

不同布设间距和来流速度下方型人工鱼礁 上升流效应的数值模拟*

成泽毅 叶 灿 高 宇 宋金宝 李 爽

(浙江大学海洋学院 浙江舟山 316021)

摘要 合理的人工鱼礁组合可以有效改善投放水域的流场效应,提高投放水域底层与上层水体之间的扰动。通过使用并行大涡模拟模式及被动示踪物模块,并通过调整人工鱼礁布设间距,研究了在不同背景流速条件(0.1、0.5、0.6 和 1.0 m/s)下,在不同的横向间距(1L、2L、3L)(L 表示人工鱼礁的边长)或纵向间距(1L、2L、3L、4L、5L)情况下,方型人工鱼礁对上升流体积、营养盐的抬升和垂向涡黏系数的影响。研究表明,在同一布置条件下,单排布置下的三块人工鱼礁形成的上升流体积大小与来流速度成正相关,体积随来流流速增加而增大 6.4%~80.5%;在同一流速条件下,上升流体积大小与纵向布置的间距成正比,与横向布置的间距成反比;在横向布置条件下,当来流速度为 1.0 m/s、布设间距为 1L 时,上升流体积参数最佳。总体来说,上升流体积参数、示踪物浓度差和垂向涡黏性系数均显示横向布置优于纵向布置,相较于布设间距,来流速度是影响上升流体积最重要的因素。

关键词 大涡模拟;人工鱼礁;上升流;被动示踪物;垂向涡黏系数

中图分类号 P731.26 **doi:** 10.11693/hyh20221000262

人工鱼礁作为海洋牧场工程的基础构筑物,随着海洋牧场在我国的大力发展得到了广泛应用。人工鱼礁是在相应海域人为放置的构造物,用于营造海洋牧场,改善水域中水生生物的栖息环境,调控和优化海洋生态环境,为海洋经济生物提供索饵、庇护、生长、发育和繁育生殖的场所,起到增加增殖渔业资源的作用(高策, 2021)。投放人工鱼礁作为保护海洋生物多样性和促进海岸栖息地恢复的有效方法之一,在改变海洋流场方面有着重要的作用,人工鱼礁投放会使海洋当中沉积物粒度分布发生变化,这种方法有利于海洋中有机物质的积累(Davis *et al.*, 1982; Ambrose *et al.*, 1990)。冯雪等(2021)的研究指出,与未投放人工鱼礁相比,在人工鱼礁所投放的海域,鱼类种类占有海洋生物的比例从 39.13%提高到 63.89%,这一现象说明了投放人工鱼礁对提升鱼类资源密度方面有显著的正向效果。张镇等(2022)的研究表明,长礁龄的人工鱼礁产生了良好的生态效应,而短礁

龄的人工鱼礁生态效应尚不明显,这表明布设人工鱼礁所引起的生态效应会随着时间的增加而加强,长期布置人工鱼礁会引起积极的效应。人工鱼礁的投放还会使被投放地区的细菌种类发生变化,硫氧化菌丰度显著降低,海洋沃斯菌和脱硫细菌丰度显著升高(王宇等, 2022)。投放人工鱼礁会影响所在海域的流场,可以显著改变礁体附近的局部水流分布情况,即流速、湍流模式和沉积状况等,为鱼类提供合适的栖息地(郭禹等, 2020)。同时,礁体附近流速变化是引起礁体鱼类聚集效应的重要因素,与礁体大小和构型密切相关。人工鱼礁所处的海域相对较浅,处于海洋上混合层,动量、热量和物质交换的通量都是由这个边界层上的湍流垂向混合所控制的,因此,研究垂向混合对于研究人工鱼礁来说也至关重要。于定勇等(2019, 2020b)研究了不同布设间距下方型人工鱼礁的水动力特征,之后又探究了不同间距下梯型人工鱼礁的水动力特征,但研究局限于上升流特性参

* 国家自然科学基金项目, 41830533 号, 41876003 号。成泽毅, 硕士研究生, E-mail: 22034126@zju.edu.cn

通信作者: 李 爽, 博士生导师, 副教授, E-mail: lshuang@zju.edu.cn

收稿日期: 2022-10-17, 收修改稿日期: 2022-12-05

数。相关研究指出,湍流可以提高浮游植物的营养吸收(Zhao *et al.*, 2020)。高永丽(2019)在其文献中提到,改变垂向湍流系数会导致深层叶绿素最大值(deep chlorophyll maximum, DCM)现象的变化,若垂向湍流扩散减弱到一定程度,还会激发 DCM 的振荡状态。

近年来的研究指出,人工鱼礁所在的礁区地形、鱼礁的礁体高度、鱼礁与鱼礁之间的间距以及礁体的开口比等一系列状态参数对于鱼礁的生物诱集效应有着直接或间接的影响,并最终决定人工鱼礁附近海域的生态、经济效益。人工鱼礁的形态结构以及其排列组合的多样性是导致鱼礁所在海域流场不同的直接原因。于定勇等(2019)提出不同开口比的人工鱼礁会影响水动力特征,当开口比小于 0.2 时,背涡区范围较大,流场效应明显;随着开口比的增大,礁体产生的上升流范围及竖直向最大速度分量则逐渐减小。唐衍力等(2017)根据上升流面积和背涡流面积的大小进行判断,指出针对不同形状的人工鱼礁的流场效应,根据对比试验的效果得出三角型礁流场效应最好,复合型礁流场效应次之,框架型礁流场效应最差的论断,这一结论为不同海域不同要求下人工鱼礁的选择和设计提供了参考。吕泽砚等(2022)研究了四角锥台形人工鱼礁斜面变化对上升流效应和背涡流效应的影响,找到了最优倾角为 78.7°。毛海英等(2022)也研究导流型人工鱼礁组合的流场效应,主要的评价标准是上升流体积。林明健等(2022)对方型人工鱼礁的流场效应和水动力特征进行分析,发现当组合礁体纵向布设间距为一倍礁长时,方型鱼礁的涡量发育完全,且涡量的分布结构较为稳定,但当布设间距增至两倍礁长时,涡量大小及分布范围明显减小,且随着布设间距的增大,组合礁体的最大上升流速与来流速度的比值均呈现先增大后减小的趋势。

Zhang 等(2021)通过对海底人工鱼礁不同间隔条件下的排布方式进行研究,以及在等间距和不同来流角度的情况对人工鱼礁流场效应影响问题的分析,提出了最优入流角度的布局方式。Wang 等(2021)研究在不同孔隙率的条件下,人工鱼礁对流场的影响,并利用上升流指数和尾流再循环指数来评价人工鱼礁流场效应的有效性。Liu 等(2013)利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)来研究布局变化对礁体周围海域的影响,得出密集的礁体布置可以增大背涡流区域的范围的结论,但该方案并不是最优的部署战略,礁体之间应保持适当的距离以达到最佳的效果。Campbell 等(2011)指出,人工鱼礁的

排列和组合也是影响人工鱼礁所在区域生态价值的重要因素。此外,Liu 等(2013)指出,人工鱼礁的在海底的排列和组合也是影响人工鱼礁所在区域生态价值的重要因素。Su 等(2007)还研究了海底地形对人工鱼礁内外流场的影响。Jiang 等(2010)利用重整化群理论(the renormalization group theory, RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型和水槽实验模型对单体鱼礁产生的流场进行分析,得出模型结果可以代替试验结果的论断,说明了该湍流模型在进行流场分析中有着很高的适用性。

投放人工鱼礁会影响所在海域流场,人工鱼礁的存在可以显著改变礁体附近水流的分布特征,来为鱼类提供合适的栖息地。礁体附近流速的变化是导致出现礁体鱼类聚集效应的重要因素,这与礁体的大小和构型密切相关。利用上升流将底部营养盐带到表层,最好的办法就是加强单个人工鱼礁的上升流效应,而加强上升流效应最简单的办法就是优化人工鱼礁的布局模式和选择合适的布设地点。合理的人工鱼礁组合,不仅可以有效改善人工鱼礁的整体流场效应,而且在提高人工鱼礁区底层与上层水体之间扰动方面有着至关重要的作用。掌握不同排布方式下的人工鱼礁流场分布及营养分布的情况,对日后的研究有着十分重要的价值。因此,本文为找出单排多块人工鱼礁的最优布设方式,通过改变人工鱼礁布置方式,调整鱼礁间的排布间距,控制模式来流速度的大小,来分析对不同因素对人工鱼礁上升流体积的影响,从而找出最优的布置方式。

1 模式设计

1.1 数值模式设置

本文使用的大涡模拟(large-eddy simulation, LES)模式是大气和海洋流动的并行大涡模拟模式(the parallelized large-eddy simulation model, PALM),该模式由德国莱布尼茨大学气象和气候学研究所开发。大涡模拟是基于湍流通量的空间平均,湍流通量利用特定的滤波函数分为大尺度和小尺度涡,然后直接模拟大尺度涡流,而将小尺度涡流进行参数化(Maronga *et al.*, 2015)。LES 模型的基本控制方程由公式(1)~(5)给出。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \varepsilon_{ijk} f_j u_k + \varepsilon_{i3} f_{3g,j} - \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial u_j \theta}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u_j \theta''} \right) - \frac{L_v}{C_p \Pi} \psi_{q_v}, \tag{3}$$

$$\frac{\partial S_a}{\partial t} = -\frac{\partial u_j S_a}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u_j S_a''} \right) + \psi_{S_a}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial u_j S}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u_j S''} \right) + \psi_S, \tag{5}$$

