第 40 卷 第 3 期 力 学 进 展 Vol. 40 No. 3
2010 年 5 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS May 25, 2010

# 泥沙输运模拟综述 —— 现状及其发展趋势*

Athanasios N.(Thanos) Papanicolaou[1,†] Mohamed Elhakeem[1,‡]
George Krallis[2] Shwet Prakash[2] John Edinger[3]

[1] Univ. of Iowa, IIHR-Hydroscience and Engineering, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Iowa City, IA 52241
[2] ERM Inc., Exton, PA
[3] Bryn Mawr College, Dept. of Geology

**摘 要** 随着流体力学中数值方法的飞速发展, 计算模型已经成为研究流体运动, 泥沙输运和不同环境 (诸如河流, 湖泊及沿海地区) 中相应污染物归趋过程等方面非常有吸引力的工具, 在过去的 30 多年里, 发展了许多计算水动力学/泥沙输运模型. 文章追溯当前具有代表性的 (一维、二维、三维) 模型的发展历程, 描述他们各自的特点, 优势及局限, 力图作为对模型方面感兴趣读者的第一指南, 同时也为大家讨论模型的局限性, 未来的发展趋势和研究需求方面搭建一个平台. 给出了模型的表达, 时空特性, 水动力学和沉积物的耦合方式, 处理非恒定流, 推移质和悬移质, 泥沙交换过程, 泥沙类型 (粘性或非粘性) 及非均匀泥沙输运的能力. 总结了不同模型的应用实例, 读者可以运用这些例子作为研究模型设置, 模型率定及模型验证的参考. 给出了选择泥沙输运模型应遵循的原则, 模型输入及率定方面存在的问题及改进的途径. 探讨了现有水动力学/泥沙输运模型在处理复杂湍流, 泥沙携带, 流动与输沙耦合, 非均匀泥沙, 离散和扩散系数, 河岸来沙处理等方面的局限性及改进的方向. 最后, 对基于多相流思想的泥沙输运模型及其它一些交叉性问题作了评述与展望.

**关键词** 泥沙输运, 数学模型, 模型选择, 模型率定, 模型局限, 二相流方法

## 1 引 言

相对物理模型而言, 应用计算模型是解决泥沙输运及归趋问题 (fate problems) 比较新的方法. 选择物理模型还是计算模型取决于几个方面的考虑, 即: 需要解决的问题的特性, 可利用的资源, 解决问题所需的总费用. 在一些特殊的问题中, 物理模型和计算模型的联合使用能更好地帮助人们理解问题的整个过程 [1]. 一般来说, 运用计算水动力学/泥沙运动模型会涉及到流体连续性、动量和能量控制微分方程中的一个或数个及泥沙连续性方程的数值求解. 计算模型的一个优点是它比物理模型更容易适应到不同的物理区域, 而构建的物理模型只代表特定区域的条件. 计算模型的另一个优点是可以得到与实地同样流动情况下 (相同的雷诺数和佛罗德数, 3 个方向相同的长度尺度等) 的解, 不会像物理模型那样产生失真效应.

随着流体力学中数值方法的飞速发展, 计算模型已经在研究流体运动, 泥沙输运和不同环境 (诸如河流, 湖泊及沿海地区) 中相应污染物的归趋过程等问题中成为非常有吸引力的工具. 这些环境中代表性的运动过程有河床的淤积和冲刷, 河堤溃决, 建筑物周围的局部冲刷, 河流弯道的形成, 河床的细化和粗化, 吸附于泥沙的点源和非点源污染物的输运, 诸如沉降、沉积和自重固结等泥沙交换过程、海岸沉积、以及潮流和波浪作用下的海滩运动过程.

在过去的 30 多年里, 已经发展了许多水动力学/泥沙输运计算模型 [2,3], 大量文献对这些不同泥沙输运模型的性能进行了评述 [4~9]. 概括地说, 这些模型可根据它们的应用范围 (例如, 推移质还是悬移质, 物理输运还是化学输运) 和时空连续性公式进行分类 (例如, 一维模型, 二维模型, 三维模型, 稳态还是非稳态). 对于一个特定问题, 模型的

收稿日期: 2009-08-11, 修回日期: 2010-04-22
* 陕西省重点学科建设专项资金资助, Journal of Hydraulic Engineering 惠允版权翻译此文 (published with kind permission from Journal of Hydraulic Engineering, volume © 2008, http://pubs.asce.org), 中英文摘要由译者加.
† E-mail: apapanic@engineering.uiowa.edu; ‡melhakee@engineering.uiowa.edu

选择依赖于问题本身的性质及其复杂性、可选模型模拟问题的能力、可用来率定及验证模型的数据、以及解决问题可用的时间及经费预算.

本文的目的包括两方面: 首先, 文章将追溯当前具有代表性的 (一维、二维、三维) 模型的发展历程, 描述他们的主要应用、优势和局限. 本文力图成为对模型方面感兴趣读者的第一指南, 同时也为大家讨论模型的局限性和未来需求方面搭建一个平台. 第二, 文章将展望水动力学及泥沙输运模型未来的发展趋势和需求. 在文中, 要包含所有文献中可找到的模型几乎不可能, 所以作者可能无意中会遗漏一些模型. 最后, 虽然文章主要集中于多维 (二维和三维) 的计算模型上, 但是对一维模型也进行了简单介绍, 以便一维模型的特点与二维三维模型的主要特点进行对比.

## 2 模型描述

这部分给出关于模型表达式、时空特性、水动力学和沉积物耦合、模型预测能力的一些信息. 表 1 ~ 表 3 列出了不同模型处理非恒定流、推移质和悬移质、泥沙交换过程、泥沙类型 (黏性或非黏性) 和非均匀泥沙输运能力的状况, 也给出了关于模型的缩写、所采用的语言、模型的可用性和发行信息. 表 4 ~ 表 6 总结了不同模型的应用实例. 读者可以运用这些例子作为研究模型设置, 模型率定和模型验证的参考指南.

**表 1 所选一维模型概要**

| 模型及参考文献 | 最后更新 | 流态 | 推移质输运 | 悬移质输运 | 非均匀泥沙 | 黏性泥沙 | 泥沙交换过程 | 可执行性 | 源代码 | 程序语言 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HEC-6: Hydraulic Engineering Center; Thomas 和 Prashum[15] | V. 4.2 (2004) | 恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | PD | PD | F77 |
| MOBED: MObile BED; Krishnappan[10] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | C | C | F90 |
| IALLUVIAL: Iowa ALLUVIAL; Karim 和 Kennedy[11] | | 准恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | C | C | FIV |
| FLUVIAL 11; Chang[16] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | C | P | FIV |
| GSTARS: Generalized Sediment Transport models for Alluvial River Simulation; Molinas 和 Yang[17] | V. 3 (2002) | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | PD | PD | F90 /95 |
| CHARIMA: Acronym of the word CHARiage which means bedload in French; Holly 等 [12] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 是 | 挟带与沉积 | C | C | F77 |
| SEDICOUP: SEDIment COUPled; Holly 和 Rahuel[13] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | C | C | F77 |
| OTIS: One-dimensional Transport with Inflow 和 Storage; Runkel 和 Broshears[18] | V.OTIS -P (1998) | 非恒定 | 否 | 是 | 否 | 否 | 对流与扩散 | PD | PD | F77 |
| EFDC1D:Environmnetal Fluid Dynamics Code; Hamrick[19] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 是 | 挟带与沉积 | PD | PD | F77 |
| 3STD1,Steep Stream Sediment Transport 1D model; Papanicolaou 等 [14] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | C | P | F90 |

注: V= 版本, C= 版权, LD= 限制发行, P= 专利权, PD= 公共域, F=FORTRAN, [a] 作为总输运处理, 未分解.

**表 2　所选二维模型概要**

| 模型及参考文献 | 最后更新 | 流态 | 推移质输运 | 悬移质输运 | 非均匀泥沙 | 黏性泥沙 | 泥沙交换过程 | 可执行性 | 源代码 | 程序语言 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SERATRA: SEdiment and RAdionuclide TRAnsport; Onishi 和 Wise[32] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 对流与扩散 | C | C/LD | FIV |
| SUTRENCH- 2D: SUspended sediment transport in TRENCHes; van Rijn 和 Tan[33] | | 准恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 否 | 对流与扩散 | C | LD | F90 |
| TABS-2; Thomas 和 McAnally[34] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 挟带与沉积 | C | C | F77 |
| MOBED2: MObile BED; Spasojevic 和 Holly[35] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | C | C | F97 |
| ADCIRC: ADvanced CIRCulation; Luettich 等 [36] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 对流与扩散 | C/LD | C/LD | F90 |
| MIKE 21: Danish acronym of the word microcomputer; Danish Hydraulic Institute[37] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 挟带与沉积 | C | P | F90 |
| UNIBEST-TC: UNIform BEach Sediment Transport-Transport Cross-shore; Bosboom 等 [38] | | 准恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 否 | 挟带与沉积 | C | LD | F90 |
| USTARS: Unsteady Sediment Transport models for Aluvial Rivers Simulations; Lee 等 [39] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | P | P | F90 |
| FAST2D: Flow Anylysis Simulation Tool; Minh Duc 等 [40] | | 非恒定 | 是 | 是 | 否 | 否 | 挟带与沉积 | LD | P | F90 |
| FLUVIAL 12; Chang[41] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | C | P | F77 |
| Delft 2D; Walstra 等 [42] | | 非恒定 | 是 | 是 | 否 | 是 | 对流与扩散 | C | LD | F90 |
| CCHE2D:The National Center for Computational Hydroscience 和 Engineering; Jia 和 Wang[43] | V. 2.1 (2001) | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 对流与扩散 | PD/C | LD | F77/ F90 |

注: V= 版本, C= 版权, LD= 限制发行, P= 专利权, PD= 公共域, F=FORTRAN, [a] 作为总输运处理, 未分解.

