

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.011

波流环境下多孔射流运动和稀释特性试验

张玉玲^{1,2}, 徐振山¹, 陈永平^{1,2}, 孙朴¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用 PIV 和 PLIF 技术对波流环境下多孔垂向射流近区的速度场和浓度场进行测量, 对比分析不同波浪条件下射流运动轨迹、速度场、浓度场及涡量场特性, 重点探讨波流和纯流环境下射流运动特性的差异以及波浪作用对多孔射流发展的影响。结果表明: 波流流场中射流时均轨迹发生扭曲, 产生“污染物云团”现象, 与纯流环境下射流差异明显; 波浪对波流环境下的多孔射流运动影响显著, 具体表现在波浪强度的增大能够增加射流与环境水体的接触面积、加快射流垂向动量衰减、增强前方射流对后方射流的遮掩作用、降低多孔射流汇合点高度等方面。当前组次下, 波浪的存在使得各断面污染物浓度峰值减小, 因此对波流环境下多孔射流的稀释有积极的作用。

关键词: 波流环境; 多孔射流; 速度场; 浓度场; 污染物稀释特性; 射流试验

中图分类号: TV132⁺. 1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2019)01-0071-08

Experimental study on movement and dilution of multiple jets in wavy cross-flow

ZHANG Yuling^{1,2}, XU Zhenshan¹, CHEN Yongping^{1,2}, SUN Pu¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The near-field velocity and concentration fields of vertical multiple jets in wavy cross-flow were measured by using the PIV and PLIF techniques. The characteristics of multiple jets, including the trajectory, velocity field, concentration field and vorticity field, were analyzed, focusing on the differences between the jet in wavy cross-flow and that in cross-flow as well as the wave effect on the development of multiple jets. The results show that the time averaged trajectories of jets in wavy cross-flow are distorted with “effluent cloud” existing on the jet body. Further, wave has a significant influence on the movement of multiple jets in wavy cross-flow, including increasing the interaction area between jets and surrounding waters, accelerating the decay of the vertical momentum of jets, enhancing the shielding effect of leading jet on the rear jets, and reducing the height of the confluent point of the jets, etc. In present cases, waves lead to the decreasing of the peak concentration of contaminant at all sections, and thus have a positive effect on the dilution of multiple jets in wavy cross-flow.

Key words: wavy cross-flow; multiple jets; velocity field; concentration field; effluent dilution characteristics; jet experiments

基金项目: 国家自然科学基金(51709078); 江苏省自然科学基金(BK20170882)

作者简介: 张玉玲(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail: yuling_zhang@hhu.edu.cn

通信作者: 徐振山, 讲师。E-mail: zsxu2006@hhu.edu.cn

引用本文: 张玉玲, 徐振山, 陈永平, 等. 波流环境下多孔射流运动和稀释特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 71-78.

ZHANG Yuling, XU Zhenshan, CHEN Yongping, et al. Experimental study on movement and dilution of multiple jets in wavy cross-flow[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 71-78.

随着沿海城市的快速发展,向海排放污水的需求日益增长。然而对于海洋环境,特别是近海环境的现状不容乐观。如何科学协调二者之间的矛盾,有赖于加深对达标尾水海洋处置工程所引起环境效应的科学认识,即要求准确地掌握海岸动力环境下达标尾水的运动规律和稀释过程。

排海达标尾水通常以单孔或多孔射流的形式在环境水体中运动。与单孔射流相比,经多孔扩散器排放的尾水能与更大面积的环境水体相互掺混,达到更好的稀释效果,实际工程中也多布置多孔射流扩散器。在静水环境中,由于孔间区域压强的变化,多孔射流相互卷吸并最终汇合形成一股射流^[1]。在海水环境中,多孔射流还将受到水流和波浪的作用。水流(如横向水流)的存在对各孔射流之间的相互作用有较大影响。槐文信等^[2]采用数学模型模拟了横流中的多孔射流,分析其浓度场特性,认为射流-横流速度比是影响横流下多孔射流轨迹的重要因素;Moawad等^[3]和 Ajersch等^[4]开展了横流下多孔射流试验,认为由于相邻射流的存在,单一射流体周围的环境自由流体减少,混合区污染物稀释程度会有所减小,孔间距的合理设计可以弱化该影响。在以上研究中,孔口连线均与横流方向垂直,Kolář等^[5]通过试验比较了横流下双孔浮射流的3种孔口布置方式,发现当污染物出射方向与横流方向垂直且孔口连线与横流方向平行时(T形布置),相邻射流间相互剪切作用最强烈,且会更迅速、更大程度地与环境水体混合;Yu等^[6]分别对横流环境下T形布置的2~8孔射流间的相互作用进行了试验研究,发现前方射流对后方射流有遮掩作用,后方射流的横向有效速度仅为0.3~0.7倍的横流速度;Makihata等^[7]对横流环境下等间距对称分布的多孔射流进行了试验研究,发现受相邻射流间卷吸作用的影响,横流环境下多孔射流轨迹线要高于单孔射流;Gutmark等^[8]总结了在横流环境下射流流场中出现的4类涡旋结构,即马蹄涡、剪切涡、尾涡和反向对称漩涡(CVP);李少华等^[9]应用realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型并结合SIMPLEC算法,对横流下多孔圆管射流的涡量场进行数值模拟,结果表明在前方射流的遮挡下,后方射流剪切涡发生的位置升高,当多股射流合并为一股新的射流之后才出现马蹄涡的雏形,并最终发展成为马蹄涡,同时CVP的形状逐渐发生变化并趋于规则。

