

实验室条件下麦穗鱼群体动态结构的表达

王军¹, 周应祺^{1,2,3,4*}, 钱卫国^{1,2,3,4}, 曹道梅^{1,2,3,4}, 李玉伟^{1,2,3,4}, 陈鹿¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 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. 上海海洋大学远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 为了探究麦穗鱼群体动态结构的特征参数, 以及这些参数可能反映的行为机理, 本实验使用2台摄像机从俯视和侧视2个方向同时拍摄由13尾麦穗鱼组成的群体, 获取连续时间内麦穗鱼群体中各个体的三维位置数据, 对个体间最近邻近距离、视角、转角变化量、个体游泳速度等参数进行分析。结果表明: 麦穗鱼个体最近邻近距离多数处于0.5~2 BL, 偏好的最近邻近距离为0.6~0.8 BL; 麦穗鱼总是将最邻近的个体保持在本鱼80°视野范围内; 避免碰撞时, 个体鱼转角改变量为0~30°; 在无人干扰的自然环境下, 个体鱼以0.75 BL/s左右的速度配合其他个体保持运动速度一致性。实验观察证实, 视觉对麦穗鱼个体间的分布起着关键性作用, 此外麦穗鱼群体动态结构还受到个体状态(饱食与饥饿)的影响。

关键词: 麦穗鱼; 鱼群; 群体动态结构; 最近邻近距离; 视觉

中图分类号: Q 149; S 917.4

文献标志码: A

集群行为是大多数鱼类典型行为之一。一般认为是适应生存需要和进化的结果, 集群可以增强防御能力或攻击力; 可更快地获得食物源信息, 提高觅食效率; 节省个体能量消耗, 减少游泳阻力; 降低被捕食的概率等^[1-5]。此外, 鱼群还具有个体所不具备的群体功能^[6-9]。

一般从鱼群结构的变化来探索鱼类集群行为的机理, 并通过实验观察或模型模拟等方法对鱼群的结构进行研究, 例如鱼群的外部结构、内部结构、动态结构、次群体结构、自组织状态等。国内外很多学者对鱼群动态结构的特征参数和影响因素进行了探究, 主要涉及曲率、最小个体间距、游泳速度、游泳角速度、方向性、群体大小、延展性、落单比例、碰撞几率、信息鱼数量等^[3,10-16]。周应祺^[17]在长期研究鱼类行为的过程中, 认为以下7项最能反映鱼群群体结构的参数: 密度、群体大小、个体容量、最近邻近距离(nearest neighbour distance, NND)、偏好距离与偏好角度、个体相对

距离以及群体形状与速度的动态关系。这些特征参数不仅反映了鱼群群体结构, 而且还反映了一定的行为机理, 如视觉、侧线、嗅觉等在鱼群保持和形成中的作用等^[18]。

本研究考虑到鱼类的生物学习性(如昼行性或夜行性、光照强度和视觉能力、饥饿程度等)可能对个体间的关系和群体空间分布有影响, 故在实验室控制条件下, 以相同的理化条件在同一时段进行录像观察, 以便探索表征麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)群体结构的参数以及这些参数与鱼的感觉能力之间的关系。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究选用麦穗鱼为实验对象, 该种属脊索动物门辐鳍鱼纲鲤形目鲤科麦穗鱼属麦穗鱼种, 分布广, 杂食性, 喜集群。在最佳生长水温25~30℃时, 摄食旺盛; 7—9月生长速度最快, 而后变

收稿日期: 2013-12-04 修回日期: 2014-03-09

资助项目: 上海市教委重点课程建设项目(2013-125); 上海海洋大学研究生科研基金(B-5008-11-0009118); 上海海洋大学博士科研启动基金(A-0209-13-0105418); 上海市研究生教育创新计划大文科研究生学术新人培育计划(B1-5201-13-0000-10)

通信作者: 周应祺, E-mail: yqzhou@shou.edu.cn

化较小,呈现稳定状态^[19]。在上海地区易采集和饲养。个体较小,便于在实验室水族箱条件下进行群体行为研究。

2013年9月26日傍晚在上海海洋大学校内河,使用撑架式敷网在同一地点同时捕获野生麦穗鱼15尾,其中3尾因受伤而被放流。实验对象的体长(8.0 ± 0.1) cm,体宽(0.9 ± 0.1) cm。

