



长江上游航道三棱柱式人工鱼礁流场特性研究*

王兴超¹, 彭志豪², 万宇², 张帅帅³

(1. 长江宜昌航道工程局, 湖北宜昌 443000;

2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

3. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 一种新型的三棱柱式人工鱼礁在长江上游航道整治工程中已广泛应用, 在改善水体流态和营造鱼类生境方面发挥着重要作用。通过数值模拟方法研究不同来流速度与布设间距下三棱柱式人工鱼礁上的流场特性, 并提出人工鱼礁的最佳布置方式。研究结果显示, 上升流最大速度与来流速度成正比, 而上升流体积、上升流最大高度与礁高比值、背涡流体积和长度基本不受来流速度的影响。在同一流速下, 上升流和背涡流体积均与人工鱼礁布置的横向间距成反比, 与纵向间距呈先增大后减小的变化。横向及纵向间距分别为0.5倍和4倍礁长时为人工鱼礁的最佳布置方式。对比不同来流速度, 上升流和背涡流区域特性参数受人工鱼礁布设间距的影响更明显。研究结论可为长江上游生态型人工鱼礁的建设提供理论依据。

关键词: 三棱柱式人工鱼礁; 来流速度; 布设间距; 长江上游航道

中图分类号: U61; S953.1; TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0152-08

Flow characteristics of triangular prism artificial fish reef in upper waterway of Yangtze River

WANG Xingchao¹, PENG Zhihao², WAN Yu², ZHANG Shuaishuai³

(1. Yangtze River Yichang Waterway Engineering Bureau, Yichang 443000, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River, Chongqing 401147, China)

Abstract: A new type of triangular prism artificial fish reef has been widely used in the channel regulation project in the upper reaches of the Yangtze River, playing an important role in improving water flow dynamics and creating fish habitats. This study investigates the flow field characteristics on triangular prism artificial fish reefs under different inflow velocities and deployment spacings using numerical simulation methods, and proposes the optimal arrangement of artificial fish reefs. The research results show that the maximum velocity of upwelling is proportional to the inflow velocity, while the upwelling volume, the maximum height-to-reef height ratio of upwelling, the volume and length of back-eddy flows are not significantly affected by the inflow velocity. Under the same flow velocity, both the volume of upwelling and back-eddy flows are inversely proportional to the lateral spacing of artificial fish reef deployment, and they initially increase and then decrease with the longitudinal spacing. The optimal deployment configuration for artificial fish reefs occurs when the lateral and longitudinal spacings are 0.5 times and 4 times the reef length, respectively. Compared with different inflow velocities, the characteristics parameters of upwelling and back-eddy flow regions are more significantly influenced by the deployment spacing of artificial fish reefs. The research conclusions can provide theoretical basis for the construction of ecological artificial fish reefs in the upper reaches of the Yangtze River.

Keywords: triangular prism artificial fish reef; inflow velocity; layout spacing; upper waterway of Yangtze River

收稿日期: 2024-03-13

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52279058); 长江航道局科研项目(KY2022-01、YG04-CF-QT-2021024)

作者简介: 王兴超(1978—), 男, 副高级工程师, 研究方向为港口与航道工程。

通讯作者: 万宇(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为航道水环境修复及生境营造。E-mail:wanyu_hhxy@cqjtu.edu.cn

长江上游作为四大家鱼种质资源保护区, 是鱼类重要栖息生境、洄游通道与产卵场等。目前长江上游航道整治工程通过广泛投放三棱柱式人工鱼礁营造鱼类生境效果。人工鱼礁投放之后会形成上升流和背涡流区域, 该地区的湍流、涡流等有助于浮游生物的聚集, 也可促进水层交换, 加快营养物质循环, 可为鱼类营造索饵、繁殖和栖息的场所^[1]。

近年来, 国内外学者通过数值模拟方法对人工鱼礁水动力特性开展了大量研究, 通过分析上升流最大高度与礁体高度比值、上升流最大速度与来流速度比值、背涡流长度与高度等参数, 为研究人工鱼礁流场特征奠定了良好的基础^[2]。人工鱼礁结构形式多样, 其营造的流场效应也存在一定的差异。邵万骏等^[3]研究发现立方体空心开孔人工鱼礁的上升流规模随流速的增大而增大, 背涡流规模随流速的增大而减小; 公丕海等^[4]研究发现塔型人工鱼礁上升流面积和高度随流速的增大, 呈现先增加后减小的变化趋势, 且人工鱼礁结构形式的差异性导致不同的最佳布置间距; 崔勇等^[5]研究发现方形鱼礁最佳布设间距为礁体尺寸的 1~1.5 倍; 胡聪等^[6]研究表明在 4 倍礁体尺寸下, 圆筒型人工鱼礁流场效果最好; 韩林峰等^[7]研究指出正六面体透空型人工鱼礁最佳布设间距为 6 m; Zhu 等^[8]发现箱式人工鱼礁的最佳布设间距为 5 m; 毛海英等^[9]对导流型鱼礁流场特性研究发现纵向间距为 4.0 倍礁长时流场效应较好。三棱柱式人工鱼礁作为一种新型的人工鱼礁结构, 目前在长江上游已广泛应用, 因此其流场特性值得进一步关注。另外, 目前针对人工鱼礁流场效应的研究主要集中在流速较低海洋和长江中下游区域, 对于三棱柱式人工鱼礁广泛应用的长江上游高流速山区河流, 其流场特性的研究还相对缺乏。

