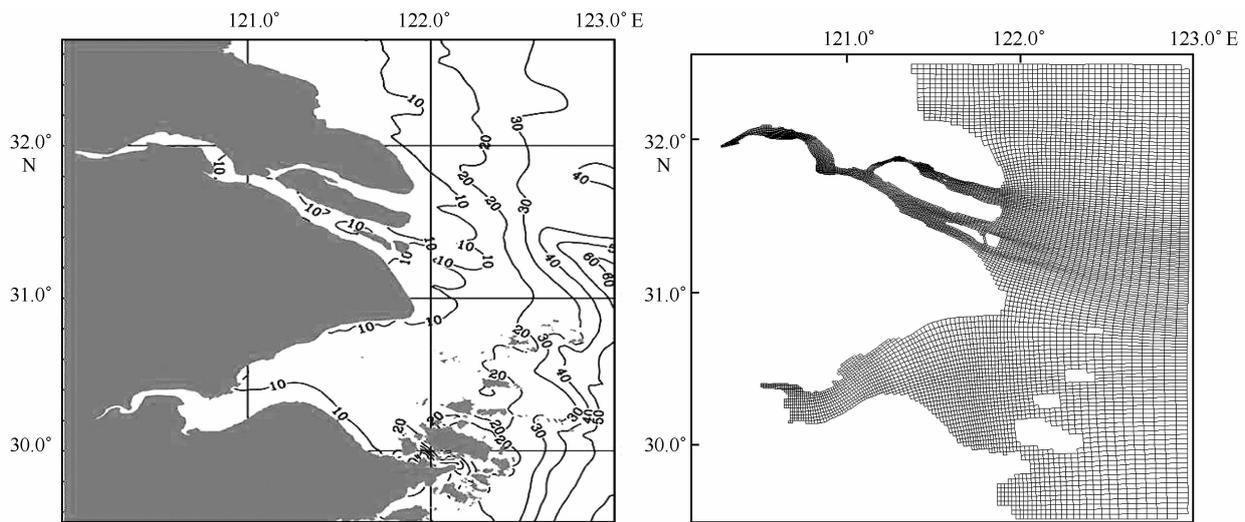


图 1 长江口及其邻近海域的地形(左)及计算网格(右)

模型的初始水位和流速取为 0。初始温度、盐度采用 7 月份多年平均的统计资料^[25]。本文重点研究垂直分辨率对潮汐模拟的影响,因而,除开边界潮位外的其他各种外强迫,均采用固定的值。开边界上的温度、盐度采用 7 月份多年平均数据^[25]。长江和钱

塘江的入流采用 7 月份多年平均的径流量。气温、气压、湿度、降雨、辐射、云量以及风速等气象要素均采用美国国家环境预报中心(NCEP)再分析资料提供的 7 月份气候平均值;蒸发则使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 7 月份气候平均值。

本文使用长江口海域的 8 个主要分潮: M₂、S₂、N₂、K₂、K₁、O₁、P₁、Q₁ 来计算开边界上的潮位:

$$\zeta = \sum_{n=1}^N \zeta_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) + \zeta_{ser}, \quad (1)$$

式中, ζ_n , ω_n , φ_n 为各分潮的振幅、角频率、初位相; ζ_{ser} 是余水位。各分潮的振幅、初位相由 Nao, 99b^[26] 提供, 初位相是 2005 年 1 月 1 日 00 时的位相值。对于分潮个数的选择, 作者亦采用了不包含 P₁、Q₁ 分潮的 6 个分潮进行了试验, 结果表明这两个试验间的差异极其微小, 但为考虑全面, 本文采用 8 个分潮的试验结果进行分析。本文暂不考虑余水位。

模型从初始状态积分 60 d 达到稳定状态, 继续模拟 60 d, 并输出逐时的结果用于分析。

3 结果分析

3.1 不同垂直分辨率试验模拟的 M₂ 分潮

潮波传入长江口海域后, 受长江径流、复杂地形等因素的影响, 使该海域成为一个中等强度的半日潮型海区, M₂ 分潮是该海域的主要天文分潮。

图 2 是基于 TOPEX/Poseidon 卫星测高资料和近岸观测数据得到的渤海、黄海、东海 M₂ 分潮同潮图^[27]。长江口的潮波深受东海前进潮波系统的影响, M₂ 分潮在计算海域内从东南向西北传播, 向西传播过程中受到长江口和杭州湾的海岸影响, 沿岸向西传播, 传播方向与河槽轴线一致。由于杭州湾呈喇叭形, 其潮汐振幅向西增大^[28]。

图 3 是不同垂直分辨率试验模拟的 M₂ 分潮同潮图。从初位相的对比可以看出, 各试验均较好地模拟出了 M₂ 分潮的传播方向, 初位相间的差别不大。M₂ 分潮振幅的空间分布特征也大体一致, 都能反映出实际振幅空间变化的若干特征, 如杭州湾内的振幅较大等, 但振幅的数值之间却存在着较大差异。图 4 是各试验与 L05 试验的 M₂ 分潮振幅之差。可以看出, 外海区域的 M₂ 分潮差异相对较小, 差值均小于 10 cm, 并且基本都表现出东南区域增加, 西北区域降低的趋势。长江河道内的 M₂ 分潮振幅均随层数的增加而降低, 40 层试验的振幅降低最大, 并且会随着底层分辨率的增加而进一步降低, L40C 试验的最大降幅超过 1 m。杭州湾内的振幅差异更加显著, 但变化规律略有不同, 10 层试验的振幅有所增加, 最大增幅近 30 cm, 20 层和 40 层试验的振幅则表现出显著的降低, L40C 试验的最大降幅几近 2 m。此外, 各试验在舟山群岛西侧有一个振幅增加区域, 其中以

