

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.011

波流环境中多孔射流三维数值模拟

徐振山¹, 韩松¹, 张玉玲², 陈永平¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: 建立了波流环境中多孔射流的三维大涡数学模型, 探讨了波流共同作用下多孔射流的扩散和稀释机制, 分析了孔间距对双孔射流、射流与环境水体相互作用的影响, 并给出了最优相对孔间距。模拟结果表明: 在波谷相位时刻, 由于横流与波浪相互作用强烈, 流场内的三维涡旋结构丰富、尺度较大、数目众多, 有利于射流与环境水体、射流与射流之间的掺混, 这是波流环境比单一横流环境中多孔射流运动扩散效果更佳的主要原因; 随着孔间距的增大, 双孔射流之间的相互作用慢慢削弱, 而射流与环境水体之间的相互作用却在不断增强; 双孔射流在孔间距为 7.0 倍管口直径时扩散效果最好。

关键词: 多孔射流; 波流环境; 孔间距; 大涡模拟; 三维流场

中图分类号: TV132⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)01-0084-09

Three-dimensional numerical simulation of multiple jets in wave-current environment

XU Zhenshan¹, HAN Song¹, ZHANG Yuling², CHEN Yongping¹

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

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The motion and diffusion behaviours of multiple jets in wave-current environment were studied by using a 3D large eddy simulation model, and the diffusion and dilution mechanism of jets in wave-current environment was discussed. Then, the influence of hole spacing on the interaction between two-hole jets and environmental water was analyzed and the optimal relative hole spacing was given. The simulation results showed that, due to the strong interaction between cross-flow and wave, the three-dimensional vortices in the flow field at the wave trough phase are rich in structure, large in scale and numerous in number, which is conducive to the mixing between jets and environmental water, and between jet and jet. Hence, the multiple jets in wave-current environment have a better dilution than that in current only environment. With the increasing of hole spacing of dual jets, the interaction between the two jets becomes weaker while the interaction between jets and environment water becomes stronger. The best dilution effect of two-hole jets is obtained when the hole spacing is 7.0 times of the jet diameter.

Key words: multiple jets; wave-current environment; hole spacing; large vortex simulation; three-dimensional flow field

排海污水通常以单孔或多孔射流的形式在海水中运动, 而多孔逐渐取代单孔扩散器成为污水处置工程的发展趋势, 其运动和稀释规律是海岸水动力及水环境研究重点关注的问题。开展波流环境中多孔射流近区运动的研究, 有助于丰富射流理论, 提高对多孔射流运动和稀释规律的认知, 为废水排放工程的环境效应分析提供参考。

在海岸动力环境中, 射流的运动主要受到水流和波浪的影响, 多孔射流相邻射流之间会存在相互吸附效应, 因此其流动规律相较于单孔射流要更为复杂。Fang 等^[1]从质量守恒、动量平衡和标量守恒的基本方程出发, 采用了一种通量守恒公式, 使数值积分中的奇异性最小化, 建立了一个比早期模型更通用、更可靠、更准确的积分模型, 可用来模拟和预测静水、水流、波浪和波浪流环境中的射流。横流环境是最常见的水动力

基金项目: 河北省省级科技计划项目(21373302D)

作者简介: 徐振山(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail: zsxu2006@hhu.edu.cn

引用本文: 徐振山, 韩松, 张玉玲, 等. 波流环境中多孔射流三维数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 84-92.

XU Zhenshan, HAN Song, ZHANG Yuling, et al. Three-dimensional numerical simulation of multiple jets in wave-current environment [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 84-92.

环境,对相邻射流之间的相互作用有较大的影响^[2]。Gutmark 等^[3]归纳了横流环境中射流流场中的 4 种涡旋结构:马蹄涡、剪切涡、尾涡和反向对称漩涡(counter-rotating vortex pair,CVP)。槐文信等^[4]采用三维数学模型对横流条件下多孔射流进行了数值模拟预测,认为射流与横流速度的比值和相对孔间距(孔间距与射流管径的比值)是影响射流轨迹线的主要因素。Moawad 等^[5]认为相邻射流的存在会影响混合区稀释效果,增加孔间距会有效提高稀释效果。Zhao 等^[6]借助格子玻尔兹曼(lattice Boltzmann method,LBM)数值方法对低雷诺数双孔平面射流进行研究,发现流场中的紊动会造成周期性涡脱落现象,促进射流与环境水体的物质交换,当相对孔间距为 7 时,射流与周围水体的混合强度最大。Kolár 等^[7]对比了横流条件下双孔射流并列布置(孔口连线与横流方向垂直)、连续布置(孔口连线与横流方向平行)和倾斜布置(孔口连线与横流方向夹角为 45°)的涡特征,发现连续布置条件下射流可以更有效、更有效地与环境水体混合。肖洋等^[8-9]进行了横流条件下连续布置多孔射流实验,发现受第 1 孔射流的遮挡与卷吸作用,后面几孔射流的弯曲度与稀释度变化都弱于第 1 孔射流;第 1 孔射流迎流面的卷吸强度明显大于单孔射流,射流孔之间的区域不仅受到上一个射流的卷吸作用和遮挡作用,还受到下一个射流的卷吸作用。多孔射流中第 1 孔射流近区流场与单孔射流流场具有相似的分佈,后部射流也与第 1 孔射流流场有类似的模式^[10]。