**表 3 三维模型概述**

| 模型及参考文献 | 最后更新 | 流态 | 推移质输运 | 悬移质输运 | 非均匀泥沙 | 黏性泥沙 | 泥沙交换过程 | 可执行性 | 源代码 | 程序语言 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ECOMSED; Blumberg 和 Mellor[59] | V. 1.3 (2002) | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 挟带与沉积 | PD | PD | F77 |
| RMA-10; King)[60] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 挟带与沉降 | C | P | F77 |
| GBTOXe; Bierman 等 [61] | | 非恒定 | 否 | 是 | 否 | 是 | 挟带与沉积 | NA | NA | F77 |
| EFDC3D; Hamrick[62] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 是 | 挟带与沉积 | PD | P | F77 |
| ROMS; Song 和 Haidvogel[63] | V. 1.7.2 (2002) | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 挟带与沉积 | LD | LD | F77 |
| CH3D-SED, Spasojevic 和 Holly [64] | | 非恒定 | 是 | 是 | 是 | 是 | 挟带与沉积 | C | C | F90 |
| SSIIM; Olsen[65] | V. 2.0 (2006) | 恒定 | 是 | 是 | 是 | 否 | 对流与扩散 | PD | P | C-Langua |
| MIKE 3; Jacobsen 和 Rasmussen [66] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 挟带与沉积 | C | P | F90 |
| FAST3D; Landsberg 等 [67] | V.Beta-1.1 (1998) | 非恒定 | 是 | 是 | 否 | 否 | 挟带与沉积 | LD | P | F90 |
| Delft 3D; Delft Hydraulics[68] | V. 3.25.00 (2005) | 非恒定 | 是 | 是 | 否 | 是 | 挟带与沉积 | C | LD | F77 |
| TELEMAC; Hervouet 和 Bates[69] | | 非恒定 | [a] 是 | [a] 是 | 否 | 是 | 挟带与沉积 | C | P | F90 |
| Zeng 等 [70] | | 非恒定 | 是 | 是 | 否 | 否 | 挟带与沉积 | P | P | F90 |

注: V= 版本, C= 版权, LD= 限制发行, P= 专利权, PD= 公共域, F=FORTRAN, [a] 作为总输运处理, 未分解.

**表 4　一维模型的应用实例**

| 模型和参考文献 | 应用实例 |
|---|---|
| HEC-6;<br>homas 和 Prashum[15] | 预测加拿大 Gardiner 坝下游 Saskatchewan 河水流和泥沙输运及其河床高程的变化 [20];<br>预测华盛顿 Glines Canyon 坝上游侵蚀和再沉积泥沙三角洲地区的河床纵剖面 [21] |
| MOBED;<br>Krishnappan[10] | 将此模型对加拿大 Gardiner 坝下游 Saskatchewan 河的水沙流动及河床变化模拟的结果与 HEC-6 模拟的结果进行比较 [20].<br>预测加拿大西北部 Hay 河冰盖下的细颗粒泥沙的输运. |
| IALLUVIAL;<br>Karim 和 Kennedy [11] | 模拟内布拉斯加州 Missouri 河的水沙运动过程 [11].<br>模拟内布拉斯加州 Missouri 河上 Gavins Point 坝下游的水沙运动过程 [22] |
| FLUVIAL 11;<br>Chang[16] | 模拟南加州 San Dieguito 河的水沙运动过程 [16].<br>模拟北加州 San Lorenzo 河的水沙运动过程 [23]. |
| GSTARS;<br>Molinas 和 Yang[17] | 预测伊利诺伊州 Mississippi 河第 26 号闸坝置换处冲深和冲坑形态;<br>预测新墨西哥 Mescalero 水库下游无衬砌溢洪道断面形状的变化 [24]. |
| CHARIMA;<br>Holly 等 [12] | 南达科他州密苏里河从 Ft. Randall 到 Gavins Point 坝河段动床动力学特性的研究.<br>内布拉斯加州密苏里河从 Gavins Point 坝到 Rulo 河段动床动力学的研究. |
| SEDICOUP;<br>Holly 和 Rahuel[13] | 德国 Lower Salzach 河改造措施对推移质输运长期影响的模拟 [25].<br>德国多瑙河形态的长期模拟 [26]. |
| OTIS;<br>Runkel 和 Broshears[18] | Bencala 和 Walters[27] 所做加利福尼亚州 the Uvas Creek 河中氯化物浓度变化现场试验的模拟. 采用 Laenen 和 Risley[28] 所测的苏丹明数据, 对俄勒冈州 Clackamas 河中物质传播时间和混合特性的研究, . |
| EFDC1D;<br>Hamrick[19] | 华盛顿 Elliott 海湾及 Duwamish 河水流及泥沙运动过程的模拟 [29].<br>特拉华州 Christina 河水质模型的开发 [30]. |
| 3STD1;<br>Papanicolaou 等 [14] | 预测委内瑞拉 Cocorotico 河河床形态和粒径大小的分布 [14].<br>预测阿拉斯加州 Alec 河推移质输沙率及粒径大小的分布 [31]. |

### 2.1　一维模型

自 20 世纪 80 年代初以来, 一维模型已经成功地应用于研究和工程实践中. 大多数一维模型建立在直线坐标系下, 采用有限差分法求解流体的质量和动量守恒微分方程 (也就是圣维南流动方程组) 及泥沙质量守恒方程 (Exner 方程). 基于上述方程发展起来的一些代表性的模型包括 Krishnappan 的 MOBED[10], Karim 和 Kennedy 的 IALLUVIAL[11], Holly 等的 CHARIMA[12], Holly 和 Rahuel 的 SEDICOUP[13], Papanicolaou 等的 3ST1D[14]. Thomas 和 Prashum 的 HEC-6 [15] 也是建立在直线坐标系下并采用有限差分法进行离散的, 但它求解能量微分守恒方程而非动量守恒方程.

其它采用不同坐标系, 不同方程或算法的一维模型有 Chang 的 FLUVIAL 11[16], Molinas 和 Yang 的 GSTARS[17], Runkel 和 Broshears 的 OTIS[18]. Chang[16] 应用曲线坐标系求解他所建立模型的控制方程. Molinas 和 Yang[17] 采用最小能耗原理来确定给定水力和泥沙条件的渠道的最佳宽度和几何形状. Runkel 和 Broshears[18] 采用附加项修正一维对流扩散方程, 用以表述侧向入流、一级衰减、非守恒溶解物的吸附作用及这些溶解物的临时滞留等现象.

这里提到的大多数一维模型能够预测特定渠道的基本参数, 包括平均速度、水位、河床高程变化和输沙率. 除了 OTIS 模型 [18], 其他所有模型都可以预测总输沙量和非均匀沙的粒径分布. 3ST1D[14] 模型不能将总输沙率分解为推移质输沙率和悬移质输沙率. HEC-6 [15] 模型及 IALLUVIAL[11] 模型不能用于非恒定流的情形. 表 1 包含了所有模型的出处和名称缩写的注释, 并概括了每个模型的主要特征.

部分一维模型有自己的特色. 例如, HEC-6[15] 模型把能量损失分解成形状损失和表面摩擦损失. MOBED[10] 模型可以对不同的流动过程, 预测河

床泥沙特性随时间和距离的变化规律. FLUVIAL 11[16] 模型通过调节流向速度的大小计及弯曲河道中二次流的存在. 此模型能够预测河床断面, 宽度的变化及弯道的横向输移. CHARIMA[12] 模型和 OTIS[18] 模型能处理守恒污染物及热量的输移和归趋问题. Hamrick 的 EFDC1D[19] 模型能用于河网的模拟. 3ST1D[14] 模型能够捕获水跃和模拟超临界流, 因此, 它能适用于过渡流河段的非恒定流情形, 例如山区溪流中的阶梯深潭系列上的水流.

由于数据量少, 对 CPU 的要求低, 使用简单, 一维模型至今仍为一种有用的预测工具, 特别是在项目咨询阶段, 以及不必要应用二维或三维模型, 或计算费用昂贵的河流和水系生态应用项目. 表 4 给出了不同的一维模型的应用实例.

### 2.2 二维模型

20 世纪 90 年代初以来, 数值计算研究开始向二维模型转变. 当前水利工程界可用的大多数二维模型都是基于界面接口的软件, 数据输入简单且结果可视化. 增加的这一功能使得二维模型用户友好并流行开来. 二维模型是水深平均模型, 它能提供河流、湖泊和河口中关于水深和河床变化的信息, 以及深度平均的流向及横向流速分量的大小. 大多数的二维模型采用有限差分法、有限元法、有限体积法求解深度平均的连续方程和 N-S 方程, 以及泥沙质量守恒方程. 表 2 给出了模型的出处、模型缩写的注释, 概括了所选二维水动力学/泥沙输运模型的特点. 每个模型的主要特色描述如下:

(1) SERATRA: 它是由 Onishi 和 Wise[32] 采用有限元法建立的泥沙 - 污染物输运模型. 模型包括了一般的对流扩散方程, 加上汇/源项. 模型能预测陆地和水流中杀虫剂的迁移和归趋, 用以评估其对受纳水体中生物潜在的短期和长期影响.

(2) SUTRENCH-2D: 它是由 van Rijn 和 Tan[33] 采用有限体积法建立的水动力学和泥沙输运数学模型, 用来模拟在准稳态水流及风致波浪 (wind induced waves) 作用下, 沉积河床底部泥沙输送及其相应河床高程的变化. 为了能够考虑泥沙的沉积, 此模型在求解对流扩散方程时增加了一个延滞系数 (lag coefficient).

