

文章编号: 1004-7271(2005)04-0406-07

## 铅直二维定常流中人工鱼礁 流场效应的数值实验

潘灵芝, 林军, 章守宇

(上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

**摘要:**以定常来流海域为例,利用数值实验方法,定量探讨了具有自由水面的海域中人工鱼礁单体对流场的影响。考虑嵊泗鱼礁投放区的流速、水深的调查结果,来流速度  $U_m$ 、水深  $H$  分别取为 0.7 m/s、20 m。在鱼礁为实心方体的情况下,在鱼礁迎流面产生上升流背流面产生涡流;上升流场的规模、强度随着礁高增大而增大,而上升流面积的平均产量与边际产量随礁高先增后减,在礁高水深比  $r = 0.1$  时上升流效应最佳;背涡流场的规模也随着礁高增大而增大,其面积的平均产量随礁高先增后减,在  $r = 0.1$  时达到极值。

**关键词:**人工鱼礁;数值模型;二维;上升流

**中图分类号:**S 911;S 972.63 **文献标识码:**A

### A numerical experiment of the effects of artificial reef on vertical 2-dimensional steady flow field

PAN Ling-zhi, LIN Jun, ZHANG Shou-yu

(College of Marine Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of artificial reef on the vertical 2-dimensional steady flow fields with free surface were quantitatively discussed with numerical methods. In view of the current velocity and the water depth investigated in the artificial reef area at Shengsi, the value  $U_m$  and the depth  $H$  could be taken as 0.7 m/s and 20 m respectively. The influencing range and the strength of the upwelling field intensify with the increase of the reef height, and the range of the eddy behind reef has the similar features to the range of the upwelling strength. The average production and marginal production of upwelling field and eddy field reaches at the appropriate 0.1 ratio of the reef height to the water depth, after this, weakening with the increase of reef height.

**Key words:** artificial reef; numerical experiment; two-dimension; upwelling

人工鱼礁是人为在水中设置的构造物,实践证明,建设人工鱼礁是一条改善近海水域生态环境、养护渔业资源的行之有效的途径。一般来说,人工鱼礁的生态效应主要是通过人工鱼礁的流场效应来实现的,因此,流场效应在人工鱼礁的相关研究中应该是最为基础的,它对于人工鱼礁的建设规模和建成后的效果评价都具有指导意义。关于人工鱼礁的研究,在发达国家十分活跃,日本是开展人工鱼礁研究最早、最细致、深入的国家,也是出版人工鱼礁著作最多的国家。内容主要围绕鱼礁的结构、材料和工程

收稿日期:2005-04-20

基金项目:国家自然科学基金(30471332),上海市重点学科建设项目(T1101),上海市教委重点基金项目(05ZZ51)。

作者简介:潘灵芝(1979-),女,山东德州人,硕士研究生,专业方向为海洋生态系统工程。

通讯作者:章守宇(1961-),男,教授,E-mail:syzhang@shfu.edu.cn

学原理、鱼类与人工鱼礁的关系、人工鱼礁的效益、人工鱼礁的流场特性等问题开展的。迄今为止,人工鱼礁流场的研究大都以现场调查分析为主,也有部分水槽<sup>[1,2]</sup>或风洞实验,由于研究手段的限制,它们只反映了人工鱼礁海域局部的流速流向,不能正确把握整个流场的分布和变化,因而从全局来看,这些研究属于定性的。若要全面反映流场的分布与变化须借助数值计算方法作定量研究,并辅以现场调查或者水槽实验进行验证。本文将采用数值计算方法,定量探讨铅直二维定常流中人工鱼礁单体规模与产生的上升流、背涡流规模之间的关系,以期从整体上把握人工鱼礁海域的流场效应,为今后定量评估人工鱼礁的生态效益提供依据。

## 1 计算方法

考虑具有自由水面、无限长的沿岸定常流海域。为简化研究问题,假设水域底边界平直,人工鱼礁单体简化为实心、截面方形模型,直角坐标原点位于鱼礁模型左侧底部, $x$  坐标位于海底, $z$  坐标垂直向上,物理问题及坐标示意如图 1 所示。其中  $U_{in}$  为定常流速, $H$  为水深, $h$  为礁体单边长度。

