

文章编号: 1000-0615(2019)09-2025-14

DOI: 10.11964/jfc.20190511800

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

郭禹, 章守宇*, 林军

(上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘要: 人工鱼礁投放规模是鱼礁建设的核心问题之一, 其中礁体数量与布设间距不仅表征了鱼礁规模的范围和密度, 而且也决定着人工鱼礁流场效率。本研究采用数值实验方法, 对典型结构边长为 l 的米字型人工鱼礁在4种投放量(2×2 、 3×3 、 4×4 和 5×5)、7种布设间距($0.1l$ 、 $0.5l$ 、 $1.0l$ 、 $1.5l$ 、 $2.0l$ 、 $3.0l$ 和 $4.0l$)下的流场相对体积、相对高度、相对长度等流场效率特性进行比较分析。结果显示, 当上升流目标流速比分别为小于0.10、0.10~0.15和大于0.15倍时, 上升流流场存在协同效应的最大布设间距分别为 $4.0l$ 、 $3.0l$ 、 $2.0l$, 背涡流目标速度比下最大间距均为 $3.0l$; 人工鱼礁投放量越多, 上升流与背涡流相对体积越大, 平均相对体积增长率越低, $0.5l$ 布设间距的上升流相对体积与鱼礁单体相对流场体积最大, $1.5l$ 布设间距的背涡流相对体积与鱼礁单体相对流场体积最大; 上升流相对高度随投放量增加以1.01倍速率增加, 随布设间距增加以0.90倍速率降低, 背涡流相对长度随布设间距的增加先增后降, 相对长度最大值位于 $1.0l$ 处。

关键词: 流场效率; 数值实验; 相对体积; 相对高度; 相对长度; 米字型鱼礁; 海洋牧场

中图分类号: S 931

文献标志码: A

人工鱼礁以其良好的海洋生态修复与渔业资源养护作用被广泛应用于全国各大海洋牧场工程建设中^[1-2], 成为海洋牧场建设的设施基础。人工鱼礁建设通过底质重构与流场改造作用达到增殖养护渔业资源的终极目标, 一方面礁体为附着生物提供硬质附着基, 进而为底层游泳生物提供饵料基础; 另一方面人工鱼礁建设引起海底起伏, 并且礁体自身的多样性结构形成复杂的流场区, 流场通过上升流与背涡流效应改变海域营养盐与底泥粒径^[3-5], 以食物供应与生境改造的形式达到增殖浮游生物、中上层游泳生物与底栖生物资源的作用^[6-9]。随着人工鱼礁建设效果的日渐突出, 越来越多的沿海地区开始大规模投放^[10], 截至2018年底, 我国沿海地区人工鱼礁总投放量约为8 325万空 m^3 , 随着人工鱼礁建设资金投入的增加与规模的陆续扩大, 人类将研究方向转为对人工鱼礁合理建

设规划与设计问题的思考, 努力实现“有的放矢”、“物尽其用”的, 生态与经济效应并存的人工鱼礁建设模式。

确定建礁效果评价标准、方式与模型是规划人工鱼礁建设的前提与基础。研究者通过调查建礁前后渔业资源变化和建礁区流场效应, 直接评价建礁效果^[2, 11-13]。关于人工鱼礁流场效应研究方法主要有普通水槽实验法^[4]、风洞实验法^[5]、PIV(粒子图像测速)水槽实验^[16-17]和数值实验方法^[18], 其中又以快捷、准确、耗资少的数值实验方法被广泛使用。崔勇等^[19]通过数值实验分析2个正方形实体鱼礁纵向布设时礁体间涡流面积随布设间距的变化关系, 这种礁体间流场效应研究有利于分析人工鱼礁对I型鱼类的养护作用; 关长涛等^[20]、Zheng等^[21]分别研究了2个三圆管与星体型人工鱼礁单体横、纵向布设间距差异对流场效应的影响, 以上升流与背涡流高

收稿日期: 2019-05-22 修回日期: 2019-07-10

资助项目: 藻类产业技术体系专项(CARS-50); 公益性行业(农业)科研专项(201303047)

通信作者: 章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

度、面积及流速为流场规模与强度标准,分析了横纵向最佳间距参数;庞运禧等^[22]对箱型、梯形台及三棱体3种礁型鱼礁在3×3个投放量、均匀分布模式下3种布设间距的流场变化进行分析,一方面说明人工鱼礁迎流面角度设置对流场规模有影响,另一方面又以增加投放量的角度,说明布设间距对上升流与背涡流规模的决定性作用。

现有关于流场效应的分析主要以上升流和背涡流为研究对象,以流场规模(面积与高度)与强度(相对速度)为效应评价指标,分别通过分析单位鱼礁附近小尺度涡的流场特性及固定投放量流场面积、高度与速度随布设间距变化规律两方面进行说明,其结果对人工鱼礁建设具有一定参考性,但研究仅从单一因素(布设间距)出发,未加入在实际建设中代表单位人工鱼礁建设规模指标的投放量变化与流场效应差异的综合影响研究。不同海域单位人工鱼礁投放量具有一定要求,日本单位人工鱼礁投放量最低标准为400空m³,东海区单位人工鱼礁投放量为700空m³左右^[23],而已有研究中单位人工鱼礁投放量均较少,未达标准。因此本研究选取108、243、432和675空m³的4种投放量,以国内通用的等间距均匀建礁方式为前提,以东海区典型的米字型人工鱼礁为对象,以ANSYS流场分析软件为手段,采用大涡模拟模型(large eddy simulation, LES),以流场相对体积、高度与长度的大尺度宏观特征作为流场效率的评价指标,通过数值实验综合分析4种投放量与7种布设间距对上升流与背涡流流场效率的影响,旨在为经济、高效的人工鱼礁建设提供理论依据与指导。

1 数值模拟实验方法

1.1 控制方程与湍流方程

根据实际海域中人工鱼礁流场特性,假设流体为不可压缩、非定常、黏性流动。LES方程通过空间域N-S方程滤掉时间项得出,用瞬时的N-S方法直接模拟湍流中的大尺度涡,有效滤掉比过滤网格小的涡旋,小涡对大涡的影响通过近似的模型获得,从而得到大于网格尺度涡的动量方程^[24]。根据过滤尺寸 G ,得出过滤后的瞬时变量 $\bar{\phi}$ 的计算表达式:

$$\bar{\phi} = \int_D \phi(x') G(x, x') dx'$$

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, x' \in v \\ 0, x' \notin v \end{cases}$$

$$\bar{\phi} = \frac{1}{V} \int_D \phi(x') dx'$$

式中, D 为流场区域, x' 为过滤前流动区域中的空间坐标, x 为过滤后大尺度空间坐标, G 为决定过滤尺寸的函数, V 为计算单元体积。经过过滤的瞬时变量处理下的不可压缩流体、瞬时状态下的连续方程与N-S方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

式中, ρ 为流体密度,kg/m³; \bar{u}_i , \bar{u}_j ($i, j=1, 2, 3, i \neq j$)为过滤后的空间坐标系下 X 、 Y 和 Z 的3个方向的平均流速,m/s; \bar{p} 为过滤后的平均压强,Pa; μ 为动力黏度,Pa·s; τ_{ij} 为亚格子应力,表示为 $\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ 。

1.2 数值模拟模型

人工鱼礁的选择主要取决于建礁目的、水文与地理条件,本实验采用适合于改变海流且内部结构简单的米字型礁体(图1)为模拟对象,米字型礁体以其稳定性好而被广泛应用于东海人工鱼礁建设中。米字型人工鱼礁单体由钢筋混凝土构成3 m×3 m×3 m的正方体(鱼礁单体边长 l 为3 m),人工鱼礁单体体积为27空m³,通透特性为27.37%(混凝土体积/空方体积),外框宽0.25 m,中间交错形方柱宽0.3 m。以单位人工鱼礁投放量为基础变量,选取4种投放量分别为108、243、432和675空m³,按人工鱼礁数量分成4(2×2)、