其中, t 是时间, (i, j, k) 分别代表笛卡尔坐标系的 (x, y, z) 方向; 这里的科氏力是 $f_i = [0, 2\Omega \cos(\varphi), 2\Omega \sin(\varphi)]$, Ω 是地球旋转速度, φ 是地球纬度; η 是修改后的扰动压力, $u_{g,k}$ 是表示地转风速, ρ 是海水密度, p 是静水压力, C_p 是恒压干燥空气比热容, L_v 是蒸发潜热, $e = \frac{1}{2} \overline{u_i'' u_i''}$ 是亚网格尺度的湍流动能(turbulent kinetic energy, TKE), $\mu/\rho = \nu$ 为运动黏度系数, μ 为动力黏度系数, S_a 为实际盐度, S 为示踪物浓度, $\psi_{q_v}, \psi_{S_a}, \psi_S$ 分别为 q_v, S_a 和 S 的源和汇项。引号表示亚网格尺度值, 而上划线是表示平均值。模式的详细介绍见 Maronga *et al* (2015) 与 Huq *et al* (2019)。详细参数信息请见表 1。

表 1 参数列表
Tab.1 List of parameters

符号	单位	说明
t	s	时间
u_i	m/s	速度分量 ($u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$)
x_i	m	笛卡尔网格坐标 $x_i (x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z)$
ε	/	列维-奇维塔符号
f_i	s ⁻¹	科氏力参数
ρ_0	kg/m ³	海水密度
η	hPa	修改后的扰动压力
C_p	kJ/(kg·k)	恒压干燥空气比热容
L_v	kJ/kg	蒸发潜热
θ	K	位势温度
θ_v	K	虚位温度
ν	/	运动黏度系数
δ_{i3}	/	克罗内克符号
e	m ² /s ²	次网格湍流动能
q_v	kg/kg ¹	湿度
S_a		盐度
S	kg/m ³	被动示踪物的浓度
ψ_{q_v}	kg/(kg·s)	湿度的源/汇项
ψ_S	kg/(m ³ ·s)	示踪物(营养盐)的源/汇项
Π	/	用于温度与位势温度之间的转换

1.2 礁体模型布置与计算区域设置

人工鱼礁的结构繁多, 有方型体(林明健等, 2022), 圆筒型(胡聪等, 2022), 六角型(刘扬等, 2021), 梯形台(于定勇等, 2020b)和组合型。在我国东部海域, 方型鱼礁已被广泛使用。肖荣等(2016)的研究中说明, 相较于船礁和梯形台鱼礁, 方型鱼礁在鱼礁区域营养盐垂直通量最大。为研究布设间距和来流速度对上升流体积和营养盐抬升效果的影响, 故本项研究采用的是 3 m×3 m×3 m 的方型人工鱼礁。计算域和相关参数如图 1 所示, 空间分辨率为 0.25 m, 计算时间为 28 800 s(即 8 h)。Jiang 等(2020)考虑到中国山东省海域的常见流速为 0.5 m/s, 根据亚太数据研究中心数据库(Asia-Pacific Data-Research Center, APDRC)中混合海洋坐标模型(the hybrid coordinate ocean model, HYCOM)查出, 中国近海流速在 0.32~0.52 m/s 的范围内, 并且 Li 等(2017)指出, 根据声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)测得的海洋数据, 真实的海洋流速要小于 1.0 m/s, 故将此模型的来流速度设置为 0.5 m/s, 并作为正常流速状态。崔勇等(2011)研究布设间距对人工鱼礁流场效应影响时, 将来流速度设置为 0.4、0.6 和 0.8 m/s。根据前人经验, 本次研究将来流速度参数设

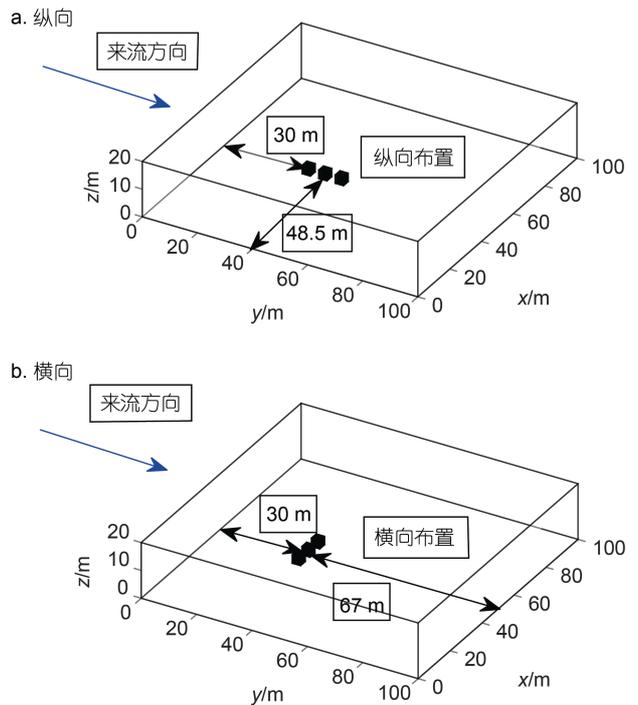


图 1 布置的计算域

Fig.1 Computational domain of the arrangement
注: a 表示纵向, b 表示横向, 黑色正方体表示人工鱼礁

置选取 0.1、0.5、0.6 和 1 m/s 四种流速, 分别表示低流速状态、正常流速状态、过度状态和极限高流速状态, 布设间距以人工鱼礁的礁长(L)为标准, 横布设间距选取 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍和 5 倍鱼礁礁长($1L$ 、 $2L$ 、 $3L$ 、 $4L$ 、 $5L$), 纵向布设间距选取 1 倍、2 倍和 3 倍鱼礁礁长($1L$ 、 $2L$ 、 $3L$), 并将正常流速(0.5 m/s)状态作为重点分析部分。另外设计一组对照的空白实验, 即不放置人工鱼礁, 其余参数均一致。入流边界条件为非循环边界条件; 表层、底层边界采用自由滑动边界条件。

被动示踪物浓度梯度见图 2 所示。盐度、被动示踪物浓度的分布是根据曹欣中(1983)所设定的, 盐度为 28, 此次研究设置的纬度为 30°N , 根据数据库 APDRC 中 Ocean temperature 得到中国近海的海表温度数据, 从纬度上看, $50^\circ\sim 20^\circ\text{N}$ 的海表温度呈递增趋势, 温度 $5\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$, 设计实验时将纬度设置为 30°N , 根据相关资料得到实际中国近海 30°N 处的海水温度大约在 $19\sim 22\text{ }^\circ\text{C}$, 本实验中选取 $22\text{ }^\circ\text{C}$, 即 295.15 K 的情况进行分析。在实验中加入被动示踪物的原因是在大涡模拟下营养盐与被动示踪物在水体中的运动特性相似(王者也等, 2021), 可以利用被动示踪物来表示海水中营养物质的分布。

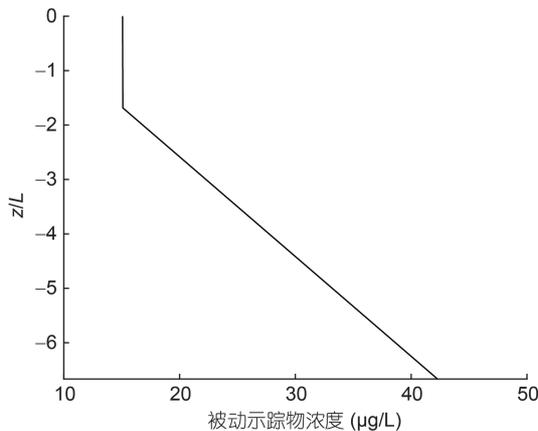


图 2 初始被动示踪物

Fig. 2 Concentration of passive scalar profiles at the initial time
注: z 表示模拟场深度; L 表示人工鱼礁的边长

2 模拟结果与讨论

2.1 人工鱼礁纵向布置的流场效应及示踪物浓度分析

2.1.1 纵向不同间距对上升流的影响 人工鱼礁流场效应是指在礁体投放到海域后, 使得原有的流场发生改变, 在鱼礁投放海域内形成新的流场形态, 根据新流场的形态特征与作用形式。上升流位于单位人工鱼礁迎流面向, 由于礁体阻隔作用而产生的

沿鱼礁迎流面向上的流场作用区(郭禹等, 2020)。上升流的定义选用唐衍力等(2017)一文中的所给出结论, 即选取 $z=0$ 中垂面(xoy 平面)作为研究的基准面, 将 Y 方向流速分量与来流速度之比等于或大于 10% 的区域定义为上升流区域(郑延璇等, 2012), 即将垂向流速分量与来流速度之比等于或大于 10% 的区域定义为上升流区域。来流速度设置为正常流速(0.5 m/s)。