L40A 试验最显著, 最大增幅超过 20 cm。从结果可以看出, 垂直分辨率变化对潮波传播方向的影响较小, 但对分潮振幅的模拟结果, 尤其是近岸水域的分潮振幅却有着显著的影响, 这意味着垂直分辨率改变后, 必须对模型参数做出重新调整, 以提高对分潮振幅的模拟精度。

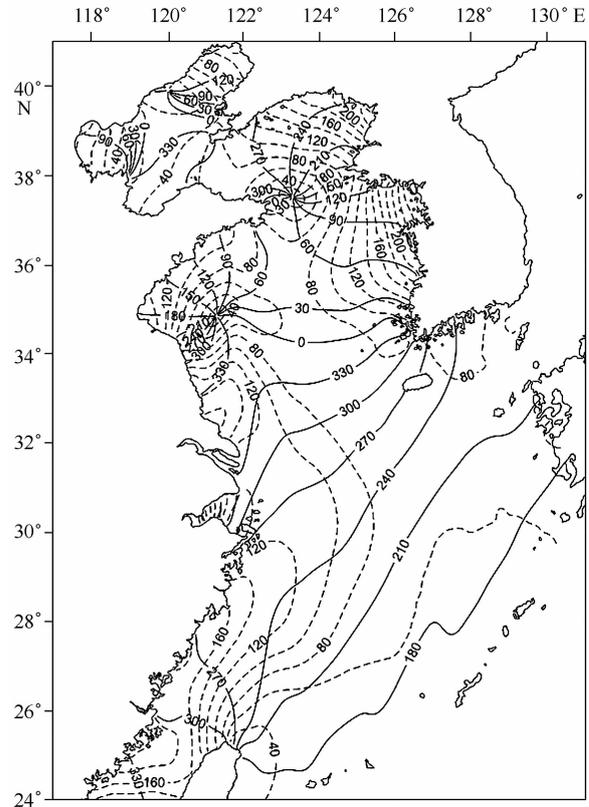


图 2 渤海、黄海、东海海的 M₂ 分潮同潮图^[27] [实线表示初位相, 单位: (°); 虚线表示振幅, 单位: cm]

3.2 不同垂直分辨率试验模拟的潮能通量

长江口及杭州湾内的潮汐是由外来潮波引起的胁振潮, 外来潮波传入能量的大小决定着该区域潮振动的强弱。能量传播的大小可以用潮能通量表示, 即在单位时间内通过单位宽度断面、自海底至海面整个水柱的潮汐能量, 其计算公式如下^[29]:

$$(E_{fx}, E_{fy}) = \frac{\rho}{T} \int_0^T \int_0^1 (u, v) h \left[g\zeta + \frac{u^2 + v^2}{2} \right] d\sigma dt, \quad (2)$$

式中, E_{fx} , E_{fy} 表示潮能通量在 x , y 方向的分量, ρ 是海水密度, T 是时间, u, v 分别是 x, y 方向的流速, h 表示总水深, ζ 是水位。图 5 是不同垂直分辨率下模拟的潮能通量矢量图。各试验模拟的潮能传播方向在外海基本都是从东南传向西北, 在长江口及杭

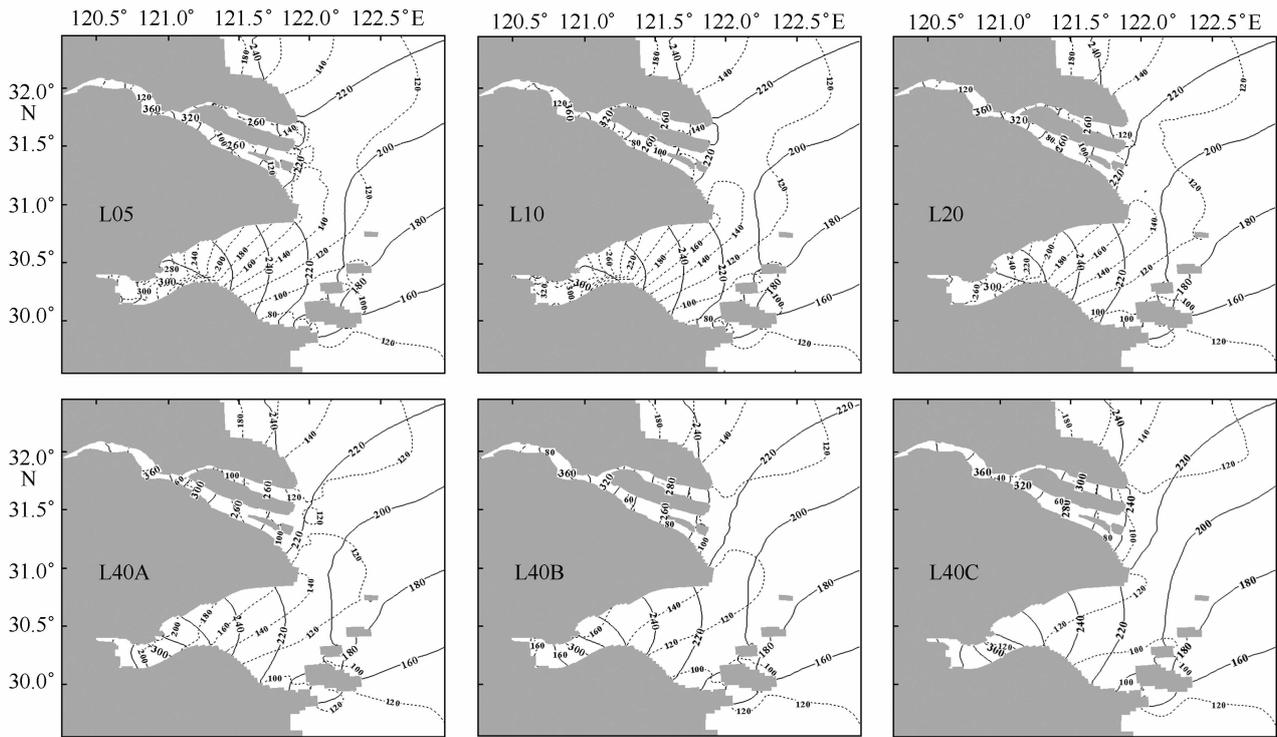


图3 不同垂直分辨率下的 M_2 分潮同潮图[实线表示初位相,单位: $^\circ$;虚线表示振幅,单位: cm]

