

文章编号:1005-9865(2001)01-0084-04

湍流数值模拟中封闭模式应用的局限性

蔡树群,王文质

(中国科学院 南海海洋研究所,广东 广州 510301)

摘 要:通过对琼州海峡的潮流场特征进行数值模拟,指出了选择不同的特征混合长度表达式对数值模拟结果的影响,表明了基于特征混合长度理论的湍流封闭模式在近海湍流数值模拟中应用的局限性。

关键词:特征混合长度;近海数值模拟;湍流封闭模式;垂直涡动粘性系数

中图分类号:O357.5 **文献标识码:**A

The limitation of applying turbulent closure model to the numerical simulation of turbulence

CAI Shu-qun, WANG Wen-zhi

(South China Sea Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: In this paper, based on the numerical simulation of characteristics of tidal current in Qiongzhou Channel, the influence of different expressions of the characteristic mixed length on the numerical simulation result is pointed out, and the limitation of applying turbulent closure model which is based on the characteristic mixed length theory to the numerical simulation of onshore turbulence is presented.

Key words: Characteristic mixed length; numerical simulation of onshore turbulence; turbulent closure model; vertical eddy viscosity coefficient

混合过程是海洋中十分重要的能量传递及分配的过程。实测资料^[1]和数值模拟研究^[2]均表明,垂直涡动粘性系数 A_v 随海区的垂直混合程度及流场结构变化甚大。因此,在数值模拟中, A_v 的表达形式不仅会影响数值模拟结果中流场的结构,而且影响水位场。目前,在大洋环流模式中常用的两种 A_v 的参数化形式为:一是 Munk-Anderson 模式^[3],这类模式因其待定的常数太多,其应用很受限制;另一是湍流封闭模式,它用基于湍流混合长度理论的封闭方程组来求解 A_v ^[4]:

$$A_v = l^2 b \sqrt{1 - R_t} \quad (1)$$

其中, $b = \sqrt{(\frac{\partial u}{\partial z})^2 + (\frac{\partial v}{\partial z})^2}$; $R_t = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} / b^2$ 为雷诺数; l 为特征混合长度。这类模式的重大弱点是,对于 l 的取法存在着较大的差别。例如, Rohlmann^[5]给出了下列关系式:

$$l = C_L h_L \quad (2)$$

其中, $C_L = 0.05$; h_L 为混合层的厚度。又如,于克俊和方国洪^[6]则取:

收稿日期:1999-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49676285);香港研究资助局(RGC)资助项目(58/96E)

作者简介:蔡树群(1968-),男,广东澄海人,副研究员,博士,主要从事物理海洋学研究。

$$l = k\zeta Z^*/D \quad (3)$$

其中, $k=0.4$ 为冯卡门常数; $Z^*=D+\zeta$; D 为水深; ζ 为海面水位抬升。从以上各式可以预见, 由于对特征混合长度的取法不同, 湍流封闭模式对于层结海洋中的数值模拟结果显然会存在着一定的差异。

在近岸或河口, 其水体一般从表及底混合均匀, 层结较小, 应用不同的特征混合长度表达式所引起的灵敏值模拟结果的差异会有多大呢? 下文将用一个三维陆架海模式—Hamsom 模式(其差分格式可详见文献[7])对冬末春初琼州海峡三维潮流场进行数值模拟为例, 探讨当选用不同的特征混合长度表达式(2)或(3)时是否对近岸数值模拟结果产生影响。

1 琼州海峡潮流的三维数值模拟结果比较

考虑到琼州海峡平均水深只有 70m, 水体混合较均匀, 在模拟中忽略斜压效应。模拟海区(109°40'~110°20'E, 19°56'40"~20°18'N 南北岸线之间)如图 1 所示, 经向及纬向网格步长均取为 20", 垂向分成 7 层: 0~10m, 10~20m, 20~30m, 30~40m, 40~50m, 50~75m, 75~120m。计算中取时间步长为 60s。对于开边界条件, 流速采用辐射边界条件; 而在西北角、西口及东口的开边界水位上给定由该海区振幅最大的八大分潮(Q_1 、 O_1 、 P_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 、 S_2 、 K_2)的调和常数所预报的海面水位。考虑到潮波是由太平洋传入, 故下文中视海峡中的流向从东向西时为涨潮, 反之则为落潮。A₀ 由式(1)来确定, 而特征混合长度分别选用表达式(2)、(3), 则可得到其相应的数值模拟结果。

以落潮时的计算结果为例, 当特征混合长度由式(2)确定时, 计算得到的大潮落急时的表层流场分布如图 2 所示。结合表层的流速等值线分布(图略), 可以看出, 此时表层流场的主要特点: 从海峡中央越往两岸流速均衰减; 最大流速约为 189cm/s, 出现在海峡最狭窄处的连线以东的海峡中部附近; 在灯楼角以西的海域, 潮流流向大体呈南或东偏南方向, 之后慢慢转向, 至灯楼角以东海域的流向逐渐过渡为东或东偏北方向; 在灯楼角以菱的港湾内存在着一个气旋式潮生岬角涡。