(3) TABS-2: 它是美国陆军工程兵团水道实验站 (Thomas 和 McAnally[34]) 采用有限元法开发的一组水动力学和泥沙输运计算代码, 目前在 SMS v.9.0 windows 界面下运行. 这些代码可以用于河流, 水库和河口的模拟. TABS-2 模型的主要组成有水动力学模块 RMA2、泥沙输运模块 SED2D (正式为 STUDH) 和水质模块 RMA4.

(4) MOBED2: 它是由 Spasojevic 和 Holly[35] 在曲线坐标系中采用有限差分法建立的水动力学泥沙输运模型. 在适宜于采用水深平均的情况下, 该模型能够模拟自然水道如水库, 河口及海岸地区的水流, 泥沙输运和河床演变.

(5) ADCIRC-2D: 它是由 Luettich 等 [36] 在直线坐标系下采用有限元法建立的水动力学泥沙输运模型, 可以通过采用 “外部模式” 的二维方程来模拟大范围区域 (例如, 美国的整个东海岸), 而采用 “内部模式” 来得到局部地区的具体速度和应力. 内部模式是通过指定动量离散系数和以垂向速度分布表示的底部剪应力来实现的. 浅水方程的波浪连续性公式用来求解时间依赖的自由表面环流和输运过程.

(6) MIKE2: 它是由丹麦水力研究所 [37] 在直线坐标系下采用有限差分法建立的, 可以模拟排放或者偶然流入湖泊、河口、海岸地区或大海中的溶解质和悬移质的输移和归趋问题. 此系统包含 4 个主要的模块, 也就是水动力学模块、波浪模块、泥沙输运模块和环境水力学模块. 水动力学和波浪模块与漫滩区中发生的物理过程有关. 泥沙输运模块用来模拟海岸线变化和泥沙输运, 而环境水力学模块则用来检验水质问题.

(7) UNIBEST-TC2: 它是在直角坐标系下采用有限差分法建立的水动力学和泥沙输运模型, 假设沿海岸方向存在均匀的平均沿岸流, 模型用来描述离岸方向的波浪和水流的水动力学过程 (Bosboom 等 [38]). 推移质和悬移质的输运过程通过假定局部平衡条件进行模拟 (不考虑水流和泥沙间的滞后效应).

(8) USTARS: 一维 GSTARS 模型的修正模式, 同样也是基于流管概念的模型 (Lee 等 [39]). 在直角坐标系下采用有限差分法求解水动力学和泥沙输运方程. 和 GSTARS 模型一样, 在给定的水力、地貌、泥沙和人为限定条件下, 用河流最小能量原理确定最佳的渠道宽度和形状.

(9) FAST2D: 它是在曲线坐标系下采用贴体网格建立的有限体积水动力学和泥沙输运模型, 可模拟冲积河渠中的泥沙输运及地形动力学问题 (Minh Duc 等 [40]). 模型间接地计及了由于区域复

杂性而产生的二次效应.

(10) FLUVIAL 12: 它是由 Chang[41] 在直线坐标系下采用有限差分法建立的水动力学和泥沙输运模型. 可以模拟给定时段内水流动力、泥沙输运和河道变化的综合效应. 此模型为动床模型, 可以模拟由于河道弯曲造成的河床断面形态、宽度及床沙成份的变化.

(11) DELFT-2D: 它是采用有限差分法建立的水动力学和泥沙输运模型, 用来模拟波浪和水流运动 (Walstra 等 [42]). 此模型以时间依存的方法, 将水动力学与计算的底部形态变化耦合起来. 该模型即可以用局部平衡也可以用局部非平衡 (也就是, 流动与泥沙间的延滞效应) 的方式模拟推移质和悬移质的输运. 模型能够反映波浪运动对输运大小和方向的影响.

(12) CCHE2D: 它是由 Jia 和 Wang[43] 采用有限元法建立的水动力学和泥沙输运模型, 模型通过求解对流扩散方程模拟悬移质输运, 由经验公式 (例如, Yalin [44]; van Rijn[45]) 计算推移质输运. 模型可以考虑弯道中形成的二次流效应.

除了 SUTRENCH-2D[33] 模型及 UNIBEST-TC2[38] 模型外, 上述所有模型都适用于非恒定流的情况. 所有模型都能预测总输沙量; 但只有 MOBED2[35], USTARS[39], FLUVIAL 12[41] 和 CCHE2D[43] 模型能处理多组分非均匀泥沙的输运, 并将总的输沙量分解为悬移质输运和推移质输运. DELFT-2D[42] 和 FAST2D[40] 模型也可将总输沙量分解为悬移质输沙量和推移质输沙量, 但其只能用于均匀沙的计算模拟. 表 5 中列举了不同二维模型的应用实例.

**表 5　二维模型的应用实例**

| 模型和参考文献 | 应用实例 |
|---|---|
| SERATRA;<br>Onishi 和 Wise[32] | 研究纽约 Cattaraugus 和 Buttermilk 河泥沙对放射性核素输移的影响 [46]. 模拟从乌克兰切尔诺贝利核电站排放到 Pripyat 和 Dnieper 河中放射性核素的水文地球化学性质 [47]. |
| SUTRENCH-2D;<br>van Rijn 和 Tan[33] | 荷兰海岸较低段沿疏导坑和疏导沟的泥沙输运过程及其相应河床变化的模拟 [42].<br>模拟里海伊朗海岸泥沙输运和海岸线的演变 [48]. |
| TABS-2;<br>Thomas 和 McAnally[34] | 模拟阿拉斯加州黑湖的水流及泥沙输运过程 [30].<br>为形成新的浅水栖息地, 对建造在密苏里河的不同建筑物进行水力性能的评价. |
| MOBED2;<br>Spasojevic 和 Holly [35] | 爱荷华州爱荷华河的 Coralville 水库中动床动力学的模拟 [49]. |
| ADCIRC;<br>Luettich 等 [36] | 模拟德克萨斯州 Matagorda 湾自然承台的水流及泥沙输运过程 [50].<br>模拟荷兰 Scheveningen Trial 渠的泥沙输移过程 [50]. |
| MIKE 21;<br>丹麦水力研究所 [37] | 预测丹麦瑞典 Oresund Link 中疏浚泥的蔓延.<br>预测丹麦 Gradyb 潮流入口处落潮流中的输沙速率. |
| UNIBEST-TC;<br>Bosboom 等 [38] | 研究建造马来西亚吉兰丹港对海岸的影响.<br>为防护荷兰 Texel 地区海岸线进行海岸水动力学研究. |
| USTARS;<br>Lee 等 [39] | 模拟台湾基隆河一河段的泥沙输移过程及其相应的河床变化 [39].<br>台湾淡水河上游石门水库中水沙的演进过程. |
| FAST2D;<br>Minh Duc 等 [40] | 模拟德国巴伐利亚多瑙河一河段的泥沙输移过程及其相应的河床高程变化 [40]. 波兰 Orlice 河的洪水和消洪分析 [51]. |
| FLUVIAL 12;<br>Chang[41] | 南加州的 San Dieguito 河水沙运动过程的模拟 [52].<br>北加州的 Feather 河水沙运动过程的模拟 [53]. |
| Delft 2D;<br>Walstra 等 [42] | 荷兰海岸较低段沿疏导坑和疏导沟的泥沙输运过程及其相应的河床变化的模拟 42].<br>荷兰莱茵河 Pannerdense 山和 Ijssel 山分叉处的流场和泥沙输移过程的模拟 [54]. |
| CCHE2D;<br>Jia 和 Wang[43] | 路易斯安那州红河航道 2 号闸坝下游潜丁坝和石堆作用的研究.<br>密西西比河 Little Topashaw 河中大木质碎石建筑物对河流演化影响的研究 [55]. |

### 2.3 三维模型

在许多水利工程应用问题中, 当二维模型不适用于模拟某些水力及泥沙输运过程时, 人们必须借助于三维模型. 墩体附近或水工建筑物周围普遍存在三维流动结构, 此时二维模型不能充分地描述其物理过程. 由于计算技术, 如计算速度、并行计算和数据储存分类等的最新发展, 应用三维水动力泥沙输运模型就变得更具吸引力了. 大多数的三维模型采用有限差分法、有限元法或有限体积法求解连续性方程、N-S 方程及泥沙输运平衡方程. 求解的控制方程是雷诺平均的 N-S 方程.

雷诺平均 (Reynolds average Navier-Stokes, RANS) 模型可分成流体静力学和非静力学模型. 流体静力学模型 (例如, Gessler et al[56]) 不能准确地预测强三维、有逆压梯度或存在大尺度分离流区域中的流动和输运现象 (例如, 有水工建筑物存在的弯曲河道). 相反, 非流体静力学模型可以充分地描述复杂区域中二次流的复杂特性 (例如, Wu 等 [57], Ruther 和 Olsen[58]).

表 3 给出了完整的模型出处和缩写的注释, 概括了所选 12 种水动力学泥沙输运模型的特征. 每个模型的主要特色描述如下:

(1) ECOMSED: 由 Blumberg 和 Mellor[59] 在正交曲线坐标系下开发的全集成的三维有限差分水动力学、波浪和泥沙输运模型. 该模型采用了静水压力分布假定, 能够预测像湖泊和海洋这样大水体中的归趋和输运过程.

