



不同侧板结构对八棱柱型人工鱼礁流场效应的影响

戚福清¹, 林 军^{1,2*}, 张清雨¹

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为了解侧板结构对八棱柱型人工鱼礁流场效应的影响, 实验基于计算流体力学方法 (computational fluid dynamics, CFD), 利用大涡模拟 (LES) 对 4 种不同侧板结构的八棱柱型人工鱼礁周围流场变化进行数值模拟, 并以上升流体积、背涡流体积和向上输运通量等为流场效应指标进行了分析, 同时利用水槽实验对数值模型进行验证。结果显示, 水槽实验流速与 2 种尺寸数值模拟流速的均方根误差最大不超过 0.065。0°垂直迎流时, 2 种来流速度下, A 型、C 型和 D 型礁的上升流体积较 B 型礁最大分别高 35.6%、244.1% 和 80.1%, 背涡流体积较 B 型礁最大分别高 193.5%、115.8% 和 88.8%。C 型和 D 型礁的向上输运通量均大于 A 型礁, 且 C 型礁最大向上输运通量是 D 型礁的 1.29 倍。不同迎流角度下, C 型礁和 D 型礁的上升流体积和背涡流体积在 4 种角度下差异显著, 且迎流面投影面积和上升流体积及背涡流体积之间相关系数较小。研究表明, 实验所采用的数值模拟准确可靠; 侧板数量增加对于提升八棱柱型人工鱼礁流场效应尤其是上升流效应作用明显; 下层侧板固定时, 上层为倾斜侧板有利于提升礁体的上升流效应, 上层为垂直侧板时有利于提升礁体的背涡流效应; 不同的侧板组合会影响礁体对迎流角度的适应性。本研究结果可为鱼礁单体的优化设计以及大尺度海洋数值模型中阻力参数设定提供参考。

关键词: 八棱柱型人工鱼礁; 流场效应; PIV 实验; 数值模拟

中图分类号: S 954.1

文献标志码: A

近年来, 受气候变化、环境污染和过度捕捞等影响, 海洋生态环境遭到严重破坏, 海洋生物量和多样性急剧下降, 而投放人工鱼礁、建设海洋牧场是改善海洋生态环境, 保护海洋生物资源的重要措施^[1]。人工鱼礁作为人为投放在水域中的构造建筑物, 通过改变原有水流结构来达到改善沿海水域生态环境以及聚集鱼类的效果。人工鱼礁功能的发挥受礁体结构及其摆放位置影响^[2-4]。就礁体结构而言, 不同的礁体形状^[5-9]、同一礁体开口的大小、数量和形状^[10-11]、导流板角度和开

口孔径大小^[12-13]等均会对人工鱼礁流场效应产生影响; 就鱼礁摆放位置而言, 不同的海底条件^[14]和不同的迎流角度^[8-9]也会对人工鱼礁流场效应产生影响。

研究人工鱼礁流场效应常用方法包括物理模型实验和数值模拟。近年来, 随着计算机技术的发展, 数值模拟广泛地应用于各种研究。相对于物理模型实验, 数值模拟不仅用时短, 还能观测到更多物理模型实验无法得到的数据。众多学者采用数值模拟方法对人工鱼礁的流场效应进行了

收稿日期: 2021-05-20 修回日期: 2021-06-16

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901302)

通信作者: 林军 (照片), 从事海洋环境与生态动力学以及海洋牧场工程等相关研究, E-mail: jlin@shou.edu.cn



研究^[15-21]。但数值模拟方法也存在缺点, 如过于简化所模拟的环境, 因此需采用物理模型实验数据或者现场采集的数据进行验证以保证数值模拟的精度。有研究利用物理模型实验结果对数值模拟结果进行验证, 表明数值模拟结果和物理模型实验结果的误差较小, 数值模拟可用于人工鱼礁流场效应相关研究^[22-29]。

八棱柱型人工鱼礁作为十字翼型人工鱼礁^[30]的衍生礁体, 具有稳定性好、表面积和空方体积更大的特点。本研究将以双层八棱柱型人工鱼礁为研究对象, 采用数值模拟的方法, 研究不同侧板结构对八棱柱型人工鱼礁流场效应的影响, 进而对八棱柱型人工鱼礁礁体结构进行优化, 以期对礁体结构设计和优化提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 鱼礁模型

实验设置 4 种双层八棱柱型人工鱼礁模型,

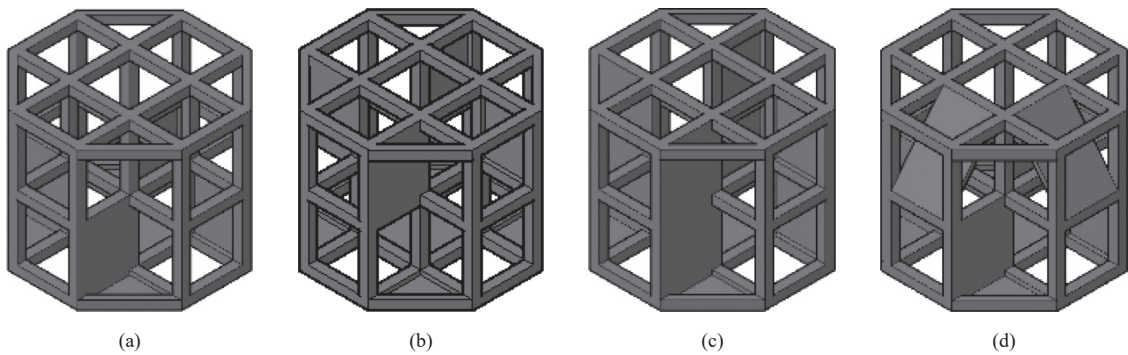


图 1 4 种八棱柱型人工鱼礁模型

(a) A 型礁, (b) B 型礁, (c) C 型礁, (d) D 型礁; 图 9 同。

Fig. 1 Four octagonal prism artificial reef models

(a) type A, (b) type B, (c) type C, (d) type D; the same as fig.9.

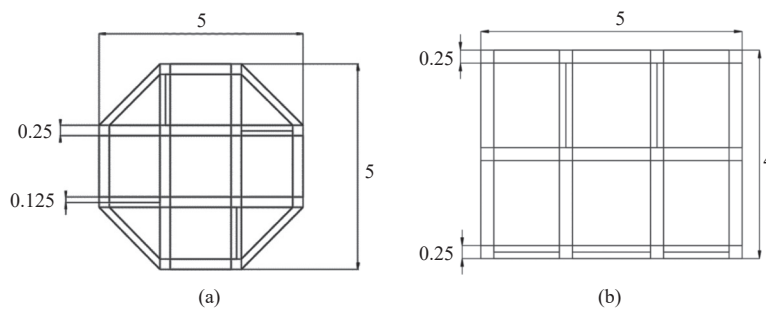


图 2 八棱柱型人工鱼礁尺寸示意图 (单位: m)

(a) 礁体俯视图, (b) 礁体侧视图。

Fig. 2 Schematic diagram of octagonal prism artificial reef (unit: m)

(a) top view of the reef, (b) side view of reef.

分别是 2 种单层侧板型: 单下层侧板的 A 型和单上层侧板的 B 型, 2 种双层侧板型: 上下层均为垂直侧板的 C 型和下层为垂直侧板、上层为倾斜侧板的 D 型(图 1)。鱼礁整体长 5 m, 宽 5 m, 高 4 m(图 2), 礁体框架宽度为 0.25 m, 侧板厚度为 0.125 m。对于 C 型和 D 型礁体, 本实验分别测试了 4 种迎流角度(图 3), 不同迎流角度下各礁型的迎流面投影面积如表 1 所示。

1.2 数值模型的设置

控制方程和湍流模型 采用常用的计算流体力学软件 ANSYS fluent。实验计算不涉及能量运输, 主要受质量守恒定律和动量守恒定律控制^[31]。湍流模型采用大涡模拟, 大涡模拟是一种非直接数值模拟的湍流模型, 主要通过分别处理大尺度涡和小尺度涡进行模拟分析, 利用滤波函数将大尺度和小尺度涡分离, 湍流中的大尺度涡由瞬时 Navier-Stokes 方程 (N-S 方程) 直接模拟, 小涡对大涡的影响采用近似模拟得到^[21,31-32]。

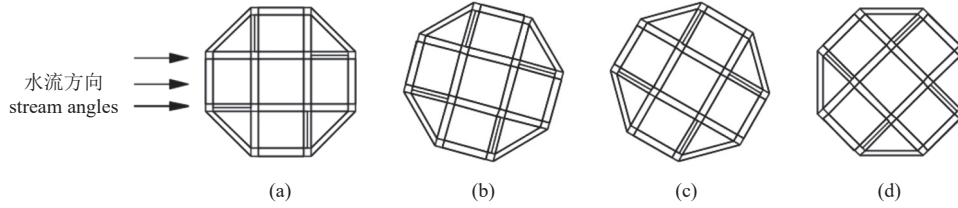


图3 4种迎流角度示意图

(a) 0°迎流, (b) 15°迎流, (c) 30°迎流, (d) 45°迎流。

Fig. 3 Schematic diagram of four upstream angles

(a) 0°upstream, (b) 15°upstream, (c) 30°upstream, (d) 45°upstream.