1.2 实验方法

将捕获的实验鱼暂养在具有循环系统(该系统具有温控、曝氧、消毒、水循环等功能)的实验水槽中,2 d后开始实验观察(避免时间过长影响其野生习性)。实验水槽长×宽×高为4.00 m×0.68 m×0.45 m,相当于实验鱼50倍体长或75倍体宽的空间。水槽底部设置1.00 m×0.68 m白色塑料板,用以提高拍摄时的反差,突显鱼体轮廓线、尤其是尾鳍梢的清晰度。水槽的侧面附着不透明的绘有格网的白板。网格将有助于对畸变进行修正。暂养和实验期间,温度控制在(16 ± 0.2) °C;水槽四周(除正面之外)使用黑色帘布罩住,实验室墙壁均为黑色,避免不必要的光亮或反射影响鱼类的行为。光源下方设有乳白透明板来保持均匀。

每天20:00定时投食,1天1次。投食采用自动投饵器,投食位置每天改变,以保持鱼类运动的随机性。投食1 h后将残留的食物用吸管吸走,避免饲料对鱼类的运动行为产生影响。饲料采用嘉兴飞鸣宠物用品有限公司生产的下沉性锦鲤专用粮。

1.3 数据获取

使用2台摄像机同步录像。一台摄像机(智能型红外匀速球装置,波特率2 400, Pelco-D协议,供电AC24V)设置在实验水槽的正上方2 m高处;另一台摄像机(索尼高清摄像机,型号Sony HDR-SR10,228万像素)设置在水槽的正前方约5 m处,以降低所拍摄图象的畸变^[20]。2台摄像机利用YW-AF-DVR-II-A/16-16(Ver. 60)硬盘录像机(上海宇文电子科技有限公司生产)同步拍摄(25帧/s),每天在喂食3 h后开始拍摄,每次拍摄120 min,连续拍摄2 d。整个实验过程中,为了防止对实验造成人为的干扰,实验和录像控制分别在不同的房间里进行;同时,光照和亮度均匀,曝氧装置暂停,保证无噪音、振动和气味等干扰。此外,还进行

相隔48 h喂食的拍摄,以便对饥饿与个体空间分布的关系进行比较分析。

利用硬盘录像机的截屏功能,获取不同时刻垂直和水平拍摄的影像。使用Getdata软件获取视频中各个体在同一时刻的吻端、质心(近似为离头部1/3处)、尾部的三维位置数据^[11,21]。对所获得的数据进行畸变校正^[20]后待用。本实验共获取录像240 min,剔除模糊不清的画面,可供分析研究的有89 min 32 s。Cha等^[22]在实验室采用56 s的延时影像定量研究幼石斑鱼的游泳行为,Kawaguchi等^[23]采用5 s的影像来研究南极磷虾(*Euphausia superba*)的集群行为。本实验采用2种数据采样方法,方法1:提取连续视频62 s,共300帧影像;方法2:断点采样,在余下88 min 30 s的录像资料中,每隔2 min连续取5帧,共计220帧影像。对录像中的各个体按帧进行三维数据提取,每间隔0.2 s取1帧。对这2种采样方法的结果进行比较分析。

1.4 数据处理

提取和计算获得最邻近距离、视角(vision angle, VA)、转角改变量、游泳速度等参数,用以反映麦穗鱼群的群体结构,由此探究影响鱼类集群行为的关键参数和机理。

NND计算方法 由于麦穗鱼的身体呈柳叶型,游动时总是“摇头摆尾”,对表达个体形状的几何参数的选择将影响数据的质量。观察表明麦穗鱼游动时,头部到质心处的体段几乎不变形。故本实验中将麦穗鱼个体头部到质心处看作是空间中的一条有向线段,即线段的两端点分别对应个体鱼的头部与质心处坐标。通过测量计算两空间线段之间的最小距离可获得某一时刻相邻个体之间的NND。计算方法与张仲秋等^[11]的线段法类似,但将线段法中的尾部坐标替换为该实验数据的质心坐标。在计算NND时,设定其中一个体为本鱼,则定义离其距离最近的为邻近个体,离其距离第2远的个体为次邻近个体。

