



立方对角面开孔人工鱼礁流场效应的数值模拟

薛大文, 庞聪利, 潘 昀*

(浙江海洋大学船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 人工鱼礁是建设现代化海洋牧场的基础设施, 为了研究在不同海域流速下, 迎流角度对人工鱼礁的影响, 实验基于 Ansys-Fluent 平台, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 的湍流模型, 进行数值水槽模拟, 对结构边长为 3 m 的立方对角面开孔鱼礁在 3 种来流速度 (0.5、1.0 和 1.5 m/s)、4 种迎流角度 (0°、15°、30°和 45°) 下的上升流体积、背涡流体积、阻力、倾覆力矩等水动力特性进行比较分析。结果显示, 人工鱼礁内部和周围存在具有显著特征的上升流区域和背涡流区域; 流场规模的大小基本不受来流速度的影响; 流速是影响立方对角面开孔人工鱼礁稳定性的主要因素, 流速越大, 作用在礁体上的阻力和倾覆力矩相应变大, 礁体的稳定性越差; 迎流角度是影响人工鱼礁流场效应的主要因素, 鱼礁的流场效应规模在迎流角度为 30°~45°时达到最优, 礁体为 45°迎流时上升流体积和背涡流体积都达到最大值。利用权重赋值法, 引入人工鱼礁建设效果综合评价模型, 通过综合评价分析, 在不考虑海底底质淤积、风浪等条件下, 投放人工鱼礁时宜选取最大流速不超过 1 m/s 的海域, 且迎流角在 30°至 45°范围内, 鱼礁的建设效果最佳。

关键词: 人工鱼礁; 海洋牧场; 流场效应; 数值模拟; 稳定性; 迎流角度

中图分类号: S 953.1

文献标志码: A

随着生活水平的日益提高, 人们对海产品的质量要求越来越高, 由于过度捕捞、海洋生态环境恶化、“海洋荒漠化”现象频发, 渔业资源在不断衰退, 建设海洋牧场成为解决现实困境的途径之一。海洋牧场的建设是一项系统工程, 包含多个学科和领域, 其中首要环节是进行生境修复, 而生境建设主要通过投放人工鱼礁实现。人工鱼礁是相对于自然鱼礁而言的, 经过科学选址、合理规划后投放于海底的人工构造物, 是海洋牧场生境修复的重要技术手段之一。布设人工鱼礁后, 由于礁体对流体产生阻碍作用, 礁体的上部和背部形成上升流和背涡流区域, 这为鱼类等海洋生

物提供了避敌、索饵、栖息生长的场所, 实现了渔业资源增殖和生态效益^[1]。Granneman 等^[2]通过定量评估南加州海湾人工礁和天然礁, 发现了人工礁在聚集鱼类密度和生物数量方面优于天然礁。随着计算流体力学的发展和商用软件的推广, 数值模拟技术由于具备成本低、效率高、可解决复杂问题等优点而应用于人工鱼礁领域。

人工鱼礁水动力特性直接决定其流场效应及其稳定性。张硕等^[3]研究了不同高度的鱼礁水动力特性, 得出上升流效应与礁高不呈正相关, 但背涡流长度、高度、面积与礁高成正比。于定勇等^[4]研究了不同开口比的单体人工鱼礁流场, 结

收稿日期: 2021-09-07 修回日期: 2021-12-02

资助项目: 国家自然科学基金 (52101330); 浙江省省属高校基本科研业务费 (2022J004); 浙江省自然科学基金 (LQ18E090007, LQ19E090007); 浙江省大学生新苗计划 (2020R411053)

第一作者: 薛大文 (照片), 从事流固耦合、水动力数值模拟研究, E-mail: xuedw@zjou.edu.cn

通信作者: 潘昀, 从事波浪与海洋工程结构相互作用研究, E-mail: panyunhk@zjou.edu.cn



果表明上升流和背涡流范围随开口比的增大而减小。王佳浩等^[5]研究了不同布设间距下人工鱼礁流场,发现在一定范围内,涡量及流场效应受布设间距的影响较明显。

除了流场效应,在稳定性方面,张世东^[6]通过数值模拟和水槽实验,对比研究了4种不同开口大小和迎流角度下的方形人工鱼礁受力特征,结果表明水槽实验与数值模拟所得阻力系数误差较小,验证了数值模拟研究人工鱼礁水动力性能的可行性和准确性。许柳雄等^[7]、关长涛等^[8]、唐衍力等^[9]、叶功照等^[10]对不同结构、不同雷诺数和波况、不同迎流角度条件下的人工鱼礁受力特征进行了深入研究。张硕等^[11]通过数值模拟与模型试验对比研究了不同形状开口大小的方形人工鱼礁,得到了4种迎流角度下人工鱼礁阻力系数与迎流角度的关系,指出迎流角度对礁体的稳定性产生较大影响。

总结上述研究发现,在工鱼礁流场效应评价方面,国内外学者主要考虑鱼礁的开口比、布设间距、礁体高度、礁体顶部有盖无盖等因素的影响,但对人工鱼礁体流场效应随迎流角度的变化情况研究较少。在人工鱼礁的迎流方式方面,国内学者主要研究了方形人工鱼礁下迎流面形状与迎流面角度对鱼礁稳定性的影响,尚未涉及交叉型鱼礁在不同迎流角度下的流态效应。基于此,实验以舟山海域水文条件为基础,选取3种来流速度和4种迎流角度的立方对角面开孔型鱼礁,通过数值模拟的方法,定量研究其水动力特性,旨在探究礁体上升流规模、背涡流规模、阻力和倾覆力矩等随迎流角度的变化规律,以期为实际海域投放人工鱼礁提供理论参考。

1 数值模拟方法及计算模型

1.1 控制方程和湍流模型

根据流动分离和旋涡的演变发展,假设人工鱼礁附近所在的流场为典型的非定常、黏性不可压缩流体,因海水温度变化较小,因此能量方程可以忽略。在三维笛卡尔坐标中,其连续性方程和雷诺时均 Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

式中, μ 为动力黏度; $u_i(i=1,2,3)$ 分别为x、y、z方向的雷诺平均速度; p 为平均压强; $\overline{u'_i u'_j}$ 代表未知的雷诺应力项。

由于计算条件的有限性,本实验采用由Launder和Spalding提出的RNG $k-\varepsilon$ 模型,该模型基本形式简单,精度适中,适用于高雷诺数模型,且广泛应用于工程流场计算中^[12]。

湍动能 k 方程:

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_D \frac{k^{3/2}}{l} \quad (3)$$

湍流耗散率 ε 方程:

$$u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_l \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{l} \quad (4)$$

式中,两方程的经验系数分别取值为 $C_l = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.99$, $\delta_k = 1.0$, $\delta_\varepsilon = 1.3$ 。

