

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20201102001

http://www.yykxjz.cn/

郭禹, 秦传新, 章守宇. 基于结构差异性正方体鱼礁的流场效应研究. 渔业科学进展, 2022, 43(2): 01-10
GUO Y, QIN C X, ZHANG S Y. Flow field effect of cube reef monocase of different structure. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(2): 01-10

基于结构差异性正方体鱼礁的流场效应研究*

郭禹¹ 秦传新^{1,2①} 章守宇³

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所 国家渔业资源环境大鹏观测实验站 广东 广州 510300;
2. 南方海洋广东省实验室 广东 广州 511458; 3. 上海海洋大学 上海 201306)

摘要 人工鱼礁结构差异是影响流场规模效应的主要因素之一, 本研究选择大字型、米字型、回字型、交叉型、框架型和实体型 6 种鱼礁单体, 分析均匀布设模式下礁体自身结构特征对流场效应的影响规律, 进一步建立结构差异性单位鱼礁的规模效应模型。基于流场效应规律提出礁体结构特征指标分别为鱼礁空方体积比、透空率和迎流面相对截面积, 进一步得到上升流体积效应模型为 $V_u=0.448R_u^{-1.679}-C_p(29.868C_p-6.921)+R_{sa}(56.18R_{sa}-35.42)$, 背涡流体积效应模型为 $V_b=R_u(1830R_u-128)-R_v(95R_v-105)+C_p(138C_p-154)-R_{sa}(418R_{sa}-180)$ 。最后, 基于流场体积效应模型, 提出以流场体积为依据的礁体结构参数选择建议, 可为以流场体积为建设目标的最优鱼礁结构设计提供参数指导。

关键词 流场效应; 单位鱼礁; 体积模型; 数值实验; 正方体鱼礁

中图分类号 S953 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)02-0001-10

人工鱼礁作为海洋牧场建设的一种技术手段和基础设施(杨红生, 2016; 刘鸿雁等, 2019; Fariñas-Franco *et al*, 2014), 随着海洋牧场建设的发展, 其效果逐渐受到越来越多研究者的关注。在合理规划条件下, 经济、高效的人工鱼礁建设模式是增强建设效果、保障海洋牧场实现效益生态化的前提(王震等, 2019)。鱼礁结构差异会产生不同效果的流场形式(肖荣, 2015; 姜昭阳等, 2019), 进而影响人工鱼礁的投放效果。因此, 需要合理规划单位人工鱼礁布设模式(Kim

et al, 2016、2019; 李豹德, 1985), 其中, 鱼礁单体结构也是考量因素之一。在规划人工鱼礁建设过程中, 除对不同单位鱼礁建设模式流场效应进行研究, 更应注重研究结构差异性单位鱼礁的流场特性, 为科学设计人工鱼礁单体结构提供理论依据。

目前, 研究者仅从鱼礁单体的流场效应的角度对人工鱼礁结构差异进行了分析。李珺等(2010a)通过改变正方体鱼礁中部的孔洞大小, 发现不同通透性的人工鱼礁单体流场效应存在差异; 于定勇等(2019)对不

* 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2018YFD0900905)、中国水产科学研究院南海水产研究所基本科研业务费专项资金资助项目(2020YJ04; 2020SY01)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0402)、防城港市白龙珍珠湾海域国家级海洋牧场示范区礁区地形扫测(鱼礁探测)和海洋环境要素状况与渔业资源状况调查评估项目(FCZC2019-G3-10045-GXYL)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Plan: Blue Granary Technology Innovation Project (2018YFD0900905), Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, South China Sea Fisheries Research Institute, CAFS (2020YJ04; 2020SY01), Southern Ocean Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) Talent Team Introduced Major Special Projects (GML2019ZD0402), Survey and Evaluation Project of Topographic Survey (Artificial Reef Detection), and Marine Environment Element and Fishery Resources of the National Marine Ranch Demonstration Area in Bailong Pearl Bay, Fangchenggang City (FCZC2019-G3-10045-GXYL)]. 郭禹, E-mail: guoyu25895177@163.com

① 通讯作者: 秦传新, 副研究员, E-mail: qincx@scsfri.ac.cn

收稿日期: 2020-11-02, 收修改稿日期: 2020-11-18

同开口比的鱼礁单体流场效应进行研究,也发现礁体结构会影响流场效果。然而,现有研究忽略了实际礁体内部结构的差异(付东伟等, 2012);另一方面,已有研究仅以鱼礁单体为分析对象,而实际人工鱼礁投放均以单位鱼礁为基本单元(Kim *et al.*, 2014),同时,研究结果仅说明结构差异会改变流场效应,但针对以单位鱼礁为基本单元的流场效应的变化规律并无探讨。因此,对结构差异性礁体以单位鱼礁形式为基础单元的流场效应研究更能有效指导人工鱼礁建设。为准确评价结构差异性单位鱼礁建设效果,合理选择投放海域的人工鱼礁结构,需要准确提取代表礁体结构差异的特征指标,进一步分析、评价多种结构差异性单位鱼礁的流场效果,建立人工鱼礁流场效应评价模型,进而合理规划人工鱼礁结构设计。

本研究以单位鱼礁流场效应作为人工鱼礁建设效果的主要评价因素,以均匀布设模式的单位鱼礁形式为基础,根据目前我国人工鱼礁实际投放特征,选择具有代表性的鱼礁单体,包括大字型、米字型、回字型、交叉型、框架型和实体型6种人工鱼礁结构。通过提取6种礁型结构特征指标,分析礁体结构特征指标对流场效应的影响规律,建立结构差异性单位鱼礁的规模效应模型,进一步为人工鱼礁合理规划建设提供全面的数据参考与科学指导。