视角的计算 为了探索个体间的最近距离是否受视觉的影响,故测量个体间的视角,定义为:由邻近鱼全体长(吻端至尾端)在本鱼单眼视野中占有的范围,即两端点与本鱼眼球连线的夹角。由于麦穗鱼的眼睛较小,无法精确获取其位置,故利用个体鱼吻端位置代替眼睛位置。由于

个体鱼的眼睛分布在左右边,故在计算视角时考虑到邻近个体、次邻近个体与本鱼的角度。在某一时刻,本鱼(F)与邻近个体(N_1)和次邻近个体(N_2)之间的视角计算如图1所示。若邻近个体与次邻近个体均在本鱼的一边,则只考虑本鱼与邻近个体间的视角。

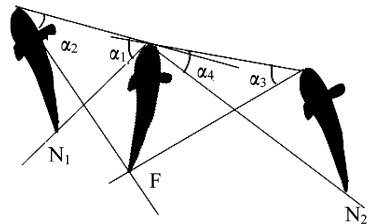


图1 视角的测量

F为本鱼, N_1 为邻近个体, N_2 为次邻近个体; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为本鱼相对邻近个体的左视角、邻近个体相对本鱼的右视角、次邻近个体相对于本鱼的左视角、本鱼相对于次邻近个体的右视角

Fig.1 Measurements of vision angle (VA)

α_1 , α_2 , α_3 , α_4 were defined respectively as left VA of N_1 (the nearest neighbor fish) to F (own fish), right VA of F to N_1 , left VA of F to N_2 (the sub-nearest neighbor fish), right VA of N_2 to F

个体游泳速度 以个体鱼吻端为测量点,若在 t 时刻,个体鱼吻端坐标为 (x_t, y_t, z_t) ,在 $t + \Delta t$ 时刻,个体鱼吻端坐标为 $(x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t}, z_{t+\Delta t})$,则个体鱼在 $t + \Delta t$ 时刻的瞬时速率为

$$v = \frac{\sqrt{(x_{t+\Delta t} - x_t)^2 + (y_{t+\Delta t} - y_t)^2 + (z_{t+\Delta t} - z_t)^2}}{\Delta t}$$

2 结果

本实验对象的体长为 (8.0 ± 0.2) cm,利用双摄像头垂直-水平拍摄法获取的实验对象平均体长为 8.01 cm,相对误差为 0.125%,与个体鱼真实体长相差很小。

麦穗鱼在实验条件下游动时尾巴摆动频率为 2.43 ~ 2.65 Hz,周期为 0.38 ~ 0.41 s(通过录像观察所得),本实验采用 0.4 s 作为 1 个周期。

2.1 2种数据采样方法的比较

利用两独立样本 t 检验对通过方法 1 与方法 2 计算所得的本鱼视角与 NND 分别进行检验,结果显示这 2 种方法所得到的本鱼视角与 NND 均存在显著性差异 ($P = 0.00 < 0.05$)。由于鱼是“摇头摆尾”地不停运动,尾巴摆动会影响到视角与 NND 的计算,故采用完整周期探究鱼群空间

结构。方法 1 采用了 150 个完整周期,方法 2 中每隔 2 min,采用 2.5 个周期。考虑到动作的连续性,确定采用方法 1,即采用连续录像资料作为群体结构分析的依据。

2.2 NND 与视角

从 2 种采样方法获得的不同视角下的 NND 分布图(图 2)来看,视角随 NND 的变化趋势基本相似。所有的点都在包络线的下面,而该包络线就是视角与 NND 的函数,可以推断鱼群中个体间的距离和最小距离主要由视觉决定。当过于靠近时,超过一定视角时,鱼类个体就会相互离开。

