

不同动力环境下孔间距对双孔射流特性的影响

江东勃,陈永平,田万青,孙 朴,王娅娜

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究孔间距对双孔射流运动和稀释特性的影响,采用粒子图像测速技术(PIV)和激光诱导荧光技术(PLIF)分别对静水、横流和波浪环境下双孔射流的速度场和浓度场进行测量,对比分析了孔间距为5倍、10倍和15倍射流孔直径时双孔射流的轴向速度、横断面垂向速度、轨迹线及浓度场分布情况。结果表明:在静水环境下,孔间距较小时双孔射流的轴向速度衰减较单孔射流慢,随着孔间距的增大双孔射流轴向速度衰减的程度逐渐趋近于单孔射流。在横流环境下,随着孔间距的增大,前方射流对后方射流的遮掩作用不断减小,而后方对前方射流的卷吸作用也有所减弱,导致前方射流弯曲程度的增大和后方射流上升高度的降低。在波浪环境下,孔间距较小时,两孔中间存在一个独立的高浓度区;孔间距增大后,浓度等值线逐渐呈“凸”形分布。为降低双孔射流相互作用对射流初始稀释的影响,建议在波浪和横流环境下双孔射流的孔间距不宜小于射流孔直径的10倍。

关键词:双孔射流;孔间距;横流;波浪;速度场;浓度场

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)05-0040-06

Influence of jet spacing on dual jets in different environments//JIANG Dongbo, CHEN Yongping, TIAN Wanqing, SUN Pu, WANG Yana(*College of Harbor Coastal & Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to study the influence of jet spacing on the hydrodynamic and dilution characteristics of dual jets, the velocity and concentration fields of dual jets were studied in stagnant, crossflow, and wave environments using particle image velocimetry (PIV) and planar laser induced fluorescence (PLIF). The axial and cross-section vertical velocity, jet trajectory, and concentration fields were analyzed when the jet spacing varied between $5D$, $10D$, and $15D$, where D is the inner diameter of the jet nozzle. The results indicate that, in a stagnant environment, the decay of the axial velocity for the dual jets with small jet spacing is slow compared with that of a single jet, while it grows faster with the increase of jet spacing and gradually resembles that of the single jet; in a crossflow environment, the shielding effect and entrainment decrease with larger jet spacing, enhancing the bending and lowering the ascending height of jets; and in wavy conditions, there is a dependent high concentration area in the middle of two jet holes with small jet spacing and contour lines grows to be bulge-shaped with larger jet spacing. To reduce the influence of spacing on initial dilution, it is advised that the jet spacing should be larger than $10D$ in crossflow and wave environments.

Key words: dual jets; jet spacing; crossflow; wave; flow field; concentration field

沿海地区污水处理厂的达标尾水通常经海底管道由扩散器向深海排放^[1]。当尾水离开扩散器后,将以射流形式向前行进,并与周围的海水发生强烈掺混,尾水中污染物质的浓度沿程降低。在实际排放工程中,为了在有限的混合区内尽快降低尾水中污染物的浓度,往往采用2个或多个喷头进行排放,由此形成双孔或多孔射流。为了达到比较理想的排放效果,双孔或多孔射流的孔间距不宜过大,也不宜过小;过大则有可能形成多个分散的混合区,过小则

相邻孔之间的射流相互约束,各孔射流的初始稀释效率明显降低^[2]。由此看出,孔间距的大小对于双孔或多孔射流运动和扩散特性的影响非常明显。

以往针对双孔或多孔射流的研究多在比较简单的环境如静水^[3]或横流^[4-5]中进行,且研究的重点为相邻孔口射流之间的相互作用机制,对孔间距的影响研究不够系统。在实际海域中,射流除了受横流作用外,还受到波浪的影响,根据前人的研究^[6-8],单孔射流在波浪环境下的运动特性与在静水或横流环境有

基金项目:国家自然科学基金(51379072);高等学校博士学科点科研专项(20120094110016)

作者简介:江东勃(1990—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail: hhujd@163.com

通信作者:陈永平(1976—),男,教授,博士,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail: ypch@hhu.edu.cn

着显著的不同,稀释效果也存在较大的差异,由此可以推断,双孔射流在波浪环境下的表现也应具有一定的独特性。为了掌握不同动力环境下孔间距对双孔射流特性的影响,笔者分别开展了静水、横流和波浪环境下双孔射流的试验研究,通过分析不同孔间距条件下射流的速度场和浓度场,以确定不同动力环境下双孔射流特有的运动和扩散机制,为沿海排放工程中双孔或多孔排放工程的优化设计提供参考。

