

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19251

基于单位鱼礁规模的米字型人工鱼礁流场效应定量研究

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: 流场效应是人工鱼礁发挥其生态效应的基础, 流场效应强弱受单位鱼礁规模影响, 同时是衡量人工鱼礁建设模式优劣与规划人工鱼礁建设模式的重要参考因素, 流场体积是表征流场效应强弱的重要指标。本研究基于数值实验方法, 分析米字型人工鱼礁在 4 种布设模式下 28 种单位鱼礁规模的流场体积变化规律, 并建立上升流、背涡流流场体积与人工鱼礁建设规模指标的多元非线性模型。结果表明, 单位鱼礁建设一级指标投放量(T_a)、布设间距(L_d)及目标速度比(R_u)与上升流体积分别呈线性、三次函数及幂函数关系, 建立上升流体积回归模型为 $V_u = T_a \times (0.002L_r^2 - 0.055L_r - 2.429V_R \times R_u + 0.011R_u^{-1.833} + 0.227L_d + 0.437)$, 回归拟合 R^2 为 0.957, 相对误差为 18.61%。与背涡流体积分别呈幂函数、三次函数及指数函数关系; 结合单位鱼礁建设二级指标相对边长(L_r)、容积率(V_R), 背涡流体积回归模型为 $V_b = R_u \times (-0.543L_r^2 + 2.388L_r) - 51.779V_R^2 + 75.045V_R + 1.449 \times 10^{-4}T_a \times e^{12.049R_u} + 1.620L_d \times T_a$, 回归拟合 R^2 为 0.938, 相对误差为 10.09%。该流场体积回归模型可用于规划指导均匀布设模式的人工鱼礁建设, 为“减量提质提效”的人工鱼礁建设策略提供参考。

关键词: 单位鱼礁规模; 流场效应; 流场体积; 多元非线性模型; 数值实验; 米字型人工鱼礁

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)05-0559-11

20 世纪 80 年代初, 中国开启人工鱼礁建设步伐, 截至 2018 年底, 人工鱼礁投放量已达 8325 万空方左右, 遍布中国所有沿海城市^[1-2]。随着各阶段海域资源与生态环境变化, 人工鱼礁投放目的由最初的促使鱼类诱集与繁殖到增殖养护渔业资源、修复生态环境, 其作用效果是积极、显著的^[3-6]。面对人工鱼礁投放量的进一步增加, 各管理部门及环境学者在保证人工鱼礁达到建设效果的前提下, 提出“减量提质提效”的建设策略, 提升人工鱼礁绿色发展水平^[7-8], 建设基础是确定合理的单位鱼礁规模。因此, 需全面了解多指标单位鱼礁投放模式下人工鱼礁的建设效果, 建立健全的人工鱼礁建设效果评价模型, 进而确立多层面人工鱼礁建设规划方案。

以物理、环境、生物指标为标准的人工鱼礁

建设效果评价均有研究, Santos 等^[9]和 Israel 等^[10]通过调查建礁前后物种数量、资源丰度等变化评价建礁效果; Mazzei 等^[11]证明人工鱼礁区初级生产力水平较高; Ceccaldi^[12]分析了建礁区流场效应变化特征, 说明礁区流场效应是营养物质与悬浮颗粒运动的主要原因。人工鱼礁建设之初主要目的是通过礁体周围产生的独特流场作用^[13-14], 刺激营养盐、底质颗粒和初级生产力等的产生与传递^[15-16], 以食物供给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^[17-19], 因此人工鱼礁流场效应是人工鱼礁发挥生态与生物效应的主要实现路径之一, 是单位人工鱼礁规模选择的重要依据。

目前, 关于人工鱼礁流场效应研究主要围绕上升流与背涡流流场特性展开, 按功能分为评价

收稿日期: 2019-08-26; 修订日期: 2019-12-12.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓海洋牧场”重点专项(2019YFD0901303); 农业农村部公益性行业(农业)科研专项(201303047).

作者简介: 郭禹(1990-), 女, 博士研究生, 研究方向为人工鱼礁与海洋牧场. E-mail: guoyu25895177@163.com

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

性研究和规划性研究,其中评价性研究较多,主要评价不同人工鱼礁单体及同类鱼礁不同布设间距下上升流与背涡流流场高度、流速及体积等的变化规律^[20-22],而规划性研究仅有通过案例形式对回字形单位鱼礁组合优化形式的研究^[23]。实际中,人工鱼礁流场效应受人工鱼礁投放量、布设模式与间距、鱼礁高度等多个鱼礁规模指标影响,为实现经济高效的建礁策略,本研究将人工鱼礁流场效应强度作为评价单位鱼礁发挥效用的指标,通过建立单位鱼礁规模指标与流场效应间的定量关系作为理论规划依据。流场效应研究摒弃对上升流与背涡流局部细微流场影响的分析,直接从宏观角度以上升流与背涡流体积作为表征人工鱼礁流场效应作用的指标,通过分指标法建立流场体积多元非线性回归模型后,以实际案例将模型应用于规划建设中,验证人工鱼礁流场效应模型的实用性与可行性。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^[24]。

1 材料与方法

1.1 单位鱼礁数值模型

人工鱼礁的选择主要取决于人工鱼礁投放目的、水文与地理条件,实验中采用适合于改变海流形态且内部结构简单的米字型礁体,这种礁体以其稳定性与方便性被广泛应用于东海人工鱼礁区,米字型人工鱼礁由钢筋混凝土构成边长(d)为 3 m 的正方体人工鱼礁单体,通透特性为 27.37% (混凝土体积/空方体积)。为获取不同投放量下多种单位鱼礁组合方式流场特征,通过数值模拟实验在数值水槽中对单位鱼礁进行配置组合,数值水槽入流面至单位鱼礁距离为 3 倍单位鱼礁边长 (length of unit artificial reef, L),单位鱼礁尾至出流面 $15L$,鱼礁左、右至水槽壁面均为 $3L$,根据人工鱼礁高度为水深 1/10 时上升流流场效应显著的特点^[25],数值水槽高度设为 30 m。根据单位鱼礁投放数量 (throwing amount, T_a) 差异将人工鱼礁组合按照数量分成 4、9、16、25 共 4 种,每种单位鱼礁投放量分别为 108、243、432 和 675 空方,单位鱼礁呈正方形布设模式 L_m (laying mode),分别为 2×2 、 3×3 、 4×4 、 5×5 ,单位鱼礁布设间距