陈永平等^[11]测量了波浪环境中多孔射流的速度场与浓度场,认为波浪环境的非恒定性会有效提高射流的稀释及扩散能力,波高与波周期的增加都会加速射流轴线速度的衰减。沈小雄等^[12]研究了波浪环境中双孔射流的压强分布规律,认为波浪加速了相邻射流的吸附与掺混,并且随着波周期的增大,这种加速会更加明显,射流合并断面将会提前出现。Liu 等^[13]研究了 3 种长波(对称、反对称和单侧)激励模式下的平面射流,认为人工激励可以有效地加强涡旋结构从射流近场至远场的演变。Anghan 等^[14]认为波浪环境中的射流未来研究应集中在直接的数值模拟上,考虑到解析完整流场所需计算量大,则应该更多关注射流近场及部分远场。

丁宏伟等^[15]的物理实验表明在波流环境中双孔射流的轴线平均垂向速度衰减规律符合幂函数关系。张玉玲等^[16]测量了多孔垂向射流的速度场与浓度场,发现相比于单孔射流,多孔射流各孔“污染物云团”发生重叠,云团更加不明显。基于上述物理实验,本文采用合成涡方法(synthetic eddy methods,SEM)生成边界条件,使用大涡模拟(large eddy simulation,LES)搭建合理的数学模型,进一步探究波流环境中多孔射流的三维运动规律和稀释特性。

1 研究方法

1.1 波流环境中多孔射流数学模型

波流环境中多孔射流大涡模型控制方程为空间平均的纳维-斯托克斯(N-S)方程和浓度标量输运方程。模型在垂向上引入 σ 坐标解决自由面追踪问题^[17]。控制方程采用算子分裂法求解,对流项采用二次向后特征线法和 Lax-Wendroff 格式平均法离散求解,扩散项采用时间向前差分、空间中心差分格式离散求解,泊松方程利用共轭梯度算法求解。

采用考虑波浪影响的时均水流流速剖面叠加波浪速度分量的方法得到波流水槽入口边界条件,波流入口波面高度和三维速度分量的具体给定公式参考徐振山等^[18-20]的研究;采用零梯度条件加修正的人工海绵层的方法得到出口边界条件。采用拉格朗日-欧拉法追踪波浪和水流共存情况下的速度自由表面^[21];浓度自由表面边界采用零梯度边界条件。底部速度边界采用可滑移边界来预测第一个网格节点处的速度梯度,采用壁面函数法计算底部切应力;底部浓度边界采用零梯度边界条件。侧向边界处采用不可入边界条件。模型的初始压强按照静压假定给出,浓度初始值为 0, x 、 y 、 z 方向的速度 u 、 v 、 w 初始值均为 0,水流存在时,波流水槽沿水深方向的速度分量按照对数分布假定给定。

模型中各项关键参数值均落在合理范围之内。其中紊动放大系数和 Smagorinsky 常数对射流垂向速度衰减程度有较大的影响,分别取为 3.0 和 0.175 较为合适;出口平均浓度分布和紊动普朗特数对射流轴线浓度衰减程度有一定的影响,出口平均浓度分布函数借鉴出口平均速度分布函数,紊动普朗特数取为 1.0。

模型计算域长 9.0 m、宽 0.5 m、高 0.5 m,对垂向坐标进行 σ 变换,可以精确捕捉自由表面的变化。采用 4 套网格对模型计算域进行划分(表 1),分别命名为 G1~G4,网格在 x 、 y 、 z 方向非均匀划分,并且在射流口及自由表面附近进行加密。用以上 4 套网格模拟静水环境中的射流,进行网格敏感性分析。图 1 为 4 套网

格下射流的垂向速度曲线(图中 w_c 为横断面上最大射流流速, w_0 为射流出口流速, D 为射流管径)。其中 G1 模拟结果与其他 3 套网格差异最大,证明射流口的网格划分对模拟结果影响很大。通过对比模拟结果较好的 G2 ~ G4,可以发现射流口范围外的网格粗细程度对模拟结果影响很小,相比之下 G3 拟合效果最好且计算成本较低,所以采用 G3 网格进行模拟(图 2)。第 1 孔射流布置在距离入流边界 2.0 m 的位置,阻尼区长度占水槽全长的 60%。

表 1 网格信息

Table 1 Grid information

网格	网格数	射流口网格划分	$\Delta x_{\max}/\Delta x_{\min}$	$\Delta y_{\max}/\Delta y_{\min}$	计算时长/h
G1	91×57×77	8×8	35.0	15.4	15
G2	91×65×77	10×10	35.0	15.4	20
G3	75×55×77	10×10	45.0	21.6	14
G4	63×47×77	10×10	70.0	27.0	4

注: $\Delta x_{\max}$ 、 $\Delta y_{\max}$ 分别为网格 x 、 y 方向上的最大分辨率; $\Delta x_{\min}$ 、 $\Delta y_{\min}$ 分别为网格 x 、 y 方向上的最小分辨率。

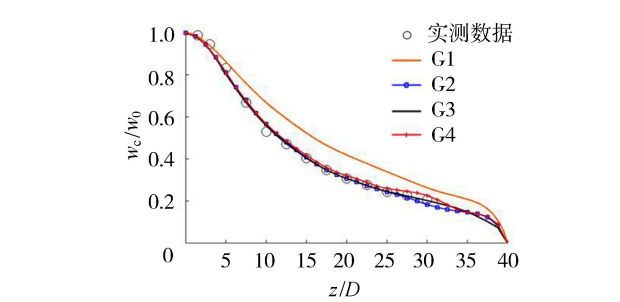


图 1 不同网格设置条件下静水射流的垂向速度衰减曲线

Fig.1 Vertical velocity attenuation curve of static water jet under different grid settings