1 数值实验与体积效应模型建立

1.1 人工鱼礁单体选择

为使结构差异性单位鱼礁流场效应研究对实际鱼礁投放具有指导作用,本研究选择目前大规模投放的大字型、米字型、回字型、框架型和交叉型正方体鱼礁结构作为研究对象,同时为使数据更加全面,补充相应大小的实体型人工鱼礁结构进行对比分析,6种鱼礁单体均为由钢筋混凝土构成的 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 正方体结构,鱼礁单体边长为 3 m ,图1所示为6种人工鱼礁礁体结构示意图,其单体面积(area of reef monospace, A_m)(鱼礁单体占地面积)相同。其中,大字型鱼礁单体4个侧面呈大字,鱼礁上下底面以对角线相连呈交叉型,礁体方柱与外框截面均为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 的正方形,礁体内部中空。米字型鱼礁6个侧面均呈米字,米字方柱与外框截面均为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 的正方形,且礁体内部中空。回字型人工鱼礁6个侧面均呈回字型,结构较为复杂。交叉型人工鱼礁由钢筋混凝土构成 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 正方体,鱼礁单体边长为 3 m ,人工鱼礁单体体积为 27 m^3 ,外框宽 0.25 m ,中间交错形方柱宽 0.3 m 。相较于大字型和米字型鱼礁单体,回字型和交叉型鱼礁单体的内部构建位于礁体中部而非侧面。框架型鱼礁单体主要由12个截面为 $0.3\text{ m}\times$

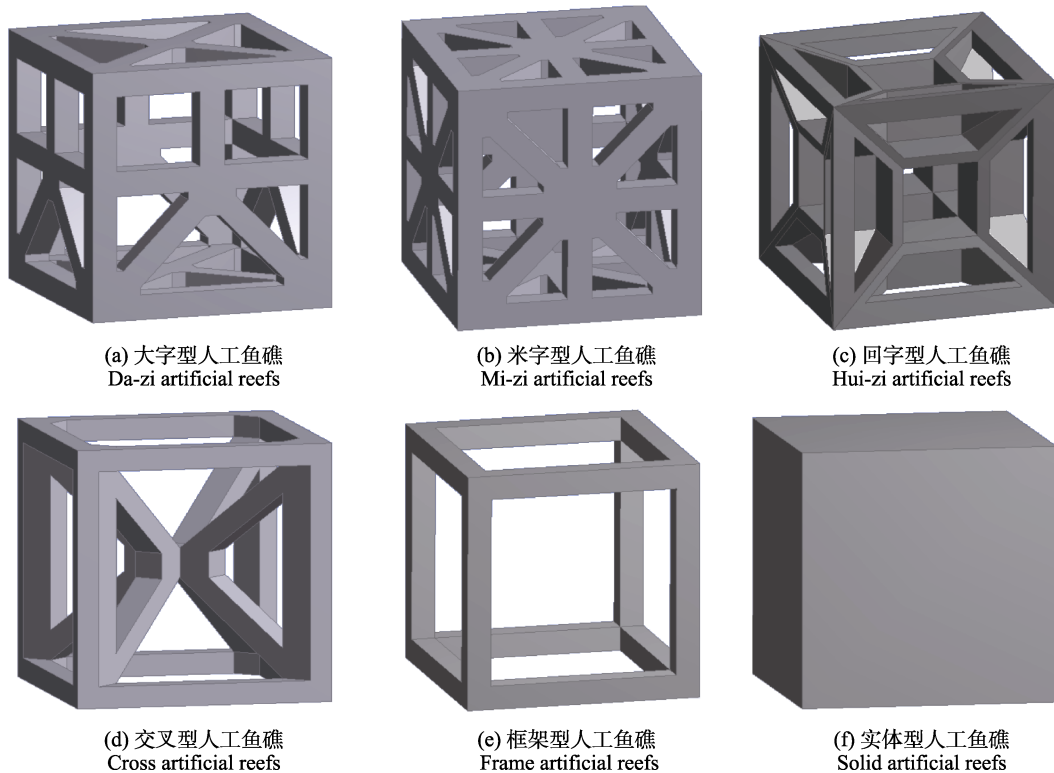


图1 人工鱼礁结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of artificial reefs

0.3 m 的正方形外框构成。实体型鱼礁单体则为实心正方体, 为研究中补充的极端礁体参考。本研究中的大字型和米字型人工鱼礁主要应用于福建省海洋牧场建设, 回字型和交叉型人工鱼礁主要投放于东海区海洋牧场, 框架型人工鱼礁以其简单的结构特征优势在各个海洋牧场中均有投放。

1.2 单位鱼礁布设模式与计算域

为分析不同鱼礁结构的单位鱼礁流场效应, 本研究均选择投放量适宜且流场效应最佳时的间距作为单位鱼礁建设规模标准(郭禹等, 2019), 故研究中的 6 种单位鱼礁均为 4×4 的均匀布设模式, 布设间距均为 1.5 倍鱼礁单体边长。

数值实验计算域范围以单位鱼礁边长 (side length of unit artificial reef, S_{lu}) 的倍数为基础参数, 来流面至单位鱼礁迎流面的长度为 $3S_{lu}$, 单位鱼礁尾至出流面长度为 $15S_{lu}$, 鱼礁左、右侧面至水槽壁面均为 $3S_{lu}$, 水深设为鱼礁单体的 10 倍, 来流方向与单位鱼礁迎流面角度为 90° , 来流速度 (inlet velocity, v_i) 为 1.0 m/s, 具体数值实验计算域如图 2 所示。数值实验中, 入口边界条件为速度入口, 出口边界条件为

速度出口, 人工鱼礁表面与计算域底面均为壁面边界条件, 采用无滑移边界参数, 计算域侧面与上顶面设为对称边界条件。实验中流体密度设为 1024 kg/m^3 , 重力参数为 9.81 m/s^2 。研究中流场数据采用 ANSYS 软件的大涡模拟模型获得, 模拟数据通过验证切实可用(李珺等, 2010b)。

1.3 流场效应与人工鱼礁规模化指标筛选

本研究中, 单位人工鱼礁布设间距均为 1.5 倍鱼礁单体边长, 产生的流场效应间均存在协调效应(郭禹等, 2020), 因此, 在选择流场效应规模指标时, 以流场相对体积即人工鱼礁产生的整个流场效应区作为流场效应规模指标进行说明。本研究分别选择 4 种目标速度比(target velocity ratio, R_{tv})作为上升流与背涡流区选取标准, 上升流区为单位鱼礁前端垂向流速分别大于 0.05、0.10、0.15 和 0.20 倍来流速度的速度区域, 背涡流区为单位鱼礁后方来流向流速中绝对值分别小于 0.70、0.75、0.80 和 0.85 倍来流速度的速度区域, 流场效应指标还包括相对面积(relative area, A_r)、相对高度(relative height, H_r)、相对长度(relative length, L_r)和流场平均相对速度(average relative velocity, V_{ar}), 具体计算公式如下:

$$A_r = S_{max}/A_{rm} \quad (1)$$

$$H_r = H_{max}/S_{lu} \quad (2)$$

$$L_r = L_{max}/S_{lu} \quad (3)$$

$$V_{ar} = V_m/v_i \quad (4)$$

式中, S_{max} 为流场最大面积; H_{max} 为流场最大作用高度; L_{max} 为流场最大作用长度; V_m 为流场平均速度。

由于本研究单位鱼礁建设模式相同, 故代表单位人工鱼礁规模的指标仅为鱼礁结构特征参数, 主要包括单体鱼礁透空率和空方体积比。单体鱼礁透空率(permeability coefficient, C_p)指沿来流方向人工鱼礁区内投影面积与边界投影面积的比值, 空方体积比(volume ratio, R_v)指鱼礁单体实际混凝土体积与空方体积的比值, 6 种不同结构人工鱼礁单体结构特征指标参数见表 1。