1 试验装置及试验工况

1.1 试验装置

本次试验在河海大学波流实验水槽(图1)中进行,该水槽长46.0 m,宽0.5 m,高1.0 m,水槽壁面为钢化玻璃。水槽的初始端为造波机,能够产生试验所需的各种类型波浪,尾端布置了由碎石块组成的消波装置,可以有效减小波浪反射的影响。造波机基于推波板式的工作原理,最高可生成波高为0.2 m、波周期为0.6~2.5 s的波浪。2台放置于地下水库的潜水泵抽水进入水槽侧边的整流池,在两端阀门和后端三角堰的配合下,产生一定速度的水流,最大流速为0.25 m/s。试验区域位于水槽中部,该区域流态较稳定,受造波机和波浪反射的影响相对较小。试验中,射流前进管尾端接射流源,4个射流管位于射流前进管的前端部分,第1个射流孔到前进管最前端的距离为20 cm,整个前进管长度为2 m,横断面尺寸为50 mm×50 mm。射流孔直径 $D=10$ mm,射流管的长度为50 mm,2个射流孔的距离

为50 mm。沿水流前进的方向依次为孔1、孔2、孔3、孔4。打开的孔口为孔1、孔2时,孔间距 $S=5D$;打开的孔口为孔1、孔3时,孔间距 $S=10D$;打开的孔口为孔1、孔4时,孔间距 $S=15D$ 。为了方便处理试验数据,将 x 轴、 z 轴的起始点均设置在孔1中心处。试验观测范围为 $-10\text{ cm}<x<35\text{ cm}$, $-2\text{ cm}<z<35\text{ cm}$ 的矩形区域(即图1虚线框部分)。

1.2 试验工况

为了研究射流孔间距对双孔射流运动和扩散特性的影响,先后开展了静水、横流及波浪3种动力环境下双孔射流的试验。试验中波流水槽静水深为50 cm。分别采用PIV和PLIF系统对射流的速度场和浓度场进行了测量,所用的染色剂为Rhodamine 6G,射流初始质量浓度为0.1 mg/L,拍摄频率为7.25 Hz。所有工况的拍摄时间均为80 s。通过计算拍摄时间内的速度和质量浓度的时均值,可以消除射流管内水流紊动的影响^[9]。在控制阀门和射流前进管之间安装有转子流量计,用于控制和测定试验中的射流流量,表1中的射流初始速度由此流量推算得到。需要说明的是由PIV直接测量的射流出口速度略小于该值,这可能是由于PIV视窗拍摄范围选取较大,而出口处流速变化较快,因此在射流出口处的量测精度相对偏低。通过对静水环境下单孔射流(工况S-0,开启的孔口为孔1)的研究发现,在距射流口6D的高度上,PIV测量结果与经典的理论值^[10]吻合很好,因此在后续的研究中分析高度6D以上的测量结果。所有试验组次中射流出口的雷诺数均大于自由射流出口的临界雷诺数^[11]。

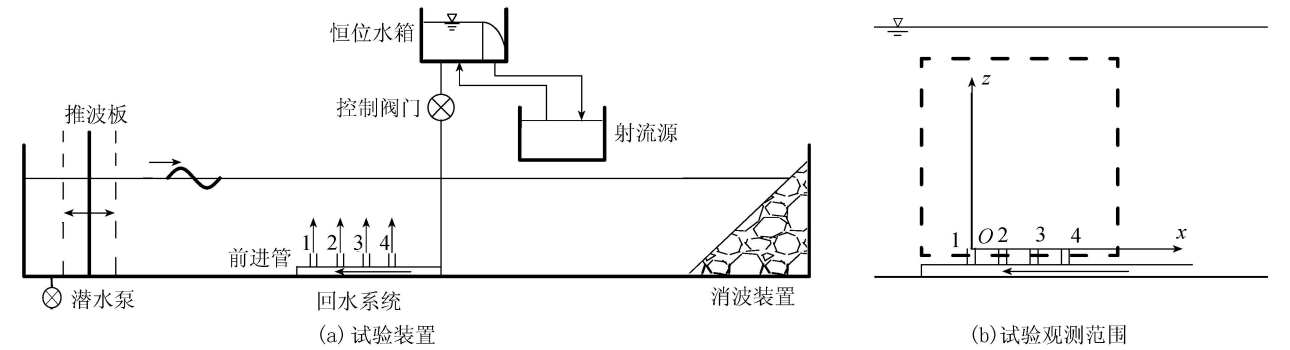


图1 试验装置及观测范围

表1 不同动力环境下双孔射流试验组次

静水环境			横流环境					波浪环境				
组次	孔间距	射流流量/ (L·h ⁻¹)	组次	射流初始速度/ (cm·s ⁻¹)	横流流速/ (cm·s ⁻¹)	孔间距	射流流量/ (L·h ⁻¹)	组次	波高/cm	波周期/s	射流流量/ (L·h ⁻¹)	孔间距
S-0		200	C-1	67.36	5.48	5D	400	W-1	6.0	1.0	400	5D
S-1	5D	400	C-2	67.36	5.48	10D	400	W-2	6.0	1.0	400	10D
S-2	10D	400	C-3	67.36	5.48	15D	400	W-3	6.0	1.0	400	15D
S-3	15D	400	C-4	67.36	7.40	5D	400					
			C-5	106.27	7.40	5D	600					
			C-6	67.36	5.48	5D	400					
			C-7	67.36	5.48	10D	400					

