

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.03.001

排污流速比对河流水体中 悬浮物沉降和底泥再悬浮的影响

李 勇^{1,2}, 张振廷^{1,2}, 花剑岚³, 黄漫丽², 周 超⁴, 倪利晓^{1,2}, 朱 亮^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210006;
4. 南京市城市与交通规划设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 采用数值模拟和水槽试验相结合的方法, 研究河道排污口不同排污流速比(R 分别为 4.5、7.2 和 9.9) 对悬浮物在排污口下游区域沉降和底泥再悬浮的影响。结果表明: 随着流速比的增加, 紊动越剧烈, 污染云团扩散范围越大, 沉降和悬浮作用也越明显。不同流速比情况下, 通过底部水平面的沉降通量变化趋势基本一致, 即先增加、后稳定, 通量总量随着流速比增大而增加; 由于临界起流速(对应于 $R=5.8$) 的存在导致低流速比($R=4.5$) 情况下再悬浮通量增长缓慢, 而中流速比($R=7.2$) 和高流速比($R=9.9$) 情况下再悬浮通量增长迅速。由此可见, 排污流速对排污口下游区域悬浮物的沉降和底泥再悬浮具有重要的影响。

关键词: 排污口; 悬浮物沉降; 底泥悬浮; 数值模拟; 水槽试验

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2015)03-0189-08

Impact of discharge velocity ratio of sewage outlet on sedimentation of suspended solids and resuspension of sediments in river

LI Yong^{1,2}, ZHANG Zhenting^{1,2}, HUA Jianlan³, HUANG Manli², ZHOU Chao⁴,
NI Lixiao^{1,2}, ZHU Liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210006, China;
4. Nanjing Institute of City & Transport Planning Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on numerical simulations and flume experiments, the processes of sedimentation of suspended solids and resuspension of sediments in the region downstream of a sewage outlet in a river were analyzed at three velocity ratios ($R=4.5$, 7.2 , and 9.9 , where R is the ratio of discharge velocity at the sewage outlet to the flow velocity in the river). Results show that the relative turbulence intensity and the area of the pollution zone increased with the velocity ratio; this also resulted in significant sedimentation of suspended solids and resuspension of sediments in the river. At the three velocity ratios, the sedimentation fluxes of suspended solids through the bottom horizontal plane have similar distributions: first increasing and then reaching respective stable values; and the total fluxes of suspended solids increased with the velocity ratio. At a low velocity ratio ($R=4.5$), the resuspension fluxes of suspended solids increased slowly due to the existence of a critical incipient velocity

(corresponding to $R=5.8$), while at the medium velocity ratio ($R=7.2$) and high velocity ratio ($R=9.9$), the resuspension fluxes increased rapidly. As a result, the discharge velocity of the sewage significantly affected the sedimentation of suspended solids and resuspension of sediments in the region downstream of the outlet.

Key words: sewage outlet; sedimentation of suspended solids; resuspension of sediments; numerical simulation; flume experiment

目前我国众多城市河道流速低缓,水流交换较慢,环境容量小,水质较差。城市污水处理厂的排污口大多设置于河流主干河道或支流上,其污染物排放形式和排污流速对下游尤其是排污口近区水动力特征、污染物浓度场以及底泥的再悬浮都会产生重要影响,进而影响下游水质^[1]。

污染物的沉降释放过程受河流水文特征、污染物排放方式、河流污染物背景浓度、排污流速和颗粒物大小等因素影响^[2]。在当前众多排污为岸边排放的情况下,排污与环境水体的流速关系(流速比)严重干扰着污染物在河道中的混合稀释过程,特别是对排污口下游较近区域有明显的影响^[3]。有关学者研究了类似射流特性的排污口对下游区域污染物沉降释放分布特征的影响。辜勇^[4]对钱塘江静态和动态水体中排污口下游流场和浓度场进行分析,结果表明动态水体中污染物和水体的掺混效果较好,有利于污染物的扩散。王旭等^[5]采用深度平均的 $k-\varepsilon$ 模型模拟了金沙江某河段多个排污口排污情况的流场与污染物浓度场。朱国宇等^[6]运用二维水质模型计算出不同排污形式下只有3孔排放可以使排污口下游监测断面处污染物浓度均匀分布,沉降和释放达到平衡。钱忠东等^[7]采用欧拉双流体模型对二维淹没射流作用下的无黏性沙床冲刷进行数值模拟,结果表明不同冲刷强度下射流水体速度场不同。Hunt 等^[8]通过对垂向射流进行分析,表明射流水体进入主流水体的射流深度与射流流速和射流孔径等有关,射流轴向速度分布近似符合高斯分布。Dinn 等^[9]通过研究认为废水通过排污口排入环境水体中,河流和排污口的流速以及沉积过程对污染物沉降作用的影响大于污染物本身的特性。Huang 等^[10]通过理论分析了不同水动力条件下底泥污染物的释放速率,认为泥沙的动态释放速率随着水流流速的增加而增大,随着水深的增加而减小,流速和水深影响泥沙中污染物的释放,容纳水体中的悬浮物浓度对排污口混合区的浓度场也有一定影响。申满斌等^[11]通过对比浑水水质模型和清水水质模型的结果发现水体中泥沙运动对污染物在水深方向的分布有明显影响。陈永灿等^[12]对三峡江段3个排污口进行分析,结果表明在流速变化不大的情况下,排污口混合区相对面积与排污负荷成正比。

