

同透空率下多孔人工鱼礁流场效应的 三维数值模拟研究

庞运禧, 李芳成, 李尧

(广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 通过计算流体动力学技术(CFD),分别模拟了非定常流作用下透空率为20%的箱型、梯形台、三棱体多孔空心单体鱼礁及组合鱼礁在6种来流速度、3种礁体布设工况下的人工鱼礁三维流场。模拟计算结果表明:水流遇到礁体迎流面抬升形成上升流,同种模拟工况下,同类型的多孔空心人工鱼礁以90°摆放时形成的上升流和背涡流规模强度达到最大,30°摆放时次之;单礁体情况下箱型鱼礁产生的流场效应更优。通过分析不同礁距下的九礁组合流场差异,上升流规模强度随着礁距的增加呈现出先增大后减小的趋势,1倍礁体距离下的鱼礁组合能产生更好的流场调控效应,并且箱型鱼礁组合和三棱体鱼礁组合的第一组礁体背面出现双涡旋现象,而梯形台鱼礁组合只存在一个涡旋,同种工况下,箱型鱼礁和三棱体鱼礁组合能更好地发挥鱼礁的集鱼、饵料效应和环境修复功能。

关键词: 人工鱼礁; 鱼礁组合; 数值模拟, 上升流; 背涡流

中图分类号: S953.1; TV13

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0133-09

Study on three-dimensional numerical simulation of flow field effect of multi-aperture artificial fish reef under identical penetration rate

PANG Yunxi, LI Fangcheng, LI Yao

(School of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Through computational fluid dynamics(CFD) technology, under the unsteady flow, the artificial fish reef three-dimensional fluid fields in six inflow velocities and three kinds of spacing for reef layout were simulated. The artificial fish reef were composed by cube type, trapezoid platform, triangular prism porous hollow monomer fish reefs and combined fish reefs with 20% of penetration rate. The simulated results showed that, the water flow was elevated and formed upwelling current when encountering the upstream which faced to the reef. Under the identical simulated condition, the formed scales and strengths of upwelling and wake the vortex region reached the maximum when the porous hollow artificial reefs of the same type were placed at the 90 degree, while was the second large when the reefs were placed at the 30 degree; the flow field effect generated by cube type fish reefs in case of monomer fish reef was optimal. The analysis of difference in flow fields of combination of nine reefs under different kinds of spacing of reef suggested that, the scale and strength of upwelling increased at first then decreased with the increasing spacing, the reef combination at one time of reef spacing can produce better flow field regulating effect, and binary vortices occurred on the reverse sides of the first group of reefs of cube type and triangular prism reef combinations. Only one vortex occurred in trapezoid platform reef combination. Under identical working condition, cube type and triangular prism reef combinations can give better effects to the fish collection and bait effects as well as the environmental remediation function of the reefs.

Key words: artificial fish reef; fish reef combination; numerical simulation; upwelling current; wake vortex current

收稿日期:2016-11-17; 修回日期:2016-12-11

基金项目:广东省科技厅资助项目(2010B030600007、2007B03020006)

作者简介:庞运禧(1992-),男,广西玉林人,硕士,研究方向为河口、海岸动力学。

通讯作者:李芳成(1962-),男,黑龙江大庆人,博士,教授,主要从事海洋工程研究工作。

1 研究背景

人工鱼礁具有集鱼和饵料效应,为渔业资源带来生态效益,而渔业资源的生态效益在一定程度上取决于人工鱼礁流场效应。人工鱼礁流场属于典型的钝体绕流问题,包含有复杂的非线性过程,如流体分离和漩涡演化,所以很难得到此类问题的解析解。目前国内外对人工鱼礁的研究方法主要以现场调查和水槽、风洞试验手段分析人工鱼礁的集鱼、避敌、繁殖等效果和其周围的生态效应。张硕等^[1-2]采用水槽试验对6种混凝土人工鱼礁模型导致的上升流和背涡流规模特性进行了研究和定量分析;此外还有粒子图像测速试验和数值模拟试验,刘彦等^[3]、关长涛等^[4]采用粒子图像测速方法对星体型和复合M型人工鱼礁周围的流场特征规律进行分析;姜昭阳等^[5-6]利用数值模拟方法对单体人工鱼礁进行的水动力学特性和流场效应进行分析,并与PIV试验相结合,两者的试验结果基本一致,表明了数值模拟能较好地反映人工鱼礁导致的上升流和背涡流特性规律。此外黄远东等^[7-8]、何文荣等^[9]、邓济通等^[10]、刘洪生等^[11]分别对实心、空心礁型及双鱼礁组合进行了数值模拟分析研究。上述学者的研究大多侧重于单一类型的单体实心以及部分镂空型鱼礁

流场模拟,关于组合鱼礁的研究则集中在双鱼礁组合或四礁体组合,对规模较大的九礁组合鱼礁下的流场分布研究较少。因此,为了能更准确地得到不同礁体模型的人工鱼礁流场特征分布,本研究采用透空率为20%情况下的礁体模型,基于计算流体力学技术模拟不同工况下的人工鱼礁三维绕流问题,分析对比了同透空率下3种常见多孔空心鱼礁(箱型、梯形台、三棱体)单礁体和九礁组合鱼礁在不同礁距情况下的流体规律和流场特征分布,得出较优的人工鱼礁布设礁距和摆放方式,为人工鱼礁实际投放提供参考。

2 礁体结构和模型

采用箱型、梯形台、三棱体3种多孔空心人工鱼礁,礁体底边边长为3 m,壁厚为0.15 m,高度为3 m,鱼礁迎流面透空率为20%,如图1。计算域进口面至鱼礁迎流面距离为5倍礁体长度,计算域出口面至鱼礁背流面距离为15倍礁体长度,计算域两侧固壁面至礁体中心距离均为5.5倍礁体宽度,计算域高度为10倍礁体高度,如图2所示。单礁体情况下,3种鱼礁(迎流面)分别采用30°、45°、90°摆放角度,对于组合礁体,礁体间距分别设定为0.5、1.0、1.5倍礁体长度。

