



不同来流流速和布设间距下人工鱼礁组合 的流场效应研究*

邵鹏飞¹, 贾瑞², 万字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: 人工鱼礁的投放可改善河流局部水域的生态环境, 为鱼类等水生生物营造良好的栖息环境。基于计算流体力学(CFD)方法, 研究长江上游三棱柱人工鱼礁组合的水动力特性, 并以上升流和背涡流的几何特征为参数, 分析不同来流流速(1.5、2.4和3.0 m/s)和布设间距(0.5、1.5和2.5 m)对流场效应的影响。结果表明: 随着来流流速的增加, 在相同人工鱼礁组合工况下上升流和背涡流的几何特征值变化不大; 随着布设间距的增加, 相同人工鱼礁组合工况下上升流、背涡流最大高度和体积等几何特征值先增加后减小, 1.5 m为最优布设间距; 而在同一流速或布设间距下, 随着人工鱼礁组合数量的增加, 上升流、背涡流最大高度和体积逐渐增加, 7个为1组的人工鱼礁为最优组合。

关键词: 长江上游; 三棱柱人工鱼礁组合; 上升流; 背涡流; 数值模拟

中图分类号: S953.1; U612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0097-08

Effect of artificial reef assemblage with different inflow velocities and layout spacings on flow field

SHAO Pengfei¹, JIA Rui², 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: The deployment of artificial reefs can improve the ecological environment of local water areas in rivers, creating a favorable habitat for aquatic organisms such as fish. Based on the computational fluid dynamics (CFD) method, we study the hydrodynamic characteristics of a combination of triangular prism artificial reefs in the upper reaches of the Yangtze River. Using the geometric features of upwelling and back-eddy flows as parameters, we analyze effect of different inflow velocities (1.5 m/s, 2.4 m/s, and 3.0 m/s) and layout spacings (0.5 m, 1.5 m, and 2.5 m) on the flow field. The results show that with an increase in inflow velocity, the geometric characteristics of upwelling and back-eddy flow show minimal variation under the same artificial reef combination condition. As the layout spacing increases, the geometric characteristics such as the maximum height and volume of upwelling and back-eddy flow initially increase and then decrease under the same artificial reef combination condition, with 1.5 m being the optimal deployment spacing. Additionally, under the same flow velocity or layout spacing, an increase in the number of artificial reef combinations leads to a gradual increase in the maximum height and volume of upwelling and back-eddy flow, with a configuration of seven reefs as the optimal combination.

Keywords: upper reaches of the Yangtze River; triangular prism artificial reef assemblage; upwelling; back-eddy flow; numerical simulation

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: 邵鹏飞(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为港口与航道工程。

通讯作者: 万字(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

长江上游处于四大家鱼国家级水产种质资源保护区,是鱼类重要的栖息生境。目前上游正在开展的航道整治工程可能对鱼类的生存环境造成一定影响,因此拟通过广泛投放人工鱼礁营造局部水域的生态环境,改善水生动植物的生长环境^[1]。人工鱼礁作为外源投放物,其形成的上升流和背涡流区域,有利于水体中部与河床底部的营养物质进行充分交换,也可促进浮游生物的聚集,进而对河床生态环境进行修复,同时为鱼类等提供索饵、避敌及繁殖的场所。

目前,人工鱼礁流场特性的研究主要采取室内试验和数值模拟的方法,其中陈帅等^[2]采用三维多普勒流速仪(ADV)测量十字形鱼礁的流场范围及附近紊动强度场;匡翠萍等^[3]基于粒子图像测速(PIV)技术对单体鱼礁内部和周围流场特征进行研究,为数值模拟中湍流模型的选择奠定了基础。但室内试验较难对人工鱼礁形成的上升流和背涡流场进行精细测量,也无法系统地研究不同影响因素下人工鱼礁的流场特性,且耗费的时间成本较高。因而黄远东等^[4]、邵万骏等^[5]、郑延璇等^[6]基于计算流体动力学(CFD)方法系统地模拟投放量、来流流速、迎流角度、布设间距、开口比等不同影响因素下方形、三棱柱形、星体形等多种海洋人工鱼礁周围的水动力特性,结果表明人工鱼礁单体的上升流和背涡流特性参数基本不受来流流速大小的影响,而随开口比的增加而降低;韩林峰等^[7-8]采用CFD方法和水槽模型试验相结合的方式研究长江中下游透空正六面体人工鱼礁的流场特性,结果表明鱼礁周围流速维持在0.84~1.00 m/s,处于四大家鱼的适宜流速范围,且最佳布设间距为6 m。综上所述,现阶段对于人工鱼礁流场效应的研究大多集中于低流速下海洋鱼礁单体的水动力学特性分析,内河航道中人工鱼礁的研究还处于探索阶段,仅长江中下游低流速区