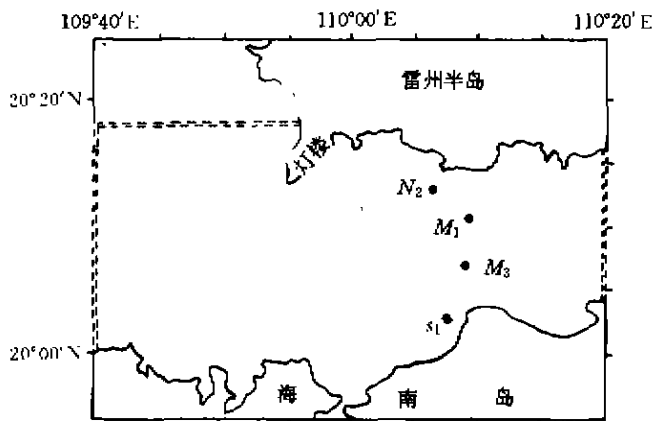


图 1 模式计算区域(双划线为开边界)

Fig.1 Model's computational domain
(double dashed line for open boundary)

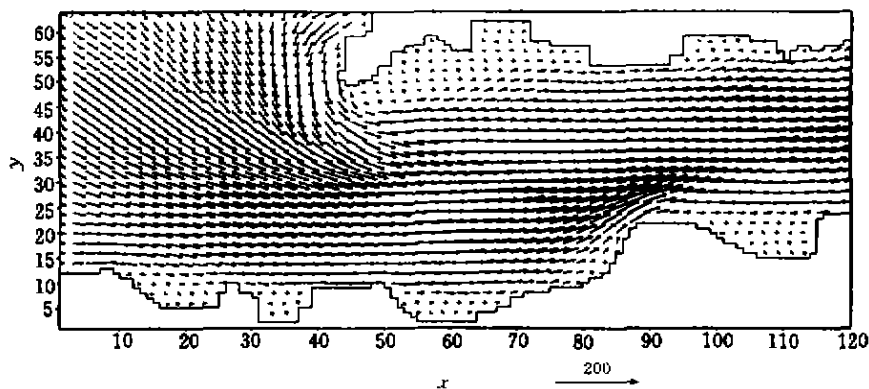


图 2 琼州海峡落急时的表层流场分布(单位:cm/s)

Fig. 2 Distribution of surface current field at spring ebb
in the Qiongzhou channel(unit:cm/s)

当将特征混合长度的表达式改为式(3)来确定时, 计算结果表明, 此时得到的大潮落急时的流场分布趋势基本上与由式(2)的计算结果大体相同。

但是, 当将两者的涨、落潮时的数值模拟结果与手头上仅有的大面站实测流场资料结果^[7]进行粗略的比

较(表 1)后, 容易发现, 利用式(2)的数值模拟结果与实测流场资料的吻合程度总体上明显优于利用式(3)的结果。究其原因, 主要是由于利用不同的特征混合长度表达式得到的海区的 A_v 分别存在着较大的时空差别。例如, 图 3、4 给出的利用式(2)、(3)计算得到的落急时 10~20m 层的整个海区的 A_v 分别便迥然不同, 因而由此得到的海区的流场速度也就存在着差别。

表 1 琼州海峡大面站表层实测流场资料与模拟计算结果的比较

Tab. 1 Comparison of observational surface current data with simulation results at some stations in the Qiongzhou Channel

站点	流速/流向	大潮涨急			大潮落急		
		实测流场资料	用式(2)的结果	用式(3)的结果	实测流场资料	用式(2)的结果	用式(3)的结果
N_2	(cm/s)	90	85	100	100	90	70
	(°)	274	288	260	92	87	80
M_1	(cm/s)	138	128	150	142	132	129
	(°)	252	247	265	90	85	83
M_3	(cm/s)	142	133	153	152	160	164
	(°)	256	260	270	84	85	80
S_1	(cm/s)	44	40	35	116	102	100
	(°)	194	210	220	22	29	35

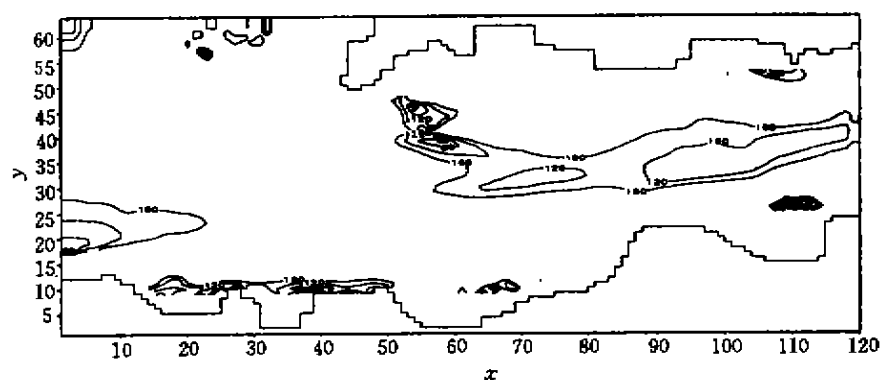


图 3 利用式(2)计算得到的落急时 10~20m 层的 A_v 分布(单位: cm^2/s)