本研究结合长江上游实际流速, 通过数值模拟的方法, 对比分析不同来流速度和布设间距下三棱柱人工鱼礁上升流和背涡流的流场特性及变

化规律, 进一步提出人工鱼礁的最佳布置方式。研究结论旨在为长江上游生态型人工鱼礁的建设提供理论依据。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程和湍流模型

人工鱼礁附近的流动可视为不可压缩流动, 其控制方程为连续性方程和不可压缩流动的 $N-S$ 方程, 而湍流模型采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型。

1.2 人工鱼礁模型和计算区域

三棱柱人工鱼礁模型(图 1)尺寸为 $1.50 \text{ m} \times 1.50 \text{ m} \times 1.31 \text{ m}$ 。参考郑延璇等^[10]的方法确定人工鱼礁计算域尺寸, L 为鱼礁长度, W 为宽度, H 为高度, 则单体鱼礁计算域为 $9L \times 6W \times 5H$ (礁前 $3L$, 礁后 $5L$), 加密域为 $4L \times 3W \times 2H$ (礁前 $1L$, 礁后 $3L$), 见图 2。

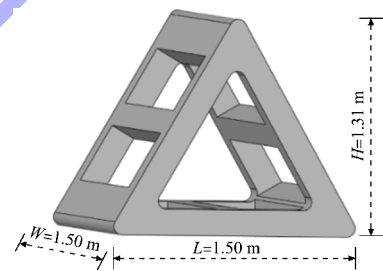


图 1 三棱柱人工鱼礁模型

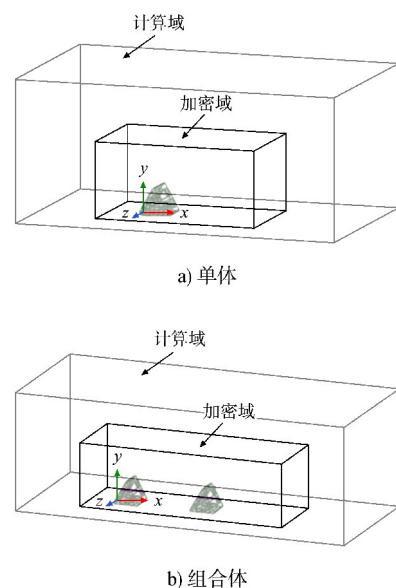


图 2 人工鱼礁计算域及加密域

1.3 网格划分和边界设置

网格划分：加密域网格边长设置为 0.15 m，较稀疏的网格边长设置为 0.2 m，单体鱼礁网格划分单元总数为 115.344 4 万个，礁体组合的网格划分单元总数为 134.623 2 万~196.797 2 万个。

边界设置：入口采用速度进口条件，出口设为自由出流，计算域的两侧与顶部采用对称边界条件，计算域底面和鱼礁各壁面采用无滑移边界条件。

1.4 模型计算

针对不同流速下人工鱼礁单体的流场特性，长江上游人工鱼礁布置区流速为 1.5~4.0 m/s，本研究选取 1.5、2.4、3.0、4.0 m/s 4 种来流速度进行模拟；针对不同布置间距下人工鱼礁组合体的流场特性，横向布置间距 L_y 选取 4 种工况分别为 0.5L、1.0L、1.5L、2.0L，见图 3a)，纵向布置间距 L_x 选取 6 种工况分别为 0.5L、1.0L、2.0L、3.0L、4.0L、5.0L，见图 3b)，同时保持来流速度为上游常年平均流速 2.4 m/s。压力与速度耦合采用 SIMPLEC 算法，离散方程采用 QUICK 格式，残差值为 10^{-5} ，时间步长为 0.005，迭代步数为 3 000 步。

