

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.015

波流环境下双孔浮射流运动特性

丁宏伟¹,杨全义²,徐振山¹,张玉玲¹,陈永平¹,杨柳俊³

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098; 2. 中国卫星海上测控部,江苏 无锡 214400;
3. 江苏省水文水资源勘测局南通分局,江苏 南通 226006)

摘要: 利用粒子图像测速技术(PIV)对波流环境下双孔浮射流的速度场进行测量,对不同组次的相位平均速度场、时均速度场进行定性描述;通过引入考虑横流、波浪、浮力影响的综合特征长度 l_{mb} ,给出了轴线垂向速度衰减过程分区的定量结果。研究表明,波流作用下会产生污染物云团现象,加快双孔射流速度衰减;波浪的作用能够减弱孔间相互影响;浮力的作用能够减小射流体偏转角度和侧向展宽;无量纲的轴线垂向速度变化可以分为近区($z/l_{mb}<3$)、过渡区($3<z/l_{mb}<6$)、远区($z/l_{mb}>6$)3个区段。
关键词: 双孔浮射流;粒子图像测速技术;波流环境;速度场;特征长度
中图分类号:TV132+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)02-0183-06

Characteristics of dual buoyant jets movement in wavy-crossflow environment

DING Hongwei¹, YANG Quanyi², XU Zhenshan¹, ZHANG Yuling¹, CHEN Yongping¹, YANG Liujun³
(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Wuxi 214400, China;
3. Nantong Branch, Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Jiangsu Province, Nantong 226006, China)

Abstract: Flow field of dual buoyant jets in wavy-crossflow environment was measured using the PIV technique. The phase-averaged and time-average velocity field in different conditions were qualitatively described, and the quantitative result of vertical velocity decay at the centerline was given by introducing a characteristic length(l_{mb}), considering effects of crossflow, wave and buoyancy. The results showed that, the effluent clouds were produced due to the combined effects of wave and current and the interaction of two jets was attenuated under the effect of wave. The buoyancy effect could reduce the jet deflection angle and the lateral width. Based on the dimensional analysis, dimensionless vertical velocity at the centerline could be divided into three regions: the near-field region ($z/l_{mb}<3$), the transition region ($3<z/l_{mb}<6$), and the far-field region ($z/l_{mb}>6$).

Key words: dual buoyant jets; PIV technique; wavy-crossflow environment; flow field; characteristic length

沿海地区生活污水经过预处理以后,通常以射流的形式排放到周围水体中^[1]。由于海水密度一般大于排放尾水的密度,因此尾水排放可以认为是一种正浮力射流问题。

横流下浮射流研究已取得了丰富成果。Wright^[2]根据主导因素的不同将横流下浮射流分为4个区段,结合量纲分析和试验数据给出了不同区域的经验公式。Lee等^[3]开发了适用于横流中浮射流的通用拉格朗日模型,并利用大量的试验数据论证了该模型的可靠性。波浪环境下的射流问题主要集中在波浪对浮射流

基金项目:江苏省水利科技项目(2017048);江苏省自然科学基金(BK20170882)
作者简介:丁宏伟(1994—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail:18351936505@163.com
通信作者:徐振山,讲师。E-mail:zsxu2006@hhu.edu.cn
引用本文: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.

运动稀释的影响上^[4-5],Chang 等^[6]用 PIV 与 PLIF 比较了不同周期与不同波高的规则波对射流稀释程度的影响;陈永平等^[7]发现随着波浪作用的增强,周围水体对浮射流的稀释能力明显增强;Hsiao 等^[8]用 PIV 对规则波环境下的非浮力射流进行了试验研究,通过相位平均法对其紊动特性进行了定量描述。实际海域中往往是波流共存环境,但是目前相关研究还处于非浮力射流阶段。如 Wang 等^[9]、徐振山等^[10]通过物理试验与数值模拟的方法发现波流作用下产生的污染物云团对稀释度提高具有一定积极作用。

