

双层十字翼型人工鱼礁流场效应的数值模拟

方继红, 林军, 杨伟, 温英, 戚福清

Numerical simulation of flow field effect around the double-layer cross-wing artificial reef

FANG Jihong, LIN Jun, YANG Wei, WEN Ying, QI Fuqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200503067>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Numerical Simulation Study on Influence of Disposal Space on Effects of Flow Field Around Porous Square Artificial Reefs
渔业科学进展. 2020, 41(3): 40 <https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20190314004>

框架型与沉箱型人工鱼礁绕流特性的数值模拟

Numerical simulation of flow around frame and caisson artificial reef models
大连海洋大学学报. 2019, 34(1): 133 <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019.01.019>

基于单位鱼礁规模的米字型人工鱼礁流场效应定量研究

Quantitative study on the flow field effect of Mi-zi artificial reefs based on unit reef scale
中国水产科学. 2020, 27(5): 559 <https://doi.org/10.3724/SP.J.1118.2020.19251>

基于流场数值仿真的人工鱼礁组合优化研究

Optimization study of artificial reef assemblage based on the numerical simulation of flow field
水产学报. 2013, 37(7): 1023 <https://doi.org/10.3724/SP.J.1231.2013.38362>

塔型桁架人工鱼礁流场效应及稳定性

Flow field effect and stability of the equilateral tower-type truss artificial reef
中国水产科学. 2019, 26(5): 1021 <https://doi.org/10.3724/SP.J.1118.2019.17259>

方形人工鱼礁单体流场效应的PIV试验研究

PIV experiment of artificial monomer reefs on the flowing field
大连海洋大学学报. 2014, 29(1): 82 <https://doi.org/10.3969/J.ISSN.2095-1388.2014.01.017>

文章编号: 1674-5566(2021)04-0743-12

DOI:10.12024/jsou.20200503067

双层十字翼型人工鱼礁流场效应的数值模拟

方继红, 林 军, 杨 伟, 温 英, 戚福清

(上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘 要: 基于 ANSYS Fluent 平台, 采用湍流模型中的大涡模拟方法 (large eddy simulation, LES) 对双层十字翼型人工鱼礁 4 种子礁的流场效应进行数值模拟, 采用比混凝土体积法分析其背涡流体积、上升流体积、向上水体输运通量等流场效应数据, 得到双层十字翼型鱼礁的最优礁体构造, 以期为人工鱼礁的设计和选型提供科学依据。结果表明: 双层十字翼型鱼礁加顶板对流场效应并无增益, 上升流和背涡流相对体积变小; 侧板结构对礁体的上升流和背涡流效应有明显的增益, 上升流和背涡流相对体积逐渐变大, 全侧板 D 型礁体的上升流和背涡流效应最强, 上升流相对体积可达无侧板 B 型礁体的 13.50 ~ 25.48 倍, 背涡流相对体积达 1.40 ~ 1.61 倍; 向上水体输运通量约在一倍礁高处达到最大值, 约在两倍礁高处降为最大值的 1/2。迎流角度的改变, 对 D 型礁体流场效应的影响无显著差异, 表明 D 型礁体对自然海域的潮流流向有很好的适应性。

关键词: 人工鱼礁; 数值模拟; 比混凝土体积法; 上升流和背涡流; 向上水体输运通量

中图分类号: S 953.1 **文献标志码:** A

海洋牧场已成为一种新的可持续的现代海洋渔业生产方式^[1-3]。人工鱼礁建设则是海洋牧场建设过程中采用的一种技术手段, 通过人为向海底投放构造物, 为海洋生物繁殖、觅食、生长等提供庇护场所, 从而达到改善海域生态环境、增加海洋渔业资源的目的。人工鱼礁增殖和聚集渔业资源的原理主要是通过生态效应和流场效应来实现的^[4-5]。人工鱼礁的流场效应是评价人工鱼礁性能的主要因素, 对于人工鱼礁的建设规模和建成后的效果评价都具有指导意义^[6]。

目前, 关于人工鱼礁流场效应, 国内外学者已经做了许多研究工作。人工鱼礁周围流场具有明显的非稳态特性。人们最初使用水槽实验研究人工鱼礁的流场效应^[7-8], 随着计算机技术的发展, 数值模拟得到广泛的应用。许多研究也对数值模拟结果进行了验证, 结果均证明了数值模拟能够准确地反映人工鱼礁周围的流场分布^[9-12]。人工鱼礁的流场效应受多种因素影响, 单礁礁体构造和开口比^[13-15]、多礁组合方式及布放间距^[16-18]等。人工鱼礁的结构设计对人工鱼

礁单体的流场效应具有显著影响, 通过对礁体构造的优化, 可有效提升人工鱼礁的流场效应。

新型十字翼型人工鱼礁是一种稳定性好、透水性大、有效空方体积大、适用于近岸海域的人工鱼礁礁体。本文以一组结构不同的双层十字翼型人工鱼礁为研究对象, 利用 ANSYS Fluent 为流场分析软件, 湍流计算采用大涡模拟湍流模型 (large eddy simulation, LES), 对不同规格的双层十字翼型人工鱼礁周围流场进行模拟计算, 分析其流场分布特性, 以期为人工鱼礁的设计和选型提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 湍流模型

湍流计算选用大涡模拟法 (LES), 大涡模拟是通过分别处理大尺度涡和小尺度涡来进行模拟分析, 用非稳态的 Navier-Stokes 方程直接模拟湍流中的大尺度涡, 对小尺度涡不直接模拟而是通过近似的模型来考虑其对大尺度涡的影响。

收稿日期: 2020-05-27 修回日期: 2020-08-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901302)

作者简介: 方继红 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋水动力学。E-mail: 1099590812@qq.com

通信作者: 林 军, E-mail: jlin@shou.edu.cn

1.2 数值模拟模型

采用双层十字翼型鱼礁的4个子礁型(图1)进行数值模拟,双层十字翼型鱼礁的主体包括1个立方中心体(2 m×2 m×4 m)和向两侧延展构成的4个翼部(2 m×1.5 m×4 m)构成,鱼礁单体边长 L 为5 m,高4 m。其子礁型是在上述主体添

加顶板、底板和侧板,以其构造分为底板十字礁(A型),顶板十字礁(B型),半侧板十字礁(C型),全侧板十字礁(D型)。鱼礁主体的框架宽0.25 m,其子礁型添加的顶板、底板和侧板的厚度为0.125 m。4种鱼礁的空方体积为 64 m^3 ,混凝土体积分别为 7.13 、 8.34 、 9.56 和 10.58 m^3 。

