

文章编号: 1674 - 5566(2012)05 - 0750 - 06

### 3 种鱼群个体间距的计算方法比较

张仲秋<sup>1</sup>, 周应祺<sup>1,2,3</sup>, 钱卫国<sup>1,2,3</sup>, 王 明<sup>4</sup>, 王 军<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 大洋生物资源开发和利用上海市高校重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 上海海洋大学 信息学院, 上海 201306)

**摘 要:** 对实验室水族箱中的鱼群空间分布状态进行录像, 采用质心法、线段法和三点折线法计算个体间距离。结果表明, 由3种方法计算获得的个体间距离均随着群体的个体尾数的增加而趋近于0.5~2倍体长(BL)的范围内。线段法与三点折线法的计算结果基本相同, 而质心法的计算结果的精度低于其它两种方法。在间距大于0.2 BL时, 三点折线法计算得到的个体间距的频率分布普遍高于线段法, 计算结果更准确。同时线段法和三点质心法所获得的个体间距在0.6~0.8 BL范围内的频率达到最大, 该范围为鱼类偏好的距离范围。

**研究亮点:** 对鱼群群体的个体间距进行研究, 通过比较3种不同的计算方法的计算结果得出最接近真实情况的计算方法为三点折线法。同时, 鱼群的个体间距是对鱼群群体运动进行数学建模的重要因子, 可为今后鱼群群体运动的数学建模提供依据。

**关键词:** 鱼群; 个体间距; 空间分布; 偏好距离

**中图分类号:** S 917

**文献标志码:** A

鱼群群体运动是一种典型的自组织现象<sup>[1-3]</sup>, 其过程是每个个体自发地按照某种共同遵守的规律, 协调地、自动地形成有序的结构。目前, 对鱼群群体的数值模拟大部分是基于个体行为的模型(individual based models, IBMs)<sup>[4]</sup>, 将群体中的个体视为独立元, 并赋予特定的行为准则。BREDER<sup>[5]</sup>、AOKI<sup>[6-7]</sup>、HUTH 和 WISSEL<sup>[8-10]</sup>和 REYNOLDS<sup>[11]</sup>将个体间的行为关系设定为“排斥-平行-吸引”的行为规则, 且将规避碰撞视为首要前提。但是, 鱼体在运动中不断地摆动, 个体间的距离是如何计量的, 在上述科学家的研究报告中并没有给予具体的说明, 并且在设定群体运动过程中个体之间的排斥、平行和吸引距离往往根据实际观察的经验值来设定而无具体的分析。

个体间的距离是研究鱼群的空间分布、结构和行为的重要因子。群体中出现频率高的个体经常保持距离范围定义为“偏好距离”。当间距

小于偏好距离而到某程度时, 鱼类个体会出现惊慌和回避现象, 定义为最小距离。影响和决定个体之间间距的感觉器官主要是视觉和侧线。由于侧线的存在, 鱼体可以感知身体各部位的相互距离和速度。

由于鱼体近似柳叶的流线型, 而且不时地摆动, 在处理个体的形状时, 可以采用以下几种简化方法: 用质心处的圆点代表该个体, 或用头尾相连的直线代表该个体, 或用“头-质心-尾”相连的折线代表个体。但是, 实验观察所获得的代表鱼体的点不一定就是质心, 采样时会存在一定误差。同样头尾连线也并不完全代表鱼体运动的方向。然而, 在实验观察和数据分析时, 往往容易确定吻端和尾稍, 以及中心点的空间位置。本研究主要关注个体间的距离, 并不是运动方向和速度, 为此, 需要判定哪种方法所计量的个体间距最具代表性。本文通过实验观察记录个体的空间位置, 用3种方法进行处理, 将计算结果

收稿日期: 2012-04-17 修回日期: 2012-05-31

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201003024); 上海市捕捞学重点学科建设项目(S30702)

作者简介: 张仲秋(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为鱼类行为学。E-mail: h. h. forever@163. com

通讯作者: 周应祺, E-mail: yqzhou@shou. edu. cn

与实际情况进行比较,确定其中较简便又可以满足一定精度要求的方法。

为了获得个体在三维空间分布,在实验室观察中,CULLEN 等<sup>[12]</sup>在照相机上安装一个立体棱镜对鱼群进行垂直拍摄,同时记录个体在三个维度上的投影,获得个体的空间位置。PITCHER<sup>[13]</sup>在动水槽中将镜面作为摄像机所拍摄的背景,利用镜面对个体的反射获得个体的三维空间位置。KUNZ 和 HEMELRIJK<sup>[14]</sup>在鱼群模拟时,将个体视为一条有向线段。柳玲飞等<sup>[15]</sup>利用水槽顶部安设 45° 反射镜面,从单机摄像记录获得个体三维参数。

