1993. 79~ 94
- 2 Stanton R J. Factors controlling shape and internal facies distribution of organic carbonate buildups. Bull AAPG, 1967. 51(12): 2462~ 2467
- 3 张维, 张孝林. 中国南方二叠纪生物礁与古生态. 北京: 地质出版社, 1992. 1~ 157
- 4 Rigby J K, Fan Jiasong, Zhang Wei. Inozoan calcareous Porifera from the permian reefs in south China. J Paleont, 1989, 63(6): 778~ 800
- 5 Mamet B L. Carboniferous Calcareous Algae. In: Riding R. et al. Calcareous Algae and Stromatolites. Springer-Verlag. 1991. 370~ 451
- 6 Mamet B L, Roux A, Nassichuk W W. Algues Carboniferes et Permienes de L' Arctique Canadiea. Geol Sur Canada Bull, 1987, 342: 52~ 53
- 7 Pratt B R. Stromatolitic framework of carbonate mudmounds. Jour Sed Petr, 1982 52(4): 1203~ 1227
- 8 Webb G E. Late Mississippian thrombolite bioherms from the Pitkin formation of northern Arkansas. Geol Soc Amer Bull, 1987, 99: 686~ 698
- 9 李继亮. 准噶尔残留弧后盆地与天山造山带的大地构造关系. 沉积学报, 1989, 7(增刊): 53~ 62
- 10 Lees A, Hallet V, Hibo D. Facies variation in Waulsortion buildups, Part 1: a model from belgium. Geol Jour, 1985, 20: 133~ 158
- 11 Lees A, Miller J. Facies variation in Waulsortian buildups, part 2: Mid-Dinantian buildups from Europe and North America. Geol Jour, 1985, 20: 159~ 180

(1998-07-08 收稿, 1999-03-10 收修改稿)

波-流共同作用下的三维悬沙扩散方程

丁平兴 史峰岩 孔亚珍

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要 依据质量守恒定律, 将流场和悬沙场分别分解成3种不同时间尺度的速度和悬沙浓度的叠加, 从理论上较严密地导出了适合于河口海岸区域, 在波-流共同作用下一般形式的三维悬沙扩散方程; 通过对脉动扩散项与波动扩散项的参数化, 给出了适合于具体计算的三维悬沙扩散方程. 与以往扩散方程不同的是, 新给出的方程中能清晰地反映波浪、水流同时对悬沙扩散的影响.

关键词 河口海岸 波浪 水流 悬沙扩散方程

众所周知, 河口海岸地区, 波浪与水流是引起泥沙输运的主要动力因素, 因而国内、外有不少学者对波-流共同作用下的泥沙运动进行研究. 早期研究较多的是遵循河流输沙的研究途径, 以波-流共同作用下的床面剪切应力替代河流泥沙输运公式中的剪切应力^[1, 2]. 现有不少研究者采用流场模型, 但在悬沙扩散方程中采用波-流共同作用下的挟沙能力, 从而讨论波-流共同作用下的泥沙输运^[3~ 6], 或在潮流方程中引入辐射应力, 然后结合二维悬沙扩散方程, 讨论波-流共同作用下的泥沙扩散^[7~ 9]. 这些研究在一定程度上改善了河口海岸地区泥沙输运计算的精度, 但目前大多数河口海岸的输沙数学模型是二维的, 特别是模型中均引用传统的水流作用下的扩散方程, 仅是在源函数中引入波浪影响, 少数在确定涡动扩散系数时考虑波浪作用^[10~ 12], 以表示波-流共同对悬沙的影响; 对于波-流共同作用下的三维泥沙输运研究较少.

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-12-1339>

所以,提出能合理反映波-流共同作用下的悬沙扩散模型,在学术上和应用上均有重要意义.本文依据质量守恒定律,从理论上导出了波-流共同作用下的三维悬沙扩散方程.

1 波-流共同作用下三维悬沙扩散方程的导出

据质量守恒定律,易得到连续方程为

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \frac{\partial uc_s}{\partial x} + \frac{\partial vc_s}{\partial y} + \frac{\partial (w - \omega_s) c_s}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

式中 c_s 是悬沙浓度, u, v, w 是流体质点速度在 x, y, z 方向的分量, ω_s 是悬沙沉降速度. 为研究在波-流共同作用下的悬沙输运,将流场、悬沙场分解成

$$u = \bar{U} + u_w + u', v = \bar{V} + v_w + v', w = \bar{w}_w + w'; c_s = \bar{C} + c_w + c', \quad (2)$$

其中 $\bar{U}, \bar{V}, u_w, v_w, w_w$ 和 u', v', w' 分别表示大尺度水平方向的背景流场(如潮流、径流等)、波动的质点速度场和湍流脉动速度场; $\bar{C}, c_w, c'$ 分别表示与背景流场,波动及脉动相对应的悬沙浓度.