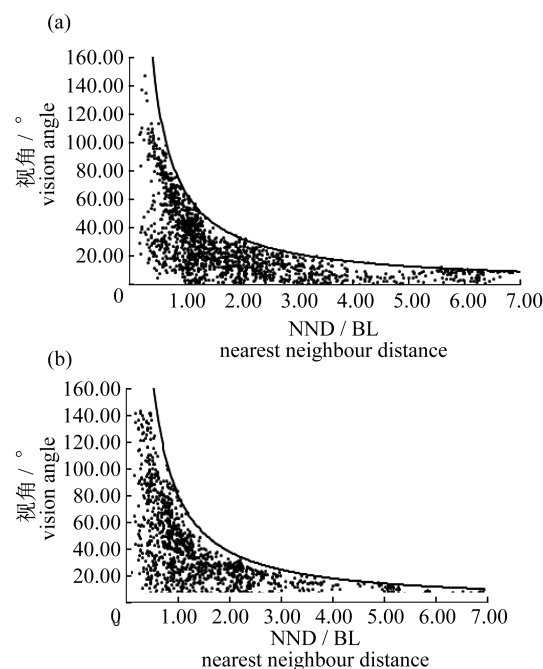


图2 不同 NND 下的本鱼视角分布

(a)方法 1 连续采样法的结果,(b)方法 2 断点采样法的结果,BL.体长

Fig.2 The distribution of focal fish's VA under varied NND

(a) continue sampling method 1, (b) interval method 2, BL. body length

在该小群体中,个体间的 NND 不断变化,在连续 1 min 内,各个体间的 NND 最小为 0.16 BL,最大为 6.99 BL。NND 大于 5 BL 的比率为 5.76%;绝大部分 NND 处于 0.5 ~ 2 BL 间,其中,0.5 ~ 1 BL 间出现的比例最高,为 29.83%。将 0 ~ 5 BL 范围内的 NND 以 0.2 BL 为间隔进行排列。其中,0.6 ~ 0.8 BL 频率最高,为 15.56% (图

3)。将个体 NND 出现频率较高的范围定义为偏好最近邻近距离,则该实验对象偏好最近邻近距

离为 0.6 ~ 0.8 BL。这与张仲秋等^[11]计算的个体偏好距离结果相一致。

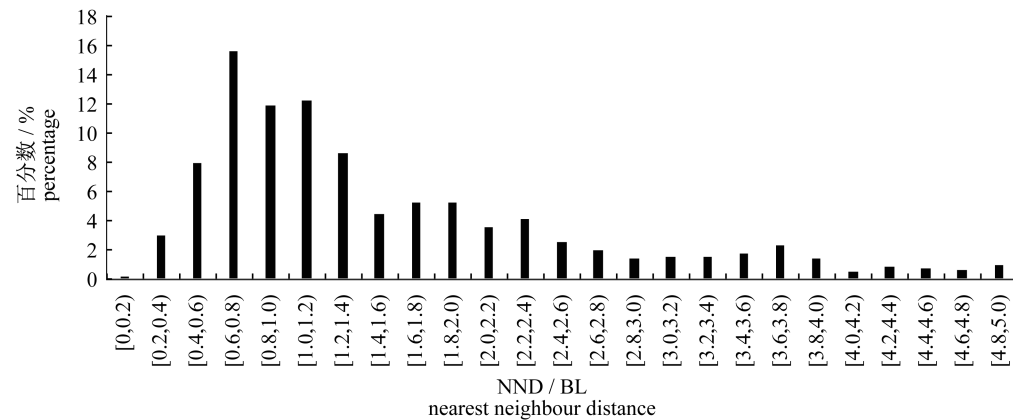


图 3 个体最近邻近距离在 0 ~ 5 BL 范围内的频率分布

Fig. 3 The frequency distribution of nearest neighbor distance in the range of 0 - 5 BL

观察记录表明,在群体中,个体将自己的邻近个体锁定在一个比较固定的方位角上,并与之保持一定的距离运动。它们的相对方位、相对位置比较稳定(图 2),形成了一个稳定的群体。在最近邻近距离时,视角范围分布主要集中于 0 ~ 80° (占 95.83%);在次邻近距离时,视角分布比较集中,基本上都在 0 ~ 60° 范围内。在视角整体分布中,0 ~ 60° 范围内占 93.13% (图 4)。