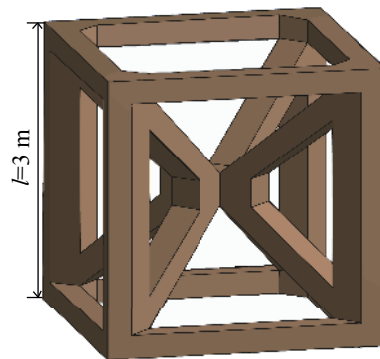


图1 米字型人工鱼礁

Fig. 1 Mi-zi artificial reefs of start shape

9(3×3)、16(4×4)、25(5×5)4种单位人工鱼礁模式, 每种投放量的礁体以7种布设间距进行划分, 分别为人工鱼礁单体边长的0、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0和4.0倍, 文中以0~4.0 *l*表示, 具体布设方式如图2所示。

1.3 计算域与边界条件

由于本研究是对多种布设模式下单位人工鱼礁的流场模拟分析, 计算域范围不能只考虑以鱼礁单体边长的倍数为设计准则, 根据多次

模拟分析, 本研究将4种投放量下单位人工鱼礁边长长度*L*作为基础参数, 计算域范围设计成单位鱼礁前3*L*、后15*L*, 左、右各宽3*L*, 计算域的高度设为10倍鱼礁单体边长(30 m), 以投放量为108空m³的单位鱼礁在布设间距为1.0 *l*的布设模式为例, 模拟实验计算域如图3所示。

数值模拟中, 入口边界条件设为速度入口 (velocity-inlet), 出口边界条件设为速度出口 (velocity-outlet), 来流速度取人工鱼礁区一般流

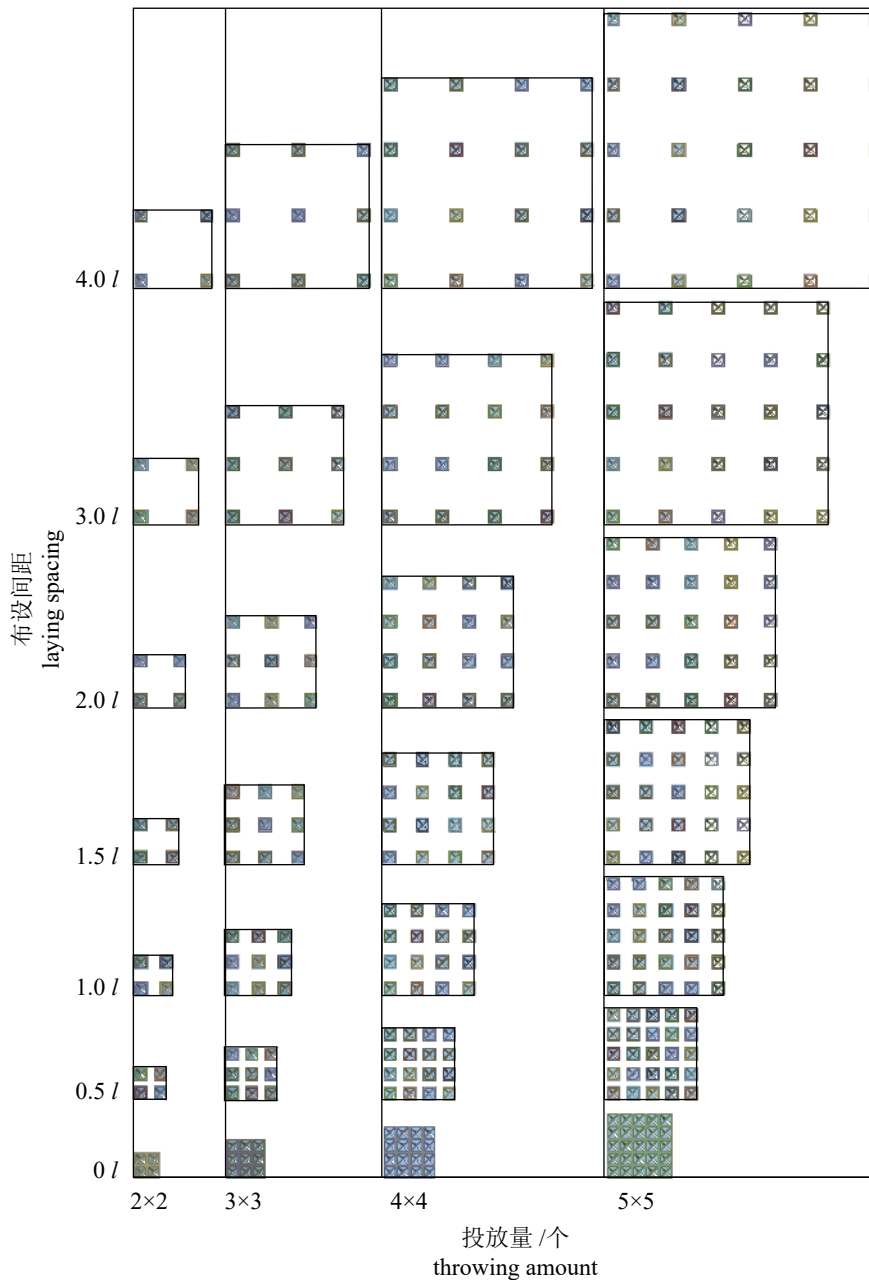


图 2 单位鱼礁组合示意图

Fig. 2 Sketch of artificial reefs assemblage

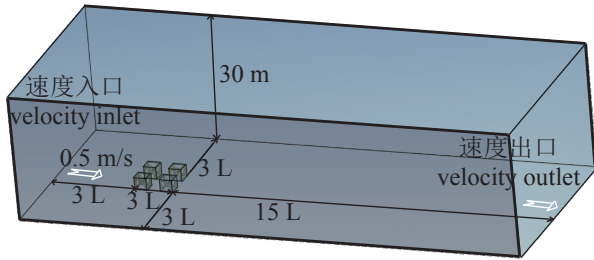


图3 数值模拟实验计算域分布

Fig. 3 Distribution of calculation domain for numerical simulation

速0.5 m/s, 来流方向垂直于单位人工鱼礁正向, 出口速度设为-0.5 m/s; 计算域底面和人工鱼礁体表面设为壁面(wall)边界条件, 采用无滑移边界参数, 侧面和上顶面设为对称边界条件(symmetry)。模拟中流体密度设定为海水典型密度1 024 kg/m³, 重力参数为9.81 m/s²。人工鱼礁计算域三维流场采用四面体非结构化网格, 礁体表面及周围进行网格加密, 随人工鱼礁数量的增加, 网格数量增多, 最终网格数量为4×10⁶~12×10⁶。

关于米字型人工鱼礁的数值实验已在水槽试验中验证其准确性与可行性, 上述所有模型构建、网格划分与数值模拟实验均在ANSYS 16.1中完成。

1.4 流场效率评价指标与方法

人工鱼礁流场效应主要通过迎流面的上升流与背流面的背涡流产生, 流场效率评价即对上升流与背涡流空间规模的衡量, 通过分析不同人工鱼礁布设模式所产生的流场效率差异, 确立最优建礁模式。研究中选取了2个建礁工程

的代表指标, 分别为投放量与布设间距, 用于说明单位人工鱼礁的布设模式差异, 其中投放量采用人工鱼礁个数 N 表示, 布设间距采用鱼礁单体边长 l 倍数表示。同时根据人工鱼礁投放目的与增殖目标的差异, 以及需要达到的目标流场的不同效果, 选取4种速度比取值 V_r 作为上升流与背涡流区选取标准, 分别选取垂直向流速大于0.05、0.10、0.15和0.20倍来流速度为上升流区, 选取来流向速度绝对值小于0.70、0.75、0.80和0.85倍来流速度为背涡流区, 上升流与背涡流区如图4所示。研究中流场效率评价指标分别为上升流与背涡流相对体积、相对高度与相对长度。流场效率评价指标及数据分析均采用MATLAB软件计算获得, 图5为上升流与背涡流流场体积、高度与长度示意图。