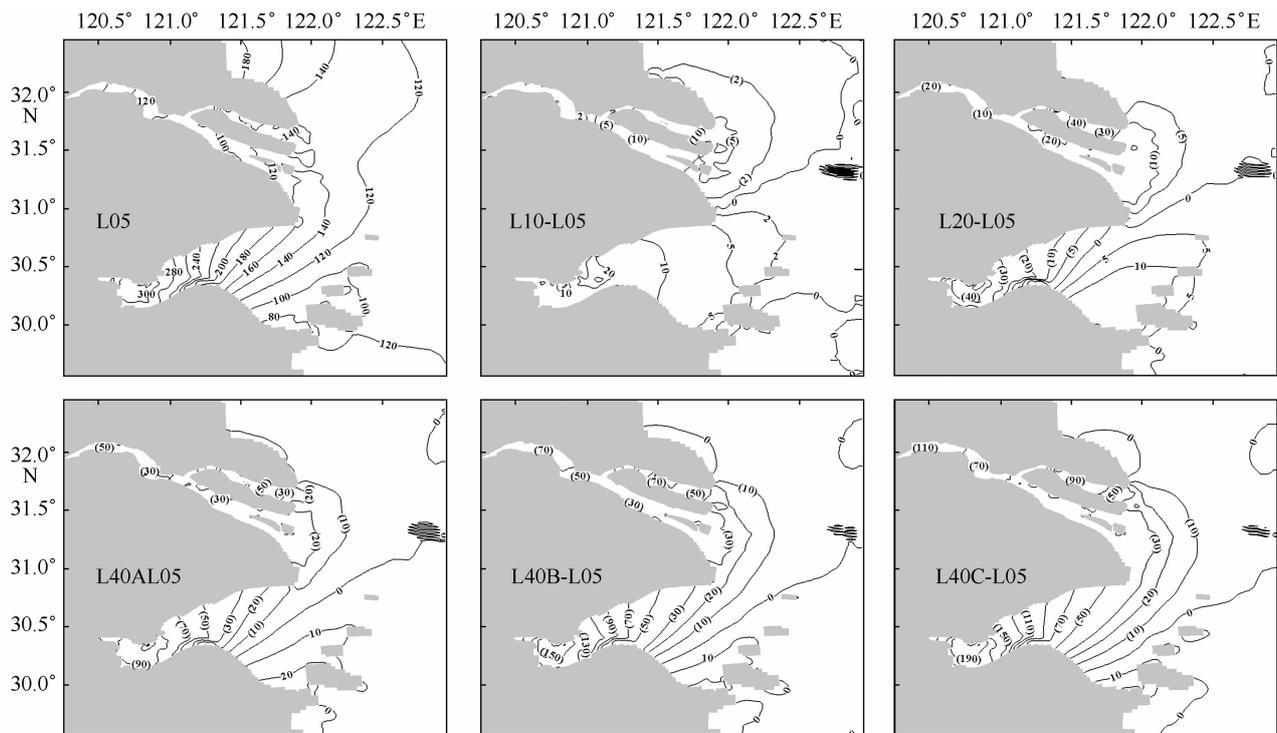


图4 各试验与 L05 试验的 M_2 分潮振幅之差(单位: cm)

括号内为负值;左上图为试验 L05 模拟的 M_2 分潮振幅,其他为相应试验与 L05 试验的 M_2 分潮振幅差

州湾内则沿岸线传向内陆,这与 M_2 分潮的传播特征相吻合。潮汐能量由外海向内陆传播过程中会产

生摩擦耗散,所以外海能量通量总体要大于近岸区域。在杭州湾,由于喇叭口地形的影响,形成了一个潮能辐聚区。同样,由于舟山附近的水道较窄,该区域也形成了一个潮能通量的大值区。图6是各试验的潮能通量与5层试验潮能通量的矢量差。表1是各试验中,单位时间内通过图5中断面传入长江口和杭州湾的总潮能。各试验在长江口内的潮能通量均有指向外海的异常,进入长江河道的潮能随着垂

直分辨率以及底层分辨率的增加而逐渐减少。而在杭州湾,L10试验中进入杭州湾内的潮能最大。其他各试验中,进入杭州湾内的潮能则有显著的降低,并且分辨率越高,降低的越多。潮能通量在长江口和杭州湾内的变化情况,与 M₂ 分潮振幅的变化一致。下面我们将研究垂直分辨率变化是如何影响潮能通量的,进而阐明垂直分辨率影响潮汐模拟结果的机制。

表1 各试验中传入长江口和杭州湾内的总潮能功率(单位:10⁶ kW)

	L05	L10	L20	L40A	L40B	L40C
长江口	1.44	1.31	1.12	0.97	0.83	0.69
杭州湾	4.17	4.53	3.96	3.10	2.39	1.82

