

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.021

# 潮流模拟中平面紊动黏性系数及动边界处理的影响

黄惠明 ,王义刚

( 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室 ,江苏 南京 210098 )

摘要 :利用实测资料计算不同平面紊动黏性系数下的潮流场 ,并就湿地特性动边界处理技术中 3 个主要参数独立变化情况下的潮流场作了进一步模拟 ,在此基础上 ,比较分析了紊动黏性系数及湿地特性中各参数对潮流场断面流速分布及沿程潮位变化的影响 ,同时 ,对湿地特性中各参数的合理取值进行了探讨 .结果表明 ,紊动黏性系数愈大愈具有均匀断面流速分布及阻水的作用 ,实际数值计算中应以  $H_3 = 0.01$  作为取值的上限 ,而其他 2 个参数的选取应以实际底床组成及地形变化等作为参考进行取值为最佳 .

关键词 :潮流模拟 ;紊动黏性系数 ;动边界 ;湿地特性

中图分类号 :TV139.2      文献标识码 :A      文章编号 :1000-1980( 2009 )03-0341-05

近年来 ,平面二维潮流计算模型已经逐步形成较为成熟的计算模式 ,其在边界和水下地形较为复杂的天然河道、潮汐河口、近岸水域等的计算中 ,也已取得了较好的成果 .考虑工程实际的复杂性 ,数值计算中各个计算参数的确定对潮流模拟结果均有不同程度的影响 ,这其中尤以平面紊动黏性系数和动边界处理技术对模拟过程的稳定性及计算结果的合理性影响较大 .一般而言 ,二者的确定方法具有多样化及经验性的特点 ,如平面紊动黏性系数的确定可以根据实际情况 ,不分区域不分方向取相同的值 ,或分区域分方向取不同值 ,亦可以根据不同计算公式或采用紊流模型来进行推算<sup>[1-2]</sup> ,而动边界处理中为了较为准确地模拟计算域中滩槽相间的复杂地貌形态或人工水下建筑物如潜堤等对流场的影响 ,其方法更为多样化 ,常用的有冻结法、切削法、干湿法和窄缝法等<sup>[3-6]</sup> .

然而 ,现阶段平面紊动黏性系数的确定方式和动边界处理的方法虽均较多 ,但二者对潮流场的影响还并未形成一个统一、确切的认识 .为此 ,本文采用平面二维潮流数学模型 ,就平面紊动黏性系数及湿地特性的动边界处理方法对潮流数值计算结果的影响进行研究 ,并就实际数值计算中所应注意的一些问题进行探讨 .

## 1 平面紊动黏性系数的物理背景及动边界的处理方法

### 1.1 平面紊动黏性系数的由来

紊动黏性的概念是由 Boussinesq 于 1877 年首先提出的 ,Boussinesq 假定是模拟紊动应力的最古老的假定 ,亦是目前流行的大多数紊流模型的重要基石<sup>[7]</sup> .目前 ,工程中应用最为广泛的浅水方程即为在紊流时均雷诺方程的基础上得到的平面二维潮流模型的控制方程 ,具体为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial ( (h + \zeta)u )}{\partial x} + \frac{\partial ( (h + \zeta)v )}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = E_{ij} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho H} + fv \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = E_{ij} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - \frac{\tau_{by}}{\rho H} - fu \tag{3}$$

式中  $E_{ij}$  便是本文所要讨论的平面紊动黏性系数 .根据现场实测资料的推算 , $E_{ij}$  一般应在  $10^2 \sim 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$  之间<sup>[8]</sup> .虽然有学者认为平面紊动黏性项对整个流场影响有限 ,在计算过程中一般可简单地取为常数 ,而当网

格步长很小时,  $E_{ij}$  甚至可以忽略不计<sup>[9]</sup>, 但众多实际工程计算表明, 在水工建筑物附近或地形变化相对较为剧烈的区域,  $E_{ij}$  的影响还是相当明显的, 为此, 有必要进一步就  $E_{ij}$  的影响作深入的研究。