目前,针对波浪和水流共同作用下多孔射流的研究还相当缺乏。陈永平等^[10]对波浪环境中多孔射流的速度场和浓度场进行了测量,认为波浪作用对各孔射流之间的汇合有很大影响;王姬娜^[11]、徐振山等^[12-13]针对波流环境中的单孔射流进行了物理试验和数值模拟研究,发现单孔射流在波流共同作用下出现了大尺度的“污染物云团”现象,与横流作用下相比,单孔射流的稀释度大幅度增加。上述成果可为波流环境下多孔射流的研究提供一定参考。笔者采用PIV和PLIF技术,针对波流环境下多孔射流运动和稀释特性进行物理试验研究,射流口按照T形布置,重点探讨波浪对多孔射流发展的影响,以揭示多孔射流在波流环境下特有的运动及稀释规律,并为后续的数值模拟研究提供数据支持。

1 试验装置与组次安排

1.1 波流试验水槽

波流水槽(图1)长46.0 m,宽0.5 m,高1.0 m。水槽生流装置为设在水槽首尾的控制阀门和水槽尾端的三角堰,水流经潜水泵从地下水库抽出,经整流槽和特制整流板从水槽底部进入。经测量,当水流到达距水槽前端20.0 m后,水流垂向分布已基本稳定。因此,选定22.0~24.0 m的范围作为试验区域。水槽生波装置为推板式造波机,波高和波周期的率定误差均在2%以内,可以稳定地产生满足试验要求的规则波。试验水深保持在0.5 m。

1.2 其他试验装置

除波流水槽之外,射流试验的装置主要还有射流发生装置、PIV与PLIF装置(包括激光器、数据同步器和工作站)以及CCD相机。

射流发生装置包括射流源、水泵、恒定水箱、流量计和多孔射流扩散器。射流管道内径 $D=10\text{ mm}$,各孔射流间距 $S=5D$,射流口距水槽底部0.1 m。试验中各孔射流均为动量射流,不考虑浮力影响。按照从上游到下游的顺序,定义射流口的序号分别为第一、第二、第三、第四孔射流。

采用粒子图像测速(PIV)技术^[14]对二维速度场进行测量,PIV工作频率设为7.25 Hz。采用激光诱导荧光(PLIF)技术^[15]对平面浓度场进行测量,PLIF工作频率设为14.5 Hz。荧光剂选用Rhodamine 6G,射流初始质量浓度 $C_0=0.15\text{ mg/L}$ 。采样时长为20个波周期。