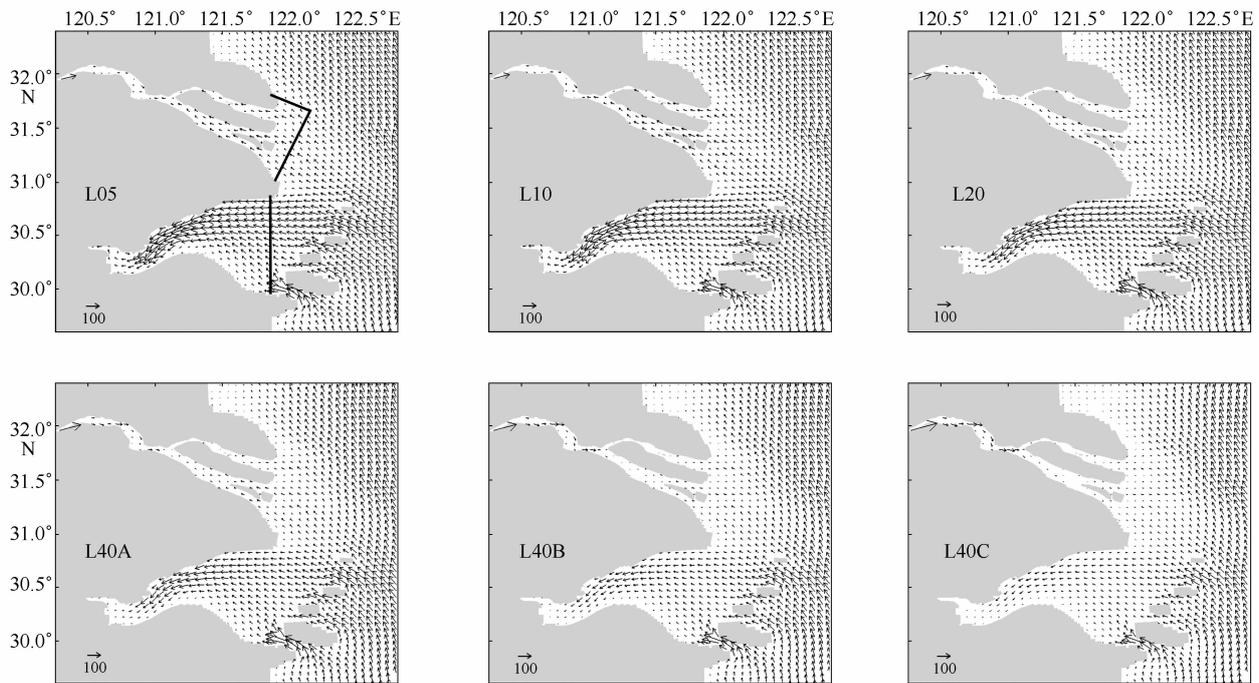


图5 不同垂直分辨率下模拟的潮能通量矢量图(单位:kW/m)

左上图黑实线表示的断面用于计算传入长江口和杭州湾内的潮能

3.3 垂直分辨率对湍流黏性系数以及底摩擦应力的影响

本文中,外来能量由3部分组成:外海开边界上的潮汐、长江和钱塘江的入流以及表面风等气象要素。这几项在所有试验中都是相同的,因而引起潮能通量差异的主要是系统中的两个能量汇项:湍流耗散和底摩擦。

图7是各试验稳定状态下垂直平均的湍流黏性系数。湍流黏性系数是随垂直分辨率的增加而增大

的,故湍流对潮能的耗散也是随垂直分辨率增加而逐渐增强的。底层垂直分辨率的增加也会显著增强湍流耗散。底摩擦应力的变化规律相对复杂些,图8是L05试验稳定状态下的平均底摩擦应力以及其他试验相对于各自前一分辨率试验的底摩擦应力增长率。L10试验中除长江口的浅滩以及杭州湾内的浅水区域外,大部分区域的底摩擦应力都要小于L05试验。此后,除L20试验外海深水区的底摩擦应力小于L10试验以及L40B、L40C两试验中杭州湾内的部分区域