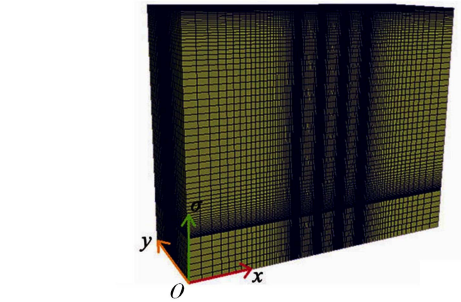


图 2 计算域网格划分

Fig.2 Grid partitioning of computational domains

图 3、图 4 是模型在波流环境中的验证结果(图中 c 和 c_0 分别为某位置处的时均浓度和射流出口浓度),其中前两个断面 $z/D=5.0$ 、 $z/D=7.5$ 速度场与浓度场的模拟结果与试验数据吻合较好。 $z/D=10.0$ 断面因为波流与多孔射流强烈的相互作用,速度、浓度分布有差异,但模拟结果中速度、浓度分布的展宽和峰值与实

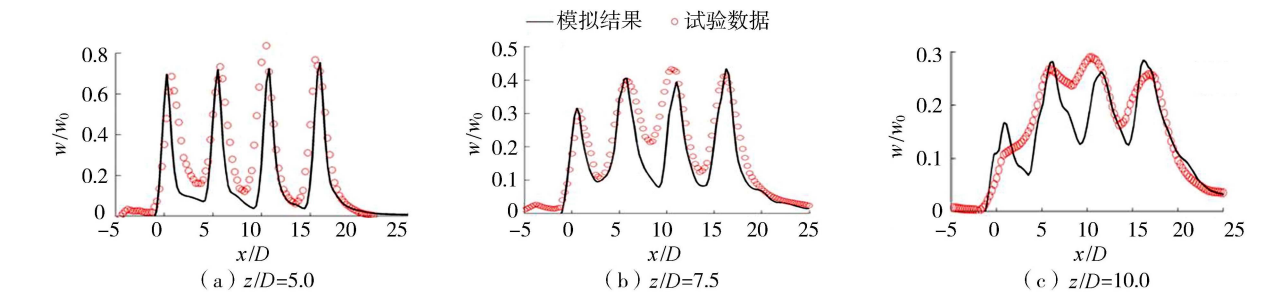


图 3 波流环境中不同断面处时均速度验证

Fig.3 Verification of time average velocity at different sections in wave-current environment

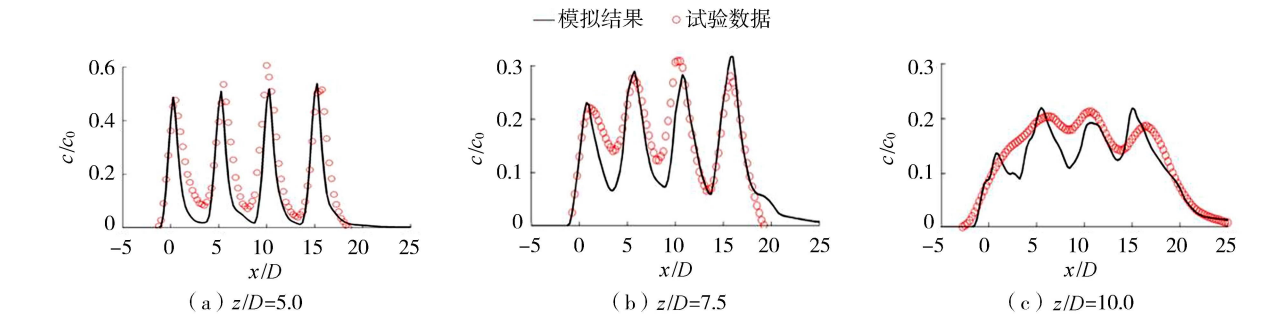


图 4 波流环境中不同断面处时均浓度验证

Fig.4 Verification of time average concentration at different sections in wave-current environment

测值相差不大。此外,模型在静水、规则波、横流等不同环境中射流的数值模拟结果与实测数据和经验曲线吻合均较好,证明了该模型的合理性和准确性。关于波流环境中射流数学模型的更多介绍和验证结果可参见文献[16,22]。

1.2 湍流边界设置

湍流射流中脉动和混合主要是由大尺度涡引起的。大尺度涡结构对流场的边界条件及初始条件具有很强的依赖性,而且与主流的相互作用较强。所以在大涡模拟过程中合理地给定射流瞬时紊动边界对于射流发展具有非常重要的意义^[23]。合成涡方法是指在入流边界上进行涡的叠加合成,每个涡对入流边界各网格点的作用强度都由形状函数确定,涡的位置与方向随机生成^[24-25]。相比其他常用的湍流进口给定方法,合成涡方法可以较大程度地避免紊动衰减,最为简单可行,进口发展段更短,可以得到具有正确统计特性的湍流,且便于修正和操作。

本文数值计算采用合成涡方法生成各向同性的湍流,即令 $\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z$,并通过生成明渠入流边界算例验证了该方法的可靠性,同时根据得到的统计特性验证了合成涡方法的有效性,最后用合成涡方法生成射流出口边界,并植入三维大涡数值波流水槽模型中进行射流模拟。

1.3 模拟组次设置

为研究波流环境中多孔射流的三维运动特性以及射流间的相互作用,设置组次 B1 ~ B4;为探究孔间距影响并得到所有组次下最优相对孔间距,设置组次 D1 ~ D4。在所有组次中,射流出口流速均为 68.55 cm/s,横流流速均为 5.48 cm/s。波流环境中多孔射流计算参数见表 2。

表 2 波流环境中多孔射流计算参数
Table 2 Calculation parameters of multiple jets in wave-current environment

组次	孔数	相对孔间距	波周期/s	波高/cm	射流与波浪速度比
B1	4	5.0	1.0	3.0	26.3
B2	4	5.0	1.4	3.0	13.1
B3	4	5.0	1.0	6.0	15.3
B4	4	5.0	1.4	6.0	7.7
D1	2	2.5	1.4	6.0	7.7
D2	2	5.0	1.4	6.0	7.7
D3	2	7.0	1.4	6.0	7.7
D4	2	10.0	1.4	6.0	7.7

