

射流孔间距对横流中两孔射流稀释特性的影响

肖 洋^{1,2}, 梁嘉斌², 李志伟^{1,2}

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了解射流孔间距对多孔扩散器污水稀释效率的影响, 采用计算流体动力学 Fluent 软件中的 realizable $k-\varepsilon$ 模型, 模拟横流中不同射流孔间距条件下两孔射流横向有效流速、射流浓度轨迹线、速度场和浓度场的变化。结果表明, 随着射流孔间距的增大, 第1个射流对后面射流的遮挡作用减弱, 第2个射流前的横向有效流速增大, 射流浓度轨迹线的弯曲程度增大; 在射流近区, 浓度轨迹线与下游距离呈 $1/2$ 的指数关系, 与射流孔间距呈 -0.27 的指数关系, 在射流远区, 与下游距离呈 $1/3$ 的指数关系, 与射流孔间距呈 -0.18 的指数关系。射流孔间距对第1个射流浓度变化影响较小, 对第2个射流, 射流孔间距越小, 污染物浓度沿水流方向衰减速率越快, 当距该射流孔超过8倍孔径后, 浓度变化趋于一致。

关键词: 多孔射流; 射流间距; 稀释特性; 横向有效流速; 浓度轨迹线; 浓度场

中图分类号: O358

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2016)03-0020-06

Effect of spacing of nozzles on dilution properties of two tandem jets in cross-flow//XIAO Yang^{1,2}, LIANG Jiabin², LI Zhiwei^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effects of the spacing of nozzles on the dilution efficiency of a multi-hole diffuser, the realizable $k-\varepsilon$ model of the Computational Fluid Dynamics (CFD) software Fluent was used to simulate the effective cross-flow velocity, the jet concentration trajectory, the velocity field, and the concentration field of two tandem jets in cross-flow with different spacing. The results show that, as the spacing of nozzles increases, the sheltering effect of the first jet weakens, the effective cross-flow velocity increases, and the degree of curvature of the jet concentration trajectory increases. Near the jet, there is an exponential relationship between the concentration trajectory and the distance downstream of the nozzle with an exponent of $1/2$, and an exponential relationship between the concentration trajectory and the spacing of nozzles with an exponent of -0.27 . At more distance from the jet, there is an exponential relationship between the concentration trajectory and the distance downstream of the nozzle with an exponent of $1/3$, and an exponential relationship between the concentration trajectory and the spacing of nozzles with an exponent of -0.18 . The spacing of jets has little influence on the concentration of the first jet. However, the concentration of the second jet decays faster in the direction of flow when the spacing of nozzles decreases, and the concentration grows more stable when the distance from the nozzle is greater than eight times the nozzle diameter.

Key words: multiple tandem jets; spacing of nozzles; dilution property; effective cross-flow velocity; concentration trajectory; concentration field

横流中多孔射流是污水排放中的一种典型流动形式, 对其稀释特性的了解是多孔扩散器设计的关键。影响横流中多孔射流稀释特性的主要因素有射流孔个数、射流横流速度比 R 和射流孔间距 S 。对于前两个因素, 研究比较充分, 如 Yu 等^[1]、肖洋等^[2-3]通过粒子图像测速技术(PIV)和激光诱导荧光技术(LIF)两种手段, 分析了 R 对横流中多孔射流横向有效流速和射流浓度轨迹线上稀释特性变化

的影响; Li 等^[4]、Xiao 等^[5]运用计算流体动力学商业软件 Fluent 中的 realizable $k-\varepsilon$ 模型对射流孔间距为5倍孔径($S=5D$)情况下横流中的单孔和多孔射流(2、3、4孔)进行了数值计算, 得到了射流浓度轨迹线、浓度半宽以及浓度轨迹线上流速衰减和稀释度的变化规律; 李少华等^[6]运用 realizable $k-\varepsilon$ 模型, 对不同 R 条件下1、2、4孔射流的涡量场进行分析。对射流孔间距 S 在流动特性方面的研究较多, 如

Yu^[1]研究了 $S/D=2,3,5,10,15$ 情况下两孔射流的射流浓度轨迹线和横向有效流速的变化;Li 等^[4]通过数值模拟研究了两孔射流 $S/D=5,10,15$ 情况下射流浓度轨迹线和两射流的汇合点;卢晓江等^[7]运用标准 $k-\varepsilon$ 模型分析了不同孔间距下两孔射流的速度分布。由于在稀释特性方面的系统研究不多,笔者采用数学模型研究了不同射流孔间距 ($S/D=2,3,5,7,9$) 下横流中两孔射流的射流浓度轨迹线、横向有效流速、射流速度场以及稀释特性等。

