

## 基于流场数值仿真的人工鱼礁组合优化研究

林 军<sup>1,2,3</sup>, 章守宇<sup>1\*</sup>, 叶灵娜<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学海洋生态系统与环境实验室, 上海 201306;

3. 上海海洋大学国际海洋研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 基于特征礁水槽集鱼实验, 研究了不同结构人工鱼礁和不同背景速度下黑鲷幼鱼在各流速区段出现频度, 以鱼类出现频度高、水平流速为背景速度的 0.7 倍和 0.8 倍以下的流场空间体积作为背涡流范围指标, 以垂向上升流速为水平来流速度的 0.1 倍和 0.2 倍以上的空间体积作为上升流范围指标, 基于 Fluent、采用大涡模拟法 (LES) 的湍流模型, 进行数值水槽建模, 以 4 种单位鱼礁组合方案为例来分析不同组合流场效应的差异和优劣。研究表明, 边长 3 m 的正方体鱼礁, 以 20~30 个单礁、1~2 倍礁距进行五点式、对称型单位鱼礁组合投放为宜, 这样既能发挥礁体的协同效应, 又能使单位鱼礁的调控范围达到最大化。

**关键词:** 人工鱼礁组合; 流场效应; 数值模拟; 优化; 大涡模拟 (LES)

**中图分类号:** Q 178.2; S 931

**文献标志码:** A

陆架海域的人工鱼礁投放后, 受周期性潮流影响, 其周围水体的流场随之发生变化, 产生背涡流和上升流。陈勇等<sup>[1]</sup>研究表明, 背涡流对部分类型鱼类有较好的诱集作用, 上升流则能够将海底的营养盐带到表层, 从而提高海区初级生产力。投放人工鱼礁的首要点是让鱼类感知礁体的存在, 以及礁体存在所带来的流场环境变异和饵料条件等的差异。鱼礁单体的投放一般是以单位鱼礁形式投放, 以达到提高鱼类感知效果和优化生态调控规模的目的。

研究人工鱼礁流场效应的方法众多, 包括风洞实验<sup>[2-3]</sup>、普通水槽<sup>[4]</sup>和 PIV (粒子图像测速) 水槽实验<sup>[5]</sup>以及数值模型仿真计算<sup>[6-10]</sup>等。随着计算机技术的发展, 数值模拟成为越来越重要的研究手段。近期有关数模在人工鱼礁领域的研究得到了进一步的发展, 应用面也得到拓展, 包括礁区配置的数值建模<sup>[11-12]</sup>、人工冲浪礁区的波浪模拟<sup>[13]</sup>, 以及礁区渔业资源的长周期变化模拟<sup>[14]</sup>等。

本实验根据黑鲷幼鱼的水槽集鱼实验结果,

总结一种新的人工鱼礁流场效应判定依据, 并通过不同单位鱼礁配置方案的数值水槽实验, 探讨如何使单位鱼礁组合的流场效应最大化, 即鱼礁单体背涡流区与上升流区规模优化问题。

### 1 材料与方法

#### 1.1 流场效应判据

本研究所用人工鱼礁流场效应判据是根据水槽集鱼实验数据分析得到的结果<sup>[15]</sup>。与一些采用微缩礁体模型、在静水槽中进行的实验<sup>[1,16-18]</sup>不同, 本实验在动水槽中进行; 作为一种实验中的改进措施, 本研究的水槽集鱼实验引入了特征礁 (尺寸 100 cm × 15 cm × 15 cm, 与实际礁体的支柱结构相仿), 并以若干特征礁分别构建鱼礁实际尺度的局部结构。以中国东海区放流代表种黑鲷 (*Sparus macrocephalus*) 幼鱼 (平均叉长 21.5 cm) 为实验鱼种, 在鱼礁不同结构 (水平间距 10、15、20 cm 和垂直间距 28.0、38.8、56.7 cm) 和不同背景速度 (19.1、23.4、27.7 cm/s, 分别为由 2 个大小不同水泵在环形水槽中形成合成流) 下,

收稿日期: 2012-10-05 修回日期: 2013-01-15

资助项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201003068, 201303047); 上海海洋大学博士启动基金项目 (B-5301-11-0222)

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

研究各鱼礁结构形成的流速分布规律、黑鲷幼鱼在各流速区段出现频度等。结果表明,在3种来流速度和9种鱼礁结构下,黑鲷幼鱼出现区域的流速组成均接近于正态分布(图1和图2),其流速平均值(15.3、17.2、20.8 cm/s)与中位数(14.9、16.9、20.3 cm/s)随着背景速度的增大而增大,它们与来流速度的比率范围为0.72~

0.80,但同时均存在一部分离群值大于来流速度10%~20%。因此,对计算空间中满足流速为背景速度0.7~0.8倍的空间体积进行累计,作为人工鱼礁营造黑鲷幼鱼适宜流速区的度量指标,确定了以相对于来流速度比率为度量的目标种流速适宜区的营造技术。本实验中的数据处理均在SPSS 16.0软件中进行。

