

# 基于大涡模型的床面形态与水流相互作用过程模拟研究

刘汛<sup>1</sup>, 宗全利<sup>2</sup>, 刘贞姬<sup>1</sup>, 苏军<sup>3</sup>

(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 3. 石河子市水利工程管理服务中心, 新疆 石河子 832000)

**摘要:** 为判断动床弯道中二次流和涡结构模型的模拟精度, 基于 Barbhuiya 的 90° 水平弯道冲刷水槽试验, 比较大涡模型 (LES) 和 RNG  $k - \varepsilon$  模型对弯道冲淤过程中床面形态模拟的精确程度, 发现 LES 模型结果更加精确。基于 LES 模型模拟结果, 通过使用  $Q$  准则识别二次流产生的底部涡结构, 分析了涡结构对床面冲刷淤积的定量影响。结果表明: 在清水冲刷动床弯道的过程中,  $Q$  值介于 30 ~ 50 之间时底部涡趋于稳定存在,  $Q$  值大于 50 时会明显影响床面冲淤; 强大稳定的涡结构会使床面形态逐渐稳定, 床面冲刷和淤积速率趋于一个定值, 床面冲刷和淤积速率不超过  $2 \times 10^{-6}$  m/s。进一步分析弯道内剪切流速与床面形态的关系, 发现弯道内存在两类高剪切流速区域, 当第一类区域剪切流速值大于第二类时, 床面会出现深度大于 0.10 m 的明显冲刷坑。研究结果可为弯道中冲淤平衡和床面形态模拟提供参考。

**关键词:** 大涡模型; 弯道模型; 床面形态; 动床模拟; RNG  $k - \varepsilon$  模型

中图分类号: TV147

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0149-010

## Simulation on the interactions between bed morphology and water flow based on the large eddy model

LIU Xun<sup>1</sup>, ZONG Quanli<sup>2</sup>, LIU Zhenji<sup>1</sup>, SU Jun<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. School of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 3. Shihezi Water Conservancy Engineering Management Service Center, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** To investigate the model simulation accuracy of secondary flow and eddy structure in dynamic bed bends, the simulation accuracy of bed morphology during scouring and siltation process in bends by the large eddy model (LES) and the RNG  $k - \varepsilon$  model was verified by the scour flume experiments of a 90° horizontal bend by Barbhuiya, and the results of the LES model were found to be more accurate. Based on the simulation results of the LES model, the bottom vortex structure generated by secondary flow was identified by the  $Q$  criterion, according to which the quantitative effect of vortex structure on bed scouring and siltation was analyzed. The results show that in the process of clear water scouring the dynamic bed bend, the bottom vortex tends to be stable when the  $Q$  value is between 30 - 50, and becomes strong enough to affect the bed scouring and siltation when  $Q > 50$ , because a strong and stable vortex structure can stabilize the bed morphology, leading to a constant bed scouring and siltation rate, which changes within  $2 \times 10^{-6}$  m/s. According to the analysis of the relationship between the shear flow velocity in the bend and the bed morphology, there are two types of high shear flow velocity areas in the bend, when the shear velocity value of the first type area is larger than that of the second type, obvious scouring pits with a depth greater than 0.10 m will appear on the bed surface. The results of this study can be used as a reference for the simulation of siltation equilibrium and bed morphology in the bends.

**Key words:** large eddy model; bend model; bed morphology; dynamic bed simulation; RNG  $k - \varepsilon$  model

收稿日期: 2023-08-17; 修回日期: 2023-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12162030); 山东省自然科学基金项目 (ZR2021ME167)

作者简介: 刘汛 (1996—), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要从事河流动力学方面研究。

通讯作者: 宗全利 (1979—), 男, 山东临朐人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事河流动力学方面研究。

## 1 研究背景

弯道水流利用凹岸冲刷、凸岸淤积的原理,很容易将含沙水流中的水沙分离在凹岸和凸岸两侧,因此在引水渠首中广泛采用弯道式设计,在凹岸侧设置引水闸来引得弯道凹岸上层清水,同时将泥沙随弯道水流冲向下游。由于弯道水沙运动规律复杂,弯道水沙运动规律的研究成果可为引水工程设计提供理论依据,因此研究弯道内的水沙运动成为水力学和河流动力学研究的重要课题之一。

水槽试验是研究弯道内水流流态和床面形态特征最直接的研究手段,也是数值模拟结果验证的重要依据。如 Barbhuiya 等<sup>[1]</sup>通过水槽试验分析了90°弯道处的三维湍流流场和冲刷,研究发现最大冲刷深度发生在30°方位角断面附近,并在凹岸附近观察到最大流速;隋斌<sup>[2]</sup>分别通过水槽试验和三维模拟分析了入汇角和汇流比对弯道交汇水流的影响效果;王奇等<sup>[3]</sup>通过弯道水槽试验讨论了水沙条件对弯曲河道河床冲淤演变的影响;潘云文等<sup>[4]</sup>通过连续弯道试验发现床面粗化层能够防止床面被进一步侵蚀;曹玉芬等<sup>[5]</sup>通过测量连续弯道水槽中的三维流场特性和剪应力分布,发现弯道曲率引起的二次流对床面形态的影响占主要作用。水槽试验方法在弯道流场分布、床面形态和弯道内泥沙分布等方面取得了一定的研究成果,但是试验中很难定量描述涡结构和二次流的强度大小,导致这方面的研究成果相对较少。

数值模拟方法可用于分析水流中的二次流和涡结构的强度大小,对此相关学者进行了研究。如马森<sup>[6]</sup>利用大涡模型(large eddy simulation, LES)模拟得知二次流强度与弯道的宽深比有关;Yan 等<sup>[7]</sup>利用 realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型分析了弯道中不同边坡形态对二次流形态的影响;Almeida 等<sup>[8]</sup>研究发现 RANS(Reynolds average Navier-stokes)和 LES 两种模型都能模拟二次流的结构,其中 LES 的二次流发生在曲线外侧;Shaheed 等<sup>[9]</sup>通过比较标准  $k-\varepsilon$  和 realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型在弯道模拟中的性能,得到标准  $k-\varepsilon$  模型在弯道中模拟表现更佳;侯慧敏等<sup>[10]</sup>使用 RNG  $k-\varepsilon$  模型分析了4种弯曲度弯道,发现弯曲度仅影响凹岸最大水面超高位置而对超高程影响较小;罗平安等<sup>[11]</sup>使用雷诺应力模型分析了小曲折系数连续弯道的水力特性;Shahosainy 等<sup>[12]</sup>建立了半解析弯道水力泥沙模型,通过计算认为存在一个稳定河床底面形态以适应上游来水来沙

条件。数值模拟方法在弯道模型中二次流和泥沙冲淤影响因素分析等方面取得了一定的成果,但在动床弯道模拟中对涡结构和床面形态相互作用方面成果较少,紊流模型的选择也缺乏相应的参考依据。