L_d (laying distance) 按人工鱼礁单体边长倍数表示,分别为 $0d$ 、 $0.5d$ 、 $1.0d$ 、 $1.5d$ 、 $2.0d$ 、 $3.0d$ 和 $4.0d$,鱼礁高度 H (height of artificial reef) 为 3 m,图 1 为 3×3 的单位鱼礁布设参量示意图。数值水槽来流速度取人工鱼礁投放区域一般流速 0.5 m/s,来流方向垂直于礁体组合正向。米字型人工鱼礁数值实验已经过水槽试验验证并证明该模型的准确性与可行性,上述所有模型构建、网格划分与数值模拟实验均在 ANSYS16.1 中完成。

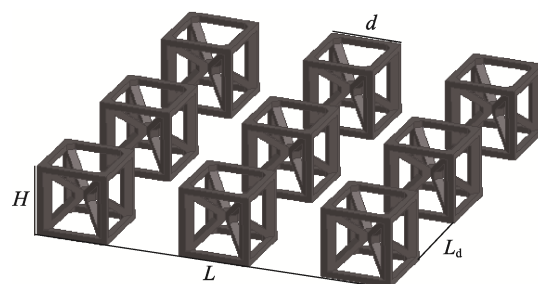


图 1 米字型单位人工鱼礁建设指标
 d : 鱼礁单体边长; L_d : 布设间距; H : 鱼礁高度;
 L : 单位人工鱼礁边长。

Fig. 1 Construction indicators of unit Mi-zi artificial reefs
 d : side length of single artificial reefs; L_d : laying distance;
 H : height of artificial reefs; L : side length of unit artificial reefs.

1.2 模型选择及边界条件

湍流模型的选择直接影响数值模拟结果的准确性与可靠性,基于已有试算经验^[26],本研究选用大涡模拟法 (large-eddy simulation, LES)。大涡模拟使用瞬时的 Navier Stokes 方法直接模拟湍流中的大尺度涡,通过近似的模型来考虑小尺度涡的模拟效果对大涡的影响,进而模拟出所有大于网格尺度涡的运动。模型边界条件设定对模拟的真实性同样至关重要,本次模型数值水槽底面与人工鱼礁表面设为壁面 (wall) 边界条件,采用无滑移边界参数,侧面与上顶面设为对称边界条件 (symmetry),来流方向面设为速度入口边界条件 (velocity-inlet),出流方向设为速度出口 (速度为来流速度负值) 边界条件 (velocity-outlet)。模型压力速度耦合采用 PISO 算法进行迭代计算,流体密度设定为海水典型密度 1024 kg/m^3 ,重力参数为 9.81 m/s^2 ,图 2 为数值模拟水槽示意图。

1.3 流场体积与单位鱼礁规模指标确立

以各布设模式下模拟所得单位鱼礁流场数据

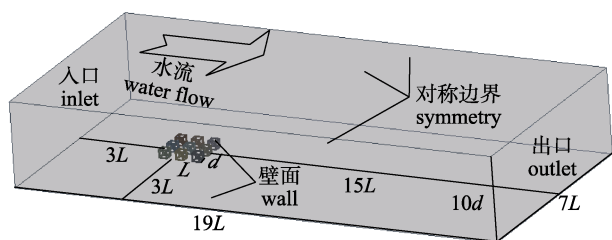


图2 数值模拟实验计算域

d : 鱼礁单体边长; L : 单位人工鱼礁边长.

Fig. 2 Calculation domain for numerical simulation experiment

d : side length of single artificial reefs;

L : side length of unit artificial reefs.

为基础, 根据人工鱼礁建设目标差异, 选取不同标准下上升流与背涡流体积作为流场效应指标。本研究选择垂向速度分别小于 0.05、0.10、0.15 和 0.20 倍来流速度区为上升流效应区, 选取沿来

流方向流速绝对值分别小于 0.80、0.85、0.90 和 0.95 倍来流速度区为背涡流效应区, 以此标准计算各速度比下流场体积, 流场体积指选取有效速度所围成包络面的体积, 以 100~110 s 数值实验结果平均值作为流场体积计算值。图 3 为上升流与背涡流流场体积选择示意图, 上升流与背涡流区选择及流场体积均通过 MATLAB 程序计算获取, 文中分别提取单位人工鱼礁最前部上升流和最后部背涡流进行讨论, 建立模型时流场体积通过相对体积形式表示, 上升流相对体积(relative upwelling volume, V_u)指上升流流场体积与人工鱼礁单体体积之比, 背涡流相对体积(relative back eddy volume, V_b)指背涡流流场体积与人工鱼礁单体体积之比。



图3 上升流与背涡流流场体积

Fig. 3 Upwelling and back eddy volume

单位鱼礁规模指标需要代表建礁工程模式需求, 分别通过人工鱼礁建设范围与强度体现, 建设范围指可以表征单位鱼礁空间可达性的指标, 建设强度指可以表示单位鱼礁空间密集程度的指标。人工鱼礁属于人为投放的海底建筑物, 其建筑特性与城市高楼相似, 基于城市风道规划标准^[27-29], 提出以单位鱼礁边长和高度作为人工鱼礁建设范围指标, 以单位鱼礁容积率作为人工鱼礁建设强度指标。综合单位鱼礁布设模式条件, 本研究首次将单位鱼礁规模指标分为两种等级: 一级指标表示直接决定单位鱼礁建设特征的指标, 包括人工鱼礁投放量、布设间距; 二级指标可由一级指标通过函数形式计算获得, 包括单位鱼礁边长与单位鱼礁容积率(volume ratio of unit artificial reefs, V_R), 其中单位鱼礁边长指人工鱼礁组合区边界长度, 单位鱼礁容积率指单位鱼礁区人工鱼礁投放量与单位鱼礁整个空间体积之比, 模型建立时采用相对边长 L_r (relative length)表示,