表1 黑鲷幼鱼栖息处流速与来流速度比率  
Tab.1 Ratio of velocity in habitat of juvenile fish to inflow velocity

来流速度/(cm/s) inflow velocity	幼鱼集中栖息处流速/(cm/s) velocity of habitat juvenile fish enjoyed			与来流速度比率 ratio to inflow velocity		
	19.1	23.4	27.7	19.1	23.1	27.7
平均值 mean	15.3	17.2	20.8	0.80	0.74	0.75
中位数 median	14.9	16.9	20.3	0.78	0.72	0.73

从鱼类行为学角度来说,由于人工鱼礁投放造成了局部空间的流速相对来流速度变缓或变急,故而对目标鱼种起到了诱集的作用,鱼礁投放后对物理环境改造的效果应视其对环境水体有异于背景流场的范围而定,在3个来流流速下,黑鲷幼鱼出现区域的流速平均值和中位数与来流速度的比率范围为0.72~0.80(表1)。因此,与以往的水槽实验一般以高度和长度等指标来表示背涡流<sup>[4]</sup>不同,本实验以黑鲷幼鱼出现区域的流速平均值与来流速度比率小于0.7(简记 vle70, 单位 m<sup>3</sup>)和小于0.8的空间体积(简记 vle80, 单位 m<sup>3</sup>)作为背涡流范围的度量指标,本研究中不考虑流速变急的空间范围;套用流速相对比率概念,将垂向上升流速与来流速度比率大于0.1(简记 wge10, 单位 m<sup>3</sup>)和大于0.2的空间体积(简记 wge20, 单位 m<sup>3</sup>)作为上升流范围的度量指标,由此判定人工鱼礁物理环境造成性能的指标共计4个。每个指标值均以流场体积(m<sup>3</sup>)/鱼礁单体来表示,即统计满足流速判定条件的计算单元的体积(本研究中划分三角形网格,每个计算单元为大小不等的四面体),累加后除以单位鱼礁的礁体个数(因本实验所用单位鱼礁的礁体型号、体积相同,不同单位鱼礁间仅排列方式和礁体个数不同)。背涡流区体积从三维空间角度表示了适合鱼类栖息的背流面缓流区空间的大小。上升流区同样用体积来表示,可以将上升流区指标大小视为一个能将底层高营养水向上层输送的生态动力泵的特征值。由于海水的流动均为湍流状态,不同时刻的指标值有所差异,背涡流和上升流范

围量值采用流场计算稳定后100 s(计算结果显示,礁体绕流产生的涡旋可在100 s内移动出计算区域,且能量基本耗散)内的均值。

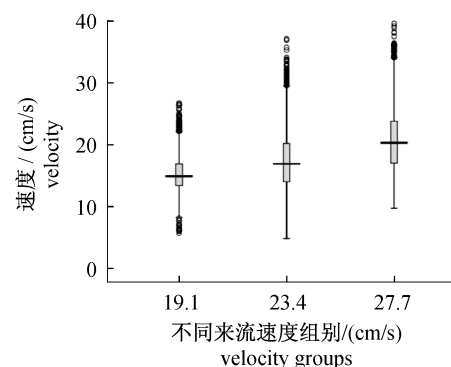


图1 不同来流速度分组下幼鱼栖息处流速分布  
Fig.1 Velocity in habitat of juvenile fish in different inflow velocity groups

## 1.2 三维数值模型

根据礁区建设的目标功能,结合礁区的地形、水深和水文条件,在完成适合该礁区的鱼礁备选单体设计、并初步提出配置组合方案后,在“数值水槽”(图3)里可对鱼礁单体设计和鱼礁组合配置进行优化。本实验选用在浙江近海人工鱼礁区应用广泛、稳定性良好的回字型礁体,对其礁体组合配置进行选优研究。首先,对鱼礁单体进行CAD三维造型,导入CAD文件到网格剖分软件GAMBIT,并复制多个单礁体、根据鱼礁组合方案排列,在GAMBIT中进行二维网格剖分,之后导入网格剖分软件TGRID中进行三维网格剖分,采用4面体网格;其次,将剖分后的网格数据导入

