

张恩泽,顾泽茂.黄颡鱼苗种寄生车轮虫的种群动态及其与水环境之间的关系[J].华中农业大学学报,2025,44(6):293-304.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.06.029

## 黄颡鱼苗种寄生车轮虫的种群动态 及其与水环境之间的关系

张恩泽,顾泽茂

华中农业大学水产学院/农业农村部水生动物疫病专业实验室(华中农业大学)/  
湖北省水生动物病害防控工程技术研究中心,武汉 430070

**摘要** 为探明黄颡鱼苗种车轮虫病的生态调控因子,于2023年5—6月在湖北省武汉市的黄颡鱼苗种场开展车轮虫种群动态观察,检测黄颡鱼苗种的车轮虫感染情况,通过形态学方法鉴定车轮虫,测定水体理化指标,定量分析浮游生物,并采用Spearman分析和冗余分析的方法研究车轮虫种群动态与水环境因子的关系。结果显示,黄颡鱼苗种的车轮虫感染率为26.7%~93.0%,感染强度为1~21,共发现重寄生车轮虫 *Trichodina hyper-parasitis* Chen & Hsieh, 1984 等6个物种。黄颡鱼育苗池水温23.0~31.5℃,透明度53.0~109.0 cm,pH 6.8~8.5,溶氧7.5~11.0 mg/L,氨氮0.1~1.3 mg/L,亚硝酸盐氮0.003~0.020 mg/L。浮游动物共54属73种,主要优势种为独角聚花轮虫,密度1 171.30~28 712.02 ind./L,生物量0.54~14.97 mg/L,多样性指数0.56~1.32,均匀度指数0.22~0.49,丰富度指数2.31~4.28。浮游植物共59属131种,主要优势种为小球藻(*Chlorella* sp.),密度 $1.88 \times 10^5$ ~ $5.61 \times 10^6$  ind./L,生物量0.38~8.04 mg/L,多样性指数0.53~1.64,均匀度指数0.16~0.49,丰富度指数3.66~6.86。相关分析结果表明,车轮虫种群动态主要与氨氮、亚硝酸盐氮、饲料投喂量、原生动物生物量、隐藻门生物量、浮游植物丰富度指数正相关,与溶氧和轮虫生物量负相关,其中氨氮和轮虫生物量是反映车轮虫种群动态变化的关键水环境因子。因此,在实际生产中可通过调节上述水环境因子来控制车轮虫的种群数量。

**关键词** 车轮虫; 黄颡鱼; 苗种; 种群动态; 水环境因子; 动态变化; 相关性

**中图分类号** S917.4   **文献标识码** A   **文章编号** 1000-2421(2025)06-0293-12

车轮虫隶属于寡膜纲(Oligohymenophora de Puytorac et al, 1974)、游走目(Mobilina Kahl, 1933)、车轮虫科(Trichodinidae Claus, 1874),是一类广泛分布于淡水、海水等多种生境的寄生或共栖生性纤毛虫<sup>[1-2]</sup>,可侵袭多种鱼类的体表、鳃等部位<sup>[3]</sup>。车轮虫反口面具有发达的附着盘结构,能够产生强大的吸力<sup>[4]</sup>,导致宿主机械损伤、黏液分泌亢进,引发车轮虫病,并可能继发感染其他病原微生物<sup>[5]</sup>。

黄颡鱼是我国重要的特色淡水鱼,车轮虫病是黄颡鱼苗种培育期危害最大的寄生虫病之一<sup>[6-7]</sup>,目前尚无安全有效的防治方法<sup>[8]</sup>。生态防控车轮虫病可减少药物残留和环境污染。研究表明,车轮虫种群在寄生时期以及脱离宿主后的自由生活时期均会受到水温<sup>[9]</sup>、溶氧<sup>[10-11]</sup>、亚硝酸盐氮<sup>[11-12]</sup>、有机

物<sup>[13-14]</sup>等水体理化因子影响。同时,车轮虫是水生态系统的重要组成部分<sup>[15-16]</sup>,水体中的浮游生物也与车轮虫种群动态密切相关<sup>[17-18]</sup>。因此,通过解析车轮虫种群动态与水环境的内在联系将有助于建立车轮虫病生态防控方法。然而,黄颡鱼苗种寄生车轮虫的种群动态研究较为缺乏,对黄颡鱼苗种车轮虫病的生态防控造成阻碍,亟需探究车轮虫种群动态与水环境因子之间的关系。

本研究选择湖北省武汉市的黄颡鱼苗种场,通过统计黄颡鱼苗种的车轮虫感染率和感染强度、测定水体理化指标、定量分析浮游生物,调查黄颡鱼苗种寄生车轮虫种群动态变化和养殖水环境动态变化。同时,采用Spearman分析和冗余分析研究车轮虫种群动态变化及其与水环境因子的关系,旨在为

收稿日期: 2024-06-14

基金项目:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-46);湖北省农业科技创新中心项目(2021-620-000-001-33)

张恩泽,E-mail:zez308@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:顾泽茂,E-mail:guzemao@mail.hzau.edu.cn

黄颡鱼苗种车轮虫病害的生态防控提供理论依据,为推动黄颡鱼苗种绿色养殖奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点选择