流场相对体积 流场相对体积采用流场体积与鱼礁单体体积之比表示, 流场体积为目标流速的流场外围包络面所包含的体积, 分为合体积与分体积, 合体积指整个包络面的体积, 其中包含未达到上升流流速但包含在上升流区内的部分, 用于说明流场效应的总体效果; 分体积指均达到上升流流速标准的区域体积, 说明流场区内流场效应的实际控制部分。上升流与背涡流相对合体积与分体积分别表示为 V_{ut} 与 V_{ua} 、 V_{bt} 与 V_{ba} 。同时引入人工鱼礁单体相对流场体积, 用于说明每种布设模式下人工鱼礁单体的空间作用效果及利用率, 采用平均流场分体积与人工鱼礁总投放量之比表示, 上升流与背涡流人工鱼礁单体相对流场体积分别为 V_{uu} 和 V_{bu} 。

流场相对高度 流场相对高度采用流场

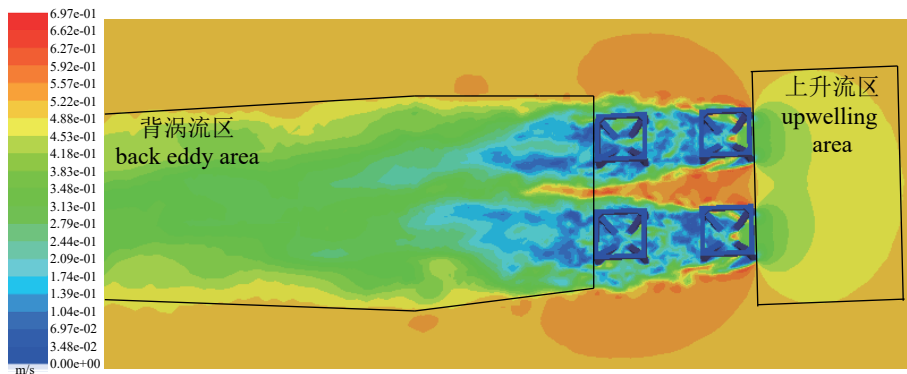


图4 人工鱼礁流场区划分

Fig. 4 Division of flow field around artificial reefs

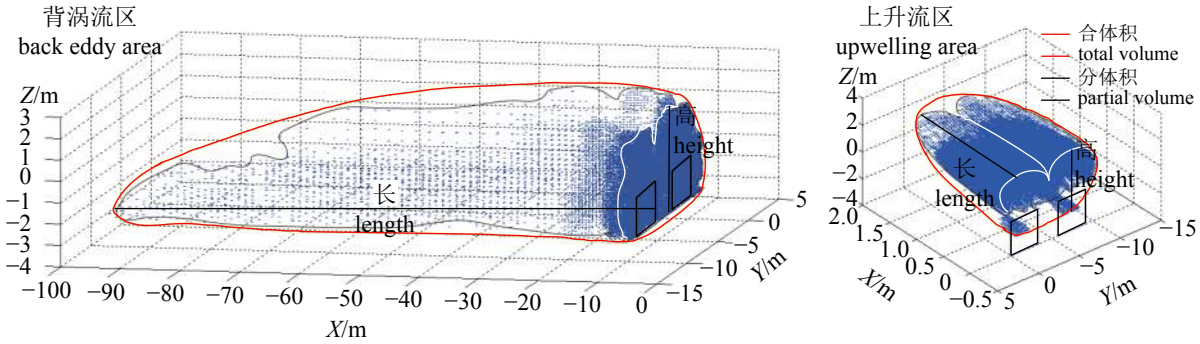


图5 流场体积、高度、长度选取标准

Fig. 5 Selection criteria of the flow field volume, height and length

高度与单位人工鱼礁高度之比表示, 流场高度以人工鱼礁底部为基准到目标流速最大高度, 用于说明垂直向的空间可达性, 上升流与背涡流相对高度分别表示为 H_u 和 H_b 。

流场相对长度 流场相对长度采用流场长度与人工鱼礁单体长度之比表示, 用于说明水平向流场的空间可达性, 上升流与背涡流相对长度分别表示为 L_u 和 L_b 。

2 结果

2.1 流场相对体积评价

人工鱼礁流场相对体积是评价流场效率的空间指标之一, 每种布设模式的单位人工鱼礁上升流与背涡流分别包括4种速度比下相对合体积与相对分体积。

上升流相对体积 图6和图7分别为4种投放量不同速度比下, 上升流流场相对合体积与相对分体积随布设间距的变化规律。上升流相对合体积随布设间距增加呈现先降后增的趋势, 当速度比小于0.05倍时, 4种投放量在3.0 l布设间距处的人工鱼礁相对合体积最小, 当速度比大于0.05倍时, 最小相对合体积均为1.5~2.0 l布设间距(图6)。而上升流相对分体积随布设间距增加呈现先增后降的趋势, 当相对分体积降低到某一间距处后将不再下降, 相对体积基本不变(图7)(图6、图7、图10和图12中每幅小图左上角的数字分别表示4种上升流速度比)。结合体积最低值位置数据, 在此相对分体积不变处布设间距, 为该布设模式下单位人工鱼礁间上升流区内相邻流场存在协同效应的最大间距, 当超过此间距, 单位人工鱼礁上升流流场互不影

响, 形成各自独立的单位鱼礁, 从而失去礁区流场协同效应。结果表明, 4种投放量中, 当目标速度比小于0.10倍, 最大布设间距为4.0 l; 当目标速度比为0.10~0.15倍, 最大布设间距为3.0 l; 当目标速度比大于0.15倍, 最大布设间距为2.0 l。

由于流场相对分体积更能表明流场区的实际作用能力, 下文上升流流场体积分析以相对分体积为依据(以下简称相对体积)。投放量越多上升流相对体积越大, 但平均相对体积增长率随投放量增加逐渐降低, 4种投放量上升流平均相对体积增长率依次为1.39、1.02、0.69和0.67(图7); 随着目标速度比增大, 对应平均相对流场体积逐渐减少, 其减少速率逐渐降低; 4种速度比下, 4种投放量人工鱼礁上升流相对体积最大值均位于0.5 l间距处。表1为4种投放量下人工鱼礁单体平均相对上升流体积, 说明人工鱼礁投放量越少, 各布设模式下人工鱼礁单体产生的流场效应越强, 对礁体利用率越高, 当布设间距为0.5 l时, 人工鱼礁单体上升流相对体积最大, 礁体流场效率最佳。

背涡流相对体积 在4种投放量不同速度比下, 背涡流相对合体积随布设间距增加逐渐增加, 布设间距为3.0 l处, 相对合体积增长率最小(图8); 背涡流相对分体积随布设间距增加呈现先增后降趋势, 当布设间距大于3.0 l时, 相对分体积基本不变(图9), 说明大于3.0 l布设间距下, 背涡流区流场间不存在协同效应, 因此满足背涡流区流场相互作用的最大布设间距为3.0 l(图8、图9、图11和图13中每幅小图左上角的数字分别表示4种背涡流速度比)。