由以上研究可见,河流水体中颗粒物的沉降及底泥中污染物的再悬浮过程受众多因素的影响(如河流水体本身所含悬浮物浓度、底泥特性等),尤其是不同排污流速造成的水动力条件改变对颗粒物的沉降和释放有着重要的影响。基于此,本文通过大型水槽试验和数值模拟,研究不同排污流速比条件对排污口近区水体中颗粒物沉降与底泥释放的影响,暂不考虑容纳水体的环境容量以及排污负荷的影响,并运用三维数值模拟结果分析讨论了不同排污流速比情况下颗粒物沉降和底泥再悬浮的特征,为河道排污口排污流速的合理设置提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在河海大学江宁校区室外水槽中完成。试验水槽总长31.7 m、宽1.2 m、高0.85 m,水槽前端设有贮水池,且与主体水槽之间砌有稳流花墙以保障水流稳定。水槽末端设有计量三角堰、退水闸和导流暗管。贮水池内来水通过2台单向潜水泵注入,下游通过调节插板控制水位。水槽来水取自河海大学江宁校区节水园区西湖,悬浮物(SS)背景质量浓度2.1 mg/L。排污口内径为4 cm,设置在稳流花墙下游7.6 m处,排污口中心设置于水面以下5 cm处,垂直于岸边排放。试验污水从自制贮水箱连续恒定排出,由转子流量计控制流量,排污射流方向与水槽水流方向垂直。

试验设计2种工况。工况1主要用于模拟所排放污水中悬浮物在下游的沉降过程。污水取自南京市某污水处理厂出水,pH=8.17,悬浮物质量浓度为19.1 mg/L;污水中颗粒物粒径 d 为0.1~1 mm,密度为1.25 g/cm³。工况2则用于模拟底泥再悬浮过程,在排污口上游2 m至下游4 m范围内的水槽底部均匀铺设

4 cm 厚的底泥。底泥取自河海大学江宁校区节水园区的西湖,其颗粒组成为 28.8% 的黏粒 ($d < 0.01\text{ mm}$)、21.1% 的粉粒 ($0.01 \sim 0.05\text{ mm}$) 和 50.2% 的砂粒 ($0.05 \sim 1\text{ mm}$)。为保持流场特征一致,工况 2 中排污口出水采用同等清水(同上游来水)替代,底泥表层以上水深保持与工况 1 相同。工况设置见表 1。表 1 中:

$$R = \frac{v_j}{v_a}$$

$$P = Q_j : Q_a$$

(1)

式中: v_j ——排污射流流速; v_a ——水槽上游水体流速; Q_j ——排污口流量; Q_a ——水槽上游流量。

秦淮河上游某支流实测流速约为 10 cm/s,污水处理厂的排污射流流速约为 80 cm/s。本试验参考该排污口的排污流速和河道流速,水槽流速设为 12 cm/s,排污流速分别设为 54 cm/s、86 cm/s 和 118 cm/s。当一种流速比试验完成后,为保证方案间仅有流速比一个变量因子,水槽中的水需全部换掉重新注水并测量水体中悬浮物浓度,使其与上游来水一致。不同流速比方案在同一水槽中间断完成。

1.2 监测分析方法

流速测量共设 4 个断面,分别设在排污口下游纵向距离 $x=0、30\text{ cm}、100\text{ cm}$ 和 200 cm 处,记为 A、B、C 和 D 断面(图 1(a))。每个断面上分别等距离布置 3 条垂线,间距为 40 cm;每条垂线上布置 2 个监测点,距水面分别为 5 cm 和 25 cm,分别记为 H_1 和 H_2 水平面, H_1 水平面为排污口所在水平面(图 1(b))。排污口中心设置在 H_1 平面高度,垂直于岸边排放。悬浮物浓度观测点和流速观测点一致,监测点布置见图 1。待水流稳定后,各点流速采用声学多普勒测速仪 ADV 逐点测得,悬浮物采用自制的同步多点采样器取样。悬浮物浓度测量采用悬浮物 SS 测量方法,参见文献[13]。