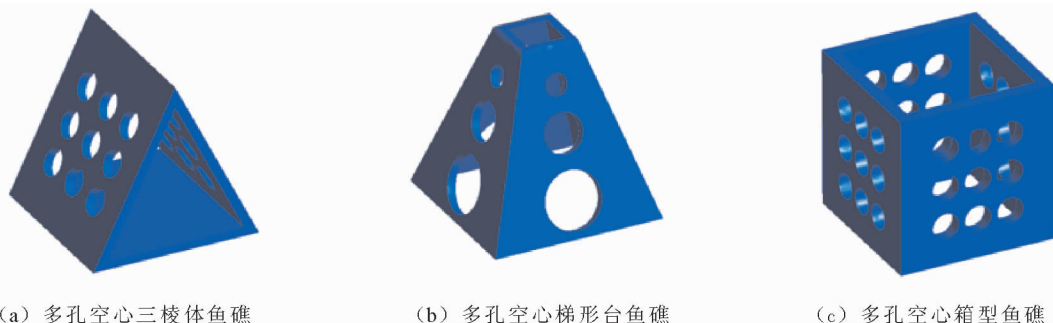


图1 人工鱼礁模型效果图

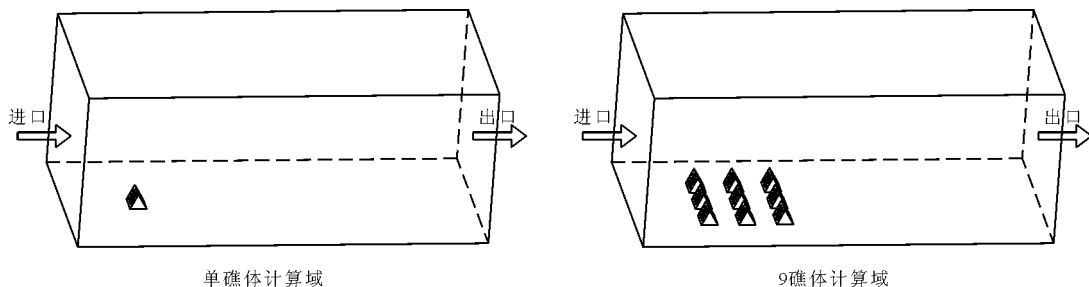


图2 人工鱼礁模型计算域

流动分离和涡旋演化等非定常流动过程是人工鱼礁绕流问题的主要研究对象,为得到绕流规律和流场时间平均特性,控制方程采用定常、不可压流动

下的连续方程和N-S方程,湍流模型采用RNG模型,压力与速度耦合采用SIMPLEC算法,方程离散为QUICK格式。

考虑到人工鱼礁的实际投放情况, 所在海域最大流速一般以不超过 0.8 m/s 为宜^[12], 采用 0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8 m/s 等 6 种来流速度的工况下进行模拟分析, 计算域入口和出口条件分别采用速度入口条件和自由出流条件, 计算域底部和礁体壁面采用无滑移壁面边界条件, 计算域顶部和两侧面均采用对称边界条件。由于鱼礁周围包含有较复杂的流动过程, 对鱼礁及礁体向外延伸计算域部分的网格进行加密。

3 模拟结果分析

通过建立 3 种多孔鱼礁模型, 模拟得到了不同工况下的三维绕流流场。图 3 为礁体纵向中轴断面 (XOZ) 速度矢量分布图, 图 4 是礁体横向 $Z = 1.5$ 水

平面速度矢量图, 图 5 是礁体流场效应参数柱状图, 图 6 为九礁组合纵向中轴断面 (XOZ) 速度矢量图, 图 7 是九礁组合水平面 $Z = 1.5$ 速度矢量图。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^[7]; 取水流 X 方向上速度绝对值小于 70% 来流速度 V_0 的水域作为背涡流区域^[13-14]。

上升流强度采用最大上升流速度 V_{max} 和上升流平均速度 V_{ave} 与来流速度之比衡量; 采用上升流最大高度 H_{max} 与礁体高度之比表征上升流规模大小; 采用背涡流区最大长度 L_{max} 、最大宽度 W_{max} 、最大高度 h_{max} 衡量背涡流区规模大小, 不考虑流速急变的空间范围。3 种多孔单体鱼礁不同摆放角度时的上升流及背涡流规模强度见表 1。

表 1 同透空率、不同摆放角度下单礁体模型上升流、背涡流的规模强度

鱼礁类型	摆放角度 / (°)	V_{max}/V_0	V_{ave}/V_0	$H_{max}/$ 礁高	$L_{max}/$ 礁长	$W_{max}/$ 礁宽	$H_{max}/$ 礁高
箱型鱼礁	30°	0.735	0.155	3.0	3.6	2.3	1.5
	45°	0.646	0.127	3.0	3.2	2.5	1.2
	90°	0.803	0.170	3.0	4.5	2.3	1.7
梯形台鱼礁	30°	0.763	0.181	2.5	2.9	1.6	1.7
	45°	0.685	0.174	2.4	2.1	1.5	1.6
	90°	0.845	0.187	2.4	3.4	1.5	2.1
三棱体鱼礁	30°	0.750	0.172	2.7	2.8	1.8	1.4
	45°	0.661	0.168	2.5	2.4	1.7	1.2
	90°	0.828	0.177	2.8	3.2	1.7	1.6