在来流速度为 0.5 m/s 时, 不同纵向布置间距的人工鱼礁投放区域对应的流速减去空白对照组的情况(图 3)。在该布置条件下, 随着单排布置下三块人工鱼礁之间的距离增大, 上升流体积也缓慢地增大, 当相邻鱼礁之间的距离只有 $1L$ 时, 上升流主要分布在迎着来流方向上的第一个礁体顶部向上一段区域, 最大上升流流速贴近在第一个礁体顶部, 上升流最大高度与人工鱼礁高度值比是 2.51; 当相邻间距增大到 $2L$ 时, 相邻鱼礁之间及鱼礁后方区域的出现向上交换的水体, 随着间距继续增大, 上升流体积快速增大, 在间距达到 $5L$ 时, 纵向布置下的人工鱼礁投放区域产生的上升流体积最大, 达到 437.375 m^3 , 上升流最大高度与人工鱼礁高度值比达到 2.60。由此可知, 想要保证良好的上升流效应, 在来流速度为 0.5 m/s 时, 纵向布置的布设间距应该设为 $5L$ 。5 种布置间距所形成的上升流主要分布区域均在迎着来流方向上的第一个礁体顶部。相关参数见表 2。

2.1.2 纵向不同间距对湍流垂向涡黏系数的影响 湍流垂向涡黏系数(K_M)与湍流结构密切相关, 对混合层海洋运动有着十分重要的作用(Paskyabi *et al*, 2014)。1877 年, Boussinesq 首次提出湍流涡黏度假设, 表达式如下:

$$\overline{u'w'} = -K_{Mx} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, \overline{v'w'} = -K_{My} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}, \quad (6)$$

$$\overline{u'T'} = -K_H \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \overline{v'S'} = -K_H \frac{\partial \bar{S}}{\partial z}, \quad (7)$$

其中, $\overline{u'w'}$ 、 $\overline{v'w'}$ 分别为 x 方向和 y 方向上速度二阶矩的平均值, $\overline{u'T'}$ 、 $\overline{v'S'}$ 分别为 x 方向上温度二阶矩平均值和 y 方向上示踪物二阶矩的平均值, $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}$ 分别为 x 方向和 y 方向上平均速度沿垂向梯度的平均值, $\frac{\partial \bar{S}}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ 分别为 x 方向和 y 方向上平均示踪物和平均温度沿垂向梯度的平均值, K_{Mx} 为 x 方向的垂向涡黏系数, K_{My} 为 y 方向的垂向涡黏系数, K_H 为标量扩散系数。

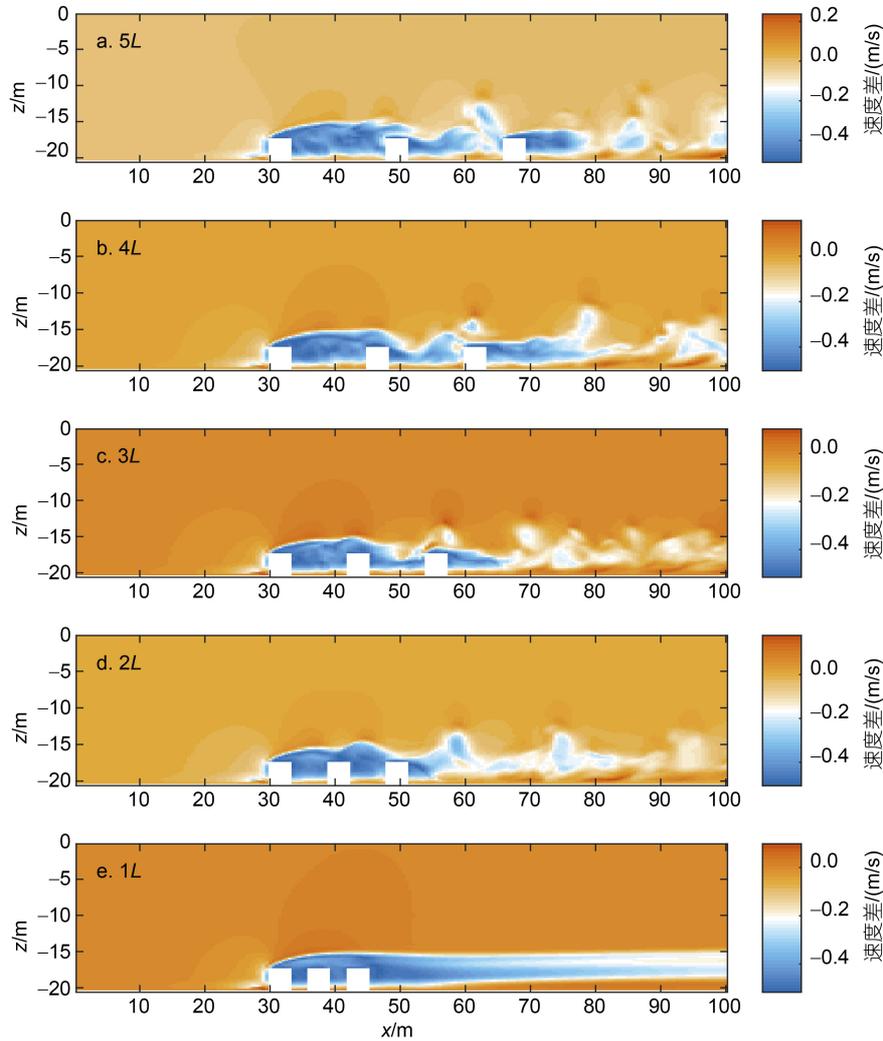


图 3 来流速度为 0.5 m/s, $x-z$ 剖面上鱼礁区域的不同倍数纵向间距下的速度差云图

Fig.3 The nephogram of velocity difference at incoming flow velocity of 0.5 m/s over the reef area at $x-z$ section at different times of longitudinal spacing

注: a: 5L; b: 4L; c: 3L; d: 2L; e: 1L; 白色立方体表示人工鱼礁, x 表示模拟区长度, z 表示模拟场深度

表 2 纵向布置相关特征参数

Tab.2 Longitudinal arrangement of the relevant feature parameters

布设间距	上升流最高速度 (m/s)	上升流最大高度 与礁体高度之比	上升流 体积/m ³
1L	0.597 5	2.51	235.375
2L	0.678 3	2.55	240.375
3L	0.602 0	2.61	287.562
4L	0.656 1	2.62	356.857
5L	0.697 8	2.60	437.375

注: L 表示人工鱼礁的礁长

通过利用公式(6)、公式(7)和稳定后的模拟数据, 得到了在 0.5 m/s 来流速度下, 不同布设间距 L 对应的 K_M 值(图 4)。这里将模拟区域水底设置为-1, 模拟

区域海水表面设置为 0, z 表示整个流场深度。 K_M 的数值随着深度的变浅, 会出现一个突起的“峰”, 位于人工鱼礁的上方。由此说明在鱼礁顶部存在一个湍流运动。随着布设间距 L 的增大, 同一深度的垂向涡黏系数的数值越大, 最大情况是 5L, 最大值达到了 0.018 7 m²/s, 最小值是 1L 的情况, 为 0.004 7 m²/s。并且, K_M 的最大值并不随着深度移动, 而是保持在同一个深度处。鱼礁间距从 1L 到 2L 时, K_M 值有明显的增加, 而间距从 2L 到 5L 时, K_M 值增加平缓。

2.1.3 纵向不同间距对被动示踪物的影响 为验证人工鱼礁产生的上升流对被动示踪物是否有抬升作用, 分析不同布置方式对被动示踪物抬升效果的影响, 在纵向布置 0.5 m/s 来流速度下, 各实验组减

去空白对照组, 得到被动示踪物的差值(图 5)。

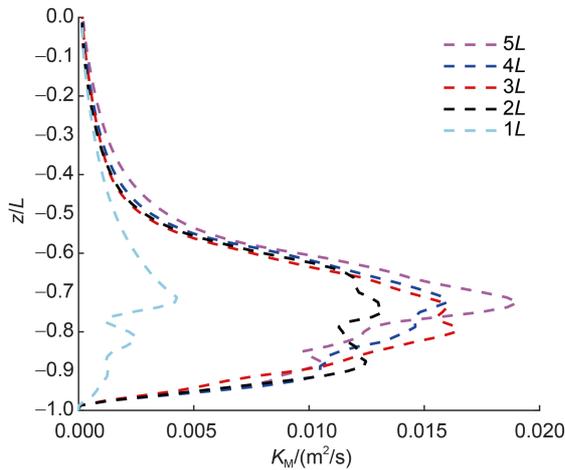


图 4 纵向布设下, 不同布设间距条件下的垂向涡黏系数 K_M 情况

Fig.4 The K_M in longitudinal layout in different layout spacing

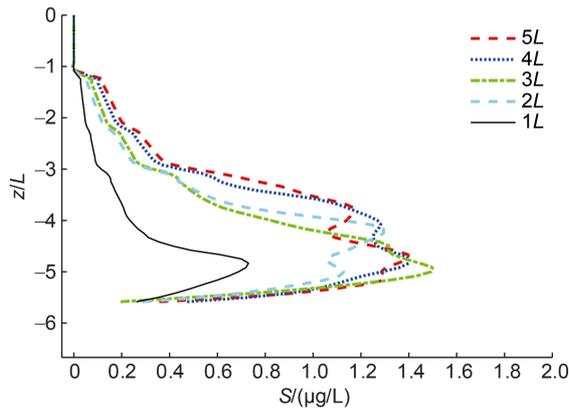


图 5 0.5 m/s 的来流速度下, 实验组与对照组在 x - z 方向的被动示踪物浓度 S 的差值

Fig.5 The difference of passive tracer's concentration in the x - z direction between the experimental group and the control group at incoming flow velocity of 0.5 m/s