选择湖北省武汉市江夏区三门口桥黄优源渔业发展有限公司342号育苗池( $30^{\circ}16'48''N, 114^{\circ}12'36''E$ ),面积约 $6\,670\text{ m}^2$ ,2023年5月4日投放200万尾基地自繁的黄颡鱼水花,15 d后在岸边浅水处可捕捞到2 cm左右的鱼苗。

### 1.2 样本采集及指标测定

于黄颡鱼夏花鱼种培育期(2023年5月19日—6月17日)每天07:00—10:00采样(6月17日出售夏花鱼种,采样结束),采集黄颡鱼苗种、浮游生物水样,现场测定水体理化因子,并记录当日的饲料投喂量(feed quantity, FQ)以及增氧、改底、施肥等生产操作。

使用抄网随机采集黄颡鱼苗种30尾/次,将采集的苗种带回实验室,测量体长和体质量。

水样采集前使用YSI Professional Plus便携式水质分析仪和塞氏盘测定水体物理指标:水温(water temperature, WT)、溶氧(dissolved oxygen, DO)、透明度(secchi disk, SD)。采集水样使用2.5 L有机玻璃采水器,采用五点取样法,在各个点位距离水面表面0.5 m深处采集水样2.5 L,共计12.5 L,混合均匀后使用桑普水博士试剂盒(桑普生化,北京)测定水体化学指标:pH、氨氮( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ )和亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^- \text{-N}$ )。通过查阅基地养殖记录统计饲料投喂量。

取10 L混合水样经25号浮游生物网过滤浓缩,收集50 mL浓缩水样,加入5 mL 40%的甲醛现场固定,用作浮游动物定量分析。取500 mL混合水样,加入5 mL鲁哥试剂现场固定,带回实验室后静置沉淀48 h,利用虹吸法将上清液吸出,保留50 mL浓缩水样用于浮游植物定量分析。

### 1.3 车轮虫感染情况调查

将采集的30尾苗种带回实验室,使用MS-222(三氯甲烷磺酸盐)进行麻醉。对苗种的全长、体长和体质量进行测量,肉眼观察是否有发病症状,并进行记录和拍照。刮取体表黏液,剪取从鳃盖起第2片鳃的一部分鳃丝,分别置于洁净载玻片上,并用洁净盖玻片压片,在光学显微镜Olympus BX73(奥林巴斯,日本) $10\times 10$ 倍视野下检查车轮虫。采样初期苗

种较小,肉眼观察较为困难,因此将苗种置于洁净的培养皿中,在显微镜下观察和解剖。计数每个视野中的所有车轮虫个体,取3个视野的平均值作为单视野的车轮虫个体总数,然后计算车轮虫的感染率(感染车轮虫的宿主数/检查宿主总数 $\times 100\%$ )和感染强度(单视野的车轮虫个体总数/感染车轮虫的宿主总数)。

### 1.4 车轮虫物种鉴定

自然干燥的黄颡鱼鳃涂片采用干银法<sup>[19]</sup>染色。显微照片用数码相机Olympus DP73(日本)在 $10\times 100$ 视野下拍摄,车轮虫形态测量与描述依据Lom<sup>[20]</sup>提出的“统一特定方法”以及Van As等<sup>[21]</sup>提出的“齿体定位描述法”。所有数据均采用统计值“最小值~最大值”(平均值±标准差)的方法描述。

### 1.5 浮游生物统计

浮游动物鉴定和定量参照文献[22-32]。Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J'$ )及Margalef丰富度指数( $D$ )计算公式如下:

$$H' = -\sum [(n_i/N) \times \ln(n_i/N)] \quad (1)$$

$$J' = H'/H_{\max}, \text{其中 } H_{\max} = \ln S \quad (2)$$

$$D = (S-1)/\ln N \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $n_i$ 为种*i*的个体数; $N$ 为物种的总个体数; $S$ 为群落中总物种数。

多样性指数分级参考文献[33]: $H'$ 在0~1.0时水体属多污带,在1.0~2.0时属 $\alpha$ -中污带,在2.0~3.0时属 $\beta$ -中污带, $>3.0$ 时属寡污带; $J'$ 在0~0.3时属重污染,在0.3~0.5时属中污染,在0.5~0.8时属轻污染或无污染; $D$ 在0~3.0时属 $\alpha$ -中污-重污型,在3.0~4.0时属 $\beta$ -中污型,4.0~5.0时属寡污型, $>5.0$ 时属清洁水体型。

通过公式(4)计算浮游生物优势度( $Y$ ):

$$Y = n_i/N \times f_i \quad (4)$$

式(4)中: $n_i$ 为种*i*的个体数; $N$ 为总个体数; $f_i$ 为种*i*在各个采样点出现的频率,优势度 $Y \geq 0.02$ 为优势种。本研究规定优势度最高的物种为主要优势种。

### 1.6 数据处理

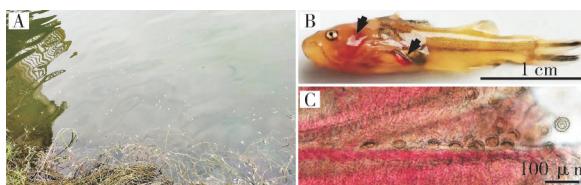
使用R 4.3.2软件包进行Spearman相关分析。使用Canoco 5.1进行约束性排序分析,并构建RDA排序分布图<sup>[34]</sup>。首先用species-sample数据进行去趋势分析(detrended correspondence analysis, DCA),通过分析结果中第一轴Gradient Length的大小确定合适的模型。如果数值大于4.0,选择典范对