## 1 材料与方方法

### 1.1 材料

实验对象为鲮鱼 (*Hemiculter bleekeri*),属淡水鲤科类。该实验对象的体型呈柳叶状流线型,喜集群,易采集,且体长较短为  $(8.0 \pm 0.2)$  cm,便于在实验室条件下进行群体行为研究。

采集到的鲮鱼饲养在  $100 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$  的水族箱内,水位保持在  $(40 \pm 0.5)$  cm,水温控制在  $(24 \pm 0.5)$  °C。在水槽的底部与侧壁均贴有大小为  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  的黑色网格线,以此获得个体的空间位置坐标。网格线粗 0.2 mm,在计算个体空间位置时可忽略不计。

### 1.2 方法

本研究采用二台摄像机同步录像,获得个体在各时刻的三维坐标。对于个体间的距离数据采用 3 种不同的计算方法进行处理,获得个体间距的频率分布和个体间触发行为反应的距离条件,通过比较获得最能反映鱼群分布状态的数据采集分析方法。在实验室环境下对不同数量的群体每天进行定时的拍摄,拍摄时长为 1 h。连续观察记录 10 d。

由于实验对象两两之间具有较强的跟随性,因此在保证鱼群在水族箱内具有足够的运动空间的前提下对由 2 ~ 10 尾[体长范围为  $(8.0 \pm 0.2)$  cm]所组成的群体进行录像。

利用一台可 24 h 进行拍摄的监控摄像机 YW/G-AF-DVR-II-A/16-16,200 万像素,从垂直方向拍摄,另一台为 Sony HDR-SR10 高清摄像机,228 万像素从正面方向拍摄。一旦开始录像,实验人员将离开实验地点,在录像的过程中保证

亮度和光照的均匀,保证无噪音,振动和气味等干扰。对录像进行截图,时间间隔为 1 s。

## 1.3 计算方法

### 1.3.1 质心法

由于鱼体在运动的过程中,因鱼体的摆动而发生形状变化,为了便于计算,可以将个体近似视为一个质点,一般取鱼体最宽处。忽略个体的体形大小与变化,简化计算个体之间的距离。质心的坐标公式如下:

$$D_{ij}(t_n) = \sqrt{(X_j(t_n) - X_i(t_n))^2 + (Y_j(t_n) - Y_i(t_n))^2 + (Z_j(t_n) - Z_i(t_n))^2} \quad (1)$$

式中: $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别表示个体在直角坐标系中相应的坐标, $i$ 、 $j$  表示所对应的个体, $D$  为个体之间在同一时刻的个体间距, $t_n$  表示时间。

### 1.3.2 线段法

将个体视为空间中的一条头尾相连的有向线段,线段端点对应头部与尾部的坐标,通过计算空间中两两线段之间的最小距离从而获得个体之间的距离关系。计算过程如下

$$\begin{cases} X = x_{head} + s(x_{tail} - x_{head}) \\ Y = y_{head} + s(y_{tail} - y_{head}) \\ Z = z_{head} + s(z_{tail} - z_{head}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别表示个体在直角坐标系中相应的坐标, $s$  为参数, $x_{head}$ 、 $x_{tail}$ 、 $y_{head}$ 、 $y_{tail}$ 、 $z_{head}$ 、 $z_{tail}$  分别表示线段的头尾处的坐标。

当参数  $0 \leq s \leq 1$  时,是线段上的点;当参数  $s < 0$  或者  $s > 1$  时,则是线段延长线上的点,即超出鱼体长度范围,故不予考虑。

同理可得:

$$\begin{cases} U = u_{head} + t(u_{tail} - u_{head}) \\ V = v_{head} + t(v_{tail} - v_{head}) \\ W = w_{head} + t(w_{tail} - w_{head}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U$ 、 $V$ 、 $W$  分别表示个体在直角坐标系中相应的坐标, $t$  为参数, $u_{head}$ 、 $u_{tail}$ 、 $v_{head}$ 、 $v_{tail}$ 、 $w_{head}$ 、 $w_{tail}$  分别表示线段的头尾处的坐标。