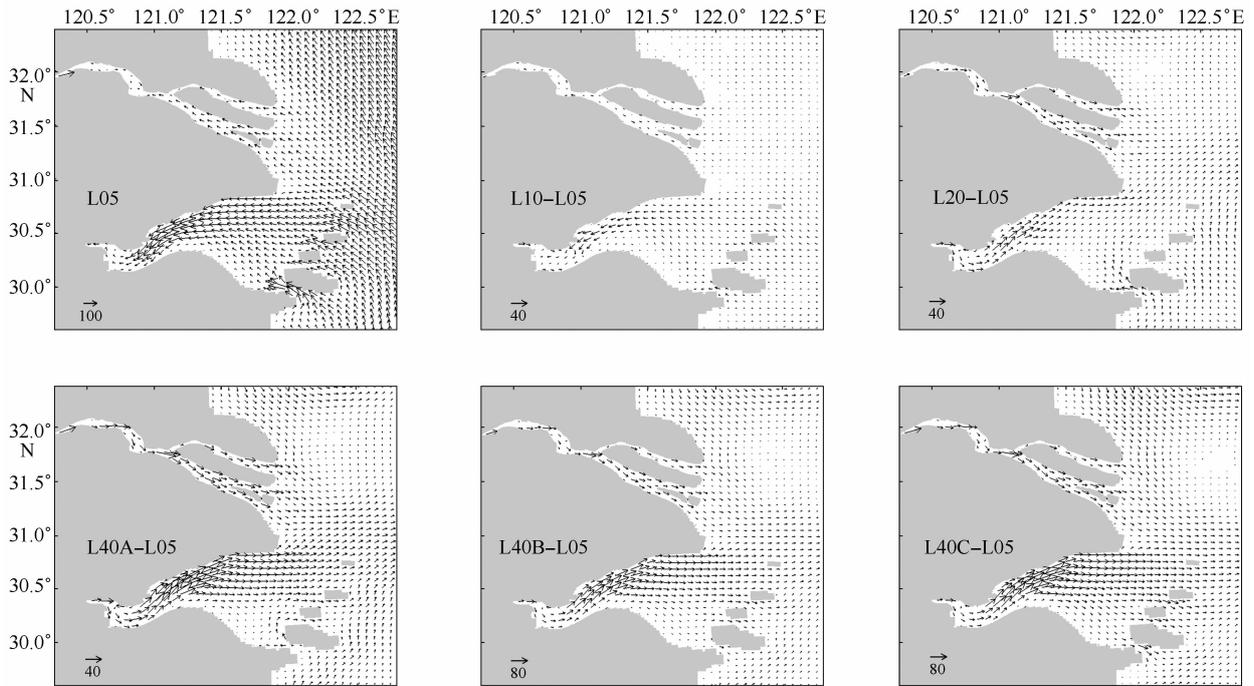


图 6 各试验与 L05 试验的潮能通量矢量差

左上图是 L05 试验的潮能通量矢量图,其他为相应试验与 L05 试验的潮能通量矢量差(单位: kW/m);L40B 和 L40C 两图中单位矢量长度表示的值是 L10 等图的 2 倍

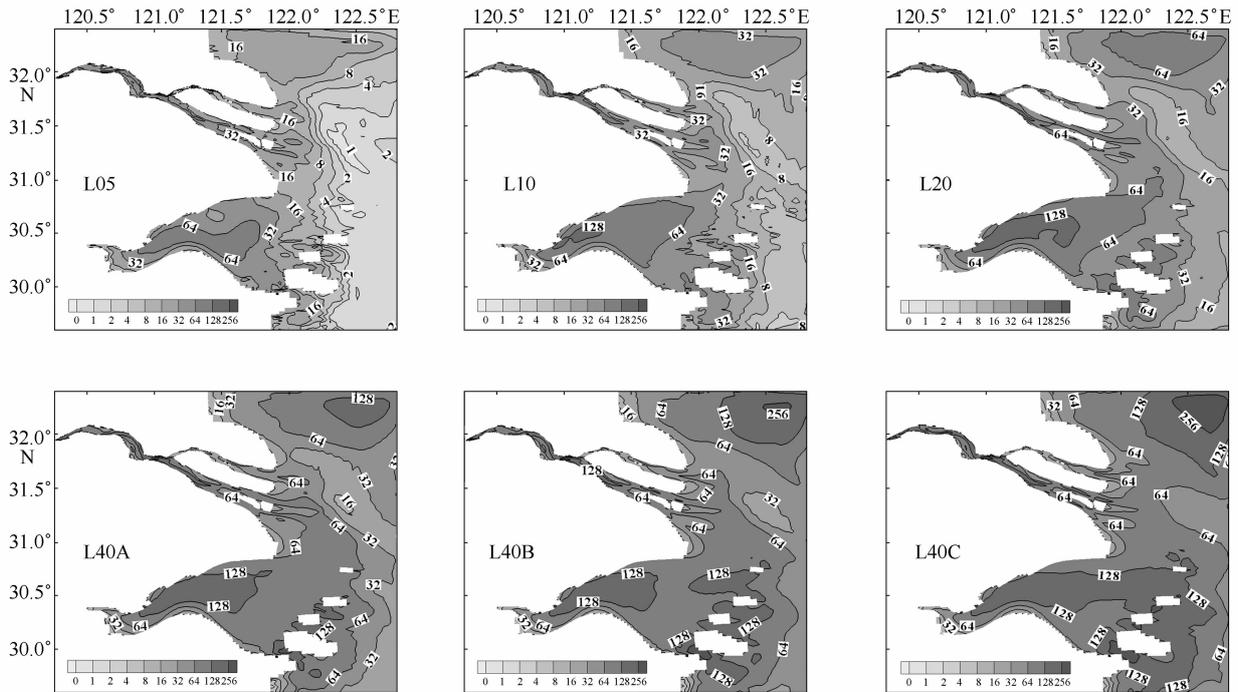


图 7 不同垂直分辨率下,垂直平均的湍流黏性系数(单位: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)