Fig. 3 Distribution of A_v at level 10~20m at spring ebb computed by equation(2)(unit: cm^2/s)

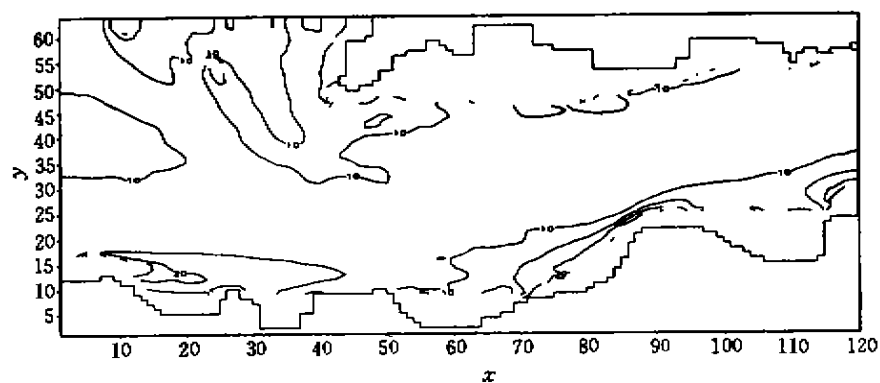


图 4 利用式(3)计算得到的落急时 10~20m 层的 A_v 分布(单位: cm^2/s)

Fig. 4 Same as Fig. 3 except that A_v Computed by equation(3)(unit: cm^2/s)

2 结 论

由上面的计算结果比较可以看出, 即使对于潮流呈现往复流这样相对比较简单流态的琼州海峡, 当采用的特征混合长度的表达式有所不同时, 也会导致数值模拟结果中的 A_v 、流场分布等存在着较大的差别。表明

湍流封闭模式在近海湍流场的数值模拟中有着很大的局限性。对于特征混合长度的表达式的选择存在着较大的人为性和盲目性,一旦选择不当,其数值模拟结果与实际流场的差别就可能相差较大,因而不能准确地为工程设计和施工提供科学的依据。

不仅如此,细究上式(1),容易看到,湍流封闭模式在计算浅水区的 A_v 时还会出现麻烦,(1)式中的 $b = \sqrt{(\frac{\partial u}{\partial z})^2 + (\frac{\partial v}{\partial z})^2}$ 在岸边浅水区、垂直分层只有1层时 b 应为0(由于在 z 方向上的流速梯度为0),由此计算得到的 A_v 也为0。但事实上,浅水区是垂直混合较强烈且充分均匀的海区,因此,在实际数值模拟计算中,通常要人为地假定垂直分层只有1层时海区的 A_v 为一较大的常数值。此外,(1)式是在假定局部的各向同性、湍流动能与耗散率平衡等条件下推导出来的,因而就未能体现近海湍流场中湍流各向异性及后散射现象^[9]。

是否有一种方法能够克服湍流封闭模式在上述近海数值模拟中的局限性?大涡模拟是现今流体力学工程中计算湍流运动最有力的计算工具之一,其中颇受青睐的重整化群理论不仅巧妙地避开了特征混合长度的选择^[9],而且能体现各向异性和后散射等物理现象。因此,将重整化群理论运用于近海湍流数值模式中意义非浅。

参考文献:

- [1] Halpern D. Variability of near-surface currents in the Atlantic North Equatorial Countercurrent during GATE[J]. J. Phys. Oceanogr., 1980, 10: 1213-1220.
- [2] Schneider N P Nuller. Sensitivity of the surface equatorial ocean to the parameterization of vertical mixing[J]. J. Phys. Oceanogr., 1994, 24(7): 1623-1640.
- [3] Jones J H. Vertical mixing in the Equatorial Undercurrent[J]. J. Phys. Oceanogr., 1973, 5: 286-296.
- [4] Mellor G L, T Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Review of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(4): 851-875.
- [5] Pohlmann T. Predicting the thermocline in a circulation model of the North Sea-Part I: model description, calibration and verification[J]. Continental Shelf Res., 1996, 16(2): 131-146.
- [6] 于克俊,方国洪. 8309 号台风风暴潮和风海流的三维数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(5): 433-441.
- [7] 黄大吉,陈宗镛,苏纪兰. 三维陆架海模式在渤海中的应用 I. 潮流、风生环流及其相互作用[J]. 海洋学报, 1996, 18(5): 1-13.
- [8] 侍茂崇,陈春华,黄方,等. 琼州海峡冬末春初潮流场特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 1-9.
- [9] Piomelli U. Applications of large eddy simulations in engineering: An overview[A]. In: Galperin B, S A Orszag. Large Eddy Simulation of complex Engineering and Geophysical Flows[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993, 119-140.