由于人工鱼礁的抬升作用, 在鱼礁底部的被动示踪物被上升流水体裹挟进入上层水体, 与人工鱼礁间距的改变使得被动示踪物浓度 S 的差值在 $1.5 \mu\text{g/L}$ 以内; 与其他布设间距相比, 当布设间距为 $1L$ 时对被动示踪物的抬升效果并不佳, 仅抬升 $0.74 \mu\text{g/L}$ 的浓度差; 而布设间距大于 $1L$ 后, 鱼礁顶部上层水体被动示踪物富足, 接近海底示踪物浓度降低人工鱼礁的存在使得鱼礁所在区域的底部物质向上运输, 将在海底的营养物质带往上层水体中; 且布设间距大于 $1L$ 后, 随着鱼礁间距的增长, 被动示踪物的抬升没有明显的变化, 抬升浓度最大差值的

间距为 $3L$, 示踪物浓度差值达到 $1.498 \mu\text{g/L}$ 。

2.2 人工鱼礁横向布置的流场效应及示踪物浓度分析

2.2.1 横向不同间距对上升流的影响 在来流速度为 0.5 m/s , 不同横向布设间距的人工鱼礁投放区域对应的流速减去空白对照组的情况(图 6)。随着横向布置间距的增大, 鱼礁两边的侧向流加速主导作用也会影响礁体间的遮蔽效果, 即随着礁体间距的增大, 上升流体积不断减小, 呈现负相关。与纵向布置相反, 上升流体积最大的横向布置情况是 $1L$, 上升流最大高度与鱼礁高度之比达到 2.75 , 但随着间距继续增大, 上升流体积和上升流最大高度却在不断减小, 在间距达到 $3L$ 时, 横向布置下地人工鱼礁投放区域产生的上升流体积最小, 上升流最大高度与人工鱼礁高度值比达到 2.51 。由此可知, 在来流速度为 0.5 m/s 时, 横向布置的上升流体积最佳的布设间距应该设为 $1L$, 相关参数见表 3。

2.2.2 横向不同间距对湍流垂向涡黏系数的影响 与纵向布置的处理方法相同, 得到在横向布置情况下, 在 0.5 m/s 来流速度下, 不同布设间距 L 对应的 K_M 值(图 7)。与间距为 $1L$ 不同, 当间距为 $2L$ 和 $3L$ 时出现了两个凸起的“峰”, 一个位于鱼礁上方, 一个位于鱼礁底部, 说明在鱼礁底部和顶部分别存在两个强弱不等的湍流运动。随着布设间距 L 的最大, 同一深度的垂向涡黏系数的数值减小。与纵向排布不同的之处是, K_M 最大值并不保持在同一深度。布设间距为 $1L$ 时的 K_M 值最大, 随着布设间距 L 的增大, 同一深度处的 K_M 值减小, 在间距从 $1L$ 增大到 $2L$ 时, K_M 值减小明显, 减小 50% , K_M 值最大情况是 $1L$, 其值为 $0.0258 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.2.3 不同间距的礁体对被动示踪物的影响 在纵向布置 0.5 m/s 来流速度下, 各实验组减去空白对照组, 得到被动示踪物的差值(图 8)。随着深度的增加, 示踪物的抬升效果基本呈现先缓慢增大后迅速减小的趋势。鱼礁顶部对应的各间距抬升的示踪物浓度均为正值, 表示底部的示踪物被抬到鱼礁的上方。与其他布设间距相比, 当布设间距为 $1L$ 时对被动示踪物的抬升效果并不佳, 抬升 $2.97 \mu\text{g/L}$ 的浓度; 而布设间距大于 $1L$ 后, 随着鱼礁间距的增长, S 值显著降低, 布设间距为 $1L$ 与布设间距为 $3L$ 抬升的浓度差比值接近 3。与纵向布置不同, 在横向布置的情况下, 间距的改变对被动示踪物的抬升作用显著, 随间距的增大呈现负相关。

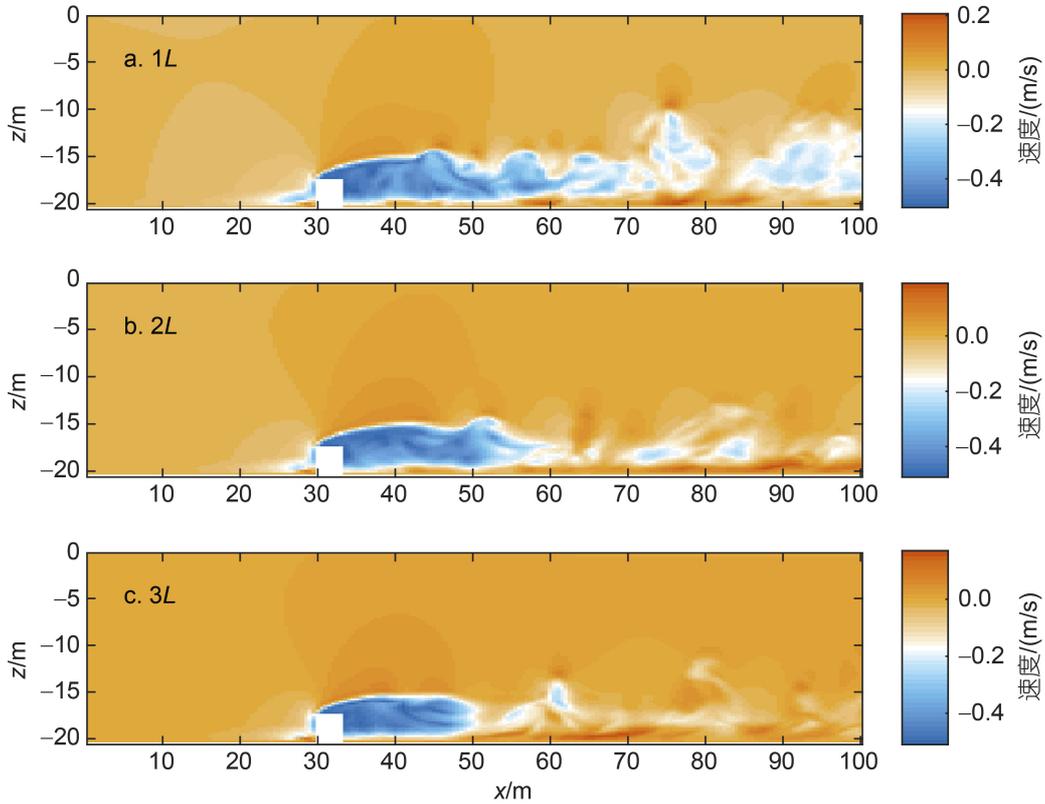


图 6 来流速度为 0.5 m/s, $x-z$ 剖面上鱼礁区域不同横向间距倍数下的速度云图

Fig.6 The nephogram of velocity difference at incoming flow velocity of 0.5m/s over the reef area at $x-z$ section at different times of transverse spacing

注: a: 1L; b: 2L; c: 3L; 白色立方体表示人工鱼礁; x 表示模拟区长度, z 表示模拟场深度

表 3 横向布置相关特征参数

Tab.3 Arrange the relevant feature parameters horizontally

布设间距	上升流最高速度 /(m/s)	上升流最大高度 与礁体高度比值	上升流体积 /m ³
1L	0.706 5	2.75	811.812
2L	0.689 7	2.65	712.468
3L	0.670 0	2.51	635.813

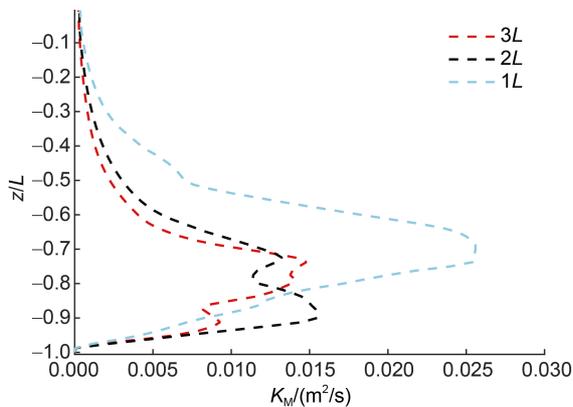


图 7 不同布设间距 L 对应的 K_M 值

Fig.7 K_M values corresponding to a different layout spacing L

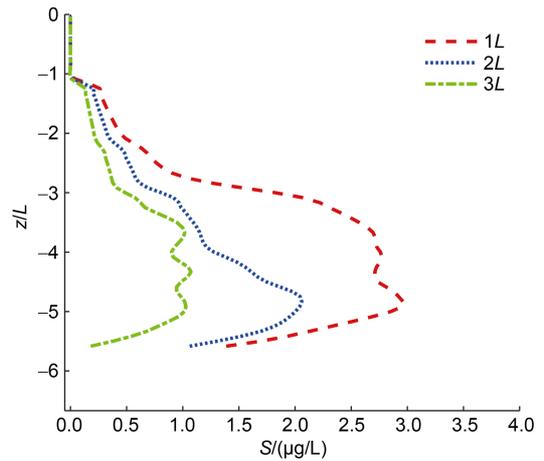


图 8 0.5 m/s 的来流速度下, 实验组与对照组在 $x-z$ 方向的被动示踪物浓度 S 的差值

Fig.8 The difference of passive tracer S concentration in the $x-z$ direction between the experimental group and the control group at the incoming flow velocity of 0.5 m/s

