

悬移质垂线分布规律与影响因素研究

练继建¹, 吴峰¹, 刘昉¹, 姚焯²

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350;

2. 天津理工大学海洋能源与智能建设研究院, 天津 300384)

摘要: 针对传统扩散模型存在的不足, 引入掺混长度系数模型, 建立了悬移质垂线分布模型, 探究了不同因素对悬移质垂线分布的影响。结果表明: 当实际掺混长度系数小于常用的假设值 0.4 时, 采用假设值计算得出的含沙量结果偏大, 反之偏小; 含沙量增大会加剧颗粒间的相互作用, 含沙量垂线分布呈现“上小下大”的特征; 粒径越大, 泥沙沉速越大, 大量泥沙分布在近底处, 不易悬浮; 流速越大, 水流垂向紊动越强, 床面与水面间的含沙量梯度越小。

关键词: 悬移质垂线分布; 泥沙扩散系数; 有限掺混理论; 掺混长度系数; 泥沙群体沉速

中图分类号: TV142

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)02-0001-08

Study on vertical distribution law and influencing factors of suspended sediment//LIAN Jijian¹, WU Feng¹, LIU Fang¹, YAO Ye² (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Institute of Ocean Energy and Intelligent Construction, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: To address the deficiencies of traditional diffusion models, a mixing length coefficient model was introduced to establish a vertical distribution model of suspended sediment. The effects of different factors on the vertical distribution of suspended sediment were investigated. The results show that when the actual mixing length coefficient is smaller than the commonly assumed value of 0.4, the sediment concentration calculated using the assumed value is overestimated, and vice versa. An increase in sediment concentration intensifies particle interactions, and the vertical distribution of sediment concentration presents a characteristic of “smaller at the upper part and larger at the lower part”. Larger particle size results in greater sediment settling velocity, causing more sediment to accumulate near the bottom and making suspension more difficult. Higher flow velocity enhances vertical turbulence, reducing the sediment concentration gradient between the riverbed and the water surface.

Key words: suspended sediment vertical distribution; sediment diffusivity; finite mixing theory; mixing length coefficient; sediment group settling velocity

悬移质在水体中的垂线分布规律不仅反映了不同水流条件下的输运特征, 而且影响着水体的流动和泥沙的沉积^[1]。悬移质的分布特性与水流的动力过程密切相关, 在多因素影响的环境中, 悬移质的分布会呈现复杂的垂直梯度, 增大水体的动力黏度, 从而影响水体流速, 而流速的变化又会使部分泥沙下沉, 导致河道淤积。对于港口和沿海地区, 悬移质的沉积会导致航道淤积, 影响船舶的正常通航^[2]; 在河流中, 悬移质的沉积会抬高河床, 可能形成地上悬河^[3], 不仅影响河道稳定性, 还对流域治理、水资源管理和生命财产安全造成不利影响。为解决悬移

质沉积问题, 必须深入了解悬移质运动机理^[4], 明确悬移质垂线分布规律及影响因素。

悬移质垂线分布的研究主要集中在稳态条件下^[5-6]。传统扩散模型最基本的问题是确定扩散系数。最简单的情况是假设扩散系数为常数或经验化, 这存在一定的局限性。事实上, 扩散系数并非常数, 而是空间位置的函数^[7]。著名的 Rouse 公式中, 垂向扩散系数呈抛物线形式。相关学者进行了验证, 结果表明, Rouse 公式的结构是正确的^[8]。Rouse 公式通常用于计算稳态悬移质垂线分布^[9], 但其有一定的局限性^[10], 特别是使用该公式时, 水

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4200701); 云南省重点研发计划项目(202203AA080009-03)

作者简介: 练继建(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利水电工程安全与优化应用研究。E-mail: jilian@tju.edu.cn

通信作者: 刘昉(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程水力学研究。E-mail: fangliu@tju.edu.cn

面上的含沙量为零,而河床上含沙量却是无限的,明显与事实不符。Zhang 等^[11-12]利用两相浊水理论解决了这一问题,建立了含沙边界层理论的数学描述,并推导出含沙量对流扩散方程,得到了扩散系数的数学表达式,为 Rouse 公式计算床面含沙量过高问题提供了合理的解决方案。Nielsen 等^[13]在传统扩散模型中引入垂向紊动扩散效应修正项,构建了考虑颗粒间碰撞抑制作用的悬移质输运模型,该模型有效解决了 Rouse 公式在近床面高含沙量区的预测偏差过大问题,显著提升了沙纹床面非均匀流场中悬移质垂线分布的模拟精度。此外,传统扩散模型还存在难以刻画短时间尺度内的冲淤动态及进行复杂底床形态下的含沙量预测等问题。

综上所述,传统扩散模型的局限性在一定程度上得到了解决,其适用性和准确性也得到了提高,但仍存在一些不足。目前侧重于传统扩散模型误差分析的研究很少,缺乏对掺混长度系数 κ_s 等因素如何影响悬移质垂线分布规律的研究。本文利用有限掺混理论分析了传统扩散理论的不足,针对 κ_s 难以确定的问题,引入了 κ_s 模型,将其与泥沙群体沉速模型相结合,建立了水流作用下悬移质垂线分布模型,并研究了泥沙掺混长度系数、含沙量、泥沙粒径和流速对悬移质垂线分布的影响,以期为提高悬移质垂线分布预测的准确性及解决河道淤积问题提供理论支持。

1 有限掺混理论

普朗特将分子扩散运动研究扩展到湍流扩散分析中,引入了掺混长度的概念^[14]。分子扩散的掺混长度 l_c 非常小,通常被忽略。然而,考虑湍流混合时,水团(或微团)的掺混长度不能忽略。为了区分与分子运动相关的掺混长度, Nielsen 等^[13]提出了适用于湍流混合的有限掺混长度 l_m 概念。悬移质的垂线掺混过程如图 1 所示,图中 z 为距床面距离, c 为含沙量。