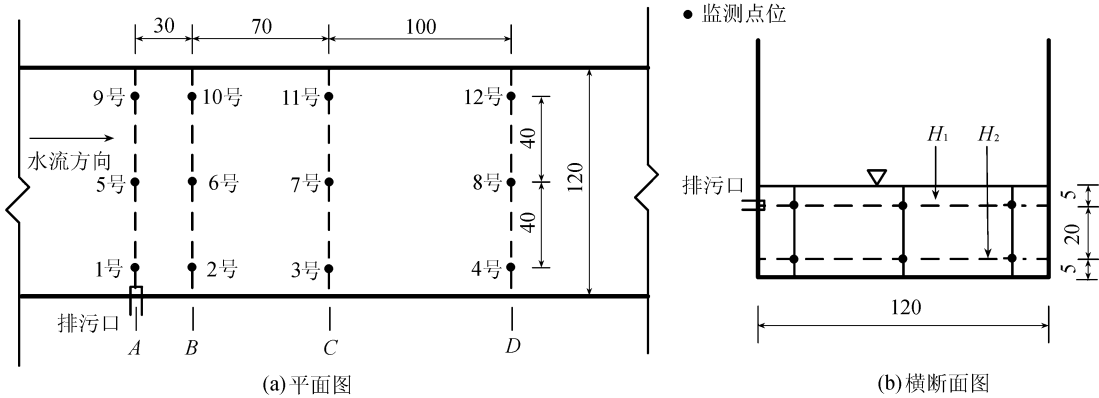


图 1 试验水槽及监测点布置(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental flume and monitoring points (units: cm)

2 模型的建立

2.1 模型选择

采用成熟的 Fluent 模型进行数值模拟。流体流动应满足最基本的规律,即质量守恒定律、动量守恒定律(N-S 方程)。本试验中的流动还包括不同组分间的混合,因此必须考虑颗粒相的动量守恒。

a. 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0$$

(2)

b. 欧拉模型中水相动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i v_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i v_i v_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \tau_i + \alpha_i \rho_i g + K_{si}(v_s - v_i)$$

(3)

c. 颗粒相动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s v_s v_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \tau_s + \alpha_s \rho_s g + K_{ls}(v_l - v_s) \tag{4}$$

式中: ρ ——密度, g/cm^3 ; t ——时间, s ; $u、v、w$ ——速度矢量在 $x、y$ 和 z 方向的速度分量, cm/s ; $\alpha_l、\alpha_s$ ——水相、颗粒相体积分数; $\rho_l、\rho_s$ ——水相、颗粒相密度; $v_l、v_s$ ——水相、颗粒相流速; $p、p_s$ ——大气、颗粒相的压力, Pa ; $\tau_l、\tau_s$ ——水相、颗粒相应力张量, N/cm ; $K_{sl}、K_{ls}$ ——颗粒相和水相间的动量交换系数, $K_{sl}=K_{ls}$ 。

根据本文研究重点,Fluent 模型中数值模拟具体模块采用 RNGk- ϵ 双方程紊流模块,速度与压力的耦合求解采用模型中的 SIMPLE 算法,增加组分运输模块。另外,此次模拟采用 Fluent 所包含众多模型中的欧拉模型(Euler),它以液相(水)作为主要相,颗粒相作为第二相。液相在计算域的上方,颗粒相在计算域的下方。因为本文使用颗粒相来模拟悬浮物,所以在两相之间的 Interaction 中选择专门模拟颗粒相的 Syamlal-O'Brien 模型^[14]。采用结构化六边形网格对所模拟的明渠网格进行分块划分。模拟计算区域为排污口上游 2 m 到下游 4 m, $x(0.02 \sim 0.04 \text{ m})$ 、 $y(0.002 \sim 0.01 \text{ m})$ 和 $z(0.01 \sim 0.03 \text{ m})$ 。网格最小体积 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,网格总数约 40.8 万。

2.2 模型边界条件

在模拟过程中,主要涉及的边界条件有上下游边界、壁面和自由表面。速度入口边界包括上游边界处速度入口和排污口速度入口,用于定义在流动进口处的流动速度及相关的其他标量型流动变量。

上游来流边界: $v_w = v_a \tag{5}$

排污口边界: $v_s = v_l = v_j \tag{6}$

式中: v_w ——入口水相流速。

选择相对湍流强度和水力直径在边界上的值来定义流场边界上的湍流。出口边界采用自由出流,该边界条件适用于出口边界处的流动是完全发展的,即出流面上的流动情况由区域内部可外推得到,且对上游流动没有影响,所有变量的法向梯度都为 0。壁面为无滑移边界条件,近壁区采用壁面函数法处理^[3,13-16]。所模拟明渠自由表面起伏不大,设置为对称边界条件。