2 试验结果分析

2.1 静水环境下的双孔射流

射流在上升过程中,射流主体与环境水体之间不停地掺混和卷吸使得射流速度不断减小。与单孔射流不同的是,双孔射流只有外侧与环境水体进行掺混和卷吸,内侧的扩散则受到了另外一股射流的制约,使得双孔射流的速度衰减与单孔射流有着一定的区别。随着孔间距的增大,射流与环境水体之间的卷吸掺混越来越强,并逐渐成为射流速度衰减的主导因素。

图2为静水环境下不同工况双孔射流中第1个孔的射流口轴向速度衰减曲线,图中 u_c 为射流口正上方任意横断面中心处的轴向速度, u_0 为射流出口的初始速度,试验中的数据进行了无量纲化处理。从图2可以看出,静水条件下双孔射流与单孔射流的轴向速度均沿轴向发生衰减,但双孔射流的衰减速度比单孔射流慢。当孔间距较小($S=5D$)时,速度衰减的反比关系并不是很明显,这是由于双孔中另外一个射流的存在,使得射流两侧受力并不均衡,射流之间的反向涡对减缓了射流轴向速度的衰减,且射流上升到某一位置时2股射流已经发生了混合,因此射流的轴向速度衰减与单孔射流存在一定的差别。随着孔间距的增大($S=10D,15D$),双孔射流的轴向速度衰减明显加快,速度分布规律也越来越接近于单孔射流的经典理论关系^[10]。可以推测,

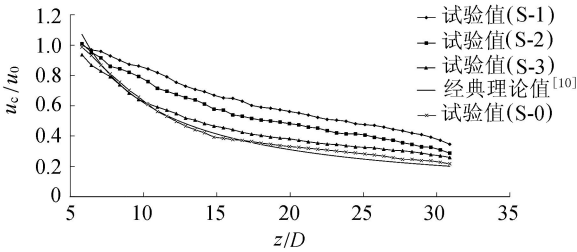


图2 静水环境下不同工况射流轴向速度衰减曲线

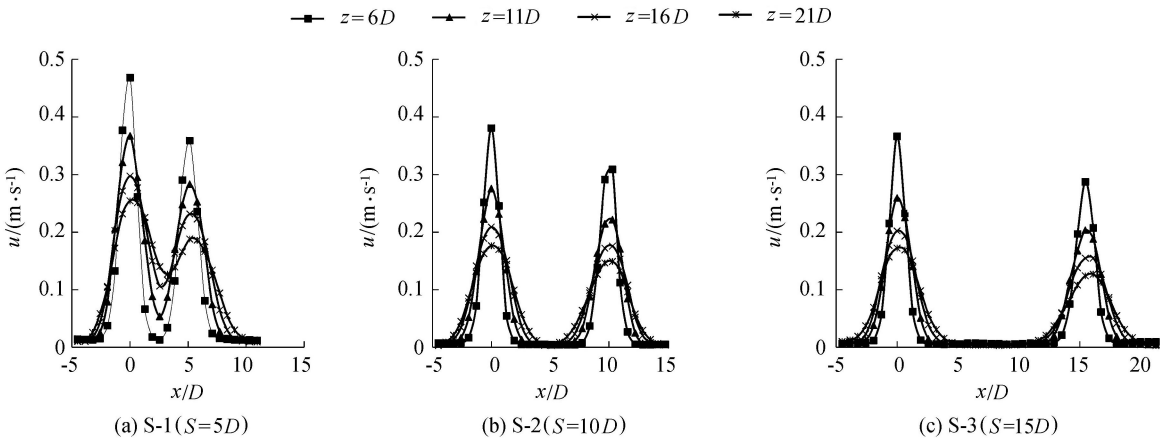


图3 不同孔间距时静水射流横断面垂向流速分布

当射流的孔间距进一步增大时,2股射流的相互影响将明显降低,双孔射流的轴向速度衰减规律也将与单孔射流保持一致。

图3为静水条件下垂向速度 u 在双孔射流口上方4个断面(射流口上方与4个孔口平行的横断面)的分布情况,各断面到射流口的距离分别为 $6D,11D,16D,21D$ 。从图3可知,双孔射流的每孔垂向速度均保持为较好的高斯分布,这与前人观测到的结果基本一致^[12]。当孔间距较小($S=5D$)时,在距离射流口 $11D$ 的横断面上2股射流发生了较为明显的混合;当孔间距较大($S=10D,15D$)时,2股射流间的混合已不明显。注意到双孔射流2个射流孔的出口流速并不相等,这种现象在前人的研究^[13]中有所提及,但并未给出清晰的解释。经分析,试验中出现这种现象可能有2个原因:①射流在前进管中存在着能量损失,使得射流在前进过程中速度逐渐减小;②在本试验中,前进管的截面尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,其面积远远大于2个孔的面积之和 157 mm^2 ,前进管中的射流在经过射流口时只有一小部分通过射流口射出,其余的大部分由于惯性将继续向前运动,因此在前进管的最前端部分存在这—个高压区,这会使得第1个射流口的出口速度偏大。