### 1.2 动边界的处理方法

动边界处理方法是数值计算中为了模拟露滩、漫滩及降低模型计算发散可能性而提出来的数值处理方法。目前常用的动边界处理方法在处理滩槽相间的海岸河口水域中, 若涨(落)潮沟的横向尺度小于模型的空间步长, 则有可能把这些潮沟抹平, 从而带来局部动力过程模拟的失真<sup>[10]</sup>。为了改善此类动边界处理方法所带来的问题, 已有学者专门就此作了相应的研究, 如孙英兰等<sup>[11]</sup>引入了线边界的概念, 并根据工程边界的特点将导堤等抽象处理成线边界, 达到了预期的模拟效果; 宋志尧等<sup>[10]</sup>将线边界法运用在长江口深水航道整治工程中亦取得了较好的效果; 美国陆军工程水道试验站水力学实验室<sup>[12]</sup>提出的湿地特性的动边界处理方法在实际应用中也取得了较好的效果。比较众多动边界处理方法的特点及适用性等可知, 由于湿地特性的处理方法允许计算网格在干湿变化中进行缓慢的过渡, 从而有效地提高了网格单元持水的能力, 能较好地克服水下地形凹凸不平时, 采用其他动边界处理法所带来的由于网格部分露滩而导致质量难以守恒的缺陷, 且能够有效地改善潮汐河口、浅滩、沙洲等在潮汐周期内反复露滩和漫滩区域的数值计算环境, 因此其优势非常明显。

考虑湿地特性的动边界处理方法关键在于确定定义过水百分率与潮位间函数关系的湿地特性曲线, 如图 1(a) 所示, 但由于详细的地形及河床组成资料一般难以获得, 因此需在充分还原实际区域地形特征的基础上对湿地特性曲线进行概化, 如图 1(b) 所示。

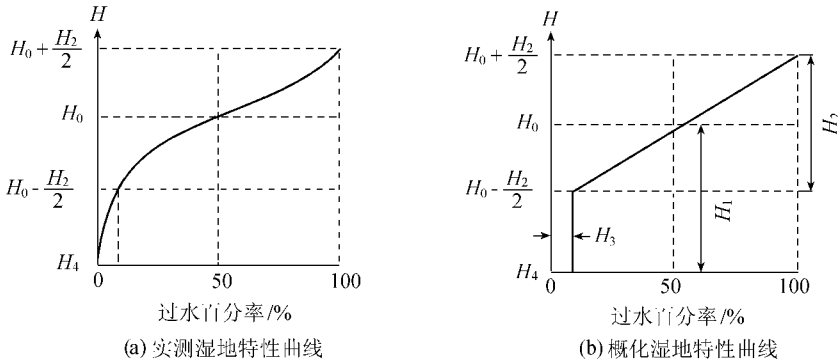


图 1 实测的过水区域湿地特性曲线及概化后的湿地特性近似曲线

Fig. 1 Measured and generalized curves of wetland properties in wetted area

湿地特性主要由 4 个参数组成<sup>[12]</sup>:  $H_0$  为网格单元的平均底高程;  $H_1$  为单元平均底高程到无流动点的距离;  $H_2$  为通过网格单元的流体量逐渐降低的过渡距离;  $H_3$  为完全露滩之前的最小过水百分率。

图 1 中横坐标为网格过水百分率, 纵坐标为潮位  $H$ 。结合图 1, 湿地特性的具体处理过程为: 当潮位高于  $H_0 + \frac{H_2}{2}$  时, 网格被认为完全过水; 当潮位处于  $H_0 + \frac{H_2}{2}$  和  $H_4$  之间时, 网格被认为部分过水, 即潮位高于  $H_0 - \frac{H_2}{2}$  时, 网格过水百分率随潮位的降低而减小; 潮位低于  $H_0 - \frac{H_2}{2}$  时, 网格过水百分率保持不变; 而当潮位低于  $H_4$  时, 网格则被认为完全不过水。

## 2 平面紊动黏性系数及湿地特性对潮流场计算结果的影响

### 2.1 平面二维数值算例简介

为了就平面紊动黏性系数及湿地特性的动边界处理技术对潮流场模拟结果的影响进行探讨, 考虑苏北挡潮闸闸下河道一般存在主槽与滩地并存的特点, 且闸下潮流场数值模拟中流场对平面紊动黏性系数及动边界处理方法变化的响应相对较为敏感, 因此, 利用苏北某挡潮闸闸下河道地形进行相应的研究。

数学模型采用控制体积法进行离散求解, 同时, 考虑模拟的闸下河道具有滩槽并存的特点, 在一个涨落潮过程中, 滩面会周期性地出现漫滩和露滩现象, 因此在地形变化较为剧烈的区域进行适当的网格加密, 最小网格尺寸达 2 m。此外, 根据当地的实测水文资料, 选取了具代表性的大中小潮潮位过程作为模型计算的边界条件, 并对闸下河道的潮位和流速过程进行了相应的验证, 取得了较为满意的结果。