2 模拟结果与分析

2.1 波流环境中多孔射流的三维运动特征

以 B4 组次为例,选取 4 个典型特征相位的瞬时流场分析多孔射流的运动特性,其中 $t=0T,0.25T,0.5T,0.75T$ (T 为波周期)分别表示第 1 孔射流上方波浪水质点处于上跨零点、波峰、下跨零点、波谷相位。图 5 为 $y/D=0$ 断面流线分布图, $(u^2+w^2)^{1/2}$ 为断面横向和垂向合成速度。

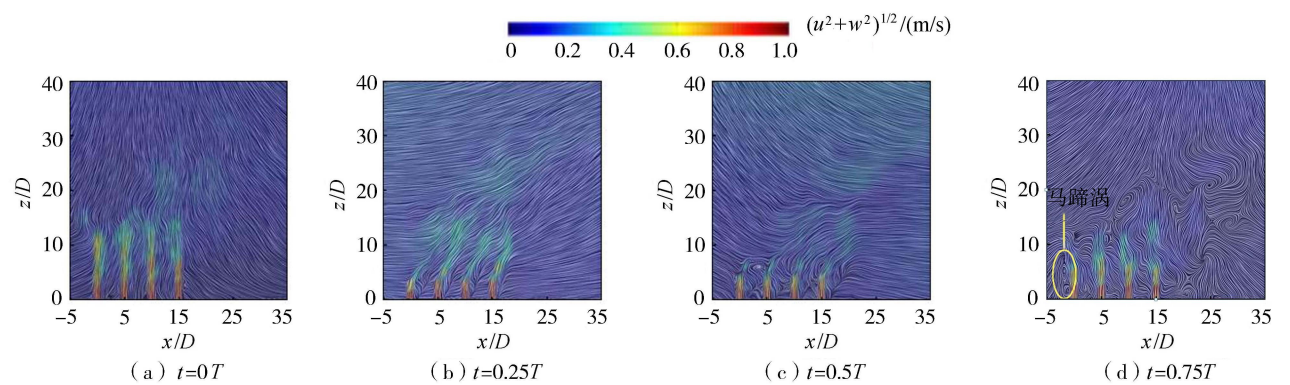


图 5 $y/D=0$ 断面流线分布
Fig. 5 Streamline distribution diagram of $y/D=0$ section

- a. 在 $t=0T$ 时刻,波浪水质点垂向速度正向最大,射流拥有较大的垂向动量。环境横流速度的方向和大小与射流差异较大,造成多孔射流迎流面和背流面处剪切层失稳,产生剪切涡,流线在 $z/D=10.0$ 附近具有明显的偏转;由于横流绕流作用,在第 4 孔射流背流面下游形成了尾涡,流线从底部偏向前方射流。
- b. 在 $t=0.25T$ 时刻,波浪水质点横向速度正向最大,与横流流速叠加,背景流场中横向速度在周期内达到最大值,流场与横流环境中的射流流场非常相似。射流与横流速度比相对较小,横流绕流作用强,射流迎流面和背流面上的剪切涡较为明显;各孔射流的背流面都可以观察到树叶状的流线,是横流绕流后残存水平

动量与背流区尾涡平衡的结果。

c. 在 $t=0.5T$ 时刻,波浪水质点垂向速度负向最大,射流动量被大大削减。射流迎流面附近的流线弯曲程度更大,前3孔射流背流区流线杂乱。在 $z/D=8.0$ 高度附近第1孔射流与第2孔射流发生汇合,产生了较为明显的涡旋,是由于下行的剪切涡与上行的尾涡相遇,使流线发生卷曲。

d. 在 $t=0.75T$ 时刻,波浪水质点横向速度负向最大,与横流发生着强烈的相互作用,射流与环境流场也发生剧烈的掺混,流场中流线混乱,涡旋众多。由于波浪的负向流速略大于横流流速,多孔射流均逆流偏转;横流受到波浪和射流的阻碍作用,围绕第1孔射流形成2个明显的马蹄涡。

图6为 $x/D=0$ (第1孔射流位置处)断面流线分布图, $(v^2+w^2)^{1/2}$ 为断面纵向和垂向合成速度。在 $t=0T$ 时刻,射流与环境流体之间的垂向速度差造成速度断面失稳,周围流线均偏向射流中心;在 $t=0.25T$ 时刻,以射流轴线为对称中心,形成肾形反向旋转涡对(CVP)的雏形,这是横向紊动射流的一个显著特征,此时射流流线顺流偏转程度最大,红色区域面积较小;在 $t=0.5T$ 时刻,波浪对射流垂向动量的削弱,导致CVP分布范围缩小,但已形成了2个明显的涡旋,且涡旋位置有所抬高;在 $t=0.75T$ 时刻,CVP分布范围大大拓展,涡旋中心位置继续提升,在CVP下方还分布着大量马蹄涡。

