

人工鱼礁建设对福建霞浦海域营养盐输运的影响

肖 荣, 杨 红

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 根据 2012 年—2013 年对霞浦人工鱼礁海域调查所获得的实验数据, 应用 CFD 软件, 对礁区投放的三类不同结构单位的鱼礁组合在非定常流作用下的三维流场进行了数值模拟试验, 分析了各鱼礁组合之间的流场差异, 并估算了诸营养盐垂直输送通量。研究表明: 三种鱼礁迎流面上升流最大高度为礁高的 2.27~3.73 倍, 上升流最大速度与来流速度之比为 0.40~0.72, 上升流平均速度与来流速度之比为 0.10~0.17; 计算域内单位鱼礁组合上升流平均速度为 10^{-2} cm/s 量级, 三种单位鱼礁组合区域营养盐垂直通量大小关系为: 方型鱼礁>船礁>梯形台鱼礁, 方型鱼礁区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平均垂直通量分别为 438.3 mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)、2212.5 mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)、7288.3 mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$), 鱼礁投放会改善该海域的水动力环境, 形成典型的上升流区, 海域初级生产力得以明显提升。

关键词: 人工鱼礁; 流场效应; 数值模拟; 上升流; 营养盐垂直输运通量

中图分类号: S953.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)02-0094-08

doi: 10.11759/hyxx20150331002

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, 产生上升流和背涡流。陈勇等^[1]研究表明, 上升流能够将海底的沉积物和营养盐带到表层, 加快营养物质循环速度, 提高海域的基础饵料水平, 从而提高海区初级生产力。人工鱼礁产生的上升流和背涡流的强度可表征鱼礁对水环境的物理作用的程度, 故可表征鱼礁生态效果的优劣。从海水化学要素分布来看, 上升流直接表现在营养盐的区域性高值, 因而, 海水中氮、磷、硅营养盐的分布成为上升流的化学指标之一^[2]。目前关于人工鱼礁的研究主要涉及生物和非生物因子^[3]、生产力^[4]、动植物区系时空变化^[5]、三大效益^[6]、选址及布局^[7]、休闲渔业^[8]、增殖资源^[9]等角度进行研究, 对于有关人工鱼礁建设产生的上升流对海域营养盐输运影响的研究鲜有报道^[10], 而弄清和掌握上升流强度及分布对营养盐含量及输运的影响, 对科学的估算和预报投礁海域的生产力和营养现状, 以及海洋环境保护, 综合利用和管理意义重大^[11]。本文通过对 2012 年、2013 年霞浦人工鱼礁投放海域的调查, 应用计算流体力学和水环境化学相关原理, 研究霞浦投礁区三类单位鱼礁组合上升流的分布及强度, 在数值模拟试验的基础上探讨鱼礁投放海域上升流的垂直速度大小, 估算诸营养盐垂直输送通量。

1 材料和方法

1.1 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, 在数值模拟计算区域里对不同鱼礁组合配置进行优化。本试验选用在福建近岸海域人工鱼礁区应用广泛、稳定性良好的中空结构梯形台礁体、中空结构方型礁体和船礁, 对其礁体组合进行模拟研究。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 中进行三维网格剖分, 采用三维非结构化四面体网格; 其次, 将剖分后的网格数据导入 FLUENT 软件, 在靠近礁体周围进行网格加密处理, 湍流模型选用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 模型, 数值模拟不同单位鱼礁组合的流场效应, 以上升流区的规模和强度为主要指标, 对不同类型

收稿日期: 2015-03-31; 修回日期: 2015-06-25

基金项目: 农业部 2012 年渔业资源保护和转产转业项目 (D8006128012)

[Foundation: The fishery resources protection and job transfer project in 2012 of Ministry of Agriculture (D8006128012)]

作者简介: 肖荣 (1988-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事海洋环境学研究, 电话: 18817775220, E-mail: 1791198674@qq.com; 杨红, 通信作者: E-mail: hyang@shou.edu.cn

鱼礁组合数值模拟结果进行分析, 据此选择确定适合海域鱼礁建设的配置组合方案。数值模拟技术采用三维双精度数(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), 流相采用常规液态水单项, 考虑重力作用的影响。数值计算区域来流方向设为流速入口(velocity-inlet), 计算区域出口设为自由出流条件(outflow), 计算区域的两个侧面和顶面均设为对称边界条件(symmetry); 计算区域的底面和鱼礁壁面均设为无滑移边界条件(wall)。