(2) RMA10: 计算分层自由面流动水位和水平速度分量的有限元水动力学模型 (King[60]). 它是针对垂向加速度可忽略不计的水体设计的 (采用了静水压力分布假设). 模型求解盐分、温度和悬移质的输运方程, 并考虑这些量对密度的影响. 此模型适于计算潮滩和湿地的水动力学问题. 模型仅限于均匀沙. RMA10 是 TABS-MD 的一个组成部分 (多维的).

(3) GBTOXe: 它是在直角坐标系下采用有限差分法建立的, 能够预测河流环境中 PCBs 的输运和归趋问题. 模型最初是针对威斯康星州 Green 湾 PCBs 的归趋和输运问题开发的 (Bierman 等 [61]). 模型的水动力学模块 (GBHYDRO) 采用静水压力分布假设, 可描述水体的循环和混合过程, 而泥沙输运模块 (GBSED) 可以模拟黏性泥沙的输运过程.

(4) EFDC3D: 它是在正交曲线坐标系及垂向 $\sigma$ 或垂向拉伸近似直线坐标系下, 采用有限差分法建立的水动力学和水质组分输移模型 (Hamrick[62]). 模型求解变密度流体的三维、垂直静压分布、带自由面、湍流平均的运动方程. 模型可模拟复杂水体, 诸如垂直混合的浅水河口、湖泊和海岸地区的流动. 模型也能预测有毒污染物和水质状态的变化. 如今, 正力图将 EFDC3D 代码合并到 BASINS 程序中, BASINS 是一个连接陆地 (也就是高地) 和河流的 EPA 开源代码流域模型.

(5) ROMS: 它是垂向采用 $\sigma$ 拉伸近似的正交曲线坐标系下的有限差分法模型 (Song 和 Haidvogel [63]). 模型可以模拟带自由面的水静力学海洋环流, 确定表面波对底部应力和底部粗糙度的影响参数.

(6) CH3D-SED: 它是垂向采用 $\sigma$ 拉伸近似的非正交坐标系下的边界拟合有限差分法模型 (Spasojevic 和 Holly[64]). 泥沙模块基于求解推移质输沙平衡方程和悬移质输运对流扩散方程.

(7) SSIIM: 基于非结构网格的有限体积水动力学和泥沙输运模型 (Olsen[65]). 模型能模拟复杂几何形态下动床上的泥沙输运问题. 它包括模拟河道蜿蜒和床面形态, 非均匀沙推移质和悬移质输运及相应床沙分选和粗化过程的模块. 模型还可扩展到其它水利工程的应用中, 如溢洪道、隧洞的水头损失、河流的迂回曲折及混浊流的模拟. 模型也能用于河道中水质和水生栖息地的研究.

(8) MIKE3: 丹麦水力学研究所开发的, 采用正交网格系统, 适于计算自由面流动的有限差分模型. 它包含模拟对流扩散、水质、与大气的热交换、重金属、水体富营养化、潮区的干湿和泥沙过程的模块 (Jacobsen 和 Rasmussen[66]). 模型可模拟守恒或线性衰减物质的归趋和输运, 涉及的过程有养分循环、溶氧水平、底沙和水体间的金属交换、泥沙输运、沉积和挟带.

(9) FAST3D: 它是采用有限体积法建立的完全三维的非水静力学模型 (Landsberg 等 [67]). FAST3D 使用高阶高分辨率的通量校正传输 (flux-corrected transport, FCT) 水动力学算法. 由于具有对虚拟元嵌入 (virtual cell embedding, VCE) 算法进行高效并行计算的附加功能, 模型能处理复杂的几何区域. 模型的泥沙模块计算非平衡推移质输沙率和基于对流扩散的悬移质输沙率 (Wu 等 [57]). 氢氧感应参数模型也包括在 FAST3D 模型中. 此模型允许多种化学组分共享单一的流速场.

(10) DELFT3D: 代尔夫特水力实验室团队研制的有限差分法集成模拟系统 (Delft Hydraulics[68]). 模型系统包括若干子模块, 可模拟 6 个过程 (流动、波浪、水质、形态、泥沙输运及生态) 的时空变化. 水动力学子模块采用贴体曲

线网格系统计算由潮汐和气象力产生的非恒定流动.

(11) TELEMAC-3D: 自由面边界条件下描绘海岸地区归趋和输运问题的有限元水动力学及输运模型 (Hervouet 和 Bates[69]). 对于水质部分, 模型求解对流扩散方程, 并由附加项来表达瞬时存储、侧向进水、一级衰减及吸附作用.

(12) Zeng 等 [70] 模型: 一般曲线坐标系下采用有限差分法建立的全三维非静水压力模型, 模型积分控制方程直至近壁边界, 避免了采用任何壁面近似. 求解器在垂向上采用动网格来适应自由面高度的变化. 模型施以适当的运动学或动力学条件来表达由侵蚀或沉积导致的河床地形的变化. 悬移质输运采用附加沉速项的对流扩散方程来模拟.

除了 SSIIM[65] 模型, 上述所有模型都适合于非恒定流的情况. 除了 GBTOXe[61] 模型, 所有模型均可预测总输沙量. 只有 EFDC3D[62], ROMS[63], CH3D-SED[64] 及 SSIIM[65] 模型能预测非均匀泥沙的颗粒级配, 而其他模型只用预测均匀沙. ECOMSED[59], RMA10[60], MIKE3[66] 及 TELEMAC-3D[69] 模型能将总输沙量分成推移质输沙和悬移质输沙. 表 6 中列举了不同三维模型的一些应用实例.

**表 6　三维模型的应用实例**

| 模型和参考文献 | 应用实例 |
|---|---|
| ECOMSED;<br>Blumberg 和 Mellor[59] | 德克萨斯州 Lavaca 湾水流及泥沙输运过程的模拟 [71].<br>瑞典 Klaralven 河东西渠分岔处水流及泥沙输运过程的模拟 [72]. |
| RMA-10;<br>King[60] | 华盛顿 Nisqually 河三角洲地区生态恢复替代方案的模拟.<br>加州洛杉矶及 Long Beach 港水流和泥沙输运过程的模拟 [73]. |
| GBTOXe;<br>Bierman 等 [61] | 威斯康辛州 Green 港 PCBs 归趋和输运的模拟. |
| EFDC3D;<br>Hamrick[62] | 加州 Moro 湾水动力学和泥沙输运过程的模拟.<br>南加州和乔治亚州间 Savannah 河上 Lake Hartwell 水库水流及泥沙输运过程的模拟. |
| ROMS;<br>Song 和 Haidvogel[63] | 纽约 Hudson 河口泥沙输移及河口最大浊度的模拟;<br>加州南加州湾的水流和底泥特征的模拟. |
| CH3D-SED,<br>Spasojevic 和 Holly[64] | 评价不同泥沙来源对俄亥俄州 Erie 湖西半湖海岸的相对影响 [74].<br>路易斯安娜州 Tchafalaya 河和密西西比河下段的弯道, 岔道和支流处的泥沙输运模拟. |
| SSIIM;<br>Olsen[65] | 由科罗里达州立大学的试验数据进行了验证 [75]. |
| MIKE 3;<br>Jacobsen 和 Rasmussen[66] | 俄勒冈州上 Klamath 湖水流、泥沙输运过程及水质的模拟;<br>佛罗里达州 Tampa 港水流、泥沙输运过程及水质的模拟. |
| FAST3D;<br>Landsberg 等 [67] | 由 Odgaard 和 Bergs[76] 的实验数据进行了验证; 模拟假想机载剂释放到主要城市, 如华盛顿、马里兰、芝加哥和伊利诺斯, 导致的污染区 [77]. |
| Delft 3D;<br>Delft Hydraulics[68] | 香港吐露港和大鹏湾水流、泥沙输运过程及水质的模拟 [68].<br>北加州的 German Wadden 海地貌动力过程的模拟 [68]. |
| TELEMAC;<br>Hervouet 和 Bate[69] | 东南太平洋秘鲁海盆地区中尺度水动力学及其泥沙输运模型的开发 [78].<br>加州 Shasta 水库中有毒物质归趋和输移的模拟 [79]. |
| Zeng 等 [70] | 用 Odgaard 和 Bergs[76] 的实验数据进行验证 |

## 3 讨论与进一步的研究

水动力学/泥沙输运模型预测和实测值的差异可以归于不同的原因. 这包括采用了不恰当的模型 (一维抑或二维, 二维抑或三维) 而对问题过度简化; 使用了不恰当的输入数据, 缺乏适合的数据率定模型; 不熟悉开发模型时所用水动力学/泥沙输运方程的局限性, 以及源程序中求解控制方

程的数值方法近似而引起的计算误差 (边界条件问题或离散时产生的截断误差). 最后一个原因超出了本文讨论的范围, 在计算流体力学课本中可找到减小计算误差的技术 (例如, Chaudhry[80], Anderson[81] , Tannehill 等 [82]). 然而, 水动力学方程和泥沙方程都包括了这些计算误差.

在许多实际应用中, 内在的局限性使得模型难以实现对一个过程准确的模拟, 而与数据输入和模型率定无关. 对此, 涡黏性模型可作为一个说明, 此模型常用于求解包括一定程度经验关系在内的湍流动力学控制方程中. 对泥沙输运模型来说问题更为严重, 它极大地依赖于试验和现场信息, 而其公式则是高度经验性的. 因此, 在目前阶段, 还没有可靠和全面的理论公式能描述水沙两相流.