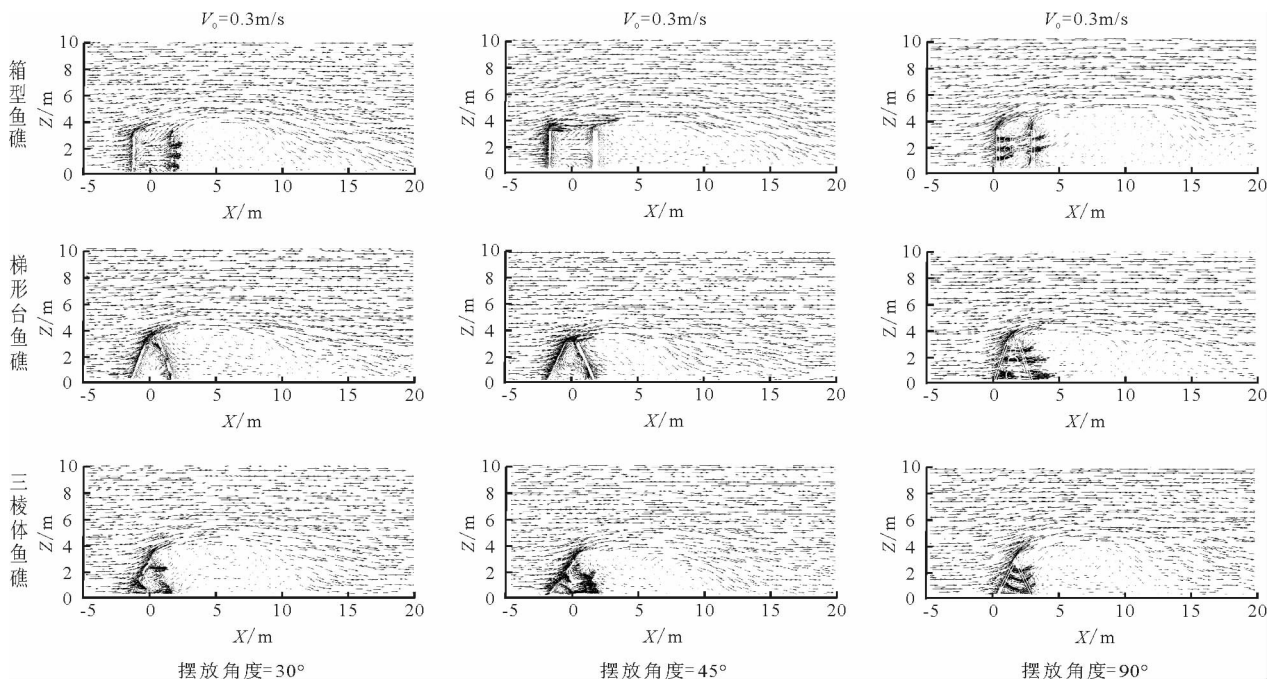


图 3 礁体纵向中轴断面 (XOZ) 速度矢量分布图

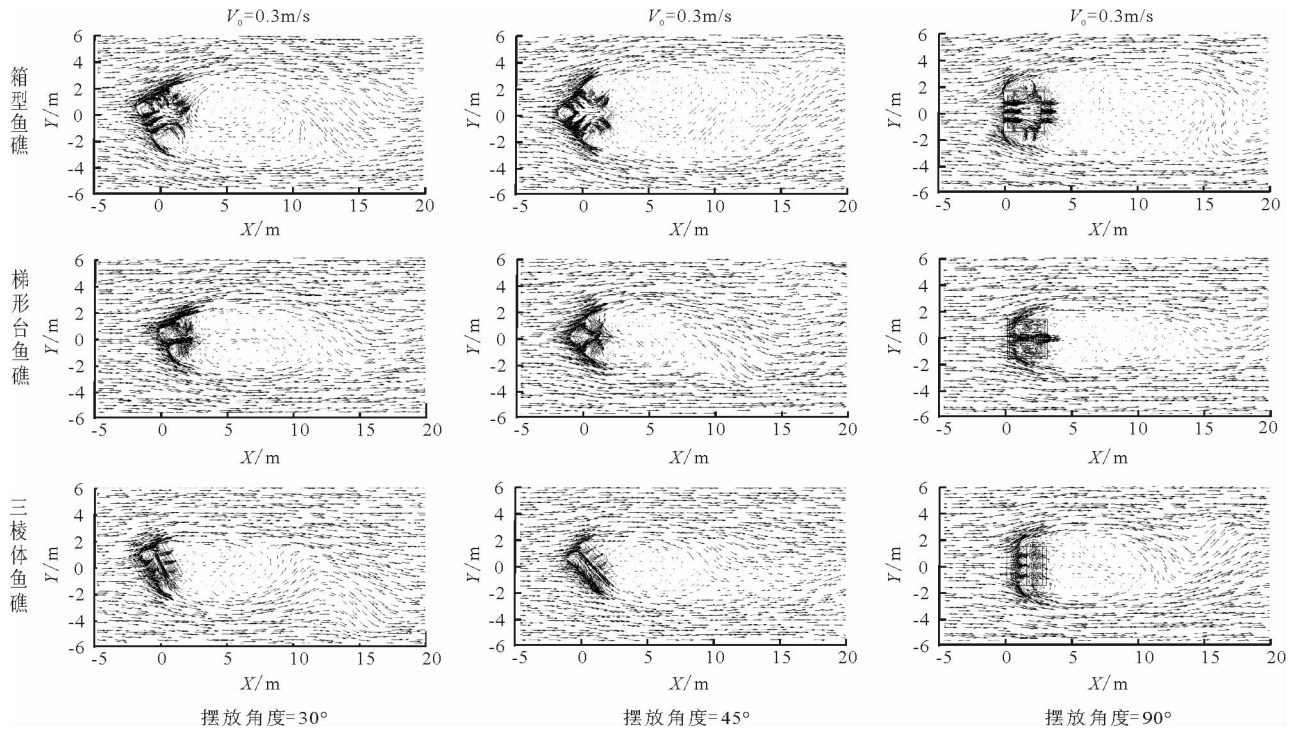


图4 礁体横向 $Z = 1.5$ 水平面速度矢量图

3.1 单体鱼礁流场分析

通过分析图3、图4得出,水流运动至礁体迎流面,水体向上抬升形成上升流,由于流体分离,水流在礁体顶部和两侧流速减缓并脱落形成小漩涡(缓流区),在礁体后部产生一大涡旋形成背涡流区;而一部分水体通过礁体表面圆孔进入礁体内部,形成小漩涡并流出。由表1可知,同类型鱼礁中,箱型人工鱼礁上升流强度以 90° 摆放时达到最大,最大上升流速度约为来流速度的82.8%,上升流平均速度约为来流速度的17.7%;3种摆放角度下所产生的上升流规模基本相同,为3倍礁体高度且几乎不随来流速度的大小而改变。通过分析箱型鱼礁纵向中轴断面速度矢量分布,由于流体分离,绕流在礁体后部形成速度很小的背涡流区,内部存在一个顺时针大涡结构,而穿过礁体内部的水流受到礁体壁面作用,在礁体底部和上方出口区域形成较强的涡流,来流流出礁体内部过程中一部分水体脱落,在礁体背部壁面附近形成小漩涡并融入礁体后方的背涡区中。箱型鱼礁 90° 摆放时所产生的背涡流区长度和高度达到最大,分别为礁体长度的4.5倍和礁体高度的1.7倍,3种摆放角度下形成的背涡流区结构基本保持不变,不同的是涡心位置和背涡流区边界层产生的小涡旋数量。在人工船礁的数值试验中,虞聪达等^[15]研究发现不同工况下背涡流区长度与礁体高度的比值为4.5~13.0;刘同渝^[16]对不同类