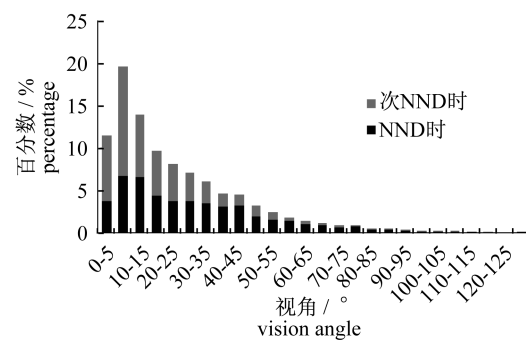


图 4 视角分布

Fig. 4 The frequency distribution of VA

2.3 转角变化量

假设在某一时刻,本鱼与另一个体间的距离靠近,为了避免在下一刻发生碰撞,两个体将改变方向,将连续时间内各个体的方向改变量(时间间隔: 0.2 s)统计分布如图 5,改变量在 30° 以内占 90.18%。这与 Inada^[24]在探究鱼群群体发生急转时,个体移动方向在 0.5 s 内改变 15° 的结果相似。

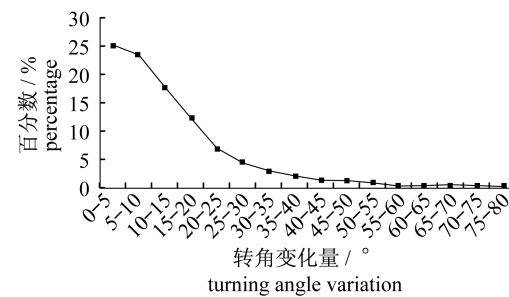


图 5 转角变化量分布

Fig. 5 The frequency distribution of turning angle variation

2.4 个体游泳速度

根据实验室录像观察,麦穗鱼群中个体速度较一致。在无外界因素干扰情况下,喂食 3 h 后,个体鱼的最小游泳速度为 0.63 cm/s (0.08 BL/s),最大游泳速度为 25.84 cm/s (3.23 BL/s),个体游泳速度大致分布于 0.12 ~ 2.00 BL/s (占比 95.49%),较大速度(大于 2.00 BL/s)通常出现在较小最近邻近距离时,较小速度(小于 0.12 BL/s)通常出现在贴近缸壁拐弯时。规定在索饵、漫游等状态下的速度平均值或者一般游泳速度的平均值为巡航速度^[12],则麦穗鱼个体的巡航速度为 5.95 cm/s (0.75 BL/s),与大多数鱼类的巡航速度相同。Viscido 等^[15]在探究影响和保持鱼群结构的因素中,将在同一时刻群体中各个体鱼的速度平均值作为该时刻的群体速度。据此,0.75 BL/s 也是麦穗鱼群的平均群体速度。

2.5 个体状态对群体结构的影响

本实验中,麦穗鱼在喂食后 3 h 以及喂食后 48 h 的群体速度随时间变化(1 步长 = 0.2 s)如图 6 所示。利用两独立样本 t 检验对不同状态下群体速度进行分析,结果表明个体鱼不同状态(饱食、饥饿)对群体速度有着显著的影响($P = 0.01 < 0.05$, 双尾)。因此,个体状态也是影响鱼群群体结构的重要因素之一。