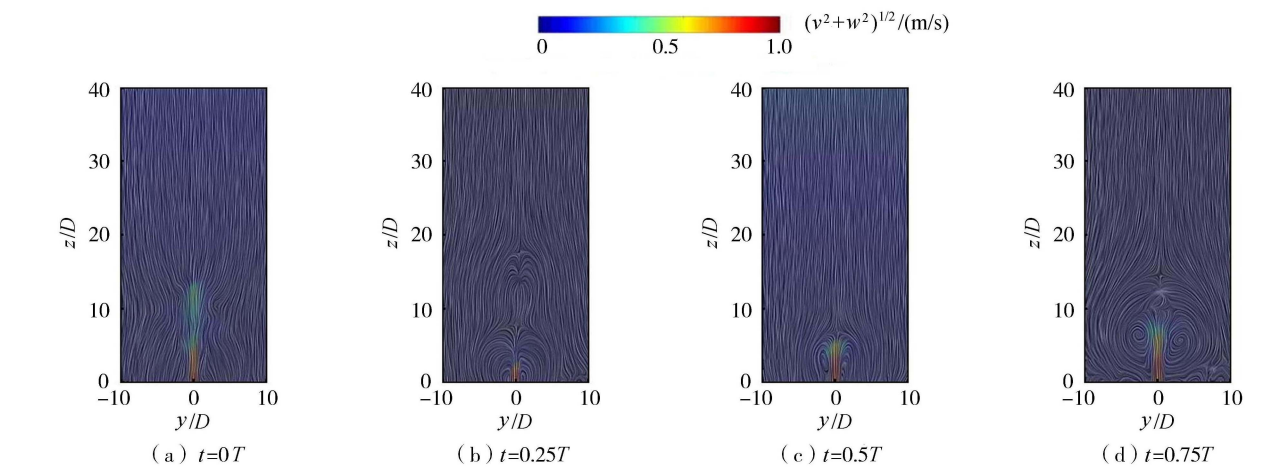


图6 $x/D=0$ 断面流线分布
Fig. 6 Streamline distribution diagram of $x/D=0$ section

图7为 $z/D=20$ 断面流线分布图, $(u^2+v^2)^{1/2}$ 为断面横向和纵向合成速度。在 $t=0T$ 时刻,射流垂向动量较大,流场中同时出现了绕过射流的马蹄涡和射流背流区的尾涡;在 $t=0.25T$ 时刻,射流顺流偏转程度最大,在 $z/D=20$ 高度处流场受射流影响较小,流线较为顺直;在 $t=0.5T$ 时刻,各孔射流上方波浪水质点所处相位不同,横向流速沿程稍有差异;在 $t=0.75T$ 时刻,因为波流间强烈的相互作用,在 $x/D > 15$ 范围内出现了3个明显的大尺度涡旋结构。

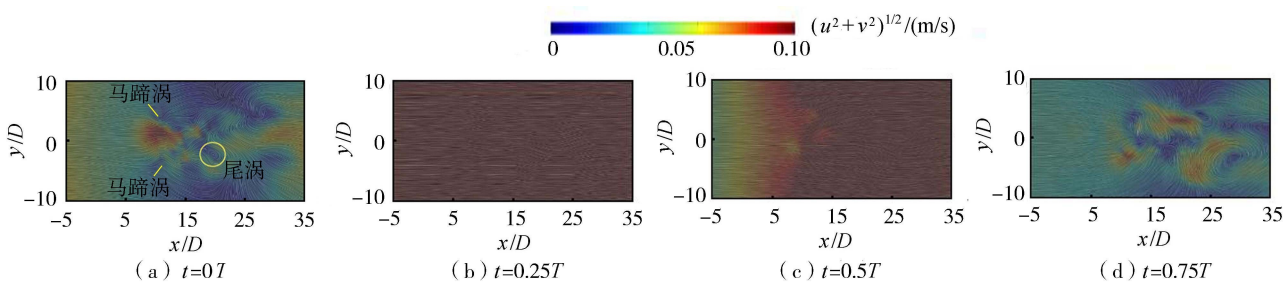


图7 $z/D=20$ 断面流线分布
Fig. 7 Streamline distribution diagram of $z/D=20$ section

通过对一个波周期内不同断面、不同特征相位下的瞬时流线和涡旋结构的分析可知,流场流线和涡旋分布随波浪水质点的周期变化呈现完全不同的景象;在上跨零点相位,流场和射流与横流速度比较大的横流流场类似;在波峰相位,流场和射流与横流速度比较小的横流流场类似;在下跨零点相位,射流动量明显被削减,流场中涡旋数量增多;在波谷相位,流场中的涡旋结构最为丰富,包括因横流受到射流的阻挡而围绕射流

产生的马蹄涡、基于环形剪切层的凯尔文-亥姆霍兹不稳定性在射流迎流面和背流面上形成的剪切涡、因横流扰流作用在射流背流面下游形成的尾涡、因横流扰流作用涡旋断面由圆形变为弯曲的肾形涡、因横流与波浪的相互作用而产生的大尺度强涡旋。射流被环境流体稀释的主要因素是射流近区涡的出现和配对,所以周期性变换的波流流场、大量的涡旋导致射流的紊动和扩散能力增强,这是射流在波流环境中(相比于单一的水流环境)垂向速度衰减更显著、更快速的主要原因。

选取 B1 ~ B4 组次的时均流场分析波浪强度对射流主轴线速度衰减的影响,这 4 个组次中射流出口流速与横流流速均保持不变,射流与波浪速度比 R_w 即可表征当前组次中波浪强度的相对大小。提取 B1 ~ B4 组次 4 孔射流的主轴线,计算主轴线上的三维合成速度,图 8 为 B4 组次 4 孔射流沿主轴线速度衰减曲线。

由图 8 可知,第 1 孔射流速度沿程衰减最快,其次是第 4 孔射流,因为在波流动力环境中外侧射流直接与环境流体作用,其稀释扩散速度较快;第 4 孔射流速度衰减曲线单调递减,其他 3 孔射流的速度衰减曲线均会形成一个明显的凸起,且上游射流出现凸起的位置均先于下游射流。可以看出第 1 孔射流流线在速度衰减曲线凸起处($z/D=12$ 附近)形成一个转折点,转折点上游是一段平缓的轨迹线,将其称作弯曲平台,转折点下游第 1 孔射流逐渐与其他射流汇合。综上所述,弯曲平台及速度衰减曲线中凸起段的形成与下游射流对上游射流的阻碍作用有关;在经历弯曲平台后,射流流线相互汇合;后方射流的阻碍作用使得多孔射流轨迹上速度衰减程度小于单孔射流情况。