为单位鱼礁边长与鱼礁单体边长比值, 相对边长与容积率是一级指标单位鱼礁投放数量与布设间距的函数。由于本研究中单位鱼礁为均匀布设模式, 鱼礁高度为鱼礁单体高度, 故不考虑高度指标。另一方面人工鱼礁规模指标需要代表建礁目标, 本研究中建礁目标通过人工鱼礁建设所要达到的不同速度流场效应体现, 即目标速度比 T_v (target velocity ratio)指标, 目标速度比为鱼礁规模的一级指标, 分别采用上升流速度比 R_u (ratio of upwelling velocity)与背涡流速度比 R_b (ratio of back eddy velocity)^[23], 其中上升流速度比取值分别为 0.05、0.10、0.15 和 0.20, 背涡流速度比取值分别为 0.80、0.85、0.90 和 0.95。

1.4 流场体积模型建立

为建立流场体积综合评价模型, 本研究首次提出利用数理统计方法建立多个自变量(各单位鱼礁规模指标)与一个因变量(流场体积)的多元非线性回归模型, 流场体积数学模型采用单一指标

法建立^[28]。单一指标法指单独考虑每个规模指标与流场体积间的关系,分别建立流场体积最佳单一指标回归模型^[30]。设流场体积 y 与规模指标 x_i ($1, 2, \dots, n$) 建立最佳一元回归模型函数为 $y=f_i(x_i)$, 通过各单元模型的 R^2 、 F 检验和相对误差值验证其可靠性^[31-32]。然后将验证合格的单一指标模型按照多元线性回归方程形式逐一叠加, 检验叠加方程的可靠性, 若模型不满足要求则进一步考虑各建礁指标间相互作用, 将叠加模型整合, 由此建立流场体积多元回归模型, 数学表达式如式 (1)。采用单一指标法建立的体积模型与实际情况吻合度较高, 便于解释模型的物理含义。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` 函数建立流场体积与规模指标的多元非线性模型, 使用 Gauss-Newton 法进行模型优化^[33],

$$y = \sum_{i=1}^n a_i f_i(x_i) + \sum_{j=i+1}^n a_j x_i x_{i+1} + k \quad (1)$$

2 结果与分析

上升流与背涡流流场体积回归模型建立中, 首先选择单位鱼礁规模一级指标与流场体积进行单元回归分析, 其次以单指标模型结构模式为基础, 建立流场体积与鱼礁规模一级指标模型, 最后将一级指标与二级指标融合建立流场体积综合回归模型。

2.1 上升流流场体积模型建立

2.1.1 上升流体积单元回归分析 应用 `polyfit` 拟合函数首先依次对人工鱼礁的各一级指标单位鱼礁投放量、人工鱼礁布设间距及目标速度比与相应上升流流场体积进行单元拟合, 图 4~6 分别为上述 3 个指标因子与流场相对体积的拟合效果图, 结果表明均匀布设模式下单位人工鱼礁建设规模的直接影响指标为一级指标, 其中对上升流相对体积影响最大的指标为目标速度比值, 其次为投放量, 布设间距指标对上升流相对体积影响最小。图 4 中, 上升流相对体积随单位鱼礁投放量增加呈线性增长趋势, 其单元回归模型为 $V_{u1}=5.500T_a-0.421$, 其 R^2 为 0.973; 上升流相对体积随布设间距增加呈现先增后降的三次函数关系, 最

大值为 $0.5d$ 布设间距处, 其单元回归模型为 $V_{u2}=0.064L_d^3-1.165L_d^2+4.316L_d+12.647$, 其 R^2 为 0.994; 相对体积随着目标速度比取值增加逐渐降低, 当速度比取值大于 0.15 时, 有效目标体积变化较小, 呈幂函数变化趋势, 回归模型为 $V_{u3}=$

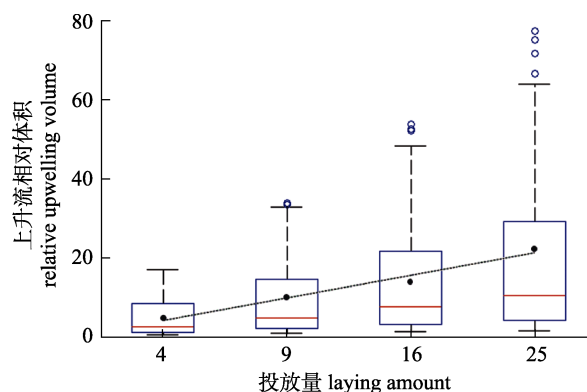


图 4 单位鱼礁投放量与上升流相对体积拟合效果图

Fig. 4 The fitting curve of laying amount of unit artificial reefs and relative upwelling volume

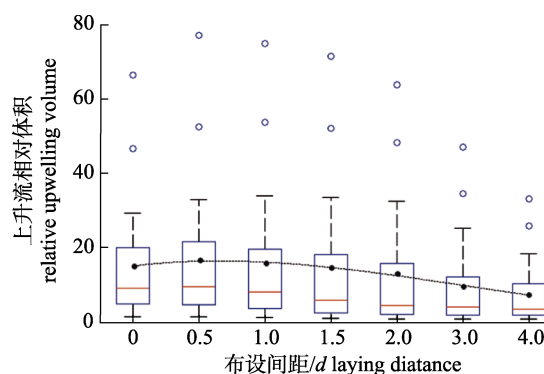


图 5 单位鱼礁布设间距与上升流相对体积拟合效果图

Fig. 5 The fitting curve of laying distance of unit artificial reefs and relative upwelling volume

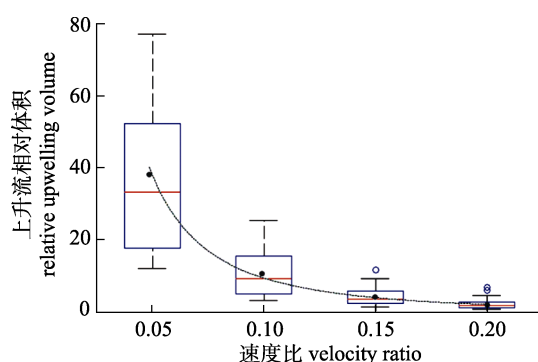


图 6 速度比与上升流相对体积拟合效果图

Fig. 6 The fitting curve of velocity ratio and relative upwelling volume

$39.983R_u^{-2.029}$, 其 R^2 为 0.995。根据单元回归模型建立上升流体积综合评价模型, 模型为 $V_u = a_1T_a + b_1L_d^3 + b_2L_d^2 + b_3L_d + c_1R_u^c$ 。