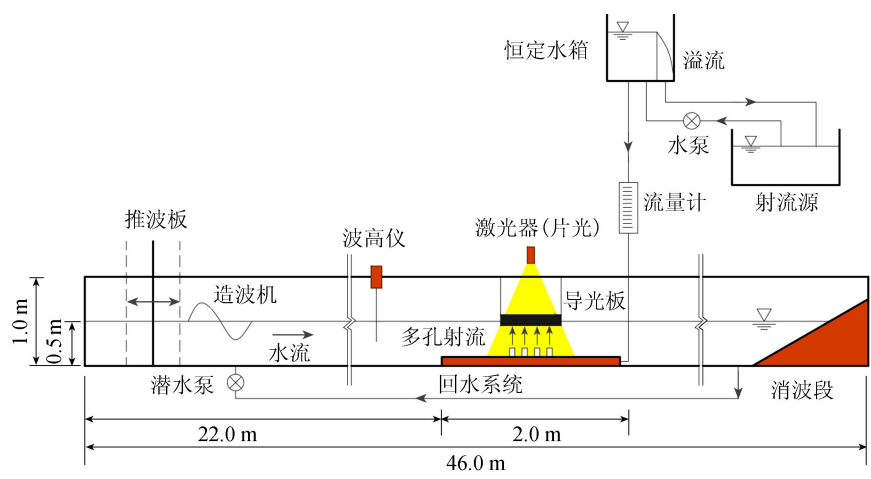


图 1 波流水槽和多孔射流发生装置示意图

Fig.1 Sketch of the wave-current flume and the multiple-jet generator

1.3 组次设计及特征参数选取

为研究不同波浪组合对波流环境中多孔射流的影响,设计了 5 个组次(表 1),其中包括一组无波浪的情况作为对照,试验波浪均为规则波。参照陈永平等^[10]进行的波浪条件下多孔射流试验,设定原型水深为 10 m,在满足重力相似准则的条件下,长度比尺、时间比尺、速度比尺分别为 $\lambda = 20$ 、 $\lambda_t = \lambda_v = 4.47$,原型波高、波周期、射流出口流速及横流流速均在合理范围之内。

Chang 等^[16]认为波浪和射流的动量比是影响掺混强度的最主要因素,Wang 等^[17]建议将射流与波浪的速度比 R_w 作为衡量波浪对射流作用的关键参数之一,参考已有的单一横流及单一波浪条件下射流运动的试验研究,将 R_w 设定在 5~30 之间。文中沿用 Chin 等^[18]和 Chyan 等^[19]的建议,定义射流出口处波浪质点最大水平速度为特征波浪速度 u_w ,计算公式如下:

$$R_w = \frac{v_0}{u_w}$$

(1)

$$u_w = \frac{\pi H \cosh(0.2kh)}{T \sinh kh}$$

(2)

式中: v_0 ——射流出口初始速度; H ——波高; T ——波浪周期; k ——波数; h ——水深。

2 试验结果讨论

2.1 波流环境下射流的运动特性

选择组次 WF4,对 4 个特征相位下射流的运动特征进行分析。根据 20 个波周期内的瞬时流场图,在时间上采用三次样条插值,在空间上采用线性插值,提取每个特征相位时刻的瞬时流场,平均后得到各个特征相位的平均流场,如图 2 所示(X 为沿波浪、水流传播方向坐标, Z 为沿水深方向坐标, C 为出口污染物的质量浓度)。图中,矢量图刻画出流场中各点的流速和流向,背景云图为相位平均浓度场。4 个特征相位分别是上跨零点($t=0$)、波峰($t=0.25T$)、下跨零点($t=0.5T$)和波谷($t=0.75T$)。

在 $t=0$ 时刻(图 2(a)),第一孔射流处于上跨零点位置,波浪水质点水平速度为零,在横流驱动下,射流弯曲程度较大且垂向速度衰减明显。在 $t=0.25T$ 时刻(图 2(b)),第一孔射流处于波峰位置,波浪水质点水平速度达到正向最大值,外加横流的作用,此时水流流速达到最大值,射流弯曲程度最大。在 $t=0.5T$ 时刻(图 2(c)),第一孔射流处于下跨零点位置,波浪水质点垂向速度最大,水平速度为零,射流轨迹逐渐出现向左偏转的趋势。在 $t=0.75T$ 时刻(图 2(d)),第一孔射流处于波谷位置,此时环境流速达到最小值,射流弯曲程度最小。由此可见,在波浪作用的牵引下,水流速度会发生周期性变化,出口射流也会发生周期性的左

表 1 试验组次安排

Table 1 Experimental arrangement

组次	波周期/s	波高/cm	波浪特征速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	射流与波浪 速度比 R_w
WF0				
WF1	1.0	3.0	2.6	26.3
WF2	1.0	6.0	5.2	13.1
WF3	1.4	3.0	4.5	15.3
WF4	1.4	6.0	9.0	7.7