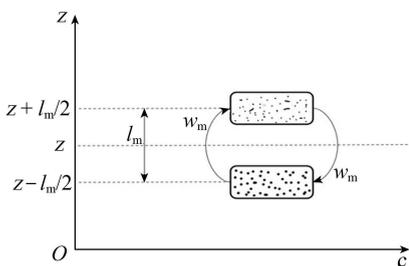


图 1 悬移质垂线掺混运动示意图

假设微团的垂线掺混速度 w_m 大小相同、方向相反,当一定体积的微团从 $z+l_m/2$ 运动至 $z-l_m/2$ 位置时,根据质量守恒定律,有相同体积的微团从 $z-$

$l_m/2$ 运动至 $z+l_m/2$ 位置,当两微团运动至 z 处时,单位时间内通过单位面积的垂直向上泥沙紊动扩散通量为

$$q_m = w_m [c(z - l_m/2) - c(z + l_m/2)] \quad (1)$$

依据扩散理论^[15],平衡状态下由泥沙垂线掺混运动产生的泥沙通量与由泥沙重力产生的泥沙通量相平衡,即:

$$q_m - w_s c = 0 \quad (2)$$

式中 w_s 为泥沙群体沉速。

在湍流中,水团(或微团)的运动表现出类似于分子运动的随机性。水流中各种性质的行为均与分子扩散行为相似。因此,依据 Fick 定律,将紊流中的泥沙扩散类比分子的扩散运动^[13]。单位时间内通过单位面积的垂直向上泥沙紊动扩散通量与含沙量梯度成正比,负号表示方向相反,即:

$$q_m = -\varepsilon_{\text{Fick}} \frac{dc}{dz} \quad (3)$$

式中 $\varepsilon_{\text{Fick}}$ 为满足 Fick 定律的扩散系数。

联立式(2)和式(3)构成了传统一维扩散方程:

$$-\varepsilon_{\text{Fick}} \frac{dc}{dz} - w_s c = 0 \quad (4)$$

Fick 定律一般用于分子扩散运动,应用于紊流中存在一定局限性。因此, Nielsen 等^[13]对式(1)进行了泰勒展开,即:

$$q_m = -w_m l_m \frac{dc}{dz} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{l_m^{2n-2}}{(2n-1)! 2^{(2n-2)}} \frac{d^{(2n-1)}c}{dc/dz} \right] = -w_m l_m \frac{dc}{dz} \left(1 + \frac{l_m^2}{24} \frac{d^3c/dz^3}{dc/dz} + \dots \right) \quad (5)$$

联立式(3)和式(5)可得扩散系数 ε 为

$$\varepsilon = w_m l_m \left(1 + \frac{l_m^2}{24} \frac{d^3c/dz^3}{dc/dz} + \dots \right) \quad (6)$$

式(5)中括号内的项可以理解为垂直尺度为 L_c 的含沙量指数分布的特殊情况^[13]。则含沙量垂线分布具有如下形式:

$$c = c(z_c) e^{-z/L_c} \quad (7)$$

式中: z_c 为参考点距床面距离,一般取 $z_c = 0.05h$ ^[16],其中 h 为水深; $c(z_c)$ 为底部参考含沙量。

由式(5)和式(7)可得:

$$q_m = -w_m l_m \frac{dc}{dz} \left[1 + \frac{1}{24} \left(\frac{l_m}{L_c} \right)^2 + \dots \right] \quad (8)$$

对比式(3)和式(8)可知,当 $l_m/L_c \rightarrow 0$ 时,两式在形式上才满足 Fick 定律,由此可见传统扩散模型和有限掺混理论下扩散模型在含沙量计算中可能产生较大误差。

联立式(2)和式(8)可得基于有限掺混理论的一维扩散方程:

$$-w_m l_m \frac{dc}{dz} \left[1 + \frac{1}{24} \left(\frac{l_m}{L_c} \right)^2 + \dots \right] - w_s c = 0 \quad (9)$$

对比式(4)和式(9)可知,含沙量不仅与掺混长度有关,还与掺混速度有关。

2 误差分析

为了明晰传统扩散模型可能带来的误差以及有限掺混理论下悬移质垂线分布与含沙量高阶导数的关系,假设水流条件为均匀紊流,则 l_m 、 w_m 为常数,求解式(9)的经典方法为将其线性化^[13],只保留括号中的第一项,得:

$$-w_m l_m \frac{dc}{dz} - w_s c = 0 \quad (10)$$

对比式(4)和式(10)可知,Fick定律下的扩散系数 $\varepsilon_{\text{Fick}}$ 为

$$\varepsilon_{\text{Fick}} = w_m l_m \quad (11)$$

式(6)进一步结合式(9)可得基于有限掺混理论的扩散系数 ε_{FMT} :

$$\varepsilon_{\text{FMT}} = \frac{w_s l_m}{2 \sinh^{-1} \left(\frac{w_s}{2w_m} \right)} = w_m l_m \left[1 + \frac{1}{24} \left(\frac{w_s}{w_m} \right)^2 + \dots \right] \quad (12)$$

扩散系数的取值将会影响悬移质垂线分布规律及数值误差。对比式(11)和式(12)可知,当 $w_s/w_m \rightarrow 0$ 时,适用 Fick 定律,扩散系数 $\varepsilon_{\text{Fick}} = w_m l_m$; 当 w_s/w_m 不趋近于 0 时,扩散系数 ε_{FMT} 如式(12)所示。因此通过比较两个扩散系数,表明采用 Fick 定律可能引起误差。图 2 为两个扩散系数的误差示意图。由图 2 可知,当 $w_s/w_m \leq 1$,即泥沙群体沉速小于或等于掺混速度时,两个扩散系数非常接近,适用 Fick 定律;而当 $w_s/w_m > 1$ 时,随着二者比值增大,扩散系数误差越大,悬移质垂线分布计算误差越大,不适用 Fick 定律。因此,为减少传统扩散模型引起的计算误差,本文基于有限掺混理论对水流作用下悬移质垂线分布规律及影响因素进行研究。