的底摩擦应力有减小的趋势外,底摩擦应力基本都是随着总的垂直分辨率以及底层垂直分辨率的增加而增大。这与区域内潮能通量的变化情况基本一致,10

层试验中整个外海区域的底摩擦应力最小,潮能在外海传播时受到的底摩擦耗散最小,因而其由外海进入杭州湾的潮能最大,但是由于其在长江口门浅滩处的

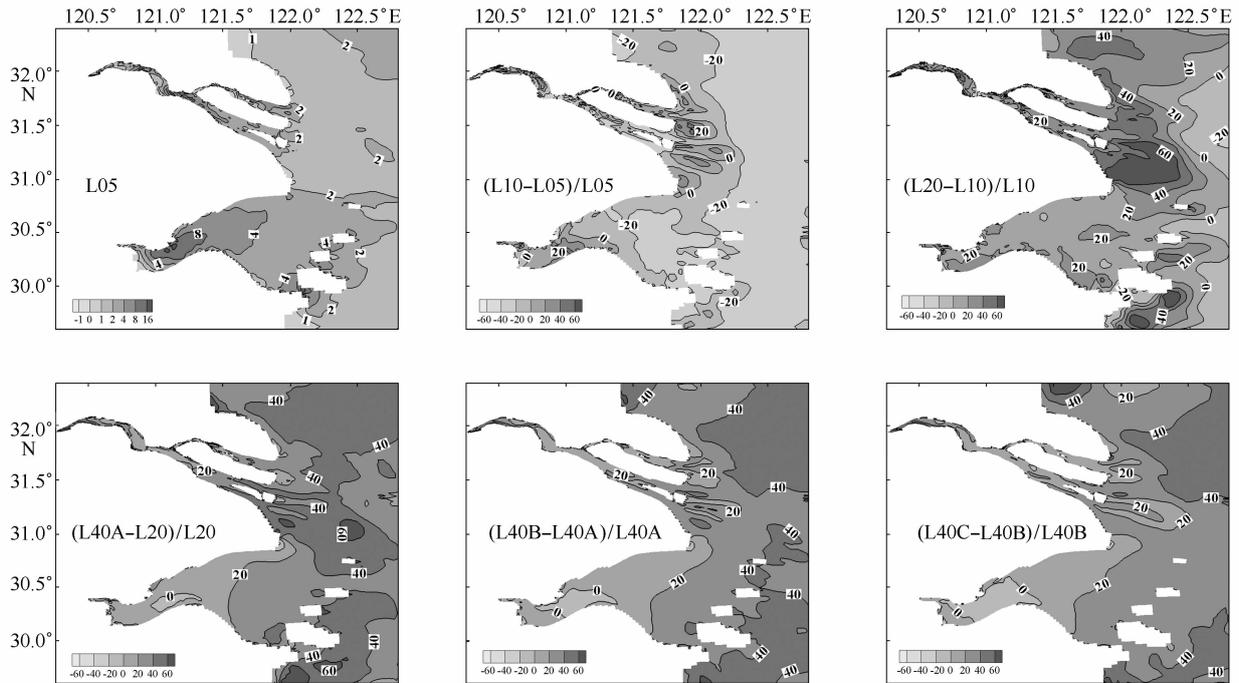


图8 左上图为 L05 试验稳定状态下的平均底摩擦应力(单位: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$); 其他图为相应试验相对于各自前一分辨率试验的底摩擦应力增长率(%)

底摩擦应力大于 5 层试验, 增强了潮汐通过口门进入长江河道时的耗散, 使得进入长江河道内的潮能仍然小于 5 层试验。其他试验中, 区域内的底摩擦应力基本都随着垂直分辨率增加而增大, 底摩擦应力对潮能的耗散逐渐增强, 因而进入长江河道以及杭州湾内的潮能逐渐减少。

由于底摩擦应力的变化情况与潮能通量的变化情况基本一致, 所以下面我们着重分析垂直分辨率是如何影响底摩擦应力的。EFDC 中的底摩擦应力计算采用的是基于混合长理论、在常通量层假定下得到的二次摩擦力关系式。其假定近地层的湍流切应力不随高度变化, 并且湍流混合长 l 与高度成正比:

$$l = \kappa z, \quad (3)$$

κ 即卡曼常数, 通常取值 0.4。基于这两个假设可得到近地层湍流应力的计算公式:

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_b \sqrt{u_1^2 + v_1^2} (u_1, v_1), \quad (4)$$

$$C_b = \kappa^2 \left(\ln \left(\frac{z}{z_0^*} \right) \right)^{-2} = \kappa^2 \left(\ln \left(\frac{\Delta_1 H}{2z_0^*} \right) \right)^{-2}, \quad (5)$$

式中, τ_{bx}, τ_{by} 分别为 x, y 方向的底摩擦应力分量, 其不随高度而变化; u_1, v_1 分别是计算高度 z 处 x, y 方向的底层速度分量; C_b 为底摩擦系数; z_0^* 是粗糙度; 在数值计算中, 垂直分层中的最底层被认为是常通量层, 因而 z 通常是格点最底层中心距床面的高度, 也

即最底层厚度的一半 $\frac{\Delta_1 H}{2}$ 。在模拟计算中, 如果水深较浅, $\frac{\Delta_1 H}{2z_0^*}$ 会出现小于等于 1 的情况, 造成计算不稳定。为此 Mellor^[30] 对摩擦系数的计算做了些改动, 公式变为:

$$C_b = \kappa^2 \left(\ln \left(1 + \frac{\Delta_1 H}{2z_0^*} \right) \right)^{-2}. \quad (6)$$

由于 z_0^* 的取值较小, 大部分情况下, $\frac{\Delta_1 H}{2z_0^*}$ 都是远远大于 1 的, 公式(6)与公式(5)的计算结果差别不大, 但能保证计算的稳定, 所以 EFDC 模型采用公式(6)进行计算。

在常通量层的假定下, 流速的垂直变化特征主要是由湍流混合作用决定的, 而压力梯度力、科氏力等外力的影响相对小得多。这时近地层的流速将按照对数规律变化, 模型计算的底摩擦应力不会随着底层厚度的改变而发生变化。实际模拟计算中, 这种常通量层的理想状态是不存在的。但如果在某一薄层内, 湍流应力的变化非常小, 那么就可以近似地认为该层是一个常通量层, 本文用最底层上表面的湍流应力与底摩擦应力间差异的相对大小来表示常通量近似的精确程度

$$C = \log \left(\left| \frac{(\tau_{xz})_1 - (\tau_{xz})_0}{(\tau_{xz})_1} \right| \right), \quad (7)$$

式中, $(\tau_{xz})_1$ 是最底层上表面的湍流应力, $(\tau_{xz})_0$ 是底摩擦应力。C 值越大, 常通量层近似的精度就越低,

利用公式(4)计算底摩擦的适用性就越差。图 9 是不同试验下最底层的常通量近似精度。可以看出, 随着最底层厚度的降低, 湍流应力的垂直差异逐渐变小, 常通量层近似的精度逐渐提高。