域开展了部分研究,而长江上游属于高流速山区河流,尚缺乏对该区域广泛投放的三棱柱人工鱼礁组合流场特性的研究,需要进一步进行系统研究。

鉴于此,本文以长江上游投放的三棱柱人工鱼礁组合(3个1组、5个1组和7个1组)为研究对象,采用CFD方法模拟不同来流流速和布设间距下人工鱼礁组合周围的流场,通过统计上升流和背涡流区域的几何特征,定量分析来流流速和布设间距对流场效应的影响。研究结果可为长江上游人工鱼礁的建设提供理论支撑。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程

流体运动控制方程的连续性方程和动量方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + f_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_i(i=1,2,3)$ 、 $u_j(j=1,2,3)$ 为 x 、 y 、 z 方向的雷诺平均速度; x_i 、 x_j 为 i 、 j 方向上的坐标位置; t 为时间; ρ 为流体密度; ν 为流体运动黏性系数; p 为流体压强; $\overline{u'_i u'_j}$ 为 i 、 j 方向上的平均脉动速度; f_i 为体积力。

1.2 数值模型

本文采用长江上游广泛投放的三棱柱人工鱼礁模型,其中人工鱼礁单体长1.5 m、宽1.5 m、高1.31 m,礁体厚度为0.15 m,见图1。由于人工鱼礁单体产生的流场效应及为鱼类等提供的栖息空间有限,同时逐个投放的工程量较大,因此本文选择对人工鱼礁单体进行组合,分别考虑3个1组、5个1组和7个1组共3种组合形式。

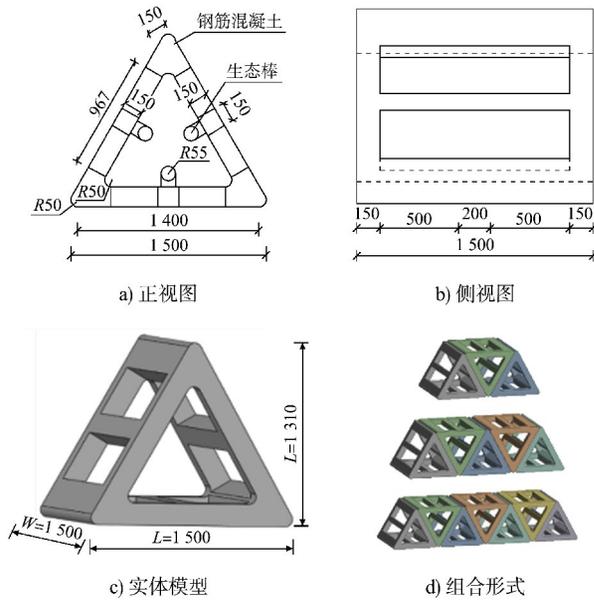


图 1 三棱柱人工鱼礁形状及尺寸 (单位: mm)

设定人工鱼礁实际尺寸为长 L 、宽 W 、高 H , 整个计算域的长设为 $10L$ 、宽设为 $6W$ 、高设为 $5H$, 其中人工鱼礁前计算域长度为 $3L$, 人工鱼礁后计算域长度为 $6L$, 左右两侧计算域宽度分别为 $2.5W$ 。基于 ICEM-CFD 软件进行网格划分, 为减少计算量采用四面体非结构化网格, 而为了更精确地捕捉人工鱼礁组合周围流场特性, 在其周围划分加密域, 整个三维计算区域的网格单元数为 116.432 1 万~140.531 6 万个, 见图 2。

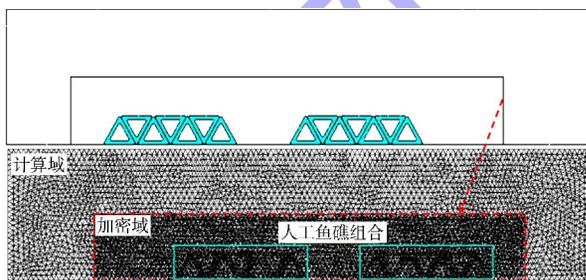


图 2 三棱柱人工鱼礁组合计算区域及网格划分

计算域的进口设置为速度边界条件; 出口设置为自由出流边界条件; 计算域底面和礁体壁面采用无滑移边界条件; 计算域其他各面采用对称边界条件^[9]。基于 ANSYS - FLUENT 软件采用重整化群 RNG $k-\epsilon$ (湍动能-湍流耗散率) 湍流模型^[10], 利用双精度求解器对连续方程中的压力和速度进行耦合求解, 采用 SIMPLEC 算法, 方程离散采用

QUICK 格式, 湍流动能和湍流耗散率均采用二阶迎风格式, 精度控制中的计算残差值取 10^{-5} , 时间步长取 0.005 s, 计算迭代最大步数设为 4 000 步。