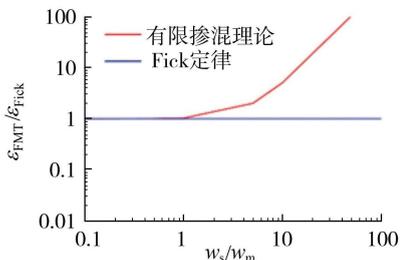


图 2 扩散系数误差示意图

3 悬移质垂线分布模型

本文在有限掺混理论的基础上,考虑了掺混长度和掺混速度对悬移质垂线分布的影响。通过对式(4)从参考高度 z_c 到坐标 z 积分^[17],得到悬移质垂线分布的计算方程:

$$c = c(z_c) \exp \left(- \int_{z_c}^z \frac{w_s}{\varepsilon_{\text{FMT}}} dz \right) \quad (13)$$

3.1 底部参考含沙量

由式(13)可知,要弄清悬移质垂线分布规律,必须了解床面附近的参考含沙量。Yao 等^[18]将含沙量与水动力条件和床料性质联系起来,扩展了公式对粉砂范围的适用性。即:

$$c(z_c) = \rho_s \beta_y (1 - p_{\text{clay}}) f_{\text{silt}} \frac{d_{50}}{z_c} \frac{\eta^{1.5}}{d_*} \quad (14)$$

其中

$$\beta_y = \begin{cases} 0.118 & d_* \leq 1 \\ 0.118 d_*^{-0.7} & 1 < d_* \leq 15 \\ 0.015 & d_* > 15 \end{cases}$$

$$f_{\text{silt}} = d_{\text{sand}}/d_{50}$$

$$d_* = d_{50} [(s-1)g/v^2]^{1/3} \quad s = \rho_s/\rho_0$$

$$\eta = (\tau' - \tau_c)/\tau_c \quad \tau' = \rho_s u_*^2 (1 - z_c/h)$$

式中: ρ_s 为泥沙密度; p_{clay} 为黏土质量分数; d_* 为无量纲泥沙粒径; g 为重力加速度; s 为相对密度; ρ_0 为清水密度; v 为运动黏度; d_{50} 为中值粒径; f_{silt} 为泥沙系数 ($d_{50} > d_{\text{sand}}$ 时, $f_{\text{silt}} = 1$); d_{sand} 为粉砂与沙的临界粒径,一般取 $d_{\text{sand}} = 62 \mu\text{m}$; η 为过量床面剪切应力; τ' 为时均有效剪切应力; τ_c 为临界起动剪切应力,通常采用 Shields 曲线确定^[19]; u_* 为摩阻流速。

3.2 泥沙群体沉速模型

悬移质沿垂线扩散受泥沙沉速影响较大。泥沙群体沉降与单颗粒沉降相比,水深平均含沙量为 c_v 的水体变化主要体现在以下几个方面^[20]:

a. 含沙水体的黏性增大,动力黏度由清水的 μ_0 变为 μ_s 。

b. 含沙水体的容重增加,导致泥沙颗粒的浮力增加。

c. 含沙量越大,水流向上的回流作用越强。单位体积含沙水体中,水流上升的体积 S_{vy} 为

$$S_{vy} = 1 - (1 + 2\delta_0/d_m)^3 c_v \quad (15)$$

式中: δ_0 为薄膜水厚度; d_m 为泥沙粒径。根据连续性定律,泥沙群体沉速为

$$w_s = \omega^* - \bar{u}_y = w_{s0} (\mu_0/\mu_s) (1 - c_v) S_{vy} \quad (16)$$

其中 $\omega^* = \frac{\rho_s g - \rho_0 g}{18\mu_s} d_m^2 (1 - c_v) = (\mu_0/\mu_s) (1 - c_v) w_{s0}$

$$\bar{u}_y = (1 - S_{vy})w_s/S_{vy} \quad \mu_s/\mu_0 = (1 - c_v/c_{vm}) - 2$$

$$c_{vm} = 0.91 - 0.2\ln(1/d_m) \quad w_{s0} = \frac{\rho_s g - \rho_0 g}{18\mu_0} d_m^2$$

式中： ω^* 为泥沙颗粒与水体的相对速度； \bar{u}_y 为水流的平均上升速度； c_{vm} 为极限含沙量； w_{s0} 为单颗粒泥沙沉速。

3.3 泥沙扩散系数

由式(12)可知,泥沙扩散系数除受泥沙群体沉速影响外,还受掺混长度和掺混速度的影响。

3.3.1 掺混长度

泥沙的掺混长度与清水的掺混长度有明显差异。这种差异被认为是定量的,而分布模式则被认为是一致的。根据 Kármán 的湍流相似假设^[7]和普朗特的掺混长度理论^[14]可知,泥沙掺混长度 l_s 为

$$l_s = 2\kappa_s h [(1 - z/h)^{1/2} - (1 - z/h)] \quad (17)$$

由于试验中泥沙掺混长度系数 κ_s 较难测定,通常假设其为 0.4。但是,通过该假设值(记为 κ'_s)计算得到的含沙量结果较差。为优化悬移质垂线分布模型,引入泥沙掺混长度系数模型^[21],即:

$$\kappa_s = r(\ln c_v - \ln 0.001) + \kappa_{s,001} \quad (18)$$

其中 $\kappa_{s,001} = 0.17152 + 0.0042d_m$

$$r = -0.0153 - 4.67 \times 10^{-4}d_m + 1.98 \times 10^{-6}d_m^2 - 3.63 \times 10^{-9}d_m^3$$