图4为静水环境下3种工况的射流浓度等值线,图中数值为相对浓度,即实测浓度 C 与初始浓度 C_0 的比值。从不同工况的浓度等值线分布可以看出,随着孔间距的增大,2股射流的混合起始点(浓度分布图上2股射流混合成1股的位置,即图4(a)(b)(c)中2股射流之间相对浓度分别为0.5、0.3、0.2的等值线顶部)的浓度越来越低。就单个射流的轴向浓度来看,在距离射流孔口上方 $20D$ 的范围内,射流孔1的浓度均比孔2衰减慢,这与速度的衰减规律是一致的。此外,随着孔间距的增大,同样高度处的浓度值也在缓慢降低,说明增大孔间距可以降低双孔射流相互作用对射流初始稀释过程的影响。

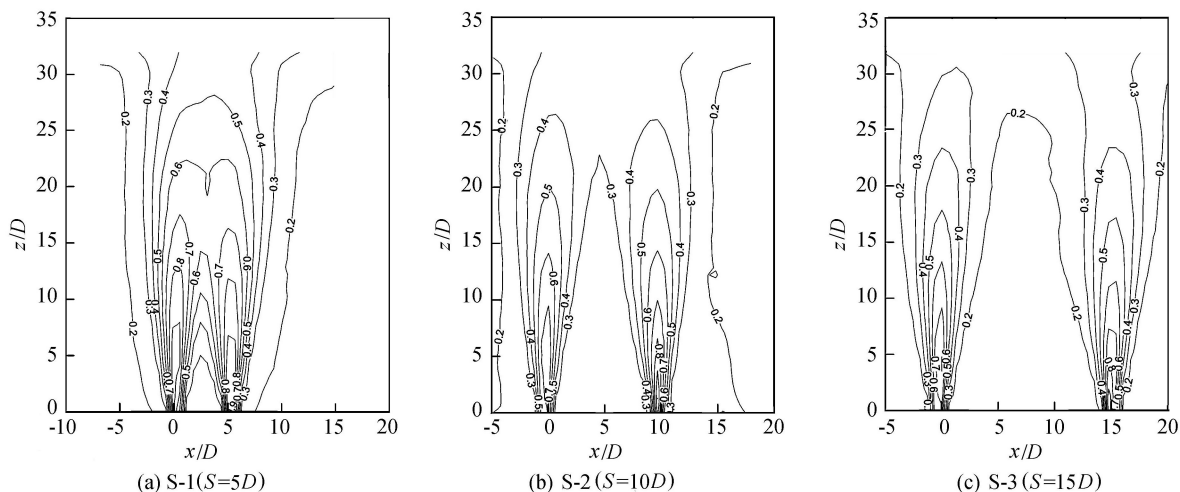


图4 静水环境下3种工况的射流浓度等值线

2.2 横流环境下的双孔射流

为研究横流中双孔射流的速度场,共进行了7组试验(试验组次见表1),主要研究内容为横流作用下双孔射流的轨迹线形态特征及双孔射流轨迹线混合点与环境变量之间的定量关系。图5为横流环境下工况C-1、C-2、C-3双孔射流的轨迹线。从图5可以看出,随着孔间距的增大,第1个孔的弯曲程度明显增加,其原因是第2个孔对第1个孔卷吸作用减弱,导致第1个孔轴向速度衰减加快,对横流的“阻挡”作用有所减弱;同时也注意到第2个孔直线上升的高度越来越低,轨迹线也越来越弯曲,这主要是因为第1个孔对第2个孔的遮掩作用有所减弱,使得第2个孔的射流有机会卷吸更多的环境水体,当2股射流汇合成1股射流后共同前进的高度随之降低^[4]。需要说明的是,本项研究主要针对孔间距对双孔射流特性的相对变化进行研究,横流环境下的射流不同于静水环境下的射流主要体现在轨迹线的随流偏转,为了简化问题,在分析的过程忽略了前后2个孔射流出口流速间的偏差所带来的影响。