1.3 模型验证

为了验证数学模型和参数设置的准确性, 在长 26.5 m、宽 1.0 m、高 1.0 m 的循环水槽中以 1:10 的比例缩放人工鱼礁模型进行 ADV 测速试验, 见图 3a); 分别测量测点 $A_1 \sim A_{13}$ 的流速值, 测点均位于距离水槽底面 15 cm 处, 见图 3b)。为避免鱼礁出现滑落、滚动现象, 将礁体底部固定在水槽试验段中央, 平行于来流方向放置。

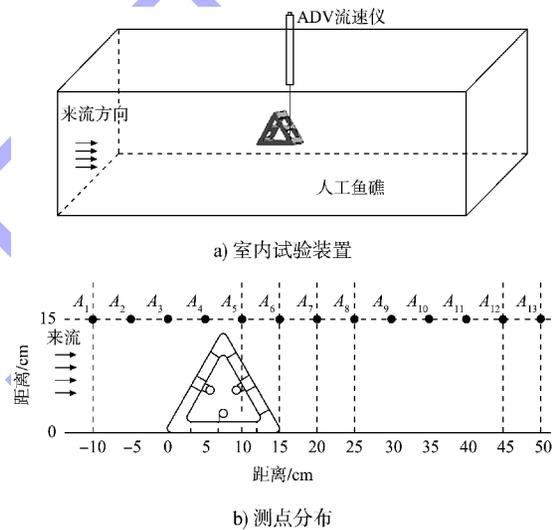


图 3 水槽试验

测点流速试验值与模拟值比较见图 4。可以看出, 数值模拟结果与试验测量结果整体吻合程度较好, 误差在 5% 范围内, 表明采用数值模拟方法对人工鱼礁流场进行模拟是可行的, 且本文所建立的模型是准确的。

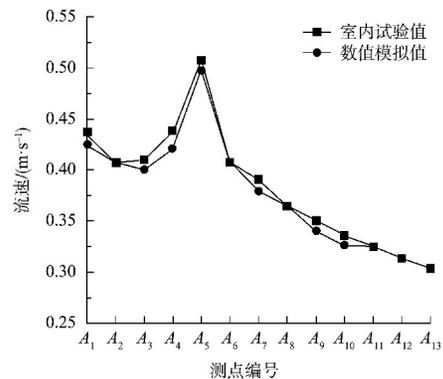


图 4 测点流速的试验值与模拟值比较

1.4 模拟工况

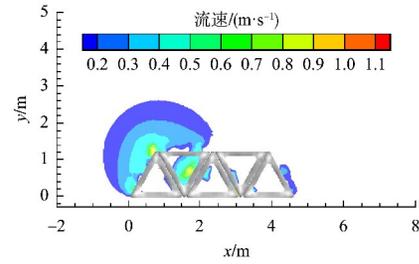
为深入探索三棱柱人工鱼礁组合(3个1组、5个1组和7个1组)的流场效应,分析最佳组合方式,在上述数值模拟方法的基础上,设置以下计算工况:1)根据相关调研结果,长江上游枯水期水流流速一般为1.5~3.0 m/s,洪水期水流流速一般为3.0~5.0 m/s,因此本文将来流流速设置为1.5、2.4和3.0 m/s;2)纵向布设间距设置为0.5、1.5和2.5 m,并取长江上游常年平均来流流速2.4 m/s进行重点分析。

2 结果与分析

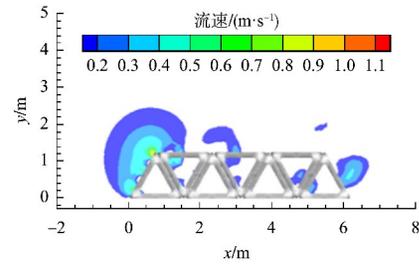
2.1 来流流速的影响

2.1.1 上升流区域的分布特性

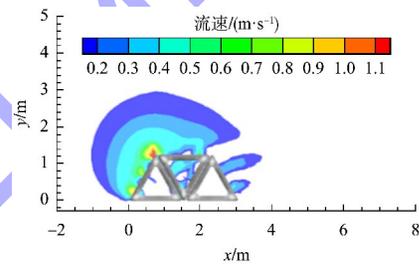
当水流贴近礁体迎流面时水流抬升形成上升流,取垂向流速与来流流速之比大于或等于5%的水域为上升流区域^[11]。不同来流流速下人工鱼礁组合 $z=0$ 平面(通过礁体组合中心)上的速度矢量分布见图5,不同来流流速下上升流几何特征值的比较见表1。可以看出,上升流主要集中在人工鱼礁组合的第1个单体礁迎流面上方。在相同人工鱼礁组合的情况下,随着来流流速的增加,上升流最大流速和体积变化不明显,与黄远东等^[12]的研究结果相一致,而最大高度略有增加,约为礁体高度的2.28倍;在来流流速不变的情况下,随着人工鱼礁组合数量的增加,上升流最大高度和体积逐渐增加,7个1组时,上升流体积达到最大,约 15 m^3 ,有利于营养物质在更广泛的区域得到交换,也可为浮游生物的聚集提供更广阔的生存空间。