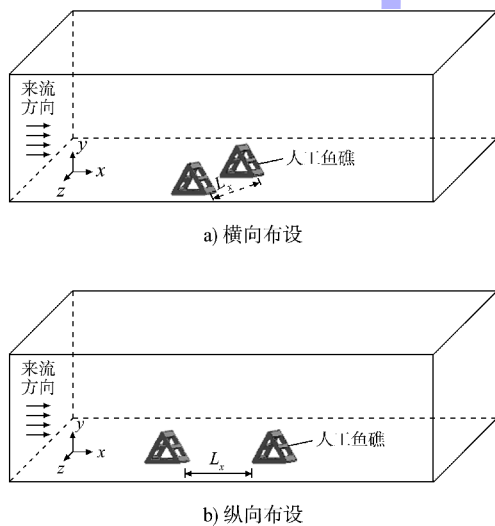


图3 三棱柱人工鱼礁布置方式

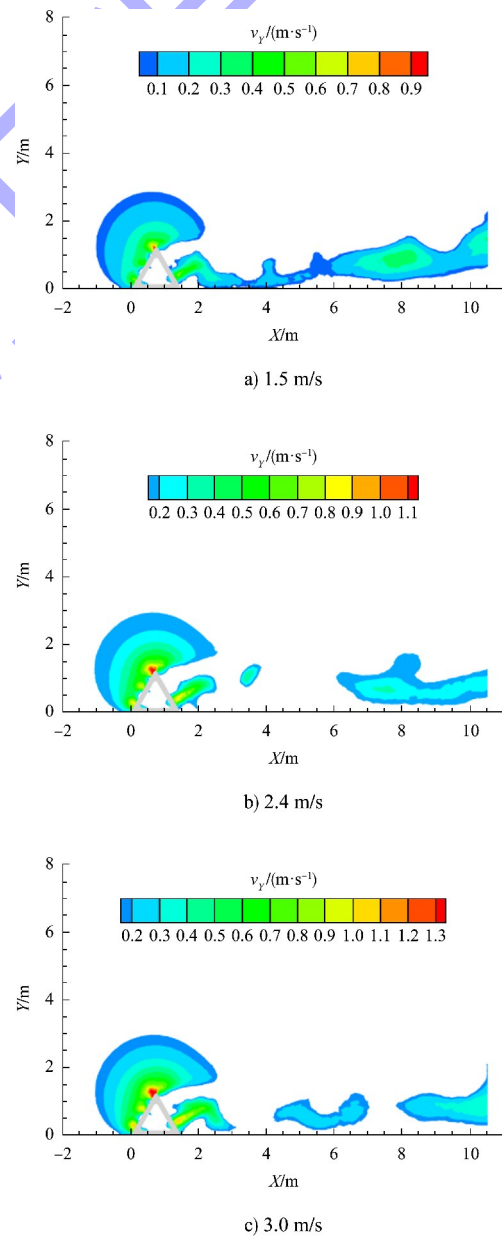
2 结果与分析

2.1 不同流速下人工鱼礁流场特性

2.1.1 上升流区域特性

将 Y 方向速度分量与来流速度之比大于或等

于 5% 的区域定义为上升流区域^[11]。不同流速下人工鱼礁 XOY 截面的上升流分布云图见图 4，上升流区域特征参数见表 1。研究结果显示，上升流最大速度位置靠近鱼礁顶部，上升流最大速度随来流速度的增加而增加；上升流体积、上升流最大高度与礁体高度比值、上升流最大速度与来流速度比值基本不随来流速度增加而变化。这与黄远东等^[12-13]的研究结果一致，即方形、实心三棱柱形、圆台形、金字塔形人工鱼礁在不同来流流速下，上升流特征参数基本不随来流流速变化而变化。



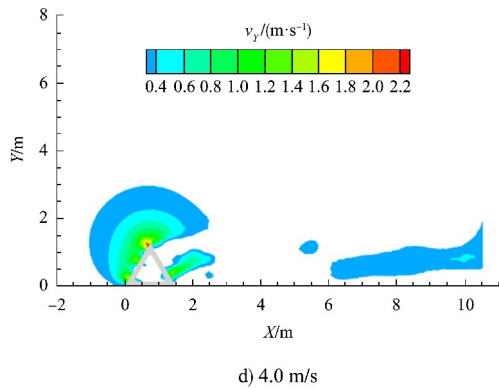


图 4 不同流速下人工鱼礁在 XOY 截面上升流分布云图

表 1 人工鱼礁上升流区域特征参数

来流速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	上升流体积/ m^3	上升流最大速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	上升流最大高度与礁体高度比值	上升流最大速度与来流速度比值
1.5	13.26	0.80	2.18	0.53
2.4	13.48	1.29	2.20	0.54
3.0	13.55	1.61	2.21	0.54
4.0	13.68	2.15	2.22	0.54

2.1.2 背涡流区域特性

研究将 X 方向速度分量与来流流速之比小于或等于 80% 的区域定义为背涡流区域。不同来流速度下人工鱼礁在 XOY 截面上背涡流速度矢量分布见图 5, 背涡流区域特征参数见表 2。研究结果显示: 背涡流体积、长度、高度均基本不随来流速度增加而变化, 最大值分别为 $19.76 m^3$ 、 $10.47 m$ 和 $1.82 m$ 。