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 N-S 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^[12]。所用礁体模型的网格剖分精度可达数十厘米级, 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 万~400 万个左右。以梯形台鱼礁计算域为例, 其纵向中轴断面的网格划分情况见图 1。

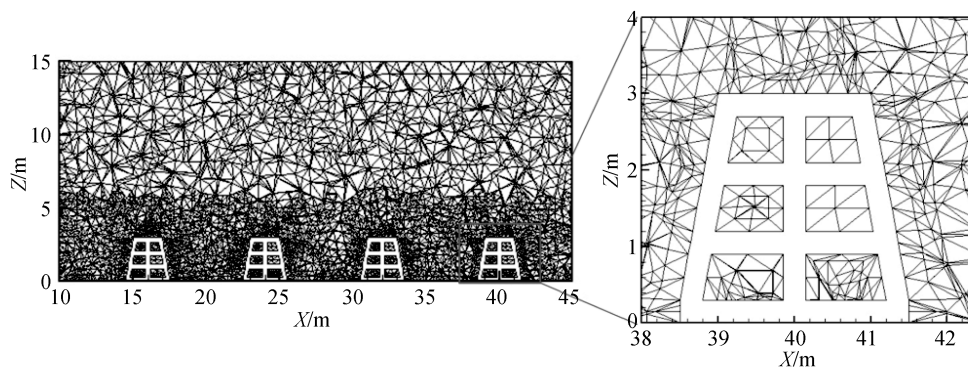


图 1 梯形台鱼礁纵向中轴断面网格剖面图

Fig. 1 The grid on the center longitudinal section of trapezoidal reef

1.2 数值实验

基于流场效应数值仿真研究人工鱼礁不同礁型组合情况下的上升流强度, 实验安排了三组数值, 其一用于判定不同鱼礁类型相同组合情况下上升流分布的差异, 其二用于比较典型钢筋砼结构礁型与船礁的流场效应差异, 从而判定三个鱼礁组之间上升流分布的差异, 为不同鱼礁区营养盐的垂直输运提供流场基础。以福建三沙根竹仔礁区建设中采用的 A、B、C 共三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 3 种单位鱼礁组合的礁体个数分别为 16、16、9, 组合鱼礁礁距均为 5m, 均匀分布。

16 礁组合: 分为中空结构梯形台鱼礁(A 型)和中空结构方型鱼礁(B 型)两组, 梯形台礁体外形尺寸为 3.0 m×3.0 m×3.0 m, 方型礁体外形尺寸为 3.0 m×3.0 m×3.0 m, 图 2 为 A、B、C3 种鱼礁模型的效果图。鱼礁的计算区域如图 3 所示。来流方向从左至右, 坐标原点位于计算域进口底面中点, 计算域进口至鱼

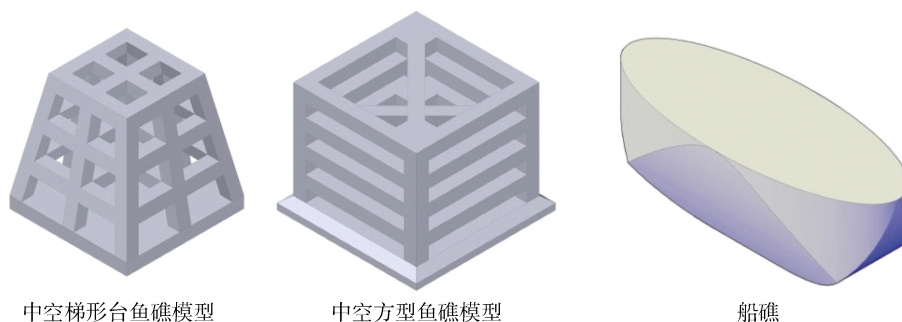
礁组中心距离为 28 m, 计算域的两侧面至鱼礁组中心的距离为 45 m, 整个计算域为 90 m×90 m×15 m。礁体材料为钢筋混凝土。

9 礁组合: 以废旧渔船(C 型)作为设置礁型, 鱼礁效果图见图 2, 计算域进口至船礁组中心距离为 20 m, 计算域的两侧面至船礁组中心的距离为 45 m, 整个计算域为 90 m×90 m×15 m。礁体材料为玻璃钢质。