对比不同波况下多孔射流时均合成速度沿三维轨迹线的衰减曲线(图 9),均遵循波浪强度越大,射流轴线速度衰减越快,即稀释扩散效果越佳的规律;通过对比图中前 3 孔的射流流线,发现波浪强度越大,弯曲平台越早出现,即表明多孔射流更早地发生汇合,以致汇合位置更低。

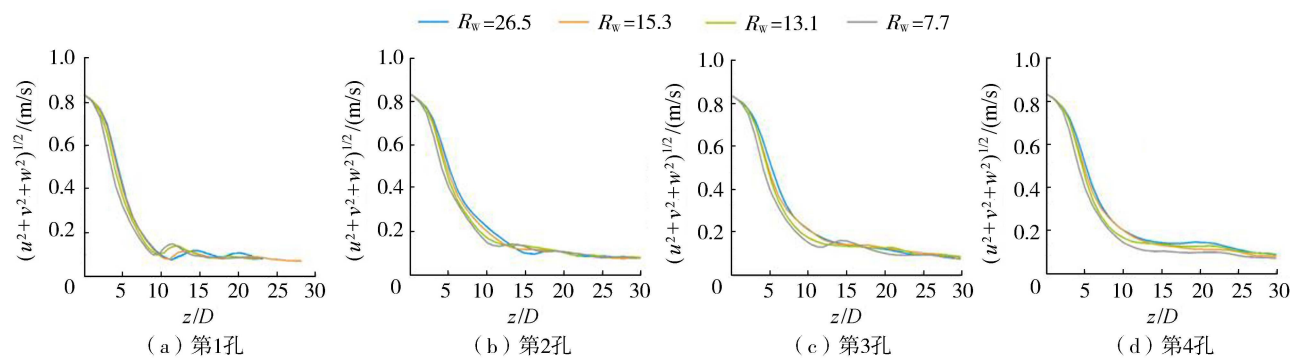


图 9 不同波况下多孔射流时均合成速度沿主轴线衰减曲线

Fig.9 Attenuation curve of time-average synthetic velocity of multiple jets along the main axis under different wave conditions

2.2 波流环境中双孔射流孔间距对射流扩散的影响

图 10 为射流口高度处($z/D=0$)断面上的流线分布。当相对孔间距 $s/D=2.5$ 时(s 为孔间距),双孔射流距离比较近,只形成了 1 个尺度较大的马蹄涡;当 $s/D\geq 5.0$ 时,各组次断面中双孔射流附近均出现一大一小 2 个马蹄涡,随着射流孔间距的增大,第 1 孔射流附近马蹄涡的大小基本保持不变,第 2 孔射流附近马蹄涡的尺度逐渐增大。

图 11 为不同相对孔间距双孔射流口连线中点处($x/D=0.5$)断面上的流线分布,可以观察到不同孔间距下都出现了成形的 CVP 结构,但随着孔间距的增大,CVP 结构的尺寸和形状略有不同。当 $s/D=2.5$ 时,CVP 位置较低,呈扁平椭圆形;随着孔间距的增大,CVP 的形状逐渐变为正圆形;当 $s/D=10.0$ 时,1 对小尺度涡旋逐渐在大尺度涡旋的正上方形成。综上所述,在一定范围内,孔间距越大,多孔射流流场中涡的数量和规模越大,进而导致射流与环境流体之间的相互作用增强。