人工鱼礁背涡区域靠近礁体顶端处和底部均形成顺时针漩涡结构, 相较于顶部的漩涡结构, 底部的漩涡结构更大。相关研究表明, 在礁体背涡区形成的漩涡结构的形状与来流大小相关。由于人工鱼礁结构的透水性, 其内部也形成了多个复杂的漩涡结构, 且大部分方向为顺时针, 这种漩涡结构有利于加剧人工鱼礁附近水层的混合, 从而促进水体中营养物质循环, 为鱼类栖息生存提供良好环境。此外, 不同来流流速下人工鱼礁背涡区流速基本小于 $1.5 m/s$, 而野外观测显示 80% 数量的鱼类聚集在流速为 $0.8 \sim 1.4 m/s$ 的区域, 因此三棱柱式人工鱼礁能够起到良好的诱集鱼类的航道整治效果。

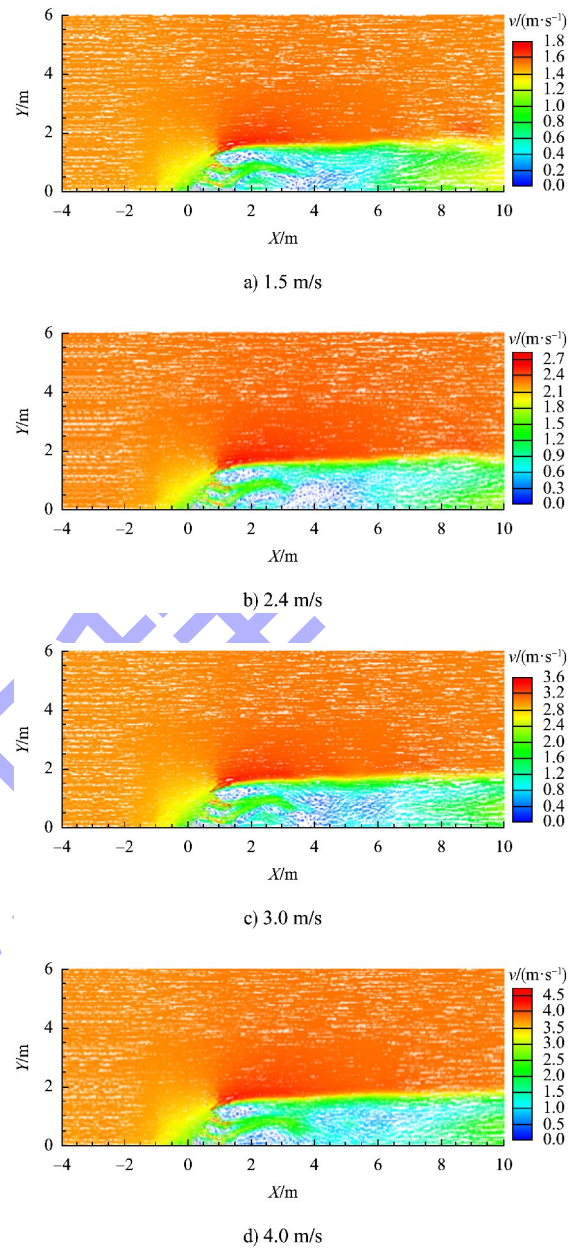


图 5 不同来流速度下人工鱼礁在 XOY 截面上背涡流分布矢量图

表 2 人工鱼礁背涡流区域特征参数

来流速度/($m \cdot s^{-1}$)	背涡流体积/ m^3	背涡流长度/m	背涡流高度/m
1.5	19.76	10.46	1.81
2.4	19.46	10.47	1.82
3.0	19.34	10.47	1.79
4.0	19.34	10.46	1.78

2.2 不同布设间距下人工鱼礁流场特性

2.2.1 横向组合间距下人工鱼礁流场特性

不同横向间距下人工鱼礁在 $X = 0.75 m$ 截面(通过 X 方向礁体中心)的上升流分布云图见图 6, 上升流特性参数见表 3。研究结果显示, 上升流体

积和上升流最大速度随横向布设间距增大而减小, 在 $0.5L$ 间距达到最大, 分别为 37.36 m^3 和 1.34 m/s 。而上升流最大高度与礁高比值随横向间距增加呈先增大后减小的趋势, 在 $1.0L$ 达到最大, 为 2.71 。

图 6 显示, 随着横向间距增大, 2 个鱼礁产生的上升流区域相互作用逐渐减小, 直至 $2.0L$ 时完全分离。此外, 横向组合鱼礁形成最大上升流速的位置与单体鱼礁一致。