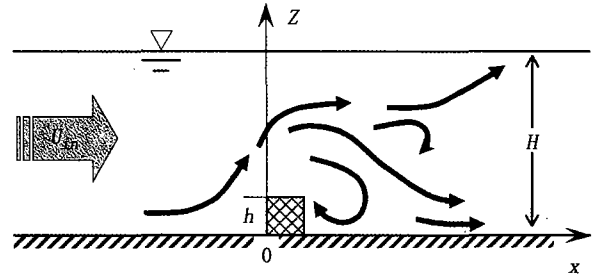


图 1 物理问题与坐标系简图

Fig.1 Sketch diagram of the problem and coordinate system

### 1.1 控制方程

在以上假设条件下, $xoz$  平面内的流体运动控制方程为连续方程和 Navie-Stokes 方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad (3)$$

式中  $u$ 、 $w$  分别为流速沿  $x$ 、 $z$  方向的分量, $t$  为时间, $p$  为压力, $g$ 、 $\rho$ 、 $\nu$  分别为重力加速度、海水的密度和涡动粘性系数,分别取常温参量  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu=1.006 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

### 1.2 差分网格

对控制方程组的离散建立在交错网格的基础上,礁体附近加密,如图 2 所示。每个网格内各变量的空间分布如图 3 所示(即“Arakawa C 网格”)<sup>[3,4]</sup>,压力定义在网格中心,速度  $u$ 、 $w$  分别定义在前后与上下边界的中点。记  $\Delta x$  和  $\Delta z$  分别为沿水平、垂直方向的空间步长, $\Delta t$  为时间步长。

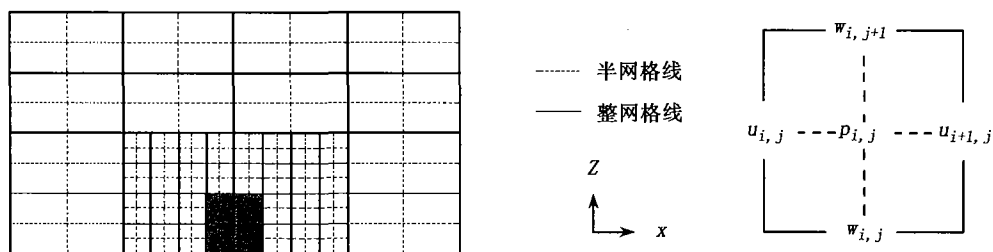


图 2 差分计算网格及交错网格中各变量的分布

Fig.2 Staggered grid and the distribution of variable on grid

### 1.3 差分方法

离散方法选取发展成熟的有限差分法,非定常项采用向前差分,平流项采用二阶精度的迎流差分,

粘性项采用中心差分<sup>[5]</sup>,即

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{F^{n+1} - F^n}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\left( c \frac{\partial F}{\partial x} \right)_{i,j} = \frac{c}{2} \left\{ (1 + \epsilon) \frac{3F_{i,j} - 4F_{i-1,j} + F_{i-2,j}}{2\Delta x} + (1 - \epsilon) \frac{-3F_{i,j} + 4F_{i+1,j} - F_{i+2,j}}{2\Delta x} \right\}$$

$$\text{其中 } \epsilon = \text{sign}(c) = \begin{cases} 1 & C > 0 \\ -1 & C < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\left( \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right)_{i,j} = \frac{F_{i-1,j} - 2F_{i,j} + F_{i+1,j}}{(\Delta x)^2}, \left( \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right)_{i,j} = \frac{F_{i,j-1} - 2F_{i,j} + F_{i,j+1}}{(\Delta z)^2}$$

上式中的  $F$  表示速度,上标  $n$  为时间记号,下标  $i-1, i, i+1, j-1, j, j+1$  为空间点记号。

## 1.4 初始条件与边界条件

初始条件:

整个计算域内水平速度取为常数  $U_{in}$ ,压强取为 0,即  $u_{i,j}^0 = U_{in}, w_{i,j}^0 = 0, p_{i,j}^0 = 0$ 。

边界条件:

礁体壁面及海底:  $u_{i,j}^n = w_{i,j}^n = 0$ 。

自由水面:  $w_{i,j_{max}}^n = 0, u_{i,j_{max}}^n = u_{i,j_{max}-1}^n, p_{i,j_{max}}^n = P_a$  (一个标准大气压)。

流入边界:  $u_{i_{min},j}^n = U_{in}, w_{i_{min},j}^n = 0, p_{i_{min},j}^n = p_{i_{min}+1,j}^n$