1 模型的建立

1.1 控制方程

控制方程采用不可压缩雷诺平均 N-S 方程组:水流连续方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

其中
$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

式中: ρ 为密度; u_i, u_j, u_k 分别为 x, y, z 方向上的速度分量; p 为动压强; τ_{ij} 为雷诺应力; μ 为流体的动力黏度。

通过 Boussinesq 假设可将雷诺应力和平均速度梯度联系起来,其表达式为

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \tag{3}$$

式中: μ_t 为紊动黏性系数; k 为紊动能。

计算采用 realizable $k-\varepsilon$ 模型:

k 方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \tag{4}$$

$$\varepsilon \text{ 方程 } \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \rho S \varepsilon - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \tag{5}$$

其中
$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

$$c_1 = \max \left\{ 0.43, \frac{\eta^*}{5 + \eta^*} \right\}$$

$$c_2 = 1.9 \quad \eta^* = \frac{S k}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: ε 为耗散率; ν 为流体的运动黏度。 μ_t 的计算公式为

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \tag{6}$$

其中

$$c_\mu = \frac{1}{4.0 + \sqrt{6} \cos \varphi U^{(*)} k / \varepsilon}$$

$$\varphi = \frac{\arccos \sqrt{6} S}{3}$$

$$S = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}}$$

$$U^{(*)} = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij}^* \Omega_{ij}^*}$$

$$\Omega_{ij}^* = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

式中: ω_k 表示旋转角速度; $\bar{\Omega}_{ij}$ 为角速度 ω_k 参考系中的时均转动速率张量; ε_{ijk} 表示黏性耗散项。

采用示踪物质量守恒方程模拟射流示踪物的标量输运,其计算公式为

$$u_j \frac{\partial(\rho C)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{S_i} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \tag{7}$$