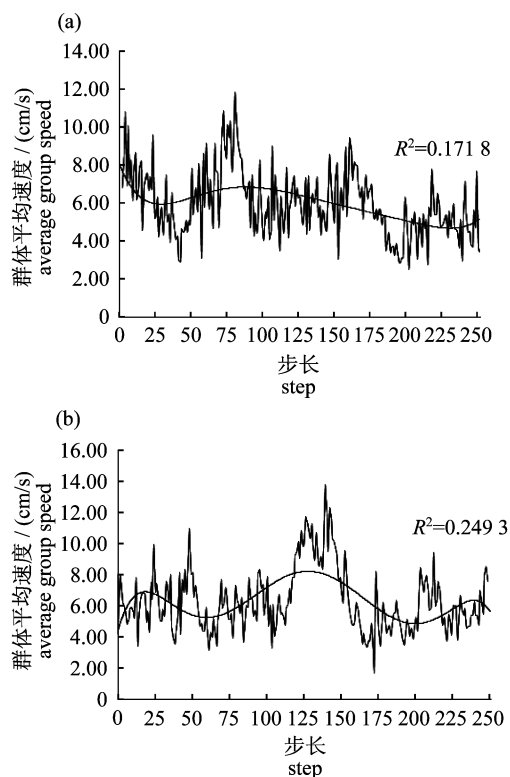


图 6 不同状态下群体瞬时速度的变化曲线

(a) 喂食后 3 h 时群体瞬时速速率, (b) 喂食后 48 h 时群体瞬时速速率

Fig. 6 The curves of instantaneous group velocity under different status

(a) the curves of instantaneous group velocity after feeding 3 hours, (b) the curves of instantaneous group velocity after feeding 48 hours

3 讨论

3.1 视觉在麦穗鱼保持群体结构以及集群行为中的作用

研究和观察实验表明,视觉作为决定鱼类行为反应的主要感觉,与群体行为有着密切的关系^[13,25-26]。本研究通过观察和统计视角与最近邻近距离间的关系,探究视觉在集群行为中的作用。

视觉在麦穗鱼集群行为中起着重要的作用。随着个体间距离减小,个体鱼将逼近自己的邻近个体锁定在一定的视野内,保持一定的距离(0.5~2 BL),并与其保持平行状态。这与 Shaw 等^[27]的研究结果基本一致。

3.2 采用关键参数来探究鱼群群体结构

当邻近个体的影像超过本鱼视野 80° 时,本鱼感受到邻近个体的“胁迫”,急速调整(加快或者减慢游泳速度)自己的位置,远离邻近个体,与之保持一定的距离;当邻近个体在本鱼视野的最大影响范围之内且远小于 80° 时,本鱼将会靠近且与邻近个体保持一定的距离。当本鱼调整位置和方向时,可以用转角变化量表达,该量可反映个体鱼在遇到胁迫或者危险时的应激反应。在本研究中,麦穗鱼个体的转角变化量较一致,在 30° 以内,表现为对应激反应行动一致性。

Partridge^[26]把时刻调整自己的速度和方向以配合群体其他成员的 3 尾或者 3 尾以上的鱼而得到的组合称之为鱼群(school),该定义清晰地表达了鱼群结构与特征,被广大学者一直沿用至今,尤其在鱼群数学模型的仿真研究中,次群体的数量为 5~7 尾。速度匹配、个体间位置相对稳定是形成鱼群或次群体的必要条件。本研究发现:最近邻近个体距离、视角、转角变化量、个体游泳速度反映了形成群体所必备的条件,是研究鱼群群体结构的主要参数。

3.3 个体鱼尾数、池壁、实验条件等对群体结构的影响

鱼类群体结构会受到很多因素的影响,如个体状态(有无损伤、饥饿状态等)、个体数量、噪声、光照、温度、含氧量、食物、捕食者等^[3,26-30]。本实验中,实验对象在实验水槽中暂养 2 d,身体状况良好;在一定的光照、温度等条件下进行实验,避免波动、噪声等人为影响。

麦穗鱼在野外具有很强的集群性。数量达到 12 尾时,它们会形成具有一定集群特性的群体。但个体鱼数量对个体间的 NND 有着较大的影响,总体积一定时,NND 会随着个体数量的增多而逐渐变小;集群性会随着个体数量的增多而增强^[31-32]。故可在适当体积下,增加个体鱼数量来探究麦穗鱼群体结构的变化。

实验室条件下,池壁对群体结构有影响^[23]。麦穗鱼群体不时贴近槽壁进行游动,槽壁的阻拦

使边缘效应较为明显。可选用个体较小的实验对象或者采用较大实验水槽来减小边缘效应的影响。

实验中,必须保持实验室内光照和亮度均匀不变,同时采用定时观察,避免鱼类的昼夜节律的影响。鱼类个体具有克流能力,故在有水流的情况下,个体或者群体游泳速度和方向可能会受到影响。本实验在无水流条件下进行,有助于分析视觉等感知能力对群体结构的影响,至于水流的影响程度,可以在专门的控制条件下进行。控制水流流速、温度、光线或其他理化因子以及个体鱼生物学状态等因素来探究影响鱼类群体结构的因素将是下一步研究的方向。