$(X, Y, Z)$  与  $(U, V, W)$  两点之间的距离为

$$D = \sqrt{(X - U)^2 + (Y - V)^2 + (Z - W)^2} \quad (4)$$

距离的平方为

$$f(s, t) = D^2 \quad (5)$$

要求两线段之间的最短距离,也就是要求  $f(s, t)$  的最小值。

对  $f(s, t)$  分别求关于  $s$ 、 $t$  的偏导数,并令偏

导数为 0:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(s,t)}{\partial s} &= 0 \\ \frac{\partial f(s,t)}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

当求出的参数  $s$ 、 $t$  的值满足  $0 \leq s \leq 1$ 、 $0 \leq t \leq 1$ , 说明式(4)就是这两条线段之间的最短距离。

如果从方程组求出的参数  $s$ 、 $t$  的值不满足  $0 \leq s \leq 1$ 、 $0 \leq t \leq 1$ , 说明不可能在这两条线段上找到最小距离。此时, 可以通过计算头尾坐标到线段的距离, 找出最小的距离, 将其视为个体之间的最短距离。

当参数  $s$  的值满足  $s < 0$ , 个体间的最短距离就是头部到线段之间的最短距离, 即

$$D_{head} = \sqrt{(X - x_{head})^2 + (Y - y_{head})^2 + (Z - z_{head})^2} \quad (7)$$

如参数的值满足  $s > 1$ , 个体间的最短距离就是尾部到线段之间的最短距离, 即

$$D_{tail} = \sqrt{(X - x_{tail})^2 + (Y - y_{tail})^2 + (Z - z_{tail})^2} \quad (8)$$

### 1.3.3 三点折线法

由于鱼类在运动过程中体型并非成简单的直线, 而是呈现柳叶形。当改变运动方向时, 因不同的旋转角度鱼体呈现出不同的弯曲程度。由于本实验主要探索个体间的间距对分布密度和结构的影响, 所以, 选用个体的头部、重心和尾尖这 3 个坐标点相连以近似反映个体的空间形状和位置, 由此计算获得两个个体间不同坐标点之间的相互距离(图 1)。



图 1 线段法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of segment method

$\min(D_{hh}, D_{hg}, D_{gh}, D_{gg}, D_{gt}, D_{th}, D_{tg}, D_{tt})$  (9)  
式中:  $D$  表示个体间的距离,  $h, g, t$  分别表示鱼体各部位的坐标, 对计算结果取最小值, 利用 C 语言编写程序进行计算。

采用 3 种不同的计算方法分别得到个体在运动过程中身体各部分之间的相互间距。为了便于不同体长的鱼类之间进行比较, 采用动物行为学和鱼类行为学常用的以个体体长 (body

length, BL) 为长度单位的计量方法。



图 2 实验对象示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fish

AOKI<sup>[6-7]</sup>、HUTH 和 WISSEL<sup>[8-10]</sup> 在建立模型时将个体与个体之间的无反应距离设定为 5 BL, 即超过 5 倍该个体体长的距离时, 个体之间将不产生任何作用, 视为无反应距离。本文亦只对 5 倍体长范围内的间距进行统计分析。统计时, 以 0.5 BL 为单位间隔。

## 2 结果

### 2.1 个体间距的频率分布

应用 C 语言编写计算程序, 将 3 种计算方法的所有计算结果在 0.5 BL 间隔的范围内出现的频率进行统计, 见图 3。

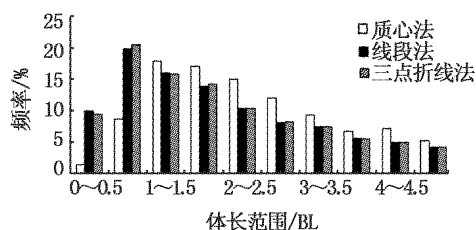


图 3 3 种计算方法所获得的个体间距的出现频率

Fig. 3 Frequency distribution by three calculation methods

在 0 ~ 0.5 BL 的范围内由线段法所计算得到的频率为 9.91%, 略高于三点折线法的频率 9.32%。而在 0.5 ~ 1 BL 的范围内三点折线法的频率为 20.47%, 略高于线段法的频率 19.83%。在 1 ~ 5 BL 的范围内两种计算方法的频率分布几乎相同。通过质心法所计算得到的频率分布与其它两种方法存在较为显著的差异。利用  $t$  检验成对样本均值分析, 对 3 种方法两两进行检验, 质心法与线段法和三点折线法的结果  $P(\text{双尾}) = 0 < 0.05$ , 证明其计算结果与其它两组数据具有显著性差异, 而线段法与三点折线法的  $P(\text{双尾}) = 0 < 0.05$ , 证明两种计算结果也存在显著性差异。对 0 ~ 5BL 范围内的 3 种计算方法的结果进行描述性统计, 见表 1。