排放口通常采用多孔布置的形式。与单孔射流相比,多孔射流的相邻两股射流之间存在吸附效应,这将影响流场结构与废水稀释效果。多孔射流研究主要涉及横流下的非浮力射流问题^[11-14],波浪或者波浪作用下的多孔射流^[15]研究成果不多。蒋传丰等^[16]结合厦门污水排海工程进行的模型试验,研究了多孔浮射流出口参数对表面稀释率的影响,指出海流流速越大,最小稀释度越大;Lee^[17]基于雷诺时均方程模拟了莲花形布置的多孔浮射流混合过程,得到了射流轨迹线的数值解;张玉玲等^[18]采用 PIV 和 PLIF 技术对波流环境下多孔垂向射流的速度场和浓度场进行测量。

综上,目前单孔射流动力响应过程认识相对充分,多孔射流在静水、横流环境下的研究有一定进展,但波流环境下多孔浮射流运动机理、区段划分等还有待解决。笔者采用 PIV 技术研究双孔垂向圆管浮射流在不同浪流组合环境下的相位平均速度场和时均速度场。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

试验在河海大学港航工程试验室的波流水槽中进行,水槽长 46.0 cm、宽 0.5 m、高 1.0 m。生波装置为水槽前端的推板式造波机。水槽尾部布置消波装置,能有效降低波浪反射影响。

试验横流流速为 0.08 m/s,射流源为距地面 3 m 的恒定水箱。玻璃转子流量计可控制射流出口的流量,从而控制出口流速。试验时,在水槽中部沿水流前进方向分别设置了 2 个垂向射流口孔 1 和孔 2,直径 d 均为 1.0 cm,间距 $s=3.0$ cm,喷口距水槽底部均为 10 cm。坐标原点设在孔 1 中心处。观测时取大小两个视窗,靠近孔口区域的流速使用小视窗数据,小视窗范围外的流速使用大视窗数据。大视窗范围: $-7.5\text{ cm}<x<27\text{ cm}$, $-2\text{ cm}<z<32\text{ cm}$;小视窗范围: $-3.3\text{ cm}<x<13.6\text{ cm}$, $-0.7\text{ cm}<z<16\text{ cm}$ 。试验装置及坐标系设定如图 1 所示。

试验中,水槽静止水深均为 50 cm,PIV 拍摄频率保持在 7.25 Hz,所有工况均连拍 300 张,拍摄时间为 42.4 s,保证至少测到 20 个波周期的数据。

1.2 量纲分析

浮射流需要综合考虑波浪水质点速度、横流流速、初始浮力通量与初始动量的影响。其中,初始动量 M_0 、初始浮力通量 B_0 为

$$M_0 = Q_0 u_0 \tag{1}$$

$$B_0 = g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} Q_0 \tag{2}$$

式中: Q_0 ——初始流量, m^3/s ; u_0 ——初始流速, m/s ; $\Delta \rho$ ——密度差, kg/m^3 ; ρ_a ——环境水体密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度,取 9.81 m/s^2 。

Wright^[2]研究了横流下浮射流的时均运动稀释规律,采用 2 个特征长度 l_m 与 l_b 分别表示浮射流初始动量与浮力通量相对于横流的作用强弱:

$$l_m = \frac{M_0^{\frac{1}{2}}}{u_c} \quad l_b = \frac{B_0}{u_c^3} \tag{3}$$

式中: u_c ——水流平均速度, m/s 。本文提出新的综合特征速度 u_{ch} 表征波浪和水流的共同作用。假设两者线

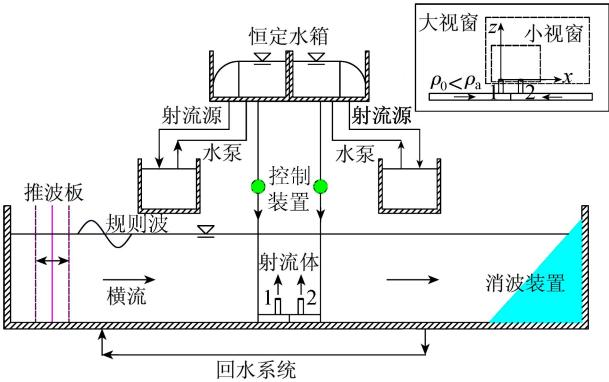


图 1 试验装置及坐标系设定示意图
Fig.1 Sketch of experiment setup and coordinate system

性叠加,综合特征速度定义为

$$u_{ch} = u_c + \bar{u}_w$$

(4)

其中

$$\bar{u}_w = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(kh_a)}{\sinh(kh)} \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} \cos(\sigma t) dt = \frac{2H}{T} \frac{\cosh(kh_a)}{\sinh(kh)}$$

式中: $\bar{u}_w$ ——波浪水质点在射流出口处水平速度的周期平均值,m/s; H ——波高,m; T ——波浪周期,s; $\sigma = 2\pi/T$; k ——波数, m^{-1} ; h ——环境水深,m; h_a ——射流口处的水深, m_0 。

综合特征长度定义为

$$l_{mb} = \frac{M_0^{\frac{1}{4}} B_0^{\frac{1}{2}}}{u_{ch}^2}$$

(5)

波流环境下浮射流轴线垂向速度衰减规律可以简化为 $v_c = f(u_0, l_{mb}, z)$ 。

1.3 静水条件下单孔浮射流速度验证

为了确定试验装置测量的准确性,开展 6 组静水环境下不同速度的单孔浮射流试验,射流体为酒精与水的混合物,组次及参数设定见表 1。其中,静水下的浮射流特征长度定义为

$$l_{ms} = M_0^{\frac{3}{4}} / B_0^{\frac{1}{2}}$$

(6)

图 2 为静水条件下浮射流轴线垂向速度 w_c 沿程分布,与 Papanicolaou 等^[19]的经典试验结果吻合良好,说明该试验装置可以准确获取静水浮射流速度场数据。

1.4 试验方案

孔间相互作用是本文的重要关注点,孔间距应采用较小值,而间距过小双孔射流特性又会与单孔类似,因此孔间距选择 3 倍孔径(3 cm),组次安排见表 2。

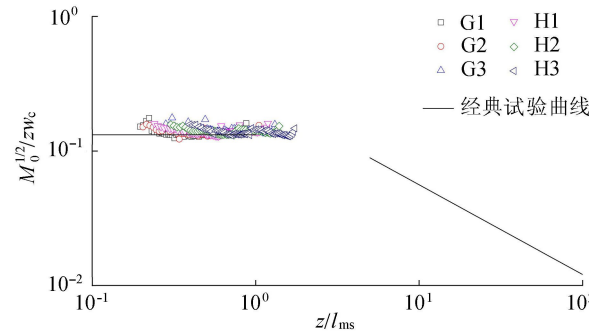


图 2 轴线垂向速度衰减与经典试验对比
Fig.2 Comparison between centerline velocity data and classic results

2 试验数据分析

2.1 波流共同作用对双孔浮射流的影响

采用相位平均的思想,得到不同相位的流场图。以组次 A4 为例,说明波流环境下双孔浮射流运动特性。(a) $t = 0T$ 时刻(图 3(a)),射流口上方处于波谷位置。波浪引起的水质点水平速度为左向极大值而垂直方向分量为零。此时的环境流体水平向速度为最小值。射流主体段(约 $z/d = 0 \sim 20$)受环境水体影响较小,速度矢量方向基本向上; $z/d = 20 \sim 30$ 的射流水体受上一周期的惯性与浮力影响,仍继续向右上方运动,与射流主体段脱离,浮力作用使速度矢量逐渐向竖直方向偏转。比较 2 个射流口的出流状况可以看出,射流口 1 前无掩护,射流体只能上升到 $z/d =$