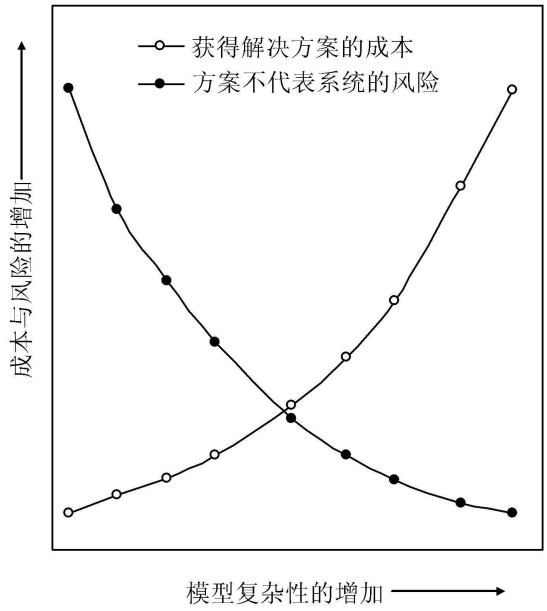
因此, Dawdy 和 Vanoni[83] 在对一些可用的一维水动力泥沙输运模型的验证中, 得出大部分动床模型不能产生完全令人满意的结果的结论, 这毫不奇怪. 这篇论文注意到, 大多数一维模型假定存在相应于泥沙输运的平衡阶段, 并且泥沙的挟带是确定性的而不是随机的过程. 然而, 对于二维和三维水动力学/泥沙输运模型通常在确定河底附近参考浓度和模拟由于湍动产生的泥沙扩散项时遇到了一些问题. 而且, 在使用多维模型时, 确定对流扩散方程中的源项及泥沙运动对近床面湍流特性的影响时也会遇到困难.

在接下来的部分里, 作者给模型使用者提供一些关于模型选择的建议, 同时, 也强调了改进现存水动力泥沙输运模型需要进一步研究的问题.

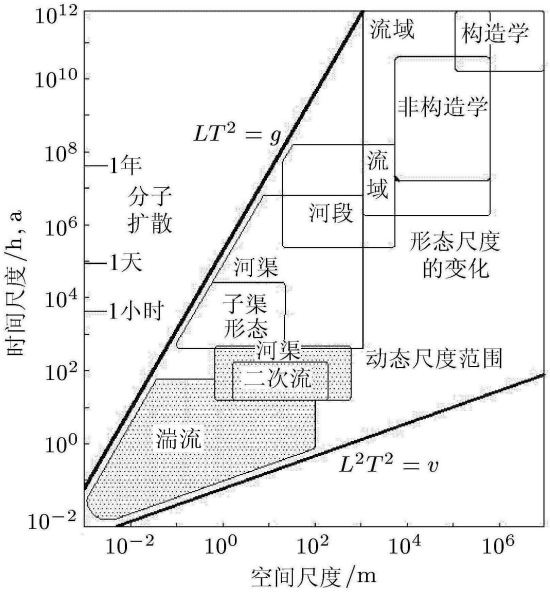
### 3.1 模型选择

必须接受对泥沙输运模型进行一定程度简化是为了计算上可行. 简化模型会导致得不到可靠结果的风险, 然而增加模型的复杂性使得描述问题的方程复杂化, 导致输入数据的准备、模型率定和验证的代价也增加. Overton 和 Meadows[84] 及 Simons 和 Simons[85] 讨论了复杂性和成本之间的权衡关系, 如图 1(a) 所示. 模型使用者通常面临的一个实际问题是选择适当维数的模型.

尽管这个问题不存在确定的答案, 用户仍需遵守一些最基本的规则. 一般来说, 选择的模型应该保留与具体问题相关的所有水力及泥沙要素项. 另外, 图 1(b) 给出了对不同时间和空间尺度过程的模拟指南 [86]. 如图 1(b) 所示, 时间尺度和长度尺度存在直接的相关性. 流域或河系形态学尺度 (长度尺度大于 $10^4$ m) 的变化经常以一年或更长时间为周期. 因此, 一维或二维模型足以模拟其变化. 然而, 动力学尺度的过程往往发生在像河段和泥沙粒径尺度这样小的长度尺度中, 这些过程的参照时间尺度可以从几秒到一小时. 图 1(b) 意味着, 对于河段或建筑物周围流动的模拟, 湍动的作用是很重要的. 因此, 三维模型用来模拟小尺度的流动, 在此需要湍动微观结构的详细图像. 上述认识与实际情况是一致的, 用三维模型模拟流域尺度的过程是不现实的, 目前它还只是一个昂贵的尝试.




(a) 模型复杂性权衡图 [84]




(b) 时间和空间尺度的图解 [86]

图 1 控制模型选择的因素

### 3.2 模型的输入和率定

模型的输入和率定对现场数据产生了新的要求. 引出以下问题: 这些数据是否存在？或者这些数据能在限定的时间和费用内收集到吗？虽然这是一个务实的问题, 但是以下的讨论将有助于产生适当的回应. 泥沙输运是水利工程师遇到的最重要和最困难的输运过程之一. 虽然这个课题很重要, 但是在所需信息与可得信息之间, 可能比其它实际工程水力学领域存在更大的差距. 传统采用点或断面对河床高程、水位、粒径级配、河床形态、速度、剪应力分布的量测方法仅适用于有限的时间和空间分辨率, 阻碍了对模型进行充分的率定和验证. 例如, 在动床河流环境下, 采用声学多普勒测速仪 (acoustic Doppler velocimeter, ADV) 或声学多普勒流速剖面仪 (acoustic Doppler current profiler, ADCP) 测量的点或横断面数据, 可能不足以进行模型的率定和验证, 因为流动在探测断面上的分布因床面形态的传播而随时变化. 而且, 基于有限空间的数据, 对动床模型进行率定和验证是有问题的, 尤其是在动态移动的环境下. 迄今为止, 对于那些能由静态条件表达的环境, 传统的测量方法是足够的. 不过, 近来河流或泥沙测量传感器技术的发展, 可能缓减涉及模型数据输入、构建、率定和验证的某些局限.

另一需要进一步研究的重要问题是缺乏测量和模拟之间的共生关系, 且与模型率定、验证和网格细化相关. 未来探索的新功能是应用能动态地接受在线现场数据和测量的模型, 并对测量实施控制. 这种模拟和测量之间的协同和共生反馈控制链是一个新的技术方向, 开创了河流/河口模拟的新领域, 有利于捕获突发或灾难性事件. 由于传统的测量手段得到的数据是有限的, 此控制循环目前还不能用于模拟自然的流动. 因此, 许多模拟工作是在批模式下进行的, 即一个事件的模拟基于一套静态的流场数据. 例如, 在认为来自诸如道路、河漫滩及其他扰动源的陆地泥沙输入是一个定值的前提下, 实施对水动力学及泥沙输移的模拟, 预测河流形态动力学的变化及其对水生生物的影响. 因此, 就无法考虑由于陆地环境时空变化而存在于系统中的扰动. 近来传感器技术的发展可以弥补模拟和测量需求间的差距. 而且, 河流/河口工程界必须接受传感器和模型的共同存在, 来确保足够的模型率定和验证. 这样也只有这样, 才能对发生在动力环境下的模型实现充分的率定和验证.

另一个与动床模型和传感器间共生关系密切关联的问题是网格的细化及网格的灵敏度. 这可以引出一些问题, 例如, 网格无关试验必要和现实吗？一个粗糙的网格将导致错误的结果吗？捕获湍流分辨尺度的最佳网格大小是多少？这些问题没有通用的答案. 对于给定的问题, 模拟流动和泥沙动力学采用不同的网格细化标准可能产生同样合理的动床响应. 最后, 必须依靠对良好工程判断的众所周知的概念.

自从 20 世纪 80 年代初以来, 一维模型大量应用于模拟大空间尺度 (百公里量级) 长时间周期 (数十年量级) 的过程. 然而, 近来计算能力的提高, 促进了在自然环境下使用二维或三维模型模拟流动/泥沙输运过程及相关污染物的归趋问题. 改进的计算技巧, 极大地减少了对计算的需求, 同时允许更好的细化网格. 在一个计算技术和传感器技术飞速提高的时代, 随着计算流体力学和动床动力学的发展, 我们大家为将来应用多维模型到工程实践中做好准备势在必行. 无疑, 多维模型, 尤其是三维模型, 最接近发生在水道中复杂的过程, 预料它们会成为不久将来的模型.

### 3.3 模型的局限性

水动力学和泥沙输运模型之间在理论基础和性能上存在不匹配. 水动力学模块与泥沙输运模块间存在差异, 是因为在过去的 20 多年里, 与泥沙输运的基础理论相比, 水动力学基本原理、湍流理论基础及其模型已经确立 (例如, Tannehill 等 [82] ; Raudkivi[87] ; Parker 等 [88]; Rodi [3]). 湍流的建模可能是水流动力学方程中最薄弱的环节. 尽管 RANS 模型在计算上很有效, 但是从求解方程中平均掉了所有的湍流脉动, 由于方程平均导致的信息损失, 该模型被批评为 “预后” 而非 “预测” 模型.

原则上 DNS 和 LES 都能更好地适用于模拟复杂湍流. DNS 需要大量的计算资源, 因此它不是一个可用于普通工程问题的方法 [3]. 鉴于此方法限制于低雷诺数流动, 在研究层流到湍流的过度时, DNS 可能是一个有价值的研究方法.

相反, LES 可被应用于低雷诺数及高雷诺数的

情形. 对高雷诺数流动, LES 能在给定的网格上, 通过采用三维非恒定的 N-S 方程, 捕获到大尺度的湍动结构 (漩涡). 认为是控制河床动量和质量交换的小尺度相干结构不能直接采用 LES 求解, 必须引入专门的近壁处理来考虑小尺度结构. 尽管 LES 模型可能有局限性, 特别是在高雷诺数的情况下, 但是对于模拟复杂的三维流动, LES 是目前可利用的最先进的建模工具 [89]. 虽然如此, DNS 和 LES 领域取得的进展, 已允许对建筑物周围的复杂湍流, 诸如水坝鱼道中的流动, 丁坝绕流, 桥墩建筑物的绕流, 进行切实的预测, (例如, Lai 等 [90]).