表 1 3 种计算方法的描述性统计表  
Tab.1 Descriptive statistics table of three calculation methods

	质心法	线段法	三点折线法
平均	2.348	1.926	1.924
标准误差	0.023	0.024	0.024
标准差	1.158	1.267	1.259
方差	1.342	1.606	1.584
最小值	0.125	0.021	0.125
最大值	5	4.993	4.995
置信度 95%	0.044	0.047	0.047

2.2 个体间距与群体尾数的关系

利用 3 种计算方法获得了群体的个体间距及其出现的频率,再对不同尾数所组成的群体的情况进行分析比较(图 4),图 4 显示由 2 至 5 尾所组成的群体中,个体间距随着群体尾数的增加

没有明显的变化。录像记录表明,此时群体运动在很多情况下呈现无序的状态。而当个体数量继续增加时,聚集现象的趋势趋于明显,并且随着尾数的不断增加,个体间距的频率分布呈现出明显的趋势,即群体中个体数量越多,则在间距为 0.5~2 BL 范围内出现的频率就越高。其中线段法和三点折线法计算结果的最高频率随着尾数的增加基本固定在 0.5~1 BL 的范围内,而质心法的计算结果随着尾数的增加最高频率出现的范围不同。数据分析表明鱼群群体运动过程中个体间距与群体的数量存在显著的关系,在个体尾数较少时并不十分明显,但是一旦群体中的尾数增加,则这种趋势就会很明显,而且个体在群体运动中往往将个体间距保持在一定的范围内,图 4 反映了这一现象。

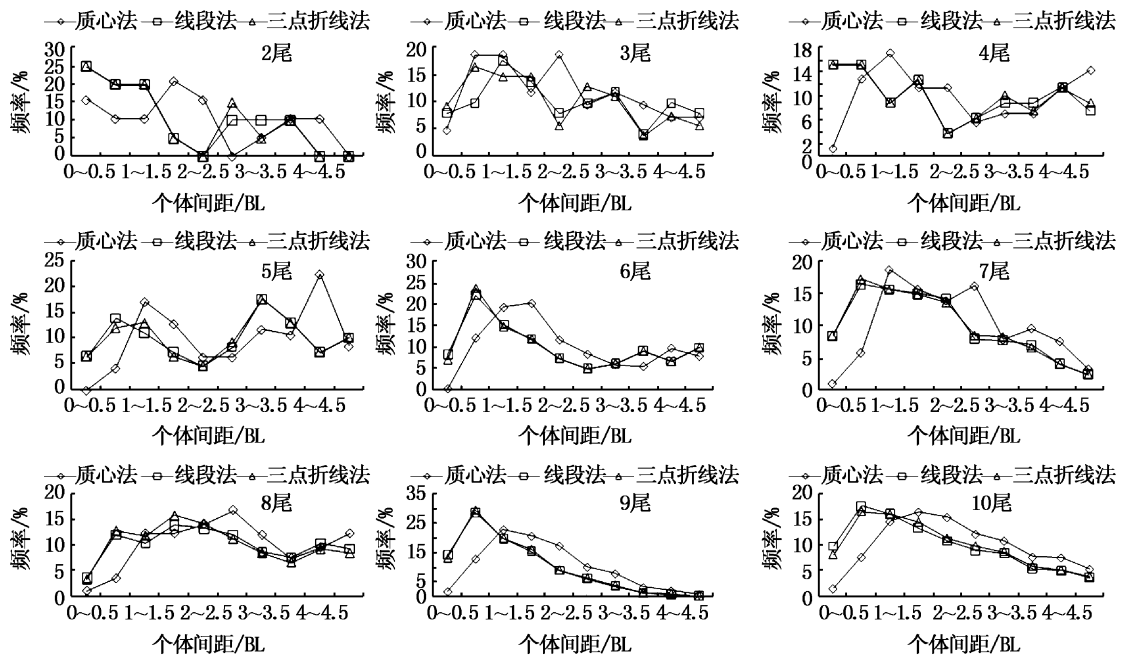


图 4 个体间距与群体尾数的关系

Fig.4 The relationship of distance among individuals and the number of individuals