3 结果与讨论

3.1 率定和验证

为了验证 Fluent 模型对顺直明渠排污口模拟的适用性,利用决定系数和均方根误差将模拟的流速、水深、相对湍流强度和悬浮物质量浓度与试验结果进行对比验证,检验模型所采用边界条件和参数的合理性。决定系数越大,均方根误差越小,说明模型计算结果与实测结果吻合度越好。

工况 1($R=4.5$)条件下各观测点流速和水深的决定系数分别为 0.98 和 0.95,都与 1 较为接近。从决定系数和均方根误差可以看出模型水流参数和边界条件的设置是合理的。同样, $R=4.5$ 沉降(工况 1-1)与释放(工况 2-1)2 种工况下各观测点悬浮物质量浓度的决定系数分别是 0.98 和 0.98,也都与 1 较为接近。由此可见,该模型所设置的边界条件和参数是合理的。

3.2 排污口下游水动力特征

3 种流速比条件下监测到排污口中心流速峰值分别为 $50.9 \text{ cm}/\text{s}$ ($R=4.5$)、 $81.1 \text{ cm}/\text{s}$ ($R=7.2$) 和 $111.1 \text{ cm}/\text{s}$ ($R=9.9$), $R=4.5、R=7.2$ 和 $R=9.9$ 时的流速分布见图 2。从图 2 可知,低流速区发生在排污口

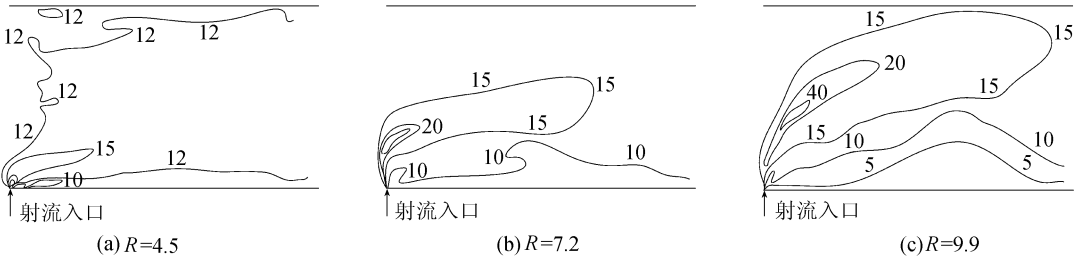


图2 3种流速比条件下排污口中心平面(H₁)流速分布(单位:cm/s)

Fig. 2 Distribution of flow velocity on horizontal plane (H₁) at center of sewage outlet at three velocity ratios (units: cm/s)

下游同侧,随着流速比的增大,范围逐渐扩大。张晓元等^[17]利用混合有限分析法对圆孔射流进行数值模拟时也得出流速比越大,射流流体越不易弯曲、低流速区越大的结论。这是因为流速比越大,对主流冲击越强烈,紊动强度和剪切应力越大,所以射流中心速度即流速峰值下降速率越快;当流速比较小时,排污流体进入主流区后受纵向主流影响较大,发生弯曲程度最大,使射流轴线迅速向下游偏移。而随着流速比增大,排污射流弯曲程度减小,射流轴线横向偏移后再向下游弯曲。

3种流速比条件下,各断面模拟相对湍流强度见图3。图中 R_a 为相对湍流强度平均值, R_l 为峰值。3种流速比情况下相对湍流强度沿射流轴线方向衰减变化趋势整体上一致。在0~30 cm范围内相对湍流强度下降幅度较大,随后趋于平缓。流速比越大,相对湍流强度沿程下降幅度也越大,从A到D断面的下降幅度分别为63.0% ($R=4.5$)、74.6% ($R=7.2$)和80.6% ($R=9.9$)。

3.3 排污口下游悬浮物沉降过程分析

取排污口所在断面A、中间断面B和C来分析沉降过程悬浮物质量浓度变化情况(见图4,图中圆点表示射流轴线位置)。每种流速比下,断面A浓度峰值最大,且随着距排污口距离的增加,断面B和C浓度峰值逐渐降低,但是扩散范围逐渐增大。中流速比($R=7.2$)和高流速比($R=9.9$)时总体上各断面悬浮物扩散范围明显增大,分别增加了27.6%、29.0%、27.7%和48.2%、45.4%、49.6%。对比3种流速比情况可知,下游断面悬浮物质量浓度沿水流方向衰减变化趋势整体上一致,在排污口处,悬浮物处于初始混合阶段,随着流速比的增大,各断面相应平均流速和相对湍流强度增大,相同断面位置处污染带宽度越大。进入顺流后,悬浮物质量浓度趋于平缓,下降速率缓慢。