应分析(canonical correspondence analysis, CCA)模型;如果数值为3.0~4.0,选择冗余分析(redundancy analysis, RDA)模型和CCA模型均可;如果数值小于3.0,则选择RDA模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄颡鱼苗种寄生车轮虫分类

采集的黄颡鱼苗种全长1.5~6.0 cm,体质量0.1~3.1 g。采样期间,在育苗池的岸边浅水处可见大量死亡或濒死的黄颡鱼苗种,镜检可发现车轮虫附着在苗种的鳃部(图1)。



A. 塘边死亡的黄颡鱼;B. 黄颡鱼鱼苗体表和鳃盖出血(箭头示);C. 鳃丝表面的车轮虫。A. Aggregation of dead fish along the edge of the pond; B. Haemorrhagia on the body surface of the yellow catfish larva (arrowhead); C. Photomicrograph of trichodinids parasitizing on the surface of gill filaments.

图1 育苗池黄颡鱼苗种车轮虫病发病情况

Fig. 1 Trichodiniasis of yellow catfish larval and juveniles in seedling pond

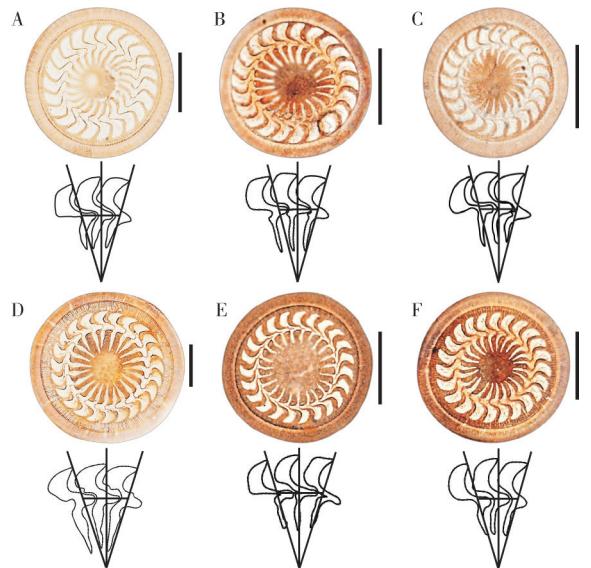
通过形态学方法进行鉴定,共发现6种车轮虫寄生于黄颡鱼苗种,分别为重寄生车轮虫(*Trichodina hyperparasitis* Chen & Hsieh, 1984)、马丁车轮虫(*Trichodina maritinkae* Basson & Van As, 1991)、马氏车轮虫(*Trichodina matsu* Basson & Van As, 1994)、狮鱼车轮虫(*Trichodina hypsilepis* Wellborn, 1967)、适度车轮虫(*Trichodina modesta* Lom, 1970)和卡氏车轮虫(*Trichodina kazubski* Van As & Basson, 1989)(图2)。

### 2.2 黄颡鱼苗种寄生车轮虫种群动态变化

如图3所示,车轮虫感染率变化范围为26.7%~93.0%,平均感染率为(55.7±17.5)%;车轮虫感染强度变化范围为1~21,平均感染强度为4±4。

### 2.3 育苗池水体理化因子动态变化

育苗池水体理化指标如图4所示,WT变化范围23.0~31.5 °C,平均值(27.6±2.3) °C;SD变化范围53.0~109.0 cm,平均值(74.5±12.8) cm;pH变化范围在6.8~8.5,平均值8.1±0.5。DO变化范围7.5~11.0 mg/L,平均值(8.7±0.7) mg/L; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化范围0.1~1.3 mg/L,平均值(0.6±0.4) mg/L;



A. 重寄生车轮虫;B. 马丁车轮虫;C. 马氏车轮虫;D. 狮鱼车轮虫;E. 适度车轮虫;F. 卡氏车轮虫。比例尺=20 μm。A. *Trichodina hyperparasitis*; B. *Trichodina maritinkae*; C. *Trichodina matsu*; D. *Trichodina hypsilepis*; E. *Trichodina modesta*; F. *Trichodina kazubski*. Bars=20 μm.

图2 车轮虫显微照片和齿体示意图

Fig. 2 Photomicrographs and denticle schematic drawings of trichodinid species

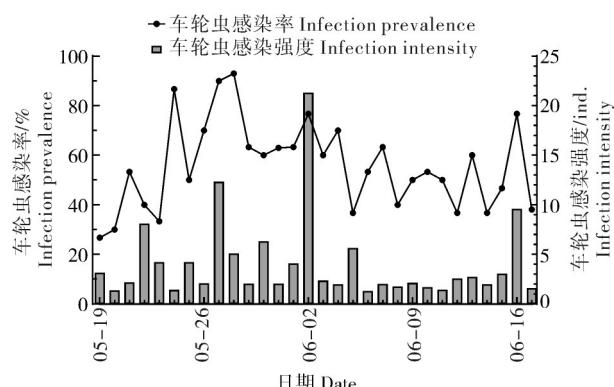


图3 黄颡鱼苗种寄生车轮虫感染率和感染强度

Fig. 3 Infection prevalence and intensity of trichodinids on yellow catfish larvae and juveniles