2.3 3 种计算结果的频率分布

将 3 种计算结果进行累加,得到频率分布图(图 5)。其中质心法所得到的计算结果的累计频率明显低于其它两种方法,而线段法和三点折线法的计算结果的累计频率几乎重合。

将 3 种计算方法在 0~5 BL 范围内以 0.2 BL 为间隔进行排列,结果如图 6。线段法和三点折线法的计算结果在 0.6~0.8 BL 范围内出现频

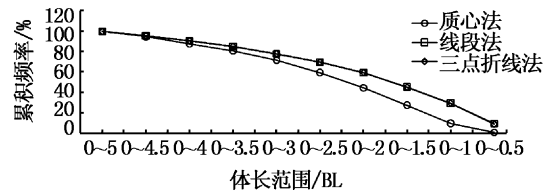


图 5 3 种计算结果频率累计图  
Fig.5 The frequency cumulative graph of three methods

率最高,此时其值分别为 8.76% 和 9.39%,三点折线法的频率略高于线段法。将个体分布出现频率较高的距离范围定义为偏好距离,则该实验

对象的偏好距离范围为 0.6 ~ 0.8 BL,这也与 PITCHER<sup>[13]</sup>、PITCHER 和 PARTRIDE<sup>[16]</sup> 的实验结果相接近。

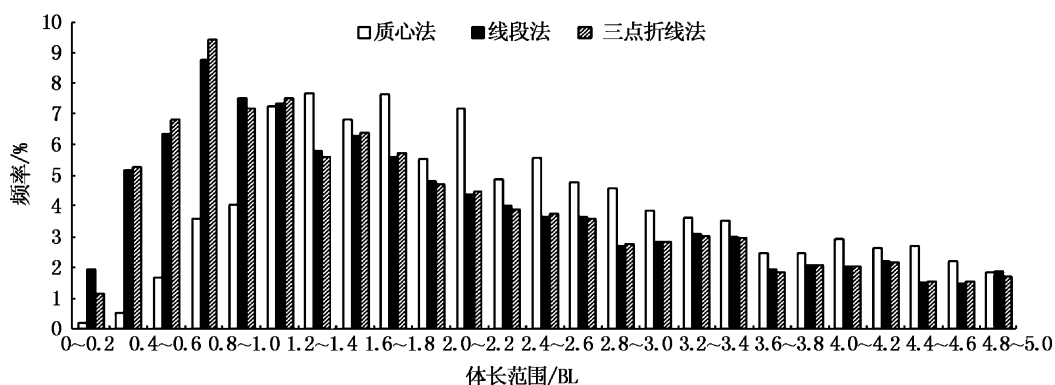


图 6 个体间距在 0 ~ 5 BL 范围内的频率分布

Fig. 6 The frequency distribution of individual distance in the range of 0 - 5 BL

### 3 讨论

本文主要关注个体在运动过程中每一时刻的相互间距,并利用数学方法对鱼体复杂的运动状态进行简单化的抽象,不考虑运动的速度和方向。质心法的累计频率在小于 4.5 BL 时明显低于其它两种计算方法,并且个体间距越小,其频率累计值相较于其它两种计算结果也越小。在计算鱼类个体间距时,由于鱼类在运动的过程中体型是不断变化的,虽然从理论上讲,质心能够准确地反映出个体的运动方向、速度和轨迹,但是鱼体摆动过程仅仅以一个点来代表会产生较大的误差的。难以反映鱼体间真正的距离,所以利用质心法计算个体间距并不是较好的方法。

图 4、图 5 和表 1 都表明线段法与三点折线法的频率分布大体相似,从图 6 可以发现,当体长范围大于 0.2 BL 时,三点折线法的频率普遍大于线段法,证明在绝大部分的情况下,三点折线法的计算精度要高于线段法,并且三点折线法综合反映了个体视觉和侧线对个体间距所产生的影响,因此建议在计算运动过程中鱼类个体之间的距离采用三点折线法。

造成线段法和三点折线法的计算结果相似的原因:如果个体中处于基本平行状态的数量较少,即群体处于无序状态,则线段法实际上采用头尾的点对点计算,故与三点折线法的计算结果趋向一致。