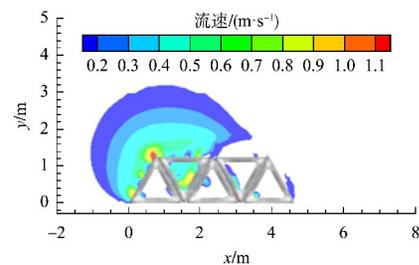
b) 5个1组, 来流流速1.5 m/s



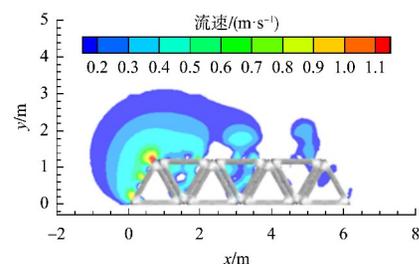
c) 7个1组, 来流流速1.5 m/s



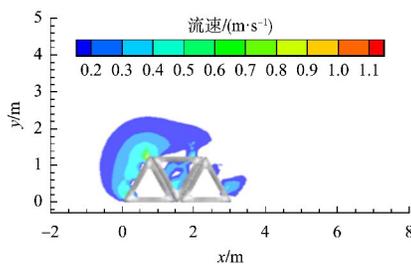
d) 3个1组, 来流流速2.4 m/s



e) 5个1组, 来流流速2.4 m/s



f) 7个1组, 来流流速2.4 m/s



a) 3个1组, 来流流速1.5 m/s

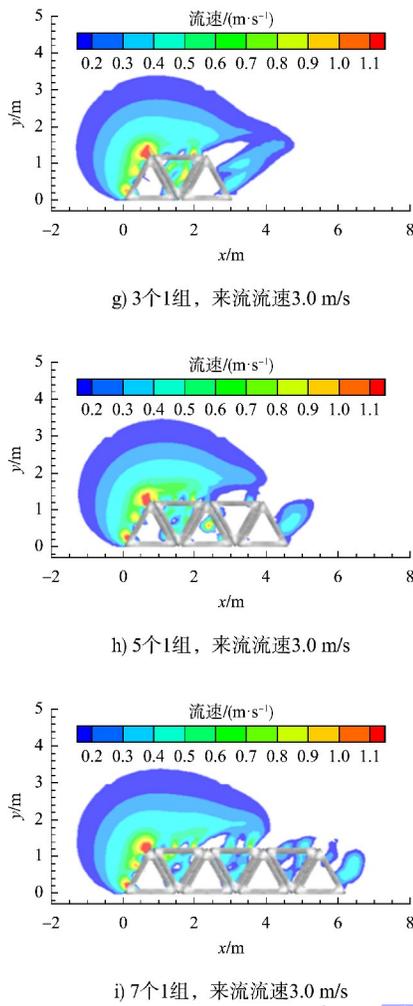


图 5 不同来流流速下人工鱼礁组合上升流流速分布

表 1 不同来流流速下上升流几何特征值的比较

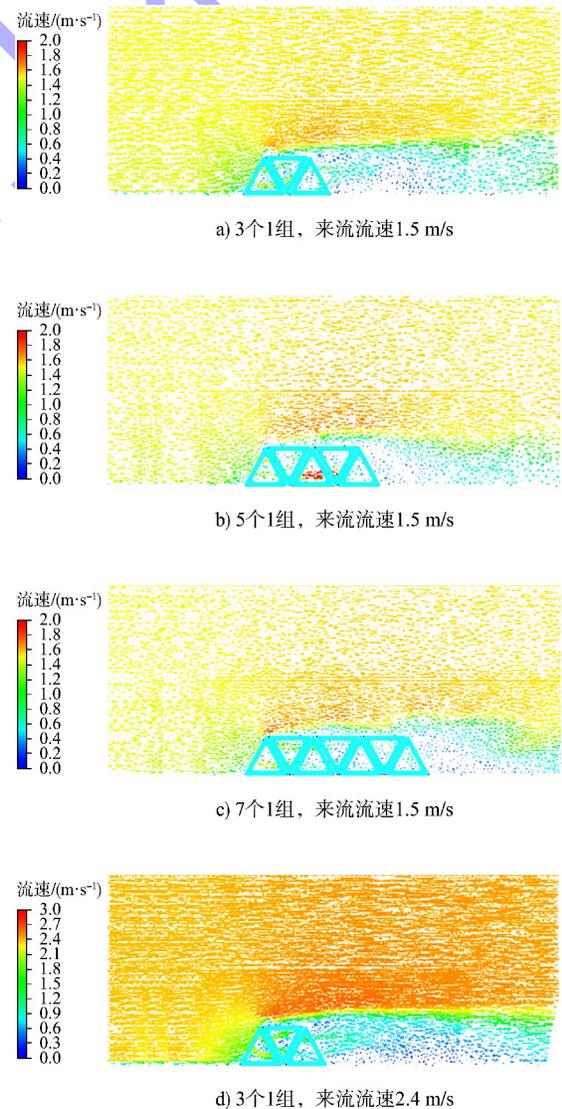
$v/$ ($m \cdot s^{-1}$)	人工鱼 礁组合	$v_{max}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	H_{max}/m	W/m^3	v_{max}/v	H_{max}/H
1.5	3个1组	1.28	2.75	13.49	0.85	2.12
	5个1组	1.30	2.86	13.86	0.87	2.20
	7个1组	1.29	2.99	14.35	0.86	2.30
2.4	3个1组	1.58	2.87	14.15	0.66	2.21
	5个1组	1.60	2.98	14.73	0.67	2.29
	7个1组	1.59	3.10	15.19	0.66	2.38
3.0	3个1组	1.68	2.98	14.62	0.56	2.29
	5个1组	1.70	3.13	15.14	0.57	2.41
	7个1组	1.69	3.05	15.72	0.56	2.35