将式(2)代入式(1),并用远大于湍流特征时间尺度的波动周期对其实施时间平均,可得在波-流共同作用下的三维悬沙扩散方程一般形式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}\bar{C}}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{W} - \omega_s) \bar{C}}{\partial z} = \\ \frac{\partial \tau_{Rx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{Ry}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{Rz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{ux}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{uy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{uz}}{\partial z}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$U = \bar{U} + u_w, V = \bar{V} + v_w, W = \bar{w}_w, C = \bar{C} + c_w \quad (4)$$

表示波-流共同作用下的流场和悬沙场; $\tau_{Rx}, \tau_{Ry}, \tau_{Rz}$ 为由湍流脉动引起的悬沙扩散,其形式为

$$\tau_{Rx} = - \overline{u'c'}, \tau_{Ry} = - \overline{v'c'}, \tau_{Rz} = - \overline{w'c'}. \quad (5)$$

$\tau_{ux}, \tau_{uy}, \tau_{uz}$ 是由波动引起的悬沙扩散,其定义为

$$\tau_{ux} = - (\overline{u_w c_w} - \bar{u}_w \bar{c}_w), \tau_{uy} = - (\overline{v_w c_w} - \bar{v}_w \bar{c}_w), \tau_{uz} = - (\overline{w_w c_w} - \bar{w}_w \bar{c}_w). \quad (6)$$

若无波动存在,或不考虑波动引起的悬沙扩散,即在式(2)中取 $u_w = v_w = w_w = c_w = 0$, 式(3)便可简化为仅在流作用下的三维悬沙扩散方程

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}\bar{C}}{\partial y} - \frac{\partial \omega_s \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{Rx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{Ry}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{Rz}}{\partial z}. \quad (7)$$

对于较浅水域,特别在破碎带,可认为脉动引起的悬沙扩散相对于波动引起的是小量,此时在式(3)中略去脉动项可有

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}\bar{C}}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{W} - \omega_s) \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{ux}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{uy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{uz}}{\partial z}. \quad (8)$$

对式(3)从水表面到水底积分,并利用边界条件,便可得到作者已导出的能反映波-流共同作用下的二维悬沙扩散方程

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial DUC}{\partial x} + \frac{\partial DVC}{\partial y} = -F_s + \frac{\partial T_{cx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{cy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{wy}}{\partial y}. \quad (9)$$

式中有关的参数见文献[13].

2 脉动与波动扩散项的参数化

求解三维悬沙扩散方程,除给定能反映波-流相互作用的流场外,还必须预先确定由脉动和波动引起的悬沙扩散项.人们常常把脉动的悬沙扩散项参数化,即取

$$\tau_{rx} = \epsilon_{cx} \frac{\partial C}{\partial x}, \quad \tau_{ry} = \epsilon_{cy} \frac{\partial C}{\partial y}, \quad \tau_{rz} = \epsilon_{cz} \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (10)$$

脉动扩散系数 ϵ_{cx} , ϵ_{cy} , ϵ_{cz} 可与摩阻流速相联系.若不考虑波动对悬沙的影响,将式(10)代入式(7)并略去“-”,便可得人们熟知且常用的仅在流作用下的三维悬沙扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} - \frac{\partial \omega_s C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left| \epsilon_{cx} \frac{\partial C}{\partial x} \right| + \frac{\partial}{\partial y} \left| \epsilon_{cy} \frac{\partial C}{\partial y} \right| + \frac{\partial}{\partial z} \left| \epsilon_{cz} \frac{\partial C}{\partial z} \right|. \quad (11)$$

同理,也可将由波动引起的悬沙扩散项参数化,即取

$$\tau_{wx} = \epsilon_{wx} \frac{\partial C}{\partial x}, \quad \tau_{wy} = \epsilon_{wy} \frac{\partial C}{\partial y}, \quad \tau_{wz} = \epsilon_{wz} \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (12)$$

波动扩散系数 ϵ_{wx} , ϵ_{wy} , ϵ_{wz} 应该与波动特征要素如波高、周期或波动质点速度建立联系.此时,式(8)可表示成

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} + \frac{\partial (W - \omega_s) C}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left| \epsilon_{wx} \frac{\partial C}{\partial x} \right| + \frac{\partial}{\partial y} \left| \epsilon_{wy} \frac{\partial C}{\partial y} \right| + \frac{\partial}{\partial z} \left| \epsilon_{wz} \frac{\partial C}{\partial z} \right|. \end{aligned} \quad (13)$$