感谢李亮在数据计算方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] Larsson M. Why do fish school? [J]. Current Zoology, 2012, 58(1):116 - 128.
- [2] Krause J, Butlin R K, Peuhkuri N, et al. The social organization of fish shoals: a test of the predictive power of laboratory experiments for the field [J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2000, 75(4):477 - 501.
- [3] Couzin I D, Krause J, Franks N R, et al. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move [J]. Nature, 2005, 433(7025):513 - 516.
- [4] Pavlov D S, Kasumyan A O. Patterns and mechanisms of schooling behavior in fish: a review [J]. Journal of Ichthyology, 2000, 40(2):163 - 231.
- [5] Svendsen J C, Skov J, Bildsoe M, et al. Intra-school positional preference and reduced tail beat frequency in trailing positions in schooling roach under experimental conditions [J]. Journal of Fish Biology, 2003, 62(4):834 - 846.
- [6] Turesson H, Bronmark C. Predator-prey encounter rates in freshwater piscivores: effects of prey density and water transparency [J]. Oecologia, 2007, 153(2):281 - 290.
- [7] Davies N B, Krebs J R, West S A. An introduction to behavioral ecology [M]. 4th ed. Oxford: Blackwell, 2002:52 - 62.
- [8] Domeier M L, Colin P L. Tropical reef fish spawning aggregations: defined and reviewed [J]. Bulletin of Marine Science, 1997, 60(3):698 - 726.
- [9] Nottestad L, Aksland M, Beltestad A, et al. Schooling dynamics of norwegian spring spawning herring (*Clupea harengus* L.) in a coastal spawning area [J]. Sarsia, 1996, 80(4):277 - 284.
- [10] Zhao Y. Preliminary study on population dynamic structure of *Hemigrammus rhodostomus* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2010 [赵媛. 红鼻鱼群体动态结构的初步研究. 上海: 上海海洋大学海洋科学学院, 2010.]
- [11] Zhang Z Q, Zhou Y Q, Qian W G, et al. Comparative study on the distance measurements among individuals in the fish school by three methods [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(5):750 - 755. [张仲秋, 周应祺, 钱卫国, 等. 3 种鱼群个体间距的计算方法比较. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5):750 - 755.]
- [12] Liu L F, Zhou Y Q, Qian W G, et al. Modeling and simulation on schooling structure of *Hemigrammus bleheri* [J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(12):1869 - 1876. [柳玲飞, 周应祺, 钱卫国, 等. 红鼻鱼群体结构的数学建模与仿真可视化. 水产学报, 2010, 34(12):1869 - 1876.]
- [13] Gerlotto F, Jones E, Bez N, et al. When good neighbours become good friends: observing smallscale structures in fish aggregations using multibeam sonar [J]. Aquatic Living Resources, 2010, 23(2):143 - 151.
- [14] Viscido S V, Parrish J K, Grunbaum D. The effect of population size and number of influential neighbors on the emergent properties of fish schools [J]. Ecological Modelling, 2005, 183(2-3):347 - 363.
- [15] Viscido S V, Parrish J K, Grunbaum D. Factors influencing the structure and maintenance of fish schools [J]. Ecological Modeling, 2007, 206(1-2):153 - 165.
- [16] Kim Y H, Wardle C S. Basic modelling of fish behaviour in a towed trawl based on chaos in decision-making [J]. Fisheries Research, 2005, 73(1-2):217 - 229.
- [17] Zhou Y Q. The application of fish behavior [M]. Beijing: Science Press, 2011:192 - 212. [周应祺. 应用鱼类行为学. 北京: 科学出版社, 2011:192 - 212.]
- [18] Zhou Y Q, Wang J, Qian W G, et al. Review on fish schooling behavior study [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(5):734 - 743. [周应祺, 王军, 钱卫国, 等. 鱼类集群行为的研究进展. 上海海洋大学学报, 2013, 22(5):734 - 743.]