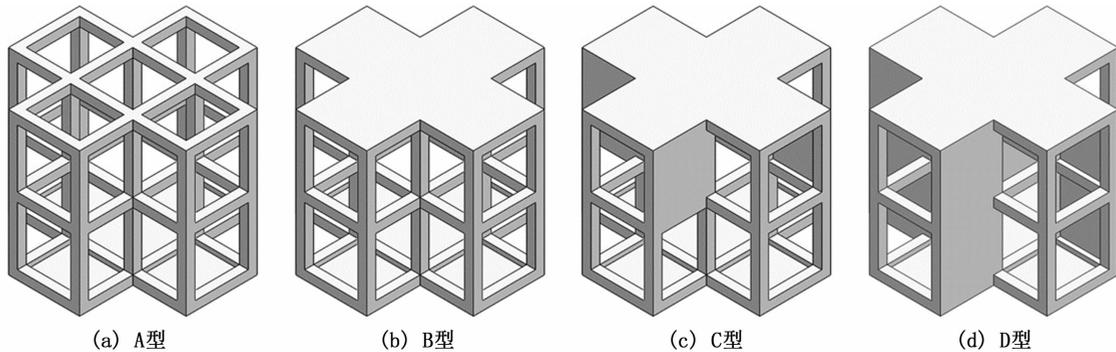


图1 双层十字翼型礁体的4种子礁(等轴测图)
Fig. 1 Four double-layer cross-wing reef (Isometric)

1.3 计算域、边界条件及网格划分

计算域长度为40倍礁长,宽为6倍礁长,高为4倍礁长,即 $200\text{ m} \times 30\text{ m} \times 20\text{ m}$ (图2),其中,礁体前为6倍礁长,鱼礁单体中心距两侧均为3倍礁长,礁体底部与计算域底部重合。首先,假设海底是水平的,不会被冲刷,不考虑其他海洋生物的存在;其次,假设海水初始流速和流向保持恒定;最后,假定礁体保持稳定,不会发生

滚动和滑移。

计算域入口边界采用速度进口条件,考虑到实际投放人工鱼礁海域的平均流速条件,选取流速为 0.5 m/s 进行模拟;出口边界设为速度出口条件,速度为 -0.5 m/s ;计算域底面和礁体表面采用无滑移壁面边界条件,计算域两侧面和顶面采用对称边界条件。

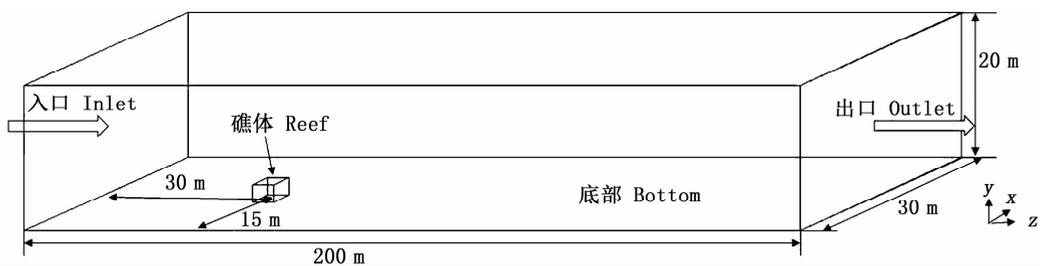


图2 计算域
Fig. 2 Computational domain

使用 ANSYS Workbench Mesh 模块进行网格划分,网格均采用四面体非结构化网格,为提高计算精度,以鱼礁底部中心为球心,向周围呈半球体扩散,网格尺寸逐渐变大(图3),鱼礁周围最

小的网格精度为 0.125 m ,即框架柱体宽度的 $1/2$ 。最终划分的网格总数量介于 $4.75 \times 10^6 \sim 4.77 \times 10^6$ 。

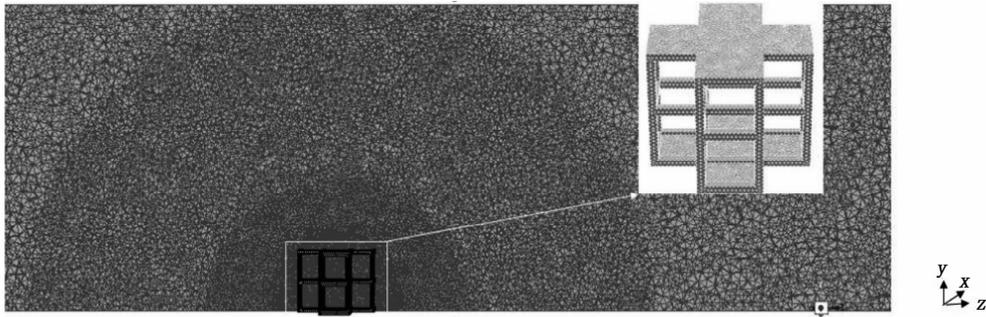


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation

1.4 流场效应评价指标和计算方法

人工鱼礁的流场效率评价主要是通过对上升流和背涡流规模的衡量。本研究中,来流方向沿 z 轴方向, y 轴为竖直方向, $x = 15\text{ m}$ 为中垂面,将 y 轴垂直向上分速度与来流速度之比大于0.10倍(V_{u10})、大于0.15倍(V_{u15})、大于0.20倍(V_{u20})的空间体积作为上升流规模的度量指标,将 z 轴方向的流速与来流速度之比小于0.70倍(V_{w70})、小于0.75倍(V_{w75})、小于0.80倍(V_{w80})的空间体积作为背涡流规模的度量指标。唐衍力等^[19]在关于国内常用人工鱼礁流场效应的比较分析中发现,相同礁高条件下,混凝土条件的差异会对实验结果产生较大影响,认为比混凝土体积法能更科学、准确的评价礁体上升流效应和背涡流效应。本文使用上升流和背涡流体积比混凝土体积得到上升流和背涡流相对体积来评价上升流和背涡流效应。

以“向上水体输运通量”为指标测算上升流的动力效应:

$$V_{\text{up},k} = \sum_{i=1,m}^{j=1,n} S_{i,j} w_{i,j} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{up},k}$ 为垂向第 k 层的向上水体输运通量;因采用的是四面体网格,故求垂向某水平高度上的参数时需采用三维插值法得到,使用 Matlab 软件中的三维插值函数将每个平面分为 $m \times n$ 个水平网格,设分辨率与礁体立柱宽度相同(0.25 m)。根据上式计算判定垂向流速为正的网格,对该高度的向上水体输运通量进行平面积分; $S_{i,j}$ 为网格面积, $w_{i,j}$ 为该网格的垂向流速。本文中垂向 y 轴方向 $y = 1\text{ m}$ 向上每1 m划分一层,统计每层中垂向分速度大于零的面积及其平均分