表 1 静水单孔浮射流组次参数

Table 1 Parameters of single buoyant jet in stagnant water

组次	$Q_0/(L \cdot h^{-1})$	$\Delta\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$u_0/(cm \cdot s^{-1})$	l_{ms}/cm
G1	300	0.007 3	106.10	37.33
G2	250	0.007 3	88.42	31.10
G3	200	0.007 3	70.74	24.88
H1	300	0.0127 5	106.10	28.24
H2	250	0.0127 5	88.42	23.54
H3	200	0.0127 5	70.74	18.83

注: $h = 50\text{ cm}$ 。

表 2 波流组合环境双孔浮射流组次参数

Table 2 Parameters of dual buoyant jets in wavy-crossflow environment

组次	$u_0/(cm \cdot s^{-1})$	T/s	H/cm	$\Delta\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$u_{ch}/(cm \cdot s^{-1})$	l_{mb}/cm
A1	106.10	1.00	2.00	0.007 3	9.11	2.86
A2	106.10	1.00	4.00	0.007 3	10.22	2.27
A3	106.10	1.50	2.00	0.007 3	10.02	2.36
A4	106.10	1.50	4.00	0.007 3	12.03	1.64
A5	106.10	2.00	2.00	0.007 3	10.37	2.20
B1	88.42	1.00	2.00	0.007 3	9.11	2.38
B2	88.42	1.00	4.00	0.007 3	10.22	1.89
B3	88.42	1.50	2.00	0.007 3	10.02	1.97
B4	88.42	1.50	4.00	0.007 3	12.03	1.36
B5	88.42	2.00	2.00	0.007 3	10.37	1.84
D1	106.10	1.00	2.00	0.0127 5	9.11	3.77
D2	106.10	1.00	4.00	0.0127 5	10.22	3.00
D3	106.10	1.50	2.00	0.0127 5	10.02	3.12
D4	106.10	1.50	4.00	0.0127 5	12.03	2.16
D5	106.10	2.00	2.00	0.0127 5	10.37	2.91

注: $u_c = 8\text{ cm/s}$ 。

15 位置,而射流口 2 处的流体由于第一段流体的掩蔽作用可以上升到 $z/d=20$ 的位置。 $z/d=10 \sim 15$ 范围内的两股流体掺混现象明显。(b) $t=1/4T$ 时刻,如图 3(b) 所示,射流口上方处于上跨零点,波浪引起的水质点水平速度为零,射流主体段进一步抬升。两股射流之间的掺混现象更加显著,在 $z/d=15$ 以上的主体段几乎合成一股,共同运动,此时已经无法比较 2 股射流体的抬升高度。(c) $t=1/2T$ 时刻,如图 3(c) 所示,射流口上方处于波峰位置,波浪引起的水质点水平速度为右向极大值。与从左向右的来流速度叠加以后,环境流体水平向速度达到右向最大。因此,该时刻射流主体偏转角度最大,且在约 $z/d=5$ 位置 2 股射流就发生了明显掺混,合成一股。此时刻,观察范围内的射流体可以抬升到 $z/d=30$ 位置处。上半部分射流体由于惯性作用再加上速度衰减,因此偏离了下半部分射流体轴线,整体位于左上方,使得射流轴线呈 S 形,这是波浪作用下射流体的显著特征。(d) $t=3/4T$ 时刻,如图 3(d) 所示,射流口上方处于下跨零点位置,波浪引起的水质点水平速度为零而垂向速度向下达到最大值,因此上半部分射流体产生向下运动趋势,与射流主体段脱离。