1.2 鱼礁结构及计算区域

我国东海区投放的人工鱼礁尺寸范围一般在2~4 m,以3 m×3 m×3 m正方形礁体居多^[13],因此本研究采用了方形礁体的框架,为了扩大鱼礁的生物附着面积、增强礁体的通透性,在方形框架的基础上设置了交叉型导流板并进行了开孔设计。鱼礁模型的边长为3 m,棱柱宽0.3 m,中间交叉的导流板厚0.1 m,导流板上开有6个直径为0.4 m的圆孔(图1)。数值模拟计算区域尺寸为30 m×12 m×10 m,来流方向从左至右,坐标原点置于礁体底面中心,礁体底部紧贴计算域(图2)。对鱼礁模型模拟4种不同迎流方式下的流场,以鱼礁底部原点为中心进行旋转,分别为0°、15°、30°和45°。

1.3 边界条件

舟山海域是我国著名的强潮海域,根据虞聪达^[14]对舟山渔场的环境调查,舟山海域适宜投放鱼礁的最大流速为1.6 m/s,平均流速为1.13 m/s,这与许强^[15]舟山市海域大潮底层最大流速范围为0.4~1.6 m/s、平均流速范围为0.2~0.8 m/s相一致。从养殖和生态效应角度而言,人工鱼礁区既需要一定的流速以减少自身的污染也应避免流速过大

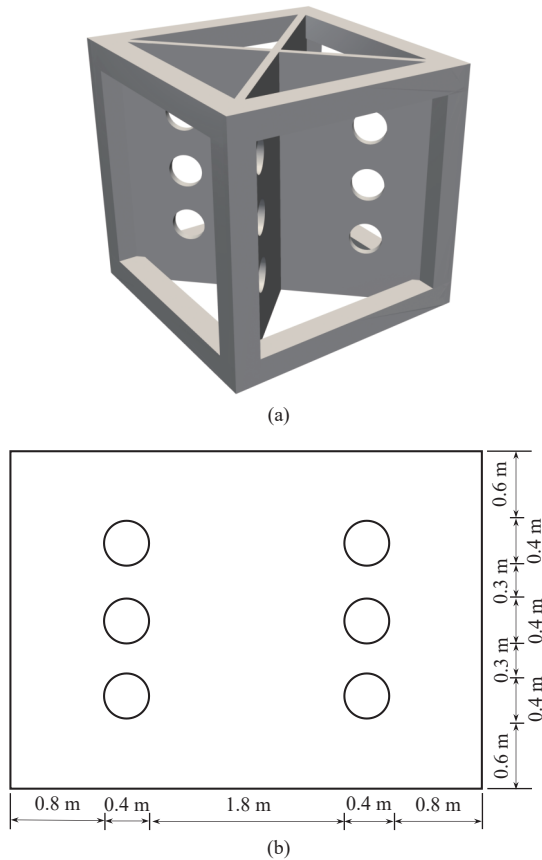


图1 人工鱼礁模型三维图 (a) 及鱼礁对角面特征尺寸 (b)

Fig. 1 3D model of artificial reef (a) and diagonal surface and opening size of reef (b)

损害鱼礁设施, 影响鱼类增殖生长, 综合考虑理论依据和舟山海域实际流速, 本研究分别选取 0.5、1.0 和 1.5 m/s 的来流速度作为速度入口边界条件 (velocity inlet), 计算区域出口边界设置为压力出口 (pressure outlet) 计算域的两侧设置为对称边界 (symmetry), 礁体及海底为刚性固体, 因此与海水接触的面设定为壁面边界条件, 并采用无滑移壁面 (wall)。

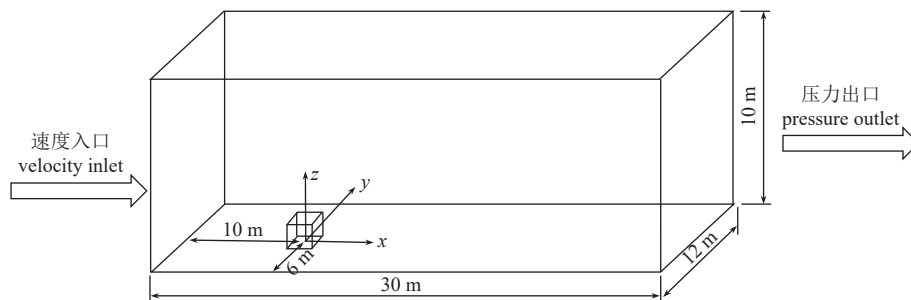


图2 计算区域

Fig. 2 Computational domain

2 数值模拟可靠性验证

2.1 计算模型验证

为了验证本研究所采用的数值方法、湍流模型及相关参数设置模拟人工鱼礁流场效应的有效性和准确性, 基于张硕等^[11,16]所做的六边开口方形鱼礁水槽实验及数值模拟为验证算例, 对比验证不同水流速度条件下礁体阻力及其变化。礁体边长为 20 cm×20 cm×20 cm, 壁厚为 5 mm, 除顶面不作开口处理, 其余 5 个面均开有相同的六边形。本研究选择开口比为 0.25 的六边开口方形鱼礁展开模拟对比分析, 模拟所得阻力与张硕等^[16]的实验及模拟数据对比见图 3 与表 1。从图 3 可得, 模拟结果和文献结果在变化趋势上一致, 并且与文献的数值及实验结果基本吻合; 由表 1 可知, 本模拟结果与张硕等^[11]的物理实验的相对误差值在 5.166%~9.903%, 与张硕等^[16]的数值实验相对误差值在 0.739%~7.936%。综上表明, 本研究的数值模拟可行, 所选模型能够利用 Fluent 软件通过数值模拟得到较为准确的流场分布及阻力特征。

2.2 网格尺寸及时间步长敏感性分析

数值模拟计算中, 网格尺寸及分布对模拟的精度及效率有重要影响, 因此对网格敏感性的分析可以保证数值模拟结果与网格尺寸无关, 以此验证模拟的科学准确性。本研究以迎流角度为 0°, 来流速度为 1.0 m/s 的工况为例, 采用不同的网格尺寸对计算模型进行划分, 最大网格尺寸分别为 0.2、0.1 和 0.05 m, 以礁体所受阻力作为参量进行网格敏感性分析。由图 4 可以看出, 当最大网格尺寸为 0.2 m 时, 流动时间在前 50 s 内礁体所受的阻力波动较大, 而最大网格尺寸为 0.1 m 和 0.05 m 的波动幅度大致相同, 随着流动时间的增