2.1.2 上升流体积回归模型建立 根据上升流体积综合评价模型一般形式, 利用 Matlab 软件提供的 nlinfit 函数拟合上升流相对体积多元非线性综合模型, 结合单位鱼礁规模二级指标, 最终得到米字型人工鱼礁上升流体积与单位鱼礁规模指标的定量关系为:

$$V_u = T_a \times (0.002L_r^2 - 0.055L_r - 2.429V_R \times R_u + 0.011R_u^{-1.833} + 0.227L_d + 0.437) \quad (2)$$

式中, 二级指标相对边长 $L_r = L_d \times (T_a^{0.5} - 1) + T_a^{0.5}$, 容积率 $V_R = T_a / L_r^2$, 一级指标 T_a 为人工鱼礁投放量, R_u 为目标速度比, L_d 为布设间距。

基于已有上升流体积模型, 对其极限数值进行检验。当 $T_a = 0$, 说明人工鱼礁投放量为零, 模型结果 V_u 为 0, 无上升流, 与投放实际相符, 故 T_a 取值应大于 0; 若 T_a 存在, 当 R_u 为 0 时, 表示所取上升流速度为垂向速度小于 0 倍来流速度, 即小于 0 m/s, 模型存在意义, 故 R_u 的取值为任意实数, 说明目标速度比值可以取任意满足规划要求的数值; 结合实际, L_d 取值范围为大于等于 0 的任意值。因此, 当各指标满足取值范围时, 上升流体积模型各变量极限取值数据存在意义, 模型具有一定实用性。

2.1.3 模型验证 用上升流相对体积回归模型求解出的各单位鱼礁规模指标下流场相对体积拟合

值, 与模拟值数据进行对比, 结果及对应残差如图 7 所示。通过回归模型计算的上升流相对体积与数值实验值基本一致, 由残差数据得出该模型共出现 2 个异常值点, 分别为 675 空方投放量下, 布设间距为 $4d$ 时, 速度比为 0.05 和 0.2 的相对体积值, 已有研究说明当布设间距大于 $4d$ 时^[26], 横向相邻礁体上升流流场间有体积间隔现象, 投放量越大, 效果越显著, 这可能是影响异常值的原因。上升流相对体积回归模型规划值与模拟值相对误差值为 18.61%, $R^2 = 0.957$, 说明回归拟合效果较好; $F = 476$, 大于 $F_{\alpha(0.1)} = 2$, 说明总体回归方程显著, 该方程可以较准确地反映单位鱼礁规模指标对流场体积的影响效果与规律。

2.2 背涡流流场体积模型建立

2.2.1 背涡流体积单元回归拟合 与上升流相对体积回归模型计算方法相同, 图 8~10 分别为单位人工鱼礁投放量、人工鱼礁布设间距及目标速度比 3 个一级指标因子与背涡流流场相对体积的单元回归拟合效果图。结果表明均匀布设模式下表示单位鱼礁规模的一级指标中, 对背涡流相对体积影响最大的指标为目标速度比值, 其次为投放量, 布设间距指标对背涡流相对体积影响最小。如图 7 所示, 背涡流相对体积随单位人工鱼礁投放量增加呈幂函数形式增长趋势, 其单元回归模型基本形式为 $V_{bl} = 34.358T_a^{0.633}$, 其 R^2 为 0.999; 随布设间距增加呈现先增后降的三次函数关系, 体积最大值位于 $1.5d$ 的布设间距处, 其单元回归模型

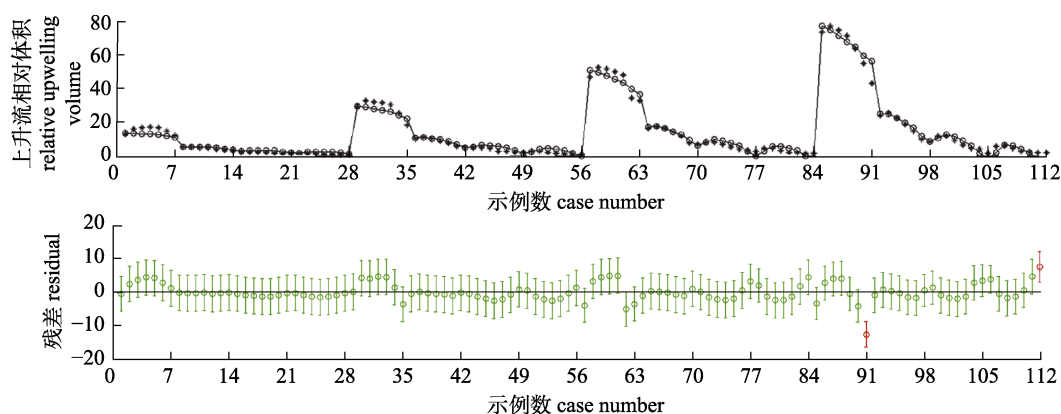


图7 上升流相对体积回归值与残差

*: 模拟值, ○: 回归值.

Fig. 7 The regression value of relative volume of upwelling current and the residual

*: simulated value; ○: regression value.