式中: C 为污染物浓度; S_i 为紊动 Schmidt 数,本文取 0.7。

1.2 计算模型和网格剖分

图 1 为射流区域中心平面示意图,多孔射流沿

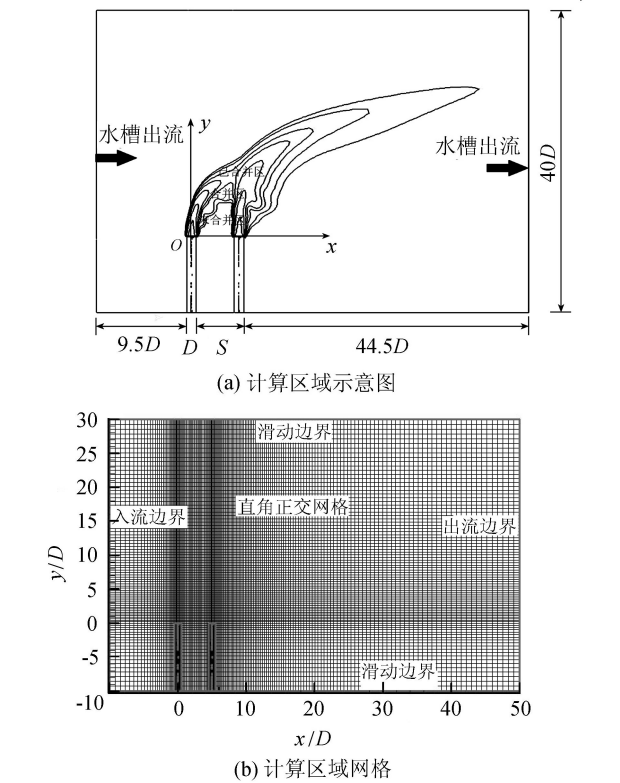


图 1 射流区域示意图

水平方向射入环境水体,方向与环境水体流动方向垂直。计算区域由主水槽和射流管两部分组成。射流管孔径 $D=0.01\text{ m}$,长度 $L=10D$ 。主水槽沿横向(y 方向)宽为 $40D$,沿垂向(z 方向)高为 $40D$,沿流向(x 方向)的长度随孔距的不同而变化。环境水体入流边界位于迎流方向第1个射流管中心上游 $10D$ 处,出流边界位于第2个射流管出口中心下游 $45D$ 处。共设11种工况,其中M系列为 $R=6.1$ 的工况,S系列为 $R=4.6$ 的工况,如表1所示,表中 U_0 为射流流速, U_a 为横流流速, R 为射流横流比, $R=U_0/U_a$,射流出口初始动量 $M_0=U_0^2\pi D^2/4$,射流动量长度尺度 $l_m=M_0^{1/2}/U_a$ 。为便于比较, $S/D=5$ 工况与文献[2-3]的试验工况相同,其中MJ03、SJ03工况分别与文献[3]中的L2J02、L2J03工况相同,NJ01工况与文献[2]中的P2J02工况相同。水槽区域网格采用结构化网格,射流管区域采用楔形网格,对射流出口处和多孔射流交汇处等流动较为复杂的区域进行局部加密^[8]。

表 1 计算工况							
工况	$U_0/$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	$U_a/$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	R	l_m/cm	S/D	水槽长度/ cm	网格数
MJ01	59.1	9.7	6.1	5.4	2	57	1520720
MJ02	59.1	9.7	6.1	5.4	3	58	1579040
MJ03	59.1	9.7	6.1	5.4	5	60	1695680
MJ04	59.1	9.7	6.1	5.4	7	62	1812320
MJ05	59.1	9.7	6.1	5.4	9	64	1928960
SJ01	88.3	19.3	4.6	4.1	2	57	1520720
SJ02	88.3	19.3	4.6	4.1	3	58	1579040
SJ03	88.3	19.3	4.6	4.1	5	60	1695680
SJ04	88.3	19.3	4.6	4.1	7	62	1812320
SJ05	88.3	19.3	4.6	4.1	9	64	1928960
NJ01	128.4	19.4	6.6	5.9	5	60	1695680

1.3 边界条件

上游入流边界 x 向流速 $U=U_a$, y 、 z 向流速 $V=W=0$,污染物浓度 $C=0$,紊动强度 $I=0.01$,水力直径 $D_H=0.444\text{ m}$,紊动能 $k=1.5(U_a)^2$,耗散率 $\varepsilon=0.09^{3/4}\cdot k^{3/2}/l$,紊动长度尺度 $l=0.07D_H$ 。射流流速 $V=U_0$,方向沿 y 轴, $C=C_0$, $I=0.1$, $D_H=0.01\text{ m}$, $k=1.5(U_0)^2$, $\varepsilon=0.09^{3/4}k^{3/2}/l$, $l=0.07D_H$ 。出流边界采用自由出流,即 $\partial V/\partial x=\partial W/\partial x=\partial C/\partial x=0$ 。水槽边壁定义为滑移边界条件,切应力为零。射流管与水槽的交界面采用交界面边界。射流管壁边界采用无滑动边界条件,近壁网格节点采用标准壁函数方法处理。

1.4 计算方法

利用有限体积法^[9](finite volume method)离散求解三维N-S方程。压力-速度耦合基于SIMPLEC算法^[10],压力的插值格式采用标准格式,空间离散

采用QUICK格式。各方程的计算残差小于 1×10^{-5} 时认为计算收敛,或监测某一点流速,当该点流速随迭代次数基本不变时,也可认为计算收敛。

1.5 模型的验证

MJ03、NJ01工况射流浓度轨迹线及横向有效流速的计算结果与文献[2-3]试验值的对比见图2。由图2可知,两者吻合良好。

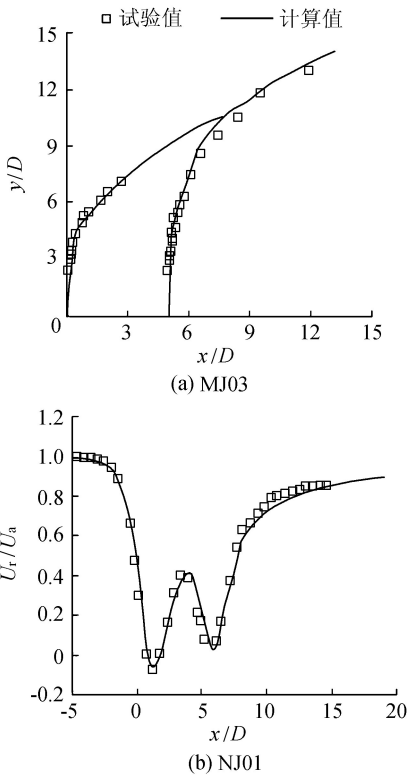


图2 计算结果与试验结果的对比

2 计算结果分析

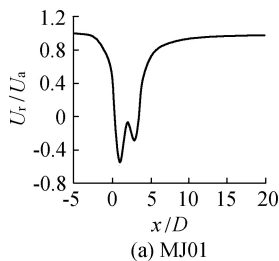
2.1 横向有效流速

横向有效流速可反映横向流动对射流作用的强弱和第1个射流对横向流动的遮挡,其表达式如下^[2]:

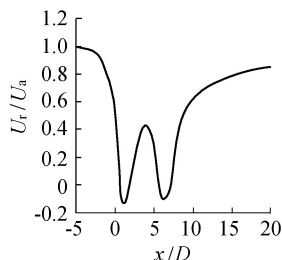
$$U_r = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} U dy \tag{8}$$

图3为不同 S/D 情况下横向有效流速的沿程变化($R=6.1$)。由图3可见, $x/D<-2$ 时,横向有效流速 U_r/U_a 接近于1。随 x/D 的增大,受第1个射流的遮挡, U_r/U_a 急剧减小,在第1个射流后达到最小值 U_{r1} , $S/D=2、5、9$ 时, U_{r1}/U_a 分别为 $-0.58、-0.19$ 和 -0.17 。两射流孔间,环境水体分为两个区域,前一部分水体被第1个射流卷吸,后一部分水体被第2个射流卷吸^[1],第1个区域内, U_r/U_a 逐渐上升,达到极大值 U_{r0} ,第2个区域内, U_r/U_a 急剧下降至另一个最低点。第2个射流后, U_r/U_a 又逐渐上升,最后接近于1。

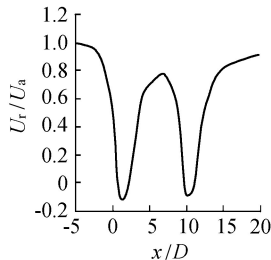
图4为不同孔距下最大横向有效流速的变化,



(a) MJ01



(b) MJ03



(c) MJ05

图3 射流中心平面横向有效流速 U_t/U_a 沿程的变化 ($R=6.1$)

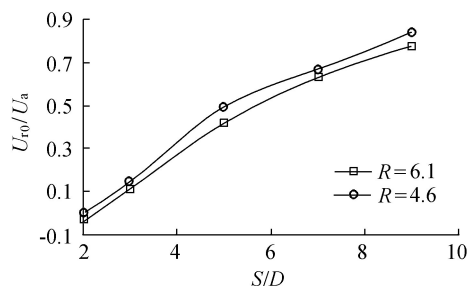


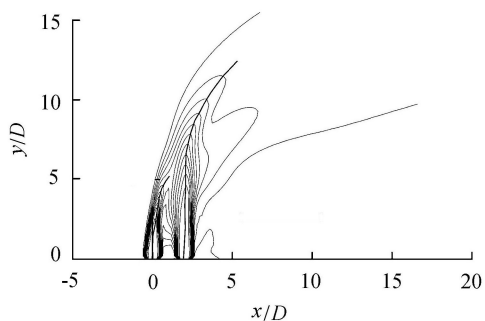
图4 不同孔距下最大横向有效流速的变化

由图4可知,射流孔间距越大,最大横向有效流速 U_{t0}/U_a 越大,第1个射流对第2个射流的遮挡越小。不同射流横流比情况下,射流横流速度比 R 越小,最大横向有效流速越大,表明射流横流速度比越小,射流对横流的遮挡作用越小。

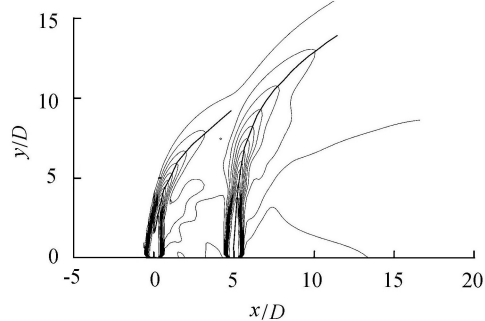
2.2 射流速度场

射流中心平面流速等值线见图5,图中绘制了时均合成速度最大点的连线,即射流速度轨迹线。由图5可知,射流速度轨迹线与浓度轨迹线类似,射流孔间距越大,作用于第2个射流的横向有效流速越大,第2个射流的弯曲度越大。