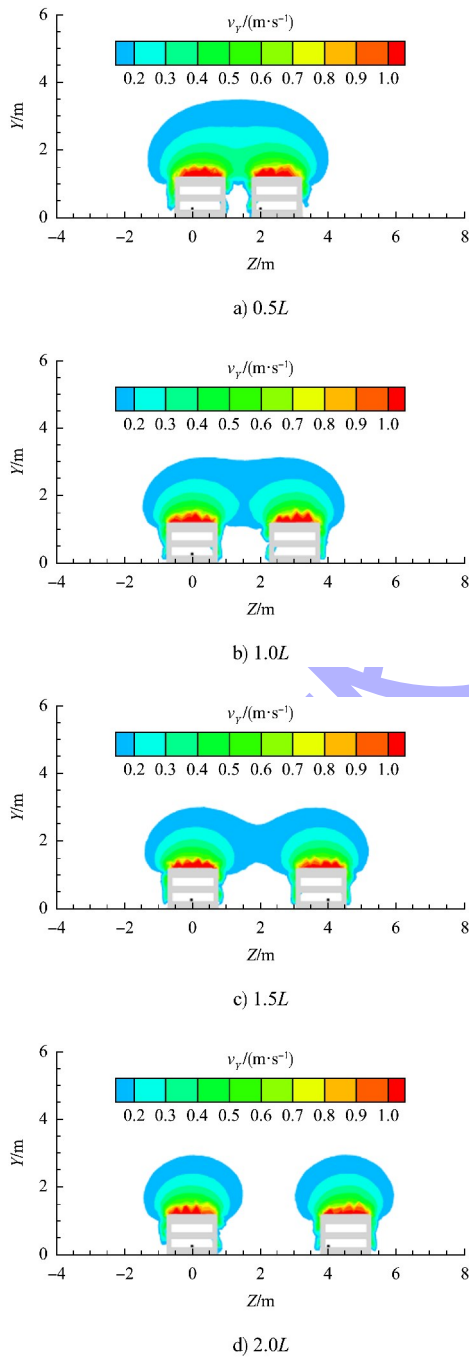


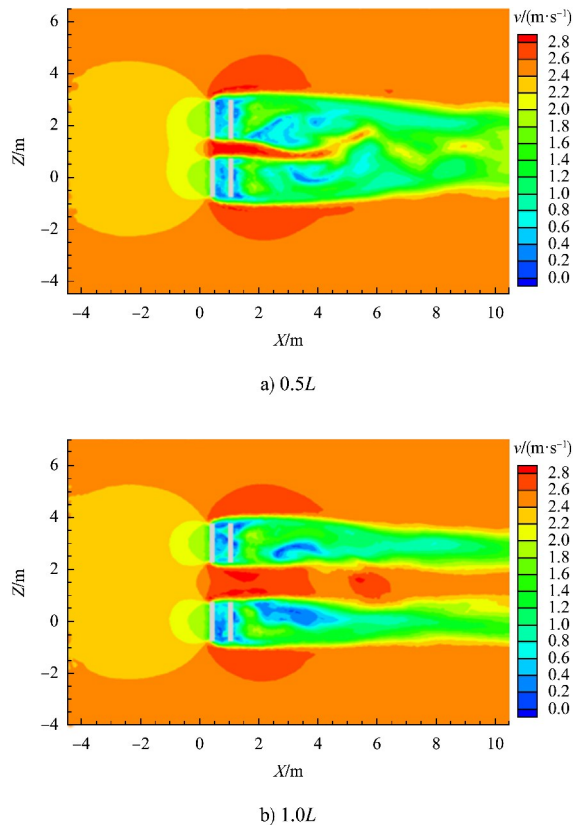
图 6 不同横向间距下人工鱼礁在 $X=0.75 \text{ m}$ 截面的上升流分布云图

表 3 不同横向间距下人工鱼礁上升流特性参数

横向间距	上升流体积/ m^3	上升流最大高度与礁高比值	上升流最大速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
$0.5L$	37.36	2.68	1.34
$1.0L$	36.21	2.71	1.33
$1.5L$	29.98	2.27	1.29
$2.0L$	28.11	2.26	1.27

不同横向间距下人工鱼礁在 $Y=0.6 \text{ m}$ 截面 (通过 Y 方向礁体中心) 的背涡流分布云图见图 7, 背涡流特性参数见表 4。研究结果显示, 背涡流体积随横向间距增大逐渐减小, 在 $0.5L$ 间距时最大, 为 36.85 m^3 。背涡流长度和背涡流高度基本不随横向间距改变而变化。图 7 显示, 背涡流区域明显观察到漩涡脱落现象, 流场整体对称分布, 鱼礁前后的缓流区相互连接。鱼礁之间形成的加速区域随横向布设间距的增大而逐渐增大, 当横向间距大于 $1.5L$ 时, 加速区趋于稳定。