在动床弯道水流泥沙实际模拟过程中,很难确定哪一种模型对动床弯道内的二次流和涡结构的模拟精度更高。因此,本文以弯道模拟应用最广泛的 LES 和 RNG  $k-\varepsilon$  模型为研究对象,基于 Meyer-Peter 泥沙输运公式,对两种模型模拟的 Barbhuiya 弯道水槽试验床面冲淤过程进行比较,得到动床情况下两种湍流模型对床底冲淤情况的模拟精度,通过对弯道内的主流流速、二次流涡分布和剪切流速分布等变量的研究,进一步揭示床面形态与水流相互作用过程。

## 2 弯道模拟数学模型

### 2.1 湍流方程

2.1.1 RNG  $k-\varepsilon$  方程 RNG  $k-\varepsilon$  方程<sup>[13]</sup>修正了小尺度运动的参数,更适合模拟大尺度运动,其控制方程见公式(1)~(5)。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中:  $x_i, x_j$  为笛卡尔坐标系分量;  $k$  为湍流动能, J;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $\rho$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u_i$  为水流流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \alpha_k, \alpha_\varepsilon$  为经验常数,在 FLOW 3D 软件中默认取值为  $C_\mu = 0.0845$ ,  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。  $\mu_{eff}$  为紊动状态下的水动力黏度,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ;  $\mu_t$  为水动力黏度紊动附加量,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ;  $\mu$  为水动力黏度,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ;  $G_k$  为平均速度梯度产生的湍动能, J。

通过公式(1)和(2)来求解  $k$  和  $\varepsilon$  的值。公式(2)~(4)中  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$  和  $C_\mu$  可控制小涡对大涡的影响,避免小涡过度影响整体流态,因此 RNG  $k-\varepsilon$  模型适合模拟较大尺度的流场。

2.1.2 LES 大涡模型 连续性方程<sup>[13]</sup>、控制方程分别用公式(5)、(6)来表示。

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (6)$$

式中: $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 为水流流速分量,m/s; $i、j$ 表示笛卡尔坐标系分量方向; $p$ 为流场压强,Pa; $\nu$ 为水流运动黏滞系数,m<sup>2</sup>/s; $\tau_{ij}$ 为亚网格的雷诺应力,Pa, $\tau_{ij}$ 用于过滤小尺度脉动和可解尺度湍流之间的动量输运;FLOW 3D 采用涡黏形式的亚格子雷诺应力模式,此时 $\tau_{ij}$ 表达式如公式(7)。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_T \bar{S}_{ij} \quad (7)$$

通过速度的变形率张量 $\bar{S}_{ij} = (1/2)[(\partial \bar{u}_i/\partial x_j) + (\partial \bar{u}_j/\partial x_i)]$ 和涡黏系数 $\nu_T = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|$ 求解 $\tau_{ij}$ ,其中变形率张量 $|\bar{S}| = (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}$ ; $\Delta$ 为过滤尺度;Smagorinsky 系数 $C_s = 0.18$ ; $C_s$ 和 $\Delta$ 完成对小涡的筛选和过滤,滤掉对流场影响不大的小涡,只保留对流场有影响的大涡; $\frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}$ 为计算亚网格周围产生的紊动雷诺应力。

### 2.2 泥沙冲淤模型

FLOW 3D 中共有 3 种泥沙冲淤模型,3 种模型精度均受泥沙颗粒粒径级配范围的影响。结合前人对 3 种泥沙冲淤模型的精度比较结果<sup>[14]</sup>和本文模拟所使用的粒径大小,使用 Meyer-Peter 泥沙输运公式<sup>[15]</sup>作为本模拟中泥沙冲淤的计算公式。

分别用公式(8)、(9)表示 Meyer-Peter 泥沙推移质单宽输沙率和 Meyer-Peter 输沙强度。

$$q_b = 8(\Theta - \Theta_c)^{1.5} \left[ \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g d^3 \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$\Phi = \frac{q_b}{\left[ \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g d^3 \right]^{0.5}} = 8(\Theta - \Theta_c)^{1.5} \quad (9)$$

式中: $\Theta$ 为无量纲希尔德数,用来衡量水流强度大小; $\Theta_c$ 为无量纲临界希尔德数; $d$ 为泥沙颗粒粒径,m; $\Phi$ 为无量纲输沙强度; $\rho_s$ 为泥沙干密度,kg/m<sup>3</sup>; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ; $q_b$ 为单宽输沙量,kg/m; $\Theta_c$ 为用来判别水流强度是否足以使颗粒起动的无量纲数,用公式(10)来计算 $\Theta_c$ 。

$$\Theta_c = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055[1 - \exp(-0.02D_*)] \quad (10)$$

式中: $D_*$ 、 $s$ 为计算过程中的过渡变量, $D_* =$

$$d_{50} \left( \frac{(s-1)g}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{3}}, d_{50} \text{ 为中值粒径,m; } s = \frac{\rho_s}{\rho}。$$

### 2.3 计算区域及网格

在 Barbhuiya 的 90°弯道冲刷试验中,明渠弯道水流流动对弯道几何尺寸非常敏感。主要尺寸有弯道中心线曲率半径( $R_c$ )、河道宽度( $b$ )和水流深度( $H$ )等,其中曲宽比( $R_c/b$ )会影响二次流强度、最大床层剪应力、横向分量引起的床层剪切应力和弯曲迁移<sup>[16-18]</sup>,因此模型按照原水槽 1:1 等比例建立,模型如图 1 所示。

计算区域分为斜坡段、紊流发展段、弯道段和下游出口段。斜坡段主要是通过斜板(长 2.81 m、高 0.25 m)将水流引到动床泥沙上方,随后水流在 6.55 m 的顺直水槽中流动充分发展为紊流,进入长度为 4.18 m 的弯道段;在弯道下游 1.60 m 处设置长方体挡板挡住底部床沙,最后在挡板下游 1.50 m 处设置水流出口。试验水槽截面为矩形,水槽内宽 0.80 m,高 0.80 m。在后续分析中出现的 $\theta$ 在弯道出口处为 0°,随逆时针运动 $\theta$ 值逐渐增大,在弯道入口处 $\theta$ 取最大值即 $\theta = 90^\circ$ ; $x$ 为距左岸距离,m; $x/b$ 表示距离左岸的相对距离; $h$ 为距离初始床面的高程,m, $h$ 大于 0 为床面淤积高度,小于 0 为床面被冲刷深度; $z$ 为距离水槽底部的高程,m。

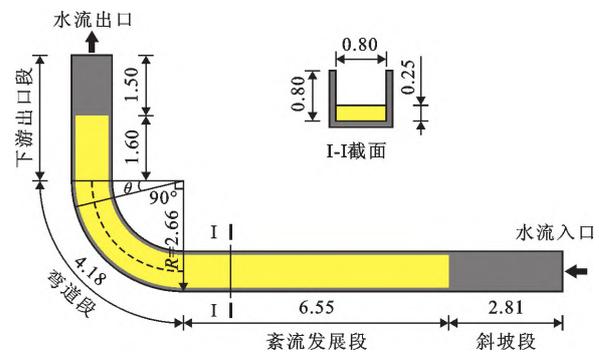


图 1 Barbhuiya 的 90°水平弯曲弯道水槽模型示意图(单位:m)