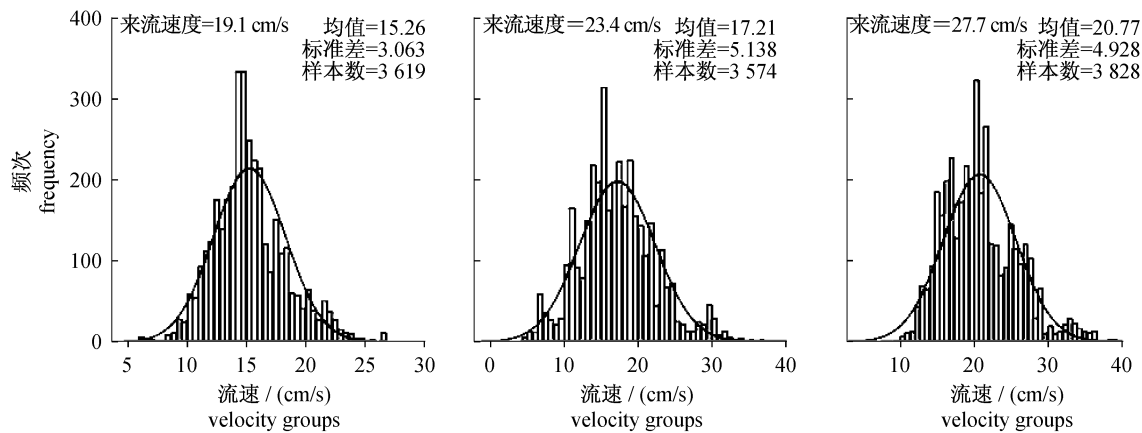


图 2 不同来流速度下幼鱼栖息处流速-频次关系

Fig. 2 Diagram of frequency-velocity in habitat of juvenile fish under different inflow velocity

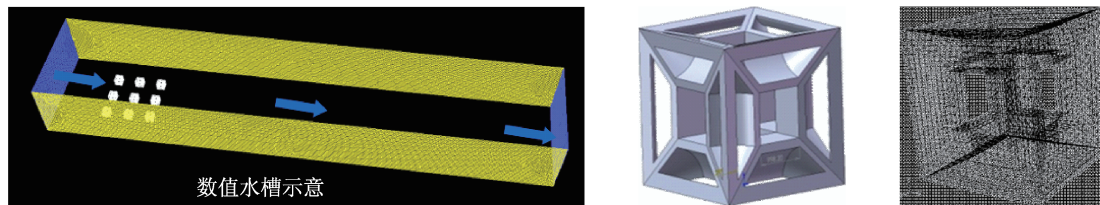


图 3 数值水槽和人工鱼礁造型与网格剖分示例

Fig. 3 Demonstration of numerical channel, modeling and grid generation of artificial reef

CFD 软件(本研究选用 Fluent),湍流计算采用大涡模拟法(large eddy simulation, LES),在数值水槽中计算不同鱼礁组合的流场效应,以背涡流区和上升流区的空间体积范围为主要指标,对鱼礁组合间距、组合配置方案下数值模拟结果进行分析,据此选择确定适合海区鱼礁建设的配置组合方案。上述数值模拟实验方案应用水槽试验和风洞验证了其可行性<sup>[3,8]</sup>。数值模型的计算采用三维双精度数(3ddp)和时变(unsteady)模型、LES 湍流模式,求解器(solver)选用基于压力隐式求解(pressure based),液态水单相流动,流体密度设定为东海近海海水典型密度  $1\ 024\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,考虑重力的作用。数值水槽沿来流方向的两个面设为流速进口(velocity-inlet,出口处流速为负值)边界条件,底面和礁体部分设为墙(wall)边界条件,2个侧面和上顶面均设为对称(symmetry)边界条件。具体参数、边界条件等设置参考文献[7,19]的方法,初始条件设为整个计算区域均为来流速度。

湍流模型选择是影响仿真精度的关键,本文选用的湍流模式为大涡模拟法。大涡模拟是介于直接数值模拟(DNS)与 Reynolds 平均法

(RANS)之间的一种湍流数值模拟方法,即用瞬时的 Navier-Stokes 方法直接模拟湍流中的大尺度涡,不直接模拟小尺度涡,而小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑,由此能模拟出所有大于网格尺度的涡的运动<sup>[19]</sup>。所用礁体模型的网格剖分精度可达厘米级,足以达到对礁体的分辨率。为了计算效率和模拟精度并重,一般在保证既能分辨礁体、又有足够大的计算区域的前提下,单体模型的网格数可控制在 100 万个左右,礁体组合的网格数在 200~400 万个左右。

### 1.3 数值实验

基于流场效应数值仿真研究人工鱼礁组合方案的优化问题,实验安排了两组数值,其一用于判定单位鱼礁的合适礁距,其二用于不同人工鱼礁组合方案的选优研究。

9 礁组合 分为实体礁(长×宽×高:  $3\ \text{m} \times 3\ \text{m} \times 3\ \text{m}$ )和回字形礁(图 3)两组,每组分 0 度和 45 度角迎流和 1、2、3 倍礁高间距等 6 个算例,共计 12 个算例。

单位鱼礁组合 采用回字形礁体计算,实验分为 A、B、C、D 等 4 种组合类型,每组分 0 度和 45 度角迎流等 2 个算例,共计 8 个算例。计算

的数值水槽水深取为东海近岸鱼礁投放区的典型水深 25 m, 来流速度取岛礁海域人工鱼礁区的典型大潮流速 1.0 m/s。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同间距 9 礁组合

