

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190314004

http://www.yykxjz.cn/

王佳浩, 刘莉莉, 蔡新晨, 陈佳滢, 杨意馨, 姜书侠. 布设间距对多孔方型人工鱼礁流场效应影响的数值模拟研究. 渔业科学进展, 2020, 41(3): 40-48

Wang JH, Liu LL, Cai XC, Chen JY, Yang YX, Jiang SX. Numerical simulation study on influence of disposal space on effects of flow field around porous square artificial reefs. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(3): 40-48

布设间距对多孔方型人工鱼礁流场效应影响的数值模拟研究*

王佳浩 刘莉莉^① 蔡新晨 陈佳滢 杨意馨 姜书侠

(浙江海洋大学水产学院 舟山 316004)

摘要 采用计算流体动力学(CFD)技术,研究了不同布设间距下,多孔方型人工鱼礁周围水流运动的规律,旨在为深入研究人工鱼礁的集鱼原理和海洋牧场建设中人工鱼礁的投放和布设提供更多参考。本研究采用了4种布设间距,分别为0.5、1、1.5和2倍鱼礁高度,基于计算机数值模拟技术,模拟了速度为0.8 m/s的水流流经2个礁体的过程,分别观察鱼礁周围水流运动情况。结果显示,多孔方型人工鱼礁内部和周围存在缓流区、背涡流区、上升流区、死水区等有显著特征的区域;多孔方型人工鱼礁上升流的最大速度与来流速度的比值约为0.95倍;多孔方型人工鱼礁周围上升流最大抬升高度与鱼礁高度之比约为2.1;多孔方型人工鱼礁的结构在一定程度上为鱼礁周围的流态多样性提供了较有利的作用;多孔方型人工鱼礁的布设间距对2个鱼礁单体间的旋涡数量和旋涡方向有较大影响,也对涡量大小和涡量分布范围产生影响。研究表明,在一定范围内,布设间距越大,涡量越大,分布范围越广,但超过一定范围后,涡量不再增大,分布范围也不再扩大;多孔方型人工鱼礁的布设间距越大,背涡流在X方向和Y方向的影响面积越大。研究结果清晰地展现了不同布设间距下的人工鱼礁的流场效应,对在特定条件下进行人工鱼礁投放和布设具有重要意义。

关键词 计算流体动力学(CFD); 多孔方型人工鱼礁; 布设间距; 上升流; 背涡流

中图分类号 S953.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)03-040-09

人工鱼礁是人为置于海底的构筑物,会在其布设周围的一定范围内形成上升流,将海底深层的营养物质带到表层水面,促进浮游植物生长、吸引鱼类觅食。由于其结构的复杂性,人工鱼礁还能为鱼类等提供相对安全的栖息环境和索饵繁殖场所,有利于幼鱼和繁殖期鱼类的栖息。在投放一定时间后,人工鱼礁附近会形成稳定的生态环境,有利于渔场的修复(王波等,

2004; 潘迎捷, 2007; 张永波等, 2016; Lee *et al.*, 2018)。人工鱼礁的形状多种多样,有方形、三角形、圆台形、米字型、金字塔型等(郑延璇等, 2014; 赵林等, 2018; 黄远东等, 2012a、2012b; 兰孝政等, 2016)。人工鱼礁投放方式有单体布设和多体布设等。对于如何更有效地投放人工鱼礁,也是现今建设海洋牧场需要优化的问题(Lan *et al.*, 2006)。

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(41606110)和浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划项目(2018R411002)共同资助 [This work was supported by National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation Project of China (41606110), and Science and Technology Innovation Program for College Students and New Talent Scheme in Zhejiang Province (2018R411002)]. 王佳浩, E-mail: wangjiahao2019@126.com

^① 通讯作者: 刘莉莉, E-mail: liulili2001@163.com

收稿日期: 2019-03-14, 收修改稿日期: 2019-05-13

计算流体动力学(CFD)是通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动等相关物理现象的系统进行分析。通过此种数值模拟技术,可以得到所研究流场内各个位置上的基本物理量。

目前,已有崔勇等(2011)采用数值模拟方法研究了布设间距对无孔实心方型人工鱼礁周围流场的影响;邓济通等(2013)研究了布设间距对无孔三棱柱形人工鱼礁周围流场的影响;于定勇等(2019)研究了不同开口比的方形鱼礁的水动力特性;黄远东等(2012b)研究了多孔方型人工鱼礁周围流态效应,尚未涉及布设间距对多孔方型人工鱼礁流场效应的影响。

为了进一步探究布设间距对多孔方型人工鱼礁流场效应的影响,本研究基于 FLUENT 软件的数值模拟技术,模拟 4 种布设间距下 2 个鱼礁单体周围流态,研究结果将对鱼礁的优化布置具有指导意义。

1 材料与方法

1.1 礁体模型和计算区域

在进行数值模拟前,需先进行礁体模型的设计和计算网格的划分。由于方型鱼礁制作方便,透水性好,适合中下层鱼类产卵和避敌,是一种在混凝土礁体中普遍被采用的礁体类型(王磊, 2007),并已经在我国沿海海域(如江苏吕泗渔场)进行了投放。于定勇等(2019)研究发现,方型开孔礁体具有抗滑移、抗倾覆

安全系数能满足工程的要求。Wang 等(2018)研究发现,方型鱼礁单侧开口数量为 4 或 9 个,开口比为 0.2 或 0.3 时,产生上升流和背涡流的效果最明显。因此,本研究礁体采用边长为 3 m,壁厚为 0.1 m 的空心多孔方型人工鱼礁。礁体的每个侧面都开有 4 个直径为 0.8 m 的圆孔,顶盖中央开有 1 个直径为 0.8 m 的圆孔(图 1)。

为适应山东省人工鱼礁建设技术规范(DB37T2090-2012),并能正确反映人工鱼礁周围流场的显示效果(Miao *et al*, 2007; 郑延璇等, 2012),本研究将整个计算域尺寸的长度设为单个礁体的 20 倍长度,宽度设为单个礁体的 10 倍长度,高度设为单个礁体的 10 倍长度,即 60 m×30 m×30 m(图 2)。其中,第 1 个圆孔方型礁的礁前计算域长度为 6 倍单体礁长度(18 m),2 个单体礁横向布设,布设间距分别为 0.5、1、1.5、2 倍鱼礁长度,礁体底部贴紧计算域,计算域侧面距 2 个鱼礁单体中心均为 15 m。