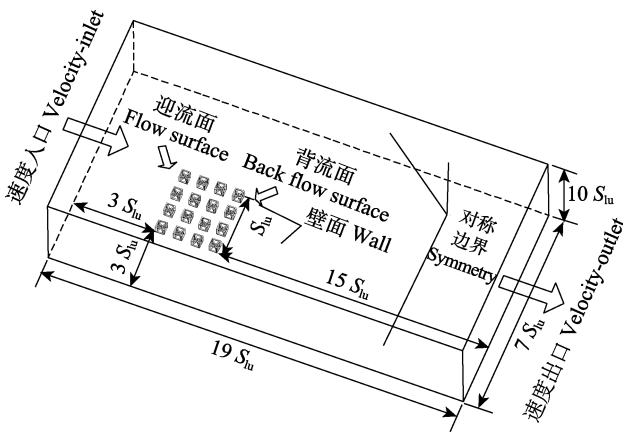


图 2 单位人工鱼礁数值实验计算域
Fig.2 Experimental calculation domain sketch of artificial reefs

表 1 人工鱼礁结构指标参数

Tab.1 Structural indicators of artificial reefs

结构指标 Structural indicators	大字型鱼礁 Da-zi artificial reefs	米字型鱼礁 Mi-zi artificial reefs	回字型鱼礁 Hui-zi artificial reefs	交叉型鱼礁 Cross artificial reefs	框架型鱼礁 Frame artificial reefs	实体型鱼礁 Solid artificial reefs
透空率 C_p /%	40.89	30.34	20.11	31.48	64	0
空方体积比 R_v /%	21.87	42.66	23.37	27.37	10.4	100

1.4 规模效应模型建立

采用单一指标法建立人工鱼礁规模效应模型

(李松等, 2016), 模型自变量为单位鱼礁规模指标, 包括目标速度比、鱼礁单体透空率、空方体积比和相对截面积。因变量分别为上升流与背涡流流场相对体

积指标,通过分析每个自变量(鱼礁规模指标)与流场体积效应指标间的关系,建立流场体积效应的最佳单一指标回归模型(人工鱼礁规模效应模型)(汪岚等,2008)。本研究利用 MATLAB 中的拟合函数 polyfit 进行实验数据的单元回归拟合,应用 nlinfit 函数建立各流场效应指标与人工鱼礁规模指标的多元非线性模型,使用 Gauss-Newton 法进行模型优化(董大校,2009)。

2 结果与分析

2.1 上升流流场效应

不同鱼礁单体构成的单位鱼礁流场效应存在一定差异,不同目标速度比条件下,6种单位鱼礁上升流流场体积效应变化规律见图3。如图3所示,代表上升流流场空间范围的3个特征指标相对体积、相对面积

和相对高度均随着目标速度比增加逐渐降低,上升流平均相对速度随着目标速度比增加逐渐增大,4种速度比条件下,各单体类型的单位鱼礁上升流相对体积、面积、高度和平均相对速度变化规律相同。每种速度比条件下,6种差异型鱼礁单体的流场相对体积与相对面积由大到小所对应的单位鱼礁类型依次为:实体型>米字型>回字型>大字型>交叉型>框架型,其中,实体型鱼礁透空率最小,空方体积比最大,框架型鱼礁透空率最大而空方体积比最小;6种鱼礁上升流相对高度和速度由大到小对应的单位鱼礁类型依次为:实体型>米字型>大字型>交叉型>回字型>框架型,同样实体型与框架型鱼礁受透空率与空方体积比影响,但其他4种结构礁体上升流效应受透空率与空方体积比影响规律较小。此结果说明,上升流效应受鱼礁结构差异影响,但透空率和空方体积比2个指标不足以表征礁体结构各异的特点。