式中： $\kappa_{s,001}$ 为水深平均含沙量为 0.001 kg/m^3 时的泥沙掺混长度系数； r 为趋势线斜率。

3.3.2 掺混速度

根据明渠水流紊动强度分布公式^[22]可知,水流作用下挟沙水流的掺混速度为

$$w_m \approx \sqrt{\bar{v}'^2} = 1.27u_{*c} \exp(-z/h) \quad (19)$$

其中 $u_{*c} = \kappa_s u_m / [\ln(h/z_0) - 1]$

式中： u_m 为水深平均流速； u_{*c} 为水流摩阻流速； z_0 为流速为 0 时距床面的距离,一般 $z_0 = k_m/30$ (k_m 为床面粗糙度)； \bar{v}' 为水流垂线平均脉动流速。

综上所述,式(13)为基于有限掺混理论的悬移质垂线分布模型(以下简称为“本文模型”)。

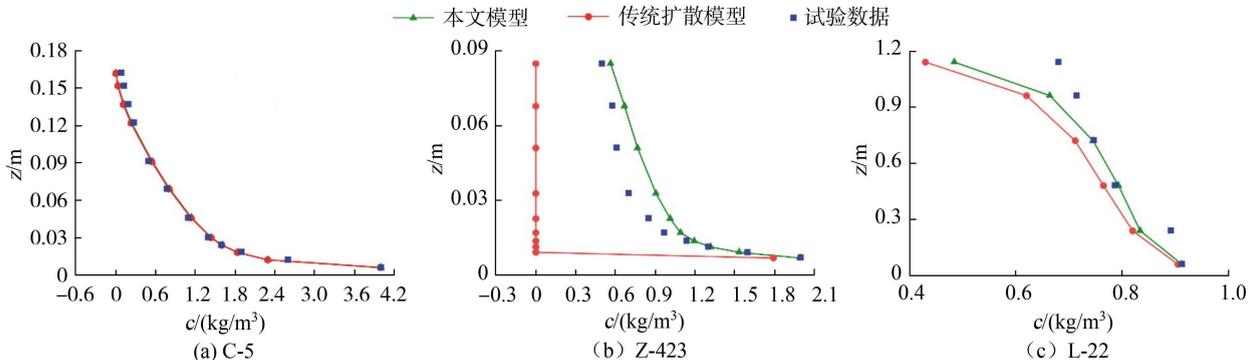


图3 不同模型计算结果与试验数据的误差验证

式(12)、(14)和(16)确定了模型中的扩散系数、参考含沙量、参考位置和泥沙群体沉速等参数。

4 模型验证

本文结合澜沧江勐省水文站^[23]、滨海港实测水文泥沙数据以及 Coleman^[24]、周家俞^[25]的水流泥沙试验数据对传统扩散模型存在的计算误差以及本文模型的适用性、准确性进行验证分析,具体试验及实测参数如表 1 所示。

表 1 试验基本参数

试验组次	h/m	d_m/mm	$u_{*c}/(m/s)$	$w_{s0}/(m/s)$	$T/^\circ C$
C-5 ^[24]	0.171	0.105	0.041	0.011	23.9
C-25 ^[24]	0.167	0.210	0.040	0.043	23.9
Z-423 ^[25]	0.113	0.064	0.033	0.004	25.0
Z-427 ^[25]	0.136	0.064	0.037	0.003	22.0
B-5E	5.000	0.150	0.620	0.018	14.7
L-22 ^[23]	1.200	0.100	0.081	0.009	23.0

注： T 为温度。

4.1 传统扩散模型计算误差验证

为了明晰传统扩散模型可能产生的误差,利用式(13)对 C-5、Z-423 和 L-22 这 3 组数据的含沙量进行了计算。其中沿水深方向各位置处的 w_s/w_m 如表 2 所示,验证结果如图 3 所示。

表 2 沿水深方向各位置处的 w_s/w_m

位置	w_s/w_m					
	C-5	C-25	Z-423	Z-427	B-5E	L-22
0.1h	0.05	1.04	134	98	0.025	0.031
0.2h	0.06	1.15	148	108	0.028	0.034
0.4h	0.07	1.41	181	132	0.034	0.042
0.6h	0.09	1.72	221	161	0.041	0.051
0.8h	0.11	2.11	270	197	0.051	0.063

结合表 2 和图 3 可知,C-5、L-22 组次沿水深各位置 w_s/w_m 均小于 1,适用 Fick 定律,因此传统扩散模型与实际数据相差不大,能较好地反映悬移质垂线分布规律,最小误差仅为 0.44%;从表 2 可知,Z-423 组次沿水深各位置 w_s/w_m 均大于 1,传统扩散模型的计算误差较大,不适用 Fick 定律,不能反映真实悬移质垂线分布特征,属于“高方差、高偏差”。

从整体上看,本文模型计算误差在3组数据验证中均属于“低方差、低偏差”;传统扩散模型计算误差在C-5、L-22组次中属于“低方差、低偏差”,但在Z-423组次中属于“高方差、高偏差”。因此本文模型体现了较好的适用性与准确性。

4.2 悬移质垂线分布模型验证

在以上3组数据验证的基础上,为了体现本文模型在不同水流条件下的普适性及准确性,利用式(13)对其余3组数据的含沙量进行计算,结果如图4所示。由图4可知,本文模型不论从悬移质垂线分布趋势上还是从数值上均能较好地反映悬移质垂线分布情况。C-25组次中,本文模型计算的最小误差为2.43%,最大误差为15.7%;Z-427组次体现了本文模型较好的适用性,最小误差仅为0.65%,而传统扩散模型计算误差较大;B-5E组次中,最小误差为0.05%,最大误差为89.7%,可能受波浪及大风天气影响较大,在近水面处产生较大误差。

综上所述,本文模型与实际数据无论是悬移质

垂线分布趋势还是数值上均保持较高的一致性,相较传统扩散模型有效避免了较大计算误差,体现了本文模型的普适性与准确性,因此本文模型能较好地反映不同水流条件下悬移质垂线分布情况。