流出边界:  $u_{i_{max},j}^n = u_{i_{max}-1,j}^n, w_{i_{max},j}^n = w_{i_{max}-1,j}^n, p_{i_{max},j}^n = p_{i_{max}-1,j}^n$

## 2 结果及讨论

根据连云港和嵎泗鱼礁海域的调查结果,计算水域取  $U_{in} = 0.7 \text{ m/s}, H = 20 \text{ m}$ ;礁高  $h$  取  $0.5 \text{ m}, 1 \text{ m}, 1.5 \text{ m}, 2 \text{ m}, 2.5 \text{ m}, 3 \text{ m}, 3.5 \text{ m}, 4 \text{ m}, 4.5 \text{ m}, 5 \text{ m}$  十个不同量值。为便于比较起见,本文取上升流速  $w \geq 0.1 \times U_{in} = 0.07 \text{ m/s}$  的水域作为上升流域,其水平方向的最大宽度称为幅宽,记作  $L$ ,上升流域达到的高度记作  $H_i$ 。上升流规模用面积  $S$ 、幅宽  $L$  加以衡量,而上升流强度用最大上升流速  $w_{max}$  和上升流域内的上升流速均值  $\bar{w}$  加以衡量。背涡流域水平尺度即涡流分离点距礁体的距离记作  $x_{sep}$ ,涡心到礁体、海底的距离分别记作  $x_{vor}, z_{vor}$ 。背涡规模用面积  $S, x_{sep}$  加以衡量。流场效应用经济学概念进行分析,将鱼礁单体作为投入,上升流和背涡流作为产出,面积的平均产量记作  $S_A$ 、边际产量记作  $S_M$ 。此外,鱼礁的高度量用礁高水深比  $r = h/H$  表示。

### 2.1 迎流面上升流

#### 2.1.1 上升流域的规模和强度

礁高不同时,鱼礁附近上升流域的分布范围如图 3 所示。当礁高水深比  $r = 0.05$  时,上升流域的面积为  $27.2 \text{ m}^2$ ,幅宽为  $6.4 \text{ m}$ ;当  $r = 0.15$  时,面积为  $161.2 \text{ m}^2$ ,幅宽为  $17.6 \text{ m}$ ;当  $r = 0.25$  时,面积为  $245.3 \text{ m}^2$ ,幅宽为  $23.7 \text{ m}$ 。由此可知,上升流域面积、幅宽均随着礁高增大逐步增大。

礁高水深比不同时  $w_{max}, \bar{w}$  的值列于表 1。数据表明,  $w_{max}, \bar{w}$  均随礁高增大而增大。因此,随礁高增大,上升流域的规模和强度均增大。

表 1 礁高水深比与  $w_{max}, \bar{w}$  的关系

Tab.1 The changes of the maximal vertical velocity and  $\bar{w}$  at different reef height

r	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25
$w_{max}(\text{m/s})$	0.517	0.570	0.590	0.637	0.661	0.703	0.756	0.806	0.838	0.873
$\bar{w}(\text{m/s})$	0.108	0.112	0.122	0.131	0.137	0.143	0.149	0.155	0.163	0.168