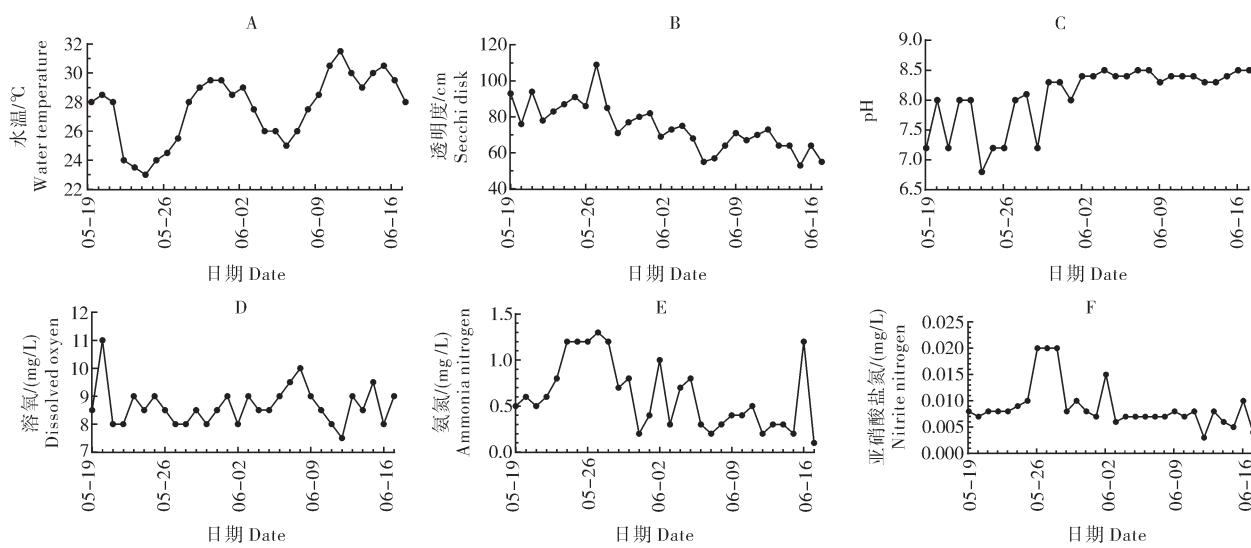
$\text{NO}_2^- \text{-N}$ 变化范围0.003~0.020 mg/L,平均值(0.009±0.004) mg/L。

### 2.4 育苗池饲料投喂量动态变化

如图5所示,人为因子饲料投喂量随黄颡鱼苗种的生长逐渐增加,初始投喂量为10 kg(1.0 kg/667 m<sup>2</sup>),之后每日增加1 kg,直至15.0 kg(1.5 kg/667 m<sup>2</sup>)。

### 2.5 育苗池浮游生物群落结构及动态变化

1)浮游动物群落结构及动态变化。采样期间,



A. 水温; B. 透明度; C. pH; D. 溶氧; E. 氨氮; F. 亚硝酸盐氮。A. Water temperature; B. Secchi disk; C. pH; D. Dissolved oxygen; E. Ammonia nitrogen; F. Nitrite nitrogen.

图4 水体理化因子动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of aquatic environment factors

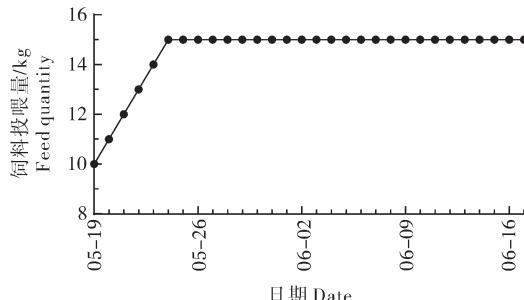


图5 饲料投喂量动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of feed quantity

共鉴定浮游动物54属73种,其中轮虫14属24种,枝角类10属16种,桡足类8属14种,原生动物7属19种。由表1可知,在采集到的浮游动物中,独角聚花轮虫的优势度最高(0.14),其次为多刺裸腹溞(0.05)和微型裸腹溞(0.05)。

由图6可知,浮游动物密度变化范围为 $1\ 171.30 \sim 28\ 712.02$  ind./L,平均值为 $(6\ 748.04 \pm 6\ 397.89)$  ind./L;浮游动物生物量(zooplankton biomass, ZPB)变化范围为 $0.54 \sim 14.97$  mg/L,平均值为 $(3.26 \pm 3.90)$  mg/L;浮游动物多样性指数(zooplankton Shannon-Wiener diversity index, ZPS)变化范围 $0.56 \sim 1.32$ ,平均值为 $0.92 \pm 0.17$ ;浮游动物均匀度指数(zooplankton Pielou evenness index, ZPP)变化范围 $0.22 \sim 0.49$ ,平均值为 $0.34 \pm 0.06$ ;浮游动物丰富度指数(zooplankton Margalef richness index, ZPM)变化范围 $2.31 \sim 4.28$ ,平均值为 $3.30 \pm 0.48$ 。