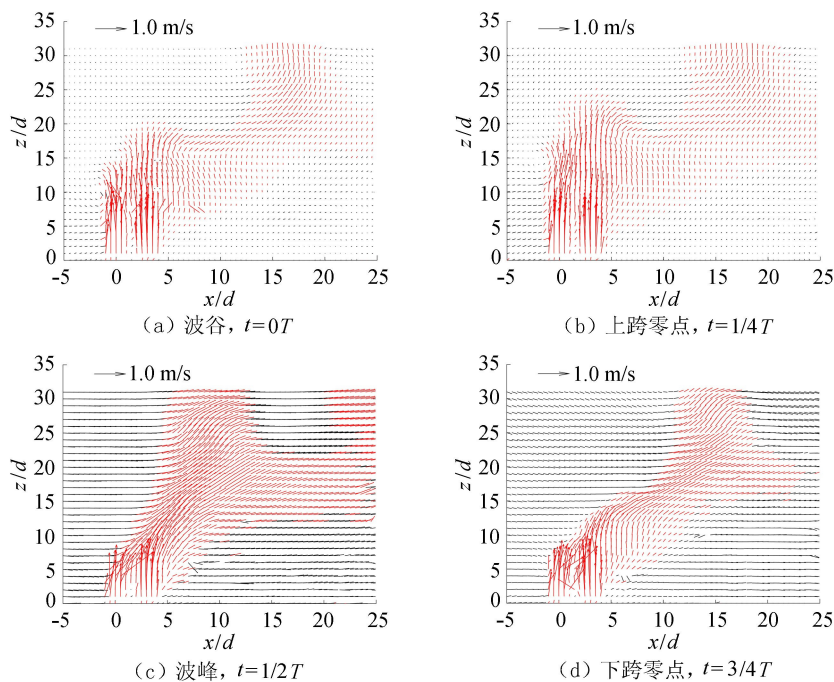


图 3 A4 组次特征相位平均速度场(红色部分:射流体)

Fig. 3 Phase-averaged flow fields of case A4 at typical phases (red part: jet body)

2.2 孔间相互作用

多孔射流孔间相互作用将影响流场的结构,波流环境下浮射流的孔间相互作用与横流环境下有较大差别。图 4、图 5 分别为 A0、A4 组次时均速度等值线,为了更细致地刻画孔口附近的流场,仅使用小视窗的数据。A0 组次两孔速度等值线在 0.3 m/s 处相互连成一体,而 A4 组次则于 0.2 m/s 等值线处连成一体,这表明 A0 组次孔间相互影响更激烈,汇流更早,证明波浪的存在能够减弱多孔射流的孔间相互作用。

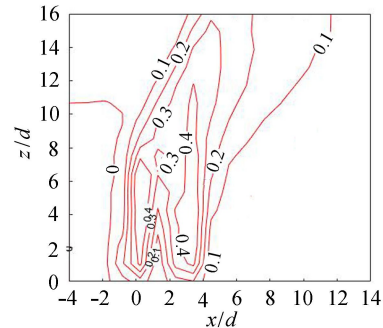


图 4 A0 组次时均速度等值线(单位:m/s)
Fig. 4 Mean velocity contour of case A0(units:m/s)

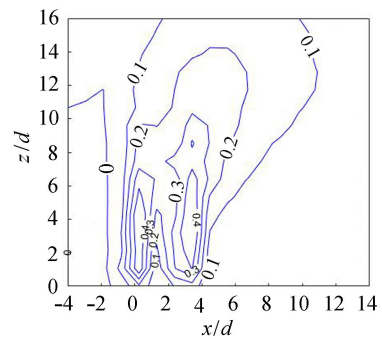


图 5 A4 组次时均速度等值线(单位:m/s)
Fig. 5 Mean velocity contour of case A4(units:m/s)