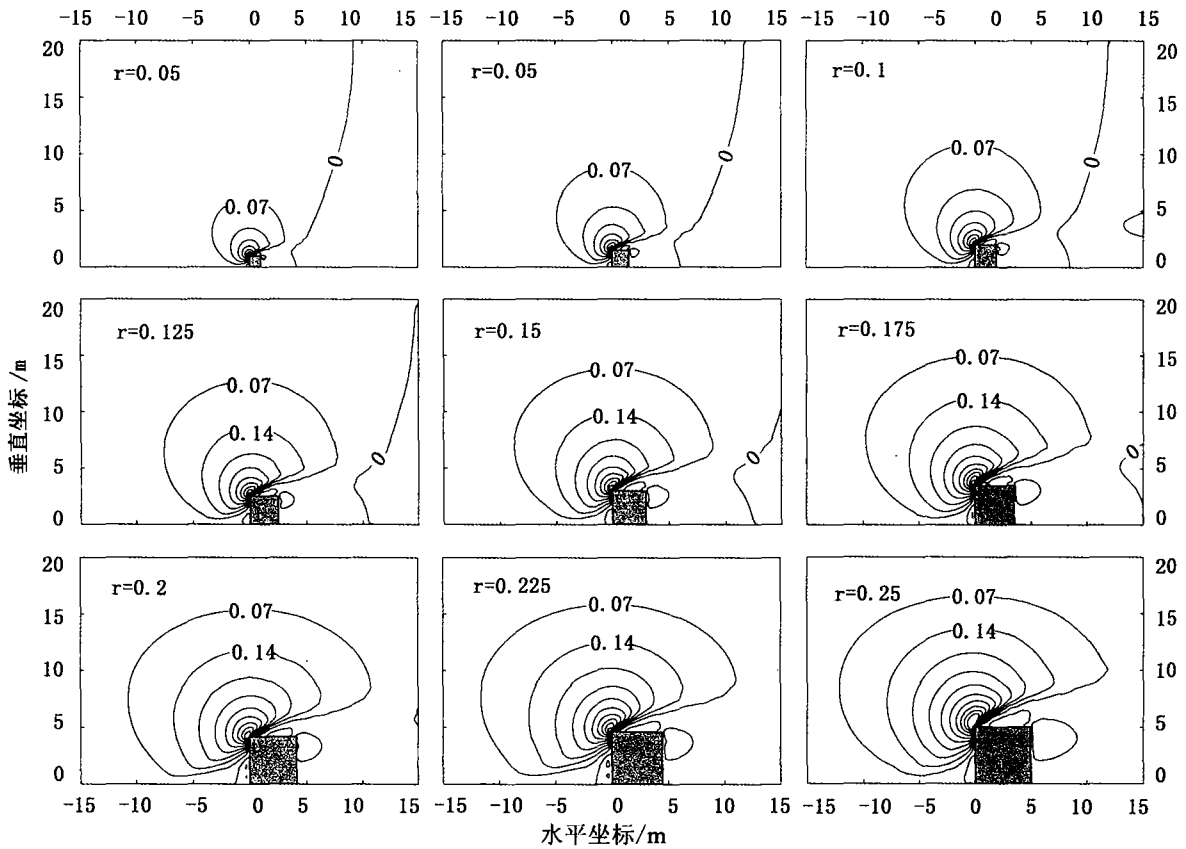


图3 礁高水深比对上升流范围的影响

Fig.3 Contours of the vertical velocity around artificial reef

2.1.2 上升流效应

上升流域面积的平均产量、边际产量的变化曲线如图4、图5所示,可见二者均随礁高的增大先增大后减小,分别在  $r = 0.075, 0.1$  时达到极值。

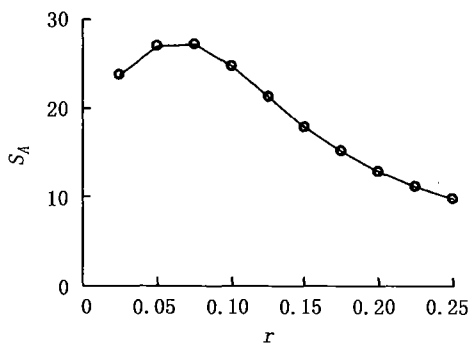


图4 上升流域面积的平均产量的变化曲线

Fig.4 The change of the average production of upwelling field area according to the reef height

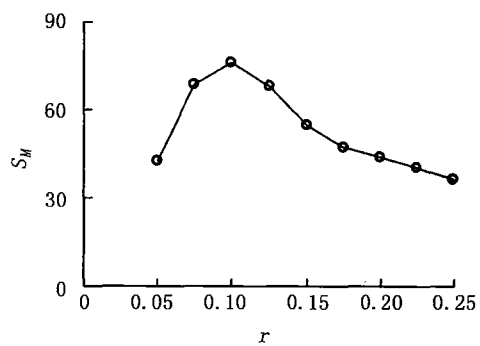


图5 上升流域面积的边际产量的变化曲线

Fig.5 The change of the margin production of upwelling field area according to the reef height

2.1.3 其他水力特性

除以上水力特性外,计算区域内的最大水平流速  $U_{max}$  和上升流域达到的高度  $H_i$  也随着礁高增大

而增大,变化趋势如图6、图7所示。在 $r=0.2$ 时最大水平流速 $1.08\text{ m/s}$ 为来流速度 $U_{in}$ 的1.54倍,这与野添学等<sup>[6]</sup>的研究结果基本吻合,他们认为礁高水深比为0.2时的最大水平流速是来流速度的1.57倍。计算 $H_i/h$ ,可知上升流域达到的相对高度随礁高增大逐渐增大,在 $r=0.1$ 以后,增幅明显减弱。