以平铺的正方体进行模型网格划分,网格尺度为 0.05 m,总网格数为 249 274。通过 FLOW 3D 的 FAVOR 功能,比较网格划分后模型与原模型的精度,经验证网格数满足模拟精度要求。入口水位与水槽试验相同,且保持在 0.168 m 不变;计算区域边界条件如表 1 所示。模型底部铺设泥沙,其厚度为 0.25 m、粒径为 0.3 mm、密度为 2 650 kg/m<sup>3</sup>。

### 3 模拟结果验证

在 Barbhuiya 的弯道冲刷试验条件下,将大涡模

型(LES)和 RNG  $k - \varepsilon$  模型模拟得到的水流流动 120 min 后床面冲淤形态的模拟结果与 Barbhuiya 水槽试验结果进行对比,分别选择  $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 30^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  等 3 个截面位置的床面形态作为验证对象,比较弯道上下游的床面变化,验证结果如图 2 所示,床面形态和床面最大冲淤程度误差值详见表 2、3。

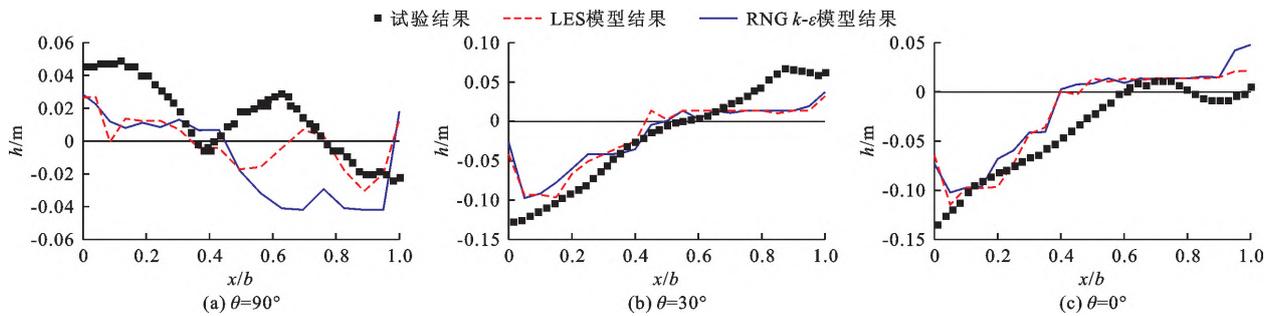


图 2 弯道 3 个截面的床面冲淤形态对比 ( $t = 120 \text{ min}$ )

图 2(a) 为  $\theta = 90^\circ$  截面处床面形态,水槽试验结果显示,床面在距离左岸  $0 \sim 0.32$  和  $0.40 \sim 0.64$  m 处有 2 个明显的淤积突起,LES 模型模拟出了  $0 \sim 0.32$  m 处的突起,因此误差较小,截面的相对误差为 7.6%;而 RNG  $k - \varepsilon$  模型没有模拟出这 2 个突起,所以在该截面误差较大,相对误差为 9.2%。

图 2(b) 为  $\theta = 30^\circ$  截面处床面形态,两种模型模拟结果在左岸没有明显差异,产生误差的主要区域在距离左岸  $0.56 \sim 0.80$  m 的位置,总体平均误差较低。误差最大值出现在距离左岸约 0.7 m 的位置,两种模型相对误差都在 9% ~ 10% 之间。

表 2 2 种模型对床面形态模拟结果的误差统计

截面位置 $\theta / (^\circ)$	模型	误差最 大值/m	误差最 小值/m	误差平 均值/m	相对误 差/%
0	RNG $k - \varepsilon$	0.040 2	-0.005 47	0.031 2	13.8
	LES	0.043 3	-0.000 103	0.018 9	6.9
30	RNG $k - \varepsilon$	0.051 6	-0.000 137	0.021 3	9.9
	LES	0.051 6	0.000 137	0.021 2	9.5
90	RNG $k - \varepsilon$	-0.044 6	-0.002 16	0.021 0	9.2
	LES	0.013 3	-0.002 95	0.017 8	7.6

表 3 2 种模型最大冲淤程度及相对误差

模型	最大冲刷深度		最大淤积高度	
	冲深值/m	相对误差/%	淤高值/m	相对误差/%
水槽试验	0.136		0.056	
RNG $k - \varepsilon$	0.124	-8.82	0.057	1.79
LES	0.142	4.41	0.053	-5.36

表 1 模型的边界条件

模型边界	边界条件
模型入口边界	速度进口,控制入口流速为 $0.308 3 \text{ m/s}$
模型出口边界	控制出口水位为 $0.168 \text{ m}$ 不变
模型两侧边壁边界	固壁边界
模型上边界	压力进口,液相体积分数为 0
模型底边界	固壁边界

图 2(c) 为  $\theta = 0^\circ$  截面处床面形态对比,LES 模型模拟结果起伏形态更接近试验中的床面,而 RNG  $k - \varepsilon$  模型模拟结果在靠近右岸附近的位置产生了较大的误差,LES 模型和 RNG  $k - \varepsilon$  模型相对误差分别为 6.9% 和 13.8%。

此外,通过对比最大淤积高度和最大冲刷深度可以看出,最大冲刷深度 LES 模型结果与试验结果相对误差为 4.41%,RNG  $k - \varepsilon$  模型相对误差为 -8.82%;最大淤积厚度 LES 模型结果与试验结果的相对误差为 -5.36%, $k - \varepsilon$  模型结果相对误差为 1.79%。

综合比较各个截面的床面冲淤误差以及最大冲淤值可知,对于 Barbhuiya 的  $90^\circ$  弯道模型,LES 模型的模拟效果要优于 RNG  $k - \varepsilon$  模型。因此在后续的模拟结果分析中,均采用 LES 模型的模拟结果进行分析。

## 4 结果分析

### 4.1 弯道水流与动床泥沙的相互作用

#### 4.1.1 弯道不同位置流场分布对床面形态的影响

图 3 为水流流动 120 min 后弯道内的流场分布。在弯道  $50^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  位置,凸岸侧的流速较大;在弯道  $0^\circ \leq \theta < 50^\circ$  位置,凹岸侧的流速较大,且与弯道上游相比,高流速区域更加集中。

在水流冲刷初始阶段,分析不受床面形态影响的主流流场分布情况,图 4 为水流流动 6 min 时 2 个特征截面 ( $\theta = 90^\circ$  和  $\theta = 30^\circ$ ) 的主流流速分布情况。从图 4 中可以看出,6 min 时床面未产生较大冲淤变化。 $\theta = 90^\circ$  截面由于处于弯道偏上游区域,保

留了直线二次流的特征,在距离水槽左岸 0.20 ~ 0.40 和 0.58 ~ 0.64 m、距水槽底部高 0.34 m 附近分别出现了中心最大流速为 0.554 和 0.583 m/s 的 2 个高速流体团,而水槽中央底部和水槽左、右岸附近受岸边阻力的影响形成了 3 个流速在 0.23 ~ 0.34 m/s 之间的低流速区域;随着弯道的发展,2 个高速流体团受到弯道紊流的影响发生扩散,最终在  $\theta = 30^\circ$  截面处完全融合。而弯道中央的低速流体团消失,只有靠近两岸的低速流体团仍然存在。