2.3 密度差对双孔浮射流的影响

以 A2 和 D2 组次为例说明密度差对双孔浮射流的影响,其环境要素均保持一致,仅密度差有区别。如图 6 所示,对于不同密度差的浮射流而言,D2 组次射流体与环境水体密度差大于 A2 组次,所受浮力作用更大,因此 D2 组次轴线平均垂向速度大于 A2 组次。由图 7 可知,D2 组次射流体偏转程度、侧向展宽均略小于 A2。整体上看,在浮力的作用下,射流体速度衰减更慢,偏转角度、侧向展宽更小。

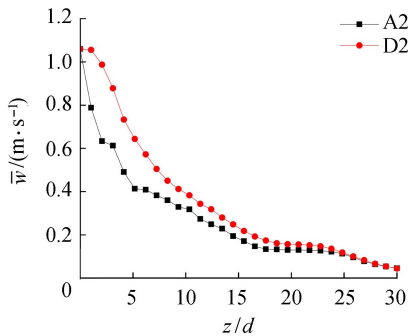


图 6 A2 与 D2 组次轴线平均垂向速度

Fig.6 Vertical velocity of case A2 and D2

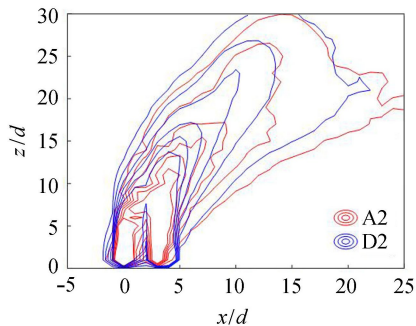


图 7 A2 与 D2 组次垂向速度等值线

Fig.7 Vertical velocity contours of case A2 and D2

2.4 轴线平均垂向速度衰减规律

射流在离开孔口后,会不断卷吸入环境流体,轴线垂向速度沿程逐渐减小。而在波浪作用下,振荡使得射流主体展宽加大,其速度衰减更加明显。双孔射流由于孔间相互作用,其衰减规律与单孔相比又有所不同。定义每一个横断面上垂向速度峰值点的连线为射流体的轴线(即轨迹线)。在两股射流尚未合成一股时,近孔口区域存在 2 条轴线。由于双孔浮射流同一组次两孔出流最终会汇成一股流体,为了方便比较全过程范围的速度衰减规律,取两孔垂向速度均值作为该组次的轴线平均垂向速度进行分析。

现将各组次数据进行无量纲化处理,即 $v_c/u_0 = f(z/l_{mb})$ 。根据前人的试验成果,射流轴线平均垂向速度公式形式: $v_c/u_0 = I(z/l_{mb})^k$ 。为了方便观察,两边取对数并做出 $\ln(v_c/u_0) \sim \ln(z/l_{mb})$ 的关系,如图 8 所示。

通过比较不同组次轴线平均垂向速度无量纲衰减规律,其变化过程可以分为 3 种情况:(a)近区($z/l_{mb} < 3$)主要受动量控制,此时不同组次无量纲速度衰减均满足同一规律, $k = -0.5$; (b)过渡区($3 < z/l_{mb} < 6$)主要是 2 股射流体掺混的区域,速度可以保持; (c)远区($z/l_{mb} > 6$)主要受浮力控制,此时 D 组次与 A、B 组次无量纲衰减规律有了比较明显的差别,A、B 组次密度差相同,指数 $k = -2.0$,D 组次密度差较大,指数 $k = -3.0$ 。