基于上升流和背涡流特性分析, 在横向布设间距 $0.5L$ 时鱼礁流场效果最佳。与成泽毅等^[14]研究方形人工鱼礁最佳横向布设间距的结论一致。



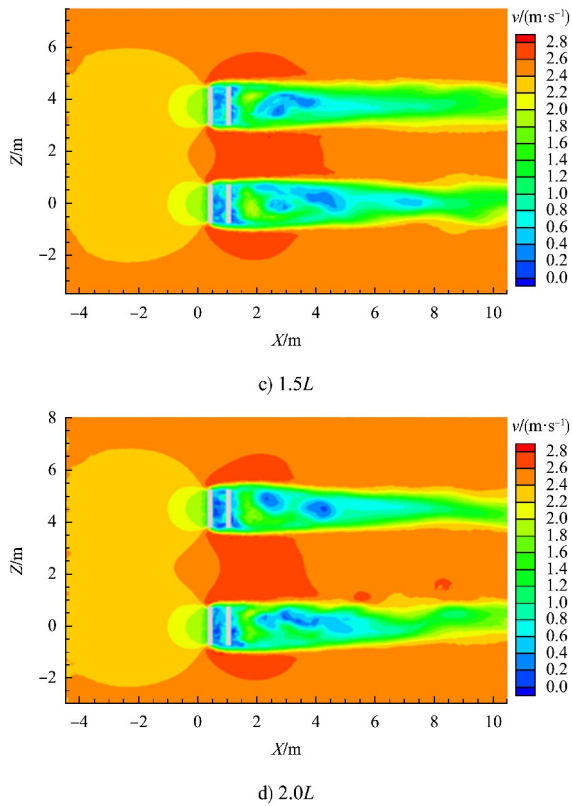


图 7 不同横向间距下人工鱼礁在 $Y=0.6\text{ m}$ 平面的速度云图

表 4 不同横向间距下人工鱼礁背涡流特性参数

横向间距	背涡流体积/ m^3	背涡流长度/ m	背涡流高度/ m
0.5L	36.85	11.14	2.25
1.0L	34.77	11.14	2.17
1.5L	31.87	11.14	2.22
2.0L	31.51	11.14	2.21

2.2.2 纵向组合间距下人工鱼礁流场特性

不同纵向间距下人工鱼礁在 XOY 截面上上升流分布云图见图 8, 上升流特性参数见表 5。研究结果显示, 上升流体积和上升流最大速度均随纵向间距增大呈现先增大后减小的变化, 在 4.0L 时达到最大, 分别为 27.33 m^3 和 1.30 m/s 。上升流最大高度与礁高比值基本不随纵向间距的增加而变化, 上升流最大高度约为礁体高度 2.37 倍。

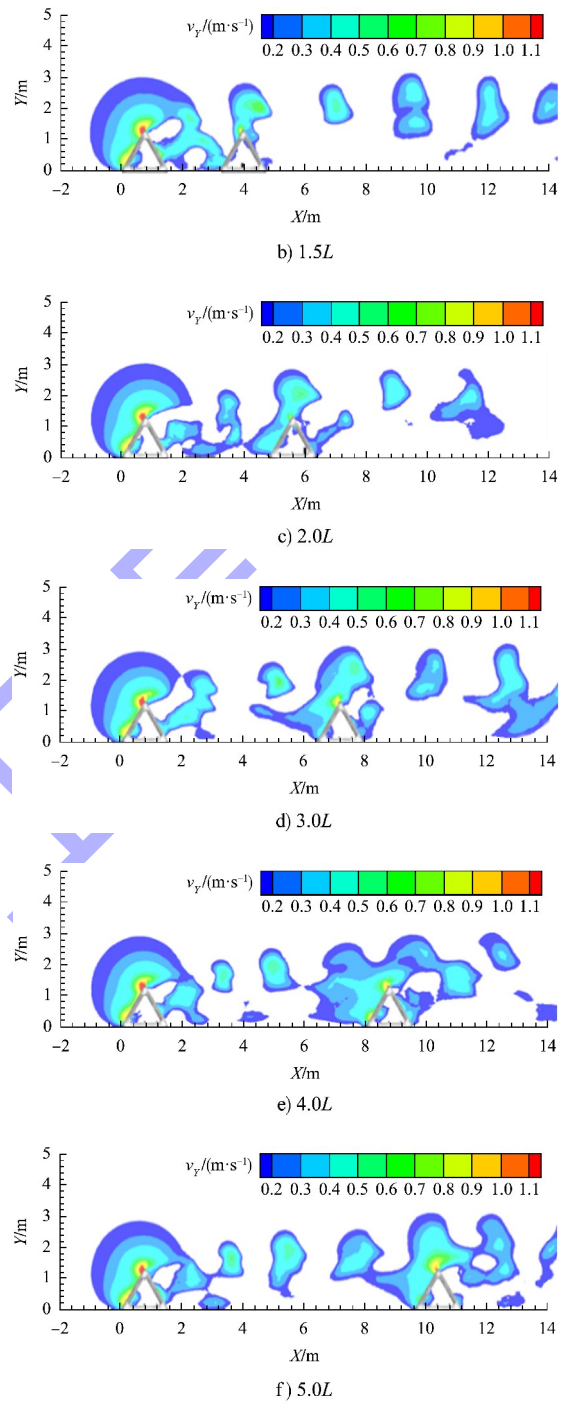
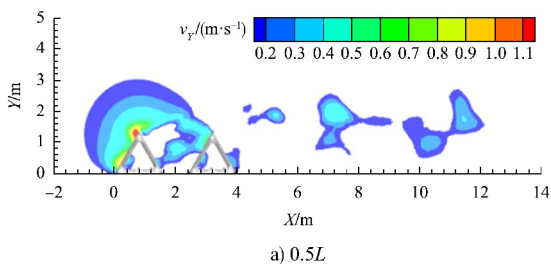