一般地,脉动与波动对悬沙扩散均有影响,将式(10)及式(12)代入式(3),便可得到在波-流共同作用下的三维悬沙扩散方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} + \frac{\partial (W - \omega_s) C}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left| \epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right| + \frac{\partial}{\partial y} \left| \epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right| + \frac{\partial}{\partial z} \left| \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right|. \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$\epsilon_x = \epsilon_{cx} + \epsilon_{wx}, \quad \epsilon_y = \epsilon_{cy} + \epsilon_{wy}, \quad \epsilon_z = \epsilon_{cz} + \epsilon_{wz} \quad (15)$$

为包括脉动和波动的扩散系数.目前人们用类似于式(14)的扩散方程去描述在波-流共同作用下的悬沙输运,在概念上应理解成扩散系数中包含脉动与波动效应.

本文从理论上导出了能合理反映波-流共同作用下的三维悬沙扩散方程,波浪、水流对悬沙浓度的影响清晰地体现在扩散方程中得到体现.与该方程相对应的能充分反映波-流相互作用的三维波-流耦合模型将在另文给出,波动扩散系数的确定我们正在继续研究.期望本文的结果有助于人们对于河口海岸地区泥沙输运的深入研究.

致谢 陈全副教授审阅本文初稿并提出了宝贵意见,作者表示感谢.本工作为国家自然科学基金(批准号:49776279)及国家杰出青年科学基金(批准号:49825161)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Bijker K W. Longshore transport computations. J of the Waterways. Harb and Coastal Eng Div, ASCE, 1971, 97: 678~ 701
- 2 Swart D H. Coastal sediment transport. Computation of Longshore Transport, Delft Hydraulics Lab, Report R968, 1976
- 3 窦希萍,罗肇森.波浪潮流共同作用下的二维泥沙数学模型.水利水运科学研究,1992,4: 331~ 338
- 4 窦国仁,董风舞.黄骅大港潮流和波浪共同作用下泥沙数学模型计算.见:第七届全国海岸工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,1993. 500~ 506
- 5 窦国仁,董风舞,窦希萍,等.河口海岸泥沙数学模型研究.中国科学, A 辑,1995,25(9): 995~ 1001
- 6 丁平兴,贺松林,张国安,等.半封闭港湾沿岸工程冲淤影响的预测分析. II. 冲淤的数值计算.海洋学报,1997,19(1): 64~ 72
- 7 曹祖德,王桂芬.波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟.海洋学报,1993,15(1): 107~ 118
- 8 曹祖德,王桂芬.三维潮流、波浪、泥沙数值模拟.见:第七届全国海岸工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,1995. 584~ 590
- 9 曹祖德,王运洪.水动力泥沙数值模拟.天津:天津大学出版社,1994
- 10 O' Connor B A. Three-dimensional sediment-transport model. Coastal, Estuarial and Harbour Engineer' s Reference Book, 1994. 199~ 214
- 11 De Vriend H J. Two-dimensional horizontal and weakly three dimensional models of sediment transport due to waves and currents. Coastal, Estuarial and Harbour Engineer' s Reference Book, 1994. 215~ 238
- 12 Kotopodi I, Ribberink J S. Quasi-3D modelling of suspended sediment transport by currents and waves. Coastal Eng, 1992, 18: 83~ 110
- 13 丁平兴,史峰岩,孔亚珍.海滩上波-流共同作用下泥沙扩散模型的研究.见:第八届全国海岸工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,1997. 754~ 761

(1998-09-29 收稿,1999-01-13 收修改稿)

南极菲尔德斯半岛苔藓泥炭层¹⁴C 测年

赵 焱 李容全

(北京师范大学资源与环境科学系,北京 100875)

摘要 根据南极菲尔德斯半岛海岸阶地面上苔藓泥炭层剖面上、中、下3层泥炭的¹⁴C数据,推得该苔藓泥炭层上段的平均累积速率为 $0.195\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,下段为 $0.0694\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$.由下部苔藓泥炭的¹⁴C数据和下段平均累积速率,推得该地区海拔18 m的海岸阶地形成时间应略早于4 300 aBP,且自4 300 aBP以来这里的海滩一直处于稳定上升状态.相应这个地区的冰盖解体与冰退过程也应早于4 300 aBP.

关键词 南极 苔藓泥炭层 ¹⁴C 测年 环境演变

在南极洲的滨海无冰区,各种上升海岸现象和位于海平面以下的海蚀平台都有力地证明,南极海平面在地质时期曾多次发生升降变化.任美锲^[1]和谢又予^[2]认为全球气候变化是引起

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-12-1339>