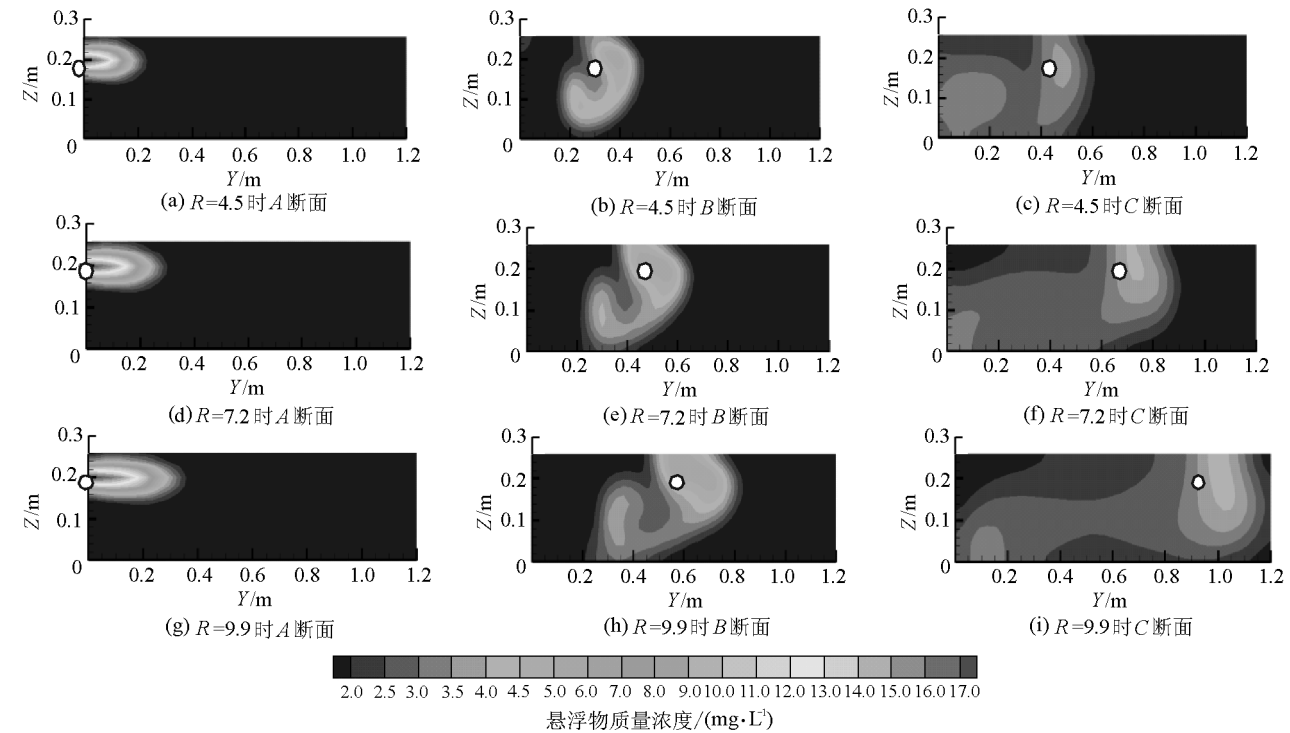


图4 3种流速比条件下沉降过程在断面A、B和C处悬浮物质量浓度分布

Fig. 4 Distribution of concentrations of suspended solids at cross-sections A, B, and C during sedimentation process at three velocity ratios

图5为3种流速比条件下沉降过程悬浮物在 H_2 水平面的模拟沉降通量分布情况,沉降通量变化总体趋

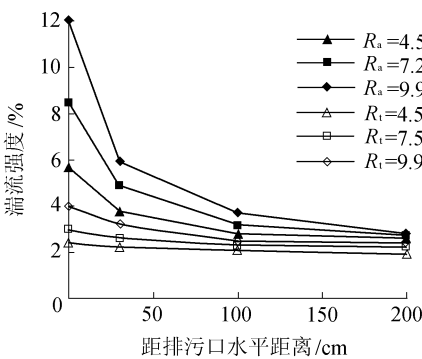


图3 3种流速比条件下各断面模拟相对湍流强度峰值和平均值

Fig. 3 Simulated peak and average values of relative turbulence intensity at cross-sections at three velocity ratios

势基本一致。从图5可以看出:在开始阶段,由于紊动强烈,悬浮物尚悬浮在水中,沉降通量较小;一段时间后由于射流和主流水体保持状态不变,悬浮物呈稳定下沉趋势,通过 H_2 水平面的沉降通量基本趋于稳定;随着流速比的增大,输入的污染物质增加,最后在 H_2 平面处的沉降通量逐渐增加,由 1.5 g/s ($R=4.5$) 增加到 2.6 g/s ($R=7.2$)、 3.5 g/s ($R=9.9$)。从图5还可以清晰地看出,流速比越大,到达稳定状态的时间越长。这是因为流速比越大,造成的紊动干扰就越强烈。