在波峰相位下,流场中较容易观察到动量和浓度较大的“污染物云团”,此时双孔射流之间的相互作用

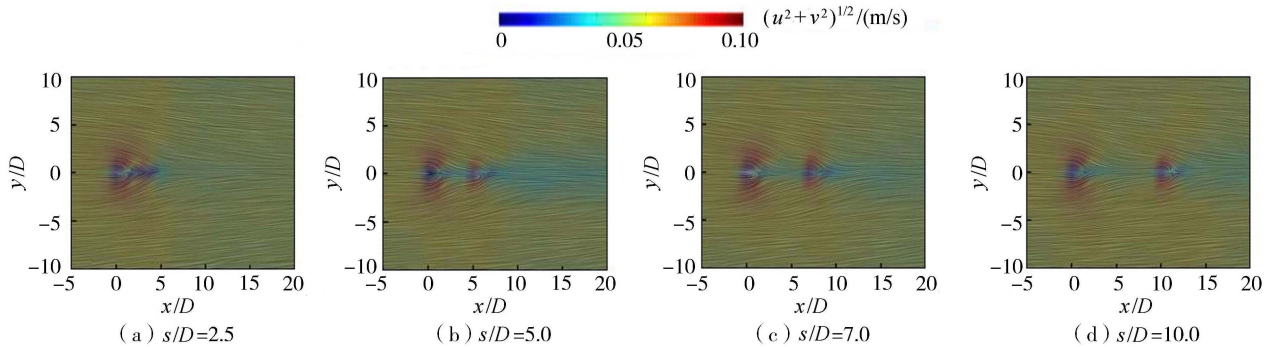


图 10 $z/D=0$ 断面流线分布

Fig. 10 Streamline distribution diagram of $z/D=0$ section

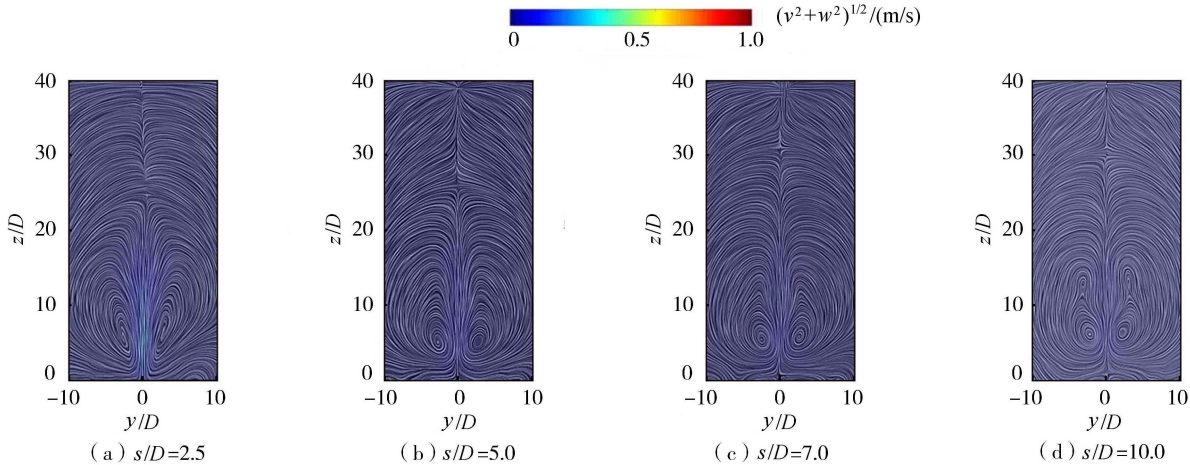


图 11 双孔射流连线中点处断面流线分布

Fig. 11 Distribution diagram of section streamline at the midpoint of two-hole jet connection

最为明显。图 12 为不同相对孔间距波峰相位下的双孔射流平均垂向速度分布。当 $s/D=2.5$ 时,第 1 孔射流与第 2 孔射流主体汇合较早,当 $z/D>5.0$ 时,其流动特性与波流环境中单孔射流较为相似;当 $s/D=5.0$ 时,第 1 孔射流的一部分脱离出射流主体,成为“污染物云团”并与第 2 孔射流左侧分支直接接触,在 $z/D=17.0$ 高度处,双孔射流的“污染物云团”之间也直接产生了相互作用;当 $s/D=7.0$ 时,一大一小 2 个“污染物云团”从双孔射流主体上脱离,其中从第 2 孔射流脱离射流主体的右侧分支与第 2 孔射流的左侧分支产生一定程度的相互作用,此时双孔射流均与环境水体有比较大的接触面积;当 $s/D=10.0$ 时,从双孔射流右侧发展而来的 2 个“污染物云团”尺度差异比较明显,双孔射流比较充分地暴露在环境流场中,双孔射流之间只发生了少许相互作用。由此可见,孔间距的改变会对双孔射流的形态产生影响,从直接相互作用的角度来看,孔间距的增大推迟了双孔射流的汇合,从间接相互作用的角度来看,孔间距的增大削弱了前方射

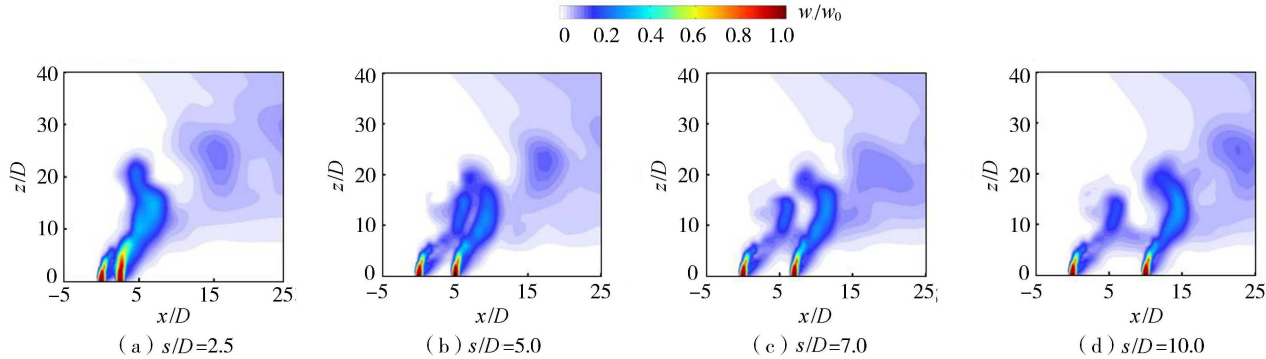


图 12 波峰相位下双孔射流平均垂向速度分布

Fig. 12 Average vertical velocity distribution of double-hole jet under wave crest phase

流对方射流的遮掩作用,同时也削弱了后方射流对前方射流的阻挡作用。

图 13 为不同相对孔间距垂向速度沿主轴线的衰减曲线,可以定量分析射流间相互作用对其运动扩散特性的影响。从第 1 孔和第 2 孔的速度衰减曲线中发现,孔间距与扩散效果并非正相关,射流与射流之间的相互作用也会加速扩散过程。当 $s/D=7.0$ 时,垂向速度衰减最快,双孔射流运动扩散效果最佳。

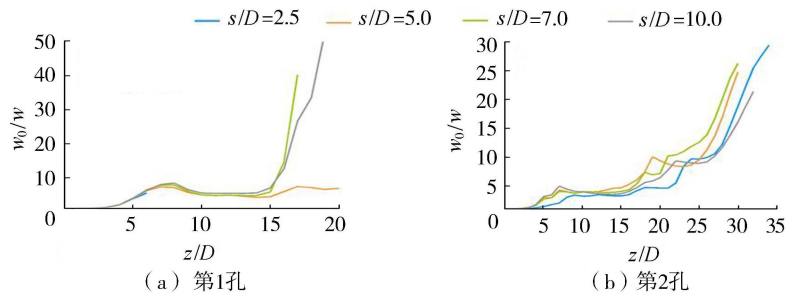


图 13 双孔射流垂向速度沿主轴线的衰减曲线

Fig. 13 Attenuation curve of vertical velocity of double-hole jet along the main axis