3 讨论

3.1 纵向布置不同来流速度下的上升流效应

现实海洋流速在不停变化, 会出现诸多不同的

海况, 本文通过模式设置来流速度为 0.1, 0.6 和 1.0 m/s 分别模拟低流速状态, 过度状态和极限高流速状态, 得到在不同来流速度情况下, 不同纵向布设间距的人工鱼礁所对应的上升流体积变化情况(图 9)。实验结果表明, 与正常流速下(0.5 m/s)人工鱼礁体积变化相同, 当来流速度为过度流速(0.6 m/s)或极限高流速(1 m/s)情况下, 随着布设间距的增加, 上升流体积在不断增加; 布设间距为 5L 时, 礁体所形成的上升流体积最大, 而布设间距为 1L 时形成的上升流体积最小, 在来流流速为低流速(0.1 m/s)时, 改变相邻鱼礁之间的间距而产生的上升流体积增大情况并不明显。在布设间距不变的情况下, 当来流速度为 1.0 m/s 时人工鱼礁形成的上升流体积最大, 而当来流速度为 0.1 m/s 时形成的上升流体积最小。在来流速度较高为 1.0 m/s 且布设间距为 5L 时, 纵向布置的人工鱼礁引起的上升流体积达到最大, 为 508.5 m³。

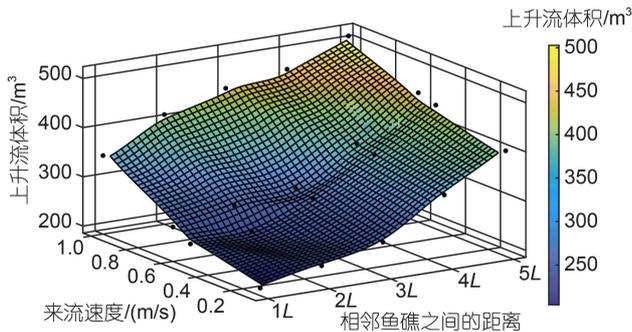


图 9 纵向布设下, 人工鱼礁的上升流体积
Fig.9 Upwelling volume of artificial reef in longitudinal arrangement

当来流速度为 1.0 m/s 情况下, 布设间距为 1L 和 2L 时, 与林明健等(2022)所设置的人工鱼礁实验部分参数相同。林明健等(2022)计算纵向极限高流速下的方型三礁体流场效应, 利用无量纲化区域面积 \bar{A} 来研究礁体影响的区域范围, 具体表达式为

$$\bar{A}=A/L^2, \tag{8}$$

其中, A 为不同等速线间包围的区域面积, L 为礁体长度, 定义沿着水流方向布置礁体为纵向布设 L_x , 垂直于水流方向布置为横向布设 L_y 。计算后来流速度为 1.0 m/s 布设间距为 1L 和 2L 下无量纲化区域 \bar{A} 的分布范围的对比情况见表 4。

表 4 反应在纵向布置极限高流速下的 1L 和 2L 无量纲化面积, 与林明健等(2022)研究结果相比, 均是 0.9 m/s 等速线所包围的面积随着布设间距的增大

也越来越大, 从 0.9 m/s 等速线过渡到 0.8 m/s 等速线时, 所包围的面积快速减小, 从 0.7 m/s 等速线过渡到 0.6 m/s 等速线时, 计算的无量纲面积均小于林明健等(2022)研究结果, 可能是礁体尺寸与模拟场大小不一致导致。

表 4 纵向组合礁不同布设间距下无量纲化面积的区域范围

Tab.4 The regional range of dimensionless area under a different layout spacing in longitudinal combinational reef

垂直于水流方向	布设间距	$\bar{A}=A/L^2$				
		$\bar{V} < 0.9$	$\bar{V} < 0.8$	$\bar{V} < 0.7$	$\bar{V} < 0.6$	$\bar{V} < 0.5$
\bar{L}_y^*	1L	45.265 4	25.175 4	14.853 8	9.765 0	6.221 7
		45.222 2	23.888 8	13.694 4	8.951 0	7.222 2
\bar{L}_y^*	2L	48.025 5	28.654 5	17.521 7	13.332 6	9.335 4
		47.222 2	29.250 0	15.694 4	12.633 2	8.388 9

注: 带*号表示林明健等(2022)实验数据; A 为不同等速线间包围的区域面积, L 为礁体长度, 定义垂直于水流方向布置为横向布设 L_y ; \bar{A} 为不同等速线下的无量纲面积

3.2 横向布置不同来流速度下的上升流效应

与纵向布置一致, 在 4 种不同的来流速度情况下, 不同横向布设间距的人工鱼礁所对应的上升流体积情况(图 10)。与纵向布设不同, 在高流速(0.6 m/s)或极限高流速(1 m/s)情况下, 布设间距的增大均使上升流体积减小, 呈现负相关; 鱼礁之间的布设距离为 1L 时所形成的上升流体积最大, 而布设间距为 3L 时形成的上升流体积最小, 即横向布设时, 相邻鱼礁之间的遮蔽效果使得小间距的人工鱼礁得到的上升流体积最大。在间距为 1L、2L 和 3L 时, 来流速度的增加使人工鱼礁引起的上升流体积不断增大, 呈现正相关, 极端高流速(1 m/s)下的上升流体积增长率比低流速(0.1 m/s)的上升流体积增长率提高 13.1%。人工

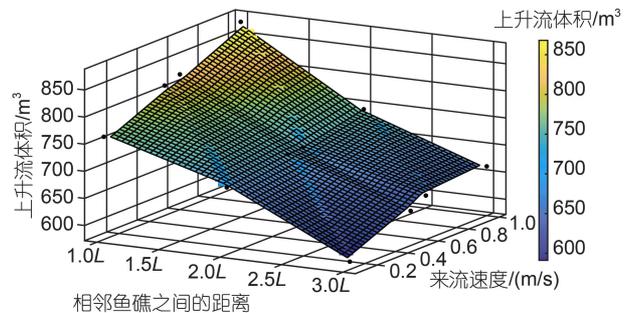


图 10 横向布设下人工鱼礁的上升流体积
Fig.10 Upwelling volume of artificial reef under lateral arrangement

鱼礁产生上升流体积最大的来流速度依然是 1.0 m/s, 而 0.1 m/s 的来流速度形成上升流体积最小。横向布置得到上升流体积最佳情况是布置间距为 5L 来流速度为 1.0 m/s 时, 上升流体积为 874.125 m³。

当来流速度为 1.0 m/s, 布置间距为 1L 时, 与林明健等(2022)所设置的计算横向极限高流速下的方型三礁体礁体流场效应相同, 计算后不同横向布置间距下无量纲化面积分布范围对比情况见表 5。

表 5 横向组合礁 1 倍间距下无量纲化面积的区域范围
Tab.5 The regional extent of the dimensionless area of the lateral combinational reef at one time of spacing

沿水流方向	布置间距	$\bar{A}=A/L^2$				
		$\bar{V}<0.9$	$\bar{V}<0.8$	$\bar{V}<0.7$	$\bar{V}<0.6$	$\bar{V}<0.5$
\bar{L}_x^*	1L	59.254 6	35.228 2	26.142 1	19.554 6	8.651 4
\bar{L}_x		62.334 0	37.774 0	29.388 0	20.554 0	10.972 0

注: 带*号表示林明健等(2022)实验数据; A 为不同等速线间包围的区域面积, L 为礁体长度, 定义沿水流方向布置礁体为纵向布置 L_x ; \bar{A} 为不同等速线下的无量纲面积

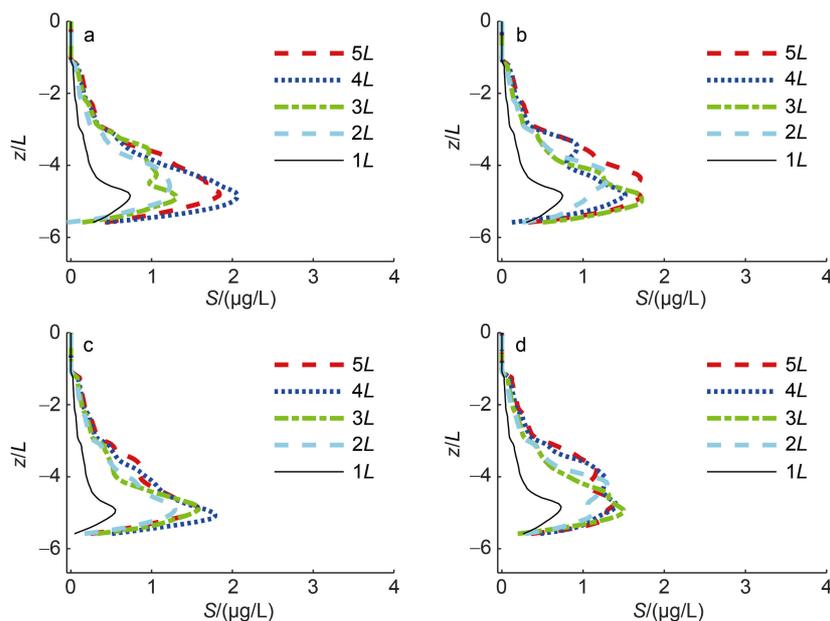
从 0.9 m/s 等速线过渡到 0.8 m/s 等速线时, 所包围的面积快速减小。在横向布置极限高流速下 1L 的无量纲化面积相较于林明健等(2022)研究结果, 所有等速线无量纲面积均大于林明健等(2022)的研究结果, 其原因可能是礁体尺寸与模拟场大小不一致导致。