注:5 个试验组次的开启孔口皆为 1、2、3、4,横流流速皆为 7.4 cm/s,射流出口流速皆为 68.5 cm/s。

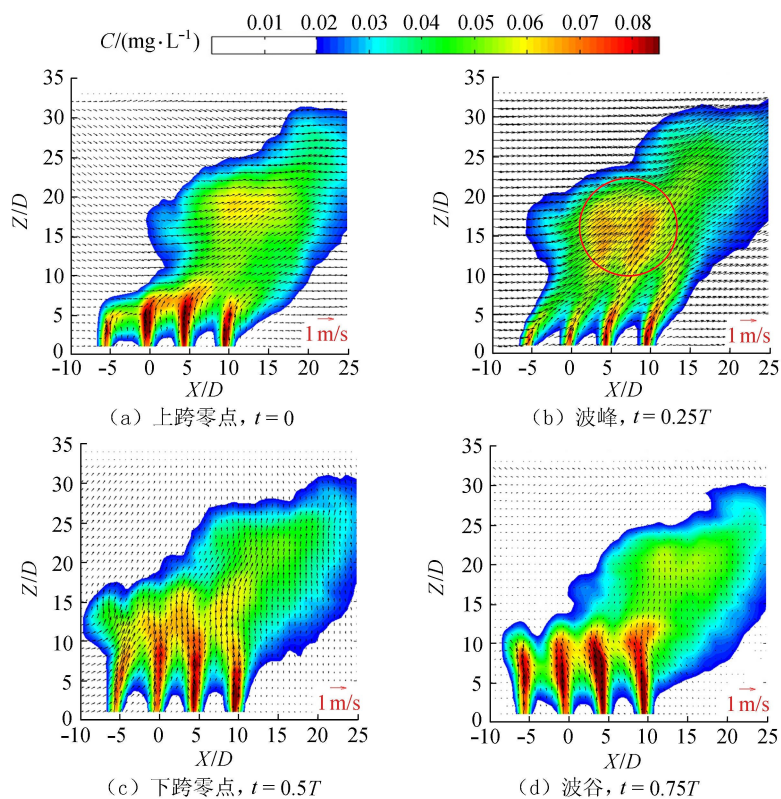


图2 WF4组次下特征相位平均流场及浓度场

Fig.2 Phase-averaged velocity and concentration fields for Case WF4 at typical phases

右摆动,与环境水体接触面积增大。

在波浪和水流的共同作用下,单孔射流上部会出现明显的大尺度“污染物云团”^[10-12]。与单孔射流相比,波流环境下多孔射流的“污染物云团”并不明显,主要原因是各孔射流所形成的云团之间发生了重叠现象。值得注意的是,多孔射流的外边界,特别是迎流面由于波浪的周期性作用而变得曲折。另外,中间两股射流因外部射流的遮挡和保护而降低了与周围水体掺混的几率,在其上方 $Z/D=10\sim20$ 的高度范围内出现了高浓度水团,如图2(b)圈出部分所示。

对特征相位下射流的运动过程进行分析,可知波浪和水流共同作用使射流轨迹发生了弯曲和左右摇摆,摆动幅度在波峰和波谷时刻达到最大。对于各孔射流来说,其轨迹线可定义为水平断面上最大垂向速度的连线。图3为组次WF1、WF2和WF3下第一孔射流在波峰和波谷时刻的轨迹线。波高或波周期越大,波浪水质点水平位移越大,进而使射流轨迹摆动幅度增大。表2对3个组次的射流摆动幅度进行了统计,结果表明,当前组次下,波高增大1倍射流摆动幅度最大增加约2.5倍,波周期的增大也使得射流摆动幅度大幅度增加。

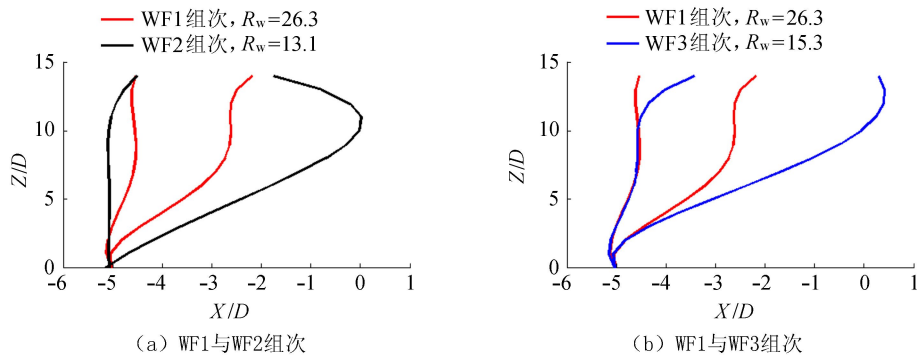


图3 波峰、波谷时刻第一孔射流轨迹线

Fig.3 Trajectories of the first jet at the wave crest phase and at the wave trough phase

图 4 为不同工况下第三孔射流垂向平均速度沿轨迹线的衰减情况,可以看出,淹没射流区初始段流速衰减较小,主体段流速衰减增大^[20]。在距离射流口 $Z/D=10$ 断面,WF0 组次下射流垂向平均速度衰减至出口速度的 59%;波流共同作用组次下射流垂向平均速度均衰减至 50% 以上,最大衰减至出口速度的 34.4% (WF4 组次)。该结果说明波浪存在能加速射流垂向平均速度的衰减,且随着波高或波周期的增大(即 R_w 减小),垂向平均流速衰减得更快。

2.2 各孔射流、环境水体间的相互作用

图 5 为波峰时刻相位平均涡量场,其中涡量计算公式如下:

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{3}$$

$$\omega_y(i,j) = \frac{1}{2} \left(\frac{v(i+2,j) - v(i,j)}{2\Delta x} - \frac{u(i,j+2) - u(i,j)}{2\Delta z} \right) \tag{4}$$