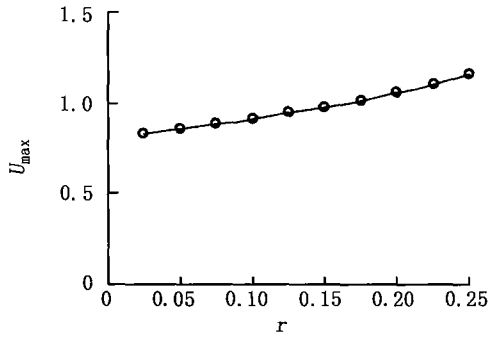


图6 最大水平流速的变化曲线

Fig.6 The change of the maximum horizontal velocity according to the reef height

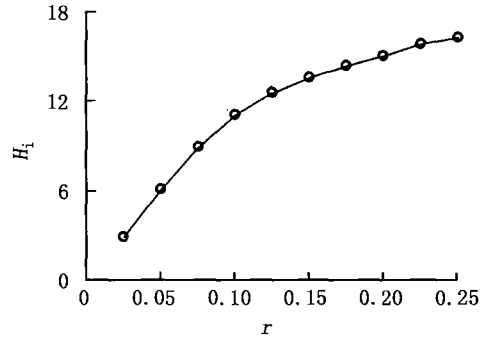


图7 上升流域达到高度的变化曲线

Fig.7 The change of the height of upwelling field according to the reef height

## 2.2 背涡流域

### 2.2.1 背涡流域的规模

背涡流域的面积 $S$ 、水平尺度 $x_{sep}$ 的变化趋势如图8、图9所示,显而易见 $S$ 、 $x_{sep}$ 均随礁高增大而增大。因此,鱼礁越高,产生背涡流域的规模越大。计算水平尺度的相对值 $x_{sep}/h$ ,可知其随礁高变化不明显, $x_{sep}$ 约为礁高的8.7~9.6倍;其中 $r=0.2$ 时,背涡的水平尺度是礁高的9.60倍,该结果与日本学者鹤谷宏<sup>[7]</sup>等所做水槽实验10倍左右的结果基本吻合。

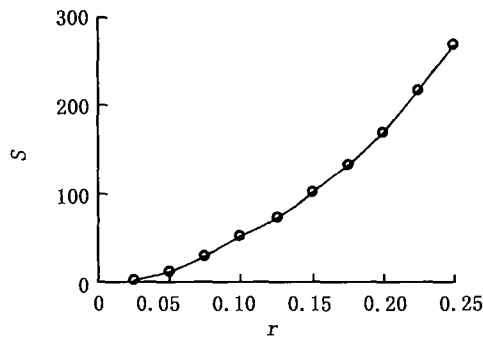


图8 背涡面积的变化曲线

Fig.8 The change of the area of eddy field according to the reef height

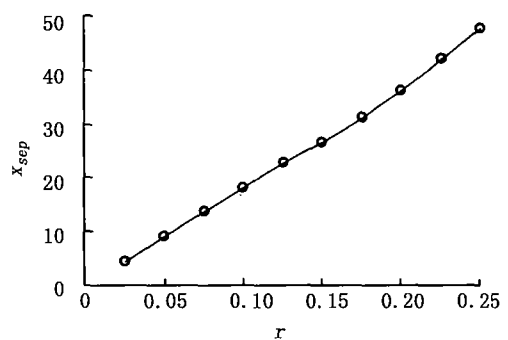


图9 背涡水平尺度的变化曲线

Fig.9 The change of the breadth of eddy field according to the reef height

### 2.2.2 背涡流效应

背涡面积的平均产量随着礁高水深比的变化曲线先增后减,在 $r=0.1$ 时达到极值,如图10所示。

### 2.2.3 其他水力特性

涡心到礁体、海底的距离 $x_{vor}$ 、 $z_{vor}$ 的变化曲线如图11、图12所示,二者均随礁高增大逐渐增大。计算距离的相对值 $x_{vor}/h$ 与 $z_{vor}/h$ ,可知 $x_{vor}/h$ 随礁高增大先增后减(与 $S_A$ 相似),在 $r=0.1$ 处取得极值, $x_{vor}$ 平均为礁高的2.9倍;而 $z_{vor}/h$ 随礁高增大呈轻微下降趋势, $z_{vor}$ 为礁高的0.86~1.03倍,平均约0.9倍。此外,流场图显示背涡顺时针转动;铃木连雄、本田阳<sup>[8]</sup>专门针对鱼礁周围的涡流设计了可视化实验,所拍涡流照片清晰显示了运动方向:在水槽底部流向鱼礁,在礁面附近由下而上运动。可见计算