模型的范围及闸下河道水下地形见图 2。

2.2 平面紊动黏性系数对潮流场计算结果的影响

数值计算过程中,发现平面紊动黏性系数的取值过大或过小均不能保证数学模型的稳定性和模拟结果的合理性,但在保证模型稳定性及合理性的基础上,紊动黏性系数亦对计算域内的流速、潮位等不同程度的影响.考虑平面紊动黏性系数的一般取值范围<sup>[8]</sup>,本文在模型稳定性的基础上分别选用了不同的紊动黏性系数值,就其对断面流速分布及沿程潮位变化的影响进行相应的比较研究.研究的流速断面及潮位剖面见图 2.由于涨落潮情况下,不同紊动黏性系数对各个断面流速分布的影响较为一致,为此,仅就断面 2 的大潮落急流速变化作详细分析,计算结果见图 3 和图 4.

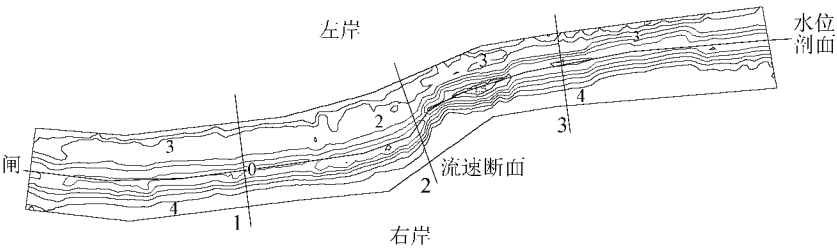


图 2 流速观察断面及潮位纵剖面布置

Fig. 2 Layout of velocity and water level observation sections

取值范围<sup>[8]</sup>,本文在模型稳定性的基础上分别选用了不同的紊动黏性系数值,就其对断面流速分布及沿程潮位变化的影响进行相应的比较研究.研究的流速断面及潮位剖面见图 2.由于涨落潮情况下,不同紊动黏性系数对各个断面流速分布的影响较为一致,为此,仅就断面 2 的大潮落急流速变化作详细分析,计算结果见图 3 和图 4.

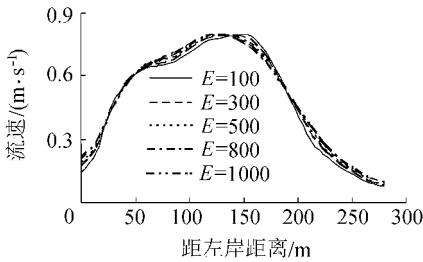


图 3 不同紊动黏性系数下落急断面流速分布

Fig. 3 Velocity distribution of section with fast ebbing tides under various turbulent viscosity coefficients

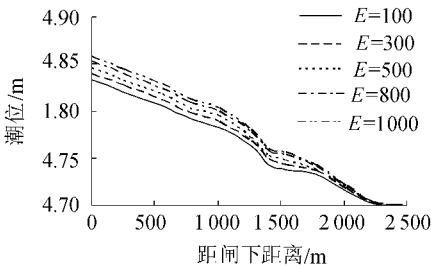


图 4 不同紊动黏性系数下落急沿程潮位变化

Fig. 4 Variation of water level profile of section with fast ebbing tides under various turbulent viscosity coefficients

从图 3 和图 4 可以看出,随着紊动黏性系数值的变化,断面流速的分布及沿程潮位也相应发生一定的变化.随着紊动黏性系数不断增大,断面流速的分布有趋于断面均匀分布的发展趋势,但变化趋势较为缓慢,此时,靠近两岸的流速均有所增大,而主槽发生最大流速的位置则有向左岸偏离的趋势,且最大流速有所减小,减小的幅度与近岸流速增大的幅度相当,这与断面流量守恒原理基本相符.同时,由实际断面的地形变化亦可知,在地形变化亦较为剧烈的区域,即底高程横向梯度较大的区域,流速变化亦相对较为剧烈,而在地形变化相对较缓的区域,流速变化亦相对较小,这说明紊动黏性系数的变化对潮流场模拟结果影响较大的区域主要在地形变化较大的区域,这一点在小范围数值模拟时尤其应注意.