型鱼礁模型进行了水槽和风洞实验,其结果显示鱼礁背部形成涡流区,影响范围为礁体长度的2~3倍,涡流在靠近鱼礁部分相对于其他区域强度更大。这些研究结果与本实验结果基本相符合。通过箱型鱼礁 $Z = 1.5$ 水平截面速度矢量分布看出,来流经过礁体形成绕流,在礁体背流面产生了复杂的双涡结构,这与TANEDA在低雷诺数时通过流体显示技术得到圆柱绕流产生圆柱尾涡(双涡)的实验结果吻合,而TANEDA的实验结论仍是目前验证算法准确性的标准之一。从箱型鱼礁水平矢量图中明显发现 45° 摆放角度形成的背涡流区宽度达到最大,为2.5倍礁体宽度。而单礁体下的梯形台和三棱体人工鱼礁产生的上升流、背涡流强度和规模分布与多孔箱型人工鱼礁类似。

由表1、图3可知, 90° 摆放时多孔箱型鱼礁上升流区的最大高度约为礁体高度的3倍,多孔梯形台和三棱体鱼礁上升流区的最大高度分别约为礁体高度的2.4、2.8倍,由于多孔梯形台和三棱体鱼礁礁体迎流面相对于垂直放置的多孔箱型鱼礁存在一定的坡度,对自由来流会产生一定程度上的阻缓作用,多孔箱型鱼礁的阻流作用要强于梯形台和三棱体鱼礁,因此同透空率下(三者均为20%)多孔箱型鱼礁上升流区最大高度要比后两者更大一些。 90° 摆放下多孔梯形台鱼礁的上升流区最大速度约为来流速度的84.5%,多孔箱型和三棱体鱼礁上升流区

最大速度分别约为来流速度的80.3%、82.8%,多孔梯形台鱼礁上升流区最大速度要稍大于箱型和三棱体鱼礁。多孔梯形台、三棱体和箱型鱼礁模型的上升流区平均速度分别约为来流速度的18.7%、17.7%、17.0%,因此同透空率和相同工况下,多孔梯形台鱼礁产生的上升流规模较箱型、三棱体鱼礁要小,而多孔梯形台鱼礁的上升流强度则要比后两者的大。3种鱼礁在30°和45°摆放下的上升流规模强度特征与90°的类似。

通过分析表1、图3、图4可得,30°摆放下多孔箱型鱼礁产生的背涡流区最大长度约为礁体长度的3.6倍,背涡流区最大宽度约为礁体宽度的2.3倍;多孔梯形台、三棱体鱼礁的背涡流区最大长度分别约为礁体长度的2.9、2.8倍,背涡流区最大宽度分别约为礁体宽度的1.5、1.7倍,显然多孔箱型鱼礁背涡流区最大长度和最大宽度比多孔梯形台、三棱体鱼礁的规模相对更大,后两者的背涡流区最大长度和高度则基本相同;而多孔梯形台鱼礁产生的背涡流区最大高度约为礁体高度的1.7倍,明显要大于多孔箱型(礁体高度的1.5倍)、三棱体(礁体高度的1.4倍)鱼礁。通过分析45°和90°摆放时3种鱼礁模型流场得出的结果基本上与30°摆放时一致。

3.2 组合鱼礁流场分析

从图5(a)~5(c)可看出,同一透空率下,同类型礁体模型的九礁组合形成的上升流规模强度随着礁距的增大呈现先增大后减小的趋势。以箱型鱼礁为例,当礁体间距为1L(L为礁体长度)时上升流最大流速与来流速度比值最大,约为0.88,其次为1.5L礁距的0.852,礁距为0.5L时上升流最大流速与来流速度比值最小,约为0.821;1L礁体间距下箱型鱼礁产生的上升流规模最大,上升流最大高度约为4.21倍礁体高度。通过分析,梯形台和三棱体鱼礁3种礁距下与箱型鱼礁具有相似的上升流变化趋势,礁体距离为1L时产生的上升流规模强度均为最大。分析箱型鱼礁纵向中轴断面(XOZ)速度矢量图(图6),礁体间距为0.5L时,只有第1个礁体背面靠近底部的区域形成了涡旋,且由于礁体间距离较近,涡旋没有完全发育,规模较小;当礁体间距为1L时,第1个鱼礁背部产生了两个涡旋,分别位于两礁体中间区域上下方,由于礁距较大,涡旋得以充分发育,大小约为2m,明显比0.5L礁距时要大,此外还在第2个鱼礁后方区域形成了一个规模较大的涡旋,大小约为3m;礁体间距进一步增大到1.5L时,第1个礁体背部仍然存在两个涡旋,大小为2~2.5m,两个涡旋都产生了较

为明显的涡旋分离扩散现象,尤其是位于中间区域上方涡旋的内部结构已经改变,而在第2个鱼礁后方的涡旋大小约为3m,其规模相较于1L礁距时不再增大,由此可推断,礁体背部形成的涡旋先随着礁距而增大,当礁距增大到一定程度时涡旋不再增大,且随着礁距的增加涡旋发生分离扩散,内部结构也会发生改变。由图5(d)、5(e)可见,1L礁距时,箱型组合鱼礁形成的背涡流区最大长度与礁体长度比值约为5.53,背涡流区最大高度与礁体高度比值约为1.67,1.5L礁距分别为5.27和1.62,可以看出1L、1.5L礁距形成的背涡流区规模要比0.5L礁距时大,综上可推断出1L是组合鱼礁较为合适的礁体间距,可使人工鱼礁产生显著的流场效应,这与刘同渝^[16]对不同类型鱼礁进行水槽和风洞实验得出1L~2L礁体间距下鱼礁能产生更好的流场效应的结果相符。