三种单位鱼礁组合示意图见图 4, 数值计算区域水深取为福建近岸鱼礁投放区的典型水深 15 m, 来流速度取岛礁海域人工鱼礁区的典型大潮流速 0.5 m/s。

1.3 营养盐垂直通量的计算

水样中各项营养盐浓度测定方法分别是: NH_4^+ 的测定采用次溴酸盐氧化法; NO_2^- 测定采用盐酸萘乙二胺分光光度法; NO_3^- 的测定运用 Zn -Cd 还原法; PO_4^{3-} 测定采用磷钼蓝分光光度法; SiO_3^{2-} 测定使用硅钼黄法, 实验测定的具体步骤详见《海洋监测规范》海水分析部分^[13]。



中空梯形台鱼礁模型

中空方型鱼礁模型

船礁

图2 人工鱼礁模型效果图
Fig. 2 Rendering of reef model

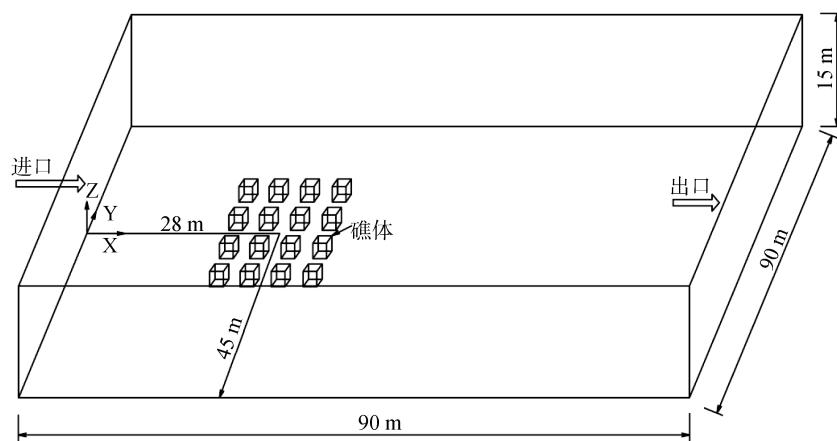


图3 鱼礁计算区域
Fig. 3 Reef model in the computational domain

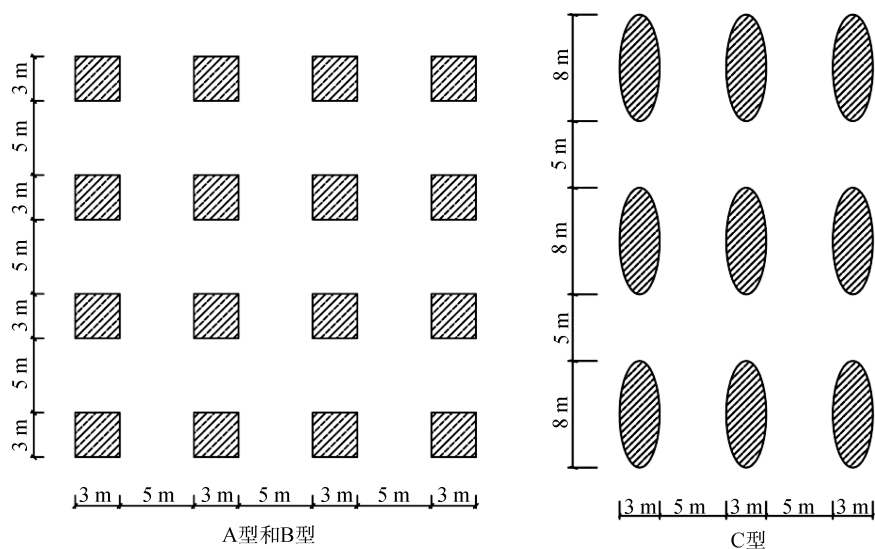


图4 3种单位鱼礁组合示意图
Fig. 4 Sketch of 3 types of artificial reef assemblages

营养盐的垂直通量指垂直方向营养盐自底层向表层在单位时间内通过单位面积的量,即底层水体进入表层水体的营养盐含量^[14]。

式中, α 为单位换算常数, C 值为研究海区营养盐平均浓度值($\mu\text{mol/mL}$); ω 为上升流上升速度。

$$f = \alpha C \omega \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 单位鱼礁组合流场效应

项目用海平面布置考虑施工投放的方便及礁群的互补、互助性,人工鱼礁平面布置为网格状分组穿插布置,除有利于增大礁体在礁区内的迎流面积外,更有利于在礁区内产生较多的涡流效应,将礁区内的不良物质带走,补充礁区内的营养物质,调节礁区内生态环境,所形成的上升流将海底深层的营养盐类带到光照充足的表水面,促进浮游生物的繁殖,从而提高海洋的初级生产力。三沙根竹仔礁区礁体的设计应充分考虑海区物种多样性的需要,鱼礁材料和鱼礁造型的选用和配置也应考虑生物附着率的高低,为其创造良好的栖息生长和繁衍场所。根据投礁区域地形、水深等条件,为了在有限的投资下增加鱼礁组的密集度,3种单位鱼礁组合均匀布置,纵向每个鱼礁组中心间距90 m,横向间距90 m,形成网格状错开布置。