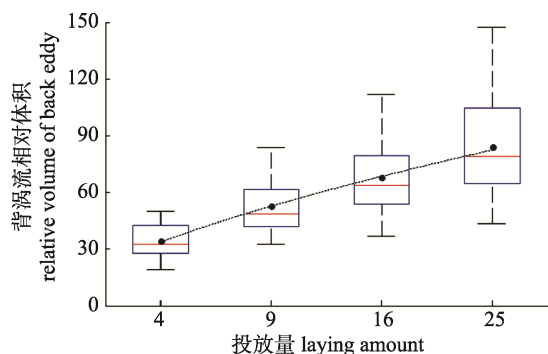


图 8 单位鱼礁投放量与背涡流相对体积拟合效果图

Fig. 8 The fitting curve of laying amount of unit artificial reef and relative back eddy volume

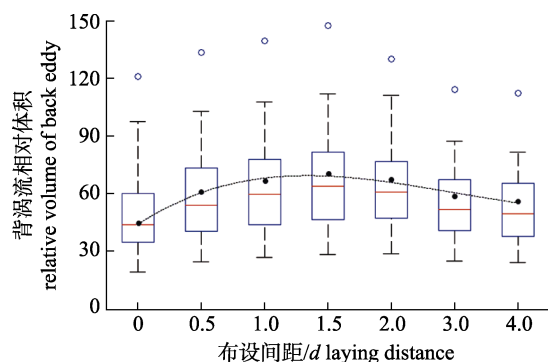


图 9 单位鱼礁布设间距与背涡流相对体积拟合效果图

Fig. 9 The fitting curve of laying distance of unit artificial reef and relative back eddy volume

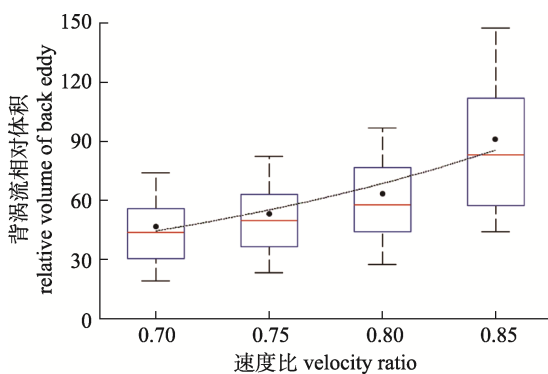


图 10 速度比与背涡流相对体积拟合效果图

Fig. 10 The fitting curve of velocity ratio and relative back eddy current volume

基本形式为 $V_{b2}=0.365L_d^3-6.494L_d^2+32.916L_d+16.379$, 其 R^2 为 0.978; 相对体积随着目标速度比取值增加逐渐呈以 e 为底的指数函数形式增加, 其单元回归模型基本形式为 $V_{b3}=32.437e^{0.233R_u}$, R^2 为 0.946。根据单元回归模型建立背涡流体积综合评价模型公式, 模型公式的一般形式为 $V_b=a_1T_a^2 +$

$$b_1L_d^3+b_2L_d^2+b_3L_d+c_1e^{c_2R_u}。$$

2.2.2 背涡流体积回归模型建立 根据背涡流体积综合评价模型一般形式, 最终得到米字型人工鱼礁背涡流体积与单位鱼礁规模指标的定量关系为:

$$V_b=R_u \times (-0.543L_r^2+2.388L_r)-51.779V_R^2+75.045 \times V_R+1.449 \times 10^{-4}T_a \times e^{12.049R_u}+1.620L_d \times T_a \quad (3)$$

式中, 二级指标相对边长 $L_r=L_d \times (T_a^{0.5}-1)+T_a^{0.5}$, 容积率 $V_R=T_a/L_r^2$, 一级指标 T_a 为人工鱼礁投放量, R_u 为目标速度比, L_d 为布设间距。

基于已有背涡流体积模型, 对其极限数值进行检验。当 T_a 为 0 时, 人工鱼礁投放量为 0, 故 L_d 与 R_u 取值无意义, 结果得出 V_R 值为 0, 且 V_u 值不存在, 即不存在背涡流, 与投放实际相符, 故 T_a 取值应大于 0; 若 T_a 存在, 当 R_u 为 0 时, 表示所取背涡流速度为沿来流方向下流速绝对值小于 0 倍来流速度, 即小于 0 m/s, 而流速绝对值必然大于等于 0, 故 R_u 需大于 0; 同样 L_d 取值为大于等于 0 的任意实数。因此, 当各指标满足取值范围时, 背涡流相对体积模型各指标的极限取值数据存在意义, 模型具有一定实用性。

2.2.3 模型验证 用背涡流相对体积回归模型求解出各单位鱼礁规模指标下流场相对体积拟合值, 与模拟实验值对比, 结果及残差数据如图 11 所示。通过回归模型计算的背涡流相对体积值与数值实验值基本一致, 残差数据显示背涡流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 10.09%, $R^2=0.938$, 说明回归拟合效果较好, $F=204$, 大于 $F_{\alpha(0.1)}=2$, 说明总体回归方程显著, 该方程可以较准确地反映单位鱼礁规模指标对流场体积的影响效果与规律。

3 基于体积模型法的人工鱼礁优化建设方法

每种单位鱼礁规模都具有其独特的流场特性, 每种建礁计划都具有相应的设计目的与预期效果, 合理选择建礁目的下单位鱼礁规模是保证经济、高效建礁策略的关键^[34]。经济-高效建礁指在达到一定流场效应前提下所需投放量最少的情况, 投

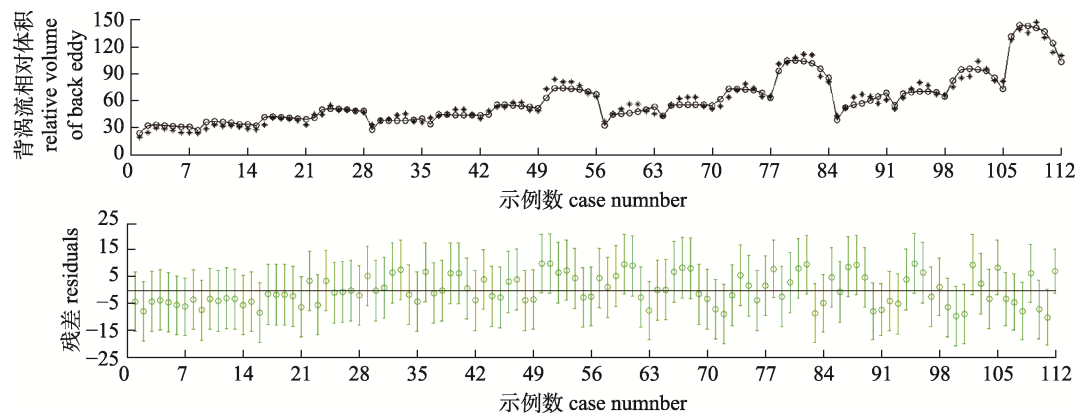


图 11 背涡流相对体积回归值与残差
*: 模拟值, ○: 回归值.