紊动黏性系数亦具有阻水、抬高潮位的作用,由图 4 可知,随着紊动黏性系数的增大,沿程潮位亦不断抬高,且潮位抬高的幅度与紊动黏性系数的变化幅度成正比.由图 3 和图 4 还可知,由于受下游开边界条件的影响,沿程潮位距离闸下越远,潮位变化的幅度对紊动黏性系数变化的响应亦不断降低,而上游采用流量边界则没有这种情况,这对小范围的数值模拟亦同样需要注意.

2.3 湿地特性的应用对潮流场数值计算结果的影响

一般情况下,湿地特性在数值计算中多应用于潮汐河口、浅滩、沙洲及陆岸等在潮汐周期内反复露滩和漫滩的区域,同时,在保证模拟的结果能够反映实际流场的基础上,湿地特性的应用可以大大降低数值计算发散的可能性.为了说明湿地特性的动边界处理方法中各个参数对潮流场计算中流速分布及潮位变化的影响,本文在保证模型稳定的基础上分别就各个参数在合理范围内变化时对潮流场模拟结果的影响进行探讨.考虑落急时刻,闸下河道内流速相对较大,且近岸存在露滩,因此主要就落急时刻不同参数独立变化对断面流速分布及沿程潮位变化的影响进行讨论.

a.  $H_2$  的变化对潮流场的影响.由湿地特性的定义可知,由于网格尺度的限制,网格单元很难完全体现各个区域实际地形的变化,尤其是细部的变化,因此网格单元的底高程仅仅只是反映网格单元范围内地形变化的一个平均值,而  $H_2$  则在一定程度上弥补了这方面的缺陷,其代表的是网格单元中地势最高的与最低的区域之间的差值.根据模型中的网格尺度及网格单元中地形的变化,近似推算  $H_2$  的取值在 0~1 之间变化,因此,考虑  $H_2$  在 0~1 之间取不同值时对潮流场计算结果的影响,结果见图 5(a) 及 5(b).由图 5(a) 及 5(b) 可知,不同的  $H_2$  取值对流

场的计算结果还是存在影响的,主要表现为随着取值的增大,沿程潮位有降低的趋势,同时近岸流速有所增大,主槽流速则有所减小,但与流速的断面变化和潮位的沿程变化幅度相比,影响甚微.因此可以推测, $H_2$  的取值只要不是特别偏离实际情况,那么其取值的变化基本不会对潮流场的计算结果产生不利影响.

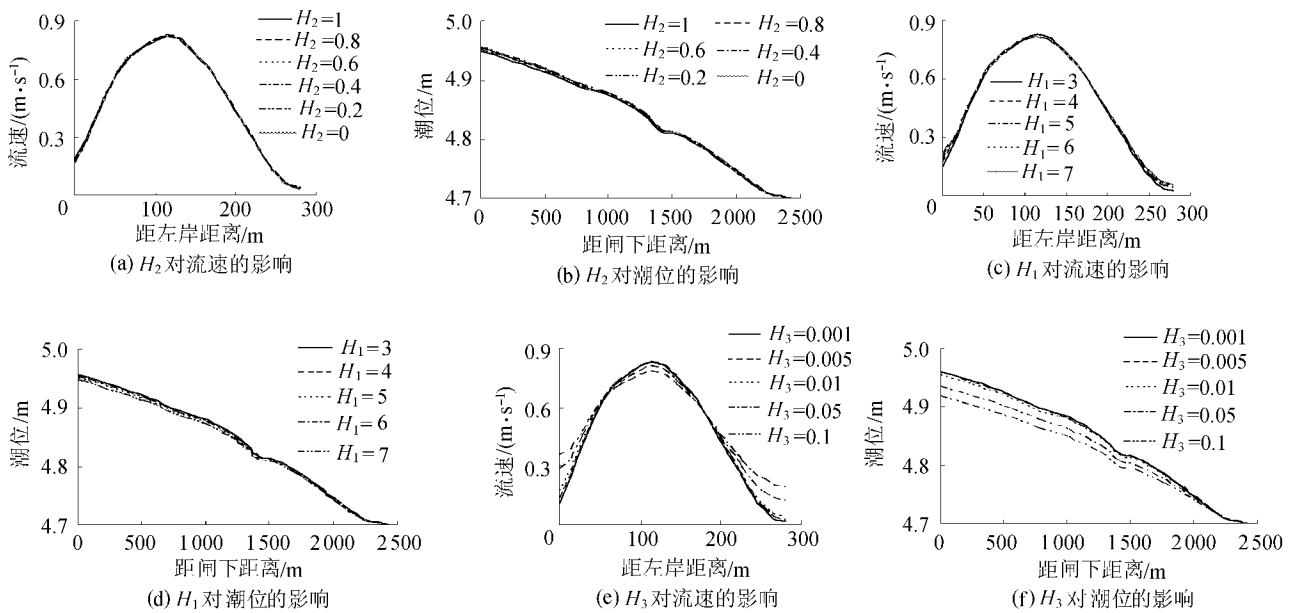


图 5 湿地特性中各参数对断面流速分布和潮位沿程变化的影响

Fig. 5 Influences of various parameters of wetland property on velocity distribution and water level profile