以背涡流相对分体积为依据, 对不同布设模式下人工鱼礁背涡流流场效率进行分析。投

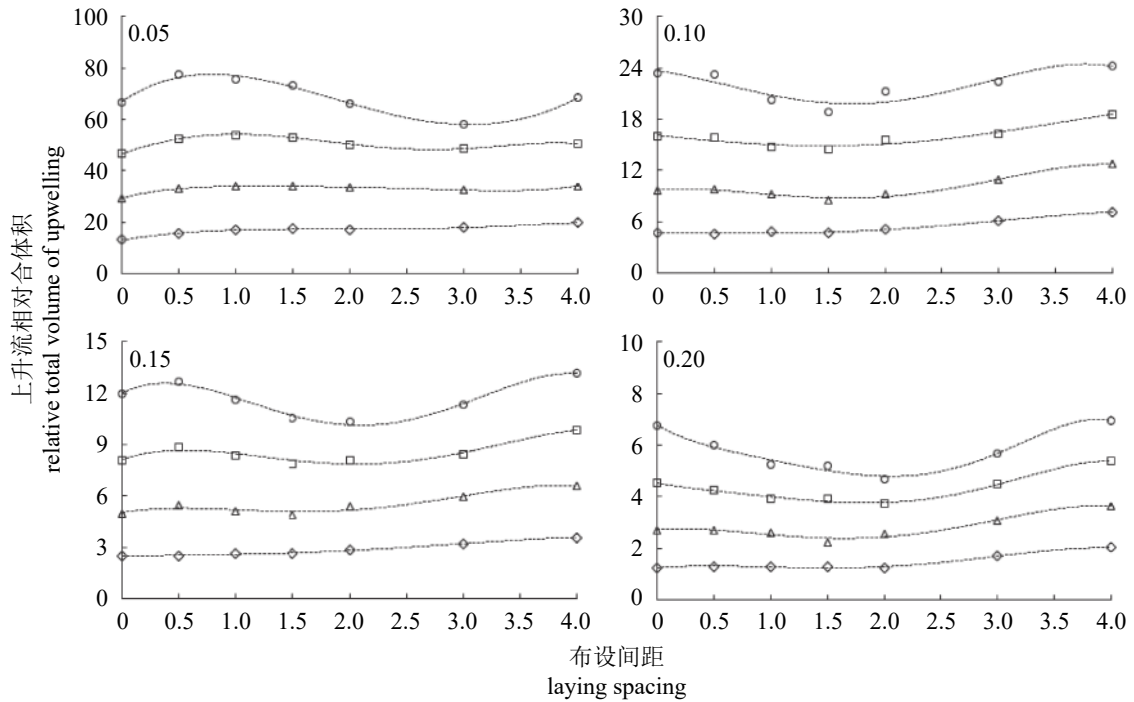


图 6 不同投放量下4种速度比鱼礁组合的上升流流场相对合体积

相对合体积: ◇. 2×2, △. 3×3, □. 4×4, ○. 5×5, 下同

Fig. 6 Relative total volume of upwelling at different throwing amount of 4 velocity ratios

Relative total volume: ◇. 2×2, △. 3×3, □. 4×4, ○. 5×5, the same below

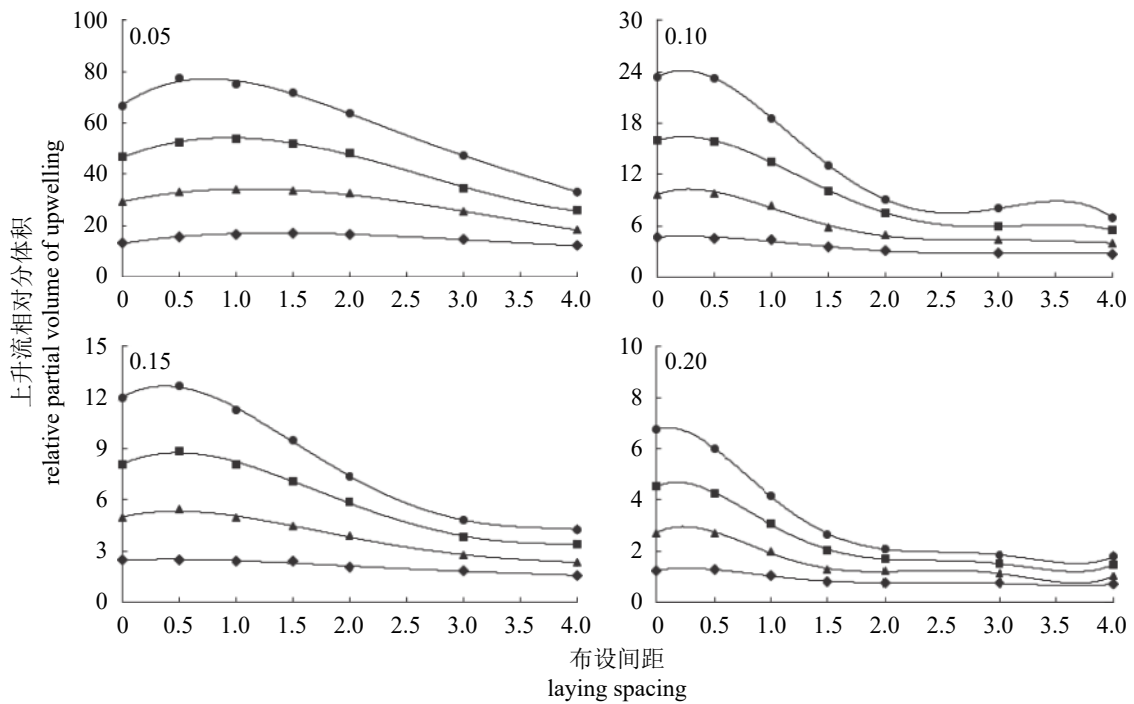


图 7 不同投放量下4种速度比鱼礁组合的上升流流场相对分体积

相对分体积: ◆. 2×2, ▲. 3×3, ■. 4×4, ●. 5×5, 下同

Fig. 7 Relative partial volume of upwelling at different throwing amount of 4 velocity ratios

Relative partial volume: ◆. 2×2, ▲. 3×3, ■. 4×4, ●. 5×5, the same below

表1 人工鱼礁单体平均相对上升流体积
 Tab.1 Average relative upwelling volume of single artificial reef

布设间距 laying spacing	上升流相对体积 relative volume of upwelling			
	2×2	3×3	4×4	5×5
0 <i>l</i>	1.34	1.30	1.18	1.09
0.5 <i>l</i>	1.55	1.43	1.29	1.20
1.0 <i>l</i>	1.52	1.39	1.25	1.11
1.5 <i>l</i>	1.53	1.29	1.14	1.00
2.0 <i>l</i>	1.44	1.22	1.02	0.85
3.0 <i>l</i>	1.27	0.95	0.73	0.62
4.0 <i>l</i>	1.08	0.72	0.58	0.47

放量越大, 相同速度比与间距下背涡流相对体积越大, 随投放量增加, 平均相对体积增长率逐渐减弱, 依次为8.66、3.68、2.21和1.79; 随着目标速度比增加, 背涡流平均相对体积逐渐增加, 其增长率逐渐增大; 4种速度比下, 4种投放量人工鱼礁背涡流相对体积最大值均位于1.5*l*布设间距处(图9)。表2为4种投放量下人工鱼礁单体背涡流平均相对体积, 说明人工鱼礁投放量越少, 各布设模式下人工鱼礁单体产生的流场

效应越强, 对礁体利用率越高, 当布设间距为1.5*l*时, 人工鱼礁单体上升流相对体积最大, 礁体流场效率最佳。

不同间距流场相对体积变化 已知布设间距对上升流与背涡流流场相对体积均有影响, 为研究不同布设间距的流场相对体积变化关系, 以0*l*不同投放量与目标速度比值的流场相对体积为基准, 分别分析0.5~4.0*l*相应流场相对体积随0*l*流场相对体积变化的关系, 结果显示以0.5~4.0*l*流场相对体积与0*l*流场相对体积均具有明显的线性相关性, 相关系数均大于0.95。随着布设间距增加, 0.5~4.0*l*上升流流场相对体积与0*l*流场相对体积相关性强度相对呈现下降趋势, 相关系数分别为1、0.99、0.98、0.97、0.95和0.95, 同时上升流相对体积增长率逐渐减弱, 增加斜率依次为1.16、1.16、1.12、1.02、0.74和0.52。6种布设间距背涡流流场相对体积均与0*l*背涡流流场相对体积存在线性相关性, 相关系数分别为0.98、0.93、0.84、0.90、0.90和0.88, 其中0.5*l*和1.0*l*流场相对体积与0*l*流场相对体积相关性更为显著, 6种布设间距背涡流相对体积增加趋势处于波动状态, 其中0.5~2.0*l*增加幅度相近, 增加斜率为0.90~1.01, 2.0和3.0*l*背涡流相