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。

基于上述数值方法,模拟得到了3种单位鱼礁组合的三维绕流流场,图5为不同鱼礁组合 $y=0$ 、 $y=4$ (过礁体中心)纵向断面上流速分布图。取水流的垂向速度分量与来流速度 V_0 之比大于或等于5%的水域作为上升流区域^[15]。上升流规模用上升流的最大高度 L_s 与礁高 H 之比加以衡量,而上升流强度用最大上升流速 $V_{\max}$ 与来流速度 V_0 之比和上升流域内的上升流均值 V_{ave} 与来流速度 V_0 之比加以衡量。

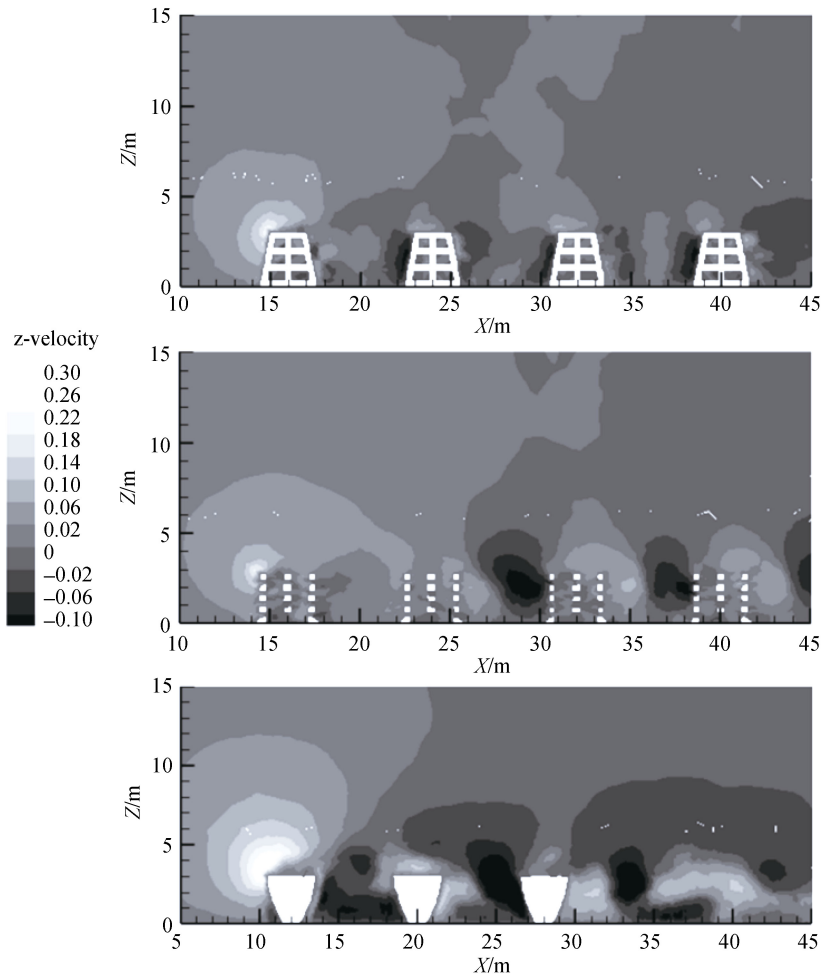


图5 鱼礁纵向断面上流速分布图

Fig. 5 Velocity contour on the center longitudinal section of the reef

本试验结果表明(表 1): 在相同来流速度下, 3 种单位鱼礁组合上升流高度为礁高的 2.3~3.7 倍, 略大于张硕等^[16]的研究结果(1.5~2.8 倍), 其原因可能是由于试验条件和尺度比不同所致。本试验在进行数值计算时是以鱼礁的实际尺寸来模拟, 采用的是投

礁海域实际流速, 相比张硕^[16]采用的礁型大得多, 而且鱼礁组合有交互效应产生, 因而产生的上升流礁高比较大。3 种单位鱼礁组合上升流最大速度与来流速度之比为 0.40~0.72, 上升流平均速度与来流速度之比为 0.10~0.17, 与黄远东等^[17]的研究结果基本吻合。