5 计算结果与讨论

5.1 泥沙掺混长度系数的影响

本文引入了泥沙掺混长度系数模型,将假设值 κ'_s 以及由式(18)计算的 κ_s 分别代入式(13)中,计算得到含沙量垂线分布,在图5中分别用 κ'_s 、 κ_s 表示。

κ_s 的取值对悬移质垂线分布影响较大。C-5、Z-423、Z-427和L-22组次中,由式(18)计算的 κ_s 均小于0.4,相较于 κ'_s 的计算结果偏小。Z-427组次中 $\kappa_s=0.18$ 与 κ'_s 的计算误差较大, κ'_s 与试验数据的最大误差为62.1%, κ_s 的最大误差为21.1%;C-25和B-5E组次中,由式(18)计算的 κ_s 均大于0.4,相较于 κ'_s 的计算结果偏大。B-5E组次中, $\kappa_s=0.42$

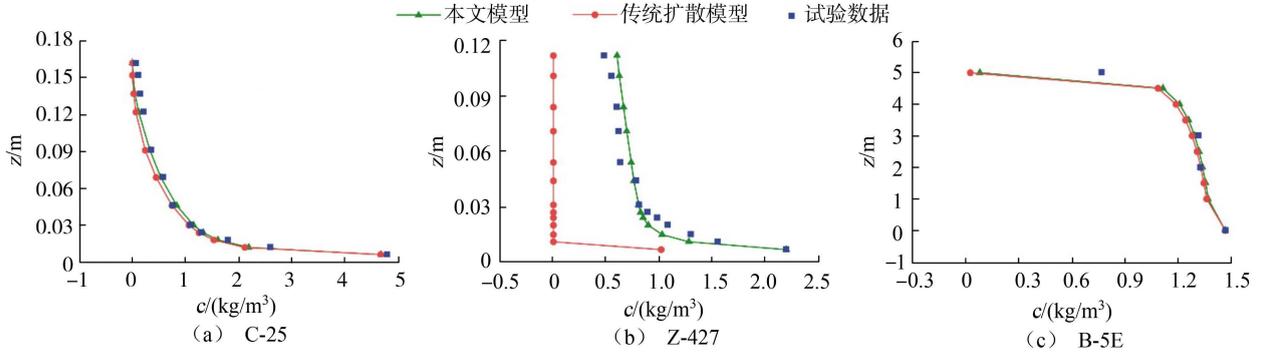


图4 不同模型计算结果与试验数据的比较

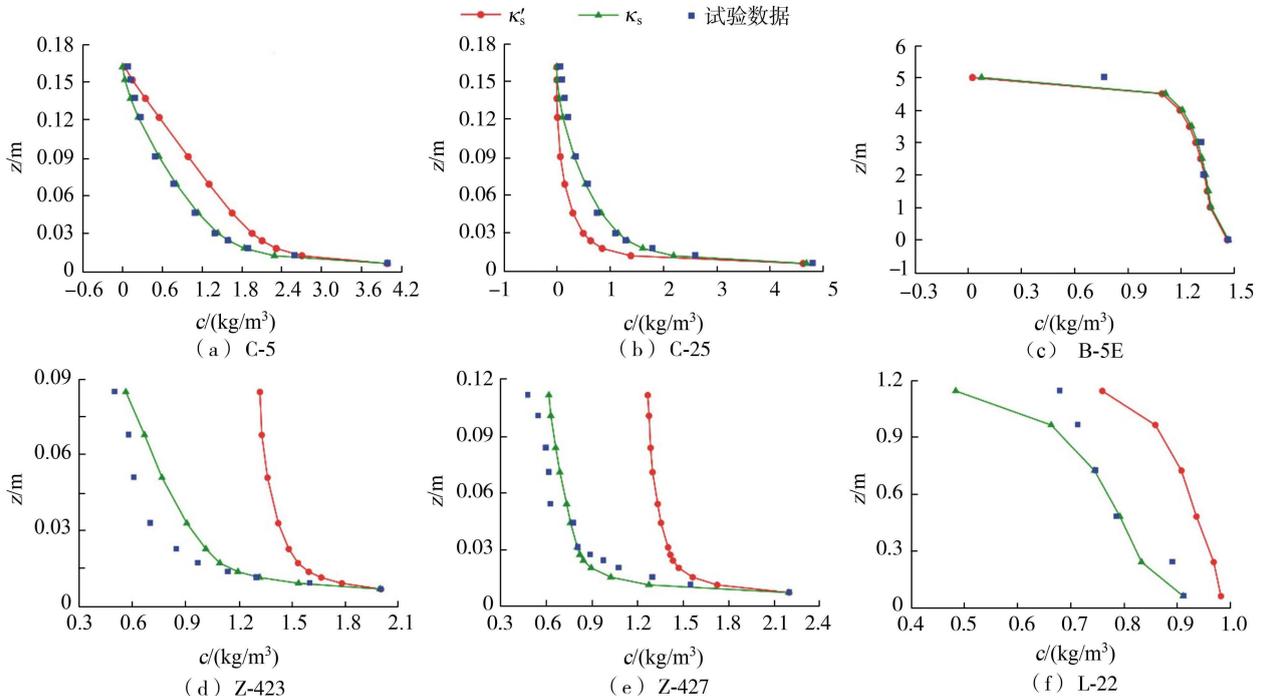


图5 泥沙掺混长度系数对悬移质垂线分布的影响

与 κ'_s 的计算误差较小, κ'_s 与试验数据最小误差为 0.52%, κ_s 的最小误差为 0.054%。综上可知, κ_s 的差值越大, κ_s 与 κ'_s 计算的含沙量差值越大, 假设条件下的计算结果与试验数据的误差也越大。泥沙掺混长度系数模型的引入减少了传统扩散模型中因假设所产生的计算误差, 提高了本文模型的计算精度。