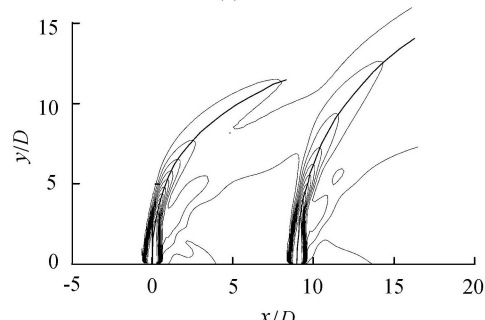
不同射流孔间距条件下的射流等值线均会出现分叉,其中上面的分支为射流的初始动量所致,下面的分支由流向涡所致^[4]。一般情况下,射流速度等值线的分叉会出现在第1个射流之后。但由于孔间距不同,可能在第1个射流出现分叉之前便与后面的射流合并为一股水流,使得合并后的水流出类似单孔射流的运动特征,即在合并后出现分叉。由图5(a)可知,当孔间距较小时 ($S/D=2$),第1个射流后的水体受第2个射流影响较大,流向涡作用较弱,第1个射流没有出现分叉;由于两股水流合并较早,合并后射流水体仍有较大的动量和较大的流



(a) $S/D=2$



(b) $S/D=5$



(c) $S/D=9$

图5 射流中心平面速度场等值线 ($R=6.1$)

向涡作用,在两个射流合并后出现分叉。随着孔间距的增大,两个射流的相互作用减弱,第1个射流出现分叉现象,由于两个射流合并较晚,两股水流合并时的射流动量较小,流向涡对合并后水体的作用减弱,合并后不出现分叉,见图5(b)(c)。

2.3 射流浓度轨迹线

图6对比了射流横流速度比 $R=6.1$,射流孔间距 $S/D=2,3,5,7,9$ 情况下两孔射流浓度轨迹线。图6(a)是射流汇合前第1个射流浓度轨迹线,可知不同孔间距下第1个射流浓度轨迹线弯曲度变化不大。图6(b)为射流汇合前第2个射流浓度轨迹线,由于射流孔间距不同,第2个射流轨迹线的 x 坐标不同,为便于比较,将第2个射流孔中心设为坐标原点,用 x' 坐标表示,由图可知,由于第1个射流对第2个射流的遮挡作用和两射流间的卷吸作用,第2个射流浓度轨迹线的弯曲程度小于第1个射流,随着孔间距的增大,第1个射流的遮挡作用和两射流间的卷吸作用减小,作用于第2个射流的横向有效

流速增大,使其浓度轨迹线弯曲程度增大。

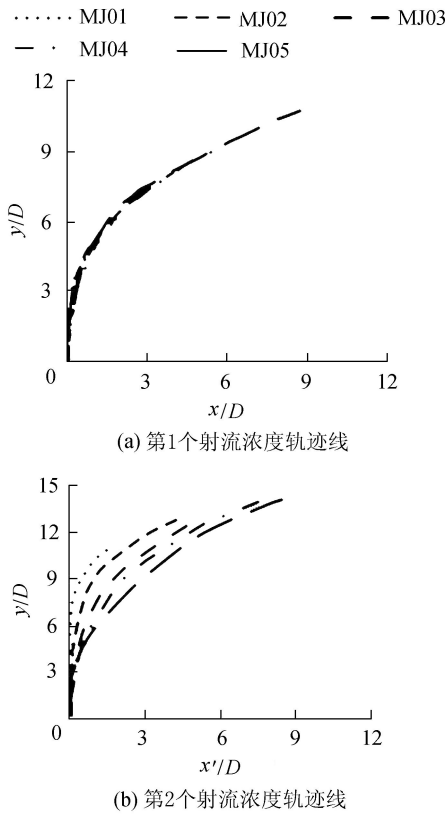


图6 各工况射流浓度轨迹线(R=6.1)

对于第2个射流,肖洋等^[3]指出在射流孔间距S/D=5的情况下射流近区的射流无量纲浓度轨迹线y/l_m与下游距离x'/l_m呈1/2的指数关系,射流远区的y/l_m与x'/l_m呈1/3的指数关系。Li等^[4]的研究表明孔间距固定情况下射流合并后y/l_m与x'/l_m呈1/3的指数关系,并指出随着孔间距的增大,其弯曲程度增大,但并未给出y/l_m、x'/l_m和S/D之间的关系。笔者考虑3个未知参数后将y/l_m与S/D的关系拟合如下:

$$\frac{y}{l_m} = k_1 \left(\frac{x'}{l_m} \left(\frac{S}{D} \right)^{k_3} \right)^{1/2} \quad (\text{射流近区}) \quad (9)$$

$$\frac{y}{l_m} = k_2 \left(\frac{x'}{l_m} \left(\frac{S}{D} \right)^{k_3} \right)^{1/3} \quad (\text{射流远区}) \quad (10)$$