注: v 为来流流速, v_{max} 为上升流最大流速, H_{max} 为上升流最大高度, W 为上升流体积, H 为人工鱼礁组合高度。

2.1.2 背涡流区域的分布特性

水流受礁体阻流作用在礁后形成背涡流, 根

据文献[5]取来流流速的 80% 为背涡流区域。不同来流流速人工鱼礁组合 $z=0$ 平面(通过礁体组合中心)上的流速矢量分布见图 6, 不同来流流速下背涡流几何特征值的比较见表 2。可以看出, 由于水体流动剧烈分离, 使得三棱柱人工鱼礁组合表面不断产生不稳定漩涡, 从壁面脱落随后进入到主流场区域。在相同人工鱼礁组合的情况下, 随着来流流速的增加, 背涡流最大长度、最大高度和体积基本不变, 与兰孝政等^[13]的研究结果相一致; 在来流流速不变的情况下, 随着人工鱼礁组合数量的增加, 背涡流最大长度、最大高度和体积逐渐增加, 7 个 1 组时, 背涡流体积达到最大, 约 $24 m^3$, 可为鱼类等水生生物的栖息、避敌和繁衍提供更广阔的空间。



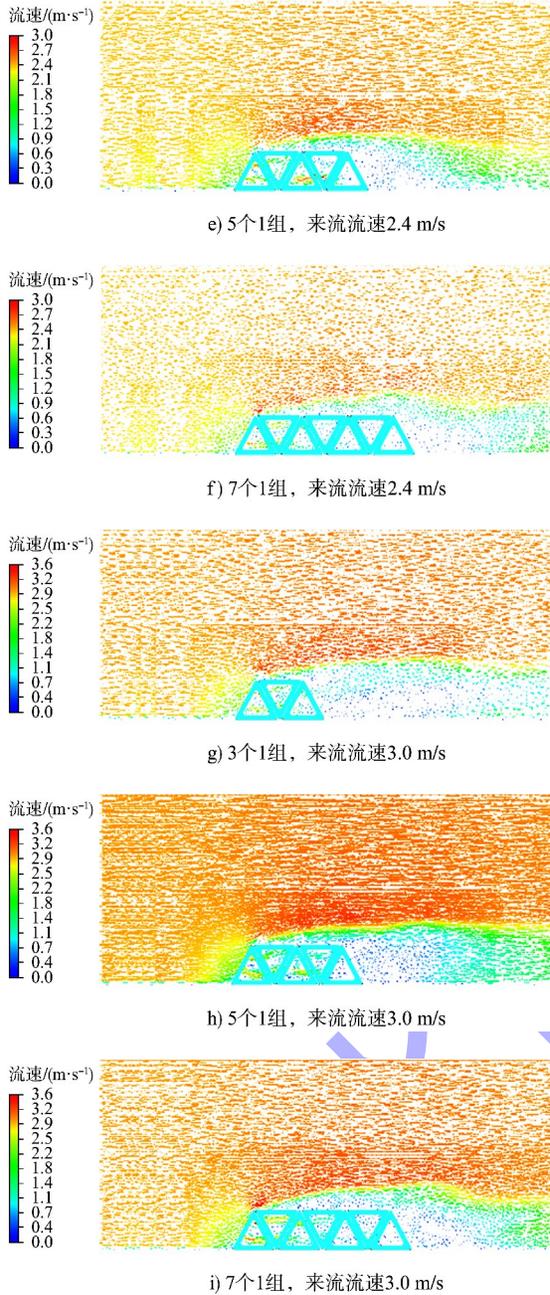


图 6 不同来流流速下人工鱼礁组合背涡流速矢量分布

表 2 不同来流流速下背涡流几何特征值的比较

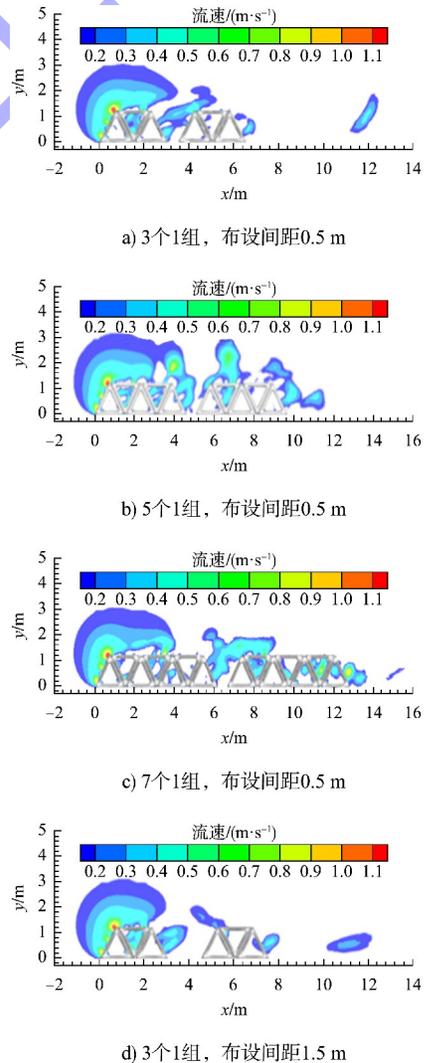
$v/$ ($m \cdot s^{-1}$)	人工鱼 礁组合	L_{max}/m	I_{max}/m	V/m^3	$v_{ave}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	I_{max}/H