3.4 排污口下游底泥再悬浮特征分析

断面A、B和C在底泥再悬浮过程中悬浮物质量浓度变化情况见图6,图中圆点表示射流轴线位置。从图6可以看出,3种流速比条件下底泥悬浮状态沿水流方向变化趋势一致。在断面A,由于紊动剧烈、干扰强度大,悬浮作用较强。随着距排污口距离的增加,紊动变弱,悬浮状态趋于稳定,并且有部分底泥会再次沉降。对比3种流速比情况,流速比越大干扰作用越强,底泥悬浮越剧烈。在断面A处,底泥悬浮影响范围由 30.5% ($R=4.5$) 增加到 61.3% ($R=7.2$)、 83.5% ($R=9.9$)。由图6的断面C可见,即使随距离增加紊动减弱,大流速比情况下的底泥悬浮影响范围依然较大。

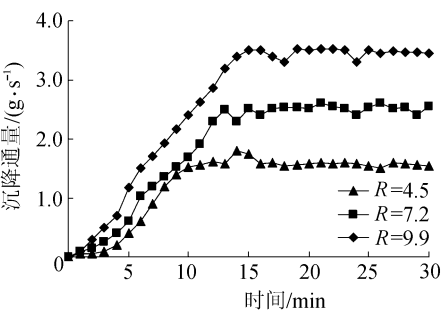


图5 3种流速比条件下 H_2 水平面处悬浮物沉降模拟通量变化

Fig. 5 Variation of simulated sedimentation flux of suspended solids through horizontal plane H_2 at three velocity ratios

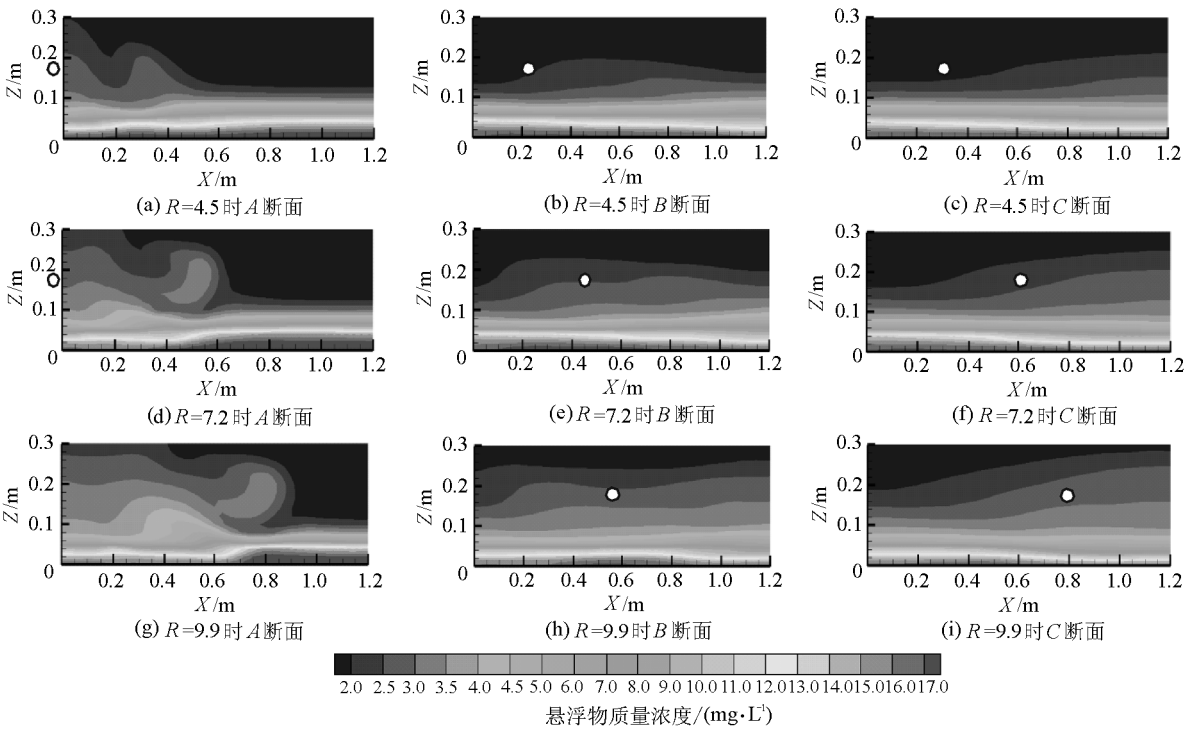


图6 3种流速比条件下底泥再悬浮过程中断面A、B和C处悬浮物质量浓度分布

Fig. 6 Distribution of concentrations of suspended solids at cross-sections A, B, and C during resuspension process at three velocity ratios