2)浮游植物定量统计及动态变化。采样期间,

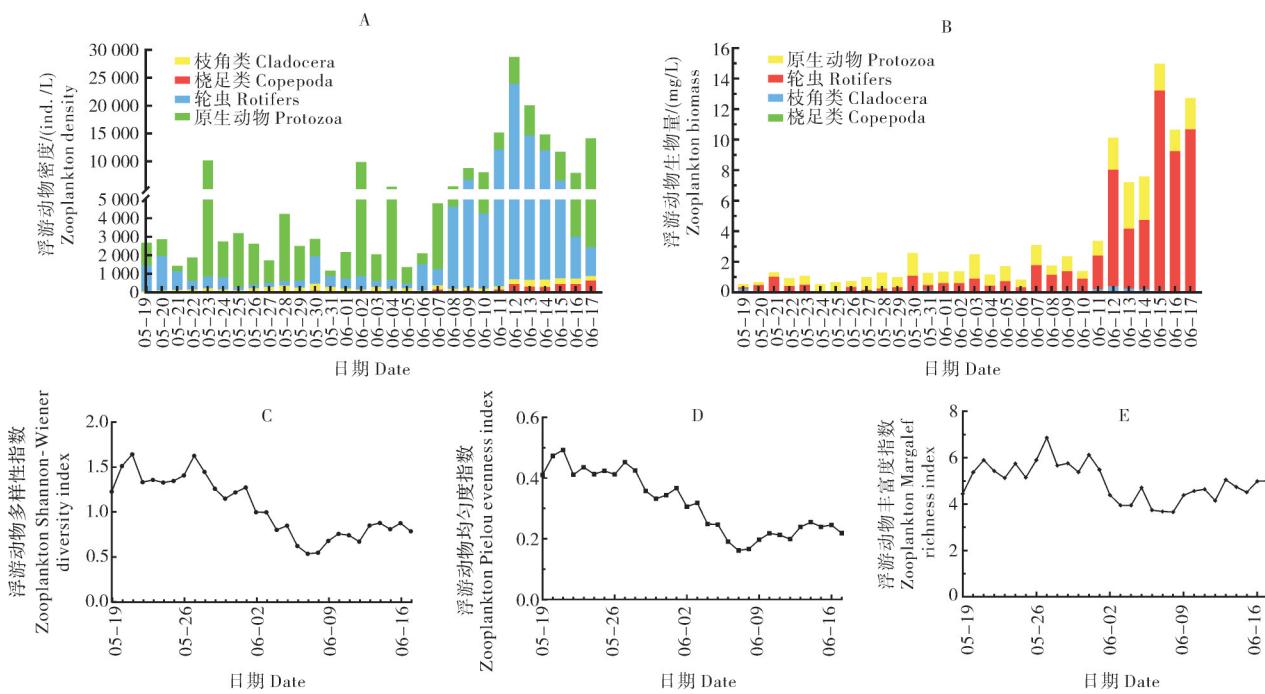
表1 浮游生物优势种统计表

Table 1 Statistics of plankton dominant species

类别 Classification	优势种 Dominant species	优势度 Dominance
轮虫 Rotifers	独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	0.14
	叉角拟聚花轮虫 <i>Conochilloides dossuarus</i>	0.02
枝角类 Cladocera	多刺裸腹溞 <i>Moina macrocopa</i>	0.05
	微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	0.05
蓝藻门 Cyanophyta	隐杆藻 <i>Aphanothecaceae</i> sp.	0.06
	苍白微囊藻 <i>Microcystis pallida</i>	0.05
	束球藻 <i>Gomphosphaeria</i> sp.	0.03
	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i>	0.02
绿藻门 Chlorophyta	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	0.22
	美丽网球藻 <i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	0.10
	韦斯藻 <i>Westella</i> sp.	0.09
	博恩微芒藻 <i>Micractinium bornhemiensis</i>	0.03
硅藻门 Bacillariophyta	四胞藻 <i>Tetraspora</i> sp.	0.03
	四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i>	0.02
	链形小环藻 <i>Cyclotella catenata</i>	0.04

共鉴定浮游植物59属131种,其中蓝藻门10属15种,绿藻门25属65种,硅藻门10属27种,金藻门3属4种,裸藻门5属12种,隐藻门2属4种,黄藻门2属2种,甲藻门2属2种。由表1可知,在采集到的浮游植物中,小球藻的优势度最高(0.22),其次为美丽网球藻(0.10)和韦斯藻(0.09)。

由图7可知,浮游植物密度变化范围 $1.88 \times 10^5 \sim$



A. 密度; B. 生物量; C. 多样性指数; D. 均匀度指数; E. 丰富度指数。A. Density; B. Biomass; C. Shannon-Wiener diversity index; D. Pielou evenness index; E. Margalef richness index.

图6 浮游动物群落动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of zooplankton population

$5.61 \times 10^6$  ind./L, 平均值 $(2.06 \pm 1.78) \times 10^6$  ind./L; 浮游植物生物量(phytoplankton biomass, PPB)变化范围 $0.38 \sim 8.04$  mg/L, 平均值 $(3.16 \pm 2.14)$  mg/L; 浮游植物多样性指数(phytoplankton Shannon-Wiener diversity index, PPS)变化范围 $0.53 \sim 1.64$ , 平均值为 $1.05 \pm 0.33$ ; 浮游植物均匀度指数(phytoplankton Pielou evenness index, PPP)变化范围 $0.16 \sim 0.49$ , 平均值为 $0.31 \pm 0.10$ ; 浮游植物丰富度指数(phytoplankton Margalef richness index, PPM)变化范围 $3.66 \sim 6.86$ , 平均值为 $4.95 \pm 0.78$ 。