通过分析图5还可看出,三棱体鱼礁组合在3种礁体距离下产生的上升流强度稍大于箱型鱼礁组合,1L礁距时上升流区最大速度和平均速度分别约为来流速度的0.891、0.141,而梯形台鱼礁组合形成的上升流强度均大于三棱体和箱型鱼礁组合,这是由于三棱体和梯形台鱼礁迎流面存在坡度,对来流起到了一定程度上的加速作用并产生强度更大的上升流。结合图6,箱型鱼礁组合下的上升流区规模最大,三棱体鱼礁组合稍小于箱型鱼礁组合却明显大于梯形台鱼礁组合。由图7的Z=1.5水平面矢量图,同一工况下来流运动至鱼礁组合两侧时流速减缓形成缓流区,明显发现箱型鱼礁组合两侧的缓流区要比三棱体、梯形台鱼礁组合影响范围更大,因而垂直放置的(迎流面坡度为0)箱型鱼礁阻流作用更强,其次为三棱体鱼礁组合,而梯形台鱼礁组合最弱。由图6、图7可看出,三棱体和梯形台鱼礁组合在礁体背部都形成了涡旋,与箱型鱼礁组合类似,礁距达到1L时涡旋完全发育,当礁距增大到1.5L时涡旋出现分离扩散现象,内部结构发生改变;不同之处在于三棱体鱼礁组合第1组鱼礁背部形成的两个涡旋大小约为2.3~2.7m,规模稍大于箱型鱼礁组合,主要是由于鱼礁形状不同导致三棱体鱼礁组合间区域较大,涡旋较箱型鱼礁组合发育更好。而梯形台鱼礁组合第1组礁体背面只形成一个涡旋,没有出现双涡旋现象,涡旋大小约为3m,规模较三棱体和箱型鱼礁组合要大;与单涡旋相比,礁体背面形成的双涡旋现象能加速海水中营养盐的输运,增强双涡旋影响海域范围内海水的初级生产力,更好地发挥饵料效应,提高集鱼效果。3种类型鱼礁模