图 5 为运行 120 min 时 4 个特征截面的主流流速分布,120 min 时的床面形态已经发生了较大的变

化,与前文分析床面形态变化不大的流场对比,可以分析出弯道流场对床面形态的影响。

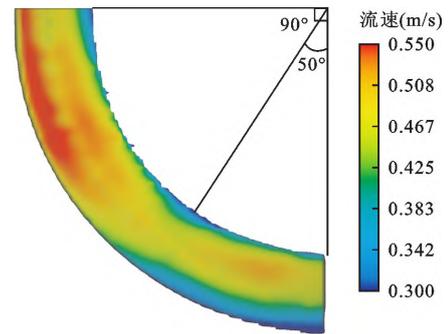


图 3 120 min 时弯道流场分布

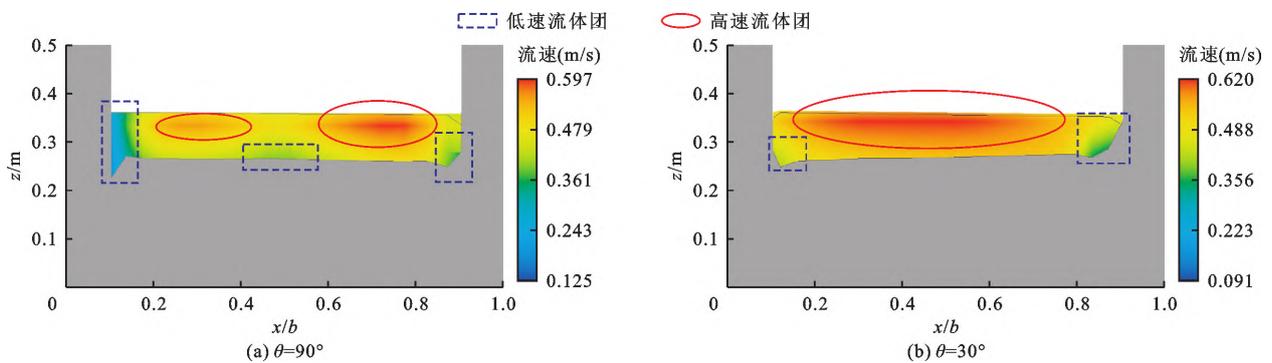


图 4 6 min 时弯道 2 个特征截面主流流速分布

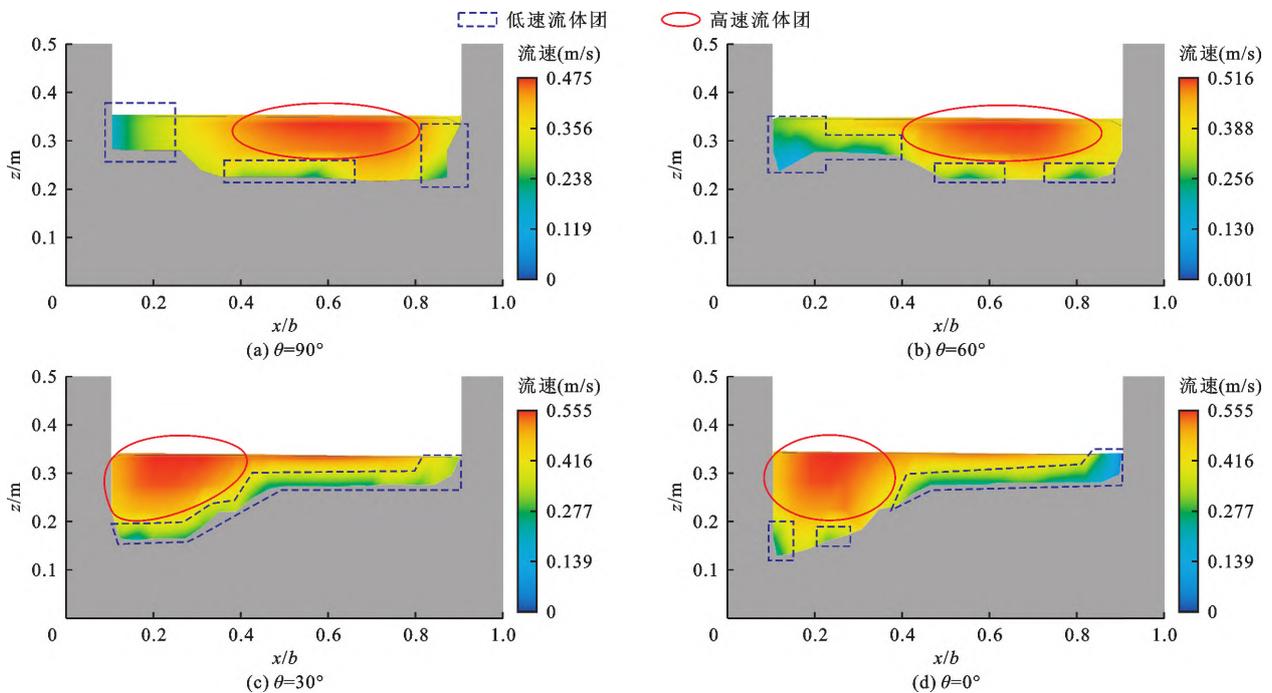


图 5 120 min 时弯道 4 个特征截面主流流速分布

如图 5(a) 所示,弯道上游的流态从 2 个高速流体团融合为一个区域较大的高速流体团,中心最大流速为 0.471 m/s,小于 6 min 时同截面的最大流速,可

以理解为高速流体团在向下游运动的同时也在垂向截面扩散。随着水流向弯道下游运动,高速水流受到离心力作用被压缩到凹岸位置。从图 5(c) 中可以看

出,当水流处于 $\theta = 30^\circ$ 区域时,流场分布整体未发生较大变化,相对于 $\theta = 90^\circ$ 截面流体团更加集中,中心的最大流速增大,为 $0.513 \text{ m/s}$ 。由图5(d)可以看出,当水流处于 $\theta = 0^\circ$ 截面时,高速水流纵向扩散更加明显,中心的最大流速进一步变大为 $0.552 \text{ m/s}$ 。受床面形态影响左岸的低速流体团的流速变得更低, $\theta = 90^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ 截面的低速流体团流速在 $0.223 \sim 0.260 \text{ m/s}$ 之间,而相对流速更小的流体团流速只有 $0.131 \text{ m/s}$ 左右。从图5(a)和5(b)可以发现低速流体团在分布上变化较大,上游低速流体团保持着3个低流速区域分布,下游的低速流体团沿床面扩散直到相互连接,不再是几个小流体团分布,如图5(c)和图5(d)所示。下游的流场随着冲刷坑深度的增加,高速流体团从横向扩散转变为在冲刷坑位置集中并沿垂向扩散。而部分低速流体团的流速受床面形态影响流速进一步降低,并且只存在于床面附近。