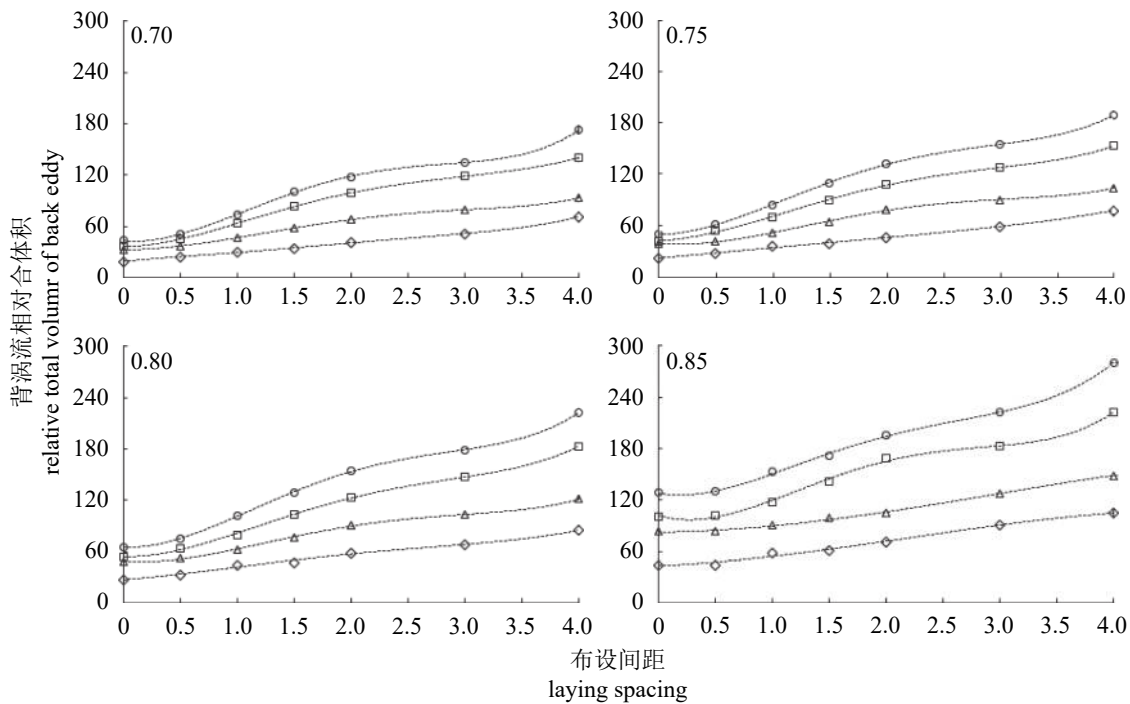


图8 不同投放量下4种速度比鱼礁组合的背涡流流场相对合体积

Fig.8 Relative total volume of back eddy at different throwing amount of 4 velocity ratios

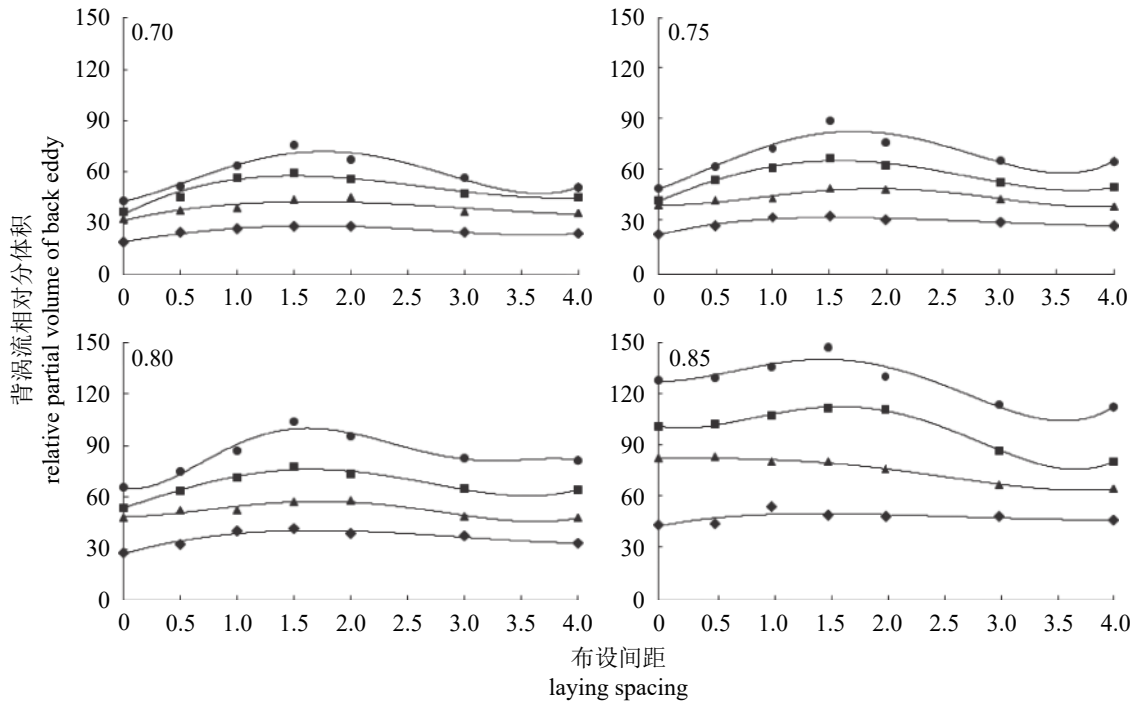


图9 不同投放量下4种速度比鱼礁组合的背涡流流场相对分体积

Fig. 9 Relative partial volume of back eddy at different throwing amount of 4 velocity ratios

表2 人工鱼礁单体平均相对上升流体积

Tab. 2 Average relative back eddy volume of single artificial reef

布设间距 laying spacing	背涡流相对体积 relative volume of back eddy			
	2×2	3×3	4×4	5×5
0 l	7.14	5.67	3.67	2.88
0.5 l	8.14	6.02	4.17	3.19
1.0 l	9.31	6.00	4.66	3.60
1.5 l	9.67	6.45	4.96	4.23
2.0 l	9.26	6.37	4.76	3.69
3.0 l	8.81	5.49	3.96	3.20
4.0 l	8.25	5.24	3.78	3.11

对体积增加幅度明显下降，斜率为0.75和0.74。

上述结果说明大于0 l的单位人工鱼礁上升流与背涡流相对体积均与0 l流场相对体积相关，可以通过0 l流场相对体积估计相应布设模式下上升流与背涡流相对体积，为单位人工鱼礁规划建设提供以流场体积为标准的理论依据。

2.2 流场相对高度评价

流场相对高度表示流场在垂直向可达性的大小，随投放量增加，上升流相对高度逐渐增

大，4种速度比下平均增加速率相同，约为1.01；上升流相对高度随着目标速度比增加而降低，降低速率逐渐减小，依次为3.67、2.51、2.04和1.76；上升流相对高度随布设间距增加而降低，降低速率约为0.90倍，当降低到某一间距时相对高度不变，此不变处布设间距分别为3.0、2.0、2.0和1.5 l，这一相对高度为目标速度比下鱼礁单体上升流相对高度，此时上升流间相互独立；随着速度比取值增大，布设间距对上升流相对高度影响变小，相同速度比下，上升流相对高度下降趋势随投放量增加而增大(图10)。