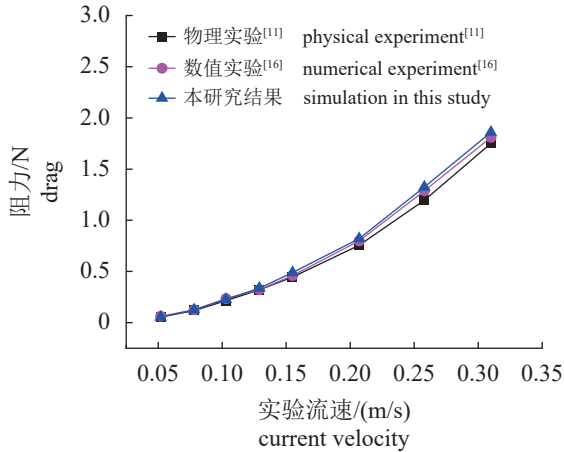


图3 礁体阻力的实验值与模拟值的比较

Fig. 3 Comparison of experimental and simulated values of reef resistance

加, 3种网格尺寸下礁体所受的阻力都趋于稳定, 最大网格尺寸为0.2 m时阻力值稍大, 另2种网格下阻力值基本接近。考虑节约计算资源和保证计算精度, 选取最大网格尺寸为0.1 m作为后续计算网格。

在瞬态计算中, 时间步长的选取影响计算的收敛性及计算总时耗。为兼顾计算的稳定性和收敛速度, 根据库朗数选取时间步长为0.100、0.005、0.002和0.001 s进行时间步长敏感性分析, 对比不同时间步长条件下礁体阻力系数结果如表2所示, 可知, 随时间步长减小, 礁体阻力系数值趋于稳定, 当时间步长低于0.002 s时, 阻力系数值基本不变, 因此本研究在后续数值计算时设置时间步长为0.002 s。

3 结果

流场效应是表征人工鱼礁水动力特性的重要

方面, 而人工鱼礁的流场效应主要体现在鱼礁前方产生的上升流和后方产生的背涡流。因此, 本研究以上升流体积和背涡流体积为指标来衡量鱼礁体的流场规模。在定义上升流范围和背涡流范围时, 参考李珺等^[7]的取值方法并依据相关文献研究采用的方法, 上升流定义为水流z方向(即垂直地面方向)速度与来流速度之比大于或等于20%的水域, 背涡流定义为水流x方向上速度分量与来流速度之比绝对值小于70%的区域。基于上述数值方法, 选取3种不同流速的工况, 模拟不同迎流角度立方对角面开孔人工鱼礁体周围的水流场。

3.1 礁体流场效应分析

不同流速条件对鱼礁流场效应的影响 如图5所示为迎流角度为0°时, Z=1.5 m高度处横向断面流速分布。从中可知, 对于单体鱼礁而言, 由于水流的抬升作用, 鱼礁前方形成了垂向流速较大的区域, 即为上升流区域; 而在礁体的背流面, 钝体绕流影响以及孔状透水结构形成了流速较小的背涡流区域。对比可知, 不同来流速度下礁体周围的流场结构基本相似, 流动受到礁体影响流速减小, 在礁体前部抬升并形成绕流, 在礁体两侧流速增加, 礁体内部交叉隔板及孔洞结构使下游流速减小并形成尾流区。图6、图7分别为不同流速条件下鱼礁上升流体积和背涡流体积随时间变化情况, 由图可知, 3种流速下礁体的上升流体积和背涡流体积发展趋势基本类似。流动初期上升流体积的曲线呈现剧烈振荡, 表明流场处于不稳定状态, 随着时间增加逐渐趋于稳定, 曲线保持平缓; 对于背涡流体积曲线, 在流动初期, 曲线呈现近线性增长的趋势, 背涡流体积不

表1 礁体阻力对比结果

Tab. 1 Comparison result of reef resistance

实验流速/(m/s) current velocity	物理实验 ^[11] /N physical experiment	数值实验 ^[16] /N numerical experiment	本研究结果/N results of this study	与物理实验误差/% physical experiment error	与数值实验误差/% numerical experiment error
0.052	0.056	0.063	0.053	-5.187	-7.936
0.078	0.118	0.126	0.125	5.932	-0.793
0.103	0.215	0.235	0.226	5.116	3.829
0.129	0.319	0.322	0.337	5.477	4.658
0.155	0.445	0.460	0.489	9.887	6.304
0.207	0.757	0.798	0.820	8.322	2.756
0.258	1.196	1.288	1.315	9.903	2.872
0.31	1.752	1.810	1.860	6.164	2.762

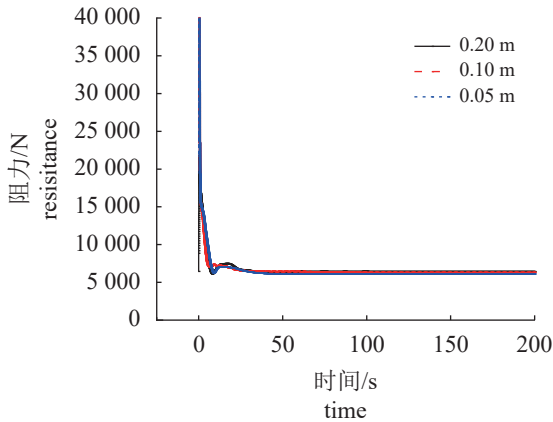


图 4 不同网格尺寸模拟结果

Fig. 4 Simulated results with different grid sizes

表 2 不同时间步长模拟结果

Tab. 2 Simulation results at different time steps

时间步长/s time step	阻力系数 resistance coefficient	误差分析 error analysis
0.01	1.407	0.060
0.005	1.333	0.004
0.002	1.328	0.000
0.001	1.328	-

断增大, 最终趋于平缓, 表明流场逐渐稳定。结合以上分析, 本研究基于计算稳定后的流场数据, 得到上升流体积 V_x 和背涡流体积 V_y (图 8)。比较 3 种不同来流速度下的流场规模, 上升流体积和背涡流体积均无较大差距, 表明随来流速度的增大, 鱼礁的流场规模并无明显增加。

不同迎流角度对鱼礁流场效应的影响 基于上升流和背涡流定义, 利用速度等值面显示方法可直接刻画其区域范围及体积大小。如图 9 和图 10 所示为不同来流速度条件下, 立方对角面开孔鱼礁在 4 种迎流角度下的上升流区域和背涡流区域显示。可见, 随迎流角度增加, 上升流“拖尾”区域明显增加, 而背涡流形态无明显改变, 结合图 11 上升流体积和背涡流体积数据分析可知, 在相同迎流角度下, 流速变化对上升流及背涡流体积影响不大, 但随着迎流角度变化, 上升流及背涡流体积变化明显, 上升流体积和背涡流体积随迎流角度的增加而显著增大。