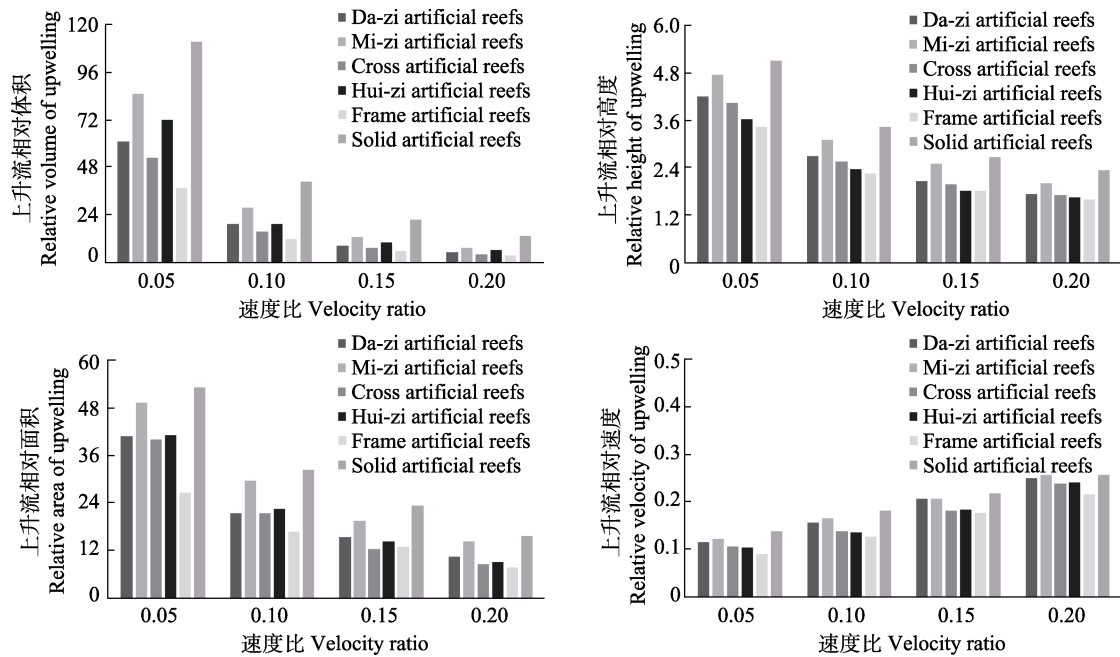


图3 6种单位鱼礁上升流效应
Fig.3 Upwelling effect of 6 types of artificial reefs

2.2 背涡流流场效应

不同目标速度比条件下,6种单位鱼礁背涡流流场效应特征见图4。如图4所示,背涡流相对体积、相对面积、相对长度和平均相对速度均随着目标速度比增加逐渐增大,且每种目标速度比条件下各类型礁体背涡流效应变化规律相同。其中,交叉型单位鱼礁背涡流相对体积最大,其次为回字型人工鱼礁,二者结构具有相似特征,即鱼礁内部构件位于礁体中部,

而大字型和米字型单位鱼礁背涡流相对体积最小,二者在结构上同样具有相似特征,即鱼礁内部构件位于鱼礁侧面。实体型单位鱼礁背涡流相对面积最大,框架型单位鱼礁背涡流相对面积最小,其他鱼礁相对面积呈2种特征,其一是鱼礁体构件位于外侧的大字型与米字型单位鱼礁,其相对面积低于另一种礁体构件位于内部的交叉型和回字型单位鱼礁。背涡流流场相对长度与速度同样受鱼礁内部结构构件位置影响,均表现为鱼礁体构件位于内部的单位鱼礁流场相对

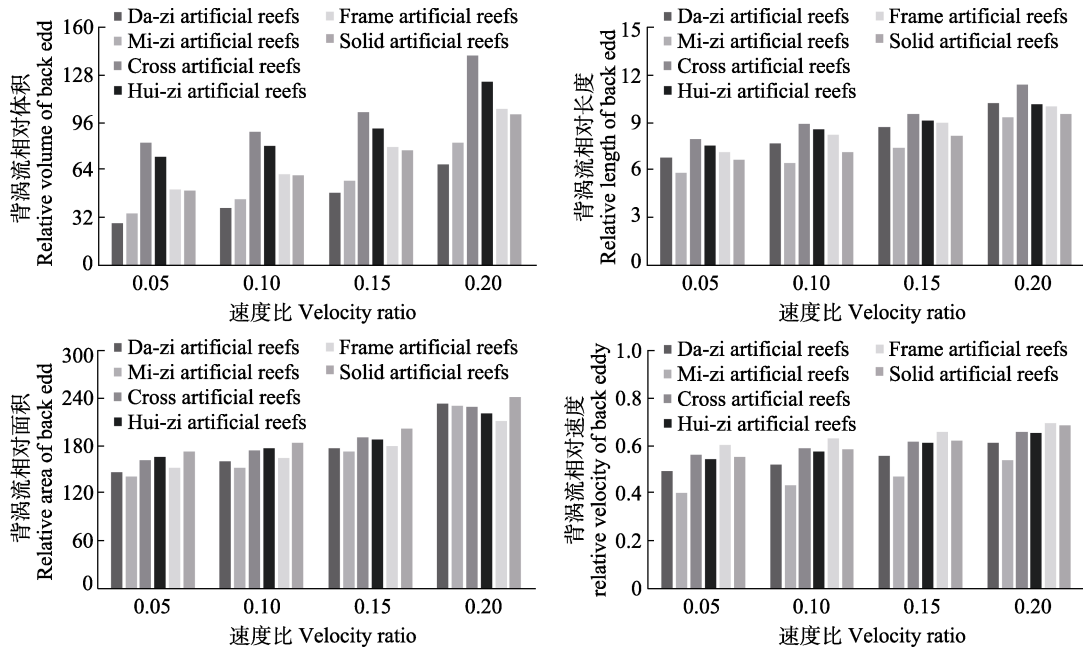


图 4 6 种单位鱼礁背涡流效应
Fig.4 Back eddy effect of 6 types of artificial reefs

长度与速度高于构件位于侧面的鱼礁。

此结果进一步说明,透空率和空方体积比是影响结构差异性单位鱼礁流场效应的因素,即可作为表征鱼礁结构差异的特征指标,但并不完全。本研究根据流场效应受鱼礁结构内部构件位置差异影响的规律,提出迎流面相对截面积(relative cross-sectional area of MR, R_{sa})指标用于表征礁体结构差异特征,迎流面相对截面积是指人工鱼礁单体迎流面礁体实际面积与总面积的比值,大字型、米字型、交叉型、回字型、框架型和实体型鱼礁相对截面积分别为 0.59、0.70、0.36、0、0.36 和 1。

2.3 上升流体积效应模型

以上升流与背涡流效应研究中影响结构差异性人工鱼礁上升流流场相对体积变化的因子为自变量,分别分析人工鱼礁上升流相对体积随各自变量因子的变化规律。图 5~图 7 分别为目标速度比、透空率

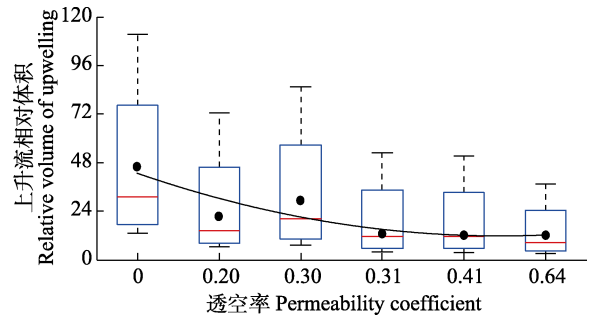


图 6 透空率与上升流相对体积拟合效果
Fig.6 Curves of permeability coefficient versus relative upwelling volume