图 8 不同纵向间距人工鱼礁 XOY 平面上上升流分布云图

表 5 不同纵向间距下人工鱼礁上升流和背涡流特性参数

纵向间距	上升流体积/ m^3	上升流最大高度与礁高比值	上升流最大速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0.5L	17.41	2.38	1.14
1.0L	18.85	2.39	1.23
2.0L	19.47	2.38	1.28
3.0L	22.28	2.38	1.29
4.0L	27.33	2.35	1.30
5.0L	26.68	2.34	1.30

图8显示,前方鱼礁形成的上升流与单体鱼礁基本相同,上升流体积变化主要取决于后方鱼礁形成上升流区域的大小。当间距为 $0.5L$ 和 $1.0L$ 时,前方鱼礁上升流区域延伸至后方鱼礁的上方,后方鱼礁迎流面几乎没有形成上升流区域。随着间距继续增大,后方鱼礁迎流面产生的上升流面积越来越大,在 $4.0L$ 达到最大。当布设间距增加过大时,鱼礁之间相互作用减弱,以致后方礁体

周围的流场形态逐渐与单体鱼礁类似。

不同纵向间距下人工鱼礁在 XOY 截面的背涡流分布云图见图9,背涡流特性参数见表6。研究结果显示,背涡流体积和背涡流高度均随着纵向间距呈先增大后减小的趋势,分别在 $4.0L$ 和 $2.0L$ 时达到最大,为 38.12 m^3 和 2.99 m 。此外,背涡流长度与纵向间距成正比。