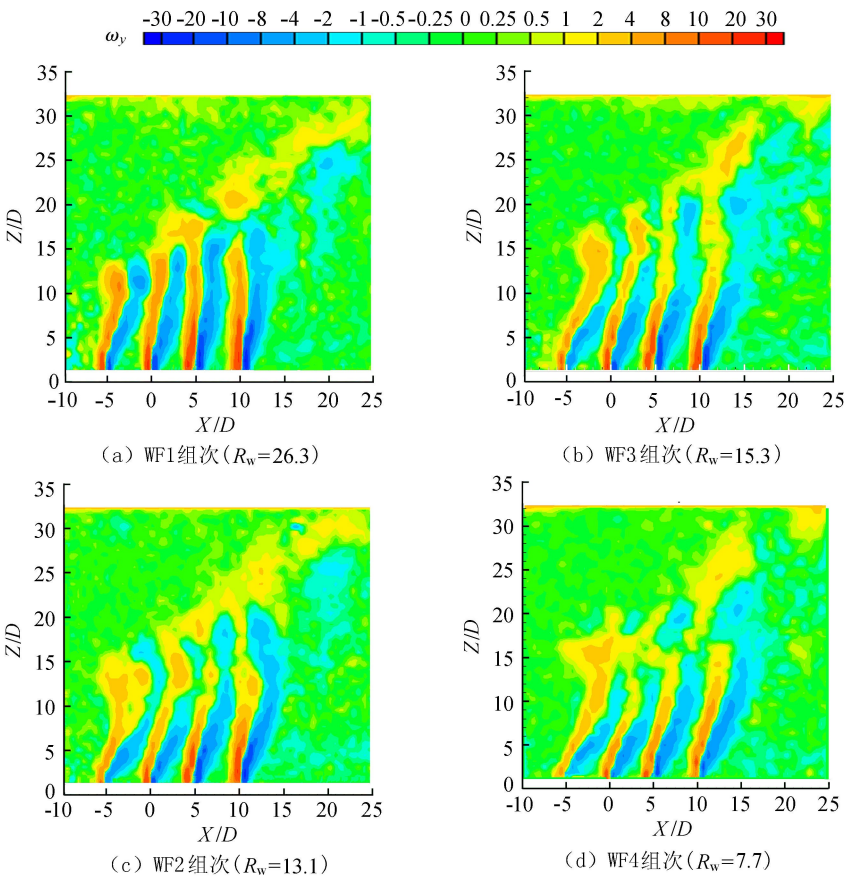


图 5 波流环境下波峰时刻多孔射流相位平均涡量场

Fig.5 Phase-averaged vorticity fields of multiple jets in wavy cross-flow at the wave crest phase

在初始阶段,射流内部的流速较大且分布均匀,仅在射流与环境水体交界处存在较大的速度梯度,随着射流动量的衰减,涡量值沿水流方向逐渐减小。波流环境下多孔射流迎流面存在大大小小的涡,其迎流面射流边界变得曲折且更加不规则,这与图 2 中发现的结果是一致的。随着波高或波周期的增大(即 R_w 减小),

表 2 不同横断面下第一孔射流轨迹摆动幅度

Table 2 Range of the trajectory of first jet at different cross sections

组次	$Z/D=5$	$Z/D=7.5$	$Z/D=10$	$Z/D=12.5$	$Z/D=14$
WF1	1.17D	1.74D	1.93D	2.08D	2.36D
WF2	2.67D	3.97D	5.05D	4.34D	2.76D
WF3	1.69D	3.22D	4.52D	4.59D	3.73D

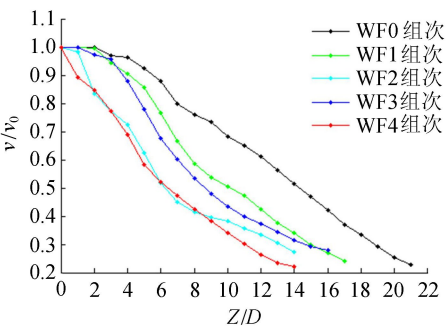


图 4 第三孔射流垂向平均速度沿轨迹线衰减

Fig.4 Decay of time-averaged vertical velocity of the third jet

涡量值存在整体减小的趋势。主要原因是波浪的增大使射流垂向速度衰减加快,导致射流体与环境水体的速度差减小。该结果说明波浪作用使射流体与环境水体以及相邻两孔射流之间的剪切卷吸作用有所减弱。