型中,第3组鱼礁背部形成了顺时针结构的尾涡,箱型鱼礁组合形成的背涡流区规模明显大于梯形台鱼礁组合,而三棱体鱼礁组合与箱型鱼礁组合背涡流

区规模接近,礁体组合后形成的尾涡随着礁体间距的增大尾涡大小不发生改变,当礁体间距增大到一定程度时尾涡分离产生新的尾涡。

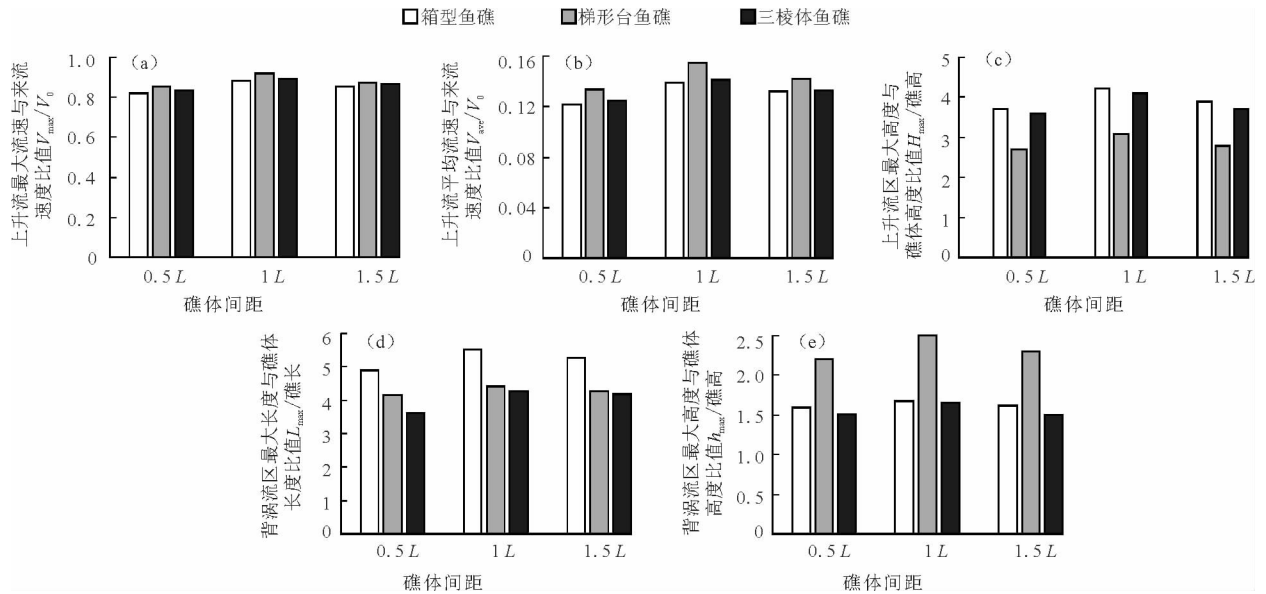


图5 九礁组合鱼礁上升流和背涡流规模强度分量云图

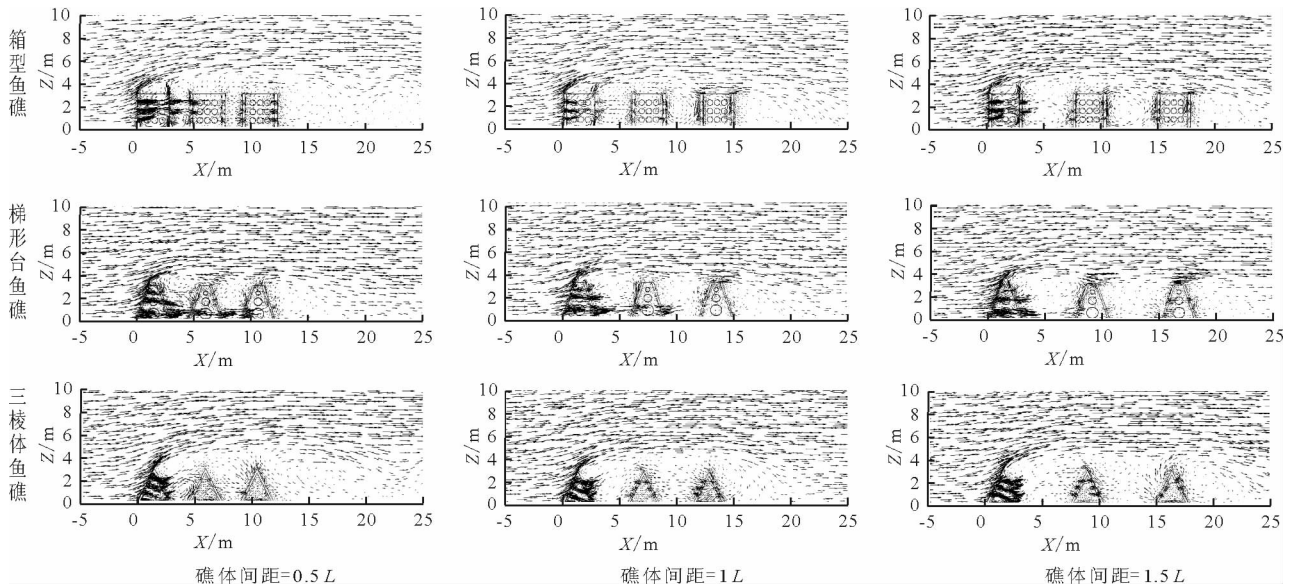


图6 九礁组合纵向中轴断面(XOZ)速度矢量图

3.3 组合鱼礁速度场分析

图8为九礁组合中轴断面的Z向速度分量云图。由图8可看出,三棱体鱼礁组合在第1个鱼礁顶部区域产生Z向速度分量最大值,速度场以顶部区域为中心向外延伸呈弧形分布,Z向速度分量大小随着速度场的向外延伸而逐渐减小,Z向速度分量在第2个鱼礁迎流面前方区域出现负值,与速度矢量分布图中产生的涡旋现象相符,由于礁体组合后方区域为背涡流区,第3个礁体后部存在Z向速

度分量为负值的规模较大区域。当礁体间距为0.5L时,呈弧形分布的Z向速度分量影响范围明显小于1L、1.5L礁体间距下的速度分布,因而,Z向速度分量影响范围随着礁体间距的先增大后减小,1L时其影响范围达到最大。结合图9Z=1.5m水平面的X向速度分量云图,礁体组合后方形成流速较小的速度减缓区域,0.5L礁体间距下的缓流区(背涡区)影响范围小于1L、1.5L礁体间距,可得到礁体间距为1L时能产生较优的流场效应分布。由图