3.2 礁体物理稳定性分析

人工鱼礁投放后具有良好的稳定性有助于鱼礁得到较好的生态效益和流场效应, 其稳定性会直接影响礁体功能的发挥, 为保证人工鱼礁建设

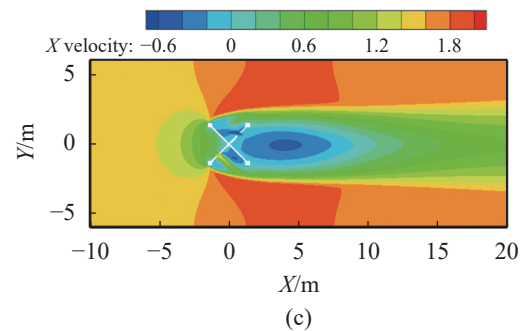
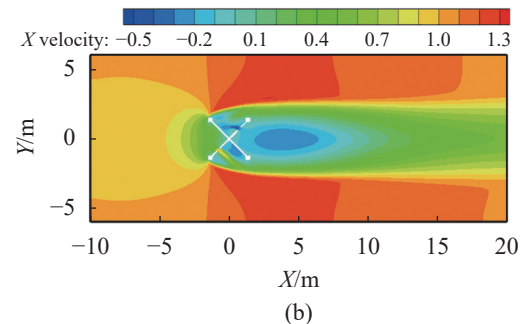
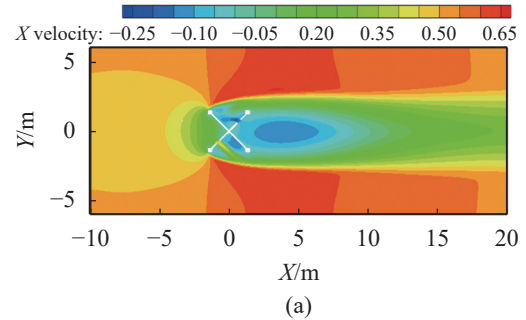


图 5 迎流角度为 0° , $Z=1.5$ m 高度横向断面上的速度分布

Fig. 5 Upstream angle is 0° , the velocity distribution on transverse section $Z=1.5$ m

(a) $v=0.5$ m/s, (b) $v=1.0$ m/s, (c) $v=1.5$ m/s, the same below.

能够取得预期效果, 有必要研究礁体在水流作用下的阻力和力矩。人工鱼礁投入海底后, 会受到海流的冲击和侵扰, 主要考虑礁体沿水流流动方向受到的阻力和使礁体发生转动的倾覆力矩。因此在对鱼礁进行数值模拟时, 同时对鱼礁的阻力和倾覆力矩进行了监测。如图 12 所示鱼礁所受的作用力变化趋势基本相同, 当来流速度逐渐增大时, 阻力和倾覆力矩随之增大; 当礁体迎流角度增大时, 阻力和倾覆力矩也逐渐增大。

4 讨论

4.1 流速及迎流角度对鱼礁流场效应的影响

人工鱼礁的流场效应是人工鱼礁发挥生态效

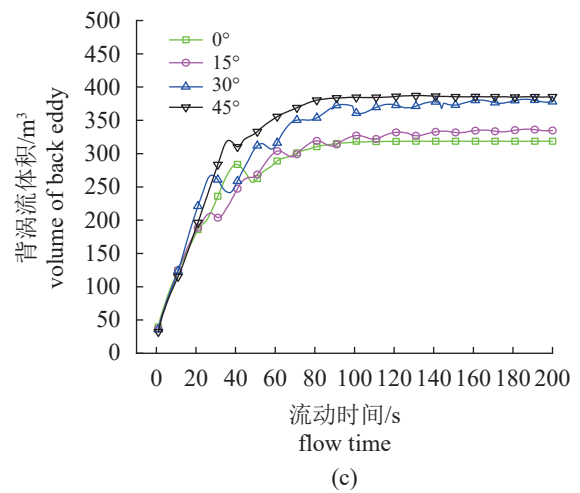
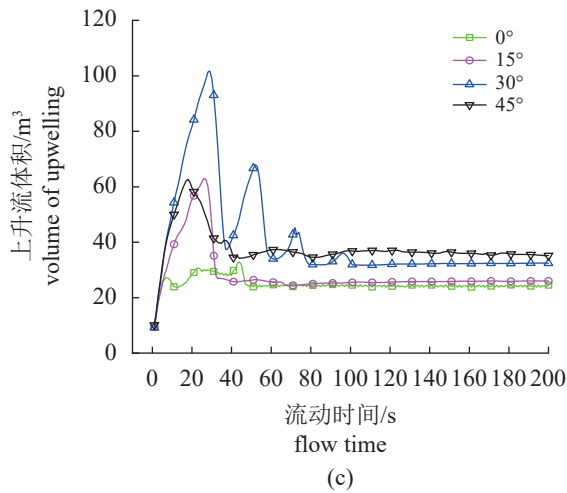
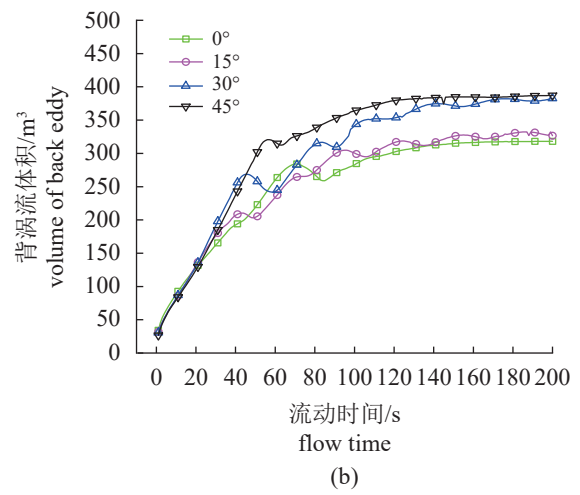
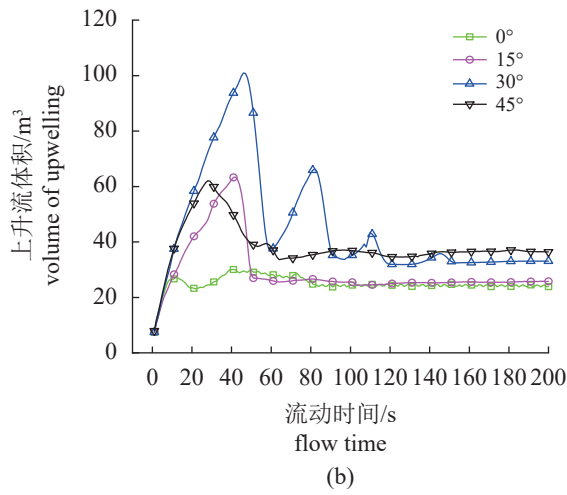
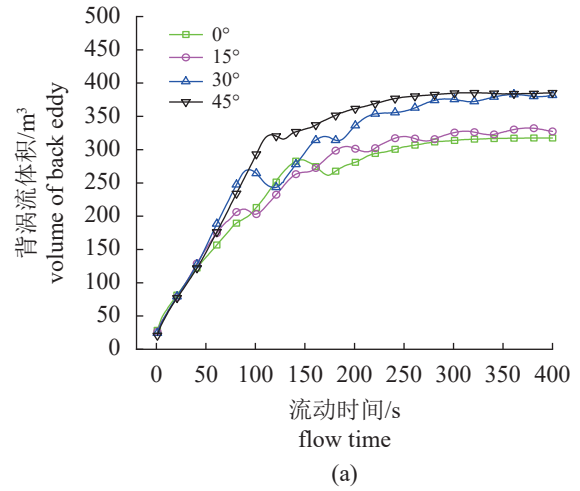
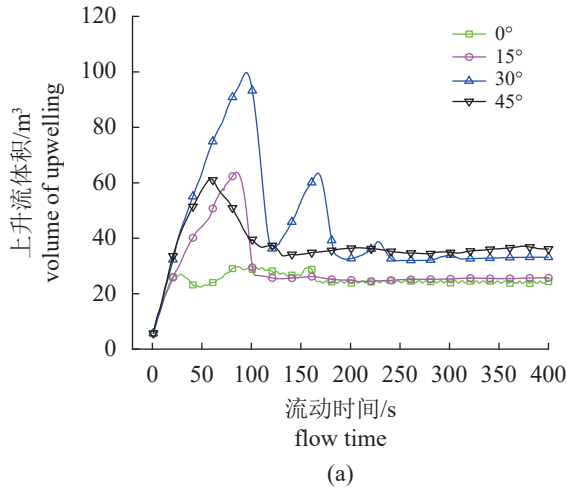