b.  $H_1$  的变化对潮流场的影响. 根据湿地特性的定义, $H_1$  的取值需要根据实际的底质钻孔采样进行分析,以确定其透水深度,但由于不同的底床构造对  $H_1$  取值的影响甚大,一般情况下很难获得相对准确的当地  $H_1$  的变化范围,不过根据湿地特性的定义可知, $H_1$  的取值一般要求大于或等于  $H_2$  的一半. 因此,为了探讨  $H_1$  的变化对潮流场的影响,同时兼顾  $H_2$  取值的变化范围和数值计算稳定性的要求,主要比较了  $H_1$  在 3 ~ 7 之间变化时对潮流场模拟结果的影响,结果见图 5(c) 和 5(d). 由图 5(c) 和 5(d) 可知,随着  $H_1$  取值的增大,近岸流速亦逐渐增大,主槽流速则逐渐减小,比较二者的变化幅度可知,近岸流速增大的幅度相对远大于主槽流速减小的幅度. 而由沿程潮位的变化可知, $H_1$  的变化同样具有降低潮位的作用,潮位随着  $H_1$  的增大而逐渐减小. 但综合来说, $H_1$  的取值对断面流速及潮位的影响还是相对较为轻微的.

c.  $H_3$  的变化对潮流场的影响. 根据湿地特性的定义, $H_3$  的取值亦需要根据实际的底质钻孔采样进行分析,以确定底床土层的透水性,但实际上由于底床土层的组成具有多样性的特点,且不同的组分对土层透水性的影响不同,因此一般难以确定  $H_3$  的合理变化范围. 为此,考虑  $H_3$  取值在较大范围内变化时对潮流场的影响进行比较、分析,结果见图 5(e) 和 5(f). 由图 5(e) 和 5(f) 可知, $H_3$  的变化对流速的断面分布和潮位的沿程分布均影响较大. 随着  $H_3$  的增大,近岸露滩水域的流速大幅度增大,而主槽的流速则相应大幅度减小. 流速的变化幅度以  $H_3 = 0.01$  为分界线,当  $H_3 < 0.01$  时,近岸流速增大的幅度与主槽流速减小的幅度相当,变化幅度均较小,当  $H_3 > 0.01$  时,近岸流速与主槽流速均有较大幅度的变化,且近岸流速增大的幅度远大于主槽流速减小的幅度.  $H_3$  的变化同样具有降低潮位的作用,随着  $H_3$  的增大,潮位亦逐渐降低,同样以  $H_3 = 0.01$  为分界线,当  $H_3 < 0.01$  时,虽然  $H_3$  的变化幅度较大,但潮位降低的幅度并不大,而当  $H_3 > 0.01$  时, $H_3$  的变化对潮位的影响则明显提高. 由此,可以看出, $H_3$  的变化对流场的变化影响较大,且不合理的取值有可能造成模拟结果的严重失真. 考虑当  $H_3 > 0.01$  时, $H_3$  的增大导致近岸露滩区域的流速大幅度增大,这与实际露滩时滩面流速较小或没有流速的实际情况不符,所以在实际数值计算当中建议以  $H_3 = 0.01$  作为取值的上限.

总的来说,根据对湿地特性中 3 个主要参数的变化对潮流场计算结果的影响分析可知,3 个参数的增大均有均匀断面流速分布的作用和降低潮位的效果,但影响程度各不相同,其中  $H_3$  的取值影响最大, $H_1$  次之, $H_2$  最小. 同时,考虑湿地特性在处理露滩时虽在一定程度上克服了复杂地形下网格单元的持水问题,且在一定程度上近似模拟了浅滩、沙洲等存在的地下水渗透作用,比之一般的动边界处理技术有一定的进步,但根据 3 个参数的变化对流场的影响分析结果可知,参数不合理的取值容易造成滩面流速的不合理增大,其中尤

以  $H_3$  的取值最需得到重视. 综合考虑, 在数值计算中, 在保证计算收敛及符合实际条件的情况下, 应尽量控制各个参数的取值, 同时建议  $H_3$  的取值应小于或等于 0.01.