5.2 含沙量的影响

不同天气及来流条件会造成水域含沙量不同。为探究水域含沙量对悬移质垂线分布的影响, 对 6 组数据在 $0.5c_v$ 、 c_v 、 $2c_v$ 水域含沙量下进行分析, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 悬移质垂线分布受水域含沙量影响较大, 含沙量增大加剧了颗粒间的相互作用, 从而抑制了泥沙的垂线掺混作用, 悬移质垂线分布呈现“上小下大”特征。B-5E 和 L-22 组次中, $z > 0.8h$ 时, 随着水域含沙量增大, 垂线含沙量变化速率增大, 水域含沙量为 $2c_v$ 时, 垂线含沙量变化分别为 94.5%、25.3%; C-5、C-25、Z-423、Z-427 组次中, 随着水域含沙量及水深增加, 垂线含沙量变化速率加快。水域含沙量为 $2c_v$ 时, 靠近床面含沙量变化速率分别为 0.546、0.866、0.472、0.492 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{mm})$ 。综上可知, 随着水域含沙量增大, 含沙量变化方差越大, 泥沙越不易悬浮。

5.3 泥沙粒径的影响

泥沙粒径不仅影响泥沙群体沉速, 还影响泥沙扩散系数。因此, 为探究泥沙粒径对悬移质垂线分布的影响, 对 6 组数据在 $0.5d_m$ 、 d_m 、 $2d_m$ 粒径下进行分析, 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 悬移质垂线分

布受粒径影响较大。根据两相流理论, 水中存在许多涡旋, 泥沙在水中受涡旋离心力作用发生掺混作用, 大粒径泥沙所需能量较高。因此, 小粒径泥沙更易发生掺混作用。B-5E、Z-423、Z-427、L-22 组次中, 粒径越小, 沿水深方向含沙量变化方差越小。粒径为 $0.5d_m$ 时, 含沙量变化分别为 53.7%、42.0%、45.6%、38.1%; C-5 和 C-25 组次中, 随着粒径增大, 泥沙沉速越大, 泥沙不易悬浮。大量泥沙未发生掺混作用, 悬浮在近底处。粒径为 $2d_m$ 时, 越靠近水面, 含沙量越小, 在近水面处含沙量趋近于 0。

5.4 流速的影响

水流流速是影响悬移质垂线分布的重要因素。流速决定了悬移质掺混速度进而影响扩散系数。本文为探究流速对悬移质垂线分布的影响, 对 6 组数据在 $0.5u_m$ 、 u_m 、 $2u_m$ 流速下进行分析。结果如图 8 所示。

由式(19)可知, 流速与掺混速度成正比。流速越大, 掺混速度越大, 扩散系数越大, 泥沙越易悬浮, 水体中含沙量较高。B-5E、Z-423、Z-427、L-22 组次中, 随着流速的增加, 沿水深方向的含沙量变化减小。流速为 $0.5u_m$ 时, 床面与水面的含沙量变化分别为 99.4%、94.8%、96.8%、71.8%。流速为 $2u_m$ 时, 含沙量变化分别为 75.0%、52.5%、45.0%、27.1%; C-5 和 C-25 组次中, 随着流速减小, 水动力减弱, 扩散系数减小, 泥沙不易悬浮, 含沙量沿水深向上迅速减小。流速为 $0.5u_m$ 时, 在近水面处含沙量趋近于 0。