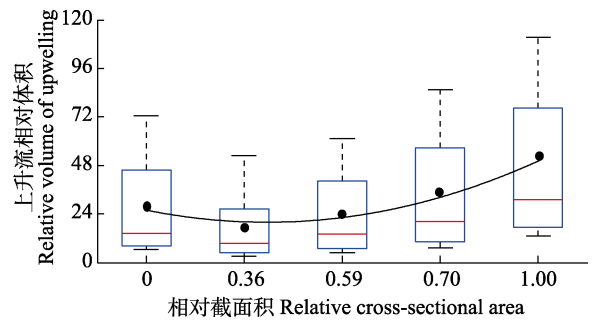


图 7 相对截面积与上升流相对体积拟合效果
Fig.7 Curves of relative cross-sectional area versus relative upwelling volume

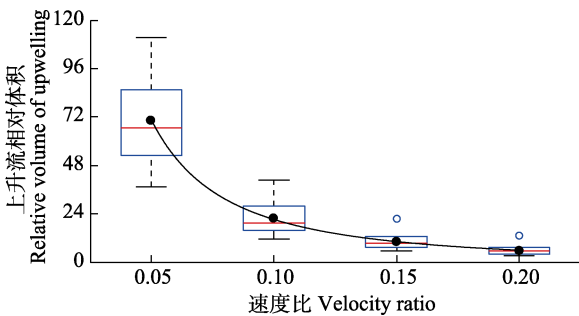


图 5 速度比与上升流相对体积拟合效果
Fig.5 Curves of velocity ratio versus relative upwelling volume

和相对截面积 3 个鱼礁建设指标与上升流相对体积的拟合效果图。其中单位鱼礁空方体积比虽然影响上升流相对体积,但上升流相对体积与空方体积比间无明显的函数关系,故模型建立时不考虑此项。如图 5 所示,上升流相对体积随目标速度比增加呈幂函数变

化, 单元回归模型基本形式为 $V_{u1}=0.424R_u^{-1.71}$, $R^2=0.91$; 上升流相对体积随透空率的增加呈现逐渐递减的二次函数关系, 其单元回归模型基本形式为 $V_{u2}=0.831C_p^2-11.481C_p+54.393$, $R^2=0.90$; 上升流相对体积随迎流面相对截面积取值增加呈先降低后增加的二次函数关系, 回归模型基本形式为 $V_{u3}=3.581R_{sa}-15.903R_{sa}+37.87$, $R^2=0.97$; 根据单元回归模型建立上升流体积综合评价模型, 模型公式的一般形式为 $V_u=a_1R_u^{a_2}+b_1C_p^2+b_2C_p+c_1R_{sa}+c_2R_{sa}$ 。

最终得到均匀布设模式下结构差异性人工鱼礁上升流体积与鱼礁结构指标的定量关系:

$$V_u=0.448R_u^{-1.679}-C_p(29.868C_p-6.921)+R_{sa}(56.18R_{sa}-35.42)$$

式中, R_u 为目标速度比, C_p 为鱼礁透空率, R_{sa} 为迎流面相对截面积。模型主要分为 3 项, 分别为目标速度比项 $0.448R_u^{-1.679}$ 、鱼礁透空率项 $C_p(29.868C_p-6.921)$ 和迎流面相对截面积项 $R_{sa}(56.18R_{sa}-35.42)$, 3 项均为各自独立项, 彼此间无相互联系。结构差异性单位鱼礁上升流相对体积效应模型适用于人工鱼礁结构重要参数的选择。以实际人工鱼礁结构特性为基础, 上升流体积效应模型各参数取值范围分别为: 流场目标速度比取值为大于 0 的任意实数; 人工鱼礁透空率取值范围为 $0 < C_p \leq 1$; 相对截面积取值范围为 $0 \leq R_{sa} \leq 1$ 。

在对模型极限值分析中, 目标速度比项值最小为 0; 当单位鱼礁透空率值越大, 透空率项值越小, 对上升流相对体积增加量越大; 当鱼礁迎流面相对截面积值为 0 时, 相对截面积项值越大, 对上升流相对体积增加量越大, 当相对截面积值为 0.795 时, 相对截面积项值最小, 对上升流相对体积正效应越小。因此, 若投放正方体鱼礁时, 当以上升流相对体积为选择依据, 对应最佳相对体积状态的鱼礁结构特征指标参数选择规律分别为: 鱼礁透空率值越大越好, 建议当迎流面相对截面积小于 0.795 时, 值越大越好; 当大于 0.795 时, 值越小越好。

用上升流相对体积回归模型求解出的各单位鱼礁结构指标下相应流场相对体积拟合值与模拟值数据对比结果及对应残差(图 8)。通过回归模型计算的上升流相对体积值与数值实验值基本一致, 残差数据显示, 上升流体积模型不存在异常值点, 模型拟合效果较好。上升流相对体积回归模型规划值与模拟值相对误差为 18.72%, $R^2=0.90$, 说明此回归模型拟合效果较好, $F=188$, 大于 $F_{\alpha(0.1)}=2.17$, 说明回归方程总体显著成立, 该方程可以较准确地反映单体结构差异特征指标对上升流流场体积的影响效果与规律。