相同目标速度比的4种投放量下单位人工鱼礁在布设间距为0 l时，其背涡流相对高度最大，当速度比取值大于0.80时，0 l下相对高度最大值更为显著，当布设间距为0.5~4.0 l时，各布设模式下上升流相对高度值均分布于1.68~1.74(图11)。

2.3 流场相对长度评价

流场相对长度表示流场水平向空间可达性的大小，随投放量增加，上升流相对长度逐渐增大，平均增加速率逐渐降低；上升流相对长度随着目标速度比增加而降低，降低速率逐渐减小，依次为2.00、1.16、0.79和0.58；上升流相对长度随布设间距增加而降低；随着速度比取

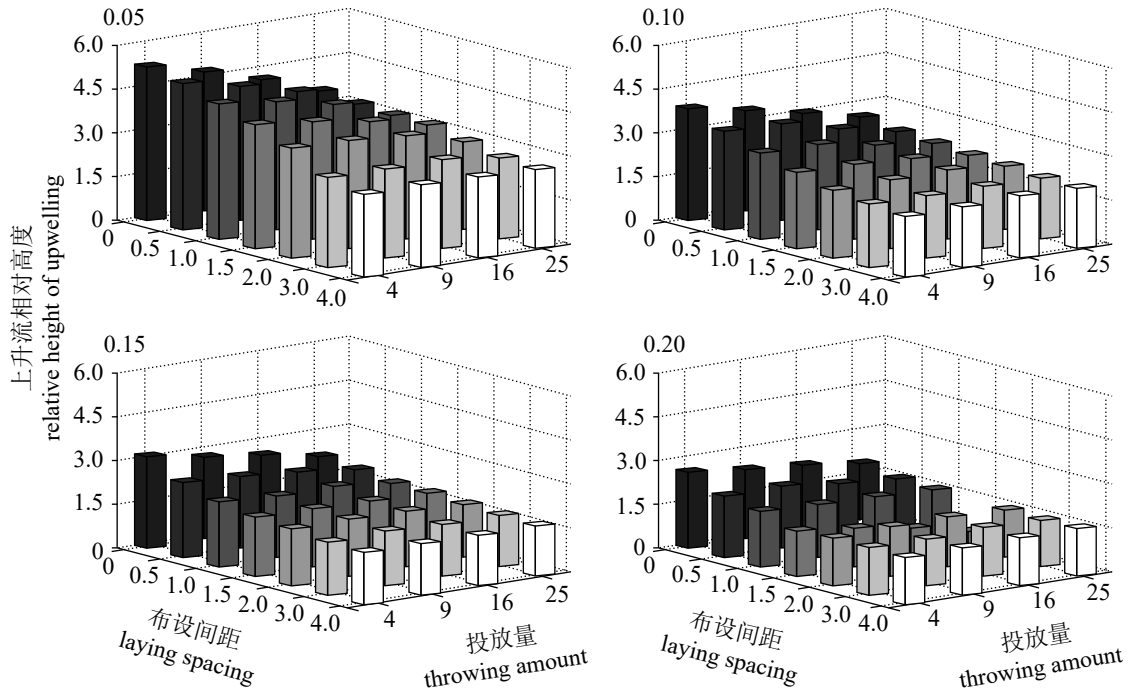


图 10 不同投放量下上升流相对高度随布设间距的变化

Fig. 10 Relative height of upwelling varying with laying spacing at different throwing amount

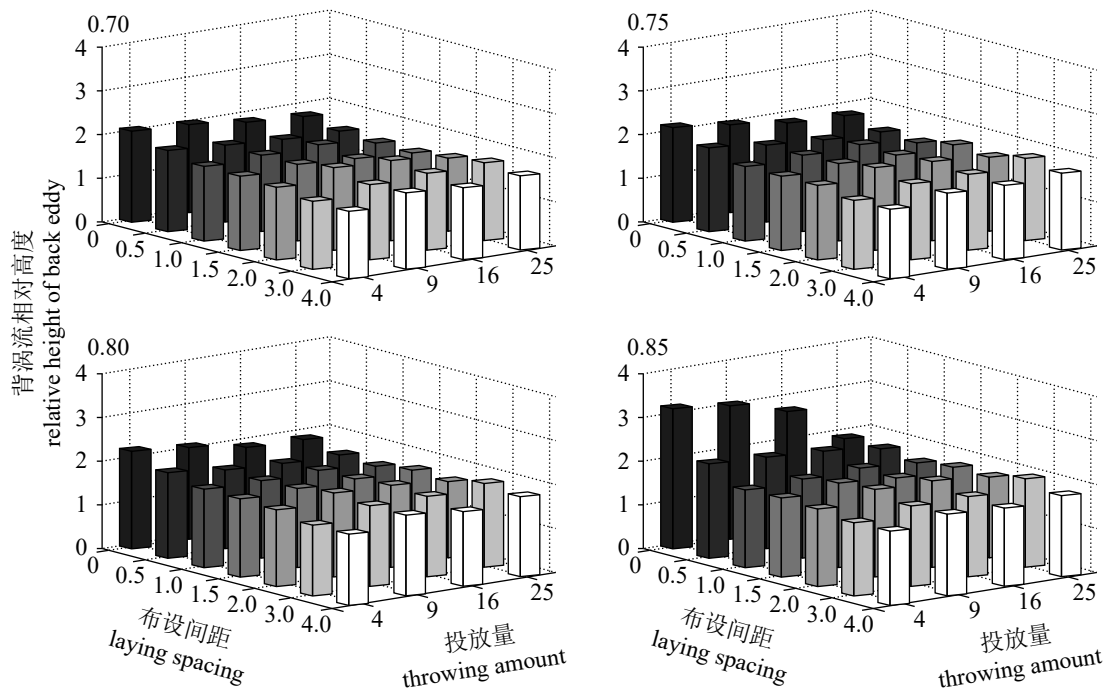


图 11 不同投放量下背涡流相对高度随布设间距的变化

Fig. 11 Relative height of back eddy varying with laying spacing at different throwing amount

值增大, 布设间距对上升流相对长度影响越小, 相同速度比下, 上升流相对长度下降趋势随投放量增加而增大(图12)。

投放量差异对背涡流相对长度影响较小;

当目标速度比小于0.80倍时, 相应布设间距的人工鱼礁背涡流相对长度基本不变, 当目标速度比大于0.80倍时, 背涡流相对长度增加较为显著; 各布设模式下背涡流相对长度随布设间距