不同冲刷历时后弯道内床面形态如图6所示。从图6可以看出,在弯道 $30^\circ < \theta < 90^\circ$ 区域,凹岸侧淤积,凸岸侧冲刷,但冲刷淤积效果不明显,冲刷深度和淤积高度的最大值均不超过 $0.05 \text{ m}$ 。从图5的4个不同截面位置来分析流场对床面形态的影响。从 $\theta = 30^\circ$ 开始出现明显的弯道下游的凹岸侧冲刷、凸岸侧淤积的现象,如图5(c)、5(d)所示, $\theta = 30^\circ$ 截面处凹岸的冲刷坑底比较平整,但冲刷深度已经达到 $0.10 \text{ m}$ 。而到了 $\theta = 0^\circ$ 截面,整个冲刷坑没有平整面而是由一道斜面连接到凹岸,最大冲刷深度也要比 $\theta = 30^\circ$ 截面处深 $0.03 \text{ m}$ 左右。由此可以看出,在弯道下游凹岸侧床面被冲刷的范围在越接近弯道出口处越严重,冲刷深度会持续增加。在弯道下游凸岸侧的淤积变化相较于冲刷变化很小,淤积高度增加 $0.01 \sim 0.05 \text{ m}$ 不等,凸岸附近的淤积值最大也仅有 $0.05 \text{ m}$ 。

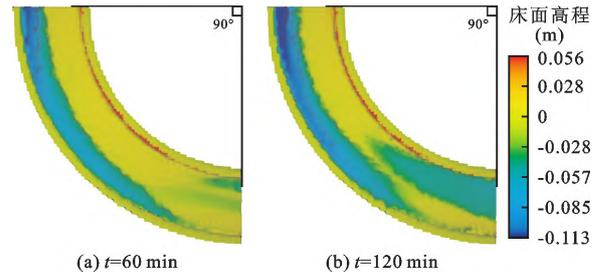


图6 不同冲刷历时弯道内床面形态

以上分析表明,随水流时间发展,集中的高速流体团因受紊流影响会在垂向的平面上发生扩散,高速流体团的最大流速降低,但整体流体团变大。观察不同截面可以发现,在弯道下游高速流体团受弯道影响明显,在离心力作用下被限制在凹岸侧,流体团最大扩散距离不会超过渠道宽度的一半,因此流体团只能沿水深方向扩散从而出现了比较明显的冲刷坑。而远离高速流体团的区域,尤其是接近流体边缘的区域,流体的流速会变得较低。

4.1.2 弯道内二次流对床面形态的影响 紊流中经常在床面附近形成一些低流速区域,这些区域影响着床面的冲刷或淤积速率,而低流速区域产生的主要原因来自二次流形成的底部涡<sup>[19]</sup>,但这一结论很难通过水槽试验进行验证。 $Q$  准则应用广泛的涡识别方法, $Q$  的物理意义是存在的涡量克服变形的效果值,当某处的 $Q$  值大于0时,则代表该处有涡结构<sup>[20]</sup>。当使用 $Q$  的等值面来表示涡结构时需要将 $Q$  值进行阈值选取才能更好地展现出涡结构。

本文通过 $Q$  准则进行涡结构识别,将 $Q = [0, 50]$  作为阈值筛选,当 $Q$  值大于50时可以确定此处有强大的涡结构。将 $Q$  准则绘制的云图与同截面同时刻的主流流速分布图进行对比(图7),发现 $Q > 0$  的区域与截面中低流速区域基本重合,由于 $Q > 0$  的区域存在涡结构,因此可以断定这些低速区域是由底部涡产生的。

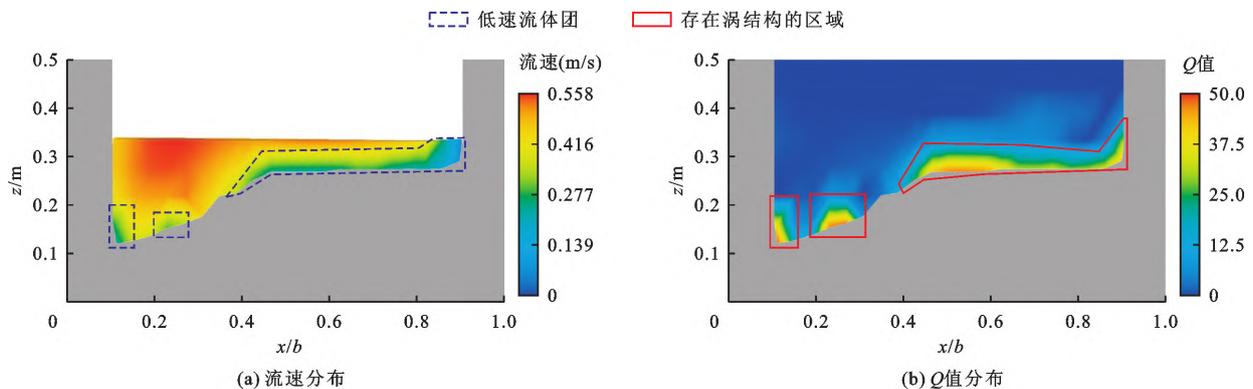


图7  $Q$  值分布区域与低流速分布区域对比图

以  $\theta = 0^\circ$  截面 60 ~ 120 min 期间床面形态变化情况为例进行具体分析,图 8 为  $\theta = 0^\circ$  截面 60 ~ 120 min 期间  $Q$  值分布变化情况。定义床面高程随时间变化的速率为冲淤速率,其值大于 0 为淤积速率,小于 0 为冲刷速率,变化规律如图 9 所示。

对比图 8(a)和 8(b)可以看出,在 60 ~ 84 min 时段距左岸 0.10 ~ 0.50 m 区域没有出现比较强大且稳定的底部涡,因此这一时段的泥沙冲刷速率变化非常大,60 ~ 78 min 泥沙的冲刷速率分布如图 9(a)所示,冲刷速率最大变化值出现在距离左岸 0.12 m 处,最大差值为  $8.9 \times 10^{-6}$  m/s。由图 8(b)和 8(c)可以看出,在 84 ~ 108 min 时段距左岸 0.10 ~ 0.40 m 区域会出现比较稳定的底部涡,此时泥沙的冲刷速率变化幅度逐渐变小,但由于底部涡大小不稳定因此泥沙冲刷速率存在波动,如图 9(b)所示,冲刷速率最大变化值出现在距离左岸 0.23 m 处,其值为  $5.2 \times 10^{-6}$  m/s。由图 8(c)和 8(d)可以看出在 108 ~ 120 min 时段距左岸 0.10 ~ 0.40 m 区域存在的底部涡逐渐趋于稳定且涡强度也在增强,而从图 9(c)可以

看出,增强的底部涡使得距左岸 0.10 ~ 0.40 m 区域的泥沙冲刷速率趋于稳定,冲刷速率最大差值出现在距离左岸 0.08 m 处,最大变化值为  $1.1 \times 10^{-6}$  m/s。从上述结果分析得出:随时间变化床面的底部涡逐渐趋于稳定且涡强度也逐渐增强,而受底部涡影响泥沙的冲刷和淤积速率变化值逐渐变小且速率趋于稳定。