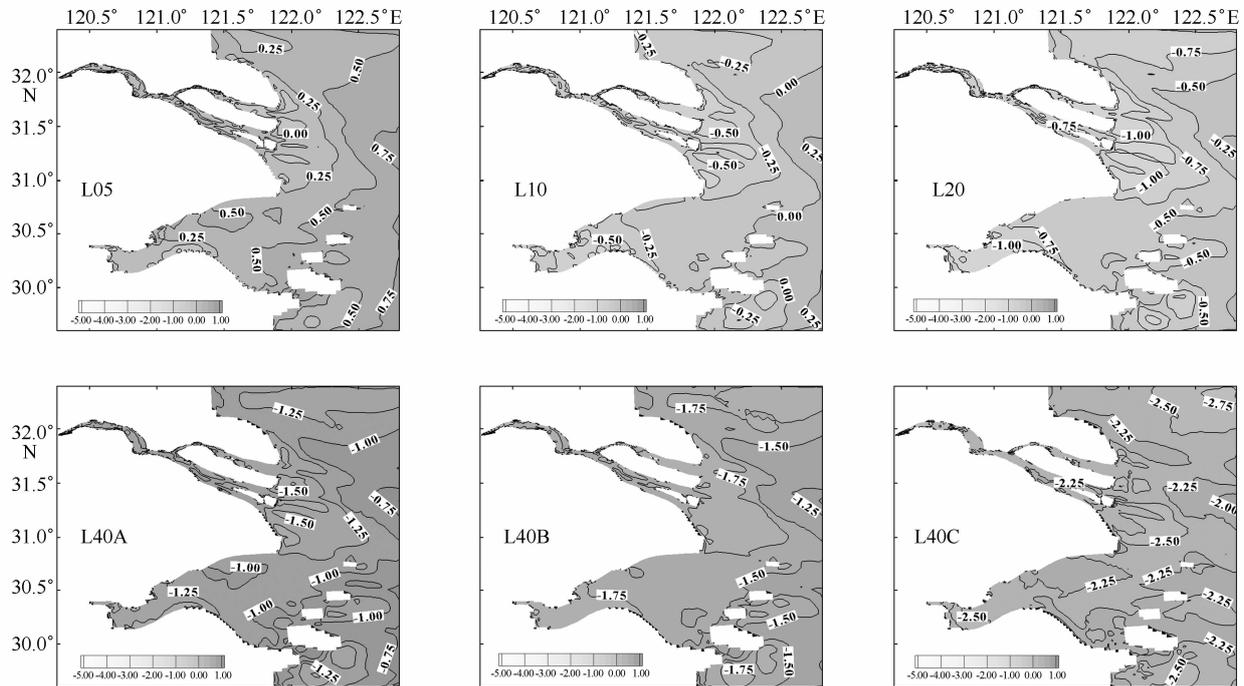


图 9 不同垂直分辨率下最底层的常通量近似精度

对于 L05 试验以及 L10 试验的深水区, 由于最底层厚度较大, 上层自由水体的特征比较明显, 如上表面的湍流应力相对较小, 导致上下表面的应力差数倍于上表面的湍流应力, 因而常通量层近似的精度较低, 底摩擦系数计算公式的适用性也就随之降低。此时, 上层自由水体的高流速特征在最底层表现的比较明显, 而底摩擦系数仍然按照常通量层近似时的变化规律进行计算, 并未做出相应的降低, 导致计算的底摩擦应力偏大。因而, 此时降低底层厚度将有助于降低上层自由水体在底层中的影响, 降低底摩擦的计算值。

随着底层厚度的进一步降低, 最底层上表面的湍流应力逐渐增大, 常通量层近似的精度逐渐增加, 最底层的流速特征将主要受垂直湍流混合的强弱决定。由湍流黏性系数随垂直分辨率的变化可以看出, 区域内的湍流黏性系数基本都是随分辨率增加而增加的。垂直黏性系数增加, 上层自由水体的高流速就会重新通过增强的湍流混合而更多的传入下层, 底层流速就

有增加的趋势, 故而此时计算的底摩擦应力就会随垂直分辨率的增加而增加。

EFDC 模型中的湍流黏性系数是采用二阶湍流闭合模型^[24]计算的, 垂直分辨率增加导致湍流黏性系数增加, 其一个原因可能是分层越细, 尺度越小的湍流涡动就能被更好的反映出来。但是由于本文未做更高分辨率的试验, 因而无法断定湍流黏性系数以及底摩擦应力是否随着垂直分辨率的增加而持续的增加, 潮振幅是否也会随分辨率增加而持续的降低。

4 结论与讨论

本文基于 EFDC 模型研究了垂直分辨率对长江口及其邻近海域潮汐模拟的影响, 找到了垂直分辨率影响潮汐模拟的原因。研究表明:

(1) 垂直分辨率的变化主要影响模拟区域 M_2 分潮振幅的大小, 尤其是近岸海域的振幅, 而对 M_2 分潮的传播方向影响不大

(2) 垂直分辨率主要通过对底摩擦和湍流混合

的影响,改变传入长江口和杭州湾内的潮能大小,进而影响这两个区域 M_2 分潮振幅的模拟结果

(3) 最底层厚度较大的情况下,上层自由水体的高流速特征在最底层过于明显,这会导致计算的底摩擦偏大

(4) 垂直湍流混合会随垂直分辨率的增加而增强,上层自由水体的高流速特征会随增强的垂直湍流混合更多的传入底层,使底层流速偏大,这使得在垂直分辨率增加到一定程度后,底摩擦会随垂直分辨率的增加而增加。