1.2 控制方程及湍流模型

由于流动分离和旋涡发展演化,使得人工鱼礁附近的流动为黏性不可压缩流体的湍流运动。因此,其控制方程采用定常、不可压缩流动下的连续性方程和 N-S 方程,而模型则选取可以有效模拟分布比较均匀、湍流结构较小的湍流模型中的 RNG k-epsilon 模型(黄远东等, 2012a; 姜少杰等, 2017)。

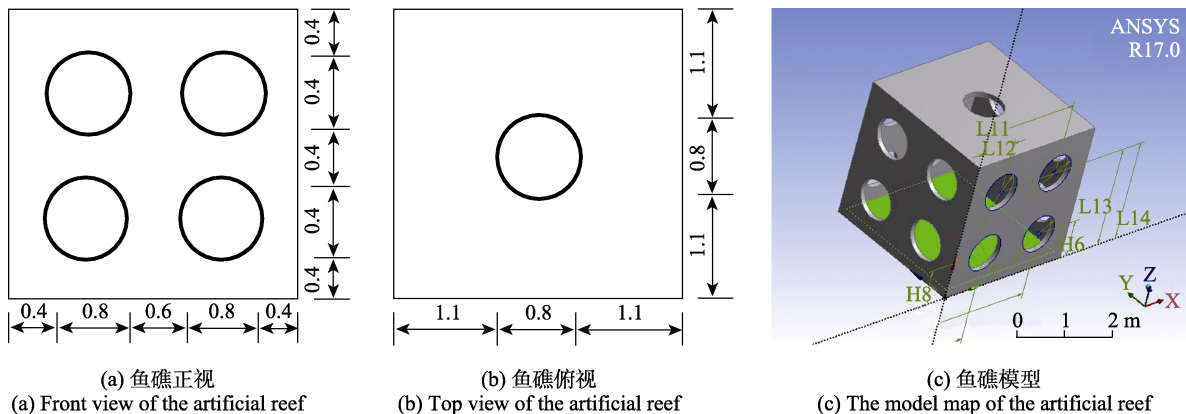


图 1 人工鱼礁礁体模型(m)
Fig.1 Geometry of the artificial reef (m)

1.3 计算区域的网格划分

在计算区域的网格划分上,采用 ANSYS Workbench Meshing 的自适应网格划分方式,划分成四面体非结构化网格。礁体附近区域自动加密,使得在数值模拟时能捕捉礁体的几何细节;在其他区域使用较大网格划分,可节约计算成本。本研究采

用的网格尺度经过 Fluent 软件中的网格独立性验证,结果表明,对于鱼礁附近的流场分辨效果良好。整个计算区域的网格单元数为 1866200,计算区域网格划分见图 3。

1.4 边界条件的设置

计算区域入口设为速度入口条件,在投放人工鱼

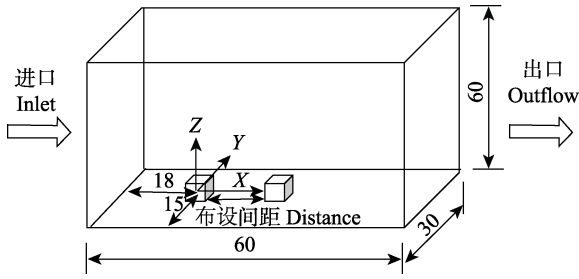


图2 计算区域(m)

Fig.2 Calculation domain (m)

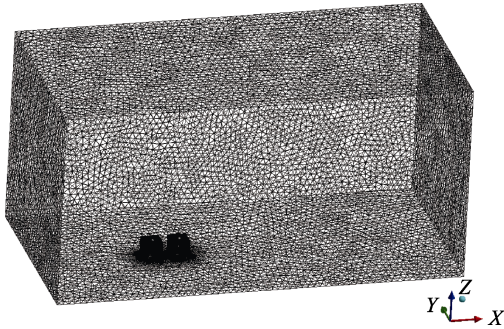


图3 网格划分

Fig.3 Mesh generation

礁的海域流速以不超过 1 m/s 为宜(刘心媚等, 2019), 并参考浙江舟山群岛海域在涨落潮时, 底层海水平均流速为 0.8 m/s 的数据(寿玮玮, 2009)。本研究选取 0.8 m/s 的来流速度进行模拟仿真; 计算区域出口设

为自由出流条件; 计算区域的两侧和顶面采用对称边界条件; 计算区域的底面和鱼礁壁面采用无滑移边界条件(黄远东等, 2012a、2012b; Liu *et al.*, 2013)。

1.5 数值算法

本研究涉及的数值模拟计算在 Ansys Fluent 17.0 平台上完成。压力与速度耦合采用 Simplec 算法, 方程离散采用 Quick 格式, 计算迭代步数为 2000 步, 计算精度残差值取 10^{-6} (姜少杰等, 2017; 邵万骏等, 2014)。

1.6 数学模型的验证

为验证 Fluent 软件模拟人工鱼礁流场效应的可行性, 需要对比在不同测点用水槽实验和数值模拟 2 种方式得到的速度。唐衍力(2013)在水槽中测量了来流速度为 0.5 m/s 时, 多孔方型鱼礁各测点的流速。礁体边长为 15 cm, 侧面分别开 4 个直径为 0.4 cm 的圆孔, 顶面开一个直径为 0.4 cm 的圆孔。本研究利用唐衍力(2013)的模型, 在鱼礁一半高度的水平断面和与水槽垂直的 C2 断面的交线上, 选择了 A3、A4、A5、A6、A3'、A4'、A5' 共 7 个测点(图 4)。利用水槽实验和数值模拟 2 种方法测出各测点的流速, 得到了 2 种方法的结果对比见图 5。从图 5 中的误差来看, 本研究所选模型能够利用 Fluent 软件进行数值模拟得到较准确的流态分布。

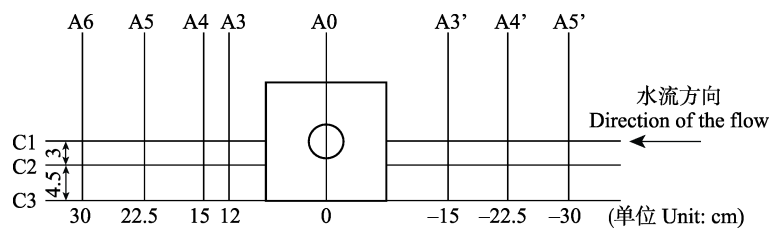


图4 测点分布

Fig.4 Distribution of measuring stations

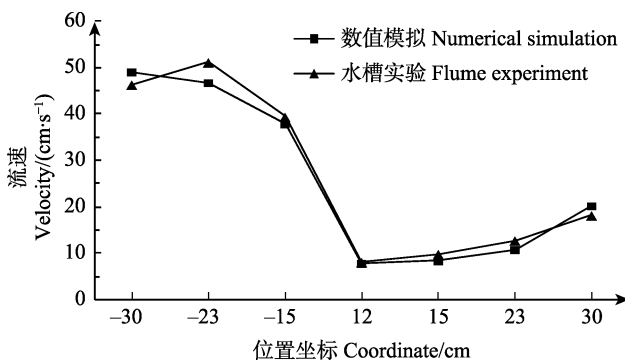


图5 测量点流速的实验值与模拟值的比较

Fig.5 Comparison of the simulated and measured velocities of the measuring stations

2 结果与讨论

2.1 多孔方型鱼礁单体周围流态变化的基本情况

唐衍力等(2017)研究表明, 6 个代表礁体(方型、框架型等)的上升流面积和背涡流面积的大小与来流速度不相关; 礁体的上升流高度与来流速度也不相关。黄远东等(2012a)研究发现, 不同来流速度工况下, 方型鱼礁上升流的最大速度与来流速度的比均约为定值, 上升流的最大高度与礁体高度的比均约为定值。本研究还参考了其他学者对其他礁体的研究均发现, 改变来流速度对相关数据影响不大, 故本研究为了减轻计算成本, 只选取恒定来流速度进行研究。为分

析鱼礁周围流场的分布情况, 选择来流速度为 0.8 m/s, 鱼礁布设间距为 6 m 的鱼礁周围流场进行分析。流场中 $Y=0$ 平面上的速度分布云图见图 6。从图 6 可以看出, 当水流经过鱼礁时, 流速变缓且越靠近鱼礁前壁面流速越小, 并在鱼礁的前方形成一片流速几乎为 0 的滞留区; 在鱼礁上方一定区域内形成上升流, 上升流会改变原来水流的运动状态和流速。在上升流区域, 水流最大速度为 1.1 m/s; 在鱼礁后方的背流面产生了背涡流, 背涡流影响区域可达 2 倍鱼礁边长。背涡流流速明显小于来流速度, 存在部分流速为 0 的区域。

流场中 $Z=3$ m 平面上的速度分布云图见图 7。从图 7 可以看出, 2 个鱼礁两侧均有侧向流存在, 第 1 个鱼礁的侧向流区域速度大于第 2 个鱼礁。

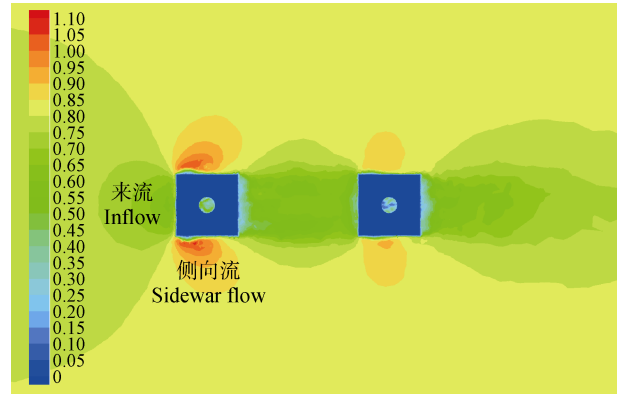


图 7 $Z=3$ m 平面上的速度分布(m/s)
Fig.7 Velocity distribution on $Z=3$ m plane (m/s)

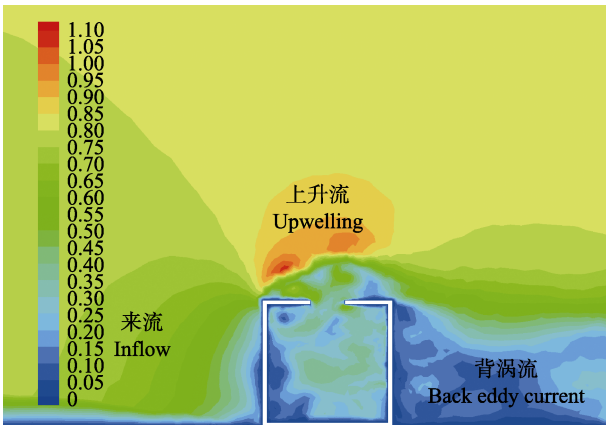


图 6 $Y=0$ 平面上的速度分布(m/s)
Fig.6 Velocity distribution on $Y=0$ plane (m/s)

2.2 多孔方型鱼礁在不同布设间距下所产生的上升流情况

本研究取 Z 方向上速度分量与来流速度之比 $\geq 5\%$ 的水域为上升流区域(黄远东等, 2012b), 为分析不同布设间距下鱼礁所产生的上升流的情况, 选取 4 种不同的布设间距进行 CFD 仿真, 分别为 0.5、1、1.5 和 2 倍鱼礁长度, 得到 1.5、3.0、4.5 和 6.0 m 的 4 种布设间距下流场在 $Y=0$ 平面上的 Z 方向速度分量分布见图 8。图 8 上刻度可以对上升流最大抬升高度进行比较。从仿真结果可以得出, 不同布设间距下, 上升流的最大流速、最大抬升高度以及分别与来流速度、鱼礁高度的关系见表 1。

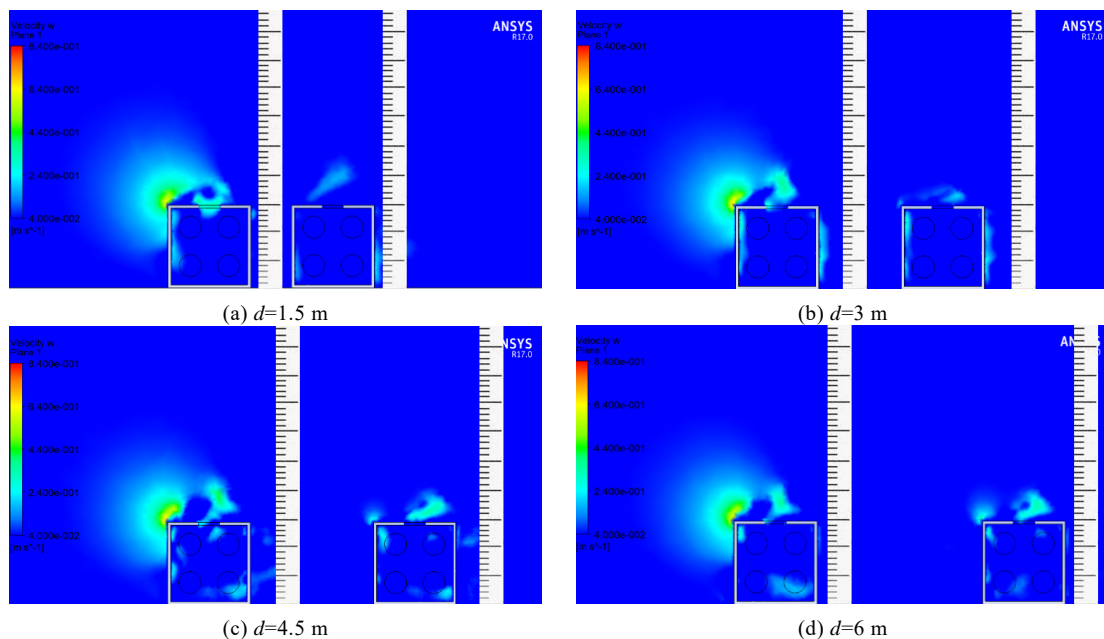


图 8 4 种布设间距下 $Y=0$ 平面上的 Z 方向速度分量分布(m/s)
Fig.8 Z -direction velocity component distribution on $Y=0$ plane with four layouts (m/s)

表1 不同布设间距下的上升流速和抬升高度
Tab.1 Upwelling velocity and elevation under different layout spaces

鱼礁高度 Height of the reef (m)	来流速度 Inflow velocity (m/s)	布设间距 Laying distance (m)	最大上升流速 Maximum upwelling velocity (m/s)	上升流最大 抬升高度 Maximum upwelling elevation (m)	最大上升流速与 来流速度比值 Ratio of maximum upwelling velocity to inflow velocity	上升流最大抬升高度 与鱼礁高度比值 Ratio of maximum upwelling elevation to reef
3	0.8	1.5	0.74	6.28	0.93	2.09
		3.0	0.75	6.27	0.94	2.09
		4.5	0.84	6.28	1.05	2.09
		6.0	0.79	6.29	0.99	2.10

由鱼礁的影响所产生的上升流速和抬升高度代表鱼礁水动力特性的丰富性(吴伟等, 2016), 即流速越大, 抬升高度越高, 其越能满足适应不同流速的鱼类的需求, 集鱼效果也就越好。

从图8和表1可以看出, 不同布设间距下, 多孔方型人工鱼礁上升流的最大速度与来流速度的比值约为0.95倍, 布设间距分别为4.5、6.0 m时, 最大上升流速和上升流范围比布设间距为1.5、3.0 m时有增大的趋势。因此, 在一定程度上, 扩大多孔方型鱼礁的排布间距有利于形成更丰富的上升流。

上升流最大抬升高度与鱼礁高度之比为2.1, 且最大抬升高度点均出现在第1个鱼礁上方, 说明上升流最大抬升高度与鱼礁布设间距之间无关联。另外, 图8中各个鱼礁的顶部开孔处中心区域的上升流效应明显强于顶部的其他区域。由此可见, 人工鱼礁上方开孔有助于增强上升流效应。

2.3 多孔方型鱼礁在不同布设间距下所产生的旋涡情况

4种布设间距下流场在 $Y=0$ 平面上的速度矢量分布见图9。从图9可以看出, 在来流速度为0.8 m/s时, 布设间距分别为1.5、3.0、4.5 m的2个鱼礁之间都形成了1个顺时针旋涡, 形成的旋涡大小随布设间距的增大而增大。产生的旋涡靠左, 旋涡中心在 Z 方向2.5 m左右。其中, 布设间距为4.5 m时, 顺时针旋涡上方隐约出现第2个逆时针旋涡; 而当布设间距为6.0 m时, 顺时针旋涡上方的逆时针旋涡变得明显, 且原来的顺时针旋涡被挤到较下方位置, 并且旋涡开始变小。可以推测, 鱼礁布设间距会对第1个鱼礁后的旋涡产生影响。布设间距越大, 旋涡越大, 但布设间距增大到一定程度后, 会生成第2个反方向的旋涡。

从图9可以看出, 4个图中第2个鱼礁的背部都产生了2个大小相近、垂直排布的旋涡, 其中, 上方的旋涡为逆时针, 下方的旋涡为顺时针。由此可见, 不同布设间距不会对第2个人工鱼礁的旋涡造成影响。

通过对比不同布设间距2个人工鱼礁背部的旋涡数量和旋涡方向, 若继续增大排布间距, 第1个鱼礁背部可能会产生像第2个鱼礁背部的旋涡。

2.4 多孔方型鱼礁在不同布设间距的涡量情况

4种布设间距下, 流场在 $Y=0$ 平面上的涡量云图见图10。从图10可以看出, 在来流速度为0.8 m/s时, 随着布设间距的增大, 鱼礁附近的涡量也随之增大, 布设间距分别为1.5、3.0、4.5 m时, 鱼礁涡量明显逐渐增大, 且涡量分布范围逐渐增大; 当布设间距为6 m时, 涡量大小和分布范围开始变小。另外, 从图10还可以看出, 涡量的最高值都出现在鱼礁的顶部开孔处。由此可以推测, 鱼礁布设间距会对涡量大小和涡量分布范围涡旋产生影响。在一定范围内, 布设间距越大, 涡量越大, 分布范围越广。但超过一定范围后, 涡量不再增大, 分布范围也不再扩大。

2.5 多孔方型鱼礁在不同布设间距的内部流态和背涡流情况

为了研究空心多孔方型人工鱼礁的内部流态情况和背涡流情况, 故选择人工鱼礁的横切面进行后处理(Liu *et al*, 2013)。4种布设间距下, $Z=1.5$ m平面上的速度矢量分布见图11。从图11可以看出, 在4种布设间距下, 尽管前后2个鱼礁内部流态各异, 但都存在一定共性: 第1个鱼礁内部速度大小总体上大于第2个鱼礁内部的速度; 前后2个鱼礁内部均产生了2个 Y 轴向排布、大小相近的旋涡, 其中, 上方的旋涡均为顺时针, 下方的旋涡均为逆时针。上下2个旋涡的速度分布也相似; 鱼礁内部的4个角落处存在大量速度较小的缓流区。

对比鱼礁内部与鱼礁周围侧向绕流流速发现, 鱼礁内部大部分区域流速小于鱼礁周围侧向绕流流速, 在鱼礁内部的4个角落, 存在速度为0的死水区。在不同布设间距下, 前后2个鱼礁背流面均产生了背涡流, 第2个鱼礁后的背涡流差异较小, 而第1个鱼礁

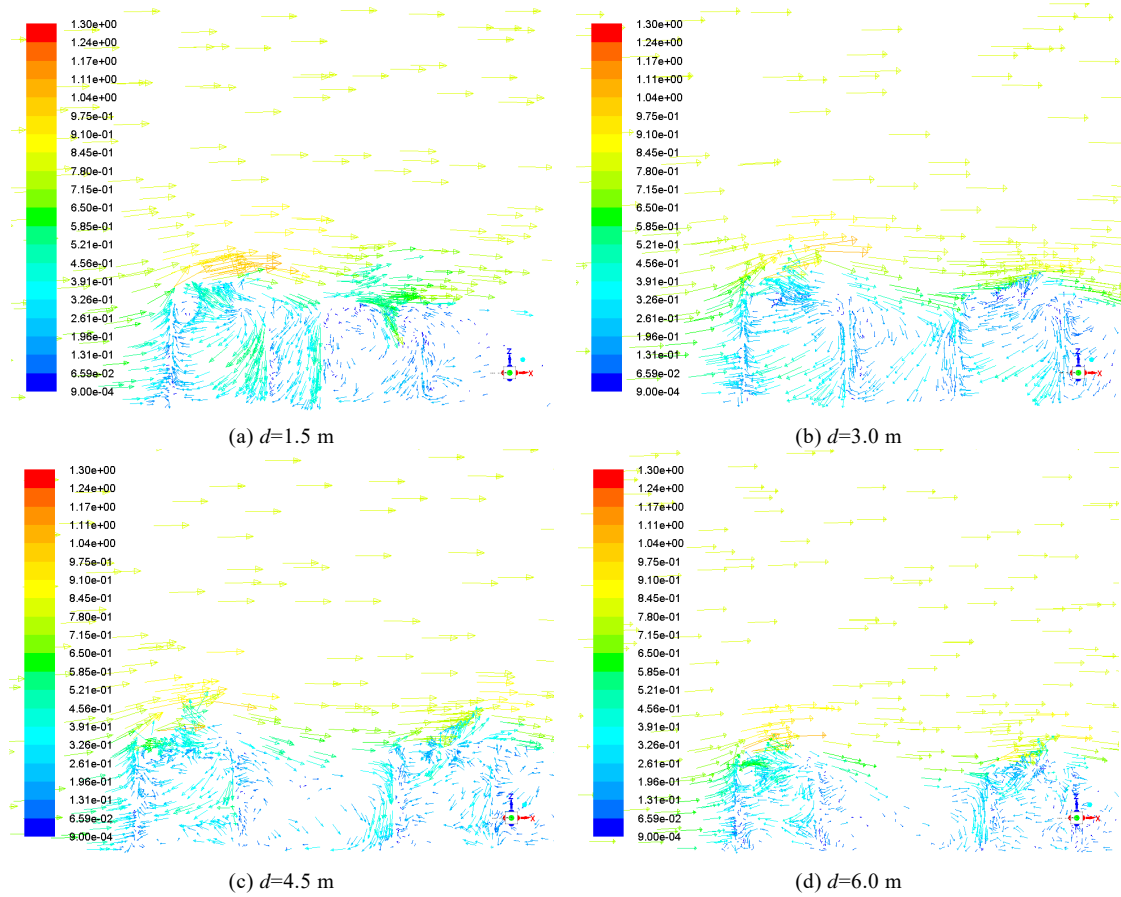


图 9 4 种布设间距下 $Y=0$ 平面上的速度矢量分布(m/s)

Fig.9 Velocity vector distribution on $Y=0$ plane with four layouts (m/s)

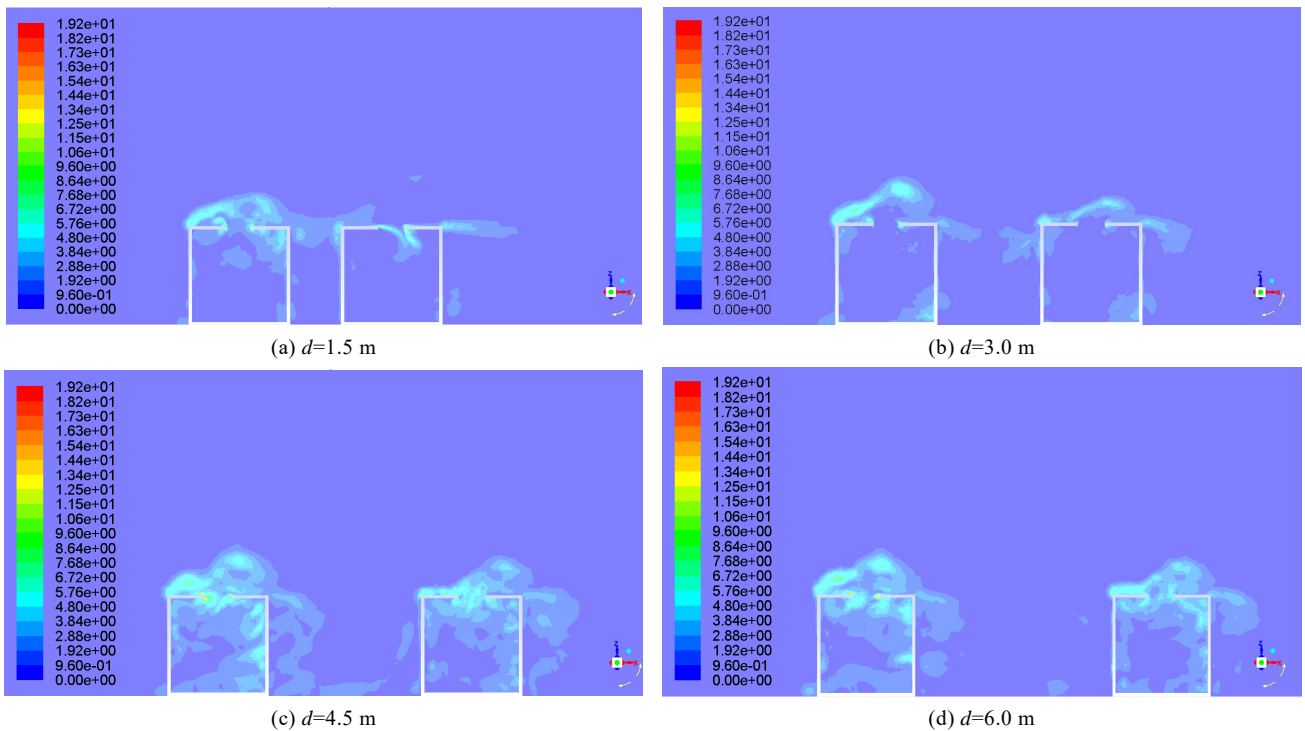


图 10 4 种布设间距下 $Y=0$ 平面上的涡量分布(S^{-1})

Fig.10 Vorticity distribution on $Y=0$ plane with four layouts (S^{-1})

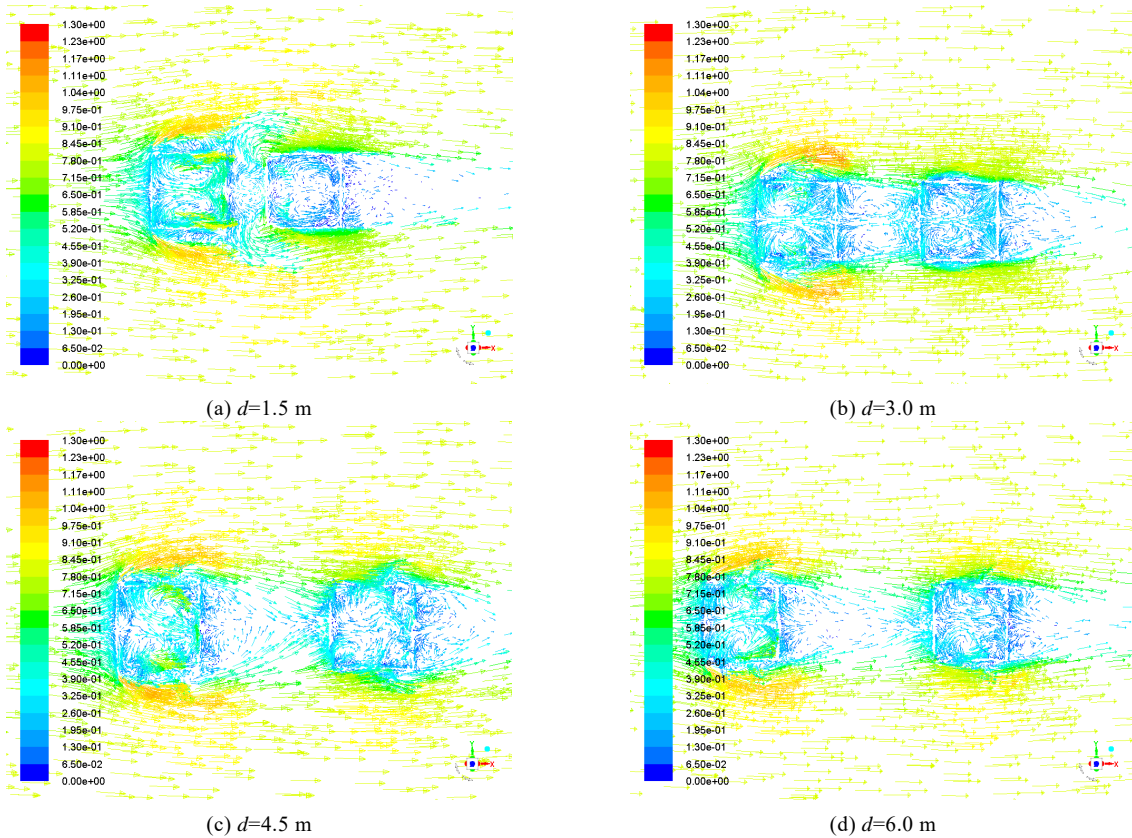


图 11 4 种布设间距下 $Z=1.5\text{m}$ 平面上的速度矢量分布(m/s)
Fig.11 Velocity vector distribution on $Z=1.5\text{m}$ plane with four layouts (m/s)

后的背涡流随布设间距的增大有较大变化。当布设间距为 1.5 m 时, 第 1 个鱼礁后出现 2 个旋转方向相反的旋涡, 旋涡大小约为 $1.00\text{ m}\times 0.75\text{ m}$; 而当布设间距分别为 3.0、4.5、6.0 m 时, 旋涡大小均增大到 $2.50\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ 。另外, 当布设间距分别为 4.5、6.0 m 时, 第 1 个鱼礁后的背涡流中有较多流集聚到第 2 个鱼礁的迎面; 而布设间距为 1.5 或 3.0 m 时, 这种情况较少。从图 9 和图 11 中 2 个不同平面上的背涡流影响范围可以看出, 在 4 种布设间距下, 布设间距越大, 背涡流在 X 方向和 Y 方向的面积越大, 这与崔勇等(2011)的研究结果相一致。而在 Z 方向上, 背涡流高度约为礁体高度的 1.2 倍, 这与黄远东等(2012b)的研究结果相近。因此, 将布设间距继续扩大到 2 倍鱼礁宽度以上, 对本研究工作的开展具有重要意义。

3 结论

基于 Fluent 软件的数值模拟技术, 本研究仿真了一定的流速下, 4 种不同布设间距的多孔方型人工鱼礁的周围流场运动规律, 并从数值模拟结果中对比分析了 4 种布设间距对礁体周围的上升流、礁体内部、2 个鱼礁单体之间的旋涡大小和数量, 以及礁体周围

涡量的影响。结果显示, 多孔方型人工鱼礁内部和周围流态较为复杂, 但可以根据流速和流向明显分辨出缓流区、背涡区、上升流区、死水区等有显著特征的区域, 说明数值模拟技术是优化人工鱼礁设计和部署的可行工具。多孔方型人工鱼礁上升流的最大速度与来流速度的比值约为 0.95 倍; 多孔方型人工鱼礁周围上升流最大抬升高度与鱼礁高度之比约为 2.1; 多孔方型人工鱼礁的结构在一定程度上为鱼礁周围的流态多样性提供了较有利的作用。多孔方型人工鱼礁的布设间距对 2 个鱼礁单体间的旋涡数量和旋涡方向有较大影响, 也对涡量大小和涡量分布范围产生影响。在一定范围内, 布设间距越大, 涡量越大, 涡量分布范围越广; 但超过一定范围后, 涡量不再增大, 涡量分布范围也不再扩大。多孔方型人工鱼礁的布设间距越大; 背涡流在 X 方向和 Y 方向的影响面积越大; 而在 Z 方向中, 背涡流面积不随间距变化而显著变化, 背涡流高度约为礁体高度的 1.2 倍。

本研究结果为人工鱼礁的集鱼原理和海洋牧场建设中考虑人工鱼礁的布设方式的科研工作者提供初步参考。本研究暂未进行整个单位鱼礁或鱼礁群的研究, 只研究了水流方向的 2 个鱼礁单体布设间距的

影响,故存在一定局限性,还需对其他布设形式进行数值模拟分析。另外,数值模拟技术并不能完全模拟各地投礁海域的复杂海况,所以,实际海域中,在人工鱼礁投放前还需通过水槽实验和实地调查(郑延璇等,2012;姜少杰等,2017;李娇等,2013、2018;Lee *et al.*,2018;Komyakova *et al.*,2019;Jiang *et al.*,2016)等研究方法验证数值模拟结果的准确性。

参 考 文 献

- Cui Y, Guan CT, Wan R, *et al.* The numerical simulation of the effect of spacing on the flow field of artificial reefs. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(2): 59–65 [崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 布设间距对人工鱼礁流场效应影响的数值模拟. *海洋湖沼通报*, 2011(2): 59–65]
- Deng JT, Huang YD, Jiang JW, *et al.* Numerical simulation of the influence of spacing on the flow around a triangular prism artificial reef. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(2): 98–102 [邓济通, 黄远东, 姜剑伟, 等. 布设间距对三棱柱形人工鱼礁绕流影响的数值模拟. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(2): 98–102]
- Huang YD, Jiang JW, Zhao SF, *et al.* Numerical simulation of flow around square artificial reef. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012a, 23(3): 1–3 [黄远东, 姜剑伟, 赵树夫. 方型人工鱼礁周围水流运动的数值模拟研究. *水资源与水工程学报*, 2012a, 23(3): 1–3]
- Huang YD, Zhao SF, Jiang JW, *et al.* Numerical simulation of the flow around a porous square artificial reef. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012b, 23(5): 15–18 [黄远东, 赵树夫, 姜剑伟, 等. 多孔方型人工鱼礁绕流的数值模拟研究. *水资源与水工程学报*, 2012b, 23(5): 15–18]
- Jiang SJ, Liu HD, Wu W, *et al.* The hydrodynamic research and construction effect evaluation of an artificial reef. *Journal of Marine Sciences*, 2017, 35(2): 53–60 [姜少杰, 刘海敌, 吴伟, 等. 一种人工鱼礁的水动力学研究与建设效果评价. *海洋学研究*, 2017, 35(2): 53–60]
- Jiang ZY, Liang ZL, Zhu LX, *et al.* Numerical simulation of effect of guide plate on flow field of artificial reef. *Ocean Engineering*, 2016, 116: 236–241
- Komyakova V, Chamberlain DP, Jones G. Assessing the performance of artificial reefs as substitute habitat for temperate reef fishes: Implications for reef design and placement. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 139–152
- Lan CH, Hsui CY. The deployment of artificial reef ecosystem: Modelling, simulation and application. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2006, 14: 663–675
- Lan XZ, Wan R, Tang YL, *et al.* Numerical simulation of flow field effect of a circular platform artificial reef. *Journal of Ocean University of China (Natural Science)*, 2016, 46(8): 47–53 [兰孝政, 万荣, 唐衍力, 等. 圆台型人工鱼礁单体流场效应的数值模拟. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(8): 47–53]
- Lee MO, Otake S, Kim JK. Transition of artificial reefs (ARs) research and its prospects. *Ocean and Coastal Management*, 2018, 154: 55–65
- Li J, Guan CT, Gong PH, *et al.* Carbon sequestration mechanism and potential analysis of artificial reef ecosystem. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 65–69 [李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 65–69]
- Li J, Zhang Y, Yuan W, *et al.* Research on artificial reef ecosystem health assessment based on fuzzy synthetic evaluation. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(5): 10–19 [李娇, 张艳, 袁伟, 等. 基于模糊综合评价法的人工鱼礁生态系统健康研究. *渔业科学进展*, 2018, 39(5): 10–19]
- Li XL, Luan SG, Chen Y, *et al.* The 3D vortex structure of cube artificial reef's wake vortex. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2012, 27(6): 572–577 [李晓磊, 栾曙光, 陈勇, 等. 立方体人工鱼礁背涡流的三维涡结构. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(6): 572–577]
- Liu XM, Zheng YN, Chen CP, *et al.* Numerical simulation of flow around frame and caisson artificial reef models. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2019(1): 133–138 [刘心媚, 郑艳娜, 陈昌平, 等. 框架型与沉箱型人工鱼礁绕流特性的数值模拟. *大连海洋大学学报*, 2019(1): 133–138]
- Liu Y, Zhao YP, Dong GH, *et al.* A study of the flow field characteristics around star-shaped artificial reefs. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 39:27–40
- Liu ZL, Su DT. Numerical analysis of the influence of reef arrangements on artificial reef flow fields. *Ocean Engineering*, 2013, 74: 81–89
- Miao ZQ, Xie YH. Effects of water-depth on hydrodynamic force of artificial reef. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(3): 372–377
- Pan YJ. The dictionary of fisheries. Shanghai: Shanghai Lexicographical Publishing House, 2007 [潘迎捷. *水产辞典(精)*. 上海: 上海辞书出版社, 2007]
- Shao WJ, Liu CG, Nie HT. Analysis of hydrodynamic characteristics and flow field effects of artificial reefs. *Hydrodynamics Research and Progress Part A*, 2014, 29(5): 580–585 [邵万骏, 刘长根, 聂红涛. 人工鱼礁的水动力学特性及流场效应分析. *水动力学研究与进展A辑*, 2014, 29(5): 580–585]
- Shou WW. Hydrodynamic characteristics of the sea area near Zhoushan Islands and their impact on material transport. Master's Thesis of Ocean University of China, 2007 [寿玮玮. 舟山群岛附近海域水动力特征及其对物质运输的影响分析. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2009]
- Tang YL. Experimental study on hydrodynamics of artificial reef and numerical simulation of flow field. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2013 [唐衍力. 人工鱼礁水动力的实验研究与流场的数值模拟. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2013]
- Tang YL, Long XY, Wang XX, *et al.* Comparative analysis of flow field effects of commonly used artificial reefs in China. *Journal of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 97–103 [唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 97–103]
- Wang B, Wu JP, Gao J, *et al.* Discussion on the construction of artificial reefs in Qingdao to improve coastal ecology and fishery environment. *Coastal Engineering*, 2004, 23(4): 66–73 [王波, 武建平, 高峻, 等. 关于青岛建设人工鱼礁改善近海生态和渔业环境的探讨. *海岸工程*, 2004, 23(4): 66–73]
- Wang L. Preliminary study on optimal design of artificial reef

- and reef area layout. Master's Thesis of Ocean University of China, 2007 [王磊. 人工鱼礁的优化设计和礁区布局的初步研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2007]
- Wang G, Wan R, Wang XX, *et al.* Study on the influence of cut-opening ratio, cut-opening shape, and cut-opening number on the flow field of a cubic artificial reef. *Ocean Engineering*, 2018, 162: 341–352
- Wu W, Jiang SJ, Yuan J, *et al.* Numerical simulation of flow field effect of artificial reef with impeller. *Scientific and Technological Innovation and Application*, 2016(32): 16–18 [吴伟, 姜少杰, 袁俊, 等. 带叶轮的人工鱼礁流场效应的数值模拟研究. *科技创新与应用*, 2016(32): 16–18]
- Yu DY, Yang YH, Li YJ. Study on hydrodynamic characteristics and reef stability of artificial reefs with different opening ratios. *Journal of Ocean University of China (Natural Science)*, 2019, 49(4):128–136 [于定勇, 杨远航, 李宇佳. 不同开口比人工鱼礁体水动力特性及礁体稳定性研究. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 128–136]
- Zhao L, Deng C, Yu ZJ, *et al.* Hydrodynamic analysis of composite pyramid artificial reef. *Fishery Modernization*, 2018, 45(6): 53–59 [赵林, 邓超, 于振江, 等. 组合式金字塔型人工鱼礁水动力学分析. *渔业现代化*, 2018, 45(6): 53–59]
- Zhang YB, Wang JY, Xin JF. Advances in artificial reef engineering technology. *Fishery Modernization*, 2016, 43(6): 70–75 [张永波, 王继业, 辛峻峰. 人工鱼礁工程技术进展研究. *渔业现代化*, 2016, 43(6): 70–75]
- Zheng YX, Liang ZL, Guan CT, *et al.* Structure design and stability of the equilateral triangle artificial reef. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(3): 117–125 [郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 等边三角形人工鱼礁礁体结构设计及其稳定性. *渔业科学进展*, 2014, 35(3): 117–125]
- Zheng YX, Guan CT, Song XF, *et al.* Numerical simulation of the flow field effect of star-shaped artificial reef. *Journal of Agricultural Engineering*, 2012, 28(19): 185–193 [郑延璇, 关长涛, 宋协法, 等. 星体型人工鱼礁流场效应的数值模拟. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 185–193]

(编辑 陈 严)

Numerical Simulation Study on Influence of Disposal Space on Effects of Flow Field Around Porous Square Artificial Reefs

WANG Jiahao, LIU Lili^①, CAI Xinchun, CHEN Jiaying, YANG Yixin, JIANG Shuxia

(School of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004)

Abstract In this study, computational fluid dynamics (CFD) technology was used to study the flow patterns around porous square artificial reefs with different disposal spaces. The aim was to increase our knowledge base of the fish harvesting principles of artificial reefs and the deployment and layout of the artificial reefs in the construction of marine pastures. Four kinds of disposal spaces were used in the study; they were 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 times the height of the reef. Based on the computer numerical simulation technology, the process of water flowing past the two reefs at a speed of 0.8 m/s was simulated, and the flow around the reef was observed. The results show that there were obvious characteristics of slow flow areas, back eddy current areas, upwelling areas, and dead water areas inside and around the porous square artificial reef. The ratio of the maximum upwelling velocity to the inflow velocity of the porous square artificial reef was about 0.95 times. The ratio of the maximum upwelling height to the reef height around the porous square artificial reef is about 2 : 1. To some extent, the structure of the artificial reef provides a favorable role for the diversity of flow patterns around the reef. The spacing of the porous square artificial reef has a great influence on the number, size, distribution, and direction of vortices between the two reefs. Within a certain range, the larger the spacing, the larger the vorticity and the wider the distribution range. Beyond a certain range, the vorticity does not increase and the distribution range does not expand. The larger the spacing of the porous square artificial reefs, the larger the influence area of the back eddy current in the *X* and *Y* directions is. The results clearly show the flow field effects of artificial reefs with different disposal spaces, which is of great significance to the deployment and layout of artificial reefs under specific conditions.

Key words CFD; Porous square artificial reef; Disposal space; Upwelling; Back eddy current

① Corresponding author: LIU Lili, E-mail: liulili2001@163.com