由于礁体之间的遮蔽作用, 礁体组合所产生的总流场规模总是小于单个礁体流场规模的累加。实际应用中, 鱼礁单体总是以组合式集中投放来发挥其生态上的协同效应。鱼礁配置组合方案是发挥鱼礁单体协同效应的关键, 首先要解决的问题是礁体的间距。本实验以上述 9 礁组合实验, 考虑 2 种礁型、2 种迎流角度和 3 种礁距(图 4), 通过对流场动画(流速等值线、矢量图时间序列, 图 4 为一个截图示例)的分析判别鱼礁组合的适宜礁距。

单体模型的计算结果表明, 本实验所选回字型鱼礁单体的背涡流规模可达到实体礁规模的 87% 以上, 上升流规模为 62% 以上。不同鱼礁单体的设计均可通过上述试验来达到背涡流规模及上升流规模效应优化。上述均值比越接近于 1, 则说明该型透水礁的流场效应越优。因此, 回字型礁设计在水动力效应上优良, 且具有良好的稳

定性<sup>[20]</sup>。

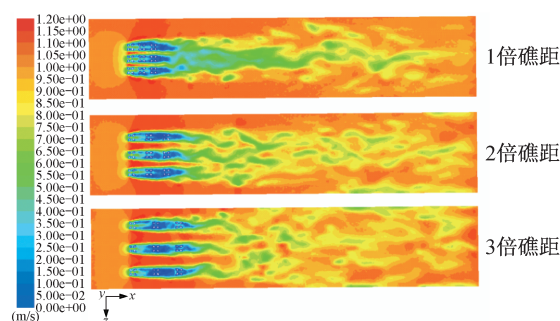


图 4 回字型礁 9 礁组合不同礁距下的背涡流范围

Fig. 4 Distribution of wake vortex in different spacing range between 9 Huizi reefs

布设礁距是影响人工鱼礁流场效应的关键因素<sup>[6]</sup>。综合分析 12 个算例的 9 礁组合实验结果(表 2), 可以消除迎流角度和礁型差异对结果的影响。不同礁距(1、2、3 倍礁高)下的 9 礁组合的流场效应分析显示, 就背涡流而言, 单礁平均  $v_{le70}$  的 1 倍到 2 倍礁距间增长斜率略大于 2 倍与 3 倍礁距,  $v_{le80}$  的 1 倍到 2 倍礁距间增长斜率略小于 2 倍与 3 倍礁距; 而单礁平均上升流的  $w_{ge10}$  和  $w_{ge20}$  均为 1 倍到 2 倍礁距间增长斜率大于 2 倍到 3 倍礁距的增长(图 5)。

表 2 9 礁组合背涡流区和上升流区体积 ( $m^3$ ) 指标

Tab. 2 Volume ( $m^3$ ) index of wake vortex and upwelling of 9 reefs assemblage

指标 index	礁距 distance	均值比 ratio of mean	最小值 minimum	最大值 maximum	均值 mean	标准差 standard deviation
vle70	1 倍	1.00	320.4	851.3	545.8	155.6
	2 倍	1.29	420.0	1 017.8	705.7	169.5
	3 倍	1.23	472.5	1 668.5	867.3	350.1
vle80	1 倍	1.00	959.2	1 998.5	1 459.6	266.2
	2 倍	1.19	1 059.2	2 323.9	1 730.3	328.3
	3 倍	1.22	1 166.3	3 612.4	2 113.1	706.0
wge10	1 倍	1.00	111.0	424.9	245.2	115.9
	2 倍	1.32	112.4	523.0	324.0	150.9
	3 倍	1.11	135.9	558.7	359.8	155.7
wge20	1 倍	1.00	15.6	91.1	39.6	22.2
	2 倍	1.56	17.1	116.9	62.0	35.5
	3 倍	1.15	20.5	119.4	71.0	34.2

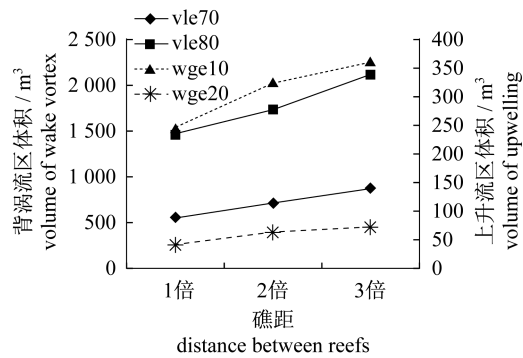


图 5 不同礁距下背涡流区和上升流区体积均值  
Fig. 5 Volume of wake vortex and upwelling at different distances between reefs

随着礁距的增大,鱼礁单体的礁均流场效应呈增大的趋势,但单礁之间协同效应则呈下降趋势。1倍礁距的背涡流区为连续区域,协同效应良好,2倍礁距下的背涡流区处于连续与分离的临界状态,3倍礁距的背涡流区在3组鱼礁间完全分离而不连续(图4)。若礁区的建设以诱集和