不同工况下各孔射流的轨迹线如图 6 所示。在没有波浪的情况下,射流轨迹线平滑向右弯曲,随着 R_w 的减小,射流轨迹线逐渐过渡为扭曲向上,且扭曲程度越来越大。从图 6 中还可以看出,不论在横流环境还是在波流环境中,前方射流对方射流均有明显的遮掩作用,这也使得后方射流的垂向动量衰减较前方射流的慢。各工况前方射流轨迹线之间的夹角明显小于各工况后方射流轨迹线之间的夹角,说明波浪作用增强了前方射流的遮挡效果。多孔射流向前行进的过程中,其垂向速度也在逐渐衰减,最终汇合成一股射流,并随流运动。图 7 绘制了横流和波流作用下多孔射流的流线,统计出 WF0 ~ WF4 组次下汇合点高度分别为 $30.50D$ 、 $29.23D$ 、 $28.58D$ 、 $29.22D$ 、 $27.93D$,此处四孔射流的汇合点高度定义为 $X/D=25$ 断面上合成速度峰值所处高度。随着波浪出现及波浪强度的增大,汇合点高度持续下降,最大降幅约为 8.4%。这表明波高和波周期的增大均可以使流线发生更明显的弯曲,导致多孔射流的汇合点高度降低。

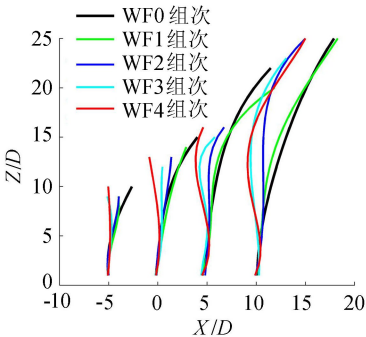


图 6 多孔射流时间平均轨迹
Fig.6 Time-averaged trajectories of multiple jets

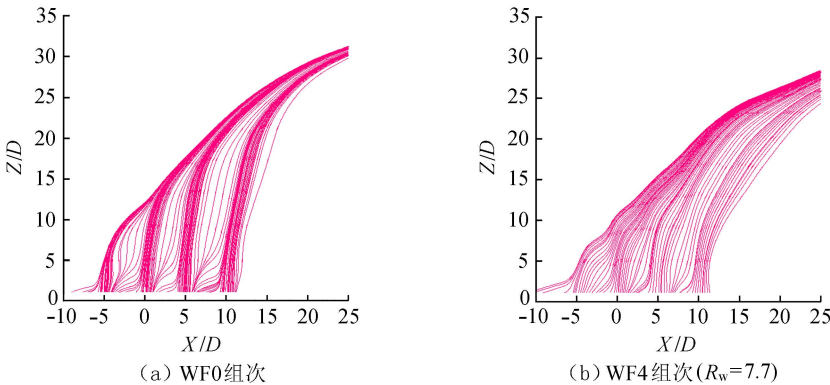


图 7 横流和波流环境下多孔射流的平均流场流线
Fig.7 Streamlines and junction height in time-averaged velocity fields of multiple jets

2.3 波流环境下射流平均浓度场

图 8 为各工况下多孔射流的平均浓度场。从图 8 可以看出,随着波浪强度的增大(即 R_w 的减小),高浓度区(如 $C/C_0>0.5$)的范围逐渐降低。统计出 WF0 ~ WF4 组次下 $C/C_0=0.5$ 浓度等值线到达的最大高度分别为 $11.36D$ 、 $7.27D$ 、 $5.73D$ 、 $5.94D$ 、 $5.12D$ 。随着波浪强度的增大,射流浓度稀释至 50% 的浓度等值线高度有一定程度的降低,说明在水动力较强的情况下,污染物在出口附近发生更大程度的稀释。

对波流环境下多孔射流的稀释情况进一步分析,对比了不同组次下 $Z/D=5 \sim 15$ 和 $X/D=15 \sim 25$ 断面上最小稀释度及其位置的变化,如图 9 所示。从图 9 可以看出,波浪强度越大,断面最小稀释度越大(即断面浓度峰值越小)。对比 WF0 组次和 WF4 组次,在距离射流口 $Z/D=10$ 的横断面上,波浪作用使浓度峰值减小约 25%;在距离第四孔射流 $X/D=20$ 的纵断面上,波浪作用使浓度峰值减小约 5%。由此可见,在当前组次下,波浪作用有利于波流环境下多孔射流的稀释。