泥沙输运过程的模拟仍然需要深入的研究, 因为泥沙输运不仅受流动随机性的控制, 而且受地形和床面形状不规则性的控制 (例如, Nino 和 Garcia[91]; Papanicolaou 等 [92]). 由于这些因素, 迄今为止泥沙输运模型并没有像水利工程师们所希望的那么通用. 大多数泥沙输运模型所表现的一些局限性可概括如下:

一项假定是泥沙挟带不是由河床附近的湍流特性激发的, 而是由床底净剪应力项 $\tau - \tau_0$ 引起. 在大多数的挟沙公式中, 剪应力 $\tau$ 是在均匀流假定下确定的 [93,94]. 目前的研究已经表明, 湍流扫射、向外的相互作用及猝发是泥沙挟带主要的触发机理 [92].

泥沙输运模型中 (如床底净切应力模型, 沉速模型), 传统方法一直是采用单一特征粒径计算输沙率, 比如中值粒径 (median)[87]. 因为这种方法不考虑不同尺寸粒径 (或密度) 泥沙颗粒不同的输运过程, 当河床表层粒径呈双峰或多峰分布时, 有可能高估或低估个别部分的输沙率 [95~97]. 而且, 大多数的多维模型在一个计算时间步长内 (在一些情况下, 甚至一系列时间步长内), 采用完全非耦合或半耦合的算法来处理流动和泥沙传输过程, 这样, 只能近似考虑河床高程和表面床沙粒径级配改变对流动的影响 (例如, Tomas 和 McAnally [34]; Onishi 和 Trent [98]).

认识到特定粒径大小或特定密度的泥沙颗粒能以不同速率输运的事实, 导致了能预测多分布输运率公式的开发 [87]. 已发展的表达粒子输移速度的公式里 (例如, Sekine 和 Kikkawa [99]; Jain[100]; Papanicolaou 等 [101]; Ferguson 等 [102]; Parker 等 [103], Francalanci 和 Solari [104]) , 规定了不同粒径颗粒的停滞和运动时间及不同部分泥沙运动的延滞系数. 这些公式允许不同粒径的粒子以不同速度运动, 将它们包含到未来的泥沙输运模型中有可能提高模型的预测能力.

将离散和扩散系数分别处理成内外变量, 也就是摩擦速度、水深平均速度、渠道宽度、平均水深的函数是有局限性的. 研究表明, 当渠道收缩或扩大, 或在淹没及非淹没障碍物 (水工建筑物) 附近, 空间平均的内外量可能无法很好地近似流动的离散过程. 此外, 也没有评价相对淹没度对离散系数估算的作用 [105].

大多数情况下, 对流扩散方程的源项不能反映来自河岸土壤的贡献, 也不能反映来自陆上山坡及河漫滩的贡献 [106]. 力图把来自山坡及河滩的泥沙与河流内的过程联系起来, 对于减小现有泥沙输运模型的预测误差至关重要. Collins 等 [107], Fox 等 [108,109], Toda 等 [106] 和其他一些人的研究揭示需要采用诸如激光雷达、生物地球化学过程示踪剂及遥感等新技术来加强山坡、河漫滩及流动过程之间的关联.

需要对表示水流 - 泥沙相互作用过程的公式进一步的研究 [110]. 近来, 受其他领域中两相流模型研究进展的启发, 人们在尝试将水沙的相互作用表示成通用的数学模型 [111~114]. 两相流方法的基本思想 (例如, Villaret 和 Davies [115]; Ni 等 [116]; Cao 等 [117]; Greimann 等 [118]) 是对两相形成各自的守恒控制方程, 它包括确定相间相互作用的项, 诸如相间作用的应力张量或界面的动量传输项.

然而, 尽管两相流方法看上去很有发展潜力, 但是它的应用, 甚至水沙问题控制方程的研究仍然处于起步阶段. 其他领域里往往被忽略的控制方程中的某些项, 在水沙研究领域可能需要一个完全不同的处理. 假定水流和泥沙颗粒之间的切应力远小于流体质点之间的湍流切应力, 该作用力经常被忽略; 假定泥沙颗粒互相不接触, 泥沙颗粒之间的相互作用力也可被忽略. 这两种假定在高含沙量的情况下是成问题的, 尤其是河床附近. 这可以解释在河床附近区域使用两相流方法时存在的挥之不去的疑虑. 而且, 两相流控制方程中的某些项, 例如界面动量传输, 需要额外的模型来使系统封闭. 这样的模化必须基于详细的湍流知识, 需要一些目前试验无法获取的数据. 最后, 由于通

常需要长期的模拟, 实际泥沙问题两相流解法的 CPU 耗时很可能是不允许的, 即使在未来的一定时期内也是如此.

在研究泥沙输运的同时, 也出现了诸如人工神经网络模糊逻辑, 及其它一些相关的模化方式 [119]. 尤其是在率定传统泥沙输运模型可用数据极少的情形下, 这些方法提供了一个替代的泥沙输运模化的方法.

未来的研究不仅应集中在前述模型的局限性上, 而且还要关注其它的交叉问题, 诸如协调不同的时间和空间尺度, 提高动态模拟河床演化及床底和水体间泥沙交换过程的能力. 而且, 需要进一步研究网格细化和网格灵敏度的问题, 并需要大量数据进行动床模型的率定和验证.

**致　谢:**　作者要感谢下列人员给予的指导、建议和帮助: 爱荷华大学的 Forrest Holly 教授; 南卡罗来那大学的 Rick Luettich 教授; 卡尔斯路大学的 Wolfgang Rodi 教授; 代尔夫特水力学研究所的 Leo van Rijn 和 Dirk-Jan Walstra 教授; 挪威科学技术大学的 Nils Olsen 教授; 水生生态系统影响研究组的 Bommanna Krishnappan 博士; 索格利公司/LHF 的 Pierre Lang; 丹麦水力学研究所 Charles Kirsty, Patrick Delaney 和 Karen Edelvang 组成的团队; ECOMSED 团队.

## 参 考 文 献

1 de Vries M. Application of physical and mathematical models for river problems. Pub No 12, Delft Hydraulics Laboratory, 1973

2 Fan S S. Twelve selected computer stream sedimentation models developed in the United States. US Interagency Subcommittee Rep on Sedimentation. Federal Energy Regulatory Commission, Washington DC, 1988

3 Rodi W. DNS and LES of some engineering flows. *Fluid Dyn Res*, 2006, 38: 145∼173

4 Nicollet G. River modeling. In: Martins R ed. Recent Advances in Hydraulic Physical Modeling—Series A: Applied Science. Kluwer Academic Publishers, 1988

5 Nakato T. Tests of selected sediment-transport formulas. *J Hydraul Eng*, 1989, 116(3): 362∼379

6 Onishi Y. Sediment transport models and their testing. In: Chaudhry M H, Mays L W eds. Computer Modeling of Free-Surface and Pressurized Flows. US Government, Washington DC, 1994. 281∼312

7 Przedwojski B, Blazejeweki R, Pilarczyk K W. River training techniques: Fundamentals, design and applications. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1995

8 Spasojevic M, Holly F M. Field data and 3D mobile-bed modeling: help or hindrance? In: Proc 4th Int Conf on Hydroinformatics, Iowa, 2000

9 The ASCE Sedimentation Engineering Manual. No 110, 2007

10 Krishnappan B G. User's manual: Unsteady, non-uniform, mobile boundary flow model—MOBED. Hydraulic Division, National Water Research Institute, CCIW, Burlington, Ontario, 1981

11 Karim M F, Kennedy J F. Ialluvial: A commuter based flow and sediment routing for alluvial streams and its application to the Missouri River. Rep No 250, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ of Iowa, Iowa City, Iowa, 1982

12 Holly F M, Yang J C, Schovarz P, et al. Charima: Numerical simulation of unsteady water and sediment movements in multiply connected networks of mobile-bed channels. Report No 343, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ of Iowa, Iowa City, Iowa, 1990

13 Holly F M, Rahuel J L. New numerical/physical framework for mobile-bed modeling. Part 1: numerical and physical principles. *J Hydraul Eng*, 1990, 28(4): 401∼416

14 Papanicolaou A, Bdour A, Wicklein E. A numerical model for the study of sediment transport in steep mountain streams. *Journal Hydraulic Resources*, 2004, 42(4): 357∼366

15 Thomas W A, Prashum A I. Mathematical model of scour and deposition. *J Hydr Div*, 1977, 110(11): 1613∼1641

16 Chang H H. Modeling of river channel changes. *J Hydraul Eng*, 1984, 110(2): 157∼172

17 Molinas A, Yang J C. Computer program user's manual for GSTARS. US Department of Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Research Center, Washington DC, 1986

18 Runkel R L, Broshears R E. OTIS: One-dimensional transport with inflow and storage: A solute transport model for small streams. CADSWES Technical Rep 91-01, Univ of Colorado, Boulder, Colo, 1991

19 Hamrick J M. EFDC1D: A One dimensional hydrodynamic and sediment transport model for river and stream networks, model theory, and users' guide. Technical Rep, US EPA National Exposure Research Laboratory, Athens, Ga and US EPA Office of Science and Technology, Washington DC, 2001