经拟合可知未知参数k₁=11.393, k₂=16.537, k₃=-0.54,拟合曲线见图7。射流近区的y/l_m与

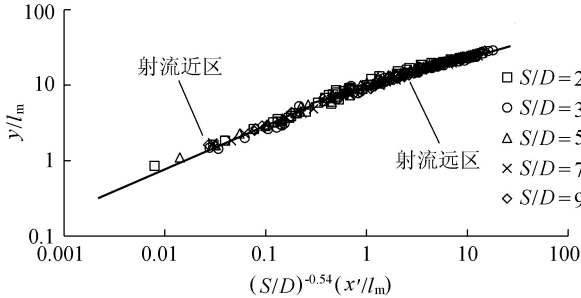


图7 射流无量纲浓度轨迹线与下游距离的关系

x'/l_m呈1/2的指数关系,与S/D呈-0.27的指数关系;射流远区的y/l_m与x'/l_m呈1/3的指数关系,与S/D呈-0.18的指数关系,表达式如下:

$$\frac{y}{l_m} = 11.393 \left(\frac{x'}{l_m} \right)^{1/2} \left(\frac{S}{D} \right)^{-0.27} \quad (\text{射流近区}) \quad (11)$$

$$\frac{y}{l_m} = 16.537 \left(\frac{x'}{l_m} \right)^{1/3} \left(\frac{S}{D} \right)^{-0.18} \quad (\text{射流远区}) \quad (12)$$

2.4 射流浓度轨迹线上的污染物浓度变化

射流浓度轨迹线上污染物浓度C/C₀越小,污染物的稀释度越高,射流水体与环境水体的掺混越剧烈。图8(a)为第1个射流浓度轨迹线上污染物浓度沿流动方向的变化,图8(b)为第2个射流浓度轨迹线上污染物浓度沿流动方向的变化。由图8(a)可知不同孔间距下第1个射流的污染物浓度变化较为相近,表明孔间距对第1个射流浓度变化影响较小。由图8(b)可知,对第2个射流,在x'/D<8时,孔间距越小,污染物浓度沿x'方向衰减速率越快,表明孔间距越小,射流浓度轨迹线弯曲程度越小,相同x'/D情况下污染物浓度的衰减距离越长。随着x'/D的增加,第2个射流的射流浓度轨迹线弯曲程度逐渐增大,污染物浓度沿水流方向的下降速率明显放缓。当x'/D>8后,各孔间距下污染物浓度趋于一致。

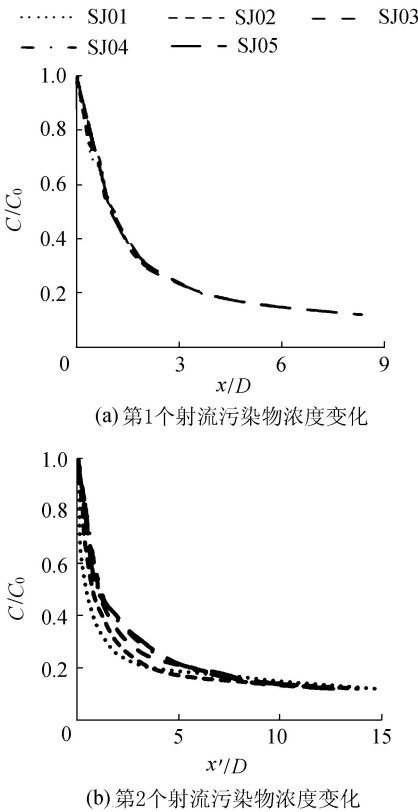


图8 各工况射流浓度轨迹线上污染物浓度的变化(R=4.6)