通过对比图 8 中凹、凸岸的涡分布可以发现,凹岸床面附近长期存在较为稳定且  $Q$  值大于 30 的底部涡,而凸岸附近冲刷坑区域仅在左岸边和距左岸 0.30 ~ 0.36 m 两处存在  $Q$  值大于 50 的底部涡且存在不稳定,因此凸岸冲刷速率变化值较大,最大变化值可达  $1.4 \times 10^{-5}$  m/s(图 9)。而凹岸的淤积速率变化值较小,仅右岸附近边界处涡强度相对较低且产生较大的淤积速率,但最大速率变化值不超过  $6.0 \times 10^{-6}$  m/s,从图 9 可以看出,速率变化的最小值为  $8.0 \times 10^{-8}$  m/s。分析凹、凸岸的涡结构可以发现,底部涡既会在凹岸控制床面冲刷速率的变化,也会控制凸岸淤积速率的变化。

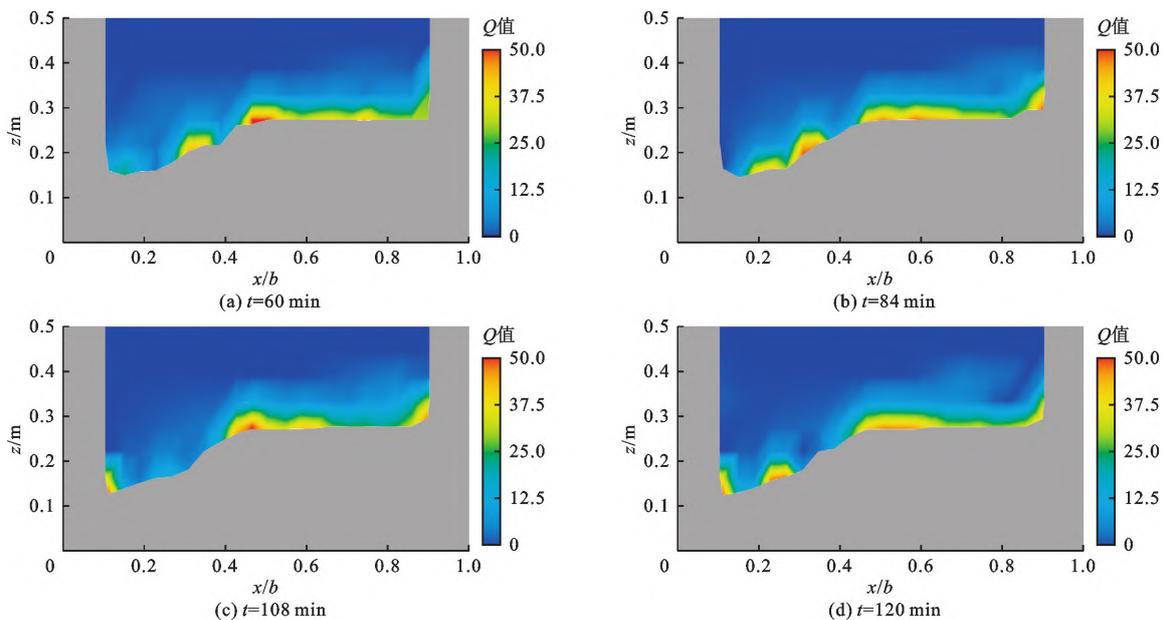


图 8 弯道出口  $\theta = 0^\circ$  截面 60 ~ 120 min 间  $Q$  值分布

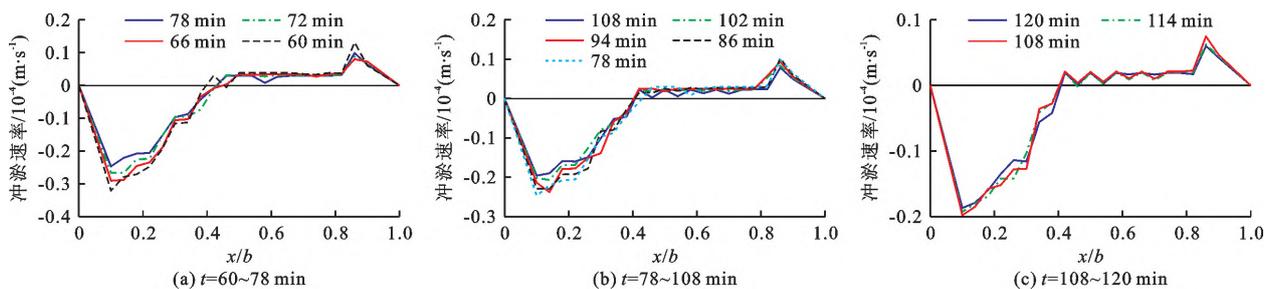


图 9 弯道出口  $\theta = 0^\circ$  截面 60 ~ 120 min 泥沙冲淤速率

由此可见,底部涡的存在会同时抑制凸岸侧的冲刷和凹岸侧的淤积速率,而涡的稳定会使床面的冲淤速率变化值控制在一定的范围,涡的强度越强冲淤速率越趋近于一个值。

#### 4.2 弯道内剪切流速与床面形态的关系

在剪切力作用下流体产生的流速称为剪切流速,该流速可以反映明渠床面剪应力的大小。剪切流速是研究明渠流动和挟沙规律的关键参数之一。图10为水流流动120 min后弯道内剪切流速分布。分析图10可以看出,在弯道 $54.5^\circ \leq \theta < 90^\circ$ 位置,紧贴凹岸侧和凸岸侧有较大的剪切流速,而凹岸侧附近距左岸0.52~0.68 m位置的剪切流速较小。而在弯道 $0^\circ \leq \theta < 54.5^\circ$ 位置,情况恰好相反,紧贴凸岸和凹岸侧有较大的剪切流速,在凸岸附近距左岸0.07~0.25 m位置剪切流速较小。总体剪切流速分布与Kashyap等<sup>[22]</sup>在研究剪切力时的分布基本一致,即弯道内剪切流速较大的区域出现在上游凸岸附近和下游凹岸附近。

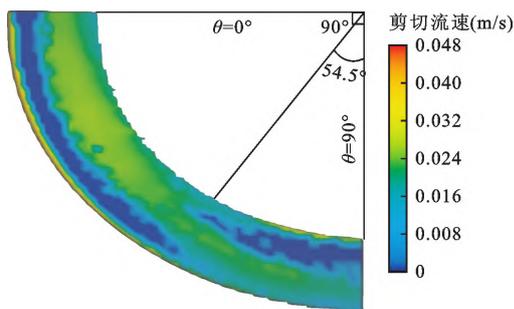


图10 120 min时弯道内剪切流速分布

在弯道 $\theta = 50^\circ$ 截面附近区域不同时刻的剪切流速分布如图11(a)、11(b)所示,分析图11(a)、11(b)可以看出,存在两类剪切流速较大的区域,一类位于靠近凹岸的位置,中心最大剪切流速为0.0215 m/s,该类高剪切流速区域的特点是出现在弯道一侧且受流场和床面形态影响较小;另一类位于床面附近距离左岸0.40~0.56 m的位置,此类特点是受床面形态影响较大,如图11(a)中在 $t = 90$  min时,床面最大剪切流速出现在距离左岸0.60 m附近,其中中心最大剪切流速为0.0296 m/s;图11(b)中在 $t = 120$  min时,床面最大剪切流速值出现在距离左岸0.50 m附近,其中中心最大剪切流速为0.0222 m/s。在90~120 min期间,第一类区域的最大剪切流速小于第二类区域的最大剪切流速,床面没有出现明显的冲刷坑。