速度,由此计算向上水体输运通量,用以评价礁体对高营养盐浓度的底层水的向上输送以及促进垂向水体混合的能力。

目前,关于选取数值模拟计算数据并没有一个统一的标准,许多研究也没有明确描述其数据的选取范围。本文选取实验中 0° 迎流时4种礁体的流场数据来进行分析,每1秒保存1个数据,做出上升流(V_{u15})和背涡流(V_{w75})体积随时间变化曲线图(图4)。由图4可看出,300 s后4种礁体的上升流体积基本稳定,没有太大的波动,4种礁体的背涡流体积在350 s后能保持基本稳定。因此本文数据的选取均是在400 s以后连续50 s的数据,导入 CFD-Post 后进行处理,求取平均值和标准差等,并进行分析比较。

2 结果

2.1 流态分析

随着潮涨潮落,海水流经过鱼礁时,流速流向均发生变化。在礁体迎流面及礁体两侧流速增大生成上升流,在礁体内部及后方流速减缓形成背涡流区。其上升流区域集中在礁体内部、上方及后方,背涡流主要集中在礁体后方,流速明显低于来流速度,部分流速极低接近于0(图5)。礁体两侧均存在侧向流,越靠近礁体流速越小,礁后的缓流区宽度逐渐变宽,流态也逐渐复杂(图6)。A、B型礁体形成的流场因礁体内部结构简单而流态相对简单,背涡流缓流区较小,且小流速区域不大;而C、D型礁体流场由于侧板的增加,阻挡了礁体内部水流经过,在礁体两侧形成较大的侧向流,礁后存在明显的涡流,形成流速极小的缓流区,且流态更加复杂。

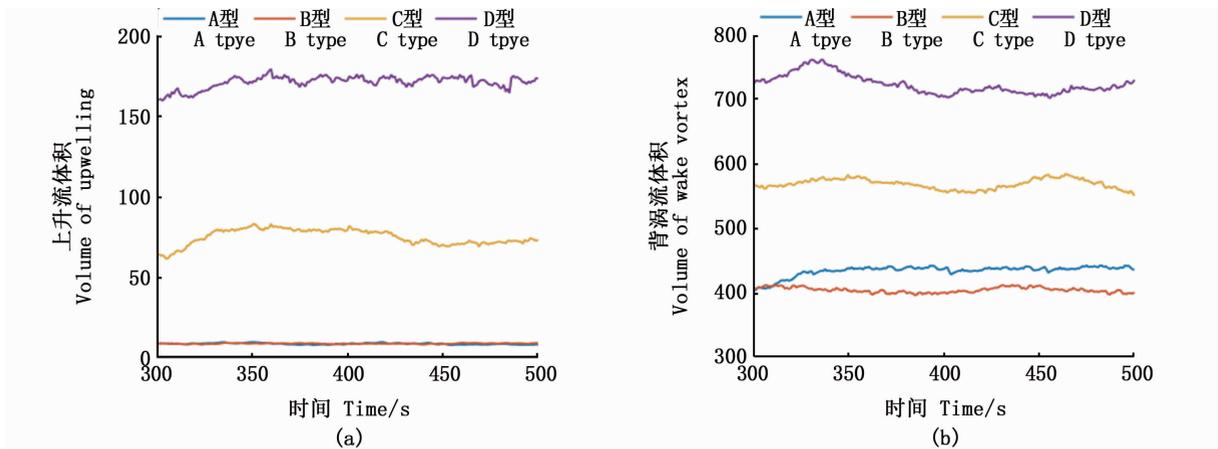


图 4 迎流角度为 0° 时 4 种礁体的上升流体积随时间变化 (a) 和背涡流体积随时间变化 (b)
 Fig. 4 Variation of upwelling volume (a) and volume of wake vortex (b) with time for four kinds of reefs at an inflow angle of 0°

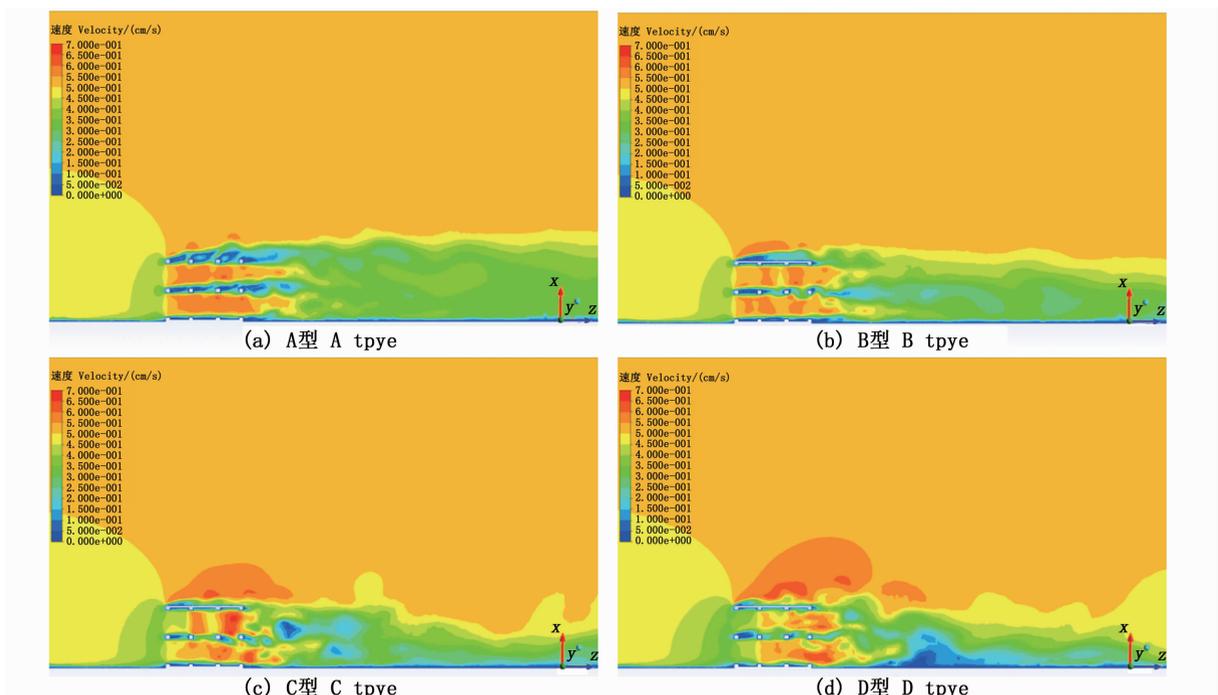


图 5 迎流角度 0° 时 4 种礁体在中垂面上的流态效应
 Fig. 5 Velocity cloud map on the vertical plane at an inflow angle of 0°

2.2 上升流特性分析

迎流角度为 0° 时, 4 种子礁的上升流体积呈现随礁体结构逐渐复杂而逐渐增大的趋势, A 型最小, D 型最大 (图 7)。A、B 型礁体结构简单, 流态变化简单, 上升流体积方差较小。3 种速度比情况下, 上升流相对体积、上升流高度为 D 型 > C 型 > A 型 > B 型。相较于 B 型礁体, 0° 迎流时, A 型礁体 3 种速度比的上升流相对体积为 B 型的 1.04 ~ 1.11 倍, C 型为 B 型的 5.87 ~ 8.76 倍, D