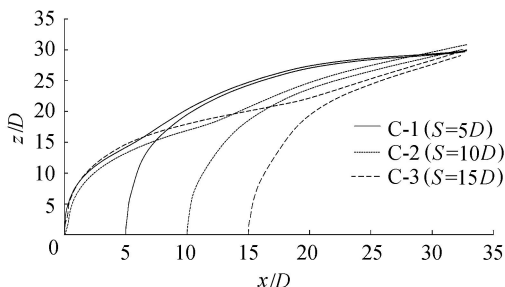


图5 横流环境下3种试验工况的双孔射流轨迹线

在横流作用下,双孔射流轨迹线的弯曲主要受流速比 α (射流出口的初始速度 u_0 与横流速度 u_a 之比)和孔间距 S 的影响^[14],而衡量多孔射流掺混稀释特性的一个很重要指标为射流完全混合点(full merge point)到射流出口的距离 X_{fm} ,目前针对双孔

射流的 X_{fm} 缺少一个定量的公式对其进行预测。为此,参照Moawad等^[15]的处理方法,以 $S/(\alpha D)$ 为横坐标, $X_{fm}/(\alpha D)$ 为纵坐标,将全部7组试验的试验数据绘制在坐标系中,结果见图6。文中,在某一 $S/(\alpha D)$ 后2股射流的轨迹线斜率相差小于10%,即认为该 $S/(\alpha D)$ 对应的点为2股射流的完全混合点。通过曲线拟合, X_{fm} 与 α 、 S 呈如下经验关系:

$$\frac{X_{fm}}{\alpha D} = 15.816 \left(\frac{S}{\alpha D} \right)^{0.8736} \quad R^2 = 0.9808 \quad (1)$$

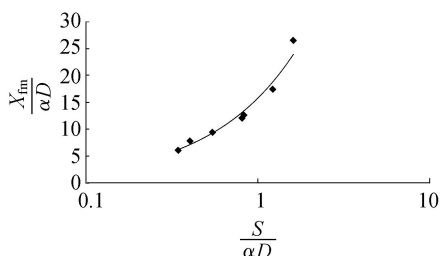


图6 射流汇合点与试验变量的关系

图7为横流环境下3种工况(C-1、C-2和C-3)的射流浓度等值线。从图7可以看出,随着孔间距的增大,第2个射流的弯曲程度越来越大,2股射流混合后上升的高度也越来越低,这与射流轨迹线呈现出的规律一致(图5)。从单个浓度区间分布范围来看,孔间距较小时,单个浓度区间分布范围较宽,主要是因为孔间距较小时2股射流混合较快,射流的叠加使得其扩散到相同程度需要更大的区域。从测量区域右侧边界的浓度来看,随着孔间距的增大,观测区域右侧边界上浓度等值线的间距有缩窄的趋势,这是因为孔间距扩大之后双孔射流逐渐接近于2个独立的单孔射流,前方射流对后方射流的“遮掩”作用越来越弱,不利于后方射流的上升。当孔间距为10D和15D时,观测区域右侧浓度分布较为相似,说明当孔间距大于10D后,孔间距对各孔浓度的初始稀释过程影响相对较小。