20 Krishnappan B G. Comparison of MOBED and HEC-6 river flow models. *Can J Civ Eng*, 1985, 12: 464∼471

21 US Department of Interior, Bureau of Reclamation. Sediment analysis and modeling of the river erosion alternative. Elwha Technical Series PN-95-9, Pacific Northwest Region, Boise, Idaho, 1996

22 Karim M F. IALLUVIAL:Analysis of sediment continuity and application to the Missouri River. Rep No 292, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ of Iowa, Iowa City, Iowa, 1985

23 Chang H H. Water and sediment routing through curved

channels. *J Hydraul Eng*, 1985, 111(4): 644∼658

24 Yang C T, Simoes F J. Users' manual for GSTARS 2.1 (Generalized stream tube model for alluvial river simulation version 2. 1). Technical Service Center, US Bureau of Reclamation, Denver, 2000

25 Otto A J. Numerical modeling of long term effect of rehabilitation measures on bedload transport. In: Proc 28th IAHR Congress, Hydraulic Engineering for Sustainable Water—Resources Management at the Turn of the Millennium, IAHR, 1999

26 Belleudy P. 100 years of Danube morphology with SEDICOUP. In: 5th Int Symp on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany, 1992

27 Bencala K E, Walters R A. Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream: A transient storage model. *Water Resour Res*, 1983, 19(3): 718∼724

28 Laenen A, Risley J C. Precipitation-runoff and streamflow-routing model for the Willamette River Basin, Oregon. Water Resour Investigations Report 95-4284, US Geological Survey, Denver, 1997

29 Schock K, Zhong J, Swarner B, et al. Simulating water quality in the Duwamish Estuary and Elliott Bay: Comparing effects of CSOs and other sources. In: Proc 4th Puget Sound Research Conf. Seattle, Wash, 1998

30 USEPA. Hydrodynamic and water quality model of Christina River Basin. Final Rep, US Environmental Protection Agency, Region III, Philadelphia, Pa, 2000

31 Papanicolaou A, Elhakeem M E, Sanford J T. A hydrologic and morphologic analysis of the Black Lake system. Rep Submitted to Chignik Regional Aquaculture Association, Bellingham, Wash, 2006

32 Onishi Y, Wise S E. SERATRA: User's manual for the instream sediment-contaminant transport model. Technical Rep. No. PB-83-122739, Pacific Northwest Laboratory, Battelle-Northwest, Richland, Wash, 1982

33 van Rijn L C, Tan G L. Sutrench model: Two-dimensional vertical mathematical model for sedimentation in dredged channels and trenches by currents and waves. Rijskwaterstaat communications, No 41, 1985

34 Thomas W A, McAnally W H. Users manual for the generalized computer program system open-channel flow and sedimentation— TABS-2. Main Text, Instruction Rep. HL-85-1, Waterways Experiment Station, U. S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss, 1985

35 Spasojevic M, Holly F M. MOBED2: Numerical simulation of two-dimensional mobile-bed processes. Technical Report No. 344, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ of Iowa, Iowa City, Iowa, 1990

36 Luettich R A, Westerink J J, Scheffner N W. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries: Report 1, theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Technical Rep DRP-92-6, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, 1992

37 Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 short description. Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark. 1993

38 Bosboom J, Aarninkhof S G, Reniers J M, et al. UNIBEST TC-2. 0 model: Overview of formulations. Rep. H2305-42, Delft Hydraulics, The Netherlands, 1997

39 Lee H Y, Hsieh H M, Yang J C, et al. Quasi–two-dimensional simulation of scour and deposition in alluvial channels. *J Hydraul Eng*, 1997, 123(7): 600∼609

40 Minh Duc B, Wenka T, Rodi W. Depth-average numerical modeling of flow and sediment transport in the Elbe River. In: Proc 3rd Int Conf on Hydroscience and Eng, Berlin, 1998

41 Chang H H. Generalized computer program: Users' manual for FLUVIAL-12: Mathematical model for erodible channels. San Diego, 1998

42 Walstra D J, van Rijn L C, Aarninkhof S G. Sand transport at the lower shore face of the Dutch coast. Technical Rep. Z2378, Delft Institute of Hydraulics, The Netherlands, 1998

43 Jia Y, Wang S S. Numerical model for channel flow and morphological change studies. *J Hydraul Eng,* 1999, 125(9): 924∼933

44 Yalin M S. Mechanics of Sediment Transport. UK: Pergamon Press, 1972

45 van Rijn L C. Principles of Sediment Transport in Rivers Estuaries and Coastal Seas. The Netherlands: Aqua Publications, 1993

46 Walters W H, Ecker R M, Onishi Y. Sediment and radionuclide transport in rivers, Phase 2: Field sampling program for Cattaraugus and Buttermilk Creeks, New York. Technical Rep. No. PNL-3117, Vol. 2, Pacific Northwest Lab, Richland, Wash, 1982

47 Voitsekhovitch O V, Zheleznyak M J, Onishi Y. Chernobyl nuclear accident hydrologic analysis and emergency evaluation of radionuclide distributions in the Dnieper River, Ukraine, during the 1993 summer flood. Technical Rep. No. PNL-9980, Pacific North-west Lab, Richland, Wash, 1994

48 Niyyati M F, Maraghei A. Sediment transport and coastline development along the Caspian Sea; Bandar Nowshahr area. The changing coast, EUROCOAST, Portugal, 2002

49 Spasojevic M, Holly F M. 2-D bed evolution in natural watercourses—new simulation approach. *J Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng*, 1990, 116(4): 425∼443

50 Edge B L. In-Situ containment and treatment: Engineering cap integrity and reactivity. Proposal Submitted to the EPA by HSRC/S&SW, Texas A&M Univ, 2004

51 Beck J et al. FLAMOR—Flood analysis and mitigation on the Orlice River. Report No. AV0Z2060917, école Polytechnique Fédérale de Laussane, Lausannein French, 2003

52 Chang H H. Test and calibration of FLUVIAL-12 model using data from the San Dieguito River. Rep Prepared for Southern California Edison Company, 1994

53 Chang H H, Harrison L, Lee W, et al. Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs. *J Hydraul Eng*, 1996, 122(7): 381∼388

54 Sloff C J. Innovation 2D river-modeling instruments: Delft2D-Rivers. Delft Hydraulics, The Netherlands, 2004

55 Wu W, Shields F D, Bennett S J, et al. A depth-averaged 2-D model for flow, sediment transport and bed topography in curved channels with riparian vegetation. *Water Resour Res*, 2005, 41: 15

56 Gessler D, Hall B, Spasojevic M, et al. Application of 3D mobile bed, hydrodynamics model. *J Hydraul Eng*, 1999, 125(7): 737∼749

57 Wu W, Rodi W, Wenka T. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *J Hydraul Eng*, 2000, 126(1): 4∼15

58 Ruther N, Olsen N R. Three-dimensional modeling of sediment transport in a narrow 90° channel bend. *J Hydraul Eng*, 2005, 131(10): 917∼920

59 Blumberg A F, Mellor G. L. A description of a three- dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps N., ed. Three-Dimensional Coastal Ocean Models. *Coastal and Estuarine Sciences American Geophysics Union*, 1987, 4: 1∼16

60 King I P. A finite element model for three dimensional hydrodynamic systems. Rep to Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss, 1988

61 Bierman V J, et al. Development and validation of an integrated exposure model for toxic chemicals in Green Bay, Lake Michigan. Rep for USEPA Large Lakes and Rivers Research Branch, Environmental Research Laboratory, Duluth, Minn, 1992

62 Hamrick J H. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. Special Rep. No. 317, Applied Marine Science and Ocean Engineering, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, Va, 1992

63 Song Y T, Haidvogel D. A semi-implicit primitive equation ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *J Comput Phys*, 1994, 115: 228∼244

64 Spasojevic M, Holly F M. Three-dimensional numerical simulation of mobile-bed hydrodynamics. Contract Rep HL-94-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, 1994

65 Olsen N R. SSIIM: A three-dimensional numerical model for simulation of water and sediment flow. HYDROSOFT 94, Porto Carras, Greece, 1994

66 Jacobsen F, Rasmussen E B. MIKE 3 MT: A3-dimensional mud transport model. Technical Rep DG-12 to the Commission of the European Communities, 1997

67 Landsberg A, Chtchelkanova A, Lind C, et al. Fast3D User and Programmer Reference Manual, 1998

68 Delft Hydraulics. Delft 3D Users' Manual. The Netherlands: Delft Hydraulics, 1999

69 Hervouet J M, Bates P. The TELEMAC modeling system. *Hydrolog Process*, 2000, 14: 1∼3

70 Zeng J, Constantinescu G. , Weber L. A fully 3D nonhydrostatic model for prediction of flow, sediment transport and bed morphology in open channels. In: 31st Int Association Hydraulic Research Congress, Seoul, Korea, 2005

71 HydroQual Inc. Development and application of a modeling framework to evaluate hurricane impacts on surficial mercury concentrations in Lavaca Bay. HydroQual Inc, Mahwah, New Jersey, 1998

72 Admass M. 3-D numerical modeling of flow and sediment transport in rivers. LIC 2028, KTH Land and Water Resources Engineering, 2005

73 Tetra Tech. Los Angeles and Long Beach Harbor complex framework for calculating TMDLs. Tetra Tech, San Diego, 2004

74 Velissariou P, Velissariou V, Guo Y, et al. A multi size, multi source formulation for determining impacts of sediments on near-shore sensitive sites. In: Spaulding M L, Butler H L, eds. Proc 6th Int Conf of Estuarine and coastal modeling, 1999