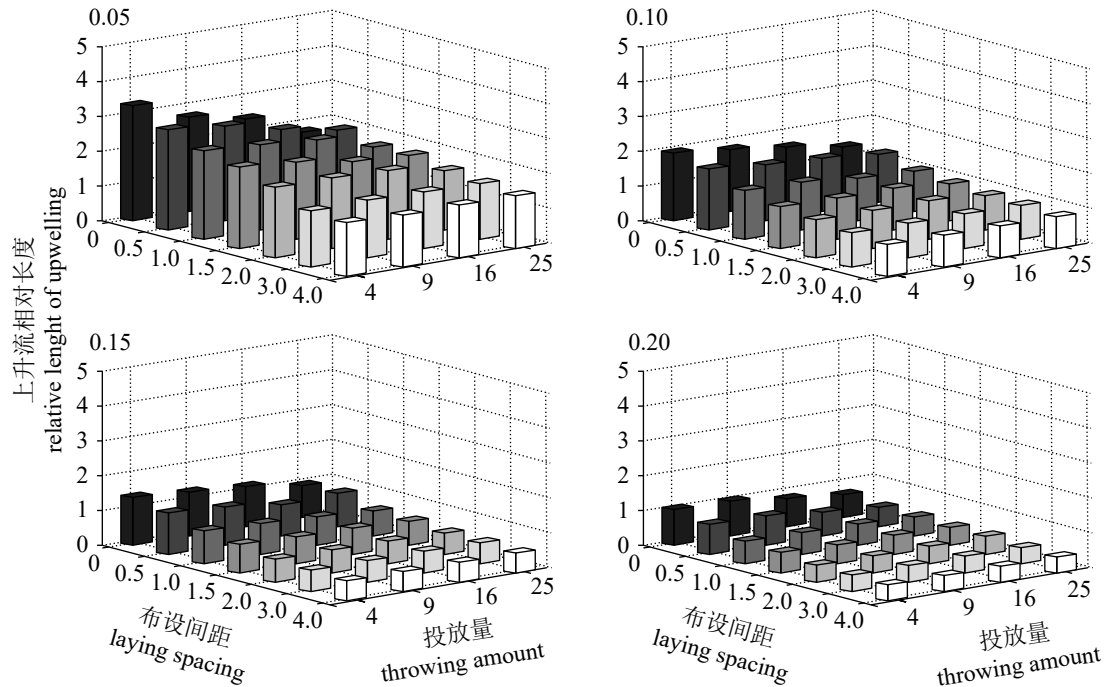


图 12 不同投放量下上升流相对长度随布设间距的变化

Fig. 12 Relative length of upwelling varying with laying spacing at different throwing amount

增加呈现先增后降的趋势，最大相对长度位于 1.0 l 处(图 13)。

3 讨论

研究中人工鱼礁流场效率的评价主要在流场相对体积、相对高度和相对长度 3 个方面，其中流场相对体积分为相对合体积与相对分体积，流场相对合体积指流场整个包围面内的有效流速围成的整个空间体积与单体人工鱼礁体积之比，包围面内包括未达到要求的流速区，是评价整个建礁区流场效率的空间指标；而相对分体积则指流场区实际达到要求流速的流场体积与单体人工鱼礁体积之比，是相对合体积内流速控制区，当流场相对合体积较大而相对分体积较小，则说明礁体间流场协同作用较弱甚至消失，此时整个礁区流场呈现单个礁体各自为堆的现象，由此可见，当布设间距较大时，相对分体积更能说明流场效应空间状态；流场相对高度与相对长度也是评价流场空间状态的重要指标，表示流场空间可达性的大小。本研究通过对不同投放量、布设间距和流场目标速度比下米字型人工鱼礁流场相对体积、相对高度与相对长度的数值计算与分析，指出不

同建礁目标下人工鱼礁的最优配置模式。

3.1 以流场相对体积为评价基准的建礁效率

投放量越多，单位鱼礁流场相对体积越大，但人工鱼礁单体平均相对流场体积减小，说明增加人工鱼礁量可以扩大海域内的流场空间范围，而鱼礁单体所产生的流场能力下降，鱼礁利用率降低。虽然单位人工鱼礁越少，鱼礁单体流场效率越高，但各海域单位人工鱼礁具有一定投放量要求，按照单位人工鱼礁投放量规定，以增加投放量的方式达到流场既定体积时，按研究中均匀模式布设条件下单位鱼礁投放量上限为 5×5 的布设模式，其投放量为 675 m^3 ，最佳投放量为 4×4 的模式下 432 m^3 ，不仅满足单位鱼礁量要求，而且鱼礁作用效率较高。改变布设间距也是导致流场相对体积(人工鱼礁间具有协同作用下的流场体积)变化的因素，当布设间距为 0.5 l 时，上升流流场相对体积最大，当布设间距为 1.5 l 时，背涡流流场相对体积最大；0.5 l 布设间距下单位鱼礁上升流相对流场体积最大，1.5 l 布设间距下单位鱼礁背涡流相对流场体积最大。因此若以上升流为人工鱼礁建设目标时，0.5 l 布设方式上升流相对体积最大，单位鱼礁流场越强，利用率越高，建礁效果越

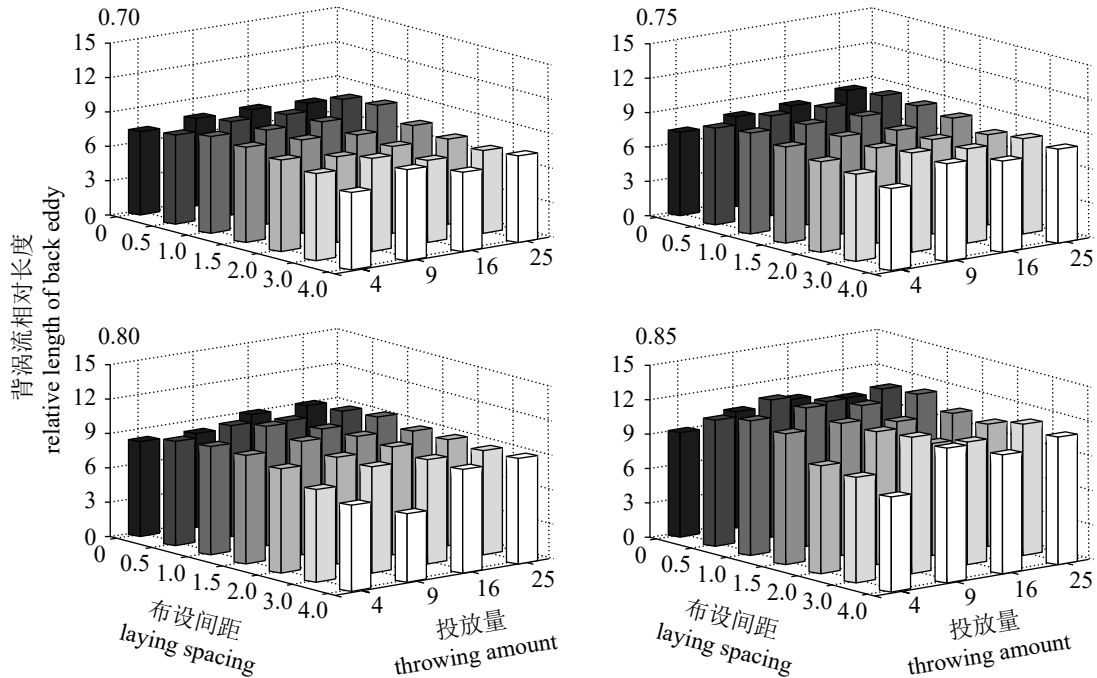


图 13 不同投放量下背涡流相对长度随布设间距的变化

Fig. 13 Relative length of back eddy varying with laying spacing at different throwing amount

好; 若以背涡流为人工鱼礁建设目标时, 1.5 l 布设方式背涡流相对体积最大, 单位鱼礁流场越强, 利用率越高, 建礁效果越好。根据建礁海域底质悬浮物粒径及增殖对象的差异, 建礁的目标流速(速度比)也是影响流场体积的因素, 随着流场区建礁目标流速的增加, 流场相对体积减小, 达到协同作用下的布设间距减小, 不同速度比与实现礁体间上升流流场协同作用的礁体布设间距间具有相关性, 其一般式为 $y = -6.4x + 1.75$, R^2 为0.97, 背涡流区流场协同作用的礁体布设间距均为3.0 l 处, 因此不同速度比流场在3.0 l 布设间距下均存在协同作用。

3.2 以流场相对高度为评价基准的建礁效率

流场相对高度对上升流评价较为重要, 上升流相对高度越大说明人工鱼礁引起的营养盐与悬浮物流动高度越高, 也是衡量单位人工鱼礁建设高度的指标之一。研究中上升流相对高度随投放量增加而增加, 随布设间距增加而降低, 随流速比增加而降低, 4种速度比的所有投放量下上升流相对高度随布设间距降低至相同高度, 分别为8.5、6.0、5.2和4.8 m, 此上升流相对高度也为目标速度比的单体鱼礁上升流相对高度。这与郑延璇等^[25]得出星体型人工鱼礁上升