3 结 论

在利用实际地形模拟了不同平面紊动黏性系数及湿地特性中 3 个主要参数不同取值情况下的潮流场的基础上, 比较分析了各个参数的变化对潮流场的断面流速分布及沿程潮位变化的影响, 可知:

- a. 平面紊动黏性系数愈大愈具有均匀断面流速分布的作用, 同时亦具有阻水和抬高潮位的作用, 但总的来说影响的程度不是很大, 只在地形变化较为剧烈的区域影响才较为显著.
- b. 湿地特性各个参数的取值对流场均有不同程度的影响, 其中  $H_3$  的取值影响最大,  $H_1$  次之,  $H_2$  最小. 同时, 随着这 3 个参数的增大, 近岸边滩流速均有所增大, 主槽流速均有所减小, 而潮位则均有所降低. 此外, 为了较为准确地反映实际河口、海岸的露滩及漫滩现象, 建议在实际数值计算中应以  $H_3 = 0.01$  作为取值的上限, 而其他 2 个参数的选取则应以实际底床组成及地形的变化等作为参考进行取值为最佳.

参考文献:

[ 1 ] 交通部天津水运工程科学研究所. 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程[ K ]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 69-77.

[ 2 ] 夏云峰. 感潮河段三维水流泥沙数值模型研究与应用[ D ]. 南京: 河海大学, 2002.

[ 3 ] 程文辉, 王船海. 用正交曲线网络及“冻结法”计算河道流速场[ J ]. 水利学报, 1988( 6 ): 18-25.

[ 4 ] 严以新, 宋志尧. 西江水道工程整治效果数值研究[ C ]//1995 两岸港口及海岸开发讨论会论文集. 台南: 成功大学, 1995: 1709-1724.

[ 5 ] 史峰岩, 孔亚珍, 丁平兴. 潮滩海域边界自适应网格潮流数值模型[ J ]. 海洋工程, 1998, 16( 3 ): 68-75.

[ 6 ] 何少苓, 王连祥. 窄缝法在二维边界变动水域计算中的应用[ J ]. 水利学报, 1986( 12 ): 11-19.

[ 7 ] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型[ M ]. 南京: 河海大学出版社, 1989: 19-21.

[ 8 ] 罗家海. 河口及海湾地区水平扩散系数确定研究[ J ]. 海洋环境科学, 1989, 8( 3 ): 36-40.

[ 9 ] OLEY L Y, MELLOR G L, HIRES R I. A three dimensional simulation of the Hudson Raritan estuary, I: description of the model and model simulations[ J ]. Journal of Physical Oceanography, 1985, 15( 12 ): 1676-1692.

[ 10 ] 宋志尧, 薛鸿超, 严以新. 线边界法在潮流模拟中的应用[ J ]. 海洋工程, 2000, 18( 4 ): 49-54.

[ 11 ] 孙英兰, 陈时俊, 王丽霞, 等. 胶州湾环流和污染扩散的数值模拟: V. 胶州湾变空间步长的嵌套模型[ J ]. 青岛海洋大学学报, 1989, 19( 1 ): 1-18.

[ 12 ] Users Guide to RMA2 WES version 4.3[ K ]. New York: US Army Corps of Engineers-Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, 1997: 49-58, 78-82.

Influences of horizontal turbulent viscosity coefficient and moving boundary treatment on tidal current simulation

HUANG Hui-ming, WANG Yi-gang

( Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China )

**Abstract:** The tidal current fields with various horizontal turbulent viscosity coefficients were calculated using the measured data. The tidal current fields with the independent variation of three parameters of wetland properties in the moving boundary treatment technology were further simulated. On such a basis, influences of the turbulent viscosity coefficient and wetland properties on the velocity distribution and water level profile of the tidal currents were compared and analyzed. The rational values of parameters of the wetland properties are discussed. The test results indicate that the larger the turbulent viscosity coefficient, the more uniform the velocity distribution and the more water blocking action, and  $H_3 = 0.01$  should be selected as the upper limit in actual simulation while the other two parameters of the wetland properties should be chosen based on actual parameters such as the composition of bed material and topographical variation.

**Key words:** tidal current simulation; turbulent viscosity coefficient; moving boundary; wetland properties