型则是 B 型的 13.50 ~ 25.48 倍。4 种子礁中 B 型礁体的上升流高度也最小, 在速度比大于 0.20 倍 (V_{u20}) 时, B 型礁体上升流高度仅为礁高的 1.20 倍, 表明起附着生物作用的顶板对部分上升流反而起到了压制作用。D 型上升流高度最大, 为 B 型礁体的 1.44 ~ 1.69 倍, 在速度比大于 0.10 倍 (V_{u10}) 时高达礁高的 2.38 倍。4 种礁体中, D 型礁体的上升流体积、上升流相对体积及上升流高度均为最大, 上升流效应最佳。

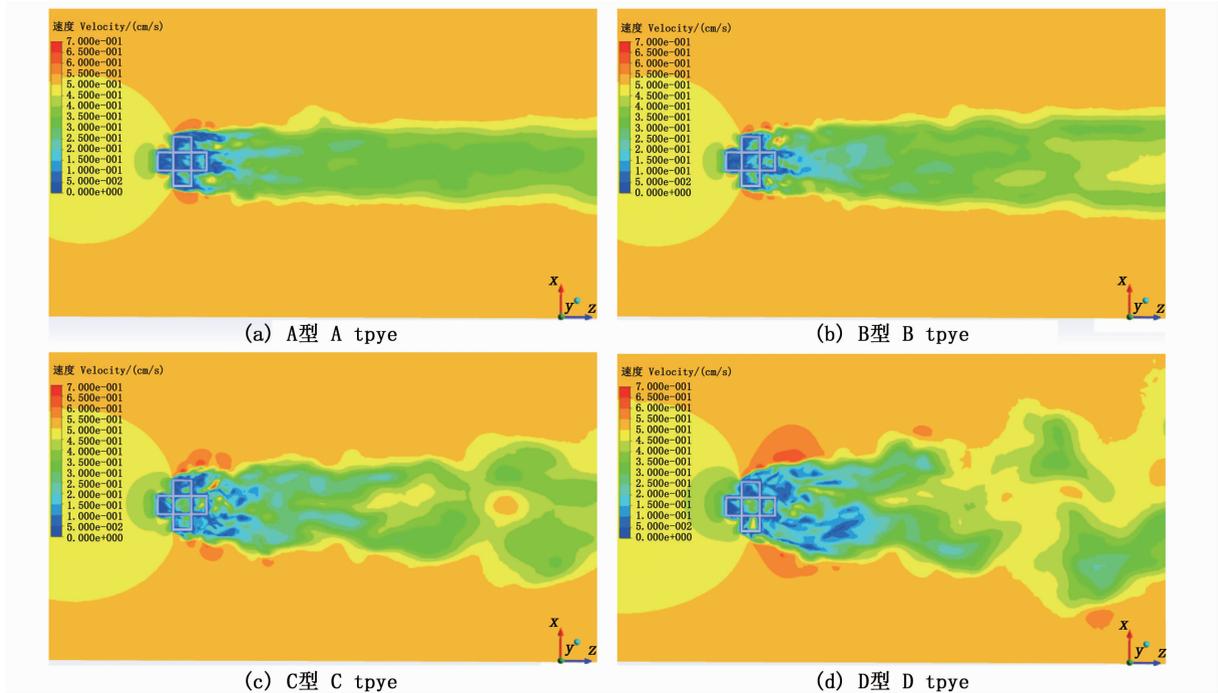


图6 迎流角度0°时4种礁体在y=2m平面的流态效应
 Fig.6 Velocity cloud map of on the plane y = 2 m at an inflow angle of 0°

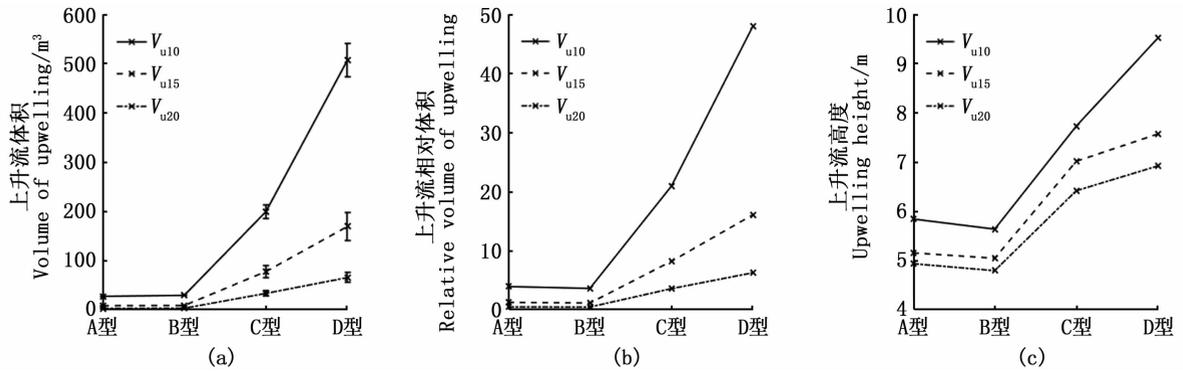


图7 迎流角度0°时,4种子礁的上升流体积(a)、上升流相对体积(b)及上升流高度(c)
 Fig.7 Volume of upwelling (a), relative volume of upwelling (b) and upwelling height (c) of four kinds of reefs at an inflow angle of 0°

2.3 背涡流特性分析

迎流角度为0°时,4种子礁的背涡流体积和相对体积呈现相同的趋势,随礁体结构逐渐复杂而先减小后增大,B型最小,D型最大(图8a,8b)。与上升流体积方差相同,A、B型礁体的背涡流体积方差较小。相较于B型礁体,3种速度比情况下,A型礁体背涡流相对体积为B型的1.17~1.32倍,C型为B型的1.15~1.42倍,D型为B型的1.40~1.61倍。因区域相对小,背涡流区平均流速则是B型最大;而D型的背涡流

区相对最大,平均流速则最小(图8c)。4种礁体中,D型礁体的背涡流体积和相对体积均为最大,背涡流平均流速最小,形成的背涡流效应最佳。

2.4 向上水体输运通量分析

4种礁体的向上水体输运通量的总体趋势相似(图9)。在0°角迎流时,4种礁体的垂直向上平均分速度为D型>C型>B型>A型。4种礁体的向上输运面积,从海底开始先随高度逐渐增大,至3m高度的水平截面开始减小,达到低值后再增大;A、B型向上输运面积低值出现在y=6m,