表 1 不同组合情况下鱼礁模型上升流规模和强度

Tab. 1 The distribution and intensity of the upwelling in different combinations of reefs

礁体模型 类型	礁体 数量	上升流规模和强度			计算域垂向平均速度 ($\times 10^{-3}$ cm/s)
		L_s/H	$V_{\max}/V_0$	V_{ave}/V_0	
梯形台鱼礁(A 型)	16	2.27	0.43	0.13	25.8
方型鱼礁(B 型)	16	2.41	0.40	0.10	45.5
船礁(C 型)	9	3.73	0.72	0.17	41.9

A 型、B 型单位鱼礁组合为透水礁, 其绝对迎流面积(扣除礁迎流面中空部分)较小, 而 C 型单位鱼礁组合为不透水礁, 其绝对迎流面面积较大, 因此, 同等程度下 A 型、B 型单位鱼礁组合上升流相对面积较 C 型要小。这也进一步佐证了鱼礁透水性能对其流场变化, 尤其是对上升流影响区域的大小有直接的关系。A 型、B 型鱼礁在不同来流方向上, 鱼礁的迎流面积相对变化不大, 而 C 型鱼礁长轴和短轴差异较大, 本文模拟的是长轴与来流方向垂直的情况, 此时 C 型鱼礁的绝对迎流面积达到最大, 随着涨落潮往复流的变化, C 型鱼礁迎流面积在短轴与来流方向垂直时与本文模拟的情况之间变化, 相对来说 C 型鱼礁的不同走向会对上升流产生明显的影响, 单位迎流面积的 C 型鱼礁产生的上升流相对面积随着来流方向的改变会产生明显的变化, 流场的稳定性不如 A 型、B 型鱼礁。

A 型鱼礁迎流面坡度的存在对自由来流的加速起到了一定的缓解作用(相对垂直放置的鱼礁迎流面), 也表明 A 型鱼礁的阻流作用要稍弱于 B 型鱼礁; 而 A 型鱼礁绕流的上升流平均速度与来流速度之比以及上升流最大速度与来流速度之比略大于 B 型鱼礁。

对于单位鱼礁组合来说, 上升流主要形成在第一排礁体的迎流面, 鱼礁组合之间的交互作用, 使得第二排礁体对第一排礁体产生影响, 由于 A 型、B 型鱼礁为透水礁, 水流通过第一排鱼礁时形成一个缓流区域, A 型、B 型鱼礁第二排礁体迎流面产生的上升流要比 C 型鱼礁明显, 随着水流通过鱼礁数量的增加, 鱼礁迎流面产生的上升流逐渐减少, 整个计算域上升流速度取决于每个鱼礁产生的上升流的综合效应。

2.2 营养盐输运

人工鱼礁的流场效应深刻影响着鱼礁的物理环境功能及生态效应的发挥。通常除碎浪带外, 沿岸海域水体的垂向运动相对水平运动而言往往可以忽略。如果在潮流主流轴方向上投放人工鱼礁, 可以生成很强的局部上升流, 其量值可以与水平流相当^[6], 从而促进表底层水体交换。通过这种水体的垂直交换功能, 上升流不断将底层、近底层低温、高盐富营养的海水涌升至表层, 导致温度、盐度格局重新分布, 使水文条件更适合于中、上层鱼类栖息和集群活动的要求。另外, 饵料浮游生物高密度区主要出现在上升流区, 这为中心渔场的形成创造了必要的条件^[18]。

人工鱼礁产生的上升流将底层水带入真光层的营养盐含量可通过上升流海域营养盐的垂直输送通量计算。对于 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^{2-} -Si: (1)式中单位换算常数分别取 $\alpha_N=12096$, $\alpha_P=26758$, $\alpha_{\text{Si}}=24270$ ^[19]; A 型、B 型、C 型单位鱼礁组合上升流平均流速 ω 取自 CFD 模拟值 25.8×10^{-3} 、 45.5×10^{-3} 、 41.9×10^{-3} cm/s, 东海上升流 ω 量级为 10^{-3} cm/s^[20-23]、台湾海峡上升流平均流速 ω 为 4.4×10^{-3} cm/s^[24], 本文是以单位鱼礁组合为研究对象, 流场调控距离取值为单位鱼礁组合中心间距 90 m, 根据人工鱼礁区周边水质、生物资源等实际调查的结果表明, 人工鱼礁区的影响范围可达到其建设规模的近 5~10 倍之多, 通常的面积范围在 $10^0 \sim 10^1$ m 量级的公顷数^[25], 实际海域由于鱼礁设置所产生的流场影响范围在水平尺度上一般不超过鱼礁规模的 50 倍^[26], 所以数值计算得到的计算域内上升流的平均速度要大于自然环境海域存在的上升流。营养盐浓度 C 取 2013 年 11 月调查站位诸营养盐含量平均值。