3.3 不同来流速度下的人工鱼礁对被动示踪物的影响

为验证人工鱼礁产生的上升流对被动示踪物是

否有抬升作用, 分析不同布置方式对被动示踪物抬升效果的影响, 在实验过程中将不同情况的实验组减去对照组, 得到被动示踪物的差值(图 11)。

图 11 是不同布置方式的被动示踪物的浓度差值图。实验结果可以得出, 由于人工鱼礁的抬升作用, 在鱼礁底部的被动示踪物被上升流水体裹挟进入上层水体, 与人工鱼礁间距的改变相比, 来流速度的改变对被动示踪物浓度的差值均在 0.5 μg/L 以内, 来流速度对被动示踪物浓度差值影响不明显, 但横纵向两种不同的布置方式是对被动示踪物浓度差影响最为强烈。在纵向布置的条件下, 来流速度不变的条件下, 当布置间距为 1L 时, 被动示踪物的增加区域仅在第一块鱼礁的顶部, 与其他布置间距相比, 对被动示踪物的抬升效果并不佳, 仅抬升 0.4~0.7 μg/L; 而布置间距大于 1L 后, 鱼礁顶部上层水体被动示踪物富足, 接近海底示踪物浓度降低; 不同流速度下, 被动示踪物最佳抬升位置均在人工鱼礁的顶部, 人工鱼礁的存在使得鱼礁所在区域的底部物质向上运输, 将在海底的营养物质带往上层水体中。相较于纵向布置, 横向布置下的人工鱼礁对被动示踪物的抬升效果更加显著。在横向布置的条件下, 人工鱼礁对被动示踪物的最佳抬升位置与纵向布置的效果相同, 被动示踪物的最佳抬升位置均在鱼礁顶部; 在相同流速下, 横向布置抬升浓度的最大值与纵向布置相比提高 1.05 μg/L, 且横向布置下的被动示踪物浓度增大的区域比纵向布置提高了 40%; 不同流速下抬升



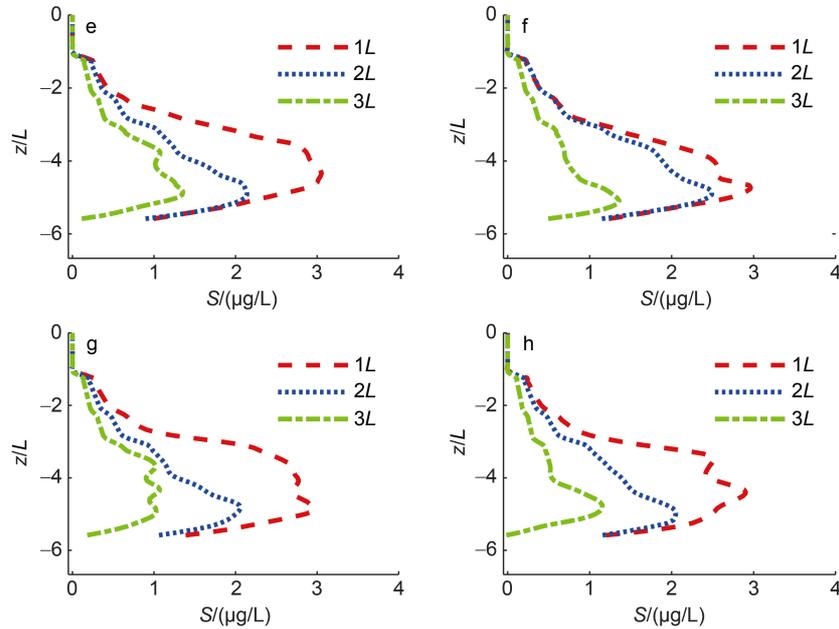


图 11 在 0.1、0.5、0.6 和 1.0 m/s 来流速度下, 实验组与对照组在 $x-z$ 方向的被动示踪物浓度 S 的差值

Fig.11 Under the flow velocity of 0.1, 0.5, 0.6, and 1.0 m/s, the difference between the passive tracer S concentration of the experimental group and the control group in the $x-z$ direction

注: a: 纵向 1.0 m/s; b: 纵向 0.6 m/s; c: 纵向 0.5 m/s; d: 纵向 0.1 m/s; e: 横向 1.0 m/s; f: 横向 0.6 m/s; g: 横向 0.5 m/s; h: 横向 0.1 m/s

效果最佳的布设间距均为 $1L$, 0.1 m/s 时抬升的最大浓度是 $12.37 \mu\text{g/L}$, 而 1.0 m/s 时抬升的被动示踪物最大浓度为 $18.12 \mu\text{g/L}$ 。

3.4 不同流速不同布置方式下人工鱼礁对湍流垂向涡黏系数的影响

选取整个模拟区域, 在不同来流速度下改变相邻鱼礁之间间距的大小, 从而得到不同布置下的垂向涡黏系数图(图 12 和图 13), 这里将模拟区域水底设置为 -1 , 模拟区域海水表面设置为 0 。在相同来流速度和布设间距的情况下, 横向布置的 K_M 值要大于纵向布置的 K_M 值。在纵向布置情况下, 随着深度的增加, 垂向涡黏性系数的值呈现出先迅速增大后快速减小的趋势; 越靠近海水表面, K_M 值越小, 而越靠近人工鱼礁的顶部, K_M 值越大; 在相同布设间距情况下, 随着来流速度的增加, K_M 值随之增大, 极端高流速(1.0 m/s)情况下的 K_M 值比低流速(0.1 m/s)高出近 10 倍; 在相同流速情况下, 间距从 $1L$ 到 $2L$ 时 K_M 值有明显的增加, 而间距从 $2L$ 到 $5L$ 时, K_M 值增加平缓。在横向布置, 相同间距情况下, K_M 值均随着来流速度的增大而增大, 呈正相关; 而在相同流速下, 布设间距为 $1L$ 时的 K_M 值最大, 但随着布设间距的增大, K_M 值逐渐减小, 呈负相关。

3.5 不同布置方式下的上升流参数

Zhang 等(2021)在研究人工鱼礁布设间距和来流

入射角度对流场的影响, 通过 4 个无量纲指标, 来分析不同组合情况下的上升流效应, 背涡流效应和水交换效应的不同之处, 提出了最好的优化布局模式。这里采用分析上升流效应的无量纲指标, 具体如下:

$$\phi = \frac{v_{\text{up}}}{v_m}, \quad (9)$$

其中, v_{up} 表示上升流体积(单位: m^3), v_m 表示人工鱼礁的总体积(单位: m^3), 无量纲参数 ϕ 表示上升流体积和总人工鱼礁的体积之比, 用来分析人工鱼礁形成上升流的抬升效果。

图 14 所示的是在纵向布置条件下, 不同来流速度和不同布设间距下的人工鱼礁上升流效应指标的评估图。可以清晰地看出速度越大, 纵向布设间距越大, 人工鱼礁上升流效应越好, 呈正相关。在实验结果中, 上升流效应最佳的组合情况是来流速度为 1 m/s 和 $5L$ 的情况, 上升流无量纲参数达到 6.278。相同布设间距下, 流速的增加引起上升流体积的增大, 从低流速情况(0.1 m/s)到极端高流速情况(1.0 m/s)下, 上升流体积参数增大 27.1%~80.5%。而在流速相同的情况下, 当布设间距从 $1L$ 到 $3L$ 时, 上升流体积参数增加的最为明显, 超过了 70%; 随着纵向布设间距的增加, 上升流体积参数增大了 47.2%~98.5%; 在 1.0 m/s 的流速下, 尽管人工鱼礁形成的上升流体积最大, 但增长率最低, 仅有 47.2%。