表1 4种礁体迎流面投影面积相关统计

Tab. 1 Statistics of upstream surface projection area of four types of reef

礁型 reef type	迎流角度 upstream angle	单礁外廓投影面积/m ² projected area of a single reef profile(A _{sp})	迎流面投影面积/m ² projected area of upstream surface(A _{us})	A _{us} /A _{sp}
A型 type A	0°	20.00	11.06	0.55
B型 type B	0°	20.00	11.06	0.55
C型 type C	0°	20.00	15.13	0.76
	15°	21.40	19.94	0.93
	30°	21.32	18.35	0.86
	45°	19.80	19.80	1.00
D型 type D	0°	20.00	14.00	0.70
	15°	21.40	19.69	0.92
	30°	21.32	19.12	0.90
	45°	19.80	17.42	0.88

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 u_z \tag{4}$$

式中, u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 3个方向的速度分量, t 为时间, P 为压强, ρ 为密度, ν 为水体的黏性系数, f_x 、 f_y 、 f_z 为3个方向的单位质量力, ∇ 表示散度。

计算域和网格划分 计算域大小为 200 m × 30 m × 20 m(长×宽×高), 礁体中心距进口距离为 6

倍礁体长度, 距两侧壁面的距离各为 3 倍礁体长度(图4)。网格划分在 Workbench 的 Meshing 模块中完成。网格单元采用能很好适应复杂结构的四面体网格。为了更好地捕捉礁体周围的水流流态, 实验对礁体周围网格适当加密, 以礁体底部中心, 呈球状向周围扩散, 网格尺寸逐渐增加^[30](图5), 最小网格尺寸为 0.125 m, 即为鱼礁框架厚度的 1/2。网格质量检查采用 skewness 参数, 其值小于 0.7, 网格质量较好。

边界条件 进口和出口设置为速度进口边界条件, 进口流速设置为东海区小潮典型底层涨落急流速 0.5 m/s 和大潮典型底层流速 0.9 m/s, 出口流速设置为 -0.5 m/s 和 -0.9 m/s, 计算域顶面和两侧

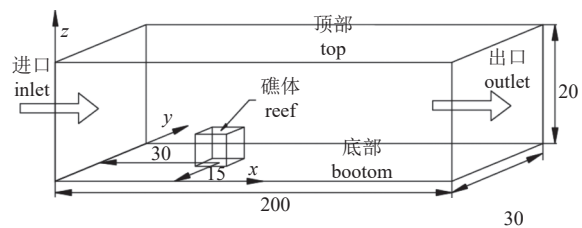


图4 计算域(单位: m)

Fig. 4 Computational domain (unit: m)

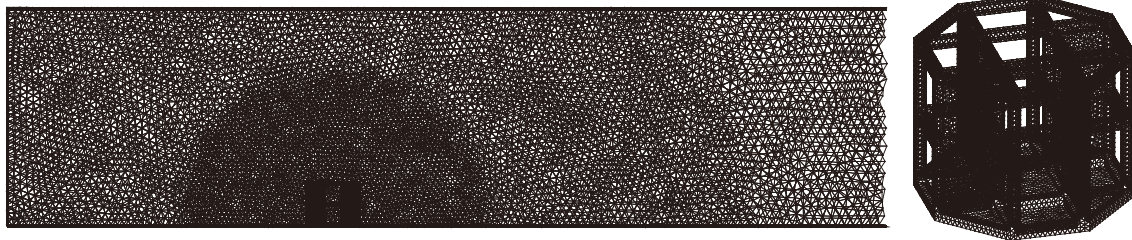


图 5 网格划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of meshing

壁面设置为对称边界条件 (symmetry), 底部以及鱼礁设置为无滑移壁面条件 (wall)。

1.3 水槽实验

水槽实验设备 实验在上海海洋大学水动力实验室完成。实验水槽为 U 型水槽, 水槽的底部和侧壁均为钢化玻璃材质。实验在水槽的直道段完成, 水槽直道长 6 m, 宽 0.45 m, 高 0.55 m。流速测量采用粒子图像测速技术 (PIV, Particle Image Velocimetry), 示踪粒子采用粒径为 50 μm 的聚氯乙烯粉末。

实验设计 实验模型制作采用几何相似。综合考虑鱼礁和实验水槽尺寸, 取比例尺为 1 : 45.45, 鱼礁模型长宽高分别为 11、11 和 9 cm, 框架厚度为 5.5 mm。为保证鱼礁在实验中的稳定性, 鱼礁模型底部采用钢板材料; 框架和侧板采用易透过激光的有机玻璃材料。实验时, 鱼礁摆放于距水槽进口 2.45 m 处的水槽中央, 水深 36 cm。实验速度以数值模拟流速 0.9 m/s 为例, 根据 Froude 准则, 其对应的水槽流速为 0.133 m/s。分别拍摄距水槽底部 4 cm(平面 1) 和 6 cm(平面 2) 平面。每个平面设置 3 条流速测线, 分别为流速线 a、b、c(图 6), 流速线间距为 10 cm; 每条流速线上设置 7 个流速点, 流速点间距为 1 倍礁高 (9 cm), 其中流速线 b 点 2 位于鱼礁中心, 水槽实验无法获取其流速, 因此该点不参与对比和讨论。

数值模拟共设置 2 种, 大尺寸数值模拟和小

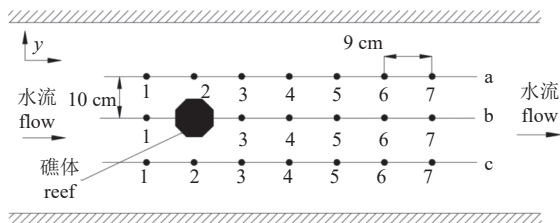


图 6 鱼礁位置及流速测量点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fish reef location and velocity measuring point

尺寸数值模拟。大尺寸数值模拟的计算域和前文所述一致, 流速测线和流速点的位置根据比例尺确定, 保证相对位置与水槽实验一致, 平面 1 和 2 分别距底部 1.818 和 2.727 m, 流速线间距为 4.545 m, 流速点间距为 4.090 m。小尺寸数值模拟计算域的设置和水槽一致, 设置为 6 m×0.45 m×0.36 m, 网格划分方法以及边界条件等的设置和大尺寸数值模拟一致, 保证网格最小尺寸为礁体框架厚度的 1/2, 相关流速点的提取和水槽实验一致。

Froude 数 (F_r) 计算公式:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g\lambda_l}} \tag{5}$$

为保证模型实验和数值模拟实验时 Froude 数一致, 需满足:

$$(F_r)_a = (F_r)_m \tag{6}$$

由于

$$g_a = g_m \tag{7}$$

由此可得到水槽物理模型实验和原型尺寸数值模拟的流速计算公式:

$$v_m = \frac{v_a}{\sqrt{\lambda_l}} \tag{8}$$

式中, v 是速度, g 是重力加速度, 下标 a 表示原型, 下标 m 表示模型, λ_l 表示比例尺。

1.4 流场效应评价指标和数据处理方法

上升流区范围及评价指标 上升流区范围为垂向 (z 轴) 分速度大于来流速度 10%(w_{10})、15%(w_{15}) 和 20%(w_{20}) 的区域^[30,33], 上升流区体积即是上升流区域所占的空间体积。

背涡流区范围及评价指标 背涡流区范围为水平向 (x 轴) 流速的绝对值小于来流速度的 40%(v_{40})、60%(v_{60}) 和 80%(v_{80}) 的区域, 背涡流区体积即是背涡流区域所占的空间体积。

为了降低流场效应评价的误差, 上述上升流区和背涡流区指标均进行 3 个等级的综合评价。

运输通量 运输通量 (Q) 可用于测量水体的运输能力^[30]。其计算公式:

$$Q_k = \sum_{i=1,m}^{j=1,n} S_{i,j} \cdot U_{i,j} \quad (9)$$

式中, Q_k (m^3/s) 为垂向第 k 层的水体运输通量; 因模型采用不规则的四面体网格, 故求参数时采用三维插值法得到某一平面的垂向流速, 将平面分为 $m \times n$ 个水平网格, 设分辨率为 0.25 m; $S_{i,j}$ 为网格面积; $U_{i,j}$ 为该网格的运输速度, 计算向上运输通量时采用垂向 (z 轴) 分速度大于 0。

数值模拟计算中, 流场效应相关指标在计算一个周期 (计算域长度除以平均流速) 后相对稳定^[30]。因此, 当来流速度为 0.5 m/s 时, 流场效应评价采用 400 s 后连续 50 s (数据输出间隔 1 s) 的数据进行分析; 当来流速度为 0.9 m/s 时, 流场效应评价

采用 225 s 后连续 50 s 的数据进行分析。流速对比时, 水槽实验和数值模拟均采用 20 s 数据的平均。

2 结果

2.1 水槽实验和数值模拟的流速对比

以数值模拟时来流速度为 0.9 m/s 为例, 对 A 型和 B 型礁体进行了对应的水槽实验, 并将水槽实验结果与 2 种尺寸数值模拟结果对比, 对比结果显示, 水槽实验与 2 种尺寸数值模拟流速变化趋势基本一致。经计算, A 型礁平面 1 和平面 2 的水槽流速与小尺寸数值模拟均方根误差最大分别为 0.039 和 0.040, 与大尺寸数值模拟相比均方根误差最大分别为 0.042 和 0.063; B 型礁平面 1 和平面 2 的水槽流速与小尺寸数值模拟流速相比均方根误差最大分别为 0.041 和 0.035, 与大尺寸数值模拟相比均方根误差最大分别为 0.039 和

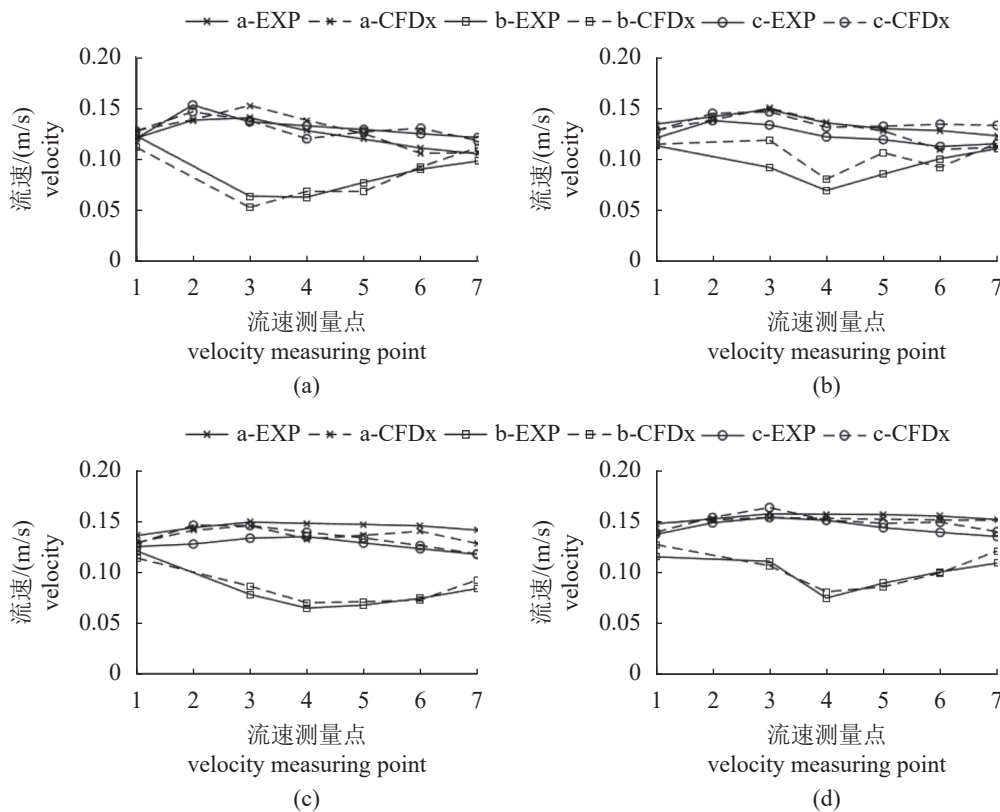


图 7 2 种礁体的平面 1(a)(c) 和平面 2(b)(d) 水槽流速和小尺寸数值模拟流速对比

(a) (b) A 型礁, (c) (d) B 型礁; a-EXP. 流速线 a 的实验流速, a-CFDx. 流速线 a 的小尺寸数值模拟流速; b-EXP. 流速线 b 的实验流速, b-CFDx. 流速线 b 的小尺寸数值模拟流速; c-EXP. 流速线 c 的实验流速, c-CFDx. 流速线 c 的小尺寸数值模拟流速; 下同。

Fig. 7 Comparison of the velocity and the small-scale numerical simulation velocity at the plane 1 (a)(c) and plane 2 (b)(d) of the two reefs

(a) (b) type A, (c) (d) type B; a-EXP. the experimental velocity of the velocity line a, a-CFDx. the velocity of the small-scale numerical simulation of the velocity line a; b-EXP. the experimental velocity of the velocity line b, b-CFDx. the velocity of the small-scale numerical simulation of the velocity line b; c-EXP. the experimental velocity of the velocity line c, c-CFDx. the velocity of the small-scale numerical simulation of the velocity line c.

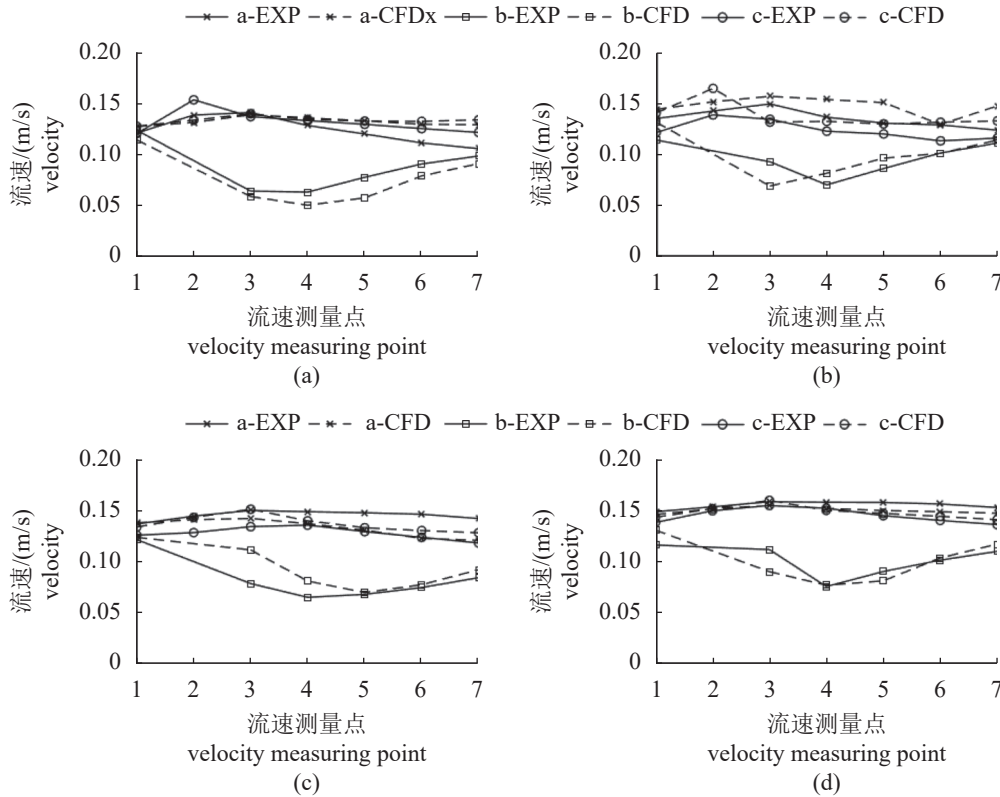


图 8 2 种礁体的平面 1(a) (c) 和平面 2(b) (d) 水槽流速和大尺寸数值模拟流速对比

CFD. 大尺寸数值模拟流速。

Fig. 8 Comparison of the velocity and the large-scale numerical simulation velocity at the plane 1 (a) (c) and plane 2 (b) (d) of the two reefs

CFD. the velocity of the large-scale numerical simulation.

0.028(图 7, 图 8)。水槽实验结果与 2 种尺寸的数值模拟结果的总体误差相对较小, 但个别点的流速相差较大, 如流速线 b 的流速点 2、流速线 a 和流速线 c 上末尾 3 个流速点等。流速线 b 的流速点 2 处于紧靠礁体后方区域, 水槽实验时受相机拍摄精度影响, 无法精确捕捉此处水流流速, 导致与数值模拟流速相差较大。流速线 a 和流速线 c 处于鱼礁两侧, 礁体后方水流紊动较大, 且距离鱼礁越远, 水流向两侧扩散和涡动越强烈, 流速瞬时变化较大, 数值模拟和水槽实验流速差异较大。此外, 实验水槽壁面和数值模拟标准壁面之间的差异、实验中粒子分布的均匀度、礁体模型的摆放精度和缩放比例等因素均会造成水槽实验和数值模拟结果之间的差异。验证结果表明, 所采用 CFD 模型的精度相对较高, 可用于人工鱼礁流场效应的相关研究。

2.2 0°迎流时侧板结构对于流场效应的影响分析

水流遇到鱼礁后, 受鱼礁阻挡作用, 向礁体

两侧和上方运动, 礁体上方和两侧流速较大, 在礁体上方形成明显上升流区域(图 9)。4 种礁体在图示时刻时, C 型礁上方高流速区域范围最大, 其次是 D 型礁, A 型礁和 B 型礁相对较小。水流流经礁体后, 在礁体后方形成漩涡并向下游不断脱落, 导致礁后流场结构较为复杂, 流速较小, 形成明显背涡流区域(图 9, 图 10)。C 型礁和 D 型礁礁后的低流速区域明显大于 A 型礁和 B 型礁。A 型礁近底层附近流速受侧板影响, 流速减弱明显, 而上层无侧板, 流速受到影响较小; B 型礁侧板位于上层, 上层礁后流速降低明显, 而近底层无侧板, 只有礁体框架对水流产生影响, 背涡流区不如 A 型礁明显(图 10)。因此, 单从流速对冲刷的影响来看, A 型礁底部受到冲刷强度较 B 型礁小, 更易造成背涡流区泥沙的淤积, 同时更易造成礁体两侧的泥沙冲刷。

2 种来流速度情况下, A 型礁的上升流体积和背涡流体积均大于 B 型礁(图 11)。A 型礁在流速为 0.5 和 0.9 m/s 时上升流体积较 B 型礁分别高

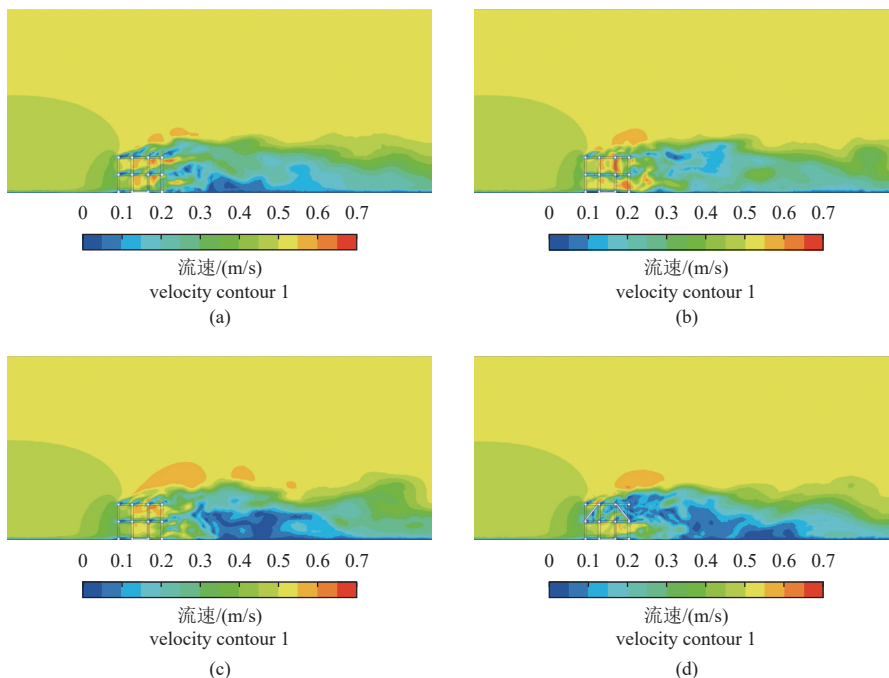


图 9 0°迎流角 4 种礁体在中垂面的流场图 (以流速为 0.5 m/s 为例)

Fig. 9 Flow field diagrams of four reefs on the vertical plane with the upstream angle of 0° (cases with velocity of 0.5 m/s as an example)

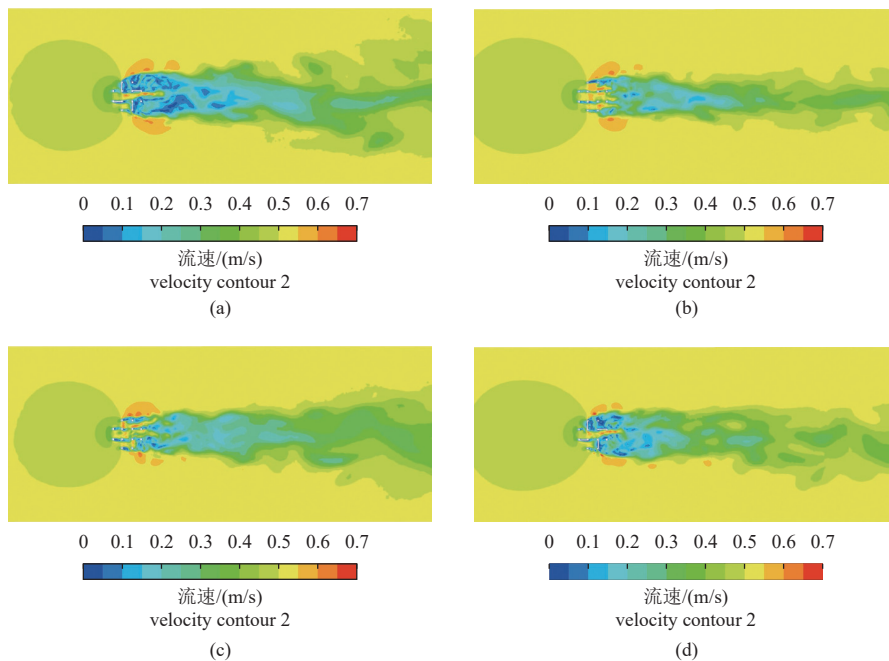


图 10 0°迎流角 A 型礁和 B 型礁在 z=1 m (a) (b) 和 z=3 m (c) (d) 平面的流场图 (以流速为 0.5 m/s 为例)

(a) (c) A 型礁, (b) (d) B 型礁。

Fig. 10 Flow field diagrams of type A and B reefs at z=1 m (a) (b) and z=3 m (c) (d) plane with upstream angles of 0° (cases with velocity of 0.5 m/s as an example)

(a) (c) type A, (b) (d) type B.

15.2%~20.0% 和 29.9%~35.6%, 背涡流体积分别高 20.3%~193.5% 和 17.4%~21.3%, 说明 2 种单层

侧板型人工鱼礁中, 侧板位于下层的 A 型礁流场效应优于侧板位于上层的 B 型礁。来流受到 A 型

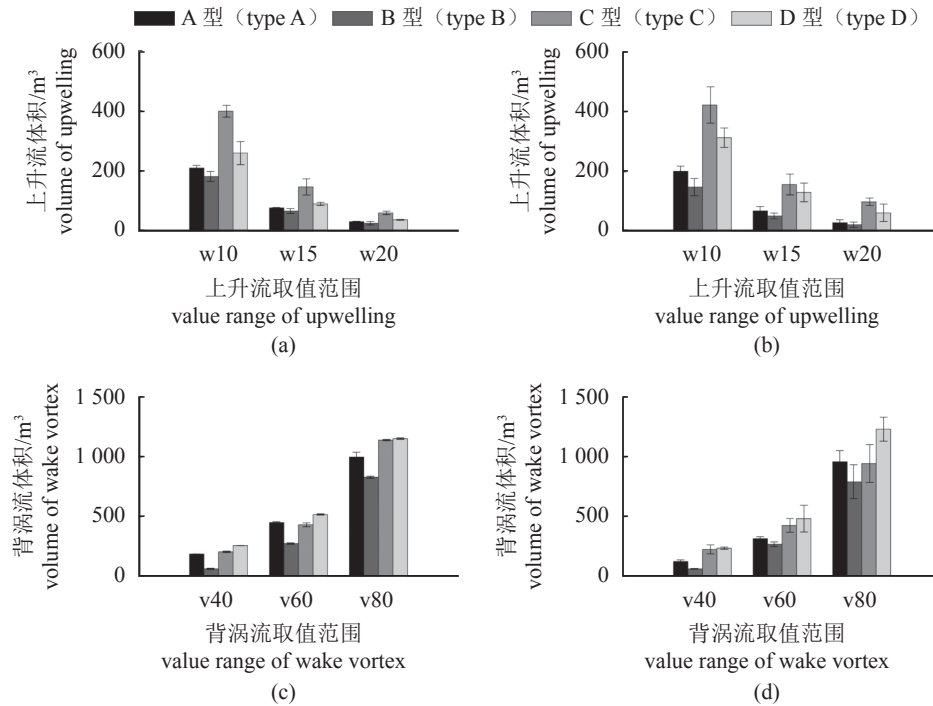


图 11 0°迎流 4 种礁体的上升流体积 (a)(b) 和背涡流体积 (c)(d)

(a)(c) 流速为 0.5 m/s 的情况, (b)(d) 流速为 0.9 m/s 的情况。

Fig. 11 Volume of upwelling (a)(b) and wake vortex (c)(d) of four reefs with the upstream angle of 0°

(a)(c) the case when the velocity is 0.5 m/s, (b)(d) the case when the velocity is 0.9 m/s.

礁下层侧板的阻挡后向上方和两侧运动, 而受到 B 型礁上层侧板的阻挡后不仅向上方和两侧运动, 还可以向下运动; 水流绕过侧板向下游流动过程中, A 型礁后方水流受侧板和海底摩擦的共同作用, 对礁后流场影响较大, 而上层侧板的 B 型礁侧板距离海底较远, 主要受侧板作用影响, 礁后流场影响相对较小。故 A 型礁的上升流和背涡流体积均大于 B 型礁体。

2 种来流速度下, A 型礁和 B 型礁的向上输运速度、输运面积和输运通量从底层至顶层先增加而后减小, 输运速度和通量在 y=3 m 层达到相应最大值 (图 12)。2 种来流速度下, B 型礁的向上输运面积较 A 型礁高约 300~500 m², 但因向上输运流速偏小, 故在流速为 0.5 m/s 时, 从底层至顶层, A 型礁和 B 型礁之间的向上输运通量相差较小; 流速为 0.9 m/s 时, A 型礁的向上输运通量略大于 B 型。综上, A 型礁的流场效应优于 B 型礁。

在 A 型礁的基础上, 添加上层侧板, 形成双层侧板型人工鱼礁 (C 型和 D 型)。2 种流速下, 0°迎流时, C 型礁的上升流体积大于 D 型礁, 背涡流体积小于 D 型礁 (图 11)。C 型礁在流速为 0.5 和 0.9 m/s 时上升流体积较 A 型礁分别高 88.4%~91.2% 和 109.8%~244.1%, D 型礁较 A 型

礁分别高 16.9%~23.5% 和 55.7%~115.8%, 表明增加侧板数量对于提升礁体上升流效应作用明显。C 型礁上下层均为垂直侧板, 0°角迎流时, 对水流阻挡强烈。而 D 型礁正对迎流方向, 上侧板为倾斜侧板, 有利于将底层水流引导至上层, 背流面倾斜侧板方向向下, 会在一定程度上减缓水体向上运动。故 0°角迎流时, C 型礁的上升流体积大于 D 型礁。

流速为 0.5 m/s, 速度比为 v40 和 v80 时, C 型礁的背涡流体积较 A 型礁分别高 9.8% 和 14.2%, 而速度比为 v60 时, 较 A 型少 4.1%; 流速为 0.9 m/s, 速度比为 v40 和 v60 时, C 型礁的背涡流体积较 A 型礁分别高 80.1% 和 34.8%, 速度比为 v80 时, 略有减小。D 型礁在流速为 0.5 和 0.9 m/s 时的背涡流体积较 A 型礁分别高 15.1%~38.0% 和 28.3%~88.8%。上述结果表明, 增加侧板数量也能提升礁体的背涡流效应, 但提升作用不如上升流效应明显。相对于 C 型礁, D 型礁的倾斜侧板增加了礁体结构的复杂程度, 对于降低高来流速度下礁后水流流速作用明显, 故 D 型礁在 0.9 m/s 来流速度下的背涡流体积明显大于 C 型礁。

2 种流速下, C 型和 D 型礁的向上输运速度、输运面积和输运通量的变化趋势和 2 种单层侧板

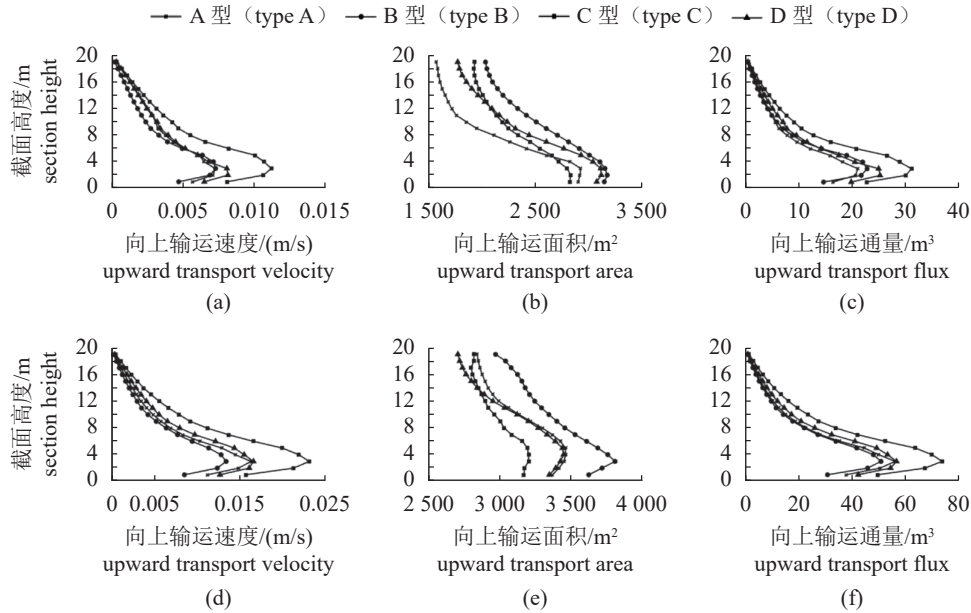


图 12 0°迎流角下 4 种礁体的向上输运速度 (a)(d)、向上输运面积 (b)(e) 和向上输运通量 (c)(f)

(a) (b) (c) 流速为 0.5 m/s, (d) (e) (f) 流速为 0.9 m/s.

Fig. 12 Upward transport speed (a)(d), upward transport area (b)(e) and upward transport flux (c)(f) of the four reefs when the upstream angle is 0°

(a) (b) (c) the velocity is 0.5 m/s, (d) (e) (f) the velocity is 0.9 m/s.

型基本一致 (图 12)。流速为 0.5 m/s 时, C 型礁的向上输运通量最大, 其余 3 种礁体相差不大, C 型礁的最大向上输运通量是 D 型礁的 1.24 倍; 流速为 0.9 m/s 时, C 型和 D 型均大于 2 种单层侧板型礁, 且 C 型>D 型, C 型礁最大向上输运通量是 D 型礁的 1.29 倍。2 种来流速度下, C 型礁的向上输运速度最大, 故向上输运通量明显大于 D 型礁。

综上, C 型礁的上升流效应、向上输运通量优于 D 型礁, D 型礁的背涡流效应略优于 C 型礁。

2.3 双层侧板型人工鱼礁在不同迎流角度下的流场效应

通过以上分析可知, 2 种来流速度下, C 型礁和 D 型礁的流场效应相对 A 型礁和 B 型礁较优。下文以流速 0.5 m/s 为例, 对 4 种迎流角下 (0°、15°、30°和 45°)C 型礁和 D 型礁的流场效应进行了对比分析。通过分析可以发现, 4 种迎流角下, C 型礁的上升流体积从大到小依次是 0°>15°>45°>30°, 背涡流体积从大到小依次是 45°>0°>15°>30°。4 种迎流角下, D 型礁在速度比为 w10 时, 上升流体积从大到小依次是 45°>30°>0°>15°, 速度比为 w15 和 w20 时, 相差不大; 当速度比为 v40 时, 背涡流体积变化较小, 速度比为 v60 和

v80 时, 从大到小依次是 0°>45°>30°>15° (图 13)。综上, 4 种迎流角下, C 型礁在 0°迎流时上升流效应最佳, 45°迎流时背涡流效应最佳; D 型礁在 45°迎流时上升流效应最佳, 0°迎流时背涡流效应最佳。

利用单因素方差分析法对 4 种迎流角下上升流体积和背涡流体积差异性进行分析, 结果显示, C 型礁在速度比为 w15 时, 30°和 45°迎流时的上升流体积差异不显著 ($P>0.05$)。D 型礁在速度比为 w15 时, 0°和 45°、15°和 30°迎流时上升流体积差异不显著 ($P>0.05$); 速度比为 w20 时, 0°和 30°迎流时的上升流体积差异不显著 ($P>0.05$)。C 型礁和 D 型礁其余角度之间的上升流体积差异显著 ($P<0.05$)。4 种角度下, C 型礁和 D 型礁的背涡流体积差异均显著 ($P<0.05$) (表 2)。

4 种迎流角下, C 型礁和 D 型礁的向上输运通量变化趋势基本一致, 从底层至顶层先增加后减小, 且在 4 种迎流角下 C 型礁的向上输运通量大于 D 型礁 (图 14)。4 种迎流角下, C 型礁在 0°和 45°迎流时向上输运速度较大, 其余角度下较小; D 型礁在 45°迎流时向上输运速度最大, 其次是 15°和 30°, 最小是 0°。4 种迎流角度下, C 型礁在 45°迎流时向上输运通量最大, 而 D 型礁在 4 种角度下差异较小。

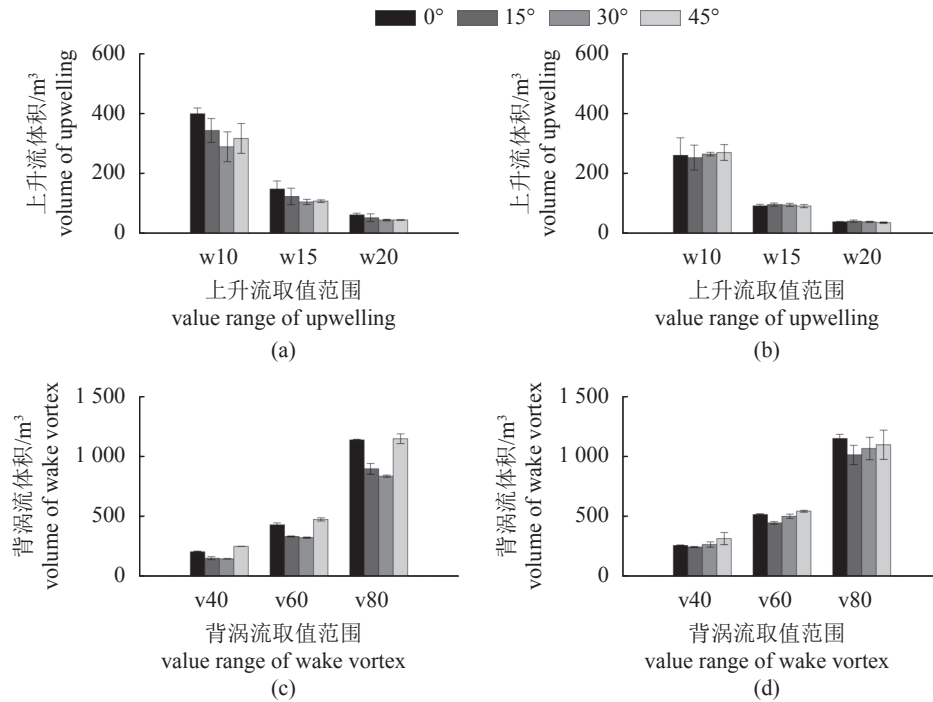


图 13 4种迎流角 C型礁和 D型礁的上升流体积 (a)(b) 和背涡流体积 (c)(d)

(a) (c) C型礁, (b) (d) D型礁。

Fig. 13 Volume of upwelling (a)(b) and wake vortex (c)(d) of type C and D at four upstream angles

(a) (c) type C, (b) (d) type D.

表 2 4种迎流角度下 C型礁和 D型礁上升流体积和背涡流体积的差异性比较

Tab. 2 Comparison of the difference between the volumes of upwelling and the wake vortex of type C and D at four upstream angles

上升流体积 volume of upwelling					背涡流体积 volume of wake vortex				
显著性(P) significance					显著性(P) significance				
	0°	15°	30°	45°		0°	15°	30°	45°
0°		1	1	1	0°		1	1	1
15°	1		1	1	15°	1		1	1
30°	0	0		0	30°	1	1		1
45°	0	1	1		45°	1	1	1	

注：“1”表示3种速度比下均显著差异，且显著差异时满足 $P < 0.05$ ；“0”表示至少有一种速度比情况下两角度之间差异不显著；表格的右上部分表示C型礁结果，左下部分表示D型礁结果。

Notes: "1" means that the difference is significant difference under the three ratios, and the significant difference is $P < 0.05$. "0" means that there is at least one speed ratio in which the difference between the two angles is not significant. The upper right part of the table represents the results of the type C, and the lower right part represents the results of the type D.

3 讨论

3.1 侧板对于八棱柱型人工鱼礁流场效应的影响

0°迎流时，侧板数量增加即是迎流面投影面积的直接增加。上升流和背涡流3种取值条件下，4种礁体的迎流面投影面积和上升流体积之间相关性系数分别为0.88、0.86和0.72，相关性较

好，即随着迎流面积增加，上升流体积随之增加(图15)。迎流面投影面积与背涡流体积之间相关性较差，仅在背涡流取值条件为v40时显著相关(图15)。于定勇等^[10]对不同开口比的方型人工鱼礁进行了研究，表明当开口比大于0.2时，上升流范围随着开口比增加逐渐减小；Wang等^[11]认为开口比应该控制在合理的范围内(如0.2和0.3)，过大或者过小均会对人工鱼礁流场效应起到抑制

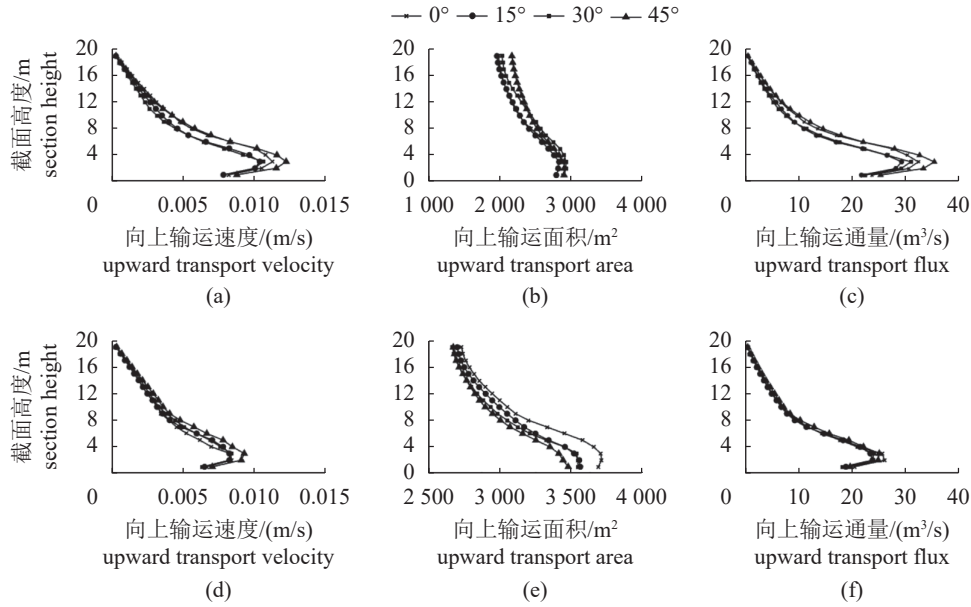


图 14 4种迎流角下 C 型礁和 D 型礁的向上输运速度 (a)(d)、向上输运面积 (b)(e) 和向上输运通量 (c)(f) (a)(b)(c) C 型礁的结果, (d)(e)(f) D 型礁的结果。

Fig. 14 Upward transport velocity (a)(d), upward transport area (b)(e) and upward transport flux (c)(f) of type C and D at four upstream angles

(a)(b)(c) the result of type C, (d)(e)(f) the result of type D.

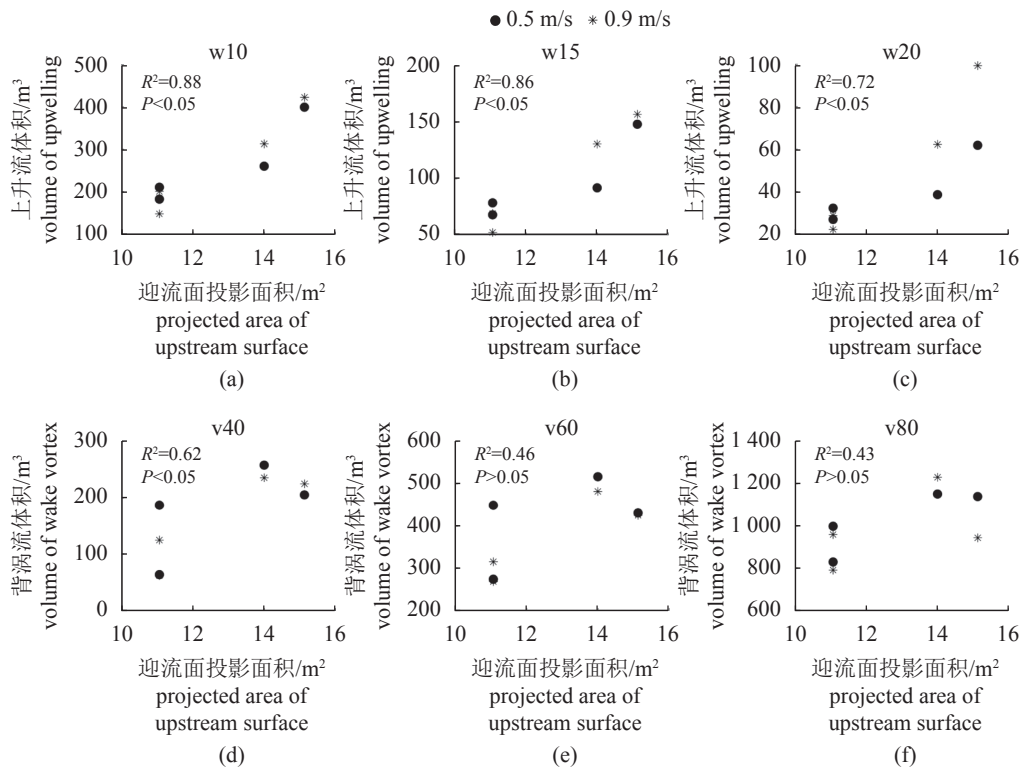


图 15 0°迎流角 4 种礁体迎流面投影面积和上升流体积 (a)(b)(c)、背涡流体积 (d)(e)(f) 之间的关系

Fig. 15 The relationship between the projected area of upstream surface and the volume of upwelling (a)(b)(c), the projected area of upstream surface and the volume of wake vortex (d)(e)(f) of the four reefs at the upstream angle of 0°

作用。由上面分析可知, C型礁在迎流面投影面积比 A_{us}/A_{sp} 为 0.76 时, 上升流效应最好, 换算成开口比, 则约为 0.3 左右, 即本研究结果与上述研究类似。

侧板位置不同, 也会对人工鱼礁流场效应以及底部冲刷等产生不同的影响。Jiang 等^[12-13] 为进一步提升立方体框架礁的上升流效应, 设计了导流礁和上升流礁, 2种礁体分别在立方体框架礁的框架上和内部分别添加倾斜或垂直导流板, 研究表明, 相对于立方体框架礁, 这2种礁体的上升流效应有明显提升。本实验中C型礁在A型礁的基础上添加了上层垂直侧板, D型礁相比于A型礁添加了上层倾斜侧板, C型礁和D型礁的上升流体积较A型礁最大分别提升了244.1%和115.8%。本研究结果和姜昭阳等^[12-13] 研究结果相似, 但本研究未对上层倾斜侧板不同倾斜角进行探讨。

3.2 八棱柱型人工鱼礁对迎流角度的适应性

4种迎流角 (0° 、 15° 、 30° 、 45°) 下, C型礁和D型礁的上升流体积和背涡流体积差异显著, C型和D型礁在 0° 和 45° 迎流时流场效应相对较好(图13)。八棱柱型人工鱼礁为旋转对称造型, 可分为4部分旋转对称。在复杂的海洋环境中, 潮流方向周期性发生变化, 目前投礁技术和精度导致礁体每个面均有迎流的可能性, 在礁体每个1/4对称结构内, 礁体有2次 0° 和一次 45° 迎流的可能。4种迎流角, 3种上升流取值条件下, C型礁的上升流体积最大值和最小值之间分别相差 (110.52 ± 8.52) 、 (43.31 ± 4.0) 、 (17.36 ± 2.3) m^3 , D型礁分别相差 (17.23 ± 8.5) 、 (5.17 ± 6.5) 、 (4.95 ± 3.2) m^3 ; C型礁和D型礁的上升流体积最大值分别是最小值的1.41和1.13倍; 3种背涡流取值条件下, C型礁的背涡流体积最大值与最小值之间分别相差 (312.56 ± 12.10) 、 (152.50 ± 6.2) 、 (104.112 ± 5.2) m^3 , D型分别相差 (136.81 ± 7.91) 、 (69.82 ± 3.1) 、 (28.94 ± 8.6) m^3 ; C型礁和D型礁的背涡流体积最大值分别是最小值的1.40倍和1.15倍。由此可知, 0° 至 45° 迎流的转换中, C型礁的上升流体积最大下降27.1%, D型礁最大下降6.3%; C型礁的背涡流体积最大下降27%, D型礁最大下降11.8%。表明在某些角度(如 15° 和 30°) 下流场效应有所减弱, 但相对下降较小, 可认为八棱柱型人工鱼礁能较好适应复杂的海流环境, 如旋转流和往复流。同

时, 相对于C型礁, D型礁在4种角度下的流场效应差异更小, 对于迎流角度的适应性更强。

3.3 对于礁体设计以及迎流面投影面积相关研究的启示

不同于礁体 0° 垂直迎流, 不同迎流角下C型和D型礁的上升流体积、背涡流体积和迎流面投影面积之间相关性不明显(图16)。以C型礁体为例, 4种角度下迎流面投影面积从大到小依次为 $15^\circ > 45^\circ > 30^\circ > 0^\circ$; 0° 迎流时, 其中2块侧板迎流面与水流之间的夹角为 90° , 虽迎流面投影面积较小(表1), 但侧板对水流阻挡作用强烈; 而非直角 (15° 、 30° 和 45°) 迎流时, 虽礁体整体迎流面投影面积较大(表1), 但侧板与水流倾斜相交, 侧板对水流的导流作用强烈, 阻流作用相对较弱。表明礁体与水流倾斜相交时侧板对水流的阻挡作用和礁体与水流垂向相交时差异较大。

与CFD模型不同的是, 大尺度海洋数值模型可以考虑实际潮流、海洋风生环流、温盐斜压效应等完整环境驱动力, 并可开展海洋生态动力学等相关研究。在大尺度海洋数值模型中, 可利用阻滞力 F 来表示水中构造物对水流的阻滞作用, 是模拟潮流发电装置、人工鱼礁等海底构造物流场效应^[34-35] 的有效方法。其中, 构造物的迎流面投影面积以及阻力系数是大尺度海洋模式中人工鱼礁流场效应模拟的关键参数。前人的研究多在计算阻滞力时假定迎流面投影面积不发生变化, 阻力系数随来流速度变化而变化^[34], 而在海洋中, 随着潮流方向的变化, 迎流面投影面积会随之发生变化。于定勇等^[10] 研究表明, 人工鱼礁的阻力系数和开口比之间呈线性相关, 开口比的增加, 迎流面面积减小, 阻力系数增加。本研究表明, 同一礁体在不同迎流角下, 迎流面投影面积和流场效应相关指标之间相关性较小。因此, 今后在大尺度海洋数值模型计算鱼礁阻滞力时, 不同迎流角度下、各类异型鱼礁体需要分别率定不同迎流角度下的迎流面投影面积和阻力系数, 不能只考虑来流速度的影响, 还需考虑到鱼礁迎流面与流向之间的夹角。

本研究只讨论了不同侧板位置的人工鱼礁流场效应, 未能深入分析礁体所受的力以及底部水流冲刷对泥沙淤积等影响, 同时数值模拟中未考虑鱼礁体和海床底边界的边界层效应, 后续研究工作中将继续对这些方面进行改进, 尤其是对不

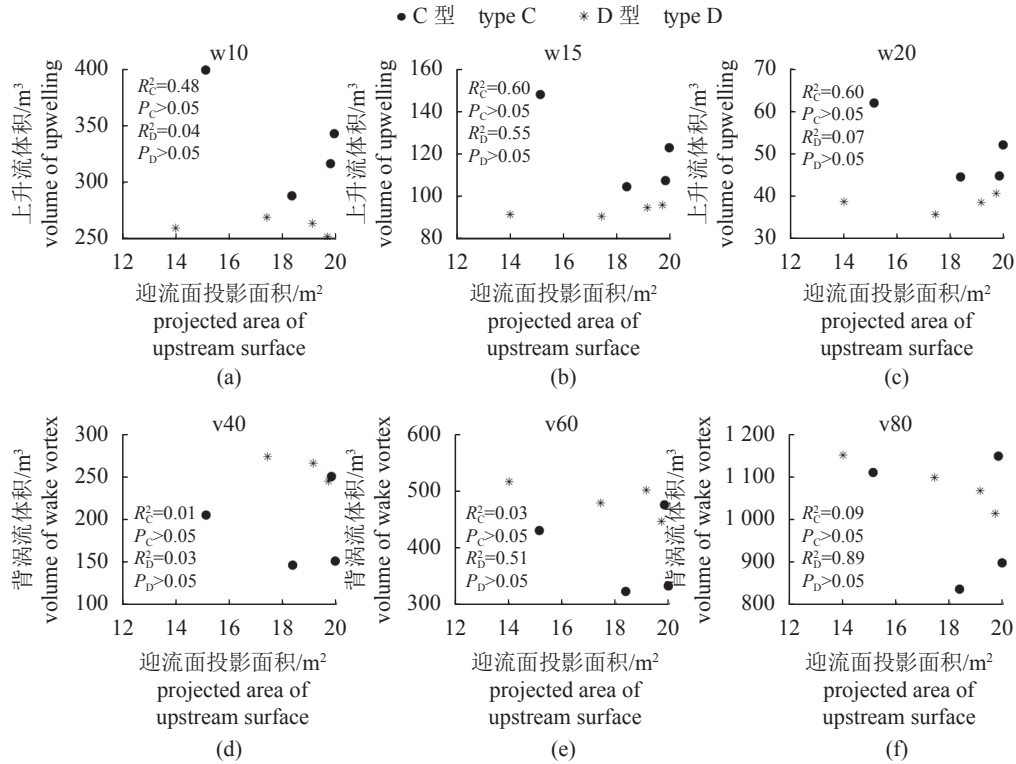


图 16 4 种迎流角下 C 型礁和 D 型礁迎流面投影面积和上升流体积、背涡流体积之间的关系

Fig. 16 The relationship between the projected area of upstream surface and the volume of upwelling as well as that between the projected area of upstream surface and the volume of wake vortex of type C and D at four upstream angles

同迎流角度下的礁体阻力系数等进行测定, 以期应用大尺度海洋数值模型研究大规模人工鱼礁区的水动力及生态效应提供依据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

[1] Harrison S, Rousseau M. Comparison of artificial and natural reef productivity in Nantucket Sound, MA, USA[J]. *Estuaries and Coasts*, 2020, 43(8): 2092-2105.

[2] Valeriya K, Dean C, Geoffrey P. Jones. 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.

[3] Gao Q F, Shin P K S, Xu W Z, *et al*. Amelioration of marine farming impact on the benthic environment using artificial reefs as biofilters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57(6-12): 652-661.

[4] 姜昭阳, 郭战胜, 朱立新, 等. 人工鱼礁结构设计原理与研究进展[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1881-1889.

[5] Jiang Z Y, Guo Z S, Zhu L X, *et al*. Structural design principle and research progress of artificial reef[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1881-1889 (in Chinese).

[6] 刘洪生, 马翔章, 章守宇, 等. 人工鱼礁流场效应的模型实验[J]. *水产学报*, 2009, 33(2): 229-236.

[7] Liu H S, Ma X Z, Zhang S Y, *et al*. Research on model experiments of effects of artificial reefs on flow field[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(2): 229-236 (in Chinese).

[8] 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[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 97-103.

[9] Tang Y L, Long X Y, Wang X X, *et al*. Comparative analysis on flow field effect of general artificial reefs in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 97-103 (in Chinese).

[10] 公丕海, 郑延璇, 李娇, 等. 塔型桁架人工鱼礁流场效应及稳定性[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(5): 1021-1028.

[11] Gong P H, Zheng Y X, Li J, *et al*. Flow field effect and stability of the equilateral tower-type truss artificial

- reef[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(5): 1021-1028 (in Chinese).
- [8] 刘彦, 赵云鹏, 崔勇, 等. 正方体人工鱼礁流场效应试验研究[J]. *海洋工程*, 2012, 30(4): 103-108,130.
Liu Y, Zhao Y P, Cui Y, *et al.* Experimental study of the flow field around cube artificial reef[J]. *The Ocean Engineering*, 2012, 30(4): 103-108,130 (in Chinese).
- [9] 关长涛, 刘彦, 赵云鹏, 等. 复合M型人工鱼礁粒子图像测速二维流场试验研究[J]. *渔业现代化*, 2010, 37(1): 15-19.
Guan C T, Liu Y, Zhao Y P, *et al.* Experimental study on two-dimensional flow field of the compound M artificial reef with particle image velocimetry (PIV)[J]. *Fishery Modernization*, 2010, 37(1): 15-19 (in Chinese).
- [10] 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[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 128-136.
Yu D Y, Yang Y H, Li Y J. Research on hydrodynamic characteristics and stability of artificial reefs with different opening ratios[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(4): 128-136 (in Chinese).
- [11] Wang G, Wan R, Wang X X, *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[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 162: 341-352.
- [12] Jiang Z Y, Liang Z L, Zhu L X, *et al.* Numerical simulation of effect of guide plate on flow field of artificial reef[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 116: 236-241.
- [13] Jiang Z Y, Liang Z L, Tang Y L. Numerical analysis of the effect of an inner structure of a cubic frame reef on flow field[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2019, 53(2): 83-92.
- [14] Su D T, Liu T L, Ou C H. Numerical investigation into effects of seabed topography on flows in and around artificial reefs[J]. *Fisheries Science*, 2008, 74(2): 236-254.
- [15] Fujihara M, Kawachi T, Oohashi G. Physical-biological coupled modelling for artificially generated upwelling[J]. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 1997, 1997(189): 69-79.
- [16] 邵万骏, 刘长根, 聂红涛, 等. 人工鱼礁的水动力学特性及流场效应分析[J]. *水动力学研究与进展A辑*, 2014, 29(5): 580-585.
Shao W J, Liu C G, Nie H T, *et al.* Analysis of hydrodynamic characteristics and flow field around artificial reefs[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(5): 580-585 (in Chinese).
- [17] 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[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 185-193.
Zheng Y X, Guan C T, Song X F, *et al.* Numerical simulation on flow field around star artificial reefs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(19): 185-193 (in Chinese).
- [18] 蒋为, 赵云鹏, 毕春伟, 等. 圆柱镂空型人工鱼礁波浪水动力特性数值模拟[J]. *渔业现代化*, 2017, 44(2): 30-37.
Jiang W, Zhao Y P, Bi C W, *et al.* Numerical Simulation of hydrodynamic characteristics of cylindrical hollow artificial reef in wave-current[J]. *Fishery modernization*, 2017, 44(2): 30-37 (in Chinese).
- [19] 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[J]. *海洋湖沼通报*, 2011(2): 59-65.
Cui Y, Guan C T, Wan R, *et al.* Numerical simulation on influence of disposal space on effects of flow field around artificial reefs[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(2): 59-65 (in Chinese).
- [20] 王佳浩, 刘莉莉, 蔡新晨, 等. 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[J]. *渔业科学进展*, 2020, 41(3): 40-48.
Wang J H, Liu L L, Cai X C, *et al.* Numerical simulation study on influence of disposal space on effects of flow field around porous square artificial reefs[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(3): 40-48 (in Chinese).
- [21] 郭禹, 章守宇, 林军. 以数值实验为基础的米字型鱼礁布设模式差异下的流场效率[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 2025-2038.
Guo Y, Zhang S Y, Lin J. Flow field efficiency of Mi-zi artificial reefs in different construction modes based on numerical experiments[J]. *Journal of fisheries of China*, 2019, 43(9): 2025-2038 (in Chinese).
- [22] 郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 三种叠放形式的圆管型人工鱼礁流场效应数值模拟与PIV试验研究[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(1): 11-19.
Zheng Y X, Liang Z L, Guan C T, *et al.* Numerical Simulation and experimental study on flow field of artificial reefs in three tube-stacking layouts[J]. *Oceanologia et*

- Limnologia Sinica*, 2014, 45(1): 11-19 (in Chinese).
- [23] Liu Y, Guan C T, Zhao Y P, *et al.* Numerical simulation and PIV study of unsteady flow around hollow cube artificial reef with free water surface[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2012, 6(4): 527-540.
- [24] Zheng Y X, Liang Z L, Guan C T, *et al.* Numerical simulation and experimental study of the effects of disposal space on the flow field around the combined three-tube reefs[J]. *China Ocean Engineering*, 2015, 29(3): 445-458.
- [25] Jiang Z Y, Liang Z L, Tang Y L, *et al.* Numerical simulation and experimental study of the hydrodynamics of a modeled reef located within a current[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(2): 267-273.
- [26] Jiang Z Y, Liang Z L, Liu Y, *et al.* Particle image velocimetry and numerical simulations of the hydrodynamic characteristics of an artificial reef[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(5): 949-956.
- [27] 李珺, 章守宇. 米字型人工鱼礁流场数值模拟与水槽实验的比较[J]. *水产学报*, 2010, 34(10): 1587-1594.
Li J, Zhang S Y. The comparison between numerical simulation and water channel experiment on an Mi-zi artificial reef[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(10): 1587-1594 (in Chinese).
- [28] Li J, Zheng Y X, Gong P H, *et al.* Numerical simulation and PIV experimental study of the effect of flow fields around tube artificial reefs[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 96-104.
- [29] 唐衍力. 人工鱼礁水动力的实验研究与流场的数值模拟 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Tang Y L. Hydrodynamics experiment of artificial reefs and numerical simulation of flow field[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [30] 方继红, 林军, 杨伟, 等. 双层十字翼型人工鱼礁流场效应的数值模拟[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(04): 743-754.
Fang J H, Lin J, Yang W, *et al.* Numerical simulation of flow field effect around the double-layer cross-wing artificial reef[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(04): 743-754 (in Chinese).
- [31] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 117-118.
Wang F J. Computational Fluid Dynamics Analysis—CFD Software Principle and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 117-118 (in Chinese).
- [32] 李珺, 林军, 章守宇. 方形人工鱼礁通透性及其对礁体周围流场影响的数值实验[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(6): 836-840.
Li J, Lin J, Zhang S Y. The numerical experiment on the permeability of a cubic artificial reef and the effect on the flow field around the reef[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(6): 836-840 (in Chinese).
- [33] 林军, 章守宇, 叶灵娜. 基于流场数值仿真的人工鱼礁组合优化研究[J]. *水产学报*, 2013, 37(7): 1023-1031.
Lin J, Zhang S Y, Ye L N. Optimization study of artificial reef assemblage based on the numerical simulation of flow field[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(7): 1023-1031 (in Chinese).
- [34] Murray R O, Gallego A. A modelling study of the tidal stream resource of the Pentland Firth, Scotland[J]. *Renewable Energy*, 2017, 102: 326-340.
- [35] Li X R, Li M, McLelland S J, *et al.* Modelling tidal stream turbines in a three-dimensional wave-current fully coupled oceanographic model[J]. *Renewable Energy*, 2017, 114: 297-307.

Influence of different side plate structures on effects of flow field of octagonal prism artificial reef

QI Fuqing¹, LIN Jun^{1,2*}, ZHANG Qingyu¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to understand the influence of the side plate structure on the flow field effect of the octagonal prism artificial reef, this paper is based on the computational fluid dynamics method (CFD), using large eddy simulation (LES) to analyze the octagonal prism type of four different side plate structures. The changes of the flow field around the artificial reef are numerically simulated. And the flow field effect indicators are analyzed with the volume of upwelling, the volume of wake vortex and upward transport flux. At the same time, the numerical model was verified by the water tank experiment. The results show that the maximum root-mean-square error between the experimental flow velocity of the flume and the numerical simulation flow velocity of the two sizes does not exceed 0.065. At 0° vertical upstream, the upwelling volume of type A, type C and type D reef is 35.6%, 244.1% and 80.1% higher than that of type B reef, and the volume of wake vortex is 193.5%, 115.8% and 88.8% higher than that of type B reef, respectively. The upward transport flux of type C and type D is greater than that of type A, and the maximum upward transportation flux of type C is 1.29 times that of type D. At different upstream angles, the correlation between the projected area of upstream surface and the volume of upwelling of types C and D is obvious, and that between the projected area of upstream surface and the volume of wake vortex of types C and D was small. The research results indicate that: the numerical simulation used in this paper is accurate and reliable. The increase in the number of side plates has a significant effect on improving the flow field effect of the octagonal prism artificial reef, especially the upwelling effect. When the lower side plate is fixed, the inclined side plate of the upper layer is helpful to enhance the upwelling effect of the reef, and the vertical side plate of the upper layer is helpful to enhance the wake vortex effect of the reef, and different side plate combinations will cause different flow field effects. The research results can provide a reference for the optimal design of reef cell and the setting of relevant retarding parameters in large-scale marine numerical models.

Key words: artificial reef; flow field effect; PIV; numerical simulation

Corresponding author: LIN Jun. E-mail: jlin@shou.edu.cn

Funding projects: National Key R&D Program of China (2019YFD0901302)