表 2 几个上升流海域诸营养盐的垂直输送通量比较

Tab. 2 The vertical transportation flux of nutrients in several upwelling areas

海区	营养盐含量平均值($\mu\text{mol/mL}$)			垂直输送通量($\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)			参考资料
	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	
A 型鱼礁上升流区	0.35	4.03	7.10	241.6	1257.7	4445.8	本文
B 型鱼礁上升流区	0.36	4.02	6.60	438.3	2212.5	7288.3	
C 型鱼礁上升流区	0.35	4.49	7.03	392.4	2275.6	7148.9	
台湾海峡中北部 近岸上升流	0.2	4.19	2.83	23.6	223	302	陈水土等 ^[20]
闽南-台湾浅滩渔 场上升流区	0.38	5.63	8.42	13.2	88.5	264	吴丽云等 ^[27]
舟山和渔山渔 场上升流区	1.22	11.75	23.82	38~189	165~824	669~3348	王桂云等 ^[28]
浙江沿岸上升流区	—	6.8~16.0	—	—	33.87~2143.7	—	雷腾飞 ^[14]
粤东沿岸上升流区	—	—	—	46.5	—	—	韩舞鹰等 ^[29]
长江口沿岸上升流区	—	—	—	10.03~50.16	—	—	杨红等 ^[30]

诸营养盐垂直输送通量估算结果列于表 2。梯形台鱼礁区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平均垂直通量分别为 241.6、1257.7、4445.8 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ；方型鱼礁区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平均垂直通量分别为 438.3、2212.5、7288.3 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ；船礁区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平均垂直通量分别为 392.4、2275.6、7148.9 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。鱼礁区营养盐的垂直输送通量估算结果高于舟山和渔山渔场上升流区营养盐的垂直通量，主要由于鱼礁的投放形成了典型的上升流区，数值模拟对象为单位鱼礁组合，计算边界的设置代表了各鱼礁区核心影响范围，水平尺度上小于鱼礁流场调控的范围。

3 结论

基于 ANSYS FLUENT12.1 平台，数值模拟了来流速度为 0.5m/s 下的 A 型、B 型、C 型单位鱼礁组合周围的三维流场。通过分析过礁体中心的铅垂平面上速度分布，得出：(1)A 型、B 型单位鱼礁组合上升流的最大高度与礁高之比为 2.27~2.41、上升流最大速度与来流速度的比约为 0.40~0.43，上升流区域平均速度与来流速度的比约为 0.10~0.13，C 型鱼礁最大高度与礁高之比为 3.73、上升流最大速度与来流速度的比约为 0.72，上升流区域平均速度与来流速度的比约为 0.17；(2)A 型、B 型鱼礁外形尺寸相当、具有类似的空方比，采用了相同的布设方案，单位鱼礁组合产生的上升流规模和强度差异不大；(3)C 型单位鱼礁组合为不透水礁，其绝对迎流面面积较

大，因此，同等程度下 C 型单位鱼礁组合上升流相对面积较 A 型、B 型要大；(4)单位鱼礁组合流场效应主要取决于礁体数量、礁体空方比、礁体迎流面积。

计算域内单位鱼礁组合上升流平均速度为 10^{-2}cm/s 量级，相比自然海域上升流的速度要高，主要由于本文数值模拟试验以单位鱼礁组合为基本研究对象，水平尺度范围为单位鱼礁组合中心间距 (90m)，实际海域单位鱼礁组合流场调控范围可以达到更大距离。通过对营养盐的垂直输运通量估算可知，不管投放何种鱼礁都能产生明显的上升流，营养盐通量相比沿岸上升流处于较高的水平，鱼礁投放会改善该海域的水动力环境，形成典型的上升流区，海域初级生产力得以明显提升。今后，可以在单位鱼礁组合的基础上来研究整个投礁海域生态调控范围内的流场效应，评估礁区海域营养盐的分布情况及水质营养水平，从定量的角度研究礁区营养盐的垂直输送通量。

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. Chen Yong, Yu Changqing, Zhang Guosheng, et al. The environmental function and fish gather effect of artificial reefs[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2002, 17 (1): 64-69.
- [2] Hung T C, Han B C, Hsu D S. Chemical and biomass studies: (2) Biological activities in upwelling off the southwestern coast of Taiwan including the Penghe area[J]. Acta Oceanographica Taiwanica, 1987, (18): 62-74.
- [3] Haroun R J, Gomez M, Hernandez J J, et al. Environ-