3 结 论

a. 波流和单纯横流作用下射流运动的差异明显。在波流共同作用下,环境流场随波浪相位发生周期性变化,流场中大量的涡旋使射流时均轨迹发生一定程度的扭曲;波流环境中波浪的作用使射流垂向及水平向紊动范围增加,射流在交界面能更快地与环境水体掺混,射流内部水体也由于波浪的牵引发生了垂向交换,从而导致射流轴线时均速度衰减加快,污染物初始浓度衰减加快。

b. 波流环境下多孔射流的“污染物云团”与单孔射流相比更不明显,各孔射流形成的云团之间发生了重叠。

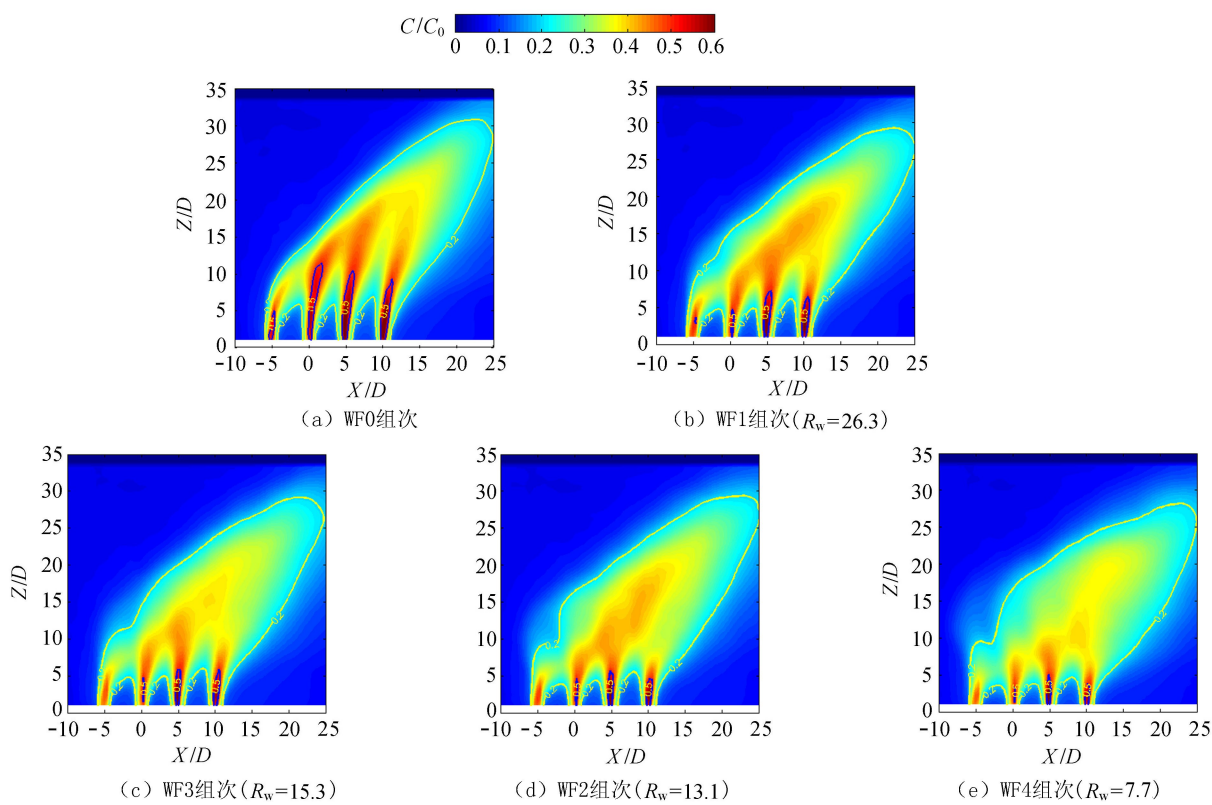


图 8 不同工况下的平均浓度场

Fig. 8 Time-averaged concentration fields under different conditions

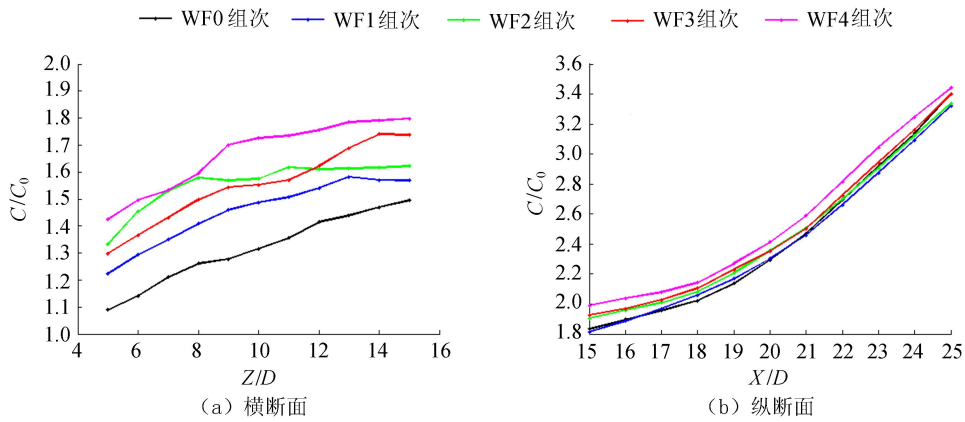


图 9 不同断面下多孔射流最小稀释度

Fig. 9 Minimum dilution of multiple jets at different sections

c. 在波浪周期性的牵引作用下,波流环境下的多孔射流也随之发生左右摆动,波高或波周期的增大使射流轨迹摆动幅度大幅度增加,使其与环境水体接触面积增大;距离射流口 $Z/D=10$ 的断面上,当前组次下波浪的存在可导致第三孔射流垂向速度衰减至无波时的 60% 左右。