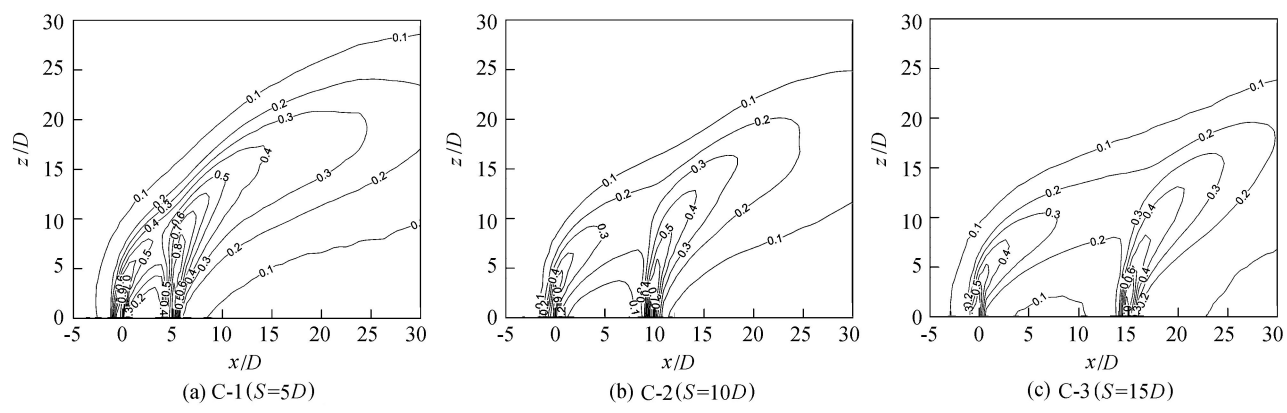


图7 横流环境下3种工况的双孔射流浓度等值线

2.3 波浪环境下的双孔射流

图8为波浪环境下3组试验工况(W-1, W-2和W-3)的射流横断面垂向流速分布。将其与图3对比可知,波浪环境下射流的展宽明显比静水环境下宽很多,不同断面处的速度分布的相似性也比静水环境下差很多。就单孔射流而言,波浪的质点左右摆动加剧了射流水体在水平方向的扩散,射流轴线处速度较大的水体逐步向两侧扩散,射流速度在横断面上呈现“双峰”分布的现象^[6,16]。在双孔射流的情形下,当双孔间距较小($S=5D$)时,由于两孔射流之间的相互作用,速度峰值出现在两孔之间的位置,在其两侧出现了2个相对较小的峰值;随着孔间距的增大($S=10D, 15D$),各自射流的上方均出现了类似于单孔