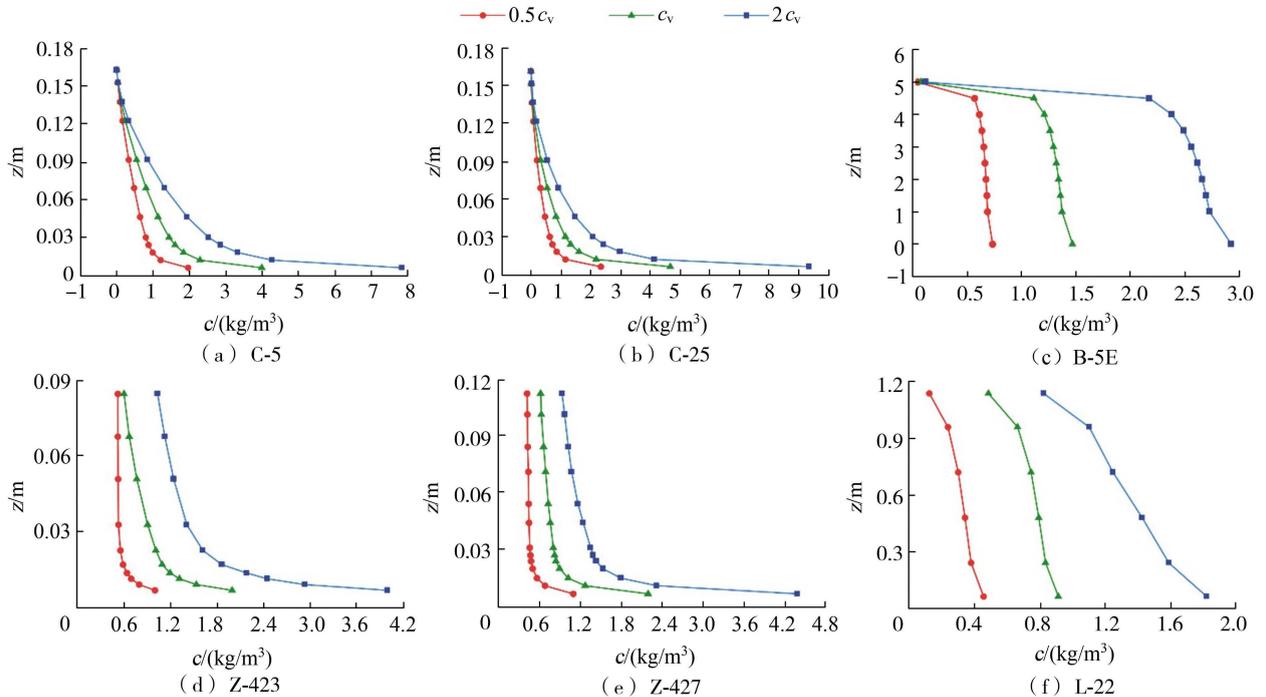


图 6 含沙量对悬移质垂线分布的影响

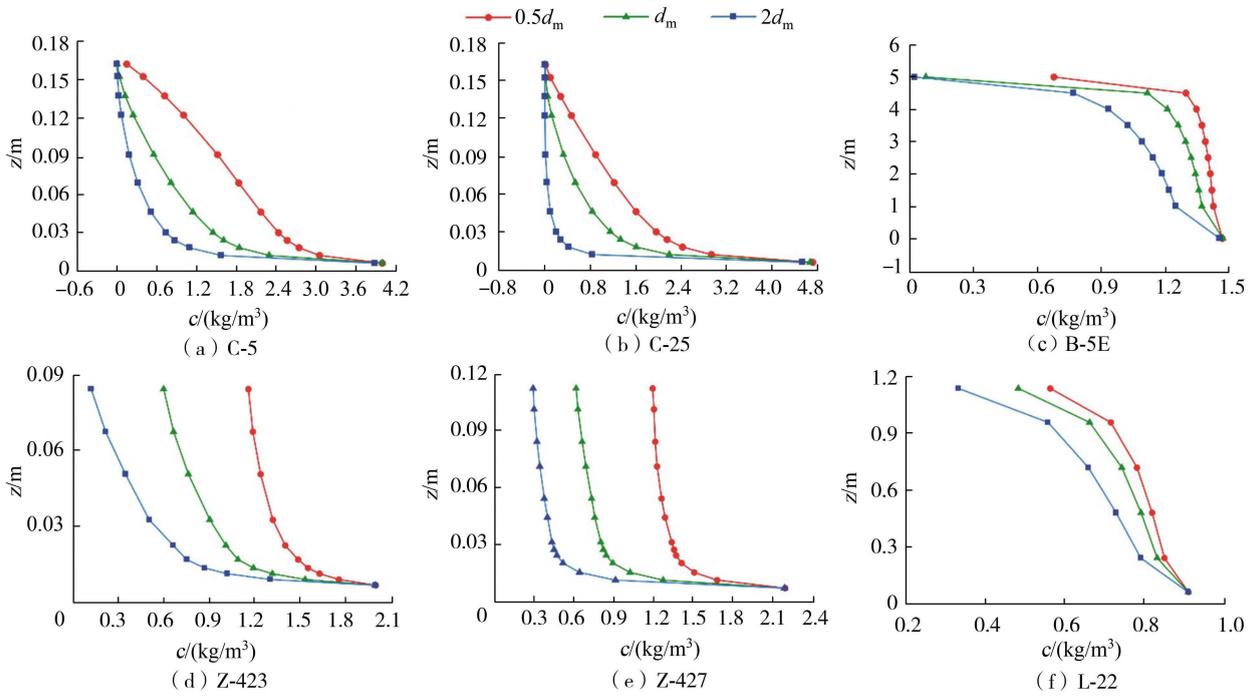


图7 泥沙粒径对悬移质垂线分布的影响

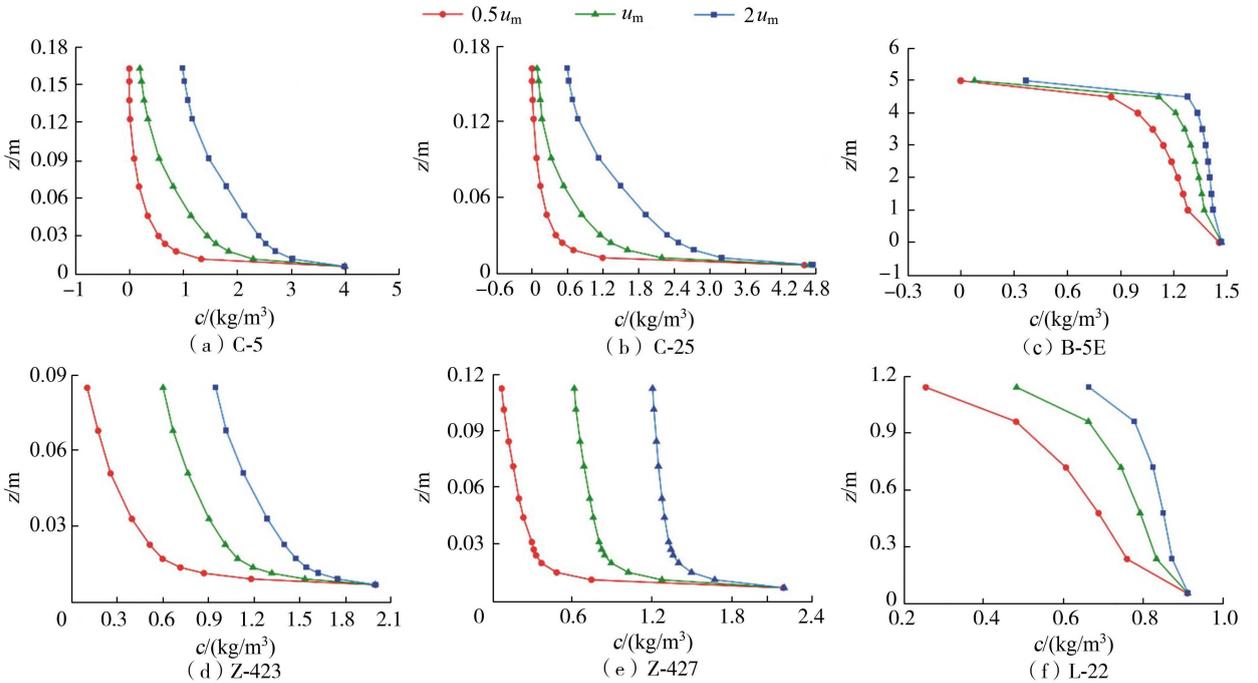


图8 流速对悬移质垂线分布的影响

6 结论

a. 传统模型在应用 Fick 定律时,被证实当泥沙群体沉速与掺混速度的比值大于 1 时,比值越大,扩散系数误差越大,Fick 定律不适用;而当泥沙群体沉速与掺混速度的比值不大于 1 时,扩散系数误差较小,Fick 定律适用。