图 6 不同流速下, 鱼礁上升流体积变化

Fig. 6 Variation of upwelling volume with different velocities

图 7 不同流速下, 鱼礁背涡流体积变化

Fig. 7 Variation of upwelling volume with different velocities

益、生境营造的重要手段之一, 是评价人工鱼礁性能的主要因素, 人工鱼礁所形成的上升流和背涡流, 促进了水体之间的交换, 使底层营养物质

上涌, 吸引鱼类聚集, 从而达到提高渔获量、增殖渔业资源的目的。鱼礁投放的不同海域、摆放角度影响鱼礁建设的作用效果, 合理选择投放海

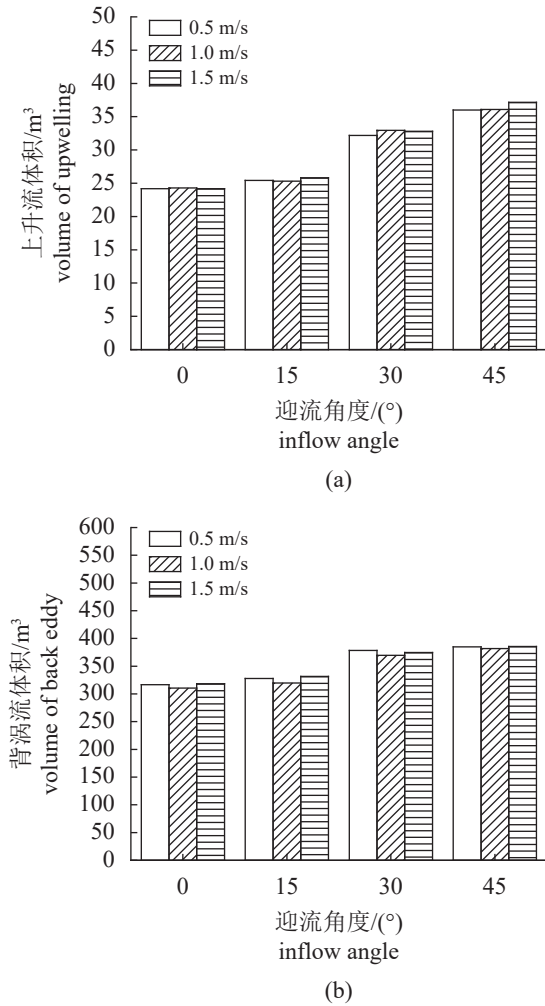


图 8 不同流速、不同迎流角度下, 鱼礁流场规模上升流体积 (a) 及背涡流体积 (b) 对比

Fig. 8 Comparison of upwelling (a) and back eddy volume (b) at different flow velocities and inflow angles

域、设置迎流角度对人工鱼礁的优化起到重要作用。本研究对一种立方对角面开孔形式的鱼礁进行了 12 组数值实验, 对其产生的流场效应进行分析, 得到不同流速和不同迎流角度下人工鱼礁的流场特征规律。根据流速和迎流角度与流场效应间的相互联系, 提出以流场效应体积优先为目标的综合评价方法。当鱼礁的迎流角度相同时, 随着流速的增加, 上升流体积和背涡流体积没有明显增大, 说明鱼礁在潮流速度大的海域和潮流速度小的海域均可产生相对稳定的流场效应, 流场规模与来流速度相关性不大, 这一研究结果与唐衍力等^[1]、黄远东等^[18]和兰孝政等^[19]研究结果相一致。但对于单体鱼礁, 改变迎流角度却能导致礁体周围的流场效应有较大变化。对比不同迎流角度下流场可知, 在迎流角度为 30°~45°时立方对

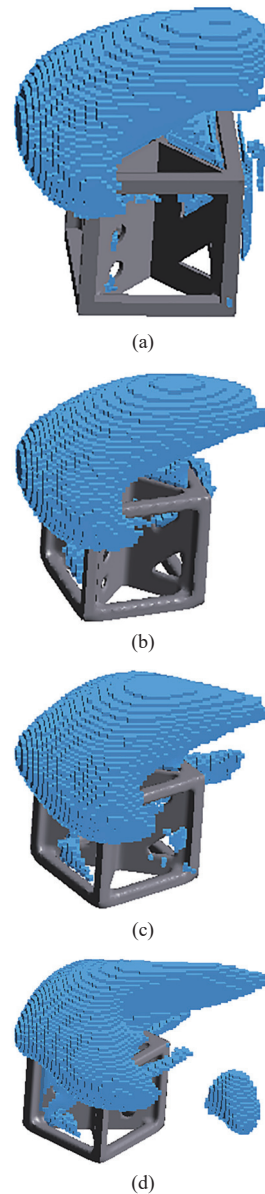


图 9 流速为 1.0 m/s 时, 不同迎流角度下鱼礁上升流体积

Fig. 9 Upwelling volume of the reef at different inflow angles with velocity 1.0 m/s

(a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=15^\circ$, (c) $\alpha=30^\circ$, (d) $\alpha=45^\circ$, the same below.