射流的“双峰”分布的现象,随着横断面高度的上升,射流之间相互融合,横断面垂向流速呈扁平状分布。

图9为波浪环境下上述3种试验工况的浓度等值线和速度场,图中浓度值为相对浓度,速度矢量的长度与其绝对速度的大小成正比。与静水环境下的

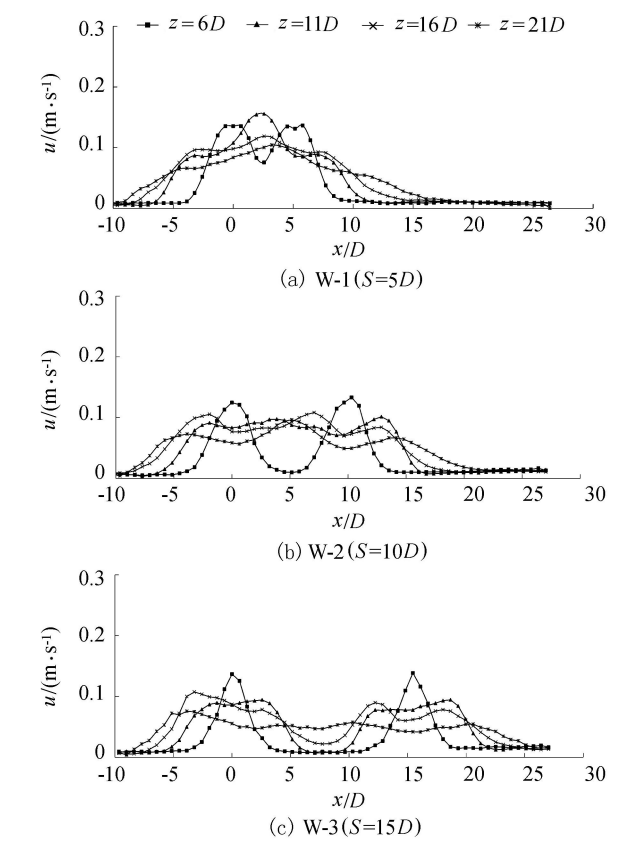


图8 波浪环境下3种试验工况的射流横断面垂向流速分布

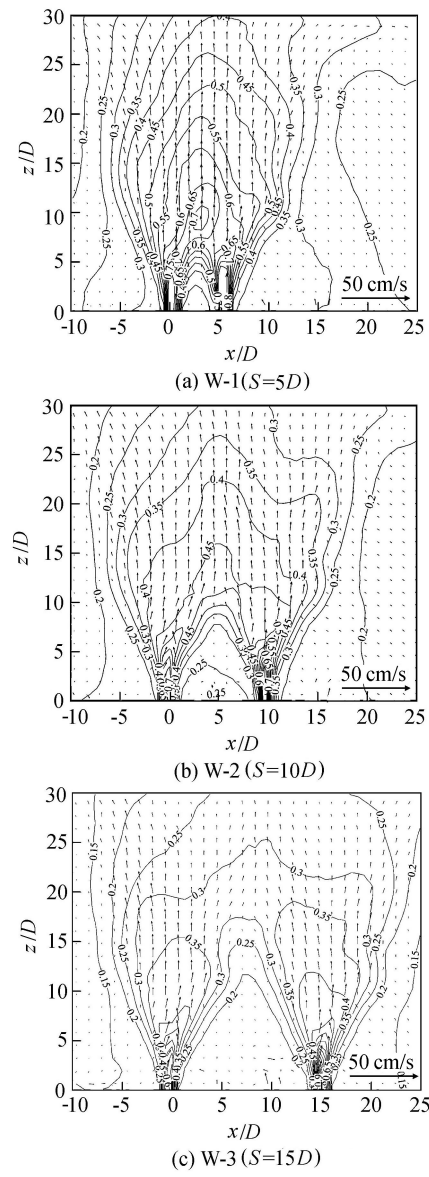


图9 波浪环境下3种试验工况的浓度等值线及速度场

射流对比可知,波浪的存在使得射流的初始稀释程度明显增强。随着孔间距的增大,测量区域相同高度处的轴向平均速度和浓度均相应减小,这主要是由于孔间距的增大使得2股射流的叠加区域变小,这与静水环境下孔间距对射流运动和扩散特性的影响一致。从速度场和浓度场的对应分布来看,在图8(a)及图9(a)中 $z=11D$ 的横断面上,两孔间的速度明显大于两侧,在图9(a)中的对应区域则存在着一个独立的高浓度区,而当孔间距为 $15D$ 时, $z=11D$ 和 $z=16D$ 断面上两孔中间速度值较小,但浓度值却较大。经分析出现这种情况的原因为:当孔间距为 $5D$ 时,该区域2股射流已经开始混合,水体紊动也更加强烈,速度的叠加使得该处浓度值较高;当孔间距为 $15D$ 时,2股射流在 $z=11D$ 附近开始混合,波浪的水平速度能够将射流中间浓度较高的部分向两侧输移并在 $x/D=7.5$ 附近叠加,因此该处浓度、射流分布宽度增大,另外速度矢量图也显示出该区域时均速度非常小,不利于物质的稀释和扩散。此外,孔间距从 $5D$ 增大到 $15D$ 时,流场中的独立高浓度区逐渐消失,2股射流的中间部分区域则呈现出“凸”形分布,其原因可以解释为,孔间距增大后,2股射流的浓度等值线越来越相似,说明射流的相互影响越来越小,开始混合、叠加的位置也越来越高,在“凸”形分布的上半部分正是2股射流开始混合的位置,混合后射流的叠加使得该处呈“凸”形分布。

3 结 论

本文运用PIV和PLIF技术对静水、横流、波浪环境下的垂向圆管双孔射流进行了试验研究,以探究不同孔间距对双孔射流运动特性的影响。在试验中,射流孔间距分别设置为 $5D$ 、 $10D$ 、 $15D$,通过对比测量结果,分析了不同工况下的射流轴线速度衰减、浓度场及孔间距对射流扩散稀释特性的影响,得到了以下几个主要结论:①在静水环境下,双孔射流的轴向速度衰减比单孔射流慢,随着孔间距的增大,双孔射流的速度衰减有所加快,并逐渐趋近于单孔射流;②在横流作用下,随着孔间距的增大,前方射流对后方射流的遮掩作用不断降低,这会使得第2个孔射流上升高度的减小和2股射流汇合成1股射流后共同上升高度的降低;③在波浪环境下,孔间距较小时两孔中间存在着一个独立的高浓度区,随着孔间距的增大两孔中间部分区域将会出现“凸”形分布;④综合所有组次的试验研究发现,在静水环境下,孔间距大于 $10D$ 之后,2股射流基本没有相互影响,而在横流和波浪环境下,孔间距大于 $10D$ 之后,2股射流之间的影响也比较微弱。考虑到实际海域

动力要素的复杂性,实际海域中多孔污水排海射流的孔间距宜在 $10D$ 以上,以降低不同射流之间相互作用对射流初始稀释过程的影响。

需要指出的是,本文试验组次相对较少,且只研究了孔间距对双孔射流的影响,后期可以进一步增加孔口的数目,研究孔间距对多孔射流的影响。

参考文献:

- [1] 张丽娜,王烜. 射流理论在水环境保护中的应用[J]. 水资源保护,2006,22(6):71-75. (ZHANG Lina, WANG Xuan. Application of jet theory in water environment protection[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(6): 71-75. (in Chinese))
- [2] 蒋传丰,严忠民,周春天,等. 污水排海管扩散器模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),1994,22(1):1-6. (JIANG Chuanfeng, YAN Zhongming, ZHOU Chuntian, et al. Experimental research on sewage outfall diffusers [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 1994, 22(1): 1-6. (in Chinese))
- [3] 芦绮玲,陈刚. 多孔紊动射流的数值模拟与实验研究进展[J]. 水科学进展,2008,19(1):137-146. (LU Qiling, CHEN Gang. Development in numerical and experimental study of the multiple jets[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 137-146. (in Chinese))
- [4] XIAO Y, TANG H W, LIANG D F, et al. Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2011; 23(6): 806-813.
- [5] 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.
- [6] CHYAN J M, HWUNG H H. On the interaction of a turbulent jet with waves [J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, 31(6): 791-810.
- [7] MOSSA M. Experimental study on the interaction of non-buoyant jets and waves [J]. Journal of Hydraulic Research, 2004, 42(1): 13-28.
- [8] RYU Y, CHANG K, MORI N. Dispersion of neutrally buoyant horizontal round jet in wave environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(12): 1088-1097.
- [9] 马皓晨,代翠,董亮,等. 90° 方形弯管内部流场 PIV 实验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):31-34. (MA Haochen, DAI Cui, DONG Liang, et al. PIV experiment of inner field in 90° bending ducts with square section [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 31-34. (in Chinese))
- [10] LIST E J. Mechanics of turbulent buoyant jets and plumes [M]. Oxford: Pergamon Press, 1982: 189-212.