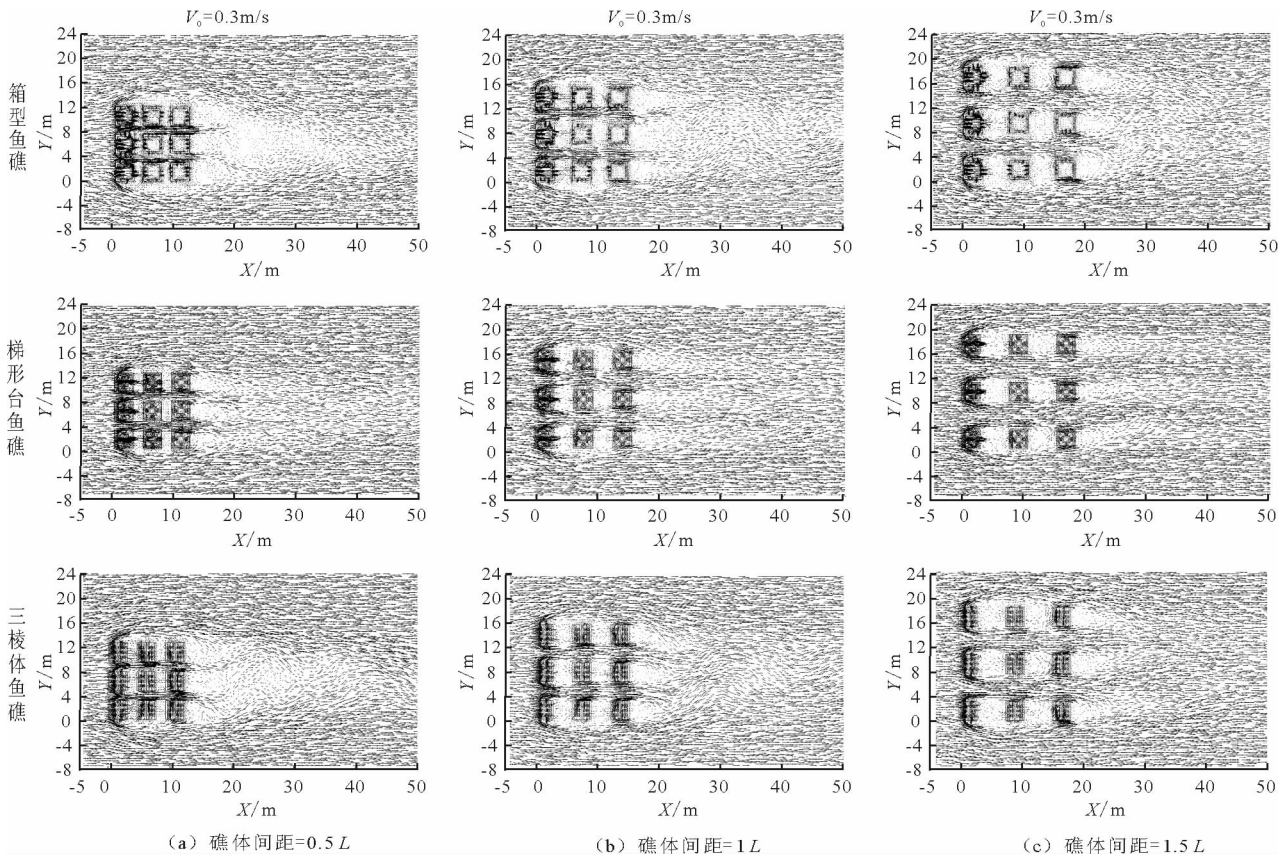


图 7 九礁组合水平面 $Z = 1.5$ 速度矢量图

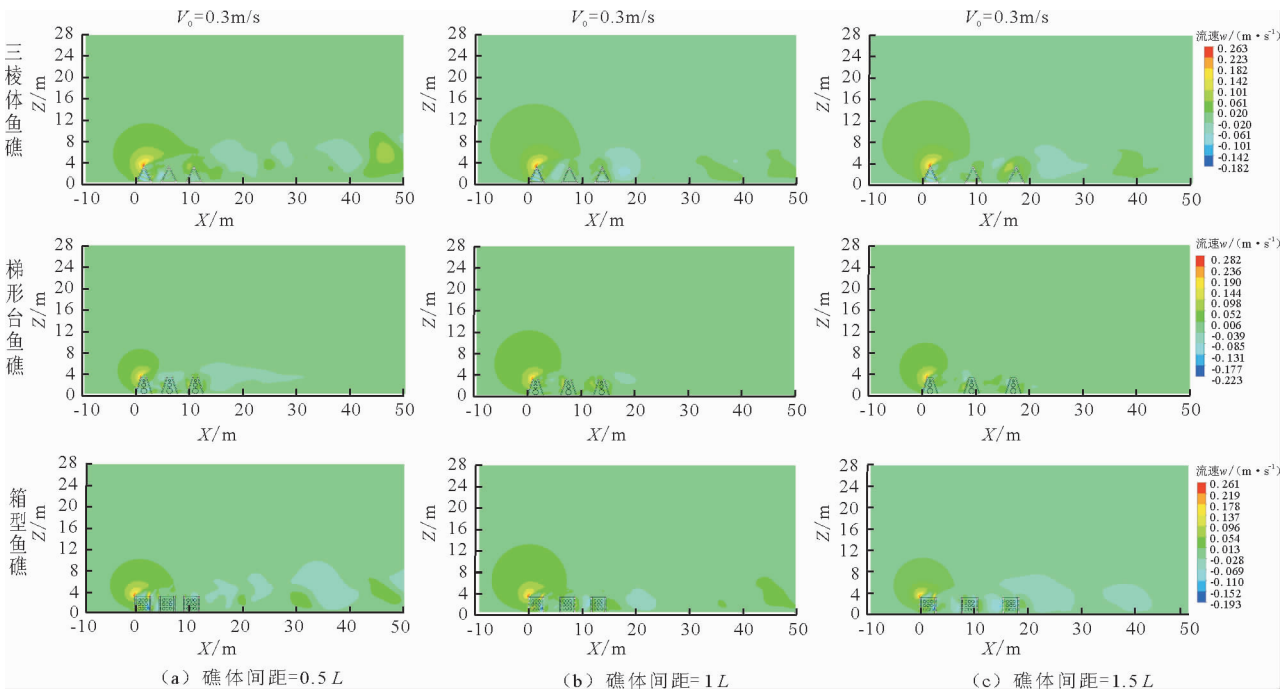


图 8 九礁组合中轴断面 Z 向速度分量云图

8 还能看出, 梯形台鱼礁和箱型鱼礁组合在第 1 个礁体左上方区域产生 Z 向速度分量最大值, Z 向速度分量向外延伸其大小逐渐减小, 呈现弧形分布, 与三棱

体鱼礁组合类似, 不同之处在于 Z 向速度分量最大值出现的位置; 礁体间距为 $1L$ 时, Z 向速度分量影响范围达到最大, 其次为 $1.5L$ 礁体间距, $0.5L$ 礁体间距

下的 Z 向速度分量影响范围最小。通过分析3种鱼礁类型的九礁组合,鱼礁组合在3种礁体间距下产生的 Z 向速度分量最大值基本相同,三棱体鱼礁组合约为 0.263 m/s ,梯形台鱼礁组合约为 0.282 m/s ,箱型鱼礁组合约为 0.261 m/s ,说明 Z 向速度分量最大值随着礁体间距的增大而保持不变, Z 向速度分量影响范围随着礁体间距的增大先增大后减小;三棱体鱼礁和箱型鱼礁组合下的 Z 向速度分量影响范围要大于梯形台鱼礁组合,而梯形台鱼礁组合的 Z 向速度分量最大值则要比其余两者的大。

由图9可以得到,位于礁体组合正前方存在 X 向速度分量值较小区域,呈弧形分布,越靠近礁体迎流面速度值越小,这是由于礁体的阻流作用,来流运动至礁体迎流面处流速逐渐减缓,水体堆积并抬升形成上升流,而箱型鱼礁和三棱体鱼礁组合正前方

的流速减缓区域明显比梯形台鱼礁组合大得多;沿 Y 方向来看, X 向速度分量最大值出现在礁体中间区域,梯形台鱼礁组合 X 向速度分量最大值分布范围明显较其余两者要大;沿 X 方向看,礁体组合间出现 X 向速度分量较小值区域,当礁体间距达到 $1L$ 时, X 向速度分量出现负值;在礁体组合的背部区域存在范围较大的 X 向速度分量较小值区域,此时来流流速减缓并产生涡旋结构,即背涡流区,当礁体间距为 $0.5L$ 时, X 向速度分量影响范围要小于 $1L$ 和 $1.5L$ 礁体间距。通过分析3种鱼礁类型的九礁组合 X 向速度分布,箱型鱼礁和三棱体鱼礁组合出现的 X 向速度较小值区域范围(缓流区)明显比梯形台鱼礁组合大,因此,相较于梯形台鱼礁组合,箱型鱼礁和三棱体鱼礁组合下的速度场分布能产生更优的流场效益。