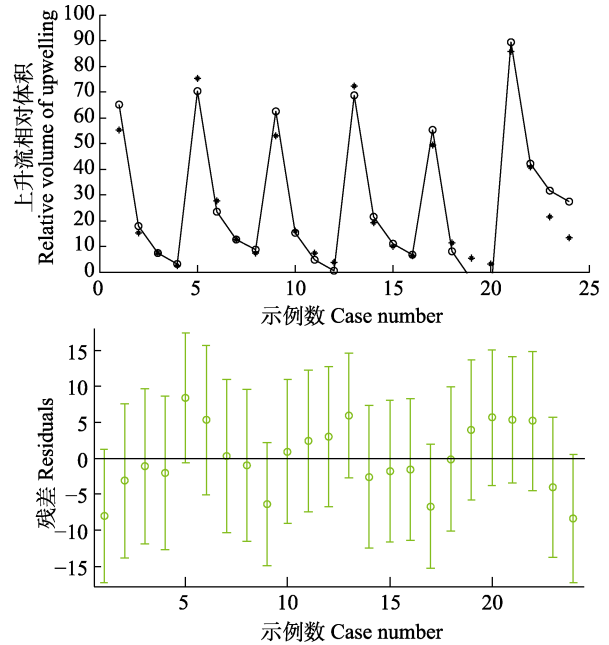


图 8 上升流相对体积回归值与残差
Fig.8 Relative volume of upwelling regression and residual

2.4 背涡流体积效应模型

图 9~图 12 分别为目标速度比、空方体积比、透空率和相对截面积 4 个鱼礁结构指标与背涡流相对体积的拟合效果图。如图 9 所示, 背涡流相对体积随着目标速度比增加呈现逐渐增加的二次函数关系, 模型基本形式为 $V_{u1}=1830R_u^2-128R_u+56$, $R^2=1$; 背涡流相对体积随鱼礁空方体积比呈现先增加后降低的二次函数关系, 模型基本形式为 $V_{u2}=-4.8R_v^2+32.936R_v+44.756$, $R^2=0.89$; 背涡流相对体积随透空率增加同样呈现先增加后降低的二次函数关系, 模型基本形式为 $V_{u3}=-2.9C_p^2+20.41C_p+54.22$, $R^2=0.88$; 背涡流相对体积随着迎流面相对截面积取值增加呈先降低后增加的二次函数关系, 模型基本形式为 $V_{u4}=7.139R_{sa}-48.839R_{sa}+137.33$, $R^2=0.92$; 根据单元回归模型建立背涡流体积综合评价模型, 模型公式的一般形式为 $V_b=a_1R_u^2+a_2R_u+b_1C_p^2+b_2C_p+c_1R_v^2+c_2R_v+d_1R_{sa}+d_2R_{sa}$ 。

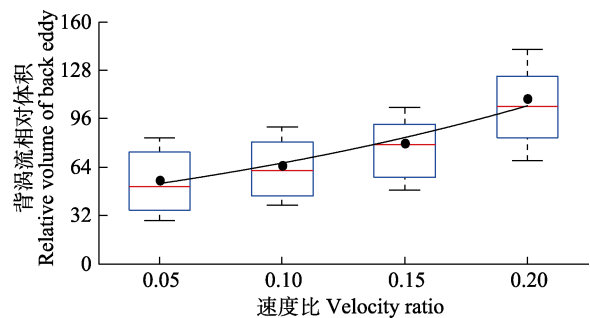


图 9 速度比与背涡流相对体积拟合效果
Fig.9 Curves of velocity ratio versus relative back eddy volume

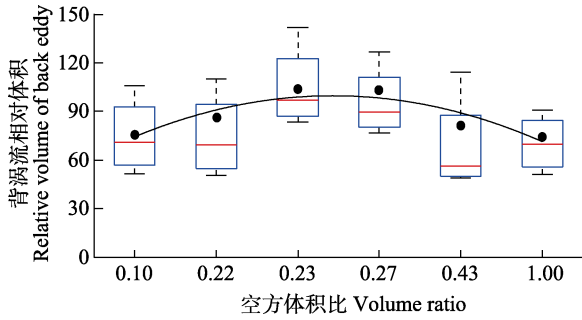


图 10 空方体积比与背涡流相对体积拟合效果
Fig.10 Curves of volume ratio versus relative back eddy volume

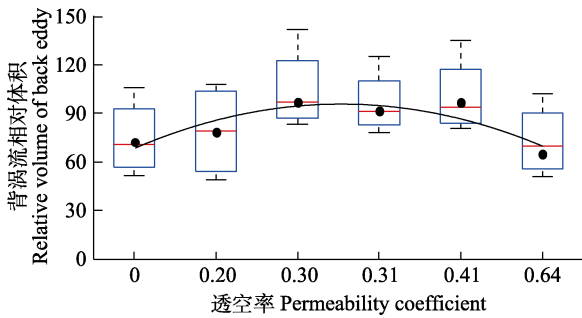


图 11 透空率与背涡流相对体积拟合效果
Fig.11 Curves of permeability coefficient versus relative back eddy volume

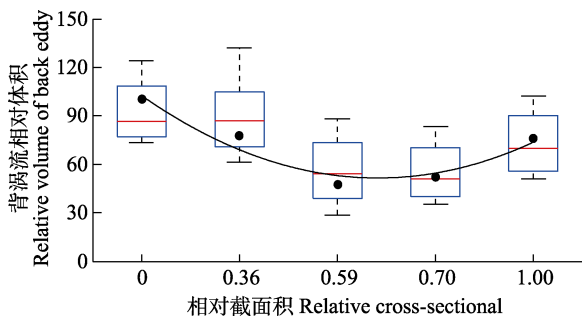


图 12 相对截面积与背涡流相对体积拟合效果
Fig.12 Curves of relative cross versus sectional area-relative back eddy volume

最终得到结构差异性单位鱼礁建设模式下流场背涡流相对体积与单位鱼礁结构指标的定量关系:

$$V_b = R_u(1830R_u - 128) - R_v(95R_v - 105) + C_p(138C_p - 154) - R_{sa}(418R_{sa} - 180)$$

式中, R_u 为目标速度比, R_v 为空方体积比, C_p 为鱼礁透空率, R_{sa} 为鱼礁迎流面相对截面积。背涡流相对体积模型主要包括 4 项, 分别为目标速度比项 $R_u(1830R_u - 128)$ 、空方体积比项 $R_v(95R_v - 105)$ 、透空率项 $C_p(138C_p - 154)$ 和迎流面相对截面积项 $R_{sa}(418R_{sa} - 180)$, 4 项同样为各自独立项, 彼此间无相互联系。背涡流相对体积规模效应模型中, 鱼礁结构特征指标参数取值范围分别为: 流场目标速度比取

值为大于 0 的任意实数, 空方体积比取值范围为 $0 < R_v \leq 1$, 人工鱼礁透空率取值范围为 $0 < C_p \leq 1$, 相对截面积取值范围为 $0 \leq R_{sa} \leq 1$ 。

在对模型极限值分析中, 目标速度比项取值最小值为 0; 当鱼礁空方体积为 0.905~1 时, 随空方体积比增加, 空方体积比项值越大; 空方体积比为 1 时取得最大值, 对背涡流相对体积增加量越小; 当空方体积比为 0.452 时, 空方体积比项值最小, 对背涡流相对体积增加量则越大; 当鱼礁透空率取值在 0.95~1 之间时, 随着透空率取值增加, 透空率项取值越大, 相应对背涡流体积增加量越大; 当透空率为 0.476 时, 透空率项值最小, 对背涡流相对体积增加量则越小; 当鱼礁迎流面相对截面积值越大, 相对截面积项取值越小, 对背涡流相对体积增加量越大。因此, 若投放正方体鱼礁时, 当以背涡流相对体积为选择依据, 对应最佳相对体积状态的鱼礁结构特征指标参数选择规律分别为: 建议当空方体积比小于 0.452 时, 取值越大越好; 当空方体积比大于 0.452 时, 取值越小越好; 建议优先选择空方体积比为 0.452 的鱼礁结构; 建议当透空率小于 0.476 时, 取值越小越好, 当透空率大于 0.476 时, 取值越大越好, 建议避免选择透空率为 0.476 的鱼礁结构; 相对截面积建议取值越大越好。