1.5	3个1组	10.47	1.92	20.71	0.63	1.48
	5个1组	11.98	2.00	22.05	0.82	1.54
	7个1组	13.48	2.08	23.46	0.63	1.60
2.4	3个1组	10.47	1.95	21.10	0.86	1.50
	5个1组	11.98	2.03	22.57	1.04	1.56
3.0	7个1组	13.48	2.10	23.94	0.95	1.62
	3个1组	10.47	2.00	21.44	1.05	1.54
	5个1组	11.98	2.08	22.91	1.12	1.60
	7个1组	13.48	2.15	24.49	1.07	1.65

注： L_{max} 为背涡流最大长度， I_{max} 为背涡流最大高度， V 为背涡流体积， v_{ave} 为背涡流平均速度。

2.2 布设间距的影响

2.2.1 上升流区域的分布特性

不同布设间距下人工鱼礁组合 $z=0$ 平面(通过礁体组合中心)上的流速矢量分布见图 7，不同布设间距下上升流几何特征值的比较见表 3。可以看出，在相同人工鱼礁组合的情况下，随着布设间距的增加，上升流最大流速、最大高度和体积呈先增加后减小的变化趋势；在布设间距不变的情况下，随着人工鱼礁组合数量的增加，上升流最大流速、最大高度和体积逐渐增加。在布设间距为 1.5 m 且人工鱼礁组合为 7 个 1 组时，上升流体积达到最大，为 $61.79 m^3$ ，此时上升流最大高度为鱼礁高度的 3.43 倍，最大流速为来流流速的 4.33 倍，有利于水体中部的营养盐和有机质等与河床底部进行充分交换，便于饵料和浮游动植物的富集，可为鱼类等水生动物提供索饵场。