本实验在人工实验室的条件下进行,由于条件的限制,无法对具有较大数量的鱼群群体进行个体间距的计算。但是无论群体数量多少,个体体型如何变化,只要获得个体的空间位置,并完全可以利用三点折线法在计算机的帮助下进行计算得到结果。

如果在研究鱼类个体运动时要考虑鱼体摆动,可以在三点折线法的基础上,对代表头部的直线加上回转角速度,并给代表鱼尾的直线赋予摆动幅度等参数,幅度的大小可以沿体长线性增加,从而提高模拟鱼体运动状态的逼真度。

通过上述观察的数据分析的结果,获得个体间的偏好间距为 0.6 ~ 0.8 BL,由此可以进一步研究鱼体体位和间距与鱼的视觉能力和侧线的关系,包括视野、视距和侧线感觉灵敏度等。

### 参考文献:

- [1] HIROSATO N. Self organizing dynamic model of fish schooling [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1994, 171: 123 - 136.
- [2] IAIN D C, KRAUSE J, SIMON A L, et al. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move [J]. *Nature*, 2005, 433(7025): 513 - 516.
- [3] JACQUES G, CHRISTIAN J, GUY T. Key behavioral factors in a self-organized fish school model [J]. *Animales Zoologici Fennici*, 2008, 45: 415 - 428.
- [4] GRIMM V. Individual-based models [J]. *Ecological Models*, 1959, 198: 115 - 126.
- [5] BREDER C M. Studies on social groupings in fish [J]. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 1959,

- 117; 397 – 481.
- [6] ICHIRO AOKI. A simulation study on the schooling mechanism in fish [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1982, 48(8): 1081 – 1088.
- [7] ICHIRO AOKI. Internal Dynamics of Fish Schools in relation to inter-fish Distance[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1984, 50(5): 751 – 758.
- [8] HUTH A, WISSEL C. The movement of fish schools: a simulation model[J]. *Biological Motion*, 1990; 578 – 590.
- [9] HUTH A, WISSEL C. The simulation of the movement of fish schools [J]. *Theoretical Biology*, 1992, 156: 365 – 385.
- [10] HUTH A, WISSEL C. The analysis of the behavior and the structure of fish schools by means of computer simulations [J]. *Theoretical Biology*, 1994, 3: 169 – 201.
- [11] REYNOLDS C W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model [J]. *Computer Graphics*, 1987, 21 (4): 25 – 34.
- [12] CULLEN J M, SHAW E, BALDWIN H A. Methods for measuring the three-dimensional structure of fish schools[J]. *Animal Behavior*, 1965, 13: 534 – 543.
- [13] PITCHER T J. The three-dimensional structure of schools in the minnow, *phoxinus phoxinus* (L.) [J]. *Animal Behavior*, 1973, 21: 673 – 686.
- [14] KUNZ H, HEMELRIJK C K. Artificial fish schools: collective effects of school size, body size, and body form[J]. *Artificial Life*, 2003, 9: 237 – 253.
- [15] 柳玲飞,周应祺,钱卫国. 红鼻鱼群体结构的数学建模与仿真研究[J]. *水产学报*, 2010, 34(12): 1869 – 1876.
- [16] PITCHER T J, PARTRIDE B L. Fish school density and volume[J]. *Marine Biology*, 1979, 54: 383 – 394.

## Comparative study on the distance measurements among individuals in the fish school by three methods

ZHANG Zhong-qiu<sup>1</sup>, ZHOU Ying-qi<sup>1, 2, 3</sup>, QIAN Wei-guo<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Ming<sup>4</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>

(1. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 3. *Key Laboratory of Shanghai Education Commission for Oceanic Fisheries Resources Exploitation, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 4. *Information College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

**Abstract:** According to the video records of spatial distribution of individuals in the fish school taken in the lab, the distances among individuals in fish school measured and calculated by the body-centroid method (BCM), segment method (SM) and broken line of three point method (BLM) indicate that the most of distances are varied in the range of 0.5 – 2 times body length (BL) while the number of individuals increasing to a certain level. The results by SM were basically same as the one from BLM, and the precision of BCM was lower than the others. When the body length was greater than 0.2 BL, the frequency of distance appearance of BLM was generally higher than SM's and its result was more precise. And the distances calculated by means of the SM and BLM were mostly allocated in the range of 0.6 – 0.8 BL, which revealed that the range might be the preferred distance of the fish.

**Key words:** fish school; distance among individuals; spatial distribution; preferred distance