Fig. 11 The regression value of relative volume of back eddy and the residual
*: simulated value; ○: regression value.

放量不足无法达到预期效果, 投放量过多则人工鱼礁相互遮蔽^[35], 不仅影响流场效率, 同时造成经济浪费。由于各海域人工鱼礁建设目标不同, 流场效应的评价标准存在差异, 因此合理规划不同建设目标下单位鱼礁规模是“减量提质提效”建设策略的保障。下文简述基于流场效应综合评价模型, 以增殖东海区典型放流鱼种黑鲷为目的的单位鱼礁规划设计方案。

3.1 建设规划生物与物理条件

黑鲷喜欢栖息于泥沙和多岩礁底质水域底层, 人工鱼礁的投放对黑鲷具有明显的诱集效果^[36], 林军等^[23]、王森等^[37]通过分析人工鱼礁水槽内黑

鲷幼鱼的动态分布趋势, 确定出黑鲷偏于喜爱流态复杂的背涡流区, 且流速为背景流速的 0.72~0.80 倍, 因此本规划主要任务是计算目标流速下背涡流最大体积时的单位鱼礁建设规模。计划人工鱼礁投放区水深为 30 m, 平均流速为 0.5 m/s, 底质类型为粉砂质, 满足人工鱼礁建设要求, 人工鱼礁投放量为 5000 空 m³, 鱼礁类型为米字型礁体。

背涡流体积回归模型, 计算得出不同单位鱼礁规模下背涡流最大相对体积与对应布设间距, 并计算单体鱼礁效率用于说明鱼礁单体的利用程度, 具体如表 1 所示。当布设模式分别为 2×2、

表 1 单体人工鱼礁 4 种布设模式下背涡流最大相对体积与对应布设间距

Tab. 1 Maximum relative volume of back eddy and corresponding laying distance in 4 laying modes of single artificial reefs												
速度比 velocity ratio	布设模式 laying mode											
	2×2			3×3			4×4			5×5		
	布设 间距 d laying distance	相对体积 relative volume	单体效率 single efficiency	布设 间距 d laying distance	相对体积 relative volume	单体效率 single efficiency	布设 间距 d laying distance	相对体积 relative volume	单体效率 single efficiency	布设 间距 d laying distance	相对体积 relative volume	单体效率 single efficiency
0.72	1.99	33.77	8.44	2.06	44.49	4.94	1.83	53.45	3.34	1.54	61.99	2.48
0.73	1.97	34.58	8.65	2.04	45.84	5.09	1.81	55.57	3.47	1.53	65.10	2.60
0.74	1.94	35.45	8.86	2.01	47.33	5.26	1.80	57.95	3.62	1.52	68.63	2.75
0.75	1.92	36.39	9.10	1.99	48.99	5.44	1.78	60.63	3.79	1.51	72.62	2.90
0.76	1.89	37.43	9.36	1.97	50.84	5.65	1.77	63.65	3.98	1.50	77.15	3.09
0.77	1.86	38.57	9.64	1.94	52.92	5.88	1.75	67.07	4.19	1.49	82.29	3.29
0.78	1.84	39.82	9.96	1.92	55.25	6.14	1.74	70.95	4.43	1.48	88.15	3.53
0.79	1.81	41.20	10.30	1.90	57.89	6.43	1.72	75.35	4.71	1.47	94.82	3.79
0.80	1.79	42.74	10.69	1.88	60.87	6.76	1.71	80.35	5.02	1.46	102.43	4.10

3×3、4×4 和 5×5 时,目标速度比条件下最大相对体积对应布设间距范围分别为 1.79~1.99 倍、1.88~2.06 倍、1.71~1.83 倍和 1.46~1.54 倍;人工鱼礁投放量越多,鱼礁单体效率越低。本文提出单位鱼礁规划设计需满足两条准则,第一准则为投放量,即到达一定投放标准,同时鱼礁单体效率较高;第二准则为布设间距,即布设间距既要考虑礁体间流场的协同效应,又要使流场体积最大,因此下文单位鱼礁规模按照以上准则进行设计。

3.2 人工鱼礁规划设计第一准则

人工鱼礁单体流场相对体积代表单体效率,单体效率越高说明人工鱼礁利用越充分,若仅以单体效率作为建设模式选择依据,其单位人工鱼礁投放量越少,鱼礁利用率及作用效果越强,尤以 2×2 模式鱼礁作用效率最佳,其单位人工鱼礁投放量为 108 空 m^3 。然而人工鱼礁投放只有达到一定的建设规模才能体现出生态修复及资源养护效应,中国人工鱼礁建设中单位人工鱼礁量参照日本人工鱼礁投放标准设定,要求单位人工鱼礁投放量大于 400 空 m^3 ,东海区一般为 600 空 m^3 左右^[38],因此 2×2 模式仅考虑鱼礁单体效率最佳而忽略生态-生物效果是不可取的。在满足单位鱼礁投放量的前提下,当布设模式为 4×4 及 5×5 时均达到单位人工鱼礁投放量要求,分别为 432 空 m^3 和 675 空 m^3 ,两种模式人工鱼礁单体效率范围分别为 3.34~5.02 和 2.48~4.10,单体效率出现重合,因此两种模式均可考虑。

3.3 人工鱼礁规划设计第二准则

人工鱼礁建设过程中首先形成单位鱼礁,单位鱼礁按一定间隔排列形成鱼礁群,鱼礁群是人工鱼礁发挥资源增殖效应的基本规模^[39]。根据已有关于米字型人工鱼礁布设间距的研究,当布设间距大于 4 倍单体边长时,沿来流方向相邻鱼礁单体间流场效应无协同效应^[26],因此构成鱼礁群的单位鱼礁间隔应大于鱼礁单体边长的 4 倍,即大于 12 m,同时也有研究指出单位鱼礁间隔为 100~200 m。2 种模式单位鱼礁按照间距为 100 m 排列成鱼礁群,则鱼礁群长度分别为 1280 m 和 930 m,均符合一般海域人工鱼礁计划建设范围内。构成 0.72~0.80 速度比的总背涡流相对体积分