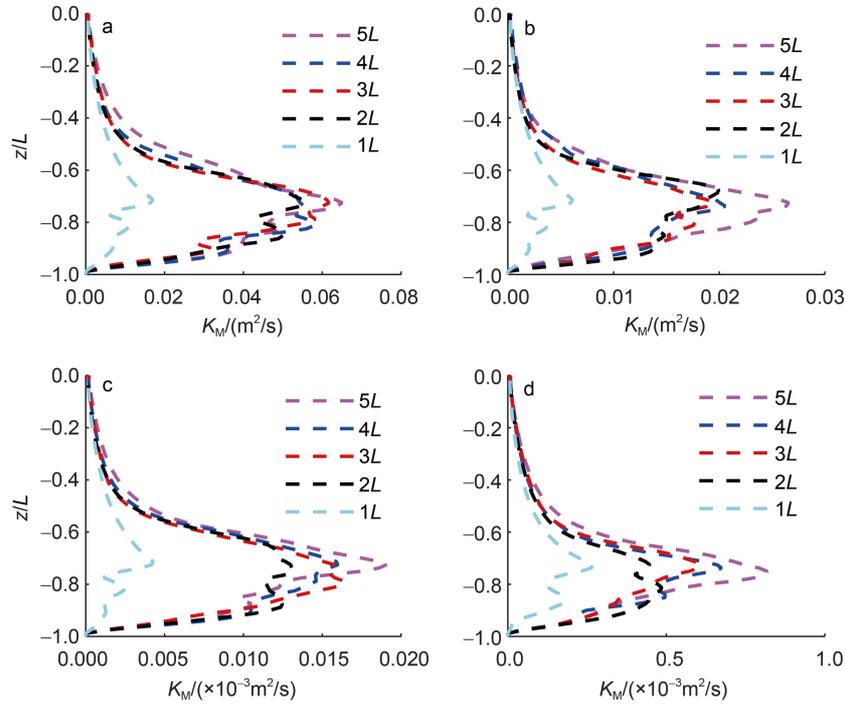


图 12 在纵向布置情况下, 不同来流速度和布设间距条件下的 K_M 情况

Fig.12 The K_M condition under the flow velocities and layout spacing in longitudinal arrangement
注: a: 1.0 m/s; b: 0.6 m/s; c: 0.5 m/s; d: 0.1 m/s

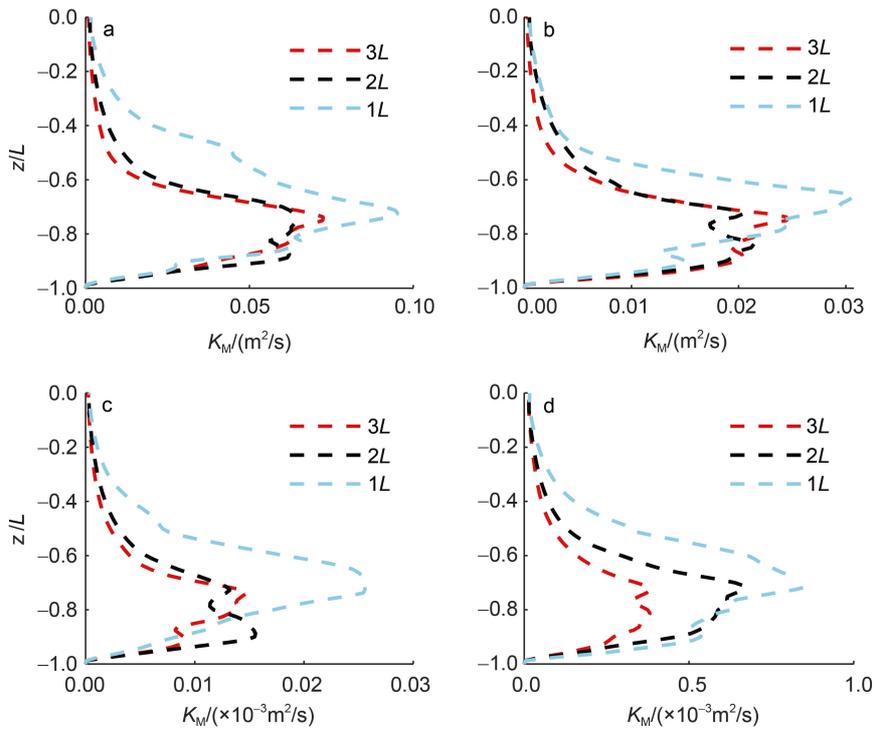


图 13 在横向布置情况下, 不同来流速度和布设间距条件下的 K_M 情况

Fig.13 The K_M condition under the flow velocities and layout spacing in transverse arrangement
注: a: 1.0 m/s; b: 0.6 m/s; c: 0.5 m/s; d: 0.1 m/s

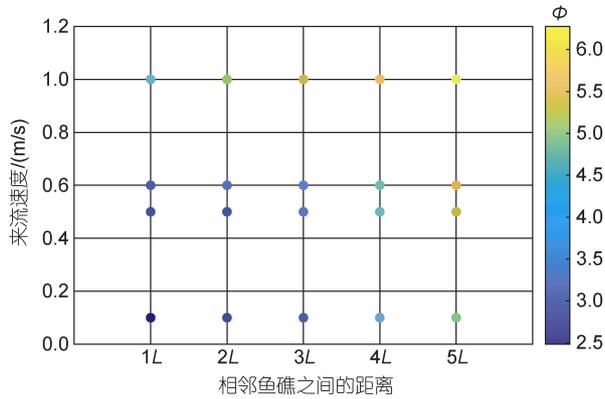


图 14 在纵向布置下, 不同来流速度和布设间距引起的人工鱼礁的上升流参数 ϕ 示意图

Fig.14 In longitudinal arrangement, upwelling dimensionless parameters of artificial reef caused by different incoming flow velocity and layout spacing are shown in schematic diagram

图 15 所示的是在横向布置条件下, 不同来流速度和不同布设间距下的人工鱼礁上升流效应指标的评估图, 计算方法同纵向布设。来流速度越大, 横向布设间距越小, 人工鱼礁上升流效应越好, 即在 1 m/s、1L 的布设情况下, 人工鱼礁产生的上升流效应最佳, 上升流的无量纲参数达到 10.792。在相同布设间距下, 来流流速越大, 上升流体积越大, 这与纵向布置一致, 均成正相关; 从低流速情况(0.1 m/s)到极端高流速情况(1.0 m/s)下, 上升流体积参数增大了 6.4%~14.8%。在来流速度相同的情况下, 随着横向布设间距的增加, 上升流体积参数减小 20.5%~24.2%; 在来流速度为 1.0 m/s 的情况下, 人工鱼礁产生的上升流体积最大, 但随着间距的增大, 其体积减小的速度越来越快, 在 3L 时上升流体积减小率达到了 24.2%。

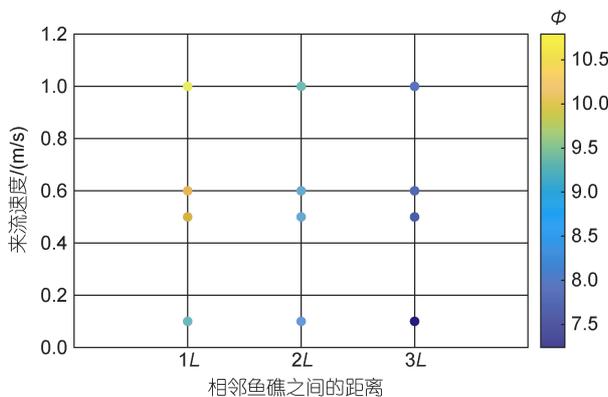


图 15 在横向布置下, 不同来流速度和布设间距引起的人工鱼礁的上升流无量纲参数 ϕ 示意图

Fig.15 In the lateral arrangement, the upwelling dimensionless parameters of artificial reef caused by different incoming flow velocity and layout spacing are shown in schematic diagram

将两种布置方式(横/纵向)所得到的上升流体积作为结果值, 来流速度与布设间距作为变量值, 对实验数据进行多项式拟合, 其中, V 表示上升流体积(单位: m^3), L 表示布设的间距(单位: L), v 表示来流速度(单位: m/s), K 表示待定参数, 方程如下所示:

$$V_{\text{up_vertical}} = aL + bv + K, \quad (10)$$

$$V_{\text{up_horizontal}} = cL + dv + K'. \quad (11)$$

方程中的 a, b, c, d 均为系数, 反映了该项对上升流体积的影响程度, 其中系数为负表示与上升流体积呈负相关, 反之呈正相关, 系数的值可以反映该变量的相关重要性, 绝对值越大表示该项的改变很容易影响上升流体积的变化。具体方程如下:

$$V_{\text{up_vertical}} = 46.75L + 167.4v + 106.7, \quad (12)$$

$$V_{\text{up_horizontal}} = -91.33L + 86.75v + 857.4. \quad (13)$$

从式(12)~(13)可以看出, 对于纵向布置来说, 人工鱼礁之间的间距增大与来流速度的增大对人工鱼礁上升流体积而言都是正反馈, 对横向布置而言, 相邻人工鱼礁之间的间距增大对人工鱼礁的上升流体积而言是负反馈。因此, 为了获得良好的上升流效应, 应将人工鱼礁放置在水流较大的区域, 同时考虑到当地海流的长期流向, 应尽量选择横向布置的方式。

4 结论

本文设置 4 种不同的来流速度(0.1、0.5、0.6 和 1.0 m/s), 2 种不同的部署方式(纵向和横向布置), 以及多种不同布设间距, 分析不同情况下的流场形态, 上升流体积和体积参数, 垂向涡粘性系数以及被动示踪物的分布状态情况。根据实验结果来看, 来流速度越大上升流效应越明显, 纵向布置时布设间距为 5L 最佳, 横向布置时为 1L 最佳, 且鱼礁的横向布置的上升流效应要优于纵向布置。主要结论如下:

(1) 对于不同的来流速度, 无论是纵向布置还是横向布置, 人工鱼礁所形成的上升流效应均随着来流速度的增加而增大。对于纵向布置, 随着间距的增大人工鱼礁所形成的上升流体积随之增大, 所抬升的营养盐和 K_M 值也随之增大; 而对于横向布置的情况截然相反, 随着横向布置间距的增大, 鱼礁两边的侧向流加速主导作用也会影响礁体间的遮蔽效果, 形成的上升流体积反而减小, 在达到 3L 时, 相邻两鱼礁之间的影响最弱, 抬升的营养盐和 K_M 值也因为上升流效应而减小。因此, 根据来流方向的不同, 不

能简单地认为间距越大, 上升流体积越大。

(2) 当布置单排三块人工鱼礁, 且布设间距在 $1L \sim 5L$ 之间, 来流速度在 $0.1 \sim 1.0$ m/s 时, 人工鱼礁引起的上升流体积 V 与布设间距 L 和来流速度 v 的关系可以用式(14)~(15)表示:

$$V_{\text{up_vertical}} = 46.75L + 167.4v + 106.7, \quad (14)$$

$$V_{\text{up_horizontal}} = -91.33L + 86.75v + 857.4. \quad (15)$$

(3) 从回归方程来看, 在相同布置形式下, 来流速度相较于鱼礁间布置的间距是影响上升流体积最为重要的因素, 而横向布置的间距对上升流体积的影响要远远的大于纵向布置的间距。横向布置优于纵向布置, 来流速度越大, 上升流效应越明显, 从底层带来的营养盐也越来越丰富。研究结果可为礁区布局方案的确定提供参考。

参 考 文 献

于定勇, 王逢雨, 张彩霞, 等, 2020a. 梯型台人工鱼礁体流场效应数值研究[J]. 中国海洋大学学报, 50(12): 135-143, doi: 10.16441/j.cnki.hdx.20180190.

于定勇, 杨远航, 李宇佳, 2019. 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, 49(4): 128-136.

于定勇, 赵伟, 王逢雨, 等, 2020b. 不同布设间距下梯型台人工鱼礁体的水动力特性研究[J]. 海洋与湖沼, 51(2): 283-292.

王宇, 徐晓甫, 于莹, 等, 2022. 大神堂海域人工鱼礁投放对底泥细菌的影响[J]. 水产科学, 41(5): 799-809, doi: 10.16378/j.cnki.1003-1111.20273.

王者也, 李爽, 2021. 基于大涡模拟与被动示踪物模型的人工鱼礁数值研究[J]. 海洋与湖沼, 52(6): 1376-1387.

毛海英, 胡聪, 于定勇, 等, 2022. 基于流场仿真的导流型鱼礁体组合优化研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 61(4): 723-730.

冯雪, 范江涛, 孙晓, 等, 2021. 珠海外伶仃人工鱼礁对鱼类资源养护效果初步评估[J]. 南方农业学报, 52(12): 3228-3236.

吕泽视, 朱文斌, 唐伟尧, 等, 2022. 四角锥台形人工鱼礁斜面倾角变化对流场效应的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 41(3): 241-249.

刘扬, 黄国兴, 2021. 六角型人工鱼礁流场效应试验研究[J]. 中国水运, (11): 60-62, DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2021.11.023.

肖荣, 杨红, 2016. 人工鱼礁建设对福建霞浦海域营养盐运输的影响[J]. 海洋科学, 40(2): 94-101.

张镇, 董建宇, 孙昕, 等, 2022. 莱州芙蓉岛人工鱼礁区大型底栖动物营养结构特征研究[J/OL]. 水产学报: 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220429.1635.002.html>.

林明健, 季新然, 王凤霞, 2022. 方型组合礁体流场效应及水动力分析[J]. 海南大学学报自然科学版, 40(1): 66-75, doi:

10.15886/j.cnki.hdxzbk.2022.0008.

郑延璇, 关长涛, 宋协法, 等, 2012. 星型人工鱼礁流场效应的数值模拟[J]. 农业工程学报, 28(19): 185-193.

胡聪, 毛海英, 王开睿, 2022. 圆筒型鱼礁体纵横布设间距下的水动力特性研究[J]. 海洋科学进展, 40(1): 154-164.

高永丽, 2019. 垂向湍流扩散系数的不确定性对深层叶绿素最大值现象模拟的影响[J]. 海洋科学, 43(2): 34-40.

高策, 2021. 人工鱼礁对渔业资源的影响[J]. 新农业(16): 68-69.

郭禹, 章守宇, 林军, 2020. 基于上升流效应的单位鱼礁建设模式研究[J]. 南方水产科学, 16(5): 71-79.

唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等, 2017. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析[J]. 农业工程学报, 33(8): 97-103.

曹欣中, 1983. 影响浙江近海营养盐分布主要水动力因子的探讨[J]. 海洋科学(2): 36-38.

崔勇, 关长涛, 万荣, 等, 2011. 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(2): 59-65, doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2011.02.011.

AMBROSE R F, ANDERSON T W, 1990. Influence of an artificial reef on the surrounding infaunal community [J]. Marine Biology, 107(1): 41-52.

CAMPBELL M D, ROSE K, BOSWELL K, et al, 2011. Individual-based modeling of an artificial reef fish community: Effects of habitat quantity and degree of refuge [J]. Ecological Modelling, 222(23/24): 3895-3909.

DAVIS N, VANBLARICOM G R, DAYTON P K, 1982. Man-made structures on marine sediments: Effects on adjacent benthic communities [J]. Marine Biology, 70(3): 295-303.

HUQ S, DE ROO F, RAASCH S, et al, 2019. Vertically nested les for high-resolution simulation of the surface layer in PALM (version 5.0) [J]. Geoscientific Model Development, 12(6): 2523-2538.

JIANG Z Y, LIANG Z L, TANG Y L, et al, 2010. Numerical simulation and experimental study of the hydrodynamics of a modeled reef located within a current [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 28(2): 267-273.

JIANG Z Y, LIANG Z L, ZHU L X, et al, 2020. Effect of hole diameter of rotary-shaped artificial reef on flow field [J]. Ocean Engineering, 197: 106917.

LI J, ZHENG Y X, GONG P H, et al, 2017. Numerical simulation and PIV experimental study of the effect of flow fields around tube artificial reefs [J]. Ocean Engineering, 134: 96-104.

LIU T L, SU D T, 2013. Numerical analysis of the influence of reef arrangements on artificial reef flow fields [J]. Ocean Engineering, 74: 81-89.

MARONGA B, GRYSCHKA M, HEINZE R, et al, 2015. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives [J]. Geoscientific Model Development, 8(8): 2515-2551.

PASKYABI M B, FER I, 2014. Turbulence structure in the upper ocean: a comparative study of observations and modeling [J]. Ocean Dynamics, 64(4): 611-631.

- Su D T, Liu T L, Ou C H, 2007. A comparison of the piv measurements and numerical predictions of the flow field patterns within an artificial reef [C] // The International Society of Offshore and Polar Engineers. Proceedings of the Sixteenth (2007) International s fshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, Portugal: 2239-2245.
- WANG X X, LIU X Y, TANG Y L, *et al*, 2021. Numerical analysis of the flow effect of the Menger-type artificial reefs with different void space complexity indices [J]. Symmetry, 13(6): 1040.
- ZHANG J T, ZHU L X, LIANG Z L, *et al*, 2021. Numerical study of efficiency indices to evaluate the effect of layout mode of artificial reef unit on flow field [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 9(7): 770.
- ZHAO G X, GAO X P, ZHANG C, *et al*, 2020. The effects of turbulence on phytoplankton and implications for energy transfer with an integrated water quality-ecosystem model in a shallow lake [J]. Journal of Environmental Management, 256: 109954.

SCHEME ANALYSIS OF UPWELLING EFFECTS IN ARTIFICIAL REEFS IN DIFFERENT LAYOUTS

CHENG Ze-Yi, YE Can, GAO Yu, SONG Jin-Bao, LI Shuang
(Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract Reasonable artificial reef assemblage can effectively improve the flow field effect and increase the disturbance between the bottom and top waters in the reef area. Using parallel large eddy simulation model and passive tracer module and adjusting the artificial reef layout spacing, we studied the background flow conditions at velocities of 0.1, 0.5, 0.6, and 1.0 m/s in different lateral spacing ($1L$, $2L$, $3L$) (L is the side length of artificial reef) or longitudinal spacing ($1L$, $2L$, $3L$, $4L$, $5L$), from which the effects of square artificial reef on upwelling volume, nutrient uplift, and vertical vortex viscosity were investigated. The results show that under a same arrangement, the upwelling volume of the three artificial reefs in a single row is positively correlated with the incoming flow velocity, and the volume increases by 6.4%~80.5% with the increase of the incoming flow velocity. Under a same flow velocity, the upwelling volume is proportional to the spacing of longitudinal arrangement and inversely proportional to the spacing of transverse arrangement. In transverse arrangement, the upwelling volume parameter is the best when the incoming flow velocity is 1.0 m/s and the spacing is $1L$. In general, the upwelling volume parameters, tracer concentration difference, and vertical vortex viscosity coefficient all show that lateral arrangement is superior to longitudinal arrangement. Compared with the layout spacing, the incoming flow velocity is the most important factor affecting the upwelling volume.

Key words large eddy simulation; artificial reef; upwelling; passive tracer; vertical eddy viscosity