d. 波浪存在使得前方射流对方射流的遮掩作用有一定的增强,当前组次下可以使各孔射流汇流点高度最多降低 8.4%。

e. 与横流下的多孔射流相比,当前组次下 $Z/D=10$ 断面浓度峰值最多降低 25%, $X/D=20$ 断面浓度峰值最多降低 5%,因此波浪的存在会加大多孔射流的稀释倍数。

需要指出的是,本文主要剖析波流环境下多孔射流对称纵剖面上速度场和浓度场的特征,多孔射流的三维结构特征分析将依赖于后期的数学模型。

参考文献:

- [1] TANAKA E. The interference of two-dimensional parallel jets (1st report, experiments on dual jet)[J]. Bulletin of the JSME, 1970, 13(56): 272-280.
- [2] 槐文信, 杨晓亭. 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): 16-20. (HUI Wenxin, YANG Xiaoting. Behavior of the concentration field for multiple jets in cross flow[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(5): 16-20. (in Chinese))
- [3] MOAWAD A K, RAJARATNAM N. Dilution of multiple nonbuoyant circular jets in crossflows[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, 124(1): 51-58.
- [4] AJERSCH P, ZHOU J M, KETTLER S, et al. Multiple jets in a crossflow: detailed measurements and numerical simulations[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(2): 608-615.
- [5] KOLÁŘ V, SAVORY E. Dominant flow features of twin jets and plumes in crossflow[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 1199-1215.
- [6] 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.
- [7] MAKIHATA T, MIYAI Y. Experiments on the characteristics of multiple jets in a crossflow[J]. Engineering and Natural Sciences, 1978, 26(2): 15-36.
- [8] GUTMARK E J, IBRAHIM I M. Dynamics of single and twin circular jets in cross flow[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50: 653-663.
- [9] 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 CSEE, 2007, 27(23): 100-104. (in Chinese))
- [10] 陈永平, 田万青, 方家裕, 等. 波浪环境下多孔射流水动力特性试验[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 569-578. (CHEN Yongping, TIAN Wanqing, FANG Jiayu, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of multiple jets in wave environment[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 569-578. (in Chinese))
- [11] 王娅娜. 波流环境下垂向射流水动力及稀释特性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2015.
- [12] 徐振山. 波流环境中垂向圆管射流三维数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [13] 徐振山, 陈永平, 张长宽. 波流环境中垂向圆管射流三维运动和稀释过程模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 265-275. (XU Zhenshan, CHEN Yongping, ZHANG Changkuan. Study on three-dimensional movement and dilution of a vertical round jet under the wave-current effect[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 265-275. (in Chinese))
- [14] 孙鹤泉, 康海贵, 李广伟. PIV 的原理与应用[J]. 水道港口, 2002, 23(1): 42-45. (SUN Hequan, KANG Haigui, LI Guangwei. Theory and application of PIV[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2002, 23(1): 42-45. (in Chinese))
- [15] 黄真理, 李玉梁, 余常昭. 平面激光诱导荧光技术测量横流中射流浓度场的研究[J]. 水利学报, 1994, 11(1): 1-7. (HUANG Zhenli, LI Yuliang, YU Changzhao. Study on the concentration field of jet in crossflow by PLIF technique[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 11(1): 1-7. (in Chinese))
- [16] CHANG K A, RYU Y, MORI N. Parameterization of neutrally buoyant horizontal round jet in wave environment[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2009, 135(3): 100-107.
- [17] WANG Yana, CHEN Yongping, XU Zhenshan, et al. Initial dilution of a vertical round non-buoyant jet in wavy cross-flow environment[J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(6): 847-858.
- [18] CHIN D A, ASCE A M. Influence of surface wave on outfall dilution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 113(8): 1006-1018.
- [19] 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.
- [20] 张春财, 杜宇, 赵润达. 浅俯淹没射流水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 78-82. (ZHANG Chuncai, DU Yu, ZHAO Runda. Research on the hydrodynamic characteristics of shallow submerged jet with depression angle [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 78-82. (in Chinese))