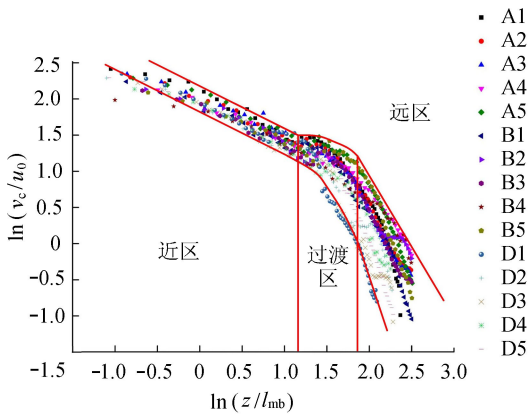


图 8 不同波流组次轴线平均垂向速度无量纲衰减规律

Fig.8 Dimensionless centerline vertical velocity decay of different cases

3 结 论

a. 波流作用下,射流体出现污染物云团现象,这与环境流速的周期性变化有直接关系,污染物云团增加了射流体与环境水体的接触面积,利于二者掺混;对于双孔射流,两孔间的吸附作用因环境水体的周期性运动而减弱;浮力作用使射流体受到垂直向上的作用力,进而导致污染物云团速度矢量逐渐向竖直方向偏转;浮力作用越大,浮射流的速度衰减明显更慢,偏转角度、侧向展宽更小,可以上升到更高的位置。

b. 引入综合考虑动量、浮力及波流影响的特征长度 l_{mb} 对实测轴线平均垂向速度进行无量纲化处理,可以发现波流环境下的双孔浮射流轴线平均垂向速度衰减规律符合幂函数关系,其轴线速度变化可以分为近区、过渡区、远区 3 种情况,近区($z/l_{mb} < 3$)动量起主要作用,幂指数可取 -0.5 ,远区($z/l_{mb} > 6$)浮力起主要作用,密度差的不同幂指数取值也不同。

参考文献:

[1] 徐振山, 陈永平, 张长宽. 海岸动力环境下射流运动研究综述[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 438-444. (XU Zhenshan, CHEN Yongping, ZHANG Changkuan. Review of hydrodynamics of jet flow in coastal waters[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 438-444. (in Chinese))

[2] WRIGHT S J. Mean behavior of buoyant jets in a crossflow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1977, 103(5): 499-513.

[3] LEE J H, CHEUNG V. Generalized lagrangian model for buoyant jets in current[J]. Journal of Environmental Engineering, 1990, 116(6): 1085-1106.

[4] MORI N, CHANG K. Experimental study of a horizontal jet in a wavy environment[J]. Journal of Engineering Mechanics-asce, 2003, 129(10): 1149-1155.

[5] HSU H C, CHEN Y Y. Theoretical analysis of a buoyant jet interacting with small amplitude waves[J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(1): 73-84.

[6] CHANG K, RYU Y, MORI N, et al. Parameterization of neutrally buoyant horizontal round jet in wave environment[J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2009, 135(3): 100-107.

[7] 陈永平, 李志伟, 谭鹰勋, 等. 不规则波作用下垂向圆管射流的试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 168-175. (CHEN Yongping, LI Zhiwei, TAN Yingxun, et al. Experimental study on flow characteristics of vertical round jet discharged into ambient with random wave[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 168-175. (in Chinese))

[8] HSIAO S C, HSU T, LIN J, 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.

[9] 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.

[10] 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))

[11] MAKIHATA T, MIYAI Y. Experiments on the characteristics of multiple jets in a crossflow[J]. Bulletin of the University of Osaka Prefecture, Series A Engineering and Natural Sciences, 1978, 26(2): 15-36.

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

[13] YIN Zhaoqin, ZHANG Hongjun, LIN Jianzhong, et al. Experimental study on the flow field characteristics in the mixing region of twin jets[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(3): 309-313.

[14] DURVE A, PATWARDHAN A W, BANARJEE I, et al. Numerical investigation of mixing in parallel jets[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 242: 78-90.

[15] 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))

[16] 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 Zhongmin, ZHOU Chuntian, et al. Experimental research on sewage outfall diffusers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1994, 22(1): 1-6. (in Chinese))

[17] LEE J H. Mixing of multiple buoyant jets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(12): 1008-1021.

[18] 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研究[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 vertical multiple jets in wavy cross-flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 71-78. (in Chinese))

[19] PAPANICOLAOU P, LIST E J. Investigations of round vertical turbulent buoyant jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 195(195): 341-391.