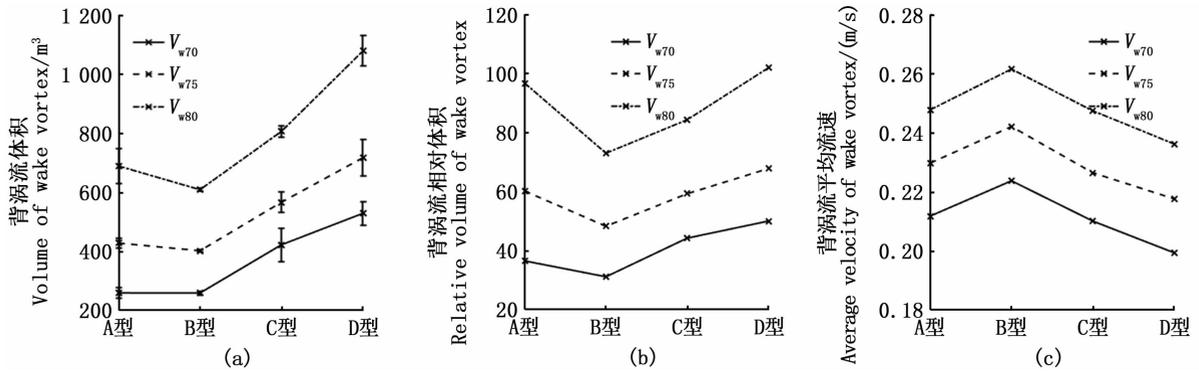


图8 迎流角度 0° 时双层十字翼型鱼礁4种子礁的背涡流体积(a)、背涡流相对体积(b)及背涡流平均流速(c)
 Fig.8 Volume of wake vortex (a), relative volume of wake vortex (b) and average velocity of wake vortex velocity (c) of four kinds of reefs at an inflow angle of 0°

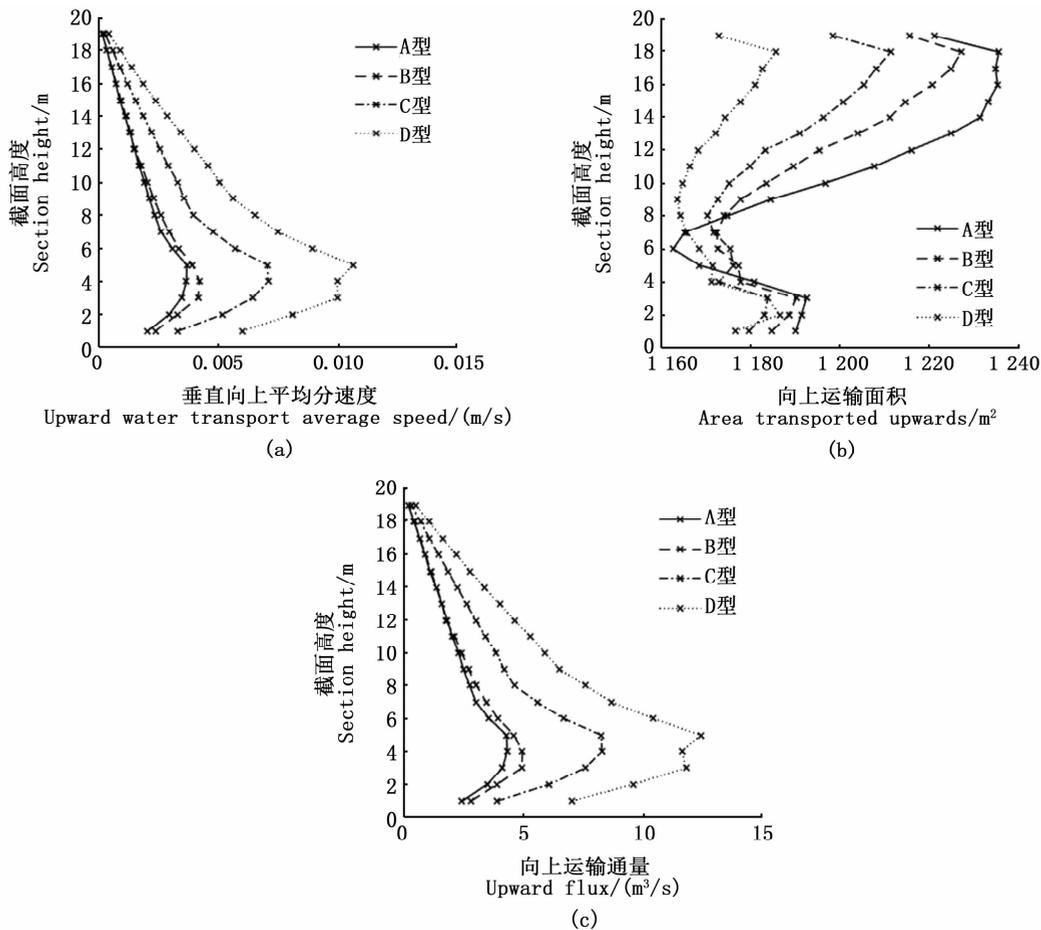


图9 迎流角度 0° 时4种子礁的垂直向上平均分速度(a)、向上输运面积(b)及向上输运通量(c)
 Fig.9 Upward water transport average speed(a), area transported upwards(b) and upward flux(c) of four kinds of reefs at an inflow angle of 0°

C型为 $y = 8\text{ m}$, D型为 $y = 9\text{ m}$ 。4种礁体向上输运通量变化趋势与垂直向上平均分速度变化趋势大致相同, D型礁体在 $y = 5\text{ m}$ 处向上输运通量达到极值 $12.45\text{ m}^3/\text{s}$, 之后逐渐降低, 其余3种礁

体则在 $y = 4\text{ m}$ 水平面上最大。综上可见, 向上水体输运通量约在一倍礁高处达到最大值, 约在两倍礁高处向上输运面积达到最小值, 向上水体输运通量降至最大值的 $1/2$ 左右, 之后向上依次递

减。

2.5 迎流角度的影响

礁体在不同迎流角度下,迎流面发生改变,形成不同的流场。分析不同迎流角度对礁体周围流场的影响,有助于礁体投放时选取最适的角度迎流。而鉴于目前投放技术及投放精度的限制,设计一种能适应不同方向来流的礁型是解决问题的方法之一。上文中对双层十字翼型鱼礁的4种子礁进行对比分析,可见D型礁体的流场效应最好,故下文以D型礁体为研究对象,分析0°、15°、30°及45°这4种迎流角度对D型礁体流

场效应的影响。如图10所示,迎流角度由0°增至45°,D型礁体的上升流体积、上升流高度及背涡流体积均呈现先减小后增大的趋势。D型礁体的上升流体积在0°迎流时最大,45°次之,15°较小,30°最小。以垂向流速为来流速度的10% (V_{u10})为指标,0°迎流的上升流体积可达到30°迎流的2.16倍;上升流高度在45°时最大,30°最小;D型礁体的背涡流体积在0°和45°时背涡流较大,15°和30°时较小。迎流角度的改变对背涡流平均流速影响不大。