角面孔鱼礁的流场效应较好, 礁体为 45°迎流时上升流体积和背涡流体积都达到最大, 分析可知此时礁体内部导流板与来流方向垂直, 鱼礁受到的作用力更大, 水体向上抬升作用更强, 受导流板的阻隔作用, 透水率降低, 礁体背后形成更大的背涡区。公丕海等^[20]计算结果也显示在相同来流速度下, 塔型衍架鱼礁 45°摆放的缓流区面积大于 90°迎流。以流场规模为评价基准, 在实际投放中应重点关注潮流流向, 将礁体布设为 45°迎流,

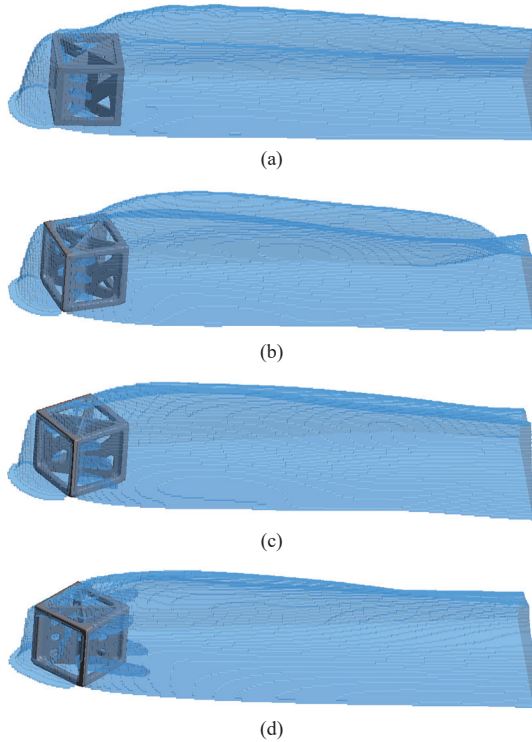


图 10 流速为 1.0 m/s 时, 不同迎流角度下鱼礁背涡流体积

Fig. 10 Back eddy volume of the reef at different inflow angles with velocity 1.0 m/s

可以形成较大体积的上升流区和背涡流区域。

4.2 人工鱼礁建设效果的综合评价

当人工鱼礁投入海中时, 礁体产生流场效应的同时还受到的流体阻力作用而发生平动及转动, 因此在保证鱼礁能够产生流场效应的前提下, 还应确保鱼礁能正常发挥作用, 即礁体在水流的作用下不发生推移和倾覆。基于此, 将上升流体积、背涡流体积、礁体阻力和倾覆力矩作为综合评价交叉型鱼礁建设效果评价的指标, 各指标权重赋值采取主观赋值方法, 其中主观权重赋值采取专家打分的形式, 即德尔菲法^[21]。专家打分主要是通过专家问卷, 专家判断各项因子对鱼礁建设生态效果的影响程度来打分。影响不显著贡献 1 分, 影响较低贡献 2 分, 影响一般贡献 3 分, 影响较高贡献 4 分, 主要影响因素贡献 5 分。最后用每一项因子得分和比上所有因子总分之和, 就能得到每一项因子的主观权重 w_i 。依据专家打分结果各项指标赋予权重如表 3 所示, 由表 3 可知上升流体积的权重值为 0.35, 背涡流体积的权重值为 0.35, 阻力的权重值为 0.15, 倾覆力矩的权重值为 0.15。

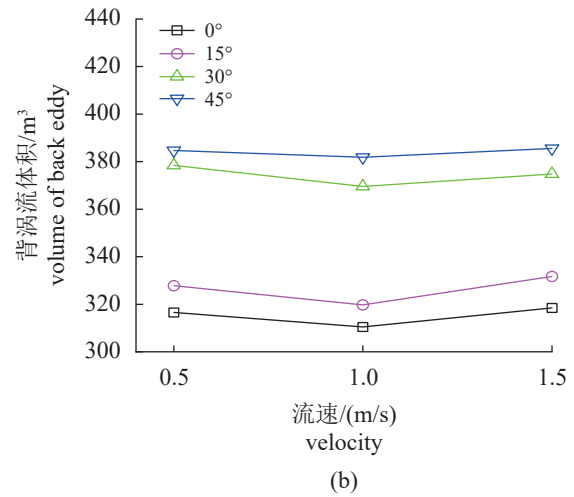
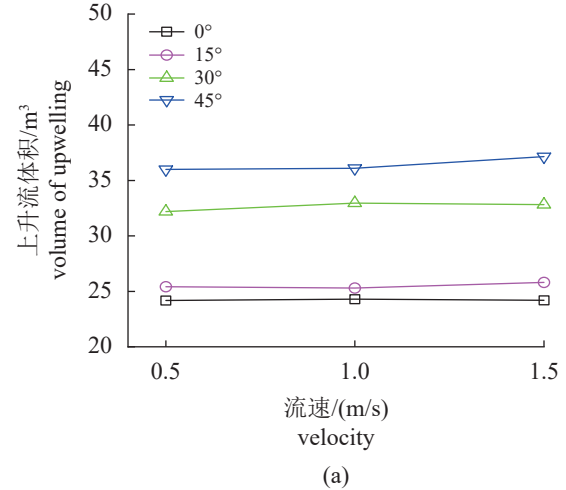


图 11 迎流角度变化时, 鱼礁的上升流体积 (a) 及背涡流体积 (b)

Fig. 11 Upwelling volume (a) and back eddy volume (b) of the reef under the change of the angle of attack

在确定权重值 w_1, w_2, w_3, w_4 的基础上, 计算鱼礁综合评价值的公式:

$$F = \frac{A_{i1}}{A_{1\max}} w_1 + \frac{A_{i2}}{A_{2\max}} w_2 + \frac{\frac{1}{A_{i3}}}{\frac{1}{A_{3\min}}} w_3 + \frac{\frac{1}{A_{i4}}}{\frac{1}{A_{4\min}}} w_4 \quad (i = 1 \dots 12)$$

式中, F 为综合评价值。

通过上述方法得到的在不同流速和迎流角度下的综合评价值如表 2 所示, 综合评价值的范围在 (0,1) 区间内, 越接近于 1 说明该模式下的鱼礁越能达到理想的建设效果。从表 4 可以看出, 来