在弯道 $\theta = 30^\circ$ 截面处,两类区域的水流剪切流速产生了变化,如图11(c)和11(d)所示。第一类高剪切流速区域在弯道下游剪切流速明显变大,中心最大剪切流速可达0.0460 m/s;第二类高剪切流速区域的剪切流速与 $\theta = 50^\circ$ 截面附近的剪切流速大小相近,最大剪切流速为0.0288 m/s,位于凹岸侧冲刷坑内的剪切流速比其他床面位置的剪切流速更低,剪切流速为0.0223 m/s。在90~120 min期间,第一类区域的剪切流速最大值远大于第二类区域的剪切流速最大值,所以在凹岸侧出现了超过0.10 m的明显冲刷坑。

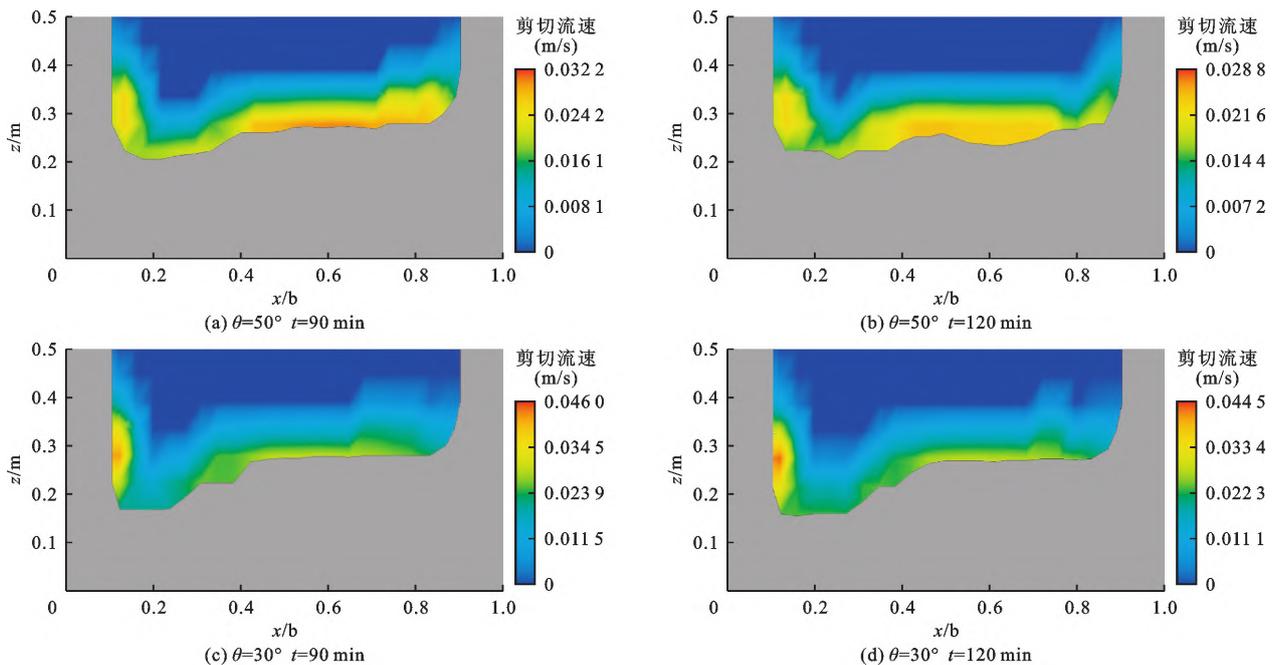


图11 弯道2个特征截面不同时刻的剪切流速分布

以上分析表明,弯道中存在着两类高剪切流速区域,第一类区域分布位置变化不大,但大小受弯道位置影响大;第二类区域分布位置受床面形态影响较大,但剪切流速大小变化较小。当第一类区域的剪切流速值大于第二类区域时,床面在局部会被剧烈冲刷出现局部冲刷坑;反之,第一类区域的剪切流速值小于第二类区域时,床面整体被冲刷而不会出现明显的局部冲刷坑。

### 5 讨 论

本文对比了 RNG  $k - \epsilon$  模型和 LES 模型模拟动床试验的效果,由表 2 可知,RNG  $k - \epsilon$  模型对于  $\theta = 0^\circ$  位置床面形态的模拟值与试验结果的误差最大。分析此截面不同位置的垂线流速分布和截面涡结构,结果如图 12 和 13 所示。

从图 12  $\theta = 0^\circ$  截面 3 个位置垂向流速分布可以看出,3 条垂线位置 RNG  $k - \epsilon$  模型和 LES 模型的垂向流速分布规律与水槽试验的垂线流速分布规律基本一致,但 LES 模型的流速值模拟结果更接近试验结果。从图 13 中两种模型在  $Q$  准则识别后的涡结构可以看出,LES 模型中  $\theta = 0^\circ$  截面有 4 个比较大

的底部涡,而 RNG  $k - \epsilon$  模型中只有 2 个明显底部涡,且没有明确识别出两岸近岸侧的底部涡,因此 LES 模型对于涡的模拟精度要高于 RNG  $k - \epsilon$  模型。郭文思等<sup>[21]</sup>在对斜向淹没射流模拟中同样发现 LES 模型对于涡的模拟精度更高,这与本文结论一致。此外,本文动床弯道截面床面的底部涡分布规律也与景思雨等<sup>[19]</sup>的试验结论一致,弯道模拟结果中的床面形态、流速分布以及剪切流速与文献[1]、[7]、[10]的模拟或水槽试验结果中参数的变化规律一致。目前对二次流的定量研究成果较少,且现有二次流强度的公式中不含有涡强度项的描述<sup>[23]</sup>,往往忽略了二次流涡对水流和床面形态的影响,而涡的模拟精度会直接影响到床面形态和水流结构的模拟精度。由此可见,二次流涡对于其他水力因素的影响仍需要更深入的研究。

本文对比分析了最常见的两种紊流模型的精度,并引入  $Q$  准则定量分析了二次流涡强度对床面形态的影响。研究结果表明,二次流涡会对弯道的床面形态产生影响,LES 模型相较于 RNG  $k - \epsilon$  模型对涡模拟得更为精细,模拟结果更加精确,该成果可为后续的动床弯道模拟研究提供参考和研究思路。