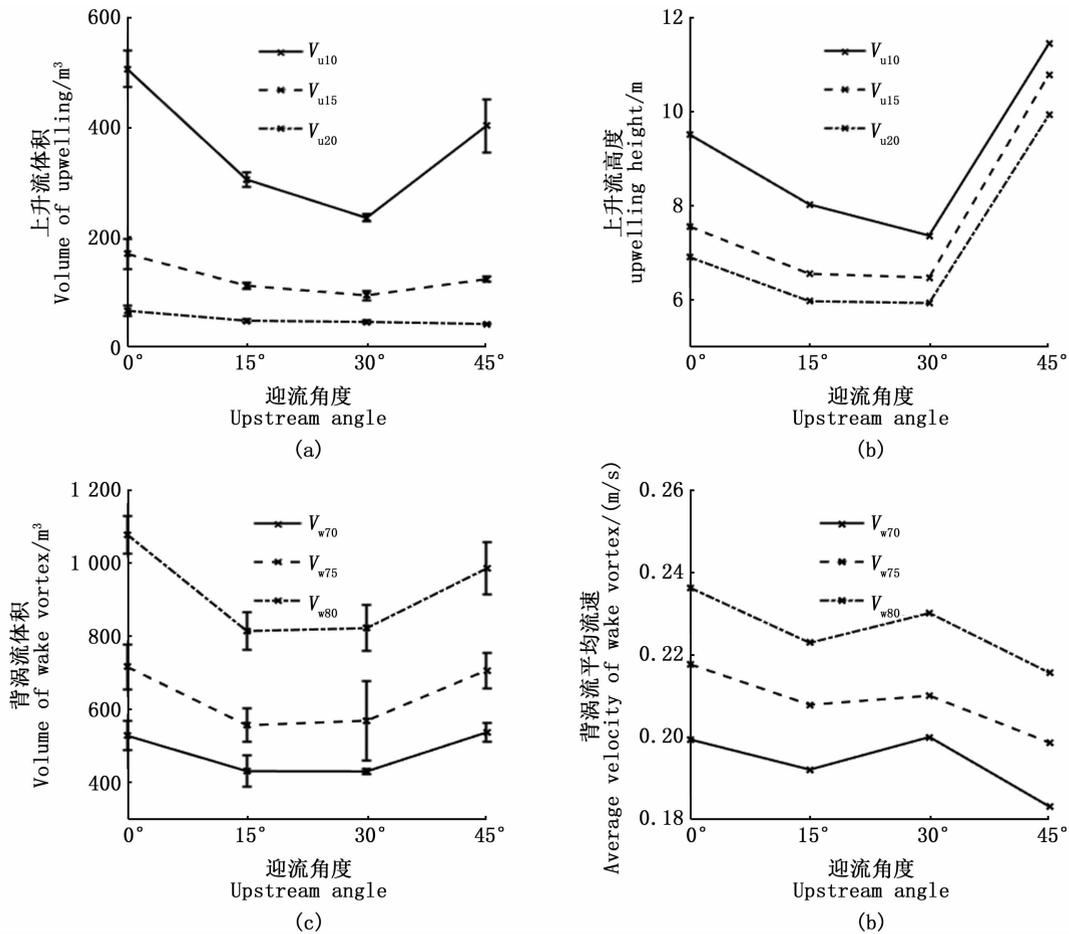


图10 不同迎流角度下D型礁体的上升流体积(a)、上升流高度(b)、背涡流体积(c)及背涡流平均流速(d)

Fig.10 Volume of upwelling (a), upwelling height (b), volume of wake vortex (c) and average velocity of wake vortex (d) of D-type reef at different inflow angles

4种迎流角度情况下,D型礁体的垂直向上平均分速度和向上输运通量趋势相同(图11), 0° 时最大, 15° 时最小。D型礁体的垂直向上平均分速度和向上输运通量在 $y=4\text{ m}$ 和 $y=5\text{ m}$ 较高,最大值均出现在 0° 角迎流 $y=5\text{ m}$ 处。D型礁体在4种迎流角度情况下的向上水体输运面积与上升流高度相同,均为 45° 时最大, 30° 时最小,在 $y=8\text{ m}$ 处出现低值。

如图10和图11所示,D型礁在不同迎流角

度下的上升流体积、背涡流体积和向上水体输送通量等主要水力参数指标虽然均有所差别,但根据 t 检验的结果,D型礁体在4个不同迎流角度下的上升流体积、背涡流体积、向上水体输送通量差异性均不显著,故可认为,本型礁体对自然海域的旋转潮流、往复潮流均有很好的适应性,对投放时的坐底姿势(迎流角度)无特殊要求。