图7为3种流速比条件下底泥再悬浮过程中 H_2 水平面处的悬浮模拟通量分布情况。从图7可以看出 $R=4.5$ 时,悬浮通量增加缓慢,而在 $R=7.2$ 和 $R=9.9$ 时,悬浮通量急剧增加。这可能是因为射流流速低于临界启动射流流速时,底泥悬浮起动缓慢,呈“少量动”状态;当高于临界启动射流流速时,紊动剧烈、底泥悬浮起动迅速,呈“普遍动”状态^[18]。刘成等^[19]通过圆孔射流对冲刷疏松淤沙的研究也表明:冲刷过程存在临界启动流速,当低于临界启动流速时,泥沙处于初始流化状态;高于临界启动流速时,泥沙处于完全流化状态;流速继续增大,则会造成清晰稳定的冲刷坑。研究还表明临界启动流速与水流流速、喷嘴直径、泥沙密度和粒径等密切相关^[20]。据推导公式^[19]和本文试验工况计算得出本文试验临界启动射流流速为 69.6 cm/s

(对应于 $R=5.8$)。图中 $R=7.2$ 和 $R=9.9$ 的再悬浮模拟通量到达最高值后都出现了下降趋势,是部分颗粒物再悬浮后又重新沉降的现象导致,当达到一种稳态后悬浮通量就会趋于平衡。

4 结 论

由水槽试验和数值模拟结果可以发现,排污口下游流场及悬浮物的沉降释放过程明显受到排污流速比的影响。沉降过程中,下游断面悬浮物浓度沿水流方向衰减变化趋势总体一致。随着流速比的增大,对沉降影响范围越大,悬浮物浓度峰值也越大。沉降通量均呈先增加后稳定状态,平衡时沉降通量总量随着流速比的增大而增加,由 1.5 g/s ($R=4.5$) 增加到 2.6 g/s ($R=7.2$) 和 3.5 g/s ($R=9.9$)。底泥在释放过程中悬浮状态沿水流方向变化趋势一致。在排污口附近悬浮作用较强,随着距离的增加,紊动变弱,悬浮状态趋于稳定。排污流速比越大底泥悬浮越剧烈,同时悬浮通量也越大。由于临界启动射流流速的存在导致 $R=4.5$ 时悬浮通量增加缓慢并维持较低值,而在 $R=7.2$ 和 $R=9.9$ 时悬浮通量短时间内急剧增加并达到较高值。

当排污口污水为岸边垂直排放时,排污口流速比不同造成排污区域污染悬浮物沉降、再悬浮趋势及悬浮通量有较大差异,同时对下游河水中污染物浓度有很大的影响。流速比较低时污染物大部分会沉积在排污口附近,造成富积,流速比较高时会造成底泥的大量再悬浮,使下游河水中污染物浓度升高。所以应根据排污口实际情况选择合适的流速比才能有效降低排污口污染物浓度,并加快下游河水污染物的稀释扩散。本文仅考虑了排污口流速比对下游污染物扩散和沉降的影响,没有考虑上游来水水质和排污口负荷的变化,希望在以后进一步研究。

参考文献:

[1] 康琳琦,朱亮,汤颖,等. 污水处理厂尾水排放形式对河流水质的影响研究[J]. 人民长江,2012,43(19):85-89. (KANG Linqi,ZHU Liang,TANG Ying,et al. Influence of discharge mode of tail water from municipal sewage plant on urban river's water quality[J]. Yangtze River,2012,43(19):85-89. (in Chinese))

[2] 王征,郭秀锐,程水源,等. 三峡库区典型排污口河段污染物扩散降解特性研究[J]. 安全与环境学报,2012,12(1):102-106. (WANG Zheng,GUO Xiurui,CHENG Shuiyuan,et al. Study on characteristics of contaminant diffusion and degradation of typical river section in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Safety and Environment,2012,12(1):102-106. (in Chinese))

[3] 白珊,李少华,王坤玉,等. 多孔横向紊动射流流场的数值分析[J]. 东北电力大学学报,2007,27(4):18-21. (BAI Shan,LI Shaohuan,WANG Kunyu,et al. Numerical analysis of the flow characteristics of the lacunaris turbulent jet-to-cross flow[J]. Journal of Northeast Dianli University,2007,27(4):18-21. (in Chinese))

[4] 辜勇. 钱塘江杭州段深槽水质监测分析与中心排放试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2013.