75 Olsen N R. Three-dimensional CFD modeling of self-forming meandering channel. *J Hydraul Eng*, 2003, 129(5): 366∼372

76 Odgaard A J, Bergs M A. Flow processes in a curved alluvial channel. *Water Resour Res*, 1988, 24(1): 45∼56

77 Pullen J, Boris J P, Young T, et al. A comparison of contaminant plume statistics from a Gaussian puff and urban CFD model for two large cities. *Atmos Environ*, 2005, 39: 1049∼1068

78 Zielke W, Jankowski J A, Sundermann J, et al. Numerical modeling of sediment transport caused by deep sea mining. In: ISOPE Ocean Mining Symp, Tsukuba, Japan, 2005

79 Gu R, Chung S. A two-dimensional model for simulating the transport and fate of toxic chemicals in a stratified reservoir. *J Environ Qual*, 2003, 32: 620∼632

80 Chaudhry M H. Open Channel Flow. New Jersey: Prentice-Hall, 1993

81 Anderson J D. Computational Fluid Dynamics. New York: McGraw-Hill, 1995

82 Tannehill J C, Anderson D A, Pletcher R H. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, 2nd Ed. Philadelphia: Taylor & Francis Publisher, 1997

83 Dawdy D R, Vanoni V A. Modeling alluvial channels. *Water Resour Res*, 1986, 22(9): 71∼81

84 Overton D C, Meadows M E. Storm Water Modeling. New York: Academic, 1976

85 Simons R K, Simons D B. Modeling contaminated sediments. *Civil Engineering*, 1996, 669: 73∼75

86 Church M. Scales of process, modes of analysis: multiples scales in rivers. In: Proc 6th Int Gravel-Bed Rivers Conf, 2006

87 Raudkivi A J. Loose Boundary Hydraulics, 4th Ed. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1998

88 Parker G, Paola C, Leclair S. Probabilistic Exner sediment continuity equation for mixture with no active layer. *J Hydraul Eng*, 2000, 126(11): 818∼826

89 Mahesh K, Constantinescu G, Moin P. A numerical method for large eddy simulation in complex geometries. *J Comput Phys*, 2004, 197: 215∼240

90 Lai Y G. , Weber L J, Patel V C. Nonhydrostatic three-dimensional model for hydraulic flow simulation I: Formulation and verification. *J Hydraul Eng*, 2003, 129(3): 196∼205

91 Nino Y, Garcia M H. Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: Implications for sediment transport. *J Fluid Mech,* 1996, 326: 285∼319

92 Papanicolaou A, Diplas P, Balakrishnan M, et al. The role of near-bed turbulence structure in the inception of sediment motion. *J Eng Mech,* 2001, 127(3): 211∼219

93 Gomez B, Church M. An assessment of bed-load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resour Res*, 1989, 2(56): 1161∼1186

94 Almadeij J, Diplas P. Bed-load sediment transport in ephemeral and perennial gravel bed streams. *Eos*, 2005, 86(44): 429∼434

95 Holly F M, Usseglio-Polatera J M. Dispersion simulation in two-dimensional tidal flow. *J Hydraul Eng*, 1984, 110(7): 905∼926

96 Usseglio-Polatera J M, Cunge J A. Modeling of pollutant and suspended-sediment transport with argos modeling system. In: Proc Int Conf on Numerical and Hydraulic Modeling of Ports and Harbors, Birmingham, 1985

97 Pavlovic R N, Verga S, Misic B. 2-D depth averaged model for the calculations of sediment transport and river-bed deformation. In: Proc Int Symp on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, 1985

98 Onishi Y, Trent D S. Three-dimensional simulation of flow, salinity, sediment, and radionuclide movements in the Hudson River estuary. In: Proc ASCE Hydraul Div Conf, ASCE, New York, 1985. 1095∼1100

99 Sekine M, Kikkawa H. Mechanics of saltating grains II. *J Hydraul Eng*, 1992, 118(4): 536∼558

100 Jain S. Note on lag in bed-load discharge. *J Hydraul Eng*, 1992, 118(6): 904∼917

101 Papanicolaou A, Knapp D, Strom K. Bedload predictions by using the concept of particle velocity: Applications. In: Proc ASCE/EWRI and IAHR Int Conf on Hydraulic Measurements and Experimental Methods, ASCE, Reston, Va, 2002

102 Ferguson R I, Bloomer D J, Hoey T B, et al. Mobility of river tracer pebbles over different timescales. *Water Resour Res*, 2002, 38(5): 3. 1∼3. 9

103 Parker G, Seminara G, Solari L. Bedload at low Shields stress on arbitrarily sloping beds, alternative entrainment formulation. *Water Resour Res*, 2003, 39(7): 1183∼1191

104 Francalanci S, Solari L. Gravitational effects on bed load transport at low Shields stress: Experimental observations. *Water Resou. Res*, 1995, 43: W03424

105 Tayfur G, Singh V P. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial neural network. *J Hydraul Eng*, 2005, 131(11): 991∼1000

106 Toda Y, Ikeda S, Kumagai K, et al. Effects of flood flow on flood plain soil and riparian vegetation in gravel river. *J Hydraul Eng*, 2005, 131(11): 950∼960

107 Collins A L, Walling D E, Leeks G L. Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surf Processes Landforms*, 2005, 23: 31∼52

108 Fox J, Papanicolaou A, Abaci O. The impact of agricultural erosion processes upon N, C, and C/N signatures of eroded-soil. In: Int Symp IAHR, River, Coastal, and Estuarine Morpho dynamics, IAHR, Illinois, 2005. 1147

109 Fox J, Papanicolaou A, Kjos L. Eddy taxonomy around a submerged barb obstacle within a fixed rough bed: A novel classification methodology. *J Eng Mech*, 2005, 131(10): 1082∼1101

110 Lyn D A. Turbulence characteristics of sediment-laden flows in open channels. *J Hydraul Eng*, 1992, 118(7): 971∼988

111 Ishii M. Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow. Paris: Eyrolles, 1975

112 Drew D A. Mathematical modeling of two-phase flow. *Annu Rev Fluid Mech*, 1983, 15: 261∼291

113 Elghobashi S E. On predicting particle-laden turbulent flows. *Appl Sci Res*, 1994, 52: 309∼329

114 Crowe C T, Troutt T R, Chung J N. Numerical models for two-phase turbulent flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 1996, 28: 11∼43

115 Villaret C , Davies A C. Modeling sediment-turbulent flow interactions. *Appl Mech Rev*, 1995, 489: 601∼609

116 Ni H Q, Huang Z C, Zhou L X, et al. Numerical simulation of sedimentation using a two-fluid model of turbulent liquid solid flows. In: Chen, Hih, Lienau, Kund eds. Flow Modeling and Turbulence Measurements VI. Balkema Rotterdam, 1996. 781∼788

117 Cao Z X, Wei L Y, Xie J H. Sediment-laden flow in open channels from two-phase flow viewpoint. *J Hydraul Eng*, 1995, 121(10): 725∼735

118 Greimann B P, Muste M, Holly F M. Two-phase formulation of suspended sediment transport. *J Hydraul Eng*, 1999, 37(4): 479∼500

119 Bhattacharya B, Price R K, Solomatine D P. Machine learning approach to modeling sediment transport. *J Hydraul Eng*, 2007, 133(4): 440∼450

西安理工大学水利水电学院 李国栋, 叶小梅 译自

Sediment transport modeling review—
current and future developments.
*Journal of Hydraulic Engineering*,
2008, 134(1): 1∼14

西安理工大学水利水电学院 陈 刚 校

# SEDIMENT TRANSPORT MODELING REVIEW — CURRENT AND FUTURE DEVELOPMENTS*

Athanasios N.(Thanos) Papanicolaou[1,†] Mohamed Elhakeem[1,‡]
George Krallis[2] Shwet Prakash[2] John Edinger[3]

[1] Univ. of Iowa, IIHR-Hydroscience and Engineering, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Iowa City, IA 52241
[2] ERM Inc., Exton, PA
[3] Bryn Mawr College, Dept. of Geology

**Abstract** With the rapid developments in numerical methods for fluid mechanics, computational modeling has become an attractive tool for studying flow/sediment transport and associated pollutant fate processes in such different environments as rivers, lakes, and coastal areas, over the past three decades, a large number of computational hydrodynamic/sediment transport models have been developed. The article traces the developmental stages of current representative(1D,2D, and 3D)models and describes their main features, strengths, and limitations, and is intended as a first guide to readers interested in immersing themselves in modeling and at the same time sets the stage for discussing current limitations and future needs. The article provided model formulation, the spatial and temporal characteristics, the coupling/linkage of the hydrodynamic and sediment components, the model capabilities to handle unsteady flows, bed load and suspended load, sediment exchange processes, type of sediment (cohesive versus cohesion-less), and multi-fractional sediment transport. Some examples of the different model applications are summarized, the reader can use these case studies as a reference guide for model setup, calibration, and verification. The authors also attempt to provide an insight for model users about model choice, problem and way to improve model input and calibration. The article discussed model limitations such as simulating complex turbulent flows, sediment entrainment, multi-fractional transport rates, the treatment of the dispersion and diffusion coefficients, soil contributions from the bank or the hill slopes and floodplains, coupling between flow and sediment processes, and highlighted the future research needs for improving available hydrodynamic/sediment transport models. At last, the two-phase flow approach to formulate models of sediment-flow interaction and other cross-cutting issues are discussed and reviewed.

**Keywords** sediment transport, computational modeling, model choice, model calibration, model limitations, two-phase flow approach

* The project supported by Shanxi Provincial Project of Special Foundation of Key Disciplines. Abstract added by the translators.

† E-mail: apapanic@engineering.uiowa.edu; ‡melhakee@engineering.uiowa.edu