结果与水槽实验结果一致。

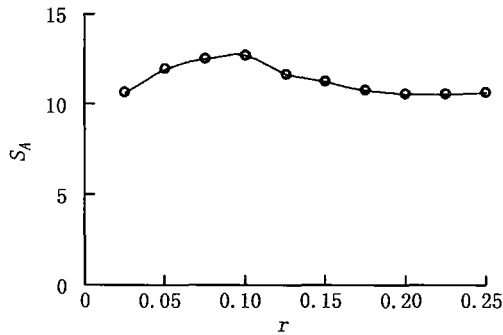


图 10 背涡流域面积的平均产量变化曲线

Fig. 10 The change of the average production of eddy field area according to the reef height

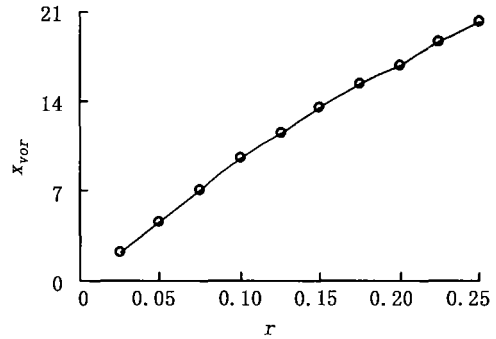


图 11 涡心到礁体距离的变化曲线

Fig. 11 The change of the distance from vortex to reef according to the reef height

### 2.3 人工鱼礁的流场效应

一般而言,表层水拥有较好的光照条件,随上升流上涌的营养盐可以提高海域的初级生产力,从而诱集鱼类前来索饵;背涡流域流速缓流,涡心处速度最小,多数鱼类喜栖息于流速缓慢的涡流区,特别是在躲避强潮流时,涡流还可造成浮游生物、甲壳类和鱼类的物理性聚集。所以,上升流和背涡流的规模可作为鱼礁流场效应的衡量指标。

计算结果显示  $r = 0.075$  时上升流的  $S_A$  达到极值,从产出角度来说,在这个投入水平上单位产出的资源消耗量最少,实现了低成本生产;从总资源有效利用角度看,只要条件允许,投放鱼礁单体的高度至少应当达到  $r = 0.075$ ;但  $r$  大于 0.1 时上升流的  $S_M$  急剧下降。所以说,  $r = 0.1$  时上升流效应最佳。由  $r = 0.1$  时背涡流的  $S_A$  达到极值,可以推断,在  $r = 0.1$  时同样实现了投放鱼礁的低成本生产,背涡流效应最佳。当  $r = 0.1$  时,上升流速  $w = 0.01$  m/s 的水体可达到距水表 2.5 m 之内的水层,上升流速度  $w = 0.001$  m/s 的水体可达到水表附近。所以说,在投放礁高满足  $r = 0.1$  时,实现了单位产出成本消耗最小,所有鱼礁流场效应最佳。

## 3 结论

以上数值实验结果表明,在定常流  $U_{in} = 0.7$  m/s、水深 20 m 的海域投放人工鱼礁,主要有两方面的流场作用,即迎流面产生上升流,背流面产生涡流:(1)上升流域的规模、强度随礁高增大而增大,上升流效应在礁高水深比 0.1 附近最佳;(2)背涡流规模随礁高增大而增大,鱼礁的背涡流效应在礁高水深比 0.1 附近最佳。综上所述,虽然鱼礁越高产生的上升流和背涡流的规模越大,但从经济效益角度考虑,并非鱼礁越高投入产出越好,而是在  $r = 0.1$  时鱼礁流场效应最佳。