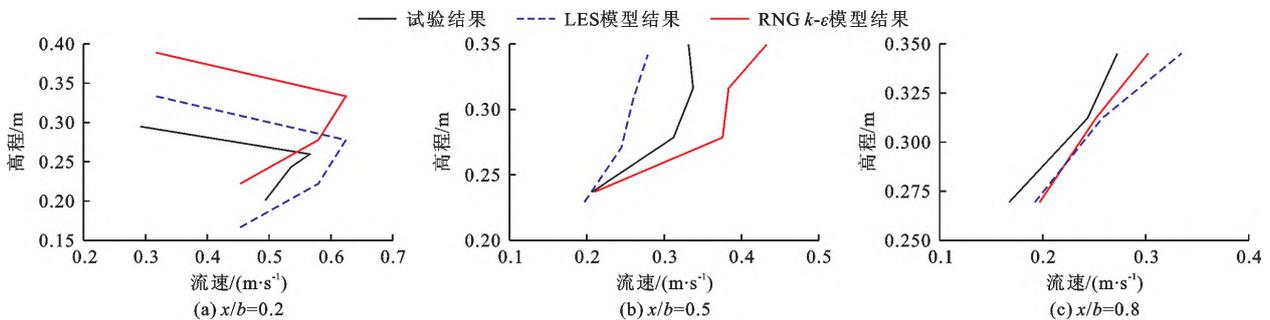


图 12 弯道  $\theta = 0^\circ$  截面 3 个位置垂线的流速分布

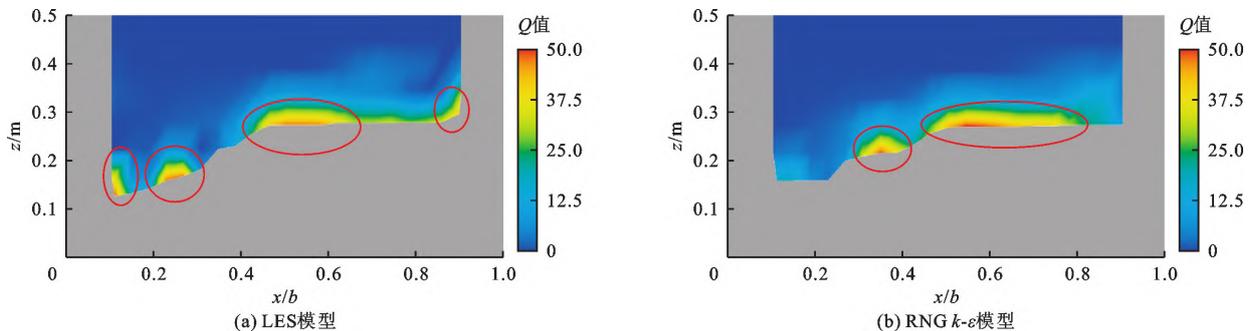


图 13 两种模型  $\theta = 0^\circ$  截面的  $Q$  值分布

### 6 结 论

本文以 Barbhuiya 的  $90^\circ$  水平弯曲弯道模型为例,分析了 LES 模型和 RNG  $k - \epsilon$  模型对弯道动床

的模拟精度,利用模拟精度较高的 LES 模型模拟,分析了  $90^\circ$  水平弯曲弯道水沙运移过程。

(1) 比较 RNG  $k - \epsilon$  和 LES 模型在  $90^\circ$  弯道的动床模拟试验,发现 LES 模型的模拟精度更佳,最大

相对误差不超过10%。

(2)弯道内横断面最大流速从上游到下游出现由凸岸向凹岸偏移的现象,且流体团会逐渐聚集,高速流体团横向扩散受阻转而向纵向扩散;随着时间的推移,接近床面的流体团流速会明显降低并形成涡结构。根据 $Q$ 准则分析,当 $Q > 0$ 时,表示该处有涡结构;当 $30 \leq Q \leq 50$ 时,底部涡存在且较为稳定;当 $Q > 50$ 时,底部涡稳定且足够强大,会影响附近床面的冲刷或淤积;底部涡越强越稳定,泥沙的冲刷和淤积速率越小并趋近于一个值。

(3)在弯道内有两类高剪切流速区域,第一类高剪切流速区域的特点是分布位置变化不大,但大小受弯道位置影响较大;第二类高剪切流速区域的特点是分布位置受床面形态影响明显,但大小变化范围不大;第一类高剪切流速区域的剪切流速值大于第二类区域时,床面会出现明显冲刷坑。

#### 参考文献:

- [1] BARBHUIYA A K, TALUKDAR S. Scour and three dimensional turbulent flow fields measured by ADV at a 90° horizontal forced bend in a rectangular channel[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21(3): 312-321.
- [2] 隋 斌. 明渠弯道交汇水流水力特性的大涡模拟与实验研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [3] 王 奇,单钰淇,刘 超,等. 不同水沙条件下弯道河床淤冲与漫滩洪水特性研究[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(5):158-167.
- [4] 潘云文,刘 欣,杨克君. 侵蚀基准面下降对弯道河床演变的影响[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(3): 11-17.
- [5] 曹玉芬,白玉川,高术仙. 连续弯道水槽水流结构与床面形态试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(12):1226-1235.
- [6] 马 森. 弯道水流结构及几何形态对水流特性影响的研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [7] YAN Xiaohui, RENNIE C D, MOHAMMADIAN A. A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2020, 25: e21.
- [8] ALMEIDA J R M, OTA J J. Comparative study between turbulence models in curved channels[J]. *RBRH*, 2020, 12(2): 258.
- [9] SHAHEED R, MOHAMMADIAN A, GILDEH H K. A comparison of standard  $k-\varepsilon$  and realizable  $k-\varepsilon$  turbulence models in curved and confluent channels[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2019, 19(2): 543-568.
- [10] 侯慧敏,邓凯文,杨紫海. 基于湍流模型数值模拟的梯形弯道水流特性研究[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(1):124-127.
- [11] 罗平安,李 觅. 连续微弯弯道水力特性试验及模拟研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(1):55-59.
- [12] SHAHOSAINY M, TABATABAI M R M, NADOUSHANI S M. Effect of secondary flow on hydraulic geometry in meandering rivers [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2019, 43(S1): 357-369.
- [13] 田守霞. 无坝渠首侧向引水的三维水力特性研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [14] 李安斌,张根广, CHANDARA M, 等. 输沙率公式对桥墩局部冲刷数值模拟影响研究[J]. *泥沙研究*, 2022, 47(3):15-22.
- [15] MEYER-PETER E, MULLER R. Formulas for bed-load transport [D]. Delft: Delft University of Technology, 1948.
- [16] FINOTELLO A, D'ALPAOS A, LAZARUS E D et al. High curvatures drive river meandering [J]. *Geology*, 2019, 47(10): E485.
- [17] SYLVESTER Z, DURKIN P, COVAULT J A. High curvatures drive river meandering [J]. *Geology*, 2019, 47(10): e485.
- [18] RUSSELL P, VENNEL R. High resolution observations of an outer-bank cell of secondary circulation in a natural river bend [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 145(5): 04019012.
- [19] 景思雨,杨文俊,陈 越. 光滑矩形明渠二次流特性研究 [J]. *水力发电学报*, 2020, 39(1): 12-20.
- [20] LIU Chaoqun, GAO Yisheng, TIAN Shuling et al. Rortex: a new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions [J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(3): 035103.
- [21] 郭文思,李乃稳,刘 超,等. LES 和  $k-\varepsilon$  湍流模型对斜向淹没射流的数值模拟研究 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(1):7-15.
- [22] KASHYAP S, CONSTANTINESCU G, et al. Influence of channel aspect ratio and curvature on flow, secondary circulation, and bed shear stress in a rectangular channel bend [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(12): 1045-1059.
- [23] 曹玉芬,高术仙,白玉川. 正弦派生曲线弯道水流结构特征试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2020, 39(4): 21-32.