- [19] Qin Y L, Li L C, Huang R J. Biological characteristics and culture technique of *Pseudorasbora parva* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2005(3):114-116. [秦玉丽, 李林春, 黄荣静. 麦穗鱼的生物学特性及养殖技术. 江苏农业科学, 2005(3):114-116.]
- [20] Liu L F, Zhou Y Q, Qian W G, *et al.* Distortion evaluation and data extraction for behavior videos of fishes [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(7):129-133. [柳玲飞, 周应祺, 钱卫国, 等. 鱼类行为录像的畸变评估及数据提取研究. 湖南农业科学, 2011(7):129-133.]
- [21] Chen J J, Xiao G, Ying X F, *et al.* Fish activity model based on tail swing frequency [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(10):2177-2180. [陈久军, 肖刚, 应晓芳, 等. 鱼体尾频运动模型研究. 中国图像图形学报, 2009, 14(10):2177-2180.]
- [22] Cha B J, Bae B S, Chob S K, *et al.* A simple method to quantify fish behavior by forming time-lapse images [J]. Aquacultural Engineering, 2012, 51:15-20.
- [23] Kawaguchi S, King R, Meijers R, *et al.* An experimental aquarium for observing the schooling behavior of Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(7-8):683-692.
- [24] Inada Y. Steering mechanism of fish schools [J]. Complexity International, 2001, 8:1-9.
- [25] Partridge B L, Pitcher T J. The sensory basis of fish schools; relative roles of lateral line and vision [J]. Journal of Comparative Physiology A, 1980, 135(4):315-325.
- [26] Partridge B L. The structure and function of fish schools [J]. Scientific American, 1982, 246(6):114-123.
- [27] Shaw E, Tucher A. The optomotor reaction of schooling carangid fishes [J]. Animal Behaviour, 1965, 13(2-3):330-336.
- [28] Squire J L. Northern anchovy school shapes as related to problems in school size estimation [J]. Fishery Bulletin, 1978, 76(2):443-448.
- [29] Girolamo M D, Mazzoldi C. The application of visual census on Mediterranean rocky habitats [J]. Marine Environmental Research, 2001, 51(1):1-16.
- [30] Oboshi T, Kato S, Mutoh A, *et al.* A Simulation study on the form of fish schooling for escape from predator [J]. Forma, 2003, 18(2):119-131.
- [31] Becco C, Vandewalle N, Delcourt J, *et al.* Experimental evidences of a structural and dynamical transition in fish school [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2006, 367:487-493.
- [32] Cambui D S, Rosas A. Density induced transition in a school of fish [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(15):3908-3914.

The observation on the dynamic structure of *Pseudorasbora parva* school under laboratory conditions

WANG Jun¹, ZHOU Yingqi^{1,2,3,4*}, QIAN Weiguo^{1,2,3,4}, CAO Daomei^{1,2,3,4}, LI Yuwei^{1,2,3,4}, CHEN Lu¹

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

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, 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. Collaborative Innovation Center for National Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Fish schools present perfect order in dimension, which has attracted interest and attention of scientists. For observation of the structure characteristics of fish school, two video cameras were set up in lab to record the position of fish (*Pseudorasbora parva*) from up and side directions of aquarium simultaneously. Three-dimensional location data of each individual can be abstracted from the record in time series. The characteristic parameters data, nearest neighbor distance (NND), vision angle (VA), turning angle as well as individual swimming speed, have been analyzed for presenting the structure characteristics of fish school. The results show that NNDs of individuals have kept in a range of 0.5 – 2 BL mostly, and the preferred nearest neighbour distances (PNND) are 0.6 – 0.8 BL. To avoid a collision, the individual fish always keeps the neighbour fish located its visual field in range 80° and the variation of turning angle keeps the range from 0° to 30° (95.83%). Under natural conditions without any stimulus or disturbance, the fish swims at around 0.75 BL/s to match the others maintaining in schooling. The results of our study confirm that visual ability plays an important role in the schooling performance of *P. parva*, and the group structure is also affected by individual status (satiation and hunger).

Key words: *Pseudorasbora parva*; fish school; population dynamic structure; nearest neighbour distance; vision

Corresponding author: ZHOU Yingqi. E-mail: yqzhou@shou.edu.cn