(下转第59页)

failure study [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22 (8) : 12-15. (in Chinese))

[10] 廖小永,王坤.模糊统计聚类理论在崩岸问题中的应用研究[J].长江科学院院报,2007,24 (4) : 5-8. (LIAO Xiaoyong, WANG Kun. Study on application of fuzzy statistic clustering theory in bank-failure [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24 (4) : 5-8. (in Chinese))

[11] WANG Yangui, JIN Yakun, SHI Hongling. Study on roles of influence factors in river bank failure [C] // Proceedings of 35th IAHR World Congress. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 213.

[12] 王延贵,金亚昆.模糊层次分析在河道岸滩稳定性评价中的应用[J].浙江水利科技,2014,42 (5) : 38-41. (WANG Yangui, JIN Yakun. Application of analytic hierarchy process in evaluation of river bank stability [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2014, 42 (5) : 38-41. (in Chinese))

[13] SAATY T L. The analytical hierarchy process [M]. New York: McGraw Hill, 1980.

[14] 汪浩,马达.层次分析标度评价与新标度方法[J].系统工程理论与实践,1993 (9) : 25-26. (WANG Hao, MA Da. Scale evaluation and new scale methods [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1993 (9) : 25-26. (in Chinese))

[15] 张庆华,白玉慧,倪红珍.节水灌溉方式的优化选择[J].水利学报,2002,33 (1) : 47-51. (ZHANG Qinghua, BAI Yuhui, NI Hongzhen. Optimal choice of water saving irrigation mode [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (1) : 47-51. (in Chinese))

[16] 王延贵,匡尚富.河岸崩塌类型与崩塌模式的研究[J].泥沙研究,2014 (1) : 13-20. (WANG Yangui, KUANG Shangfu. Study on types and collapse modes of the bank failures [J]. Journal of Sediment Research, 2014 (1) : 13-20. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 06 - 28 编辑: 熊水斌)

(上接第 45 页)

[11] 徐世凯,王勇.自由射流出口临界雷诺数的确定[J].河海大学学报(自然科学版), 2007, 35 (6) : 699-703. (XU Shikai, WANG Yong. Determination of critical Reynolds number at outlets of free jet flows [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2007, 35 (6) : 699-703. (in Chinese))

[12] 槐文信,那宇彤,童汉毅,等.静止环境中铅垂紊动射流的实验研究[J].水利学报,2002,33 (9) : 32-36. (HUAI Wenxin, NA Yutong, TONG Hanyi, et al. Experimental study on vertical turbulent jet discharged from the bottom of shallow water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (9) : 32-36. (in Chinese))

[13] LI Zhiwei, HUAI Wenxin, QIAN Zhongdong. Study on the flow field and concentration characteristics of the multiple tandem jets in crossflow [J]. Science China, 2012, 55 (10) : 2778-2788.

[14] 槐文信,杨晓亨.横流中多孔射流浓度场的特性[J].武汉水利电力大学学报,1997,30 (5) : 17-21. (HUAI Wenxin, YANG Xiaoting. Behavior of the concentration field for multiple jets in cross flow [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1997, 30 (5) : 17-21. (in Chinese))

[15] MOAWAD A K, RAJARATNAM N. Dilution of multiple non-buoyant circular jets in crossflows [J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, 124 (1) : 51-58.

[16] HSIAO S C, HSU T W, LIN J F, et al. Mean and turbulence properties of a neutrally buoyant round jet in a wave environment [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2011, 137 (3) : 109-122. (收稿日期: 2015 - 10 - 15 编辑: 骆超)

• 简讯 •

第 1 届全国水利水电工程信息化技术研究与应用研讨会将于 11 月在北京召开

为加快水利水电工程信息化技术的研究与推广,使信息化新技术成为解决工程建设实际问题的重要手段,保证水利水电工程建设和运行管理全生命周期的健康与安全,中国水利学会、中国水力发电工程学会、中国大坝工程学会,将于 2016 年 11 月 25—26 日在北京召开第 1 届全国水利水电工程信息化技术研究与应用研讨会。本次会议将就水利水电规划设计信息化、水利水电工程管理信息化、水利水电工程物联网技术、水利水电工程信息化前沿(大数据、云计算、智能化等)以及水利水电工程数字化标准化和行政支撑体系等方面的新理念、新技术、新方法开展学术交流。会议承办单位为中国水利水电科学研究院、天津大学。会议将出版内部论文集,全文截止日期为 2016 年 9 月 30 日。

(本刊编辑部供稿)