## 2.6 车轮虫种群动态与水环境因子的相关分析

利用如下27种水环境因子以及车轮虫的感染率、感染强度作为样本,进行Spearman相关分析。水体理化因子:水温(WT)、透明度(SD)、溶氧(DO)、pH、氨氮( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ )、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^- \text{-N}$ );人为因子:饲料投喂量(FQ);浮游生物因子:浮游动物生物量(ZPB)、浮游动物多样性指数(ZPS)、浮游动物均匀度指数(ZPP)、浮游动物丰富度指数(ZPM)、浮游植物生物量(PPB)、浮游植物多样性指数(PPS)、浮游植物均匀度指数(PPP)、浮游植物丰富度指数(PPM)、枝角类生物量(Cladocera biomass, CLB)、桡足类生物量(Copepoda biomass, COB)、轮虫生物量(rotifers biomass, RB)、原生动物生物量(Protozoa

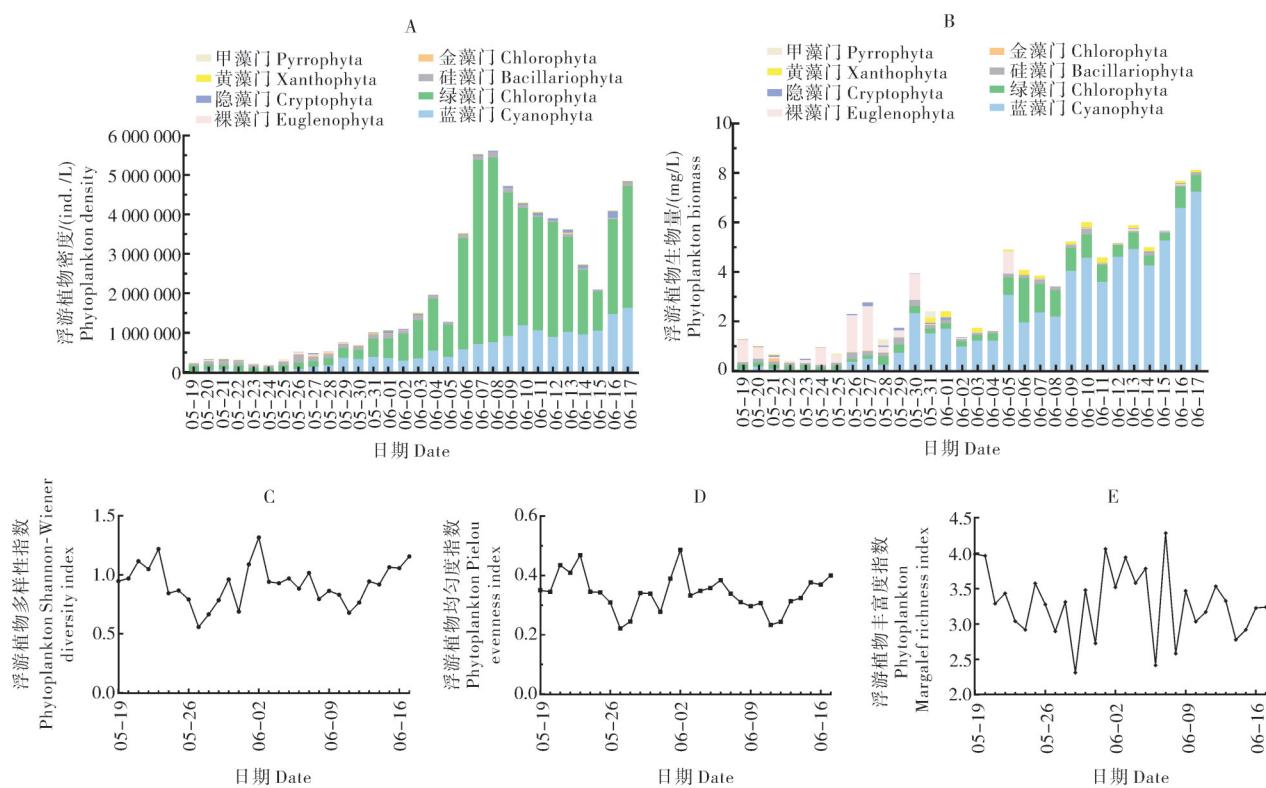
biomass, PZB)、绿藻门生物量(Chlorophyta biomass, CHLB)、蓝藻门生物量(Cyanophyta biomass, CYB)、硅藻门生物量(Bacillariophyta biomass, BB)、甲藻门生物量(Pyrrophyta biomass, PYB)、裸藻门生物量(Euglenophyta biomass, EB)、金藻门生物量(Chrysophyta biomass, CHB)、黄藻门生物量(Xanthophyta biomass, XB)、隐藻生物量(Cryptophyta biomass, CRB)。

分析结果如图8所示,车轮虫感染率与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  ( $P < 0.001$ )、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  ( $P < 0.001$ )极显著正相关( $P < 0.001$ ),与FQ极显著正相关( $P < 0.01$ ),与RB极显著负相关( $P < 0.01$ ),与DO显著负相关( $P < 0.05$ );车轮虫感染强度与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  ( $P < 0.001$ )、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  ( $P < 0.001$ )、CRB ( $P < 0.01$ )、PPM指数( $P < 0.01$ )极显著正相关( $P < 0.001$ ),与PZB显著正相关( $P < 0.05$ ),与DO显著负相关( $P < 0.05$ )。

## 2.7 车轮虫种群动态与水环境因子约束性排序分析

本研究中Gradient Length值小于3.0,因此选择RDA模型进行约束性排序分析,结果如下。

1)水体理化因子及人为因子。利用上述7种理化因子及人为因子作为解释变量,车轮虫感染率和



A. 密度; B. 生物量; C. 多样性指数; D. 均匀度指数; E. 丰富度指数。A. Density; B. Biomass; C. Shannon-Wiener diversity index; D. Pielou evenness index; E. Margalef richness index.