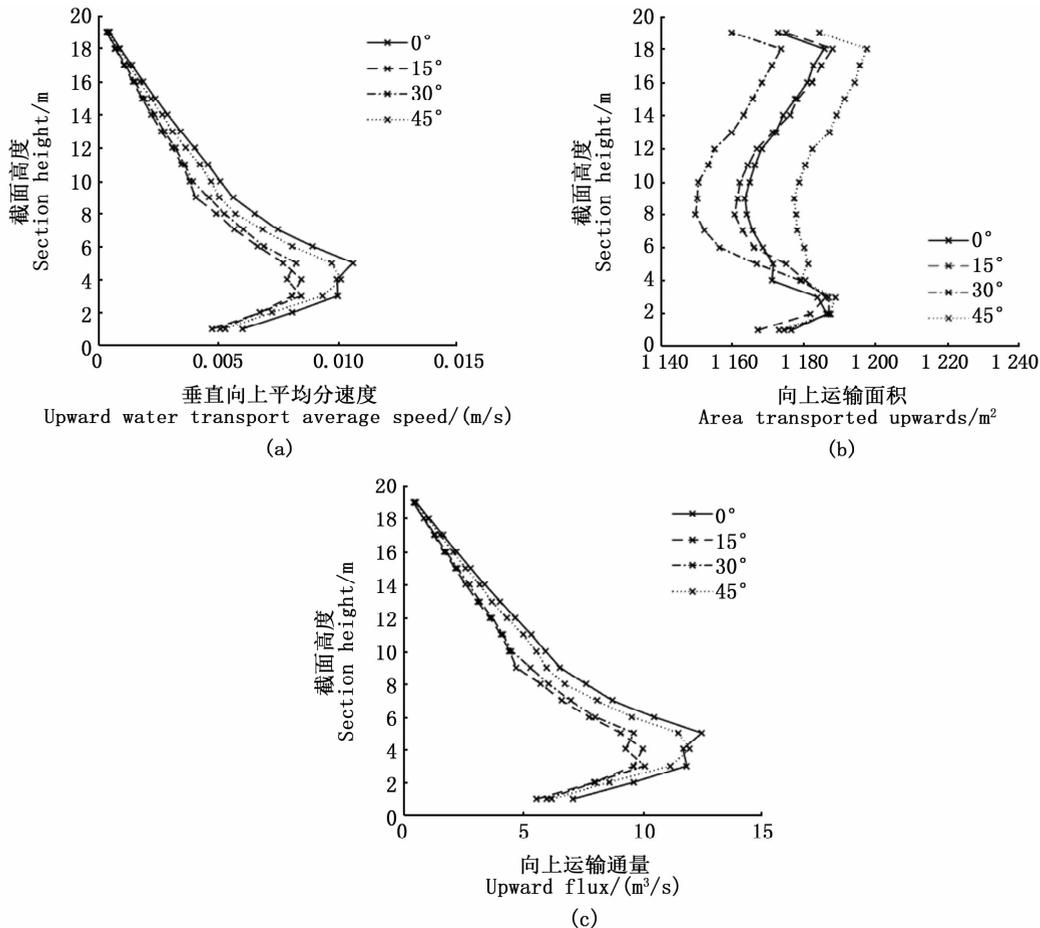


图11 不同迎流角度下D型礁体的垂直向上平均分速度(a)、向上输运面积(b)及向上输运通量(c)

Fig. 11 Upward water transport average speed (a), area transported upwards (b) and upward flux (c) of D-type reef at different inflow angle

3 讨论

人工鱼礁的流场效应是评价人工鱼礁性能的主要因素,水流受到人工鱼礁的影响,产生上升流和背涡流,提高海水交换能力,改善水生生物栖息环境,进而达到保护、增殖渔业资源和提高渔获质量的目的^[20]。人工鱼礁设计是人工鱼

礁区构建活动预先进行的计划^[21],以礁体稳定性、流场效应和生物聚集效应等方面为目的来优化礁体结构、尺寸和重量等参数^[22]。

3.1 顶板结构对双层十字翼型鱼礁流场效应的影响

对比A、B型礁体,不同点在于B型礁体增加了一块顶板。A型礁体结构最为简单,其形成的

上升流体积最小,向上水体输运通量最小,背涡流体积较小,背涡流平均流速较大,主要因为 A 型礁体结构简单,通透率最高,水流经过礁体时,迎流壁面较少,大部分水体直接穿过礁体,未形成较大的旋涡,流速下降较慢。随顶板结构的增加,上升流体积仅增加了 0.06~0.12 倍,上升流效应未能显著提高,背涡流体积变小,背涡流平均流速变大,背涡流效应有所减弱,上升流和背涡流相对体积变小,礁体利用率变低,经济性变差。综上,顶板结构对礁体的流场效应并无显著增益,仅在部分海域能起到增加附着生物的作用。这一结论与李珺等^[23]的研究结果相近。

3.2 侧板结构对双层十字翼型鱼礁流场效应的影响

对比 B、C、D 型礁体,其礁体结构差别在于有无侧板,B 型无侧板,C 型礁体有上层侧板,D 型礁体则上下两层都有侧板。随侧板增加,礁体的上升流和背涡流体积、上升流高度及向上输运通量均逐渐增大,背涡流平均流速逐渐减小,礁体的流场效应逐渐变强,礁体的上升流和背涡流相对体积也逐渐变大,礁体利用率逐渐变高。侧板结构对礁体流场效应的影响,与李珺等^[23]方形人工鱼礁通透性对礁体周围流场影响的结果类似,礁体缓流区体积随通透系数增大而逐渐变小,与于定勇等^[24]不同开口比对人工鱼礁水动力特性研究结果也类似,开口比增至 0.3 以上,随开口比增大礁体的流场效应变弱。双层十字翼型礁体增加侧板,其透水性变差,水流冲击的壁面变多,流向和流速变化较大,上升流区域更广,礁体后产生多处旋涡,背涡流区域增大,且礁体内部侧板后方及礁体后方,形成了流速接近于零的缓流区,其对缓流区平均流速有很大影响。增加侧板能显著提升双层十字翼型鱼礁的上升流和背涡流效益,特别是全侧板的 D 型礁体,上升流和背涡流体积、上升流高度均为最大,背涡流平均流速最小,流场效应最好,上升流和背涡流相对体积最大,鱼礁利用率最大,经济性最高。考虑流场效益和经济性,认为 D 型礁体是目前最好的双层十字翼型礁体的礁型。

3.3 双层十字翼型鱼礁 4 种子礁向上水体输运通量分析

人工鱼礁能形成好的生态效益是由于水流经过礁体时受阻产生向上的分流,对水层扰动,

将沉积在海底的营养盐向上输运,本文首次提出人工鱼礁向上水体输运通量的概念,其大小能够有效测算人工鱼礁的上升流效应。双层十字翼型鱼礁 4 种子礁中,D 型礁体的向上水体输运能力最好,A、B 型较差。礁体向上输运的通量与礁体形成的垂直向上分速度大小的变化趋势类似,说明向上输运通量主要受垂直向上分速度影响;向上输运面积的垂向变化不大,因此与面积没有显著关系。4 种子礁在 $y=4\text{ m}$ 、 $y=5\text{ m}$ 时的向上输运通量较大,是由于礁体上形成的漩涡最大,垂直向上的速度分量也最大。向上输运面积由 3 m 截面至低值出现高度处的平均分速度较大,低值所在截面与上升流高度相差不多,考虑为礁体强上升流出现的位置。

3.4 迎流角度对双层十字翼型鱼礁流场效应的影响

迎流角度改变,礁体迎流面积变化,对礁体流场效应产生影响。不同的迎流角度情况下,D 型礁体的上升流和背涡流变化较大。分析发现在迎流角度 0° 和 45° 时,D 型礁体的流场效应较好,上升流体积、背涡流体积、上升流高度、及向上输运通量均较好。若为获得更大的上升流效益,可在投放礁体时尽量与潮流正对; 0° 迎流布设时上升流提升最大、水体向上输运能力最强;若以背涡流为评价基准,可考虑礁体布设为 45° 迎流,可形成具有较大体积和最小流速的背涡流区域。这一研究结果与公丕海等^[25]关于塔型衍架鱼礁的研究结果类似,同一来流速度下,塔型衍架鱼礁 45° 摆放时的上升流最大流速、平均流速和 90° 摆放无明显差异, 45° 迎流时礁体缓流区面积、缓流区长度均大于 90° 迎流。经 t 检验,D 型礁体在 4 个不同迎流角度下的上升流体积、背涡流体积、向上水体输送通量差异性均不显著。