增殖岛礁性鱼类为主要需求,则要重视鱼礁单体之间的联系,以获得最大、连续的背涡流区为目的,因此不建议礁距大于2倍礁高,实际投礁中以1~2倍礁距为宜,可最大发挥多礁协同效应,这也是目前的礁体投放技术能基本达到的。礁距2~3倍礁高的单礁平均上升流区体积增长小于1~2倍礁高的增长,从上升流区的角度考虑,也以小于或等于2倍礁高间距为宜。

## 2.2 单位鱼礁选优

无论是诱集渔业资源还是通过生态调控增殖渔业资源的人工鱼礁建设项目,首先是要让鱼类感知礁体的存在,以及礁体存在所带来的环境变异和饵料条件等差异。鱼类对礁体的感知很大程度上是通过感知流场环境的变异(产生上升流和背涡流)而达成的,流场环境的变异导致的营养盐向上层水体的输运将增加礁区饵料生物的供给量,此外对于趋礁性鱼类还通过内部结构的复杂化来达到增大栖息地空间和附着生物量,从而提高诱集和增殖效果(图6)。

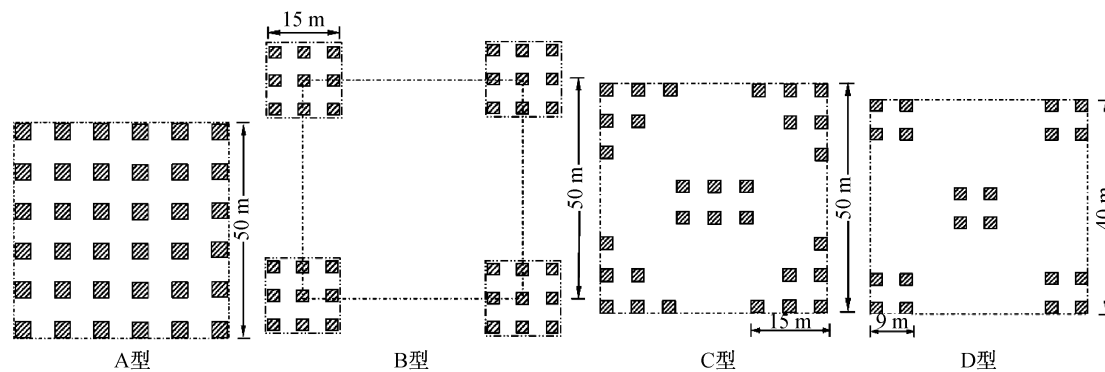


图 6 4种单位鱼礁组合示意图  
Fig. 6 Sketch of 4 types of artificial reef assemblage

鱼礁单体的投放一般总是以单位鱼礁形式投放,以达到提高鱼类感知效果和优化生态调控规模的目的。项目通过优化单位鱼礁配置而逐步形成了鱼礁群布局的理论,即单位鱼礁中鱼礁单体平均上升流与背涡流调控规模的优化问题。

以浙江三横山礁区建设中曾拟采用的A、B、C、D共4种单位鱼礁组合为例来分析比较不同单位鱼礁配置布设的差异和优劣。A、B、C、D4种单位鱼礁组合的礁体个数分别为36、36、30、20。其中,A和B型的礁体数相同,A型为单礁均匀分布,礁距在1.5倍礁高左右,B型为4个9礁组合的结合,9礁组合内的礁距为1倍礁高。C

型和D型组合的理念相同,C型为5个6礁组合的结合,D型为5个4礁组合的结合,6礁和4礁组合内的间距均为1倍礁高。

上述4种对称性的单位鱼礁组合在周期性潮流作用下,迎流角度总是在 $0 \sim 45^\circ$ 之间变换。以单位鱼礁对角线垂直迎流的方案( $45^\circ$ )比单位鱼礁边线垂直迎流( $0^\circ$ )的方案对流场环境的改造效果要好很多(图7)。不同迎流角度所造成的流场效应差异显著(背涡流  $F = 11.56, P < 0.001$ ; 上升流  $F = 102.93, P < 0.0001$ )。  $45^\circ$ 迎流的背涡流范围可达到 $0^\circ$ 的1.5倍以上,前者上升流区范围则更可达后者的3.0倍以上。由此可见,在

以往复流为主要潮流特征的海域,礁区主流轴的确定及其单位鱼礁布设的迎流角度对流场效应的影响重大。

不同迎流角度下的数据统一分析后,背涡流和上升流区的平均值见表 3 所示。4 种礁体组合的鱼礁单体背涡流区范围:  $vle_{70}$  为  $C > D > A > B$ ,  $vle_{80}$  为  $D > C > A > B$ ; 而上升流区范围:  $wge_{10}$  为  $D > C > A > B$ ,  $wge_{20}$  为  $D > A > C > B$ 。4 种组合流场效应差异经检验显著 (ANOVA, 背

涡流  $F = 5.85, P < 0.001$ ; 上升流  $F = 5.39, P < 0.002$ )。考虑到 4 种鱼礁类型的礁体个数分别为 36、36、30、20, 可知 A 型鱼礁组合的流场调控规模明显优于 B 型。而 D 型组合的礁体数最少, 除了  $vle_{70}$  值略小于 C 型外, 可以认为其单礁体综合调控流场的性能是最优的。这也是 4 种多礁 (>20 个) 组合比 9 礁组合的单礁背涡流和上升流规模要小的原因。