图7 浮游植物种群动态变化

Fig. 7 Dynamic changes of phytoplankton population

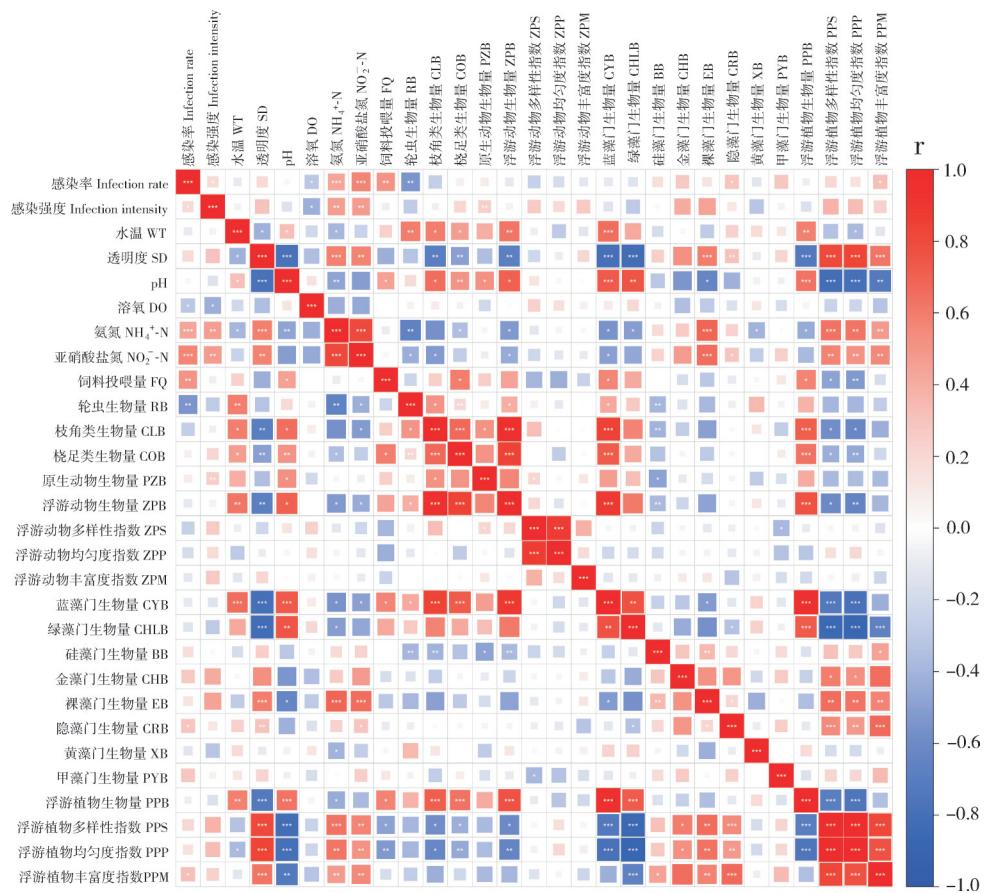
感染强度作为响应变量构建RDA排序图。结果显示,第一、二轴上物种与7种因子的相关系数分别为0.7954和0.6773,四轴共解释了车轮虫感染率、感染强度数据100%的变化,与7种因子关系的方差累积百分比为100%(表2)。由图9可知,车轮虫感染率与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、FQ正相关;车轮虫感染强度与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 正相关,与DO负相关,与本文“2.6”车轮虫种群动态与水环境因子Spearman相关分析结果基本吻合。

2)浮游生物。利用上述20种浮游生物因子作为解释变量,车轮虫感染率和感染强度作为响应变量构建RDA排序图。结果显示,第一、二轴上物种与20种因子的相关系数分别为0.8191和0.8108,四轴共解释了车轮虫感染率、感染强度数据100%的变化,与20种因子关系的方差累积百分比为100%(表3)。由图10可知,车轮虫感染率与CRB、PYB、PPM正相关,与RB负相关;车轮虫感染强度与PZB、EB、PPS正相关,与CHLB、XB负相关,与本文“2.6”车轮虫种群动态与水环境因子Spearman相关性分析结果基本符合。

### 3 讨 论

#### 3.1 黄颡鱼育苗池水体理化特征

本研究所选取的黄颡鱼育苗池为草型池塘,水草丰茂,透明度较大,水体理化指标较为稳定。采样期间,水温23.0~31.5℃,透明度53.0~109.0 cm,pH 6.8~8.5,溶氧7.5~11.0 mg/L,氨氮0.1~1.3 mg/L,亚硝酸盐氮0.003~0.020 mg/L。在养殖过程中,透明度整体呈现下降趋势,而pH则逐渐增大,这与浮游植物数量增大有关。随着浮游植物数量增多,水体由清水稳态向浊水稳态转变,透明度下降<sup>[35]</sup>。同时,浮游植物光合作用消耗水体中的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 增多,使水体pH增大<sup>[36]</sup>。而氨氮和亚硝酸盐氮含量均“先增后减”,采样前期连续阴雨天气导致氨氮升高,而采样后期随着浮游植物数量增多, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 作为氮源能够直接被浮游植物所利用,使得其含量下降<sup>[37]</sup>。与湖北荆州市太湖农场<sup>[38]</sup>(透明度192.5~203.5 cm,氨氮0.4~1.1 mg/L,亚硝酸盐氮1.7~1.9 mg/L)以及江西省南昌市水产科学研究所<sup>[39]</sup>(氨氮0.8~1.7 mg/L,亚硝酸盐氮0.02~0.08 mg/L)的黄颡鱼育苗池同一时期(5—6月)的水体理化因子相