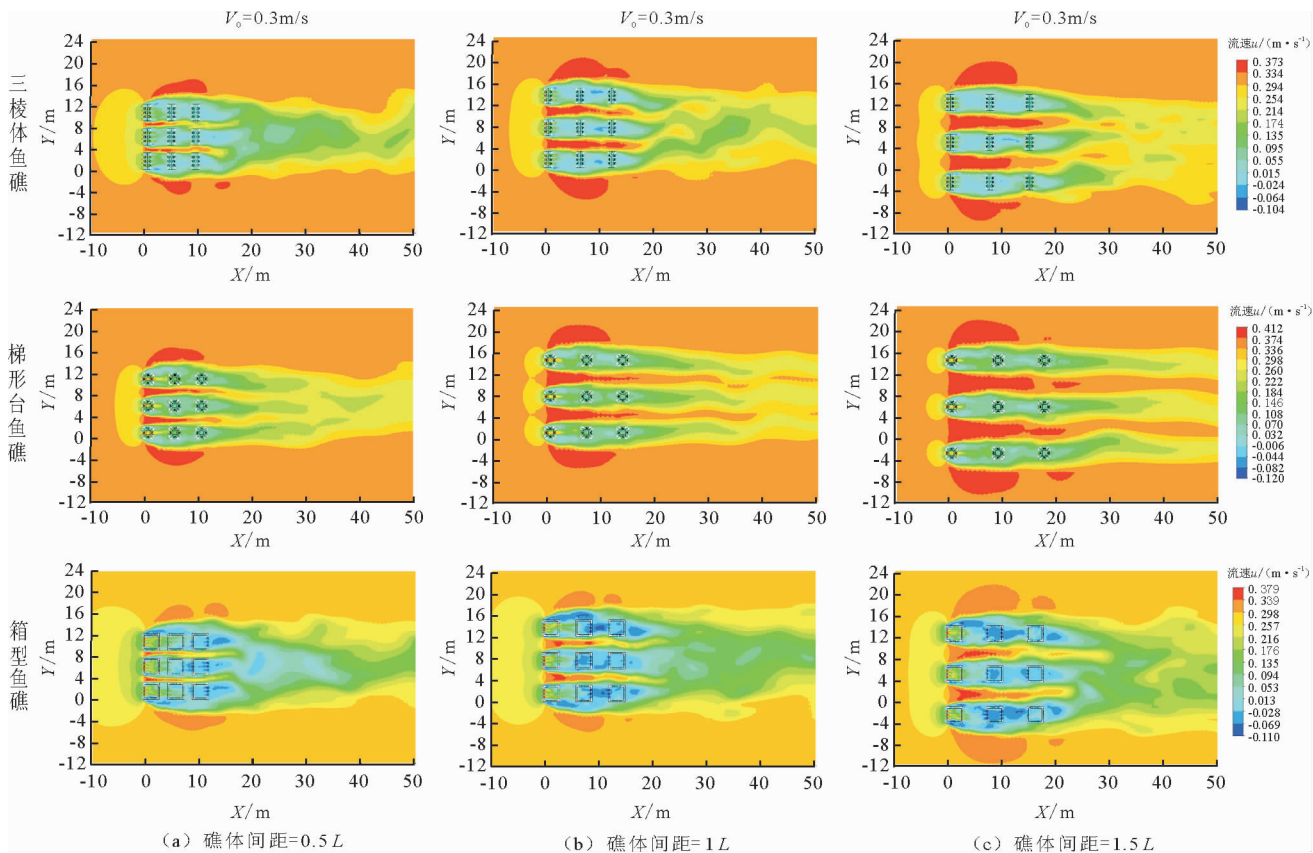


图9 九礁组合 $Z = 1.5\text{ m}$ 水平面 X 向速度云图

4 结论

本文采用计算流体动力学技术(CFD)模拟了6种不同工况下多孔空心人工鱼礁周围的三维流场,探索了鱼礁透空率为20%下的箱型鱼礁、三棱体鱼礁和梯形台鱼礁单礁体在 30° 、 45° 和 90° 摆放时产

生的上升流和背涡流规模、强度变化;以及3种鱼礁类型的九礁组合在不同布设间距下的流场特征规律分布。经分析得出:

(1)同种模拟工况下,同类型的多孔空心人工鱼礁以 90° 摆放时形成的上升流和背涡流规模强度达到最大, 30° 摆放时次之;3种摆放角度下产生的

背涡流区顺时针涡旋结构基本保持不变,不同的是涡心位置和背涡流区边界层产生的小涡旋数量;同种摆放角度下,梯形台鱼礁形成的上升流强度最大,其次为三棱体鱼礁,而箱型鱼礁产生的上升流区规模要比三棱体鱼礁和梯形台鱼礁大,三棱体鱼礁和梯形台鱼礁形成的背涡流区规模要小于箱型鱼礁,因而箱型鱼礁单礁体产生的流场效应较优,三棱体鱼礁和梯形台鱼礁形成的流场效应则基本相当。

(2) 3种鱼礁类型的九礁组合形成的上升流规模强度随礁体距离的增加呈现出先增大后减小的趋势,礁体背面产生的涡旋规模随着礁体间距的增加而增大,礁体间距达到 $1L$ 时涡旋完全发育,当增加到 $1.5L$ 礁体间距时涡旋出现分离扩散现象,内部结构发生改变,因此 $1L$ 礁体间距下的鱼礁组合能产生更好的流场调控效应;梯形台鱼礁组合形成的上升流强度较箱型和三棱体鱼礁组合要大,箱型和三棱体鱼礁组合对两侧的缓流区影响范围和背涡流区规模要大于梯形台鱼礁组合, $1L$ 礁体间距下箱型鱼礁组合和三棱体鱼礁组合第1组礁体背面出现双涡旋现象,而梯形台鱼礁组合第1组礁体背面只形成一个涡旋,显然箱型鱼礁和三棱体鱼礁九礁组合能更好地发挥鱼礁的集鱼、饵料效应和环境修复功能。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(4): 353-358.
- [3] 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.
- [4] 关长涛,刘彦,赵云鹏,等. 复合M型人工鱼礁粒子图像测速二维流场试验研究[J]. 渔业现代化,2010,37

(1):15-19.

- [5] Jiang Zhaoyang,Liang Zhenlin,Tang Yanli, et al. Numerical simulation and experimental study of the hydrodynamics of a modeled reef located within a current [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2010, 28(2):267-273.
- [6] Jiang Zhaoyang, Liang Zhenlin, Liu Yang, et al. Particle image velocimetry and numerical simulations of the hydrodynamic characteristics of an artificial reef [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2013, 31(5): 949-956.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 何文荣,黄远东,黄黎明,等. 金字塔型人工鱼礁绕流的三维CFD模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(5):71-76.
- [10] 邓济通,黄远东,姜剑伟,等. 布设间距对三棱柱形人工鱼礁绕流影响的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):98-102+108.
- [11] 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.
- [12] 唐衍力,王磊,梁振林,等. 方型人工鱼礁水动力性能试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2007,37(5):713-716.
- [13] 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.
- [14] 林军,章守宇,叶灵娜. 基于流场数值仿真的人工鱼礁组合优化研究[J]. 水产学报,2013,37(7):1023-1031.
- [15] 虞聪达,俞存根,严世强. 人工船礁铺设模式优选方法研究[J]. 海洋与湖沼,2004,35(4):299-305.
- [16] 刘同渝. 人工鱼礁的流态效应[J]. 水产科技,2003(6):43-44.