用结构差异性单位鱼礁背涡流相对体积回归模型求解出的各单位鱼礁规模指标下相应流场相对体积拟合值与模拟值数据对比结果及对应残差见图 13。通过回归模型计算的背涡流相对体积值与数值实验

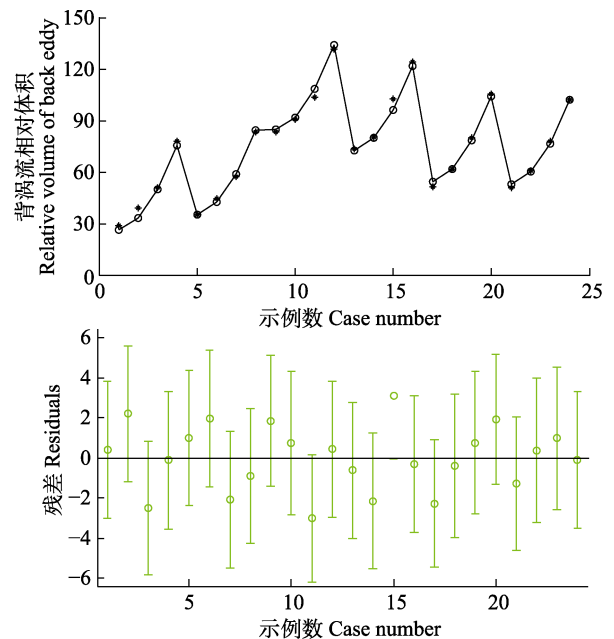


图 13 背涡流相对体积回归值与残差
Fig.13 Relative volume of back eddy regression and residual

值基本一致,残差数据显示背涡流相对体积模型不存在异常值点,模型拟合效果较好。背涡流相对体积回归模型规划值与模拟值相对误差值为3.5%, $R^2=0.99$,说明回归拟合效果较好, $F=1500$,大于 $F_{\alpha(0.1)}=2.17$,说明总体回归方程显著成立,则该方程可较准确的反映结构差异性单位鱼礁规模指标对流场体积的影响效果与规律。

3 讨论

人工鱼礁单体结构差异直接影响鱼礁建设的经济投入与作用效果(Perkol *et al.*, 2006; Ajemian *et al.*, 2015; 王佳浩等, 2020),合理选择鱼礁单体结构是保证经济、高效人工鱼礁建设的基础。本研究通过对6种内部结构差异性正方体鱼礁结构的单位鱼礁流场效应进行分析,获得不同礁体结构人工鱼礁流场特征规律。根据对鱼礁结构特征与流场效应间的相互关联,进一步通过定量方式建立上升流与背涡流流场体积规模效应模型,提出基于正方体结构鱼礁以流场体积效应最优化为目标的鱼礁结构特征指标参数值选择建议。具体如下:当以上升流相对体积最优为建设依据时,鱼礁透空率取值越大越好;当迎流面相对截面积小于0.795时,迎流面截面积取值越大越好;当大于0.795时,迎流面截面积取值越小越好;避免选择相对截面积为0.452的鱼礁结构。当以背涡流相对体积最优为选择依据时,建议当空方体积比小于0.452时,空方体积比取值越大越好;当空方体积比大于0.452时,空方体积比取值越小越好;优先选择空方体积比为0.452的鱼礁结构;当透空率小于0.476时,透空率取值越小越好;当透空率大于0.476时,透空率取值越大越好;避免选择透空率为0.476的鱼礁结构;相对截面积取值越大越好。

本研究中,实体型人工鱼礁的上升流与背涡流相对体积、面积、高度和速度均为6种礁中最大值,框架型鱼礁为最小值,其中实体型鱼礁自身空方体积比最大且透空率最小,而框架型鱼礁正相反,说明开口形状相同时,仅以空方体积比和透空率2个指标可以代表礁体的结构差异,且透空率越小,流场效应越弱(宋朝祥, 2018; 庞运禧等, 2017)。而大字型、米字型、交叉型和回字型鱼礁内部结构形状不同,单位鱼礁流场特征随空方体积比和透空率的变化存在差异,说明当鱼礁单体不仅开口比大小存在差异,且其内部结构特征也不同,空方体积比与透空率不足以表示流场特征的变化规律(Jiang *et al.*, 2016),因此,本研究首次提出表征礁体结构差异特征的指标迎流面相对截

面积,并得出此3个指标可较为准确地评价流场特征的结论。同时得出,单体内部构建位于礁体内部的鱼礁流场效应高于构建位于外部的鱼礁结构,此观点为人工鱼礁结构设计提供理论参考。

参 考 文 献

- AJEMIAN M J, WETZ J J, SHIPLEY-LOZANO B, *et al.* An analysis of artificial reef fish community structure along the Northwestern Gulf of Mexico Shelf: Potential impacts of “Rigs-to-Reefs” programs. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0126354
- DONG D X. The multivariate nonlinear regression model based on MATLAB. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences)*, 2009, 29(2): 45–48 [董大校. 基于MATLAB的多元非线性回归模型. 云南师范大学学报(自然科学版), 2009, 29(2): 45–48]
- FARIÑAS-FRANCO J M, ROBERTS D. Early faunal successional patterns in artificial reefs used for restoration of impacted biogenic habitats. *Hydrobiologia*, 2014, 727(1): 75–94
- FU D W, LUAN S G, ZHANG R J, *et al.* Two-way analysis of variance of effects of cut-opening ratio and surface shape facing flowing in artificial fish-reefs on the flowing field. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(3): 274–278 [付东伟, 栾曙光, 张瑞瑾, 等. 人工鱼礁开口比和迎流面形状对流场效应影响的双因素方差分析. 大连海洋大学学报, 2012, 27(3): 274–278]
- GUO Y, ZHANG S Y, LIN J. Flow field efficiency of Mi-zi artificial reefs in different construction modes based on numerical experiments. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 2025–2038 [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. 水产学报, 2019, 43(9): 2025–2038]
- GUO Y, ZHANG S Y, LIN J. Study on unit reef construction mode based on upwelling effects. *South China Fisheries Science*, 2020, 16(5): 71–79 [郭禹, 章守宇, 林军. 基于上升流效应的单位鱼礁建设模式研究. 南方水产科学, 2020, 16(5): 71–79]
- JIANG Z Y, GUO Z S, ZHU L X, *et al.* Structural design principle and research progress of artificial reef. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1881–1889 [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. 水产学报, 2019, 43(9): 1881–1889]
- JIANG Z Y, LIANG Z L, ZHU L X, *et al.* Numerical simulation of effect of guide plate on flow field of artificial reef. *Ocean Engineering*, 2016, 116: 236–241
- KIM D, JUNG S, KIM J, *et al.* Efficiency and unit propagation indices to characterize wake volumes of marine forest artificial reefs established by flatly distributed placement models. *Ocean Engineering*, 2019, 175: 138–148