b. 泥沙掺混长度系数在试验中较难测定,常假设其为 0.4,导致含沙量计算结果存在偏差:当实际

掺混长度系数小于常用的假设值 0.4 时,假设值计算的含沙量结果偏大,反之偏小。本文引入的泥沙掺混长度系数模型解决了这一问题,提高了计算模型精度。

c. 含沙量增大,抑制悬移质的垂线掺混作用,导致含沙量垂线分布呈现“上小下大”特征。粒径越大,泥沙沉速越大,泥沙不易悬浮,大量泥沙分布在近底处,导致水面处含沙量较小。流速越大,水动力越强,泥沙更易悬浮,沿水深方向含沙量较高,缩

小了床面与水面间的含沙量梯度。

参考文献:

- [1] 樊立东,童朝锋,孟艳秋. 博贺湾海域悬沙输移机制分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6):58-63. (FAN Lidong, TONG Chaofeng, MENG Yanqiu. Analyses of mechanism of suspended sediment transport in Bohe Bay [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(6):58-63. (in Chinese))
- [2] 孙林云,孙波,刘建军. 粉沙质海岸京唐港航道风暴潮骤淤及整治关键技术研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2008.
- [3] 王磊,邢杰炜. 基于航道工程削减黄河下游地上悬河危害性的分析[J]. 水道港口,2024,45(2):194-199. (WANG Lei,XING Jiewei. Analysis of adverse impact of the lower Yellow River channel project on mitigating suspended river [J]. Journal of Waterway and Harbor,2024,45(2):194-199. (in Chinese))
- [4] 钟德钰,张磊,王光谦. 泥沙运动力学研究进展和前沿[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):52-58. (ZHONG Deyu,ZHANG Lei,WANG Guangqian. Research progress and frontiers of mechanics of sediment transport [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):52-58. (in Chinese))
- [5] KUNDU S. Modeling stratified suspension concentration distribution in turbulent flow using fractional advection-diffusion equation [J]. Environmental Fluid Mechanics,2019,19(6):1557-1574.
- [6] ZHU Baisu, YANG Wei, JIANG Chengfei, et al. Observations of turbulent mixing and vertical diffusive salt flux in the Changjiang Diluted Water [J]. Journal of Oceanology and Limnology,2022,40(4):1349-1360.
- [7] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [8] 王兴奎,邵学军,王光谦,等. 河流动力学[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [9] ROUSE H. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers,1937,102(1):463-505.
- [10] SUN Zhilin, ZHENG Haolei, XU Dan, et al. Vertical concentration profile of nonuniform sediment [J]. International Journal of Sediment Research,2021,36(1):120-126.
- [11] ZHANG Lei,ZHONG Deyu,WU Baosheng. Particle inertia effect on sediment dispersion in turbulent open-channel flows[J]. Science China Technological Sciences,2014,57(10):1977-1987.
- [12] ZHONG Deyu, WANG Guangqian, WU Baosheng. Drift velocity of suspended sediment in turbulent open channel flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,140(1):35-47.
- [13] NIELSEN P, TEAKLEI A L. Turbulent diffusion of momentum and suspended particles: a finite-mixing-length theory [J]. Physics of Fluids,2004,16(7):2342-2348.
- [14] BRADSHAW P. Possible origin of Prandtl's mixing-length theory [J]. Nature,1974,249(5453):135-136.
- [15] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [16] 马子普,郭庆超,关见朝,等. 不平衡输沙悬移质粒径级配的垂线分布规律[J]. 泥沙研究,2022,47(4):1-7. (MA Zipu, GUO Qingchao, GUAN Jianzhao, et al. Vertical distribution of grain size gradation for the non-equilibrium sediment transport conditions [J]. Journal of Sediment Research,2022,47(4):1-7. (in Chinese))
- [17] 丰青,李瑞杰,江森汇,等. 基于含沙紊动水流掺混长度的含沙量垂线分布[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(5):549-554. (FENG Qing, LI Ruijie, JIANG Senhui, et al. Vertical distribution of suspended sediment concentration based on mixing length of sediment-laden turbulent flow [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(5):549-554. (in Chinese))
- [18] YAO Peng, SU Min, WANG Zhengbing, et al. Experiment inspired numerical modeling of sediment concentration over sand-silt mixtures [J]. Coastal Engineering,2015,105:75-89.
- [19] 左利钦. 粉砂-沙运动物理机制及其悬沙模拟方法[C]//第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京:海洋出版社,2019:811-816.
- [20] 吴华林,张小峰,段文忠. 非絮凝均匀沙群体沉速研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1996,29(1):85-89. (WU Hualin, ZHANG Xiaofeng, DUAN Wenzhong. Research on group settling velocity of non-cohesive sediment particles [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering,1996,29(1):85-89. (in Chinese))
- [21] 严冰. 粉沙质海岸泥沙运动及航道淤积机理研究[D]. 天津:天津大学,2009.
- [22] NAKAGAWA H. Turbulence in open channel flows [M]. London: Routledge,1993.
- [23] 郑浩磊. 澜沧江梯级水库建设的输沙响应[D]. 杭州:浙江大学,2022.
- [24] COLEMAN N L. Effects of suspended sediment on the open-channel velocity distribution [J]. Water Resources Research,1986,22(10):1377-1384.
- [25] 周家俞. 挟沙水流泥沙颗粒悬浮规律的试验研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.

(收稿日期:2024-04-19 编辑:俞云利)