上述结果为模型参数的校准提供了依据。在垂直分辨率重新调整之后,我们可以重点调整与底摩擦和湍流混合相关的参数,从而提高模型的应用效率。本文结果虽然是基于 EFDC 模型得到的,但是模型采用的 Mellor-Yamada 二阶湍流参数化方案以及基于混合长理论和常通量层近似的底摩擦应力计算方法都是当前水环境模型中常用的计算方案,如 POM, COHERENS 等模型均采用类似的湍流和底摩擦计算方案,所以本文的结果也对其他模型的应用具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Xu H Z, Lin J, Shen J, et al. Wind impact on pollutant transport in a shallow estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(3): 147—160.
- [2] 罗琳,李适宇,王东晓. 珠江河口夏季缺氧现象的模拟[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 729—735.
- [3] Guan W B, Wong L A, Xu D F. Modelling nitrogen and phosphorus cycles and dissolved oxygen in the Zhujiang Estuary. Model development[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(4): 493—504.
- [4] Guan W B, Wong L A, Xu D F. Modelling nitrogen and phosphorus cycles and dissolved oxygen in the Zhujiang Estuary: II. Model results[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(4): 505—514.
- [5] 蔡怡,宋学家,于卫东. 海洋模式中 Boussinesq 近似误差讨论[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(2): 121—126.
- [6] 白学志,王凡. 夏季长江冲淡水转向机制的数值试验[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(6): 593—603.
- [7] Hamrick J. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects[R]. Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, 1992.
- [8] Jiang H Z, Shen Y M, Wang S D. Numerical study on salinity stratification in the Oujiang River Estuary[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21(6): 835—842.
- [9] 徐洪周,林晶,王东晓. 基于一个年龄概念的河口污染物输运数值模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 92—98.
- [10] 陈景秋,赵万星,季振刚. 重庆两江汇流水动力模型[J]. *水动力学研究与进展:A辑*, 2005, 20(S1): 829—835.
- [11] 姜恒志,沈永明,汪守东. 瓯江口三维潮流和盐度数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展:A辑*, 2009, 24(1): 63—70.
- [12] 王翠,孙英兰,张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟[J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2008, 164(5): 833—840.
- [13] 王建平,苏保林,贾海峰. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(7): 1286—1291.
- [14] Kong Q R, Jiang C B, Qin J J, et al. Sediment transportation and bed morphology reshaping in Yellow River Delta[J]. *Science in China(Series E: Technological Sciences)*, 2009, 52(11): 3382—3390.
- [15] 陈异晖. 基于 EFDC 模型的滇池水质模拟[J]. *云南环境科学*, 2005, 24(4): 28—30, 46.
- [16] 齐珺,杨志峰,熊明,等. 长江水系武汉段水动力过程三维数值模拟[J]. *水动力学研究与进展:A辑*, 2008, 23(2): 212—219.
- [17] 郑晓琴,丁平兴,胡克林. 长江口及邻近海域夏季温盐分布特征数值分析[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2008, 142(6): 14—23.
- [18] 谢锐,吴德安,严以新,等. EFDC 模型在长江口及相邻海域三维水流模拟中的开发应用[J]. *水动力学研究与进展:A辑*, 2010, 25(2): 165—174.
- [19] 严以新,张素香,李熙. 长江口南港化学需氧量动力学模型的应用[J]. *水道港口*, 2007, 113(4): 278—281.
- [20] Li X, Wang Y G, Zhang S X. Numerical simulation of water quality in Yangtze Estuary[J]. *Water Science and Engineering*, 2009, 2(4): 40—51.
- [21] Li J P, Zeng Q C, Chou J F. Computational uncertainty principle in Nonlinear Ordinary Differential Equations: I. Numerical Results[J]. *Science in China (Series E)*, 2000, 43(05): 403—412.
- [22] Li J P, Zeng Q C, Chou J F. Computational uncertainty principle in Nonlinear Ordinary Differential Equations: II. Theoretical analysis[J]. *Science in China (Series E)*, 2012, 59: 147—149.
- [23] Wang P F, Li J P, Li Q. Computational uncertainty and the application of a high-performance multiple precision scheme to obtaining the correct reference solution of Lorenz equations[J]. *Numerical Algorithms*, 2001, 44(01): 55—74.
- [24] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, 20(4): 851—875.
- [25] 海洋图集编委会. 渤海黄海东海海洋图集(水文)[M]. 北京:海洋出版社, 1992: 13—168.
- [26] Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical mod-

- el: A global model and a regional model around Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56(5): 567—581.
- [27] Fang G. H, Wang Y G, Wei Z X, 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(C11): C11006.
- [28] 翟世奎, 孟伟, 于志刚, 等. 三峡工程一期蓄水后的长江口海域环境[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 66—67.
- [29] Greenberg D A. A numerical model investigation of tidal phenomena in the Bay of Fundy and Gulf of Maine[J]. *Marine Geodesy*, 1979, 2(2): 161—187.
- [30] Mellor G L. Oscillatory bottom boundary layers[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(11): 3075—3088.

The effect of vertical resolution on the simulation of M_2 tide in Changjiang Estuary

LIU Baochao^{1,2}, LI Jianping¹, FENG Licheng³

(1. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *National Marine Environmental Forecast Center, Beijing 100081, China*)

Abstract: A three-dimensional hydrodynamic model for Changjiang Estuary and the adjacent sea was developed within the framework of Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC). The effect of vertical resolution on the simulation of M_2 tide was analyzed. The direction of M_2 tide propagation was simulated correctly. The M_2 tide propagated from southeast to northwest in open sea, then it propagated inland along coastline in Changjiang River and Hangzhou Bay. The bottom stress and turbulence varying with vertical resolution determined the energy propagated into Changjiang River and Hangzhou Bay. This made the amplitude of M_2 tide decrease with increasing vertical resolution in Changjiang River. But in Hangzhou Bay, the amplitude of M_2 tide increased with increasing vertical resolution at first, then decreased with increasing vertical resolution. The computation of bottom stress was based on the mixing length theory and the boundary layer was assumed to be a constant fluxes layer. The bottom layer should be thin enough so that the higher velocity of the upper water, which resulted in higher bottom stress, was of little importance in bottom layer. The intensity of vertical turbulence increased with increasing vertical resolution. This transmitted more high velocity of upper water into bottom layer and resulted in higher bottom stress again. Finally, the more consumption of energy caused by higher bottom stress made the amplitude of M_2 tide become smaller.

Key words: M_2 tide; vertical resolution; bottom stress; EFDC; Changjiang Estuary