- ment description of an artificial reef site in Gran Canaria (Canary Islands, Spain) prior to reef placement [J]. Bulletin of Marine Science, 1994, 5: 932-938.
- [4] DeMartini E E, Barnett A M, Johnson T D, et al. Growth and production estimates for biomass-dominant fishes on a southern California artificial reef [J]. Bulletin of Marine Science, 1994, 55: 484-500.
- [5] Bortone S A, Van Tassell J, Brito A, et al. Enhancement of the nearshore fish assemblage in the Canary Islands with artificial habitats [J]. Bulletin of Marine Science, 1994, 55: 602-608.
- [6] 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.
Lin Jun, Zhang Shouyu. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(3): 257-262.
- [7] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. 海洋学研究, 2006, 24(4): 69-76.
Zhao Haitao, Zhang Yifei, Hao Chunling, et al. Siting and designing of artificial reefs[J]. Journal Of Marine Sciences, 2006, 24(4): 69-76.
- [8] 王伟定, 徐汉祥, 潘国良, 等. 浙江沿岸休闲生态型人工鱼礁建设现状与展望[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2007, 26(1): 22-27.
Wan Weiding, Xu Hanxiang, Pan Guoliang, et al. Current situation and prospect of recreational ecotypic artificial reef construction in Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science), 2007, 26(1): 22-27.
- [9] 段玉彤, 李志超. 利用人工鱼礁增值河北渔业资源的探讨[J]. 河北渔业, 2007, 4: 43-44.
Duan Yutong, Li Zhichao. Discussion on fishery resources multiplication of artificial in Hebei reefs[J]. Hebei Fisheries, 2007, 4: 43-44.
- [10] 章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 等. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化[J]. 水产学报, 2006, 30(4): 475-480.
Zhang Shouyu, Zhang Huanjun, Jiao Junpeng, et al. Change of ecological environment of artificial reef waters in Haizhou Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(4): 475-480.
- [11] 王珊珊, 曹志敏, 蓝东兆, 等. 福建省兴化湾湾口海域营养盐的分布状况及其影响因素[J]. 环境化学, 2006, 25(2): 234-235.
Wang Shanshan, Cao Zhimin, Lan Dongzhao, et al. The nutrients distribution and its influencing factors in Fujian Xinghua Bay[J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(2): 234-235.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fjun. Computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [13] GB17387. 4-2007, 海洋监测规范[S].
GB17387. 4-2007, The specification for marine monitoring[S].
- [14] 雷鹏飞. 浙江近海上升流速度及其营养盐通量计算[J]. 海洋湖沼通报, 1984, (2): 22-26.
Lei Pengfei. Evaluation of upwelling rate and the nutrient flux in the zone of Zhejiang[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1984, (2): 22-26.
- [15] 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.
Huang Yuandong, Jiang Jianwei, Zhao Shufu. Study on numerical model of water flows past a square artificial reef[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(3): 1-3.
- [16] 张硕, 孙满昌, 陈勇. 不同高度混凝土模型礁上升流特性的定量研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(5): 353-358.
Zhang Shuo, Sun Manchang, Chen Yong. Quantitative analysis of upwelling current features of a artificial concrete reef with different height[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(5): 353-358.
- [17] 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.
Huang Yuandong, Zhao Shufu, Jiang Jianwei, et al. Study on numerical simulation of water flow past a porous square artificial reef[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(5): 15-18.
- [18] 蔡德华. 汕头-台湾浅滩渔场渔业自然条件及上升流区特征[J]. 水产科技, 2007(3): 22-23.
Cai Dehua. Fishery natural conditions and characteristics of upwelling region in Shantou-Taiwan Bank[J]. Fisheries Technology, 2007(3): 22-23.
- [19] 陈水土, 阮五崎. 台湾海峡上升流区氮、磷、硅的化学特性及输送通量估算[J]. 海洋学报, 1996, 18(3): 36-44.
Chen Shuitu, Ruan Wuqi. The chemical characteristics and transportation flux estimation of nitrogen, phosphorus and silicon in Taiwan strait upwelling area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(3): 36-44.
- [20] 袁耀初. 东海三维海流的一个预报模式-黑潮调查研究论文选(五)[R]. 海洋出版社, 1993, 311-323.
Yuan Yaochu. A three-dimensional current of the East China Sea forecast model—Kuroshio survey research papers election(五)[R]. Ocean Press, 1993, 311-323.
- [21] 罗义勇. 东海沿岸上升流的数值计算[J]. 海洋湖沼通报, 1998, 3: 1-5.
Luo Yiyong. Numerical modelling of upwelling in coastal areas of the East China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1998, 3: 1-5.
- [22] 罗义勇, 俞光耀. 风和台湾暖流引起东海沿岸上升流数值计算[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(4): 536-542.
Luo Yiyong, Yu Guangyao. Numerical studies of wind and two-driven upwelling in coastal areas of the East China Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998, 28(4): 536-542.
- [23] 朱建荣. 夏季长江口外水下河谷西侧上升流产生的