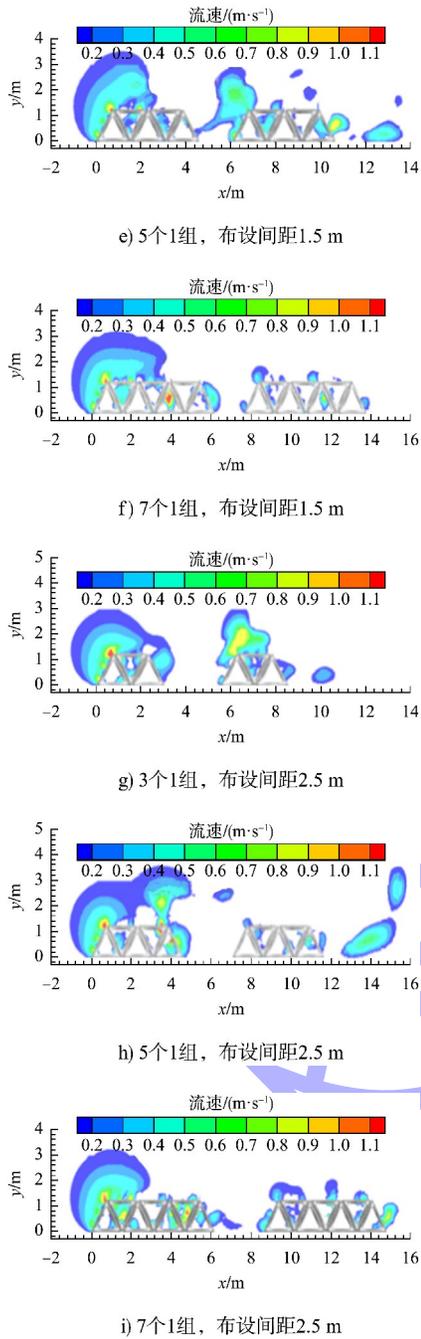


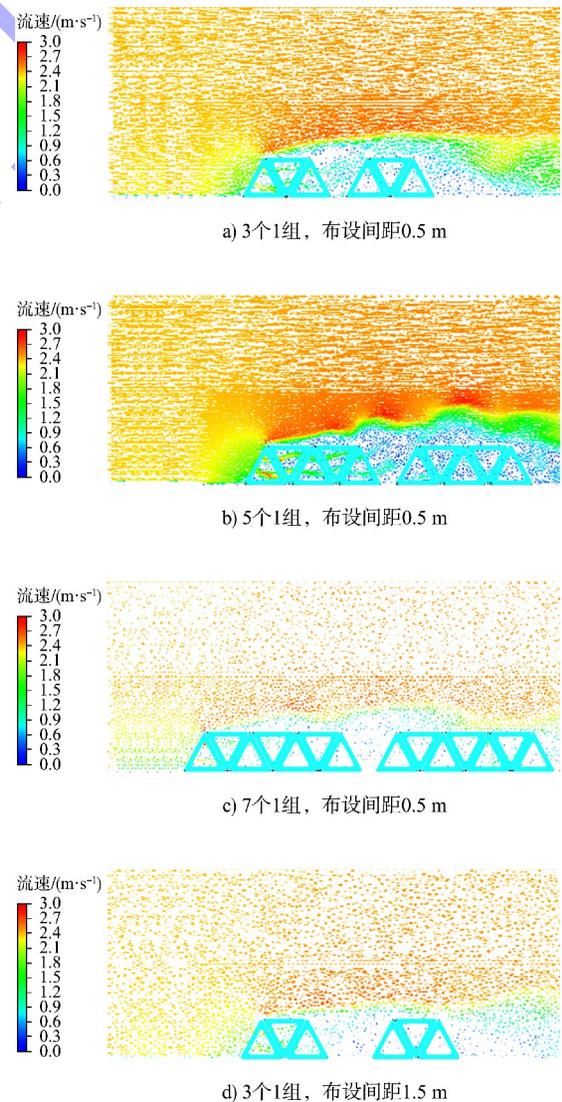
图 7 不同布设间距下人工鱼礁组合上升流流速分布

表 3 不同布设间距下上升流几何特征值的比较

布设间距/m	人工鱼礁组合	$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$	H_{max}/m	W/m^3	v_{max}/v	H_{max}/H
0.5	3个1组	2.56	2.96	20.65	1.07	2.28
	5个1组	3.06	2.98	24.59	1.28	2.29
	7个1组	5.86	3.03	34.19	2.44	2.31
1.5	3个1组	3.38	3.10	35.66	1.41	2.38
	5个1组	6.50	3.71	42.19	2.71	2.83
	7个1组	10.12	4.44	61.79	4.33	3.43
2.5	3个1组	2.10	3.06	21.94	0.88	2.35
	5个1组	4.55	3.47	35.72	1.90	2.65
	7个1组	7.97	4.00	55.12	3.32	3.05

2.2.2 背涡流区域的分布特性

不同来流流速下人工鱼礁组合 $z=0$ 平面 (通过礁体组合中心) 上的流速矢量分布见图 8, 不同布设间距下背涡流几何特征值的比较见表 4。可以看出, 在相同人工鱼礁组合的情况下, 随着布设间距的增加, 背涡流最大长度、最大高度和体积呈先增加后减小的变化趋势; 在布设间距不变的情况下, 随着人工鱼礁组合数量的增加, 背涡流最大长度、最大高度和体积逐渐增加。在布设间距为 1.5 m 且人工鱼礁组合为 7 个 1 组时, 背涡流体积为 $55.58 m^3$, 背涡流平均流速稳定在 1.2 m/s 附近, 该流速处于大部分鱼类适宜的产卵流速范围, 因此能够营造出较大的缓流区域为鱼类等水生动物提供适宜的遮蔽和繁殖场所^[14]。