Spearman 相关系数  $r$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $r$  大于 0 时, 认为 2 组变量之间的相关性为正(红色), 反之相关性为负(蓝色), 颜色的深浅表示相关程度的大小。\*,  $|P|<0.05$ ; \*\*,  $|P|<0.01$ ; \*\*\*,  $|P|<0.001$ 。Spearman correlation coefficient ( $r$ ) ranges from -1 to 1. Positive correlations ( $r>0$ ) are shown in red and negative correlations ( $r<0$ ) in blue, with color intensity indicating correlation strength. Significance levels: \*,  $|P|<0.05$ ; \*\*,  $|P|<0.01$ ; \*\*\*,  $|P|<0.001$ .

图 8 车轮虫感染情况与水环境因子的 Spearman 相关热图

Fig. 8 Spearman correlation heatmap of trichodinids infection and aquatic environmental factors

表 2 车轮虫感染情况与水体理化因子及人为因子的 RDA 排序轴特征值、解释变量及相关系数

Table 2 Eigenvalues, explanatory variables and correlation coefficients of the RDA ordination axis of trichodinid infection, physicochemical factors and anthropogenic factor

参数统计 Statistic	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.488 0	0.104 8	0.318 1	0.089 0
解释的变化(累积) Explained variation (cumulative)	48.80	59.29	91.10	100.00
物种与环境因子相关系数 Pseudo-canonical correlation coefficients	0.795 4	0.677 3	0	0
解释的拟合变化(累积) Explained fitted variation (cumulative)	82.32	100.00		

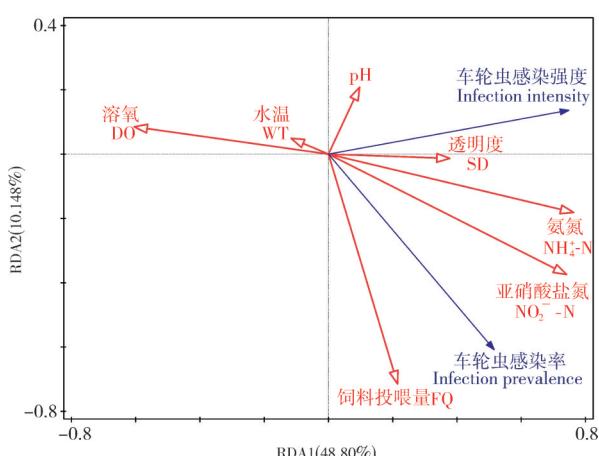


图 9 车轮虫感染情况与水体理化因子及饲料投喂量的 RDA 排序图

Fig. 9 RDA sequencing diagram of trichodinid infection, physicochemical factors and feed quantity

表3 车轮虫感染情况与浮游生物的RDA排序轴特征值、解释变量及相关系数

Table 3 Eigenvalues, explanatory variables and correlation coefficients of the RDA ordination axis of trichodinid infection and plankton factors

参数统计 Statistic	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2	轴3 Axis 3	轴4 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.521 8	0.146 2	0.272 8	0.059 2
解释的变化(累积) Explained variation (cumulative)	52.18	66.80	94.08	100.00
物种与环境因子相关系数 Pseudo-canonical correlation coefficients	0.819 1	0.810 8	0	0
解释的拟合变化(累积) Explained fitted variation (cumulative)	78.12	100.00		

比,本研究中育苗池的透明度、氨氮和亚硝酸盐氮均较低。

### 3.2 黄颡鱼育苗池浮游生物群落结构特征

本研究所选取的黄颡鱼育苗池中,绿藻门的物种数量占比最高(49.6%),浮游植物种类组成多样化、群落结构稳定性较好<sup>[37]</sup>。从浮游植物密度来看,在采样初期密度较低,在经历2次肥水(5月29日、6月3日)后逐渐增大。6月6日池塘边出现大量“青苔”刚毛藻(*Cladophora* sp.),在使用“青苔净”(主要成分为生物酶、季铵盐、三嗪等)后,浮游植物密度开始下降。从浮游植物生物量来看,在整个采样周期内逐渐增大,这与其优势种如小球藻、美丽网球藻、韦斯藻、隐杆藻、链形小环藻等生物量逐渐增大有关。其中,小球藻作为绝对优势种,其相对密度(23.3%)和优势度(0.22)均为最高,该属物种是水产动物幼体的优质饵料,在春夏两季常大量繁殖<sup>[29]</sup>。与湖北荆州太湖农场的黄颡鱼育苗池<sup>[38]</sup>相比,本研究中黄颡鱼育苗池的浮游植物多样性指数(0.53~1.64 vs 1.46~2.20)和均匀度指数(0.16~0.49 vs 0.63~0.85)均较低。根据浮游植物多样性水质分级