4 结论与展望

十字翼型系列人工鱼礁单体具有结构相对简单、制作方便、结构变化和组合方式多样等特征。本文采用 CFD 软件对 4 种不同结构双层十字翼型礁体的流场效应进行了模拟,并用上升流和背涡流体积、上升流和背涡流比混凝土体积、上升流高度及背涡流平均流速、向上水体输运通量等指标进行了分析。结果表明,4 种礁体中上升流和背涡流体积变化趋势相同,D 型礁体最好,

C型次之,A型和B型均较差。双层十字翼型礁体加顶板对上升流和背涡流体积并无增益;双层十字翼型礁体加侧板,可以显著增大其上升流和背涡流效益,且会形成速度较低的背涡流区域。D型礁体流场效应最好,经济性最高,是目前双层十字翼型人工鱼礁中最佳的礁体构造,且迎流角度的改变,对D型礁体的上升流和背涡流的影响无显著差异,表明D型礁体对自然海域的旋转潮流、往复潮流均有很好的适应性。本文首创的人工鱼礁向上水体输送通量指标,结合现场海域表底层水体的营养盐浓度差值,可有效定量测算人工鱼礁向上层水体输运营养盐的通量。

文中分析表明增加顶板不能形成较好的流场效应,C、D两种含侧板礁体均含有顶板,文中未考虑加侧板结构双层十字翼型礁体无顶板的情况,加侧板不加顶板的双层十字翼型礁体是否会有产生更好的经济性,且研究中4种子礁均含有底板,旨在防翻转,底板会影响底部下底质的含氧量等,对底板结构的改变,如底部不全部覆盖,只在4个翼部底端增加底板或只在中心体底部增加底板,在减少混凝土用量获得更好经济性的情况下是否能达到更好的流场效果,在之后的研究中有待考虑。

此外,后续研究还需要增加不同来流速度、不同水深条件的更多数值模拟测试,并结合水槽实验开展进一步分析和验证。此外,本型礁体的稳定性、抗沉降、抗倾覆等特性也需要进一步测试。

参考文献:

- [1] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
YANG H S. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [2] 王亚民, 郭冬青. 我国海洋牧场的设计与建设[J]. 中国水产, 2011(4): 25-27.
WANG Y M, GUO D Q. Design and construction of marine ranch in my country[J]. China Fisheries, 2011(4): 25-27.
- [3] 潘澎. 海洋牧场:承载中国渔业转型新希望[J]. 中国水产, 2016(1): 47-49.
PAN P. Marine ranch: carrying new hope for China's fishery transformation[J]. China Fisheries, 2016(1), 47-49.
- [4] 姜昭阳. 人工鱼礁水动力学与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
JIANG Z Y. Numerical simulation of hydrodynamics for artificial reefs[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [5] 王宏, 陈丕茂, 章守宇, 等. 人工鱼礁对渔业资源增殖的影响[J]. 广东农业科学, 2009(8): 18-21.
WANG H, CHEN P M, ZHANG S Y, et al. Effect on fishery resources multiplication of artificial reefs[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(8): 18-21.
- [6] 潘灵芝, 林军, 章守宇. 铅直二维定常流中人工鱼礁流场效应的数值实验[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(4): 406-412.
PAN L Z, LIN J, ZHANG S Y. A numerical experiment of the effects of artificial reef on vertical 2-dimensional steady flow field[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(4): 406-412.
- [7] 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.
- [8] 张硕, 孙满昌, 陈勇. 不同高度混凝土模型礁背涡流特性的定量研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(4): 278-282.
ZHANG S, SUN M C, CHEN Y. Quantificational features of wake vortices of concrete artificial model reefs with different height[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(4): 278-282.
- [9] 崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 人工鱼礁流场效应的数值模拟与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7393-7396.
CUI Y, GUAN C T, WAN R, et al. Research and numerical simulation on features of flow field around artificial reefs[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7393-7396.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] TANG Y L, YANG W Z, SUN L Y, et al. Studies on factors influencing hydrodynamic characteristics of plates used in artificial reefs [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(1): 193-202.
- [16] 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.
- [17] 郑延璇. 人工鱼礁流场效应与物理稳定性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- ZHENG Y X. Flow field effect and physical stability of artificial reefs [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [18] 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-Ziartificial reefs in different construction modes based on numerical experiments [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 2025-2038.
- [19] 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 generalartificial reefs in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 97-103.
- [20] 陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. *大连水产学院学报*, 2002, 17(1): 64-69.
- CHEN Y, YU C Q, ZHANG G S, et al. The environmental function and fish gather effect of atificial reefs[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, 17(1): 64-69.
- [21] 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.
- 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.
- [22] 唐振朝, 陈丕茂, 贾晓平. 大亚湾不同波浪、水深与坡度条件下车叶型人工鱼礁的安全重量[J]. *水产学报*, 2011, 35(11): 1650-1657.
- TANG Z C, CHEN P M, JIA X P. Study on safe weight of artificial reef in different water depths and bottom slopes under Daya Bay wave[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(11): 1650-1657.
- [23] 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]. *上海水产大学学报*, 2010, 19(6): 836-840.
- LI J, LIN J, ZHANG S Y. The numerical experiment on the permeability of a cubicartificial reef and the effect on the flow field around the reef [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2010, 19(6): 836-840.
- [24] 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*, 2019, 49(4): 128-136.
- YU D Y, YANG Y H, LI J H. 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.
- [25] 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.

Numerical simulation of flow field effect around the double-layer cross-wing artificial reef

FANG Jihong, LIN Jun, YANG Wei, WEN Ying, QI Fuqing

(College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the fluid simulation software (Ansys Fluent) and turbulence module (large eddy simulation, LES), we have simulated the flow field effects of four different types double layer cross-airfoil artificial reef. To quantify the flow field parameters, including the volume of upwelling and wake vortex, and the transport flux by upward waters, we adopt the method of concrete volume ratio to obtain the optimal structure of artificial reef, in order to provide a scientific basis for the design and selection of artificial reef. The simulation results show that the double layer cross-airfoil artificial reef with roof has faint effects on flow field, the relative volume of upwelling and wake vortex become smaller. While the artificial reef with side plate has obvious effects on flow field, the relative volume of upwelling and wake vortex increase gradually. Similarly, the flow effects of upwelling and wake vortex of D-type reef with full-side plate are most strongest, and the relative volume of the upwelling can reach 13.50 – 25.48 times of the B-type reef without side plates, the relative volume of the wake vortex can reach 1.40 – 1.61 times; the maximum transport flux value of upward waters appears at 1 times height of the reef, and about half of the maximum value appears at 2 times height of the reef. The result also shows that there is no evident difference in the flow field effect of D-type reef when changing the upstream angle, which indicates that this type of reef has a good adaptability to the flow direction in the natural sea area.

Key words: artificial reef; numerical simulation; concrete volume ratio method; upwelling and wake vortex; upward water transport flux