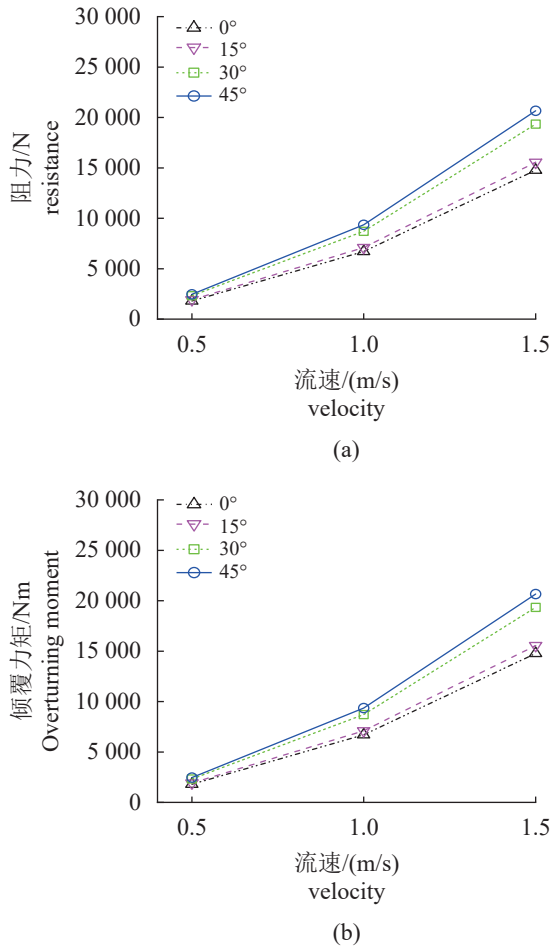


图 12 不同迎流角度下礁体阻力 (a) 和倾覆力矩 (b) 随流速变化

Fig. 12 Variation of resistance (a) and overturning moment (b) acting on the reef under different inflow angles

流速度对鱼礁的建设产生重要影响。当流速为 0.5 m/s 时, 综合评价值接近于 1; 流速为 1.0 m/s 时的综合评价值整体大于流速为 1.5 m/s 时的综合评价值, 即投放人工鱼礁时宜选取流速不超过 1.0 m/s 的海域, 流速较小时鱼礁的稳定性较好, 且能形成较优的流场规模, 这与刘心媚等^[22]的研究结果相一致。鱼礁投放的迎流角度是影响鱼礁建设效果的关键因素, 在 3 种不同的流速下, 迎流角度为 45° 时, 其综合评价值为最大, 30° 迎流角的评价值接近于 45°, 即投放人工鱼礁时宜将迎流角度控制在 30°~45° 之间。在实际投放时, 不考虑海底底质淤积、风浪等条件下, 仅对鱼礁流场效应及礁体稳定性而言, 投放人工鱼礁时宜选取最大流速不超过 1.0 m/s 的海域, 且迎流角在 30° 至 45° 范围内投放, 鱼礁的建设效果最佳。

5 结论

本研究利用 Fluent 软件 $k-\epsilon$, 基于舟山海域水文条件, 对 3 种不同来流速度和 4 种迎流角度下立方对角面开孔人工鱼礁体绕流流场进行了数值模拟, 分析了礁体绕流流场特性, 并利用上升流体积、背涡流体积、拖曳力和倾覆力矩等指标对人工鱼礁流场效应及礁体稳定性进行了综合评价。研究表明, ①在来流速度变化的情况下, 人工鱼礁体流场规模并无明显差异, 4 种流速条件下上升流及背涡流体积大小相近, 来流速度对鱼礁流场效应无显著影响; ②人工鱼礁的流场规模随迎流角度增加而增大, 其中迎流角为 45° 时, 背

表 3 鱼礁建设效果评价各指标权重赋值

Tab. 3 Weight value of each index for evaluation of reef construction effect

评价指标 evaluation index	上升流体积 volume of upwelling w_1	背涡流体积 volume of wake vortex w_2	阻力 resistance w_3	倾覆力矩 overturning moment w_4
权重值 weights (w_i)	0.35	0.35	0.15	0.15

表 4 鱼礁建设效果综合评价值

Tab. 4 Comprehensive evaluation value of reef construction effect

流速/(m/s) velocity	迎流角度/(°) angle of attack	上升流体积/m ³ volume of upwelling	背涡流体积/m ³ volume of wake vortex	阻力/N resistance	倾覆力矩/Nm overturning moment	综合评价值 comprehensive evaluation value
0.5	0	24.18	316.58	1 793.37	2 759.39	0.82
	15	25.54	327.84	1 910.62	2 774.28	0.83
	30	32.95	378.41	2 325.40	3 271.21	0.90
	45	35.99	384.70	2 453.57	3 494.07	0.93
1.0	0	24.30	310.46	6 708.05	10 271.43	0.60
	15	25.29	319.71	7 101.58	10 291.36	0.61
	30	33.81	369.52	8 705.42	12 170.81	0.73
	45	36.08	381.86	9 351.52	13 122.55	0.76

· 续表 4 ·

流速/(m/s) velocity	迎流角度/(°) angle of attack	上升流体积/m ³ volume of upwelling	背涡流体积/m ³ volume of wake vortex	阻力/N resistance	倾覆力矩/Nm overturning moment	综合评价 comprehensive evaluation value
1.5	0	24.19	318.44	14 778.81	22 589.20	0.56
	15	25.81	331.68	15 558.80	22 542.10	0.59
	30	32.19	374.75	19 333.58	27 119.46	0.68
	45	36.15	385.55	20 669.61	28 873.21	0.73

涡流和上升流体积值达到最大, 流场效应最佳; ③随来流速度增大, 水流对鱼礁的冲击力增强, 鱼礁体受到阻力值和倾覆力矩相应增大; 随鱼礁迎流角度增加, 礁体所受的阻力和力矩也随之增大, 二者呈正相关; ④综合考虑流场规模效应及礁体稳定性, 在不考虑海底底质淤积、风浪等条件下, 投放人工鱼礁时宜选取最大流速不超过 1.0 m/s 的海域, 且迎流角为 30°~45°, 鱼礁的建设效果最佳, 但在实际工程中需综合考虑目标海域的实际自然条件, 做出最后的判断。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 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.
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).
- [2] Granneman J E, Steele M A. Effects of reef attributes on fish assemblage similarity between artificial and natural reefs[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, 72(8): 2385-2397.
- [3] 张硕, 孙满昌, 陈勇. 不同高度混凝土模型礁上升流特性的定量研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(5): 353-358.
Zhang S, Sun M C, Chen Y. Quantitative analysis of upwelling current features of a artificial concrete reef with different height[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(5): 353-358 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 张世东. 六边形开口方形人工鱼礁水动力性能数值模拟与模型试验研究[D]. 上海海洋大学, 2020.
Zhang S D. Numerical simulation and model test study on hydraulic performance of square artificial reef with hexagon opening[D]. Shanghai Ocean University, 2020 (in Chinese).
- [7] 许柳雄, 刘健, 张硕, 等. 回字型人工鱼礁礁体设计及其稳定性计算[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(12): 79-83+94.
Xu L X, Liu J, Zhang S, *et al.* Research on the design and stability calculation of the artificial hui style reef[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(12): 79-83+94 (in Chinese).
- [8] 关长涛, 李梦杰, 郑延璇, 等. 三圆管型人工鱼礁布设间距的数值模拟及物理稳定性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(9): 9-17.
Guan C T, Li M J, Zheng Y X, *et al.* Numerical simulation of disposal space and analysis on physical stability of three-tube artificial reefs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(9): 9-17 (in Chinese).
- [9] 唐衍力, 王磊, 梁振林, 等. 方型人工鱼礁水动力性能试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 713-716.
Tang Y L, Wang L, Liang Z L, *et al.* Test of the hydrodynamic performance of square artificial reefs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(5): 713-716 (in Chinese).
- [10] 叶功照, 王莹, 陈舜, 等. 南麂列岛海域两种框型人工鱼礁水动力性能试验[J]. 渔业现代化, 2021, 48(1): 25-30.
Ye G Z, Wang Y, Chen S, *et al.* Hydrodynamic performance test of two frame type artificial reefs in Nanyang Islands area[J]. Modern Fisheries, 2021, 48(1): 25-30 (in Chinese).