流高度随布设间距的增加而略有增加的结论不一致, 主要原因是星体型人工鱼礁为实体礁, 本研究中礁体为具有通透性的米字型礁, 礁体通透性影响上升流流场效应^[26-28], 故流场高度变化随布设间距的不同而存在差异。

3.3 以流场相对长度为评价基准的建礁效率

流场相对长度是背涡流流场评价的重要标准之一, 背涡流相对长度越大, 说明人工鱼礁流场辐射范围越广, 背涡流相对长度的确定一方面为休闲型海洋牧场提供管理范围依据, 同时可以有目的的改善资源生物生存环境。研究中投放量对背涡流相对长度影响较小, 背涡流相对长度主要随布设间距发生变化, 最大相对长度位于1.0 l 处, 其次为0.5 l 与1.5 l。因此当以流场辐射范围为建礁目标时, 最佳布设间距为1.0 l, 若综合考虑流场相对体积, 则以1.5 l 为最佳。

随着海洋牧场建设越来越被重视, 人工鱼礁作为海洋牧场建设过程中的一种技术手段与基础设施^[29], 其建设效率研究逐渐受到越来越多研究者的关注, 人工鱼礁在合理规划下的经济、高效的建模式是保障海洋牧场实现效益生态化的前提。本研究对米字型人工鱼礁均匀

布设模式下流场效率进行研究, 以上升流与背涡流区流场外部空间范围为流场效率指标, 分析不同模式下流场效率特性, 为后续规划人工鱼礁建设提供理论指导。而人工鱼礁区内部流场小尺度涡的特性同样影响人工鱼礁建设效果, 是今后全面评价流场效率的重点之一。

参考文献:

- [1] Sreekanth G B, Lekshmi N M, Singh N P. Can artificial reefs really enhance the inshore fishery resources along Indian coast? A critical review[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 2017, 89(1): 13-25.
- [2] Israel D, Gallo C, Angel D L. Benthic artificial reefs as a means to reduce the environmental effects of cod mariculture in Skutulsfjörður, Iceland[J]. *Marine Biodiversity*, 2017, 47(2): 405-411.
- [3] 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[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Xiao R. Numerical simulation on features of flow field and transport of nutrient around hollow artificial reefs[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015(in Chinese).
- [4] Moura A, Boaventura D, Cúrdia J, *et al.* Effect of depth and reef structure on early macrobenthic communities of the Algarve artificial reefs (southern Portugal)[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 580(1): 173-180.
- [5] Nicoletti L, Marzioletti S, Paganelli D, *et al.* Long-term changes in a benthic assemblage associated with artificial reefs[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 580(1): 233-240.
- [6] Jiang Y Z, Lin N, Yuan X W, *et al.* Effects of an artificial reef system on demersal nekton assemblages in Xiangshan Bay, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(1): 59-68.
- [7] Lima J S, Zalmon I R, Love M. Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 145: 81-96.
- [8] Smith J A, Lowry M B, Champion C, *et al.* A designed artificial reef is among the most productive marine fish habitats: new metrics to address 'production versus attraction'[J]. *Marine Biology*, 2016, 163(9): 188.
- [9] 兰孝政. 圆台型人工鱼礁流场效应的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Lan X Z. Numerical simulations of the flow field around artificial reefs with truncated-cone shape[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015(in Chinese).
- [10] 王伟定, 梁君, 毕远新, 等. 浙江省海洋牧场建设现状与展望[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2016, 35(3): 181-185.
- Wang W D, Liang J, Bi Y X, *et al.* Status and prospects of marine ranching construction in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2016, 35(3): 181-185(in Chinese).
- [11] Santos M N, Monteiro C C. A fourteen-year overview of the fish assemblages and yield of the two oldest Algarve artificial reefs (southern Portugal)[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 580(1): 225-231.
- [12] 姜少杰, 刘海敌, 吴伟, 等. 一种人工鱼礁的水动力学研究与建设效果评价[J]. *海洋学研究*, 2017, 35(2): 53-60.
- Jiang S J, Liu H D, Wu W, *et al.* Study on hydrodynamics and effect evaluation for constructing of an artificial reef[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2017, 35(2): 53-60(in Chinese).
- [13] Dong Taur S U, Liu T L, Ou Ching Hsiewn O U. Numerical investigation into effects of seabed topography on flows in and around artificial reefs[J]. *Fisheries Science*, 2008, 74(2): 236-254.
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 刘洪生, 马翔, 章守宇, 等. 人工鱼礁流场风洞实验与数值模拟对比验证[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(3): 365-371.
- Liu H S, Ma X, Zhang S Y, *et al.* Validation and comparison between wind tunnel experiments and numerical simulation of flow field around artificial reefs[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(3): 365-371(in Chinese).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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(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] 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*, 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).
- [21] 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.
- [22] 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[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2): 133-141.
- 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[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(2): 133-141(in Chinese).
- [23] 李豹德. 从日本人工鱼礁建设探讨我国鱼礁建设的方向[J]. *海洋渔业*, 1985(6): 248-253.
- Li B D. Discussion on the direction of artificial reef construction in china from the construction of artificial reef in Japan[J]. *Marine Fisheries*, 1985(6): 248-253(in Chinese).
- [24] 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).
- [25] 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).
- [26] 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[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(3): 274-278.
- 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[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(3): 274-278(in Chinese).
- [27] 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).
- [28] 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).
- [29] 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(in Chinese).

Flow field efficiency of Mi-zi artificial reefs in different construction modes based on numerical experiments

GUO Yu, ZHANG Shouyu*, LIN Jun

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

Abstract: The throwing scale of artificial reefs is one of the core issues in the construction of reefs. The throwing amount and disposal spacing of artificial reefs not only characterize the range and density, but also determine the efficiency of artificial reefs flow field effects. In our study, the flow field characteristics of seven disposal spacing ($0 l$, $0.5 l$, $1.0 l$, $1.5 l$, $2.0 l$, $3.0 l$ and $4.0 l$) that is the multiple of the length of the single artificial reefs, with four throwing amounts of Mi-zi artificial reefs (2×2 , 3×3 , 4×4 and 5×5) were simulated using the large eddy simulation model based on the ANSYS software. Then, the relationships between the characteristics (including the relative volume, relative height and relative length) of different flow fields and the throwing amounts and disposal spacing and the target velocity ratio were studied. The results showed that when the upwelling target velocity ratio is less than 0.10, 0.10 to 0.15 and greater than 0.15 times, the maximum disposal spacing is $4.0 l$, $3.0 l$, $2.0 l$, respectively, and there was a synergistic effect on the upwelling area. And the maximum disposal spacing is $3.0 l$ at all the back eddy target velocity ratios. The larger the reefing amount is, the higher the relative volume both the upwelling and the back eddy are, and the lower the average relative volume growth rate. At the disposal spacing of $0.5 l$, the relative upwelling volume and the relative volume of the single artificial reefs are the largest, but the back eddy relative volume and the relative volume of the single artificial reefs are the largest at $1.5 l$. The upwelling's relative height increased at a rate of 1.01 times with the laying amount increasing and decreased at a rate of 0.90 times with the disposal spacing increasing, while the relative length of the back eddy would increase firstly and then decrease with the disposal spacing and the maximum at $1.0 l$. The study provides the theoretical planning guidance for the artificial reef placement in different construction modes.

Key words: efficiency of flow field; numerical experiment; relative volume; relative height; relative length; Mi-zi artificial reefs; marine ranching

Corresponding author: ZHANG Shouyu. E-mail: syzhang@shou.edu.cn

Funding projects: China Agriculture Research System(CARS-50); Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest(201303047)