本文利用数值实验方法,以  $U_{in} = 0.7$  m/s、鱼礁模型为实心方体的情况,针对不同鱼礁高度对二维流场的影响做了计算。由于垂直二维数值模型忽略了绕流作用,计算结果与实际流场之间存在一定差异,但与三维流场中沿来流方向截取的鱼礁中垂面上的流场特性基本吻合。由于本文计算选用的是实心方体鱼礁模型,因此计算结果相较于鱼礁渔场流态现场调查结果或透水性鱼礁模型的水槽实验结果

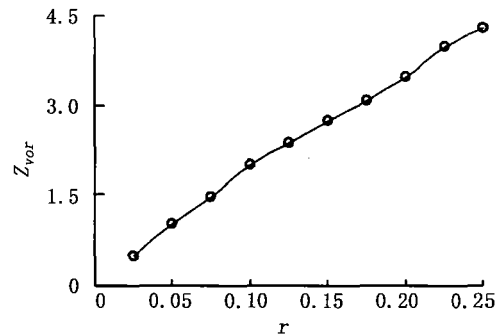


图 12 涡心到海底距离的变化曲线

Fig. 12 The change of the distance from vortex to bottom according to the reef height

要略大一些,本文计算结果更适合评估实心船礁的流场效应问题。今后的课题将在此基础上对不同水深、不同来流速度、往复流或旋转流、镂空礁体模型、三维立体空间等等情况下,研究鱼礁对流场的流态、流速影响;并进一步探讨上升流增强初级生产力、改善环境的效果,结合现场调查数据评估鱼礁的生态效应,以期为人工鱼礁建设事业提供合理的指导。

#### 参考文献:

- [1] 影山芳郎,大阪英雄,山田英已,等.人工礁周围的流况[J].水产土木,1986,19(2):1-8.
- [2] 池田俊介,二瓶泰雄,秋山信义,等.各種構造物による流の発生に関する实验的研究[J].海岸工学论文集,1992,39(3):896-900.
- [3] Takemoto Y, Torii K. Numerical simulation on unsteady density flows with free surface[A]. Computational mechanics '95 - Theory and Applications [C]. Springer, 1995, 1041-1046.
- [4] Hakan Akyildiz M, Serdar Celeby. Numerical computation of Hydrodynamic loads on walls of a rigid rectangular tank due to large amplitude liquid sloshing[J]. Marine Science, 2000, (59): 83-87.
- [5] 河村哲也.应用数值计算ライブラリ——流体解析 I[M]. 东京: 朝仓书店, 1997. 71-72.
- [6] 野添学,大桥行三,藤原正幸.铅直2次定常流場に設置された衛立型構造物による植物プランクトンと营养盐的变化予測に関する数值实验[J]. Fisheries Engineering, 2000, 36(3): 253-259.
- [7] 鹤谷宏一,松延嘉国,惟住智昭,等.涌流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性[J].港湾技术研究所报告, 1987, 26(2): 13-35.
- [8] 铃木连雄,本田阳一.3次元物体背後に発生する涌异渦に関する研究[J].海岸工学论文集,1992,39(3):901-905.

### 欢迎订阅 2006 年《上海水产大学学报》

《上海水产大学学报》是上海水产大学主办的以水产科学为主的综合性学术刊物。主要反映自然科学各学科的科研成果,促进学术与教学研究的交流与繁荣。主要刊载渔业资源、水产养殖与增殖,水产捕捞,水产品保鲜与综合利用,渔业水域环境保护,渔船、渔业机械与仪器,渔业经济与技术管理以及基础研究等方面的论文,调查报告,研究简报,综述与评述,简讯等,并酌登学术动态和重要书刊的评价等。

目前,《上海水产大学学报》已同时被中文核心期刊要目总览定为中文核心期刊、中国科学院文献情报中心定为中国科技论文统计源期刊、中国科学技术信息研究所定为中国科技核心期刊。

本刊为季刊,大 16 开,国内外公开发售。每期定价 10 元。全年定价 40 元(含邮费)。国际标准刊号:ISSN 1005-7271,国内统一刊号:CN 31-1613/S,国内邮发代号:4-604,国际发行代号 4822Q。读者可到当地邮电局订阅,也可直接汇款至编辑部订阅。

编辑部地址:上海市军工路 334 号,上海水产大学 48 信箱 邮政编码:200090

联系电话:021-65710892 传 真:021-65710232 E-mail: xuebao@shfu.edu.cn