- KIM D, WOO J, YOON H S, *et al.* Efficiency, tranquillity and stability indices to evaluate performance in the artificial reef wake region. *Ocean Engineering*, 2016, 122: 253–261
- KIM D, WOO J, YOON H S, *et al.* Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs. *Ocean Engineering*, 2014, 92: 83–91
- LI B D. Discussion on the direction of artificial reef construction in China from the construction of artificial reef in Japan. *Marine Fisheries*, 1985(6): 248–253 [李豹德. 从日本人工鱼礁建设探讨我国鱼礁建设的方向. *海洋渔业*, 1985(6): 248–253]
- 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. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010a, 19(6): 836–840 [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. *上海海洋大学学报*, 2010a, 19(6): 836–840]
- LI J, ZHANG S Y. The comparison between numerical simulation and water channel experiment on a Mi-zi artificial reef. *Journal of Fisheries of China*, 2010b, 34(10): 1587–1594 [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. *水产学报*, 2010b, 34(10): 1587–1594]
- LI S, DU Y J. Model of concrete strength prediction based on multivariate nonlinear analysis. *Concrete*, 2016(3): 44–46 [李松, 杜应吉. 基于多元非线性分析的混凝土强度预测模型. *混凝土*, 2016(3): 44–46]
- LIU H Y, YANG C J, ZHANG P D, *et al.* An Ecopath evaluation of system structure and function for the Laoshan Bay artificial reef zone ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3926–3936 [刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 等. 基于 Ecopath 模型的崂山湾人工鱼礁区生态系统结构和功能研究. *生态学报*, 2019, 39(11): 3926–3936]
- PANG Y X, LI F C, LI Y. Study on three-dimensional numerical simulation of flow field effect of multi-aperture artificial fish reef under identical penetration rate. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(2): 133–141 [庞运禧, 李芳成, 李尧. 同透空率下多孔人工鱼礁流场效应的三维数值模拟研究. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2): 133–141]
- PERKOL-FINKEL S, SHASHAR N, BENAYAHU Y. Can artificial reefs mimic natural reef communities? The roles of structural features and age. *Marine Environmental Research* 2006, 61: 121–135
- SONG C X. Study on the parameterization design method of three pyramidal artificial reefs based on Revit. Master's Thesis of Hainan University, 2018 [宋朝祥. 基于 Revit 的三棱锥型人工鱼礁参数化设计方法研究. 海南大学硕士研究生学位论文, 2018]
- 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. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(3): 40–48 [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. *渔业科学进展*, 2020, 41(3): 40–48]
- WANG L, HUANG C H. Research of color difference model of multivariate regression based on MATLAB. *Computers and Applied Chemistry*, 2008, 25(8): 1015–1018 [汪岚, 黄彩虹. 基于 MATLAB 色差预测多元回归模型的研究. *计算机与应用化学*, 2008, 25(8): 1015–1018]
- WANG Z, GONG P H, GUAN C T, *et al.* Effect of different artificial reefs on the community structure of organisms in Shique Beach of Qingdao. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(4): 163–171 [王震, 公丕海, 关长涛, 等. 青岛石雀滩海域人工鱼礁材料对附着生物群落结构的影响. *渔业科学进展*, 2019, 40(4): 163–171]
- XIAO R. Numerical simulation on features of flow field and transport of nutrient around hollow artificial reefs. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2015 [肖荣. 镂空型人工鱼礁流场效应及营养盐运输的数值模拟研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2015]
- YANG H S. Construction of marine ranching in China: Reviews and prospects. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(7): 1133–1140 [杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望. *水产学报*, 2016, 40(7): 1133–1140]
- YU D Y, YANG Y H, LI Y J. Research on hydrodynamic characteristics and stability of artificial reefs with different opening ratios. *Periodical of Ocean University of China*, 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]

(编辑 马瑾艳)

Flow Field Effect of Cube Reef Monocase of Different Structure

GUO Yu¹, QIN Chuanxin^{1,2①}, ZHANG Shouyu³

- (1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, National Agricultural Experimental Station for Fishery Resources and Environment, Dapeng, Guangzhou, Guangdong 510300, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, Guangdong 511458, China;
3. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract The differences in artificial reef structure is one of the main factors affecting the scale effect of the flow field. We selected six widely-used types of reef monocases, namely Da-zi, Mi-zi, Hui-zi, Frame, Cross, and Solid artificial reefs, to study the influence of reef body structure characteristics on the flow field effect in a uniform layout model and further establish the scale effect model of structurally different unit reefs. The results showed that, based on the law of flow field effect, the indices of reef structure characteristics were volume ratio, permeability coefficient, and relative cross-sectional area of reef monocase. The volume effect model of upwelling was $V_u=0.448R_u^{-1.679}-C_p(29.868C_p-6.921)+R_{sa}(56.18R_{sa}-35.42)$, and the back eddy volume model was $V_b=R_u(1830R_u-128)-R_v(95R_v-105)+C_p(138C_p-154)-R_{sa}(418R_{sa}-180)$. Finally, based on the volume effect model of the flow field, we propose suggestions for selecting structural parameters of the reef body, which provides reasonable parameter guidance for the structural design of an optimal reef based on the flow field volume.

Key words Flow field effect; Unit reef; Volume effect model; Numerical experiment; Cube reef monocase

① Corresponding author: QIN Chuanxin, E-mail: qincx@scsfri.ac.cn