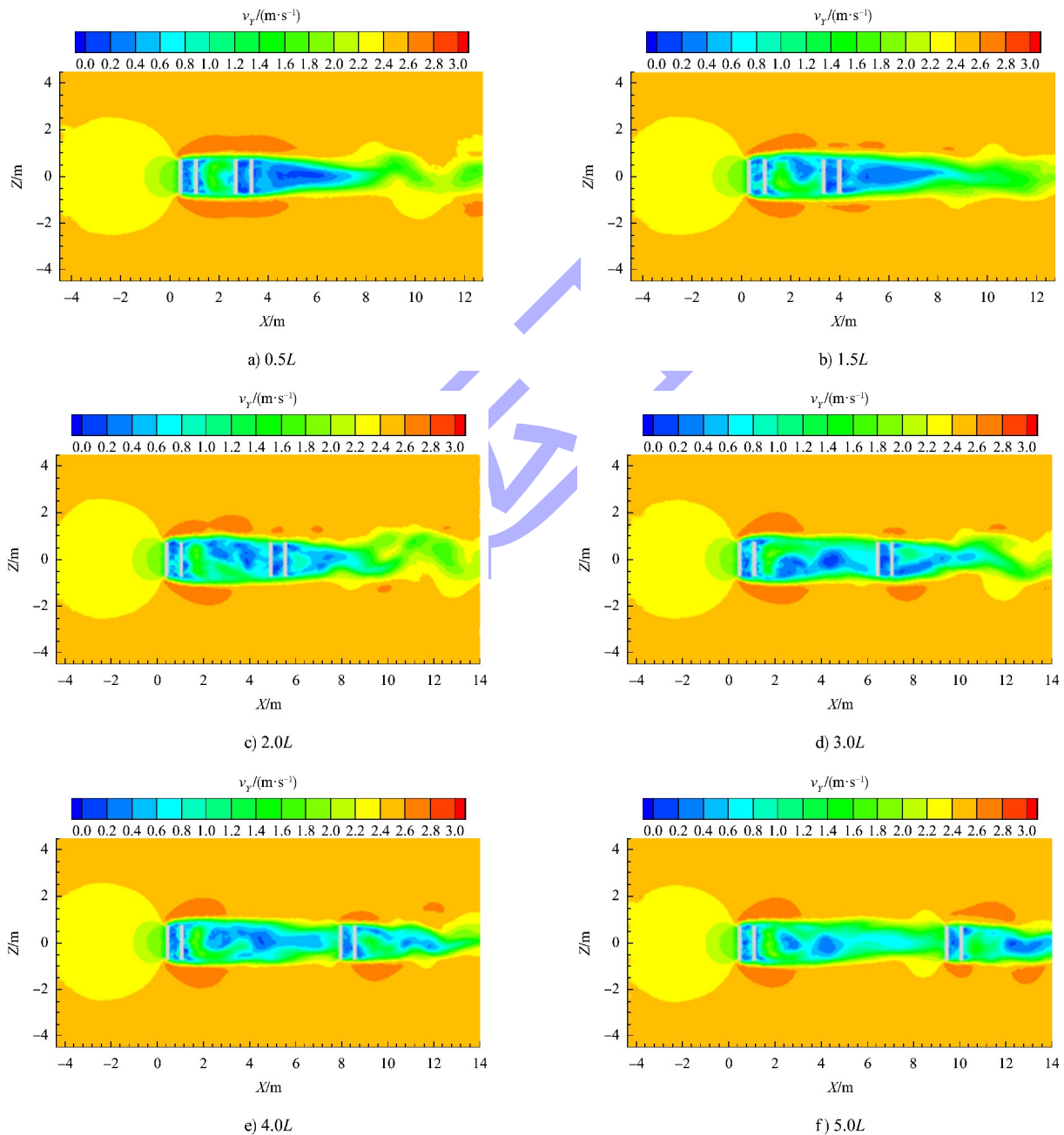


图9 不同纵向间距下人工鱼礁在 XOY 平面速度云图

表 6 不同纵向间距下人工鱼礁背涡流特性参数

纵向间距	背涡流体积/m ³	背涡流长度/m	背涡流高度/m
0.5L	24.87	13.54	2.25
1.0L	28.98	14.34	2.54
2.0L	32.19	15.94	2.99
3.0L	35.19	17.53	2.85
4.0L	38.12	20.73	2.76
5.0L	37.88	19.13	2.50

图 9 显示, 当鱼礁纵向间距较近时, 顶部和两礁体之间均形成回流流场, 后面的鱼礁内部形成漩涡, 且迎流面具有阻挡作用, 使礁体间和礁体后的缓流区域面积逐渐增大。但布置间距增加过大时, 鱼礁之间相互影响减弱, 以致后方礁体周围的流场形态与单体鱼礁类似。该结果与韩林峰在长江中下游研究的结论一致。因此, 基于上升流和背涡流特性分析, 在纵向布置间距 4.0L 时鱼礁流场效果最佳。

综上所述, 当单体人工鱼礁横向布置间距为 0.5L, 纵向布置间距为 4.0L 时, 基于其营造的上升流和背涡流特征, 人工鱼礁发挥的流场效应最佳。人工鱼礁的上升流可带动底部的养分上升到上层水体, 形成富营养的水域, 有利于浮游生物的生长和繁殖, 也为鱼类提供了更易捕获—饵料的机会。人工鱼礁背涡流带动水中的饵料生物在其周围聚集, 且在鱼礁后方产生了较大的适合鱼类栖息的背流面缓流空间, 有利于诱集更多的鱼类在礁体后方栖息。

因此, 合理的人工鱼礁布置方式可以增加人工鱼礁的饵料效应和流场效应, 促进浮游生物在人工鱼礁周围的分布, 提高鱼类觅食效率, 营造鱼类适宜生境。

3 结论

1) 对于不同来流速度, 上升流体积和背涡流体积基本不随来流速度的增大而变化。上升流最大流速与来流速度呈正相关, 而上升流最大流速与来流速度比值、背涡流长度和背涡流高度也基本不随来流速度增加而变化。背涡区上部靠近礁

体顶端处、底部以及内部均形成顺时针漩涡结构。

2) 对于横向布置, 随着间距的增大, 上升流体积和背涡流体积均逐渐减小, 且上升流最大高度与礁高比值和背涡流长度基本不随横向间距增大而变化; 对于纵向布置, 随着间距的增大, 上升流体积和背涡流体积均呈现先增大后减小的变化, 而上升流最大高度与礁高比值变化不大, 背涡流长度与纵向间距成正比。

3) 人工鱼礁横向布置间距为 0.5L, 纵向布置间距为 4.0L 时, 人工鱼礁发挥的流场效应最佳。

参考文献:

- [1] GUO Z S, WANG L, SONG M P, et al. The effects of flow field on the succession of the microbial community on artificial reefs [J]. Marine pollution bulletin, 2023, 191: 114920.
- [2] 黄远东, 姜剑伟, 赵树夫. 方型人工鱼礁周围水流运动的数值模拟研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(3): 1-3.
- [3] 邵万骏, 刘长根, 聂红涛, 等. 人工鱼礁的水动力学特性及流场效应分析 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2014, 29(5): 580-585.
- [4] 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.
- [5] 崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 布置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.
- [6] 胡聪, 毛海英, 王开睿. 圆筒型鱼礁体纵横布置间距下的水动力特性研究 [J]. 海洋科学进展, 2022, 40(1): 154-164.
- [7] 韩林峰, 王平义, 刘晓菲. 长江中下游人工鱼礁最佳布置间距的 CFD 分析 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39(7): 75-79.
- [8] ZHU P, HAO Y C, WEI Z X, et al. Study on flow field characteristics of box artificial reef [J]. Journal of physics (Conference series), 2022, 2271(1): 012007.
- [9] 毛海英, 胡聪, 于定勇, 等. 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), 2022, 61(4): 723-730.

(下转第 205 页)