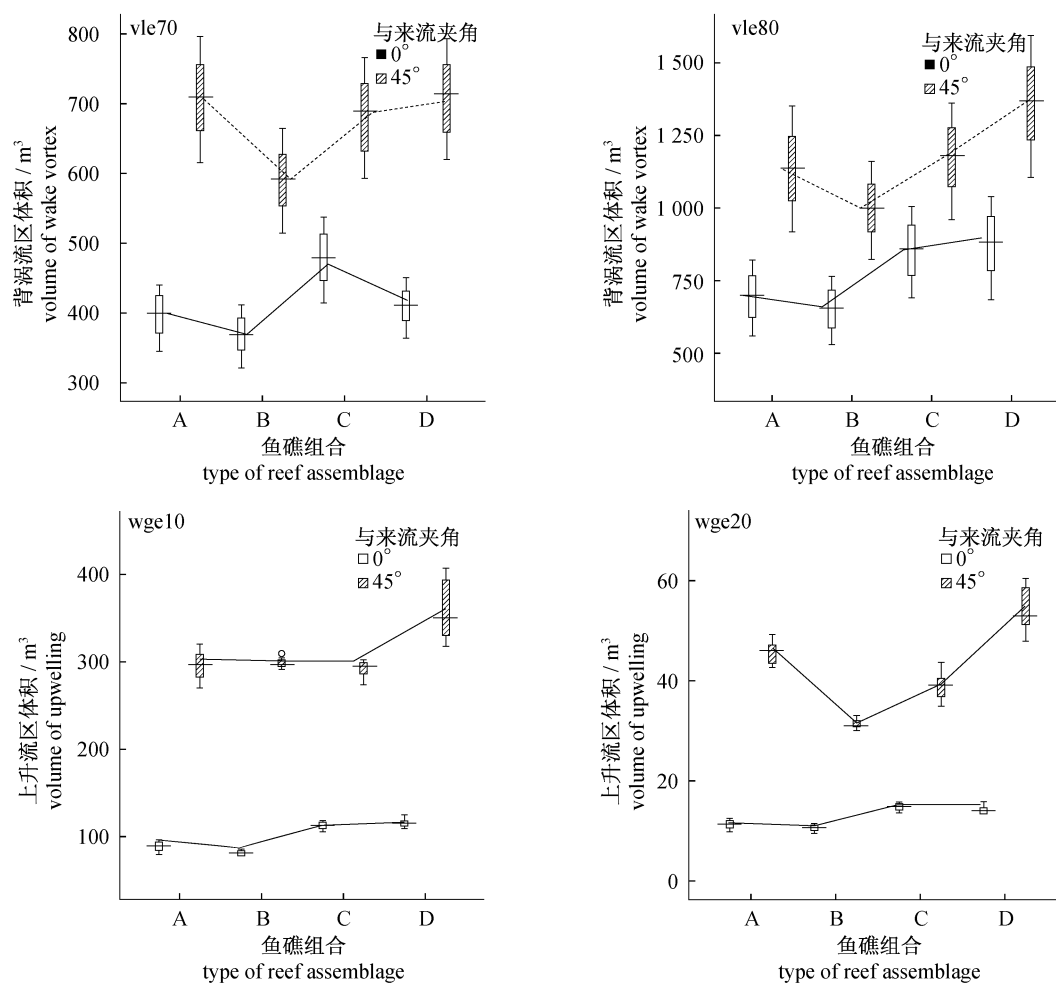


图 7 不同迎流角度下 4 型鱼礁组合的背涡流和上升流区体积

Fig. 7 Volume of wake vortex and upwelling from different inflow angles of 4 types of reef assemblage

表 3 4 型鱼礁组合背涡流区和上升流区体积 ( $m^3$ ) 平均值

Tab. 3 Average volume ( $m^3$ ) of wake vortex and upwelling of 4 types of reef assemblage

鱼礁类型 type	$vle_{70}$	$vle_{80}$	$wge_{10}$	$wge_{20}$
A	556.4	921.8	194.4	28.8
B	479.2	826.4	189.5	21.0
C	582.6	1 018.3	204.9	27.4
D	558.9	1 119.5	238.4	34.0

综上所述, D 型组合的流场效应最优, 其次是 C 型; A 型与 B 型礁体数量相同, A 型优于 B 型。因此, 从流场调控的角度来说, 选用  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  的回字型礁体时, 浙江三横山礁区的单位鱼礁选优结果是礁体数以 20 ~ 30 个左右为宜, 这样既能发挥礁体的协同效应, 保证定额投资下的礁区铺开面积, 又能使单位鱼礁的流场调控范围达到最大化。