3 结 论

- a. 随着射流孔距的增大,第 1 个射流对后面射流的遮挡作用减小,两射流孔间横向有效流速的最大值与横流流速的比值 U_{i0}/U_a 增大,使横流对第 2 个射流的作用增大。
- b. 射流的速度场等值线会产生一定程度的分叉,射流孔间距较小时,分叉在两射流合并后出现。射流孔间距较大时,分叉在第 1 个射流后出现。射流孔间距越小,两股水流的掺混作用越剧烈,合并后表现出单孔射流的流动特性。
- c. 不同射流孔间距下,第 1 个射流浓度轨迹线基本一致,第 2 个射流在射流近区其无量纲浓度轨迹线与下游距离呈指数 $1/2$ 的关系,与射流孔间距呈 -0.27 的指数关系;在射流远区,无量纲浓度轨迹线与下游距离呈 $1/3$ 指数关系,与射流孔间距呈 -0.18 的指数关系。
- d. 不同射流孔间距下第 1 个射流的稀释效果基本相同;对于第 2 个射流,射流孔间距越小,污染物浓度沿水流方向衰减速率越快, $x'/D>8$ 后,浓度变化趋于一致。

参考文献:

[1] YU D, ALI M S, LEE J H W. Multiple tandem jets in cross-flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(9): 971-982.

[2] 肖洋,雷鸣,李开杰,等. 横流中多孔射流流动特性试验研究 [J]. 水科学进展, 2012, 23 (3): 390-395. (XIAO Yang, LEI Ming, LI Kaijie, et al. An experimental study on hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 390-395. (in Chinese))

[3] 肖洋,唐洪武,阿依丁别克居马拜. 横流中多孔射流的稀释特性试验研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(5): 35-39. (XIAO Yang, TANG Hongwu, AYIDEN.

Experiments on the scalar concentration field of a multiple jet group in cross-flow [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(5): 35-39. (in Chinese))

[4] LI Zhiwei, HUAI Wenxin, QIAN Zhongdong. Study on the flow field and concentration characteristics of the multiple tandem jets in crossflow [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55: 2778-2788.

[5] XIAO Yang, TANG Hongwu. Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(6): 806-813.

[6] 李少华,袁斌,刘利献,等. 多孔横向紊动射流涡量场的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 100-104. (LI Shaohua, YUAN Bin, LIU Lixian, et al. Numerical investigation on the vortices of multiple turbulent jet in crossflow [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(23): 100-104. (in Chinese))

[7] 卢晓江,刘海舰,阳相. 射流喷头孔间距对射流特性影响的数值模拟[J]. 天津科技大学学报, 2011, 26(5): 47-51. (LU Xiaojang, LIU Haijian, YANG Xiang. Numerical simulation on the influence of the characteristics of the jet of different spacing of multi-hole nozzles [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2011, 26(5): 47-51. (in Chinese))

[8] 方神光,黄胜伟,崔丽琴. 流动环境中高浓度射流的三维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4): 17-21. (FANG Shengguang, HUANG Shengwei, CUI Liqin. Three-dimensional numerical simulation of high-concentration jets in flowing environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2010, 30(4): 17-21. (in Chinese))

[9] 汪德燿. 计算水动力学理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2011.

[10] van DOORMAAL J P, RAITHBY G D. Enhancement of the simple method for predicting incompressible fluid flows [J]. Numerical Heat Transfer, 1984, 7(2): 147-163. (收稿日期:2015-12-21 编辑:骆超)

(上接第 15 页)

[22] 林义成,丁能飞,傅庆林,等. 土壤溶液电导率的测定及相关因素分析[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(2): 83-86. (LIN Yicheng, DING Nengfei, FU Qinglin, et al. The measurement of electric conductivity in soil solution of analysis of its correlative factors [J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 2005, 17(2): 83-86.

[23] 陈丽梅,程敏熙,肖晓芳,等. 盐溶液电导率与浓度和温度的关系测量[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(5): 39-42. (LI Limei, CHEGN Meixi, XIAO Xiaofang, et al. Measurement of the relationship between conductivity of salt solution and concentrati on and temperature [J].

Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(5): 39-42. (in Chinese))

[24] 肖自荣,张由松,牛健值,等. 鹭峰国家森林公园土壤溶质运移特征研究[J]. 湖南农业科学, 2011(15): 63-66. (XIAO Zixing, ZHANG Yousong, NIU Jianzhi, et al. Characteristics of soil solute transport in Jiufeng National Forestry Park [J]. Hunan Agricultural Science, 2011(15): 63-66. (in Chinese))

[25] 崔引娣. 均值非均值饱和土壤溶质运移吸附曲线的比较分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009. (收稿日期:2015-04-10 编辑:熊水斌)