别为 587~883 和 433~717,因此单位鱼礁布设模式为 4×4 时的流场总体积大于 5×5 时的流场体积。

合理规划人工鱼礁建设模式是高效建礁的基础^[40],而人工鱼礁建设能否达到预期效果取决于现场施工能力^[41]。由于海况条件、投放技术和其他人为因素均会影响人工鱼礁施工效果,使鱼礁实际位置出现偏差,沈天跃^[42]利用 C3D 分析现场海域人工鱼礁投放间距误差呈正态分布。由于海域人工鱼礁投放所要求达到的目标速度比为 0.72~0.80,因此在 4×4 模式下不同速度比对应的最大流场体积与布设间距均为范围指标,考虑到施工误差,需要合理选择目标速度并巧妙利用误差的存在,使布设间距误差分布于计划间距范围内以达到减少施工缺陷维持建礁效果的目标。因此建议单位鱼礁规模为投放量 432 空 m^3 ,布设间距 1.77d,目标速度比值以 0.76 为主进行建设。

4 结论

本研究提出代表单位鱼礁规模的各项特征指标,并归纳了人工鱼礁流场体积计算规律,创新性地以定量方式建立单位鱼礁上升流与背涡流流场效应体积综合评价模型,并将流场体积模型用于人工鱼礁规划设计指导中。模型结果说明此方法对规划单位鱼礁建设具有一定可行性,上升流与背涡流体积模型规划值与实验值的相对误差分别为 18.61%和 10.09%,相对误差值在探索性研究的误差允许范围内,因此该流场体积回归模型及回归方程可用于 0.5 m/s 流速区均匀建设模式的米字型人工鱼礁规划建设。

参考文献:

- [1] Yang Y F, Liang H L, Liu J R, et al. The trend of artificial reef research aboard and its enlightenment to China[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(5): 19-25. [杨玉峰, 梁浩亮, 刘锦荣, 等. 国外人工鱼礁研究动向及对我国的启示[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(5): 19-25.]
- [2] Yang H S. Construction of marine ranching in China: Reviews and prospects[J]. 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[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.]
- [3] Chua C Y Y, Chou L M. The use of artificial reefs in enhancing fish communities in Singapore[J]. Hydrobiologia,

- 1994, 285(1-3): 177-187.
- [4] 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, 2019, 89(1): 13-25.
- [5] 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[J]. 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[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3926-3936.]
- [6] Fariñas-Franco J M, Roberts D. Early faunal successional patterns in artificial reefs used for restoration of impacted biogenic habitats[J]. Hydrobiologia, 2014, 727(1): 75-94.
- [7] Cultivating the blue land to promote green development—Typical experience exchange of national marine ranch construction[J]. China Fisheries, 2018(11): 4-10. [耕耘蓝色国土推动绿色发展——全国海洋牧场建设典型经验交流[J]. 中国水产, 2018(11): 4-10.]
- [8] Li F. Shengsi, Zhejiang: Construction of marine ranch to conserve “blue land”[J]. China Land, 2019(3): 56-57. [李凤. 浙江嵊泗:建设海洋牧场养护“蓝色国土”[J]. 中国土地, 2019(3): 56-57.]
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Mazzei V, Biber P. Autotrophic net productivity patterns at four artificial reef sites in the Mississippi Sound[J]. Hydrobiologia, 2015, 749(1): 135-154.
- [12] Ceccaldi H J. Contribution to the planning of the research in artificial reefs programs[M]//Global Change: Mankind-Marine Environment Interactions. Dordrecht: Springer, 2010: 67-72.
- [13] Hepburn L J, Blanchon P, Murphy G, et al. Community structure and palaeoecological implications of calcareous encrusters on artificial substrates across a Mexican Caribbean reef[J]. Coral Reefs, 2015, 34(1): 189-200.
- [14] Clarke R D, Finelli C M, Buskey E J. Water flow controls distribution and feeding behavior of two co-occurring coral reef fishes: II. Laboratory experiments[J]. Coral Reefs, 2009, 28(2): 475-488.
- [15] Lin J, Zhang S Y. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(3): 257-262. [林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 257-262.]
- [16] Xiao R. Numerical simulation on features of flow field and transport of nutrient around hollow artificial reefs[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [肖荣. 镂空型人工鱼礁流场效应及营养盐输运的数值模拟研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [17] Burt J, Bartholomew A, Usseglio P, et al. Are artificial reefs surrogates of natural habitats for corals and fish in Dubai, United Arab Emirates?[J]. Coral Reefs, 2009, 28(3): 663-675.
- [18] Wang X M, Tang Y L, Sun X M, et al. Catch community structure characteristics and their relationships with environmental factors in the Xiao Shidao artificial reef sea area of Weihai[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 34-43. [王新萌, 唐衍力, 孙晓梅, 等. 威海小石岛人工鱼礁海域渔获物群落结构特征及其与环境因子相关性[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 34-43.]
- [19] 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.
- [20] 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. [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.]
- [21] 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, 297-298. [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, 297-298.]
- [22] Zheng Y X. Flow field effect and physical stability of artificial reefs[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. [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.]
- [23] Lin J, Zhang S Y, Ye L N. Optimization study of artificial reef assemblage based on the numerical simulation of flow field[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(7): 1023-1031. [林军, 章守宇, 叶灵娜. 基于流场数值仿真的人工鱼礁组合优化研究[J]. 水产学报, 2013, 37(7): 1023-1031.]
- [24] Li J, Zhang S Y. The comparison between numerical simu-