### 3 讨论

本实验根据动水槽黑鲷幼鱼集鱼实验结果,给出了判定人工鱼礁流场效应,即背涡流区与上升流区规模大小的指标。在这个以满足相对流速比率为判据的流场空间体积指标下,利用数值水槽实验对比不同单位鱼礁组合方案的流场效应指标,提供了一种体系化的人工鱼礁组合流场效应优化方法。这一研究方法的前提是认可流场效应是人工鱼礁发挥其生态效应的要件之一,由流场效应表征生态效应,将流场调控范围作为生态调控范围的一个指标。人工鱼礁对渔业资源的生态效应究竟是诱集作用还是增殖作用,这一诱集与增殖之争<sup>[21]</sup>一直是热议的话题。从流场效用的角度来说,人工鱼礁的诱集与增殖作用兼而有之。背涡流所产生的缓流空间主要起到诱集底层鱼类的作用,但其礁体及其附近所提供的相对安全的空间,同样可起到增殖的作用;而上升流效应将底层营养盐向上层输运,主要起到促进海域初级生产力增长、从而增殖渔业资源的作用,但上升流存在区域的流速相对较大,同样有一定的诱集上层鱼类的作用。礁区的建设目的决定了鱼礁单体设计和单位鱼礁配置组合时优先考虑背涡流还是上升流。需要指出的是,礁体安全性(抗掩埋、抗倾覆等)与流场效应冲突时,以礁体的安全性为优先考虑。

人工鱼礁投放后将受周期性潮流作用,特别是具有明显往复流特征的礁区海域,鱼礁布设过程中需考虑礁区的主流轴方向,以指导鱼礁单体、单位鱼礁和鱼礁群组合的布设和配置,达到流场效应最大化的目的。目前的礁体投放技术无法保证鱼礁单体以精确角度迎流,但可基本满足单位鱼礁和鱼礁群组合配置的设计要求。单位鱼礁对角线垂直迎流在往复流占优的海域意义重大。

因水泵、水槽等实验条件的限制,本研究仅进行了3个来流速度下、特征礁作用下的集鱼实验,所选鱼种也仅为黑鲷幼鱼。本研究中所选用的流场效应指标是鱼类栖息处的流速相对来流速的比率,以相对的流速比率为判据,通过统计满足这一相对比率的空间大小作为流场效应指标。数值模拟计算的条件为原型礁体尺寸下,典型礁区水深条件下的单位鱼礁组合选优,因此选用了礁区大潮典型流速作为来流速度。即以弱流条件下的水槽集鱼实验得到满足相对流速比率的空间体积作为流

场效应指标,数值模拟研究实际海域强流作用下礁体及其组合产生的流场效应差异。今后,运用大功率水泵、在大型水槽中进行成鱼在强流速条件下的集鱼实验将完善本研究的结果。除了恋礁性的黑鲷之外,更多地开展其它不同类型鱼种的集鱼实验也十分必要,有助于流场效应指标的完善。

人工鱼礁水动力数值模拟研究经历了从二维<sup>[22]</sup>到三维<sup>[2-3,6-10,23]</sup>、静态(steady)模型<sup>[9-10]</sup>到非静态(时变,unsteady)模型<sup>[2-3,7-8,23]</sup>、应用 $k-\omega$ 和 $k-\varepsilon$ 等湍流模型<sup>[9-10,22-23]</sup>到大涡模拟湍流模型<sup>[7-8]</sup>的发展。日本对人工鱼礁水动力学的研究开展较早,但日本和美国等国家的人工鱼礁目前已向大型化、深水化发展,类似的小型鱼礁单体和单位鱼礁组合的水动力数值模拟选优研究开展的不多。选用大涡模拟(LES)湍流模型是本实验数值模拟研究工作的一大优势,LES湍流模型更符合海水流动均为湍流运动的特性,其模拟的因礁体存在所产生的涡旋运动随时间变化的规律更符合实际流动。其缺点是计算量巨大,一般需要采用并行计算,需要大型计算机集群或至少是新型工作站的硬件支持。

在单位鱼礁组合中,单体间距保持1~2倍礁高为宜,这是基于众多算例流场动态分析和满足判据的背涡流区、上升流区体积计算结果综合分析得出的结论,而1~2倍礁高间距是否可使礁体间保持较好的生物学协同作用则有待更多潜水观测研究成果的证实。分析算例中4种单位鱼礁组合的流场效应数值模拟结果,C型和D型组合所采用的5点式对称型配置是流场效应发挥较佳的方案。每个礁区的水深、流速和所选用礁体的情况均不相同,此结论是否具有普遍意义有待更深入的研究,但本研究至少提供了一种较为可行的方法。崔勇等<sup>[6]</sup>以背涡流和上升流的面积、长度和高度为指标,认为当两礁体布设间距为1.5倍礁体尺寸时,所产生的上升流高度达到最大值,背涡流效果也最好;当布设间距为1倍礁高时,其上升流的影响面积为最大;最佳布设间距应为礁体尺寸的1~1.5倍。郑延璇等<sup>[23]</sup>计算结果也显示,礁体纵向摆放时,当两礁体间距为1.5倍礁体尺寸时,上升流高度、上升流面积和两礁体后背涡流面积达到最大值。上述研究成果与本实验的结果均比较接近。此外,需要指出的是,单位鱼礁的间距应在单位鱼礁生态调控半径的2倍以上,以