- 动力机制[J]. 科学通报, 2003, 48(23): 2488-2492.
Zhu Jianrong. The produce dynamic mechanism of summer upwelling on the west side of the Yangtze river estuary underwater valley[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(23): 2488-2492.
- [24] 陈水土, 阮五琦. 台湾海峡中北部夏季溶解氧饱和度分布与上升流的关系[J]. 台湾海峡, 1991, 10(1): 16-24.
Chen Shuitu, Ruan Wuqi. Summer upwelling and saturation dissolved oxygen distribution in the Central and Northern Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1991, 10(1): 16-24.
- [25] 中国水产科学研究院南海水产研究所. 中国人工鱼礁的理论与实践[M]. 广州: 广东科技出版社, 2005.
South China sea fisheries research institute, Chinese academy of fishery sciences. Theory and practice of Chinese artificial reefs[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2005.
- [26] 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.
Pang Lingzhi, Lin Jun, Zhang Shouyu. A numerical experiment of the effects of artificial reef on vertical 2-dimensional steady flow field[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2005, 14(4): 406-412.
- [27] 吴丽云, 阮五琦. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区营养盐的研究. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991, 169-178.
Wu Liyun, Ruan Wuqi. Study on the nutrient in the upwelling region in Minnan-Taiwan Bank fishing ground, Study of the ecosystems in the upwelling region in Minnan-Taiwan Bank fishing ground[M]. Beijing: Science Press, 1991, 169-178.
- [28] 王桂云. 东海海洋化学要素含量及其分布. 黑潮调查研究论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1987, 267-284.
Wang Guiyun. The content and distribution of chemical elements in the East China Sea, Kuroshio survey research papers election[C]. Beijing: Ocean Press, 1987, 267-284.
- [29] 韩舞鹰, 马克美. 粤东沿岸上升流的研究[J]. 海洋学报, 1988, 10(1): 52-59.
Han Wuying, Ma Kemei. Research on the coastal upwelling of Guangdong[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(1): 52-59.
- [30] 杨红, 李纲, 金成法. 长江口及邻近海域磷酸盐的再生和垂直通量[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(2): 162-167.
Yang Hong, Li Gang, Jin Chengfa. The regeneration and vertical of phosphate in the Yangtze River Estuary and its adjacent area[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(2): 162-167.

Influence of artificial reef construction on the transportation of nutrients in the off-shore area of Xiapu, Fujian

XIAO Rong, YANG Hong

(College of Marine Sciences, Shang Hai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Received: Mar., 31, 2015

Key words: artificial reef; effect of flow field; numerical simulation; upwelling; the vertical transportation flux of nutrients

Abstract: According to research performed in Xiapu, Fujian in 2012 and 2013, computational fluid dynamics was used to simulate the water flow pattern around three different artificial reefs in terms of unsteady flow effects, and the scale and intensity of the upwelling around the artificial reefs were simulated. In addition, the differences in flow characteristics were summarized, and the vertical transport fluxes of various nutrients were estimated. The results showed that the maximum height of the upwellings was approximately 2.27–3.73 times the reef height, and the maximum and average velocities of upwelling were approximately 0.40–0.72 and 0.10–0.17 times the incoming velocity. The upwelling velocity in a computational domain of three types of artificial reef assemblages was 10^{-2} cm/s, and the magnitude of the relationship of nutrient vertical fluxes in different assemblages was square reefs > ship reefs > trapezoidal reefs. The average vertical fluxes of PO_4^{3-} -P, NO_3^- -N, and SiO_3^{2-} -Si were 438.3 mg/(m²·d), 2212.5 mg/(m²·d), and 7288.3 mg/(m²·d) in the square reef area. Setting artificial reefs could improve the hydrodynamic environment and form typical upwelling areas, significantly improving primary productivity.

(本文编辑: 康亦兼)