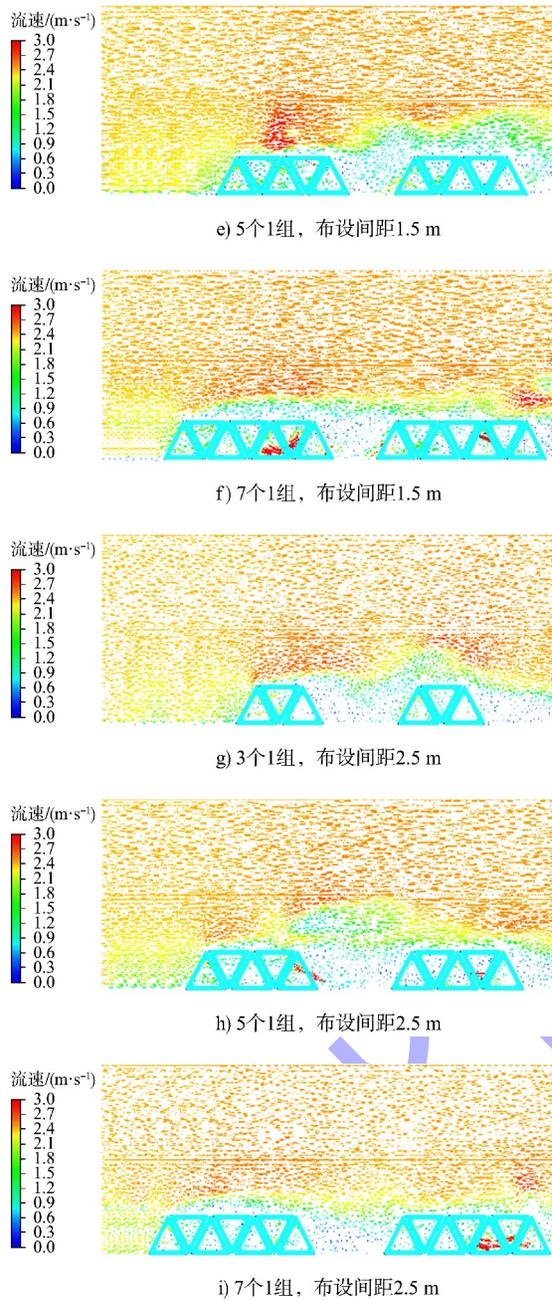


图8 不同布设间距下人工鱼礁组合背涡流流速矢量分布

表4 不同布设间距下背涡流几何特征值的比较

布设间距/m	人工鱼礁组合	L_{max}/m	I_{max}/m	V/m^3	$v_{ave}/(m \cdot s^{-1})$	I_{max}/H
0.5	3个1组	13.97	1.99	30.60	1.00	1.53
	5个1组	15.47	2.20	33.05	0.88	1.69
	7个1组	17.47	2.27	45.00	1.04	1.75
1.5	3个1组	15.98	2.35	40.47	0.98	1.81
	5个1组	20.47	2.75	50.28	1.15	2.12
2.5	3个1组	14.98	1.94	36.36	1.07	1.49
	7个1组	22.47	3.42	44.04	1.19	2.63

3 结论

1) 随着来流流速的增加,在相同人工鱼礁组合工况下上升流和背涡流几何特征值基本不变;在同一来流流速下,随着人工鱼礁组合数量的增加,上升流、背涡流最大高度和体积最大,即7个1组人工鱼礁为最优组合。

2) 随着布设间距的增加,在相同人工鱼礁组合工况下上升流、背涡流最大高度和体积先增加后减小,即1.5m为最优布设间距;在同一布设间距下,随着人工鱼礁组合数量的增加,上升流、背涡流最大高度和体积最大,即7个1组人工鱼礁为最优组合。

3) 布设间距为1.5m且人工鱼礁组合为7个1组时,上升流最大高度为鱼礁高度的3.43倍,最大流速为来流流速的4.33倍,背涡流最大高度约为鱼礁高度的2.63倍,能够为鱼类等水生动物提供更广阔的觅食、避敌和繁殖的场所。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈帅,陆彦,黄廷杰,等.人工鱼礁水动力学机理试验研究[J].人民黄河,2014,36(5):34-37.
- [3] 匡翠萍,郑宇华,顾杰,等.透水鱼礁型潜堤内部流场及绕流特性模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(7):1073-1084.
- [4] 黄远东,龙催,邓济通.三棱柱型人工鱼礁绕流流场的CFD分析[J].水资源与水工程学报,2013,24(1):1-4.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 韩林峰,王平义,刘晓菲.长江中下游人工鱼礁最佳布设间距的CFD分析[J].环境科学与技术,2016,39(7):75-79.
- [8] 韩林峰,王平义,刘晓菲.长江中下游人工鱼礁水动力学特性实验研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(8):1238-1246.

(下转第110页)