避免 2 个单位鱼礁相互干扰,及降低整体的生态调控效应。

实验中所述 4 种类型单位鱼礁的礁体间距均在 1~2 倍礁高之间,实际投礁中无法完全按设计图准确投放,随着更多相对定位辅助设施和差分 GPS 等设备的应用,使分堆投放、保持 1~2 倍礁高的礁体间距成为可能。当然,研发更高精度的投礁方法和辅助设备来使鱼礁投放安全可靠、且达到设计目标,是今后急需开展的工作之一。

除了本实验中用背涡流区范围作为鱼礁投放后所形成的有异于背景流场的流场效应之外,将海水由于礁体存在而产生的湍流强度的变化及其空间范围作为流场效应指标之一也是本领域今后研究的重点。

感谢研究生王森和浙江省海洋水产研究所王伟定高工、虞宝存老师等在黑鲷幼鱼诱集水槽实验中所付出的辛勤劳动。

#### 参考文献:

- [1] 陈勇,于长清,张国胜,等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. 大连水产学院学报,2002,17(1): 64-69.
- [2] 刘洪生,马翔,章守宇,等. 人工鱼礁流场效应的模型实验[J]. 水产学报,2009,33(2):229-236.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 刘彦,关长涛,赵云鹏,等. 水流作用下星体型人工鱼礁二维流场 PIV 试验研究[J]. 水动力学研究与进展,2010,25(6):777-783.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 黄远东,赵树夫,姜剑伟等. 多孔方型人工鱼礁绕流的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5):15-18.
- [10] 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.
- [11] Lan C H, Chen C C, Hsui C Y. An approach to design spatial configuration of artificial reef ecosystem[J]. Ecological Engineering,2004,22(4-5):217-226.
- [12] Lan C H, Hsui C Y. The deployment of artificial reef ecosystem: Modelling, simulation and application [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2006,14(5):663-675.
- [13] Ranasinghe R, Turner I L, Symonds G. Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modelling study[J]. Coastal Engineering,2006,53:589-611.
- [14] Campbell M D, Rose K, Boswell K, et al. Individual-based modeling of an artificial reef fish community: Effects of habitat quantity and degree of refuge[J]. Ecological Modelling, 2011, 222 ( 23 - 24 ): 3895 - 3909.
- [15] 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.
- [16] 何大仁,施养明. 鱼礁模型对黑鲷的诱集效果[J]. 厦门大学学报:自然科学版,1995,34(4):653-658.
- [17] 张硕,孙满昌,陈勇. 人工鱼礁模型对大龙六线鱼和许氏平鲉幼鱼个体的诱集效果[J]. 大连水产学院学报,2008,23(1):13-19.
- [18] 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):711-717.
- [19] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [20] 许柳雄,刘健,张硕,等. 回字型人工鱼礁礁体设计及其稳定性计算[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(12):79-83.
- [21] Pickering H, Whitmarsh D. Artificial reefs and fisheries exploitation: a review of the 'attraction versus production' debate, the influence of design and its significance for policy [J]. Fisheries Research,1997,31(1-2):39-59.
- [22] 潘灵芝,林军,章守宇. 铅直二维定常流中人工鱼礁流场效应的数值实验[J]. 上海水产大学学报,2005,14(4):406-412.
- [23] 郑延璇,关长涛,宋协法. 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.



## Optimization study of artificial reef assemblage based on the numerical simulation of flow field

LIN Jun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shouyu<sup>1\*</sup>, YE Lingna<sup>1</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Marine Ecosystem and Environmental Laboratory, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. International Center for Marine Studies, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Based on the aggregation experiments of feature-reef trough, the occurrence frequency of *Sparus Macrocephalus* larvae around artificial fish reefs was studied with different structures and at different background velocities. The highest frequency of fish occurrence, space volume of flow velocity of  $< 0.7$  times and  $< 0.8$  times to background were considered as indexes of wake vortex range. The space volume with vertical upwelling velocity  $> 0.1$  time and  $> 0.2$  time of the upwind horizontal velocity was considered as the index of upwelling range. Based on Fluent with a turbulence model named LES (Large Eddy Simulation), a numerical trough was built and four unit-reef assemblages as an example were adopted to analyze the difference and merits of various assemblages' flow effect. The result showed it was appropriate to place 20 – 30 unit reefs (cube, 3 meters of side length) as a 5-point symmetric mode, and 1 – 2 times reef distance in reef area, as this could not only bring about synergistic effect of reefs, but also optimize the regulation range of unit-reef.

**Key words:** artificial reef assemblage; effects of flow; numerical simulation; optimization; large eddy simulation (LES)

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