[5] 王旭,李克峰,李然,等. 城区河段多排污口耦合作用的水质模拟[J]. 武汉大学学报:工学版,2008,41(2):24-27. (WANG Xu,LI Kefeng,LI Ran,et al. Water quality simulation of coupled effect of multiple sewage outfalls in urban river reach[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(2):24-27. (in Chinese))

[6] 朱国宇,李冰冻,李嘉. 排污方式对污染物分布状况的影响反演研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2011,43(2):34-38. (ZHU Guoyu,LI Bingdong,LI Jia. Reverse deduction research of the influence of draining manners on contamination concentration distributing[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2011,43(2):34-38. (in Chinese))

[7] 钱忠东,胡晓清,槐文信,等. 基于欧拉模型的淹没射流冲刷数值模拟[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(4):419-425. (QIAN Zhongdong,HU Xiaqing,HUAI Wenxin,et al. The numerical simulation of the model based on euler submerged jet[J]. Scientia China:Technologica,2011,41(4):419-425. (in Chinese))

[8] HUNT C D,MANSFIELD A D,MICKELSON M J,et al. Plume tracking and dilution of effluent from the Boston sewage outfall[J]. Marine Environmental Research,2010,70(2):150-161.

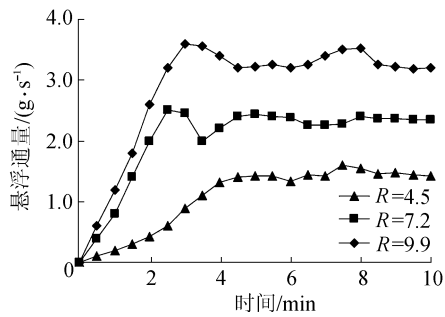


图 7 3 种流速比条件下 H_2 水平面处底泥再悬浮模拟通量变化
Fig. 7 Variation of simulated resuspension flux of sediments through horizontal plane H_2 at three velocity ratios

- [9] DINN P M, JOHANNESSEN S C, MACDONALD R W, et al. Effect of receiving environment on the transport and fate of polybrominated diphenyl ethers near two submarine municipal outfalls[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31(3): 566-573.
- [10] HUANG X G, LIU L. A theoretical study on physical effects of hydrodynamic conditions on sediment dynamic release rate[J]. *Journal of Environment Protection and Ecology*, 2012, 13(1): 203-210.
- [11] 申满斌, 陈永灿, 刘昭伟. 岸边排放污染物浓度场三维浑水水质模型研究[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(3): 93-98. (SHEN Manbin, CHEN Yongcan, LIU Zhaowei. A 3-D quality model of sediment-laden flow for side discharge[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(3): 93-98. (in Chinese))
- [12] 陈永灿, 申满斌, 刘昭伟. 三峡库区城市排污口附近污染混合区的特性[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2004, 44(9): 1223-1226. (CHEN Yongcan, SHEN Manbin, LIU Zhaowei. Characteristics of pollutant mixing zone near city outfalls in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2004, 44(9): 1223-1226. (in Chinese))
- [13] 魏夏盛, 比彤, 齐文启. 水和废水监测[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 李鹏飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [15] 芦绮玲, 陈刚, 黄君瑶. 多孔淹没紊动射流三维流场模拟及消能分析[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(5): 217-222. (LU Qiling, CHEN Gang, HUANG Junyao. Numerical simulation and analysis on energy dissipation of 3-D flow field of multiple submerged jets into plunge pool[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2007, 35(5): 217-222. (in Chinese))
- [16] 袁丽蓉, 沈永明, 郑永红. 用 VOF 方法模拟静止浅水环境中的垂向紊动射流[J]. *水科学进展*, 2004, 15(5): 566-570. (YUAN Lirong, SHEN Yongming, ZHENG Yonghong. Simulation of a vertical turbulent jet discharged from the bottom of static shallow water with the VOF method[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5): 566-570. (in Chinese))
- [17] 张晓元, 李炜, 李长城. 横流环境中射流的数值研究[J]. *水利学报*, 2002, 32(3): 32-38. (ZHANG Xiaoyuan, LI Wei, LI Changcheng. Numerical simulation for the flow field of vertical round turbulent jet entering the cross current[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 32(3): 32-38. (in Chinese))
- [18] 李一平, 逢勇, 吕俊, 等. 水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(4): 318-324. (LI Yiping, PANG Yong, LYU Jun, et al. On the relation between the release rate of TN, TP from sediment and water velocity[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 318-324. (in Chinese))
- [19] 刘成, 何耘, 韦鹤平. 圆形射流冲刷疏松淤沙的研究[J]. *泥沙研究*, 2001, 40(3): 40-45. (LIU Cheng, HE Yun, WEI Heping. Study on circular jet scouring loose sediment deposited over the outlet[J]. *Journal of Sediment Research*, 2001, 40(3): 40-45. (in Chinese))
- [20] 张兰丁. 黏性泥沙起动流速的探讨[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2000, 15(1): 82-88. (ZHANG Landing. Study on starting velocity of cohesive sediment[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2000, 15(1): 82-88. (in Chinese))