- lation and water channel experiment on an Mi-zi artificial reef[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 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[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1587-1594.]
- [25] Yoshimuta Y, Lyu X M. Reef scale and launch conditions[J]. Guowai Shuichan, 1985(2): 37-41. [吉牟田长生, 吕晓明. 鱼礁规模与投放条件[J]. 国外水产, 1985(2): 37-41.]
- [26] Guo Y, Zhang S Y, Lin J. Flow field efficiency of Mi-zi artificial reefs in different construction modes based on numerical experiments[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 2025-2038. [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.]
- [27] Zhang S Y, Zhou X J, Wang K, et al. Review of marine live-stock ecological urbanization hypothesis and marine ranching construction key-technology against blue growth background[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 81-96. [章守宇, 周曦杰, 王凯, 等. 蓝色增长背景下的海洋生物生态城市化设想与海洋牧场建设关键技术研究综述[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 81-96.]
- [28] Duan D Y, Qin C X, Zhu W T, et al. Study on the ecological classification of marine ranching based on landscape ecology: A case study in Zhelin Bay marine ranching[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(2): 1-11. [段丁毓, 秦传新, 朱文涛, 等. 海洋牧场景观生态分类研究: 以柘林湾海洋牧场为例[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(2): 1-11.]
- [29] 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. [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.]
- [30] Wang L, Huang C H. Research of color difference model of multivariate regression based on MATLAB[J]. 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[J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(8): 1015-1018.]
- [31] Ren Z G, Pei X J, Gu W T. Estimation model of debris flow provenance based on multiple nonlinear regression[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2016, 32(3): 56-61. [任志刚, 裴向军, 顾文韬. 基于多元非线性回归的极震区泥石流物源量估算模型[J]. 水电站设计, 2016, 32(3): 56-61.]
- [32] Li N. Research on application of multiple nonlinear regression analysis in computer color matching for textile dyeing[D]. Qingdao: Qingdao University, 2014. [李楠. 多元非线性回归分析在织物染色计算机配色中的应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2014.]
- [33] Dong D X. The multivariate nonlinear regression model based on MATLAB[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2009, 29(2): 45-48. [董大校. 基于 MATLAB 的多元非线性回归模型[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2009, 29(2): 45-48.]
- [34] Charbonnel E, Harmelin J G, Carnus F, et al. Artificial reefs in Marseille (France, Mediterranean Sea): From complex natural habitats to concept of efficient artificial reef design[J]. Brazilian Journal of Oceanography, 2011, 59(s1): 177-178.
- [35] Hattori A, Kobayashi M. Configuration of small patch reefs and population abundance of a resident reef fish in a complex coral reef landscape[J]. Ecological Research, 2007, 22(4): 575-581.
- [36] Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, et al. Attraction effect of various artificial reef models on *Sparus macrocephalus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(5): 711-718. [周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 10 种人工鱼礁模型对黑鲷幼鱼的诱集效果[J]. 水产学报, 2011, 35(5): 711-718.]
- [37] Wang M, Zhang S Y, Wang W D, et al. Experimental study on the juvenile *Sparus macrocephalus*'s tendency to different structural spaces of artificial reef[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(11): 1762-1768. [王森, 章守宇, 王伟定, 等. 人工鱼礁的矩形间隙对黑鲷幼鱼聚集效果的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(11): 1762-1768.]
- [38] Zeng L, Tang Z Z, Jia X P, et al. Study on the trapping effect of artificial reefs on small reef fishes in Fangchenggang Gulf[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(4): 783-795. [曾雷, 唐振朝, 贾晓平, 等. 人工鱼礁对防城港海域小型岩礁性鱼类诱集效果研究[J]. 中国水产科学, 2019, 26(4): 783-795.]
- [39] Li B D. Discussion on the direction of China's reefs construction from the artificial reefs construction in Japan[J]. Marine Fisheries, 1985, 7(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[J]. 海洋渔业, 1985, 7(6): 248-253.]
- [40] Wang Z C, Chen G B, Zeng L, et al. Exploration of 5 species of rock fishes in the Fangchenggang artificial reef area using ultrasonic biotelemetry[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(1): 53-62. [王志超, 陈国宝, 曾雷, 等. 防城港人工礁区内 5 种恋礁鱼类的声学标志跟踪[J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 53-62.]
- [41] Yin Z Q. Study on theory method of effect evaluation of the artificial reef[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2010. [尹增强. 人工鱼礁效果评价理论与方法的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2010.]
- [42] Shen T Y. Research on the evaluation method of delivery error of artificial reefs[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [沈天跃. 人工鱼礁投放误差评价方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]

Quantitative study on the flow field effect of Mi-zi artificial reefs based on unit reef scale

GUO Yu, ZHANG Shouyu, LIN Jun

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

Abstract: With the current situation of resource depletion and environmental changes, artificial reefs may be used to promote the fish trapping and breeding to proliferate and conserve fishery resources and restore the ecosystems. The main idea of artificial reef construction was to stimulate the production and transmission of nutrients, sediment size, and primary productivity through the unique flow field generated around the reef, and to proliferate plankton, pelagic swimming organisms, and benthic resources in the form of food supply and habitat transformation. Therefore, the flow field effect of artificial reefs was based on ecological-biological interactions. The strength of the flow field effect is affected by the scale of artificial reef unit. The measurement of the artificial reef construction mode was one of the most important factors for planning the scale of artificial reef construction. The flow field volume was an important indicator to characterize the flow field effect. Based on the numerical experimental method, this paper analyzed the variation of the flow field volume of Mi-zi artificial reefs in 28 kinds of artificial reef scale units in four laying modes, and established the multivariate nonlinear model for the flow field volume of upwelling and back eddy and artificial reef construction model indicators. The results showed that in the primary indicators of artificial reef construction, the throwing amount (T_a), laying distance (L_d) and target velocity ratio (R_u) and upwelling volume were linear, cubic, and power function, respectively. Combining the relative length (L_r) and volume ratio of unit artificial reef (V_R) of the secondary index to establish the upwelling volume regression model was $V_u = T_a \times (0.002L_r^2 - 0.055L_r - 2.429V_R \times R_u + 0.011R_u^{-1.833} + 0.227L_d + 0.437)$, and the back eddy volume regression model was $V_b = R_u \times (-0.543L_r^2 + 2.388L_r) - 51.779V_R^2 + 75.045V_R + 1.449 \times 10^{-4}T_a \times e^{12.049R_u} + 1.620L_d \times T_a$. The nonlinear regression fitting R^2 were 0.957 and 0.938, and the relative errors were 18.61% and 10.09%, respectively. The flow field volume regression model can be used to plan the construction of artificial reefs that guide the uniform laying mode, and gradually realize the artificial reef construction strategy of “reducing mass and improving efficiency”.

Key words: unit reef scale; flow field effect; flow field volume; multivariate nonlinear model; numerical experiment; Mi-zi artificial reefs

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