综上可知,射流与环境水体、射流与射流之间的相互作用都能够加速射流运动扩散过程。随着孔间距的增大,双孔射流之间的相互作用慢慢削弱,而射流与环境水体之间的相互作用却在慢慢增强,在本文试验组次设置下, $s/D=7.0$ 为最优相对孔间距,在此设置下,出现了双孔射流之间、射流与环境流体之间同时发生较充分掺混的情况。

3 结 论

- a. 在波谷相位时刻,由于横流与波浪相互作用强烈,流场内的三维涡旋结构丰富、尺度较大、数目众多,有利于射流与环境水体、射流与射流之间的掺混,这是波流环境比单一横流环境中多孔射流运动扩散效果更佳的主要原因。
- b. 波浪强度越大,射流轴线速度衰减越快,稀释扩散效果越佳;波浪强度越大,弯曲平台越早出现,汇合位置更低,多孔射流更早地发生汇合。
- c. 孔间距的改变会对双孔射流的形态产生影响,从直接相互作用的角度来看,孔间距的增大推迟了双孔射流的汇合;从间接相互作用的角度来看,孔间距的增大削弱了前方射流对方射流的遮掩作用,同时也削弱了后方射流对前方射流的阻挡作用。
- d. 随着孔间距的增大,双孔射流之间的相互作用慢慢削弱,而射流与环境水体之间的相互作用却在不断增强。在本文试验组次设置下,最优相对孔间距为 7.0。

参考文献:

[1] FANG Shuqiao, CHEN Yongping, SHI Weiyong, et al. General integral model for a jet in wavy current environment[J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 115: 584-615.

[2] 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))

[3] GUTMARK E J, IBRAHIM I M, MURUGAPPAN S. Dynamics of single and twin circular jets in cross flow[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(3): 653-663.

[4] 槐文信, 李伟. 静止环境中倾斜浮力射流[J]. 武汉水利电力学院学报, 1991, 24(5): 489-494. (HUAI Wenxin, LI Wei. Inclined buoyant jets in static environments[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 1991, 24(5): 489-494. (in Chinese))

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

[6] ZHAO L Q, WANG X C. Numerical investigation of parallel plane jets at low Reynolds number[J]. European Journal of Mechanics; B/Fluids, 2018, 67: 211-219.

[7] KOLÁŘ V, SAVORY E. Dominant flow features of twin jets and plumes in crossflow[J]. Journal of Wind Engineering and

- Industrial Aerodynamics,2007,95(9/10/11):1199-1215.
- [8] 肖洋,梁嘉斌,李志伟.射流孔间距对横流中两孔射流稀释特性的影响[J].水利水电科技进展,2016,36(3):20-25. (XIAO Yang,LIANG Jiabin,LI Zhiwei. Effect of spacing of nozzles on dilution properties of two tandem jets in cross-flow[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(3):20-25. (in Chinese))
- [9] 肖洋,雷鸣,李开杰,等.横流中多孔射流流动特性实验研究[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))
- [10] XIAO Yang,TANG Hongwu,LIANG Dongfang,et al. Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow[J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. B,2011,23(6):806-813.
- [11] 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))
- [12] 沈小雄,宋静贤,李佳.波浪作用下双孔射流压强特性试验研究[J].长江科学院院报,2018,35(8):51-55. (SHEN Xiaoxiong,SONG Jingxian,LI Jia. Pressure characteristics of dual jets under wave action[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2018,35(8):51-55. (in Chinese))
- [13] LIU Cheng'en,HSIAO F B. Evolution of instability modes and spreading characteristics of a planar jet flow under long-wave excitations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2022,94:108925.
- [14] ANGHAN C,BADE M H,BANERJEE J. A review on fundamental properties of the jet in the wave environment[J]. Ocean Engineering,2022,250:110914.
- [15] 丁宏伟,杨全义,徐振山,等.波流环境下双孔浮射流运动特性[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):183-188. (DING Hongwei,YANG Quanyi,XU Zhenshan,et al. Characteristics of dual buoyant jets movement in wavy-crossflow environment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(2):183-188. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] LIN Pengzhi,LI C W. A σ -coordinate three-dimensional numerical model for surface wave propagation[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,2002,38(11):1045-1068.
- [18] 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.
- [19] XU Zhenshan,CHEN Yongping,TAO Jianfeng,et al. Three-dimensional flow structure of a non-buoyant jet in a wave-current coexisting environment[J]. Ocean Engineering,2016,116:42-54.
- [20] XU Zhenshan,CHEN Yongping,TAO Jianfeng,et al. Modelling of a non-buoyant vertical jet in waves and currents[J]. Journal of Hydrodynamics,2016,28(5):778-793.
- [21] CHEN Yongping,LI Chiwei,ZHANG Changkuang. Large eddy simulation of vertical jet impingement with a free surface[J]. Journal of Hydrodynamics,2006,18(2):148-155.
- [22] 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))
- [23] HREBTOV M,BAZHENOV A,BORYNYAK K. Numerical investigation of flow dynamics and scalar transport in a wall-bounded turbulent jet[C]. Journal of Physics:Conference Series,2017,925:012031.
- [24] JARRIN N,BENHAMADOUCHE S,LAURENCE D,et al. A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2006,27(4):585-593.
- [25] LUO Yin,LIU Hongjun,HUANG Qin,et al. A multi-scale synthetic eddy method for generating inflow data for LES[J]. Computers & Fluids,2017,156:103-112.

(收稿日期:2023-04-06 编辑:熊水斌)