32.
Ye G Z, Wang Y, Chen S, *et al.* Experimental study on hydrodynamic performance of two frame-type artificial reefs in Nanji Islands waters[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(1): 25-32 (in Chinese).
- [11] 张硕, 张世东, 初文华, 等. 六边形开口方形人工鱼礁水动力性能模型实验[J]. *水产学报*, 2020, 44(11): 1903-1912.
Zhang S, Zhang S D, Chu W H, *et al.* Model experiment of hydrodynamic performance of square artificial reefs with hexagonal openings[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(11): 1903-1912 (in Chinese).
- [12] 庞运禧. 人工鱼礁流场效应数值模拟研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2017.
Pang Y X. Study on numerical simulation of flow field effect of artificial fish reef [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2017 (in Chinese).
- [13] 李东, 侯西勇, 唐诚, 等. 人工鱼礁研究现状及未来展望[J]. *海洋科学*, 2019, 43(4): 81-87.
Li D, Hou X Y, Tang C, *et al.* A review on the progress of artificial reef research[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(4): 81-87 (in Chinese).
- [14] 虞聪达. 舟山渔场人工鱼礁投放海域生态环境前期评估[J]. *水产学报*, 2004, 28(3): 316-322.
Yu C D. Previous assessment of ecological environment in the Zhoushan Fishing Ground being put the artificial reef into[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(3): 316-322 (in Chinese).
- [15] 许强. 海洋牧场选址问题的研究——以舟山市为例 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
Xu Q. Study of site selection of marine ranching—take Zhoushan Islands as an example[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012 (in Chinese).
- [16] 张硕, 张世东, 胡夫祥, 等. 六边形开口方形人工鱼礁阻力系数数值模拟与模型试验比较研究[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(11): 1350-1359.
Zhang S, Zhang S D, Hu F X, *et al.* Comparison of a numerical simulation and a test model of a hexagonal and square opening artificial reef[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(11): 1350-1359 (in Chinese).
- [17] 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).
- [18] 黄远东, 付登枫, 何文荣. 人工鱼礁开口比对流场效应影响的三维数值模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(4): 39-43.
Huang Y D, Fu D F, He W R. Three-dimensional numerical simulation on influence of cut-opening ratio of artificial reef on flow effect[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(4): 39-43 (in Chinese).
- [19] 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[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(8): 47-53.
Lan X Z, Wan R, Tang Y L, *et al.* Numerical simulation of the flow field around the truncated-cone shaped artificial reef[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(8): 47-53 (in Chinese).
- [20] 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.
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).
- [21] 符小明. 人工鱼礁修复海洋生态系统的效果评价——以海州湾为例 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Fu X M. Evaluate the effectiveness of marine ecological rehabilitation using artificial reef—a case study of Haizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [22] 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[J]. *大连海洋大学学报*, 2019, 34(1): 133-138.
Liu X M, Zheng Y N, Chen C P, *et al.* Numerical simulation of flow around frame and caisson artificial reef models[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2019, 34(1): 133-138 (in Chinese).

Numerical simulation of flow field effect of cube-diagonal hole-opening artificial reefs

XUE Dawen, PANG Congli, PAN Yun*

(School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Due to the constraints of land resources and environment and the continuous progress of science and technology, human beings have entered an era of deep exploitation of marine resources and utilization of marine space. With the depletion of offshore fishery resources and the aggravation of marine pollution, the construction of marine ranching has become an important measure to improve marine ecological environment and repair fishery resources. Among them, artificial reefs are the infrastructure of modern marine ranching, and ensuring the normal utility of artificial reefs is the key link of marine ranching construction. In order to study the influence of the upstream inflow angle on artificial reefs at different velocities, in this paper, based on Ansys-Fluent, the RNG k- ϵ turbulence model is used to conduct numerical flume simulation. The hydrodynamic characteristics of a 3 m cube-diagonal open-hole fish reef under three incoming velocities (0.5, 1.0 and 1.5 m/s) and four attack of angles (0°, 15°, 30° and 45°) were compared and analyzed, including upwelling volume, back eddy volume, resistance and overturning moment. Studies have shown that there are upwelling and back eddy areas with significant characteristics in and around the artificial reef. The scale of the flow field is basically not affected by the flow velocity, while flow velocity is the main factor affecting the stability of cube-diagonal hole-opening reef. The greater the flow velocity, the greater the resistance and overturning moment acting on the reef, and the worse the stability of the reef. The flow field effect of artificial reefs is mainly influenced by the inflow angle. The flow field effect scale of the artificial reefs reaches the optimum when the inflow angle is 30°-45°, and the upwelling volume and back eddy volume reach the maximum when the reef is 45°. The weight assignment method is used to introduce a comprehensive evaluation model for the construction effect of artificial reefs. Through comprehensive evaluation and analysis, the sea area with the maximum flow velocity not exceeding 1 m/s should be selected when placing artificial reefs without considering the conditions of seabed sedimentation, wind and waves, etc. Moreover, the construction effect of the reef is the best when the inflow angle is within the range of 30° to 45°, which can provide a certain theoretical basis for the artificial reef deployments in practical engineering.

Key words: artificial reefs; marine ranching; flow field effect; numerical simulation; stability; angle of attack

Corresponding author: PAN Yun. E-mail: panyunhk@zjou.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (52101330); Zhejiang Operating expenses of basic scientific research project (2022J004); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LQ18E090007, LQ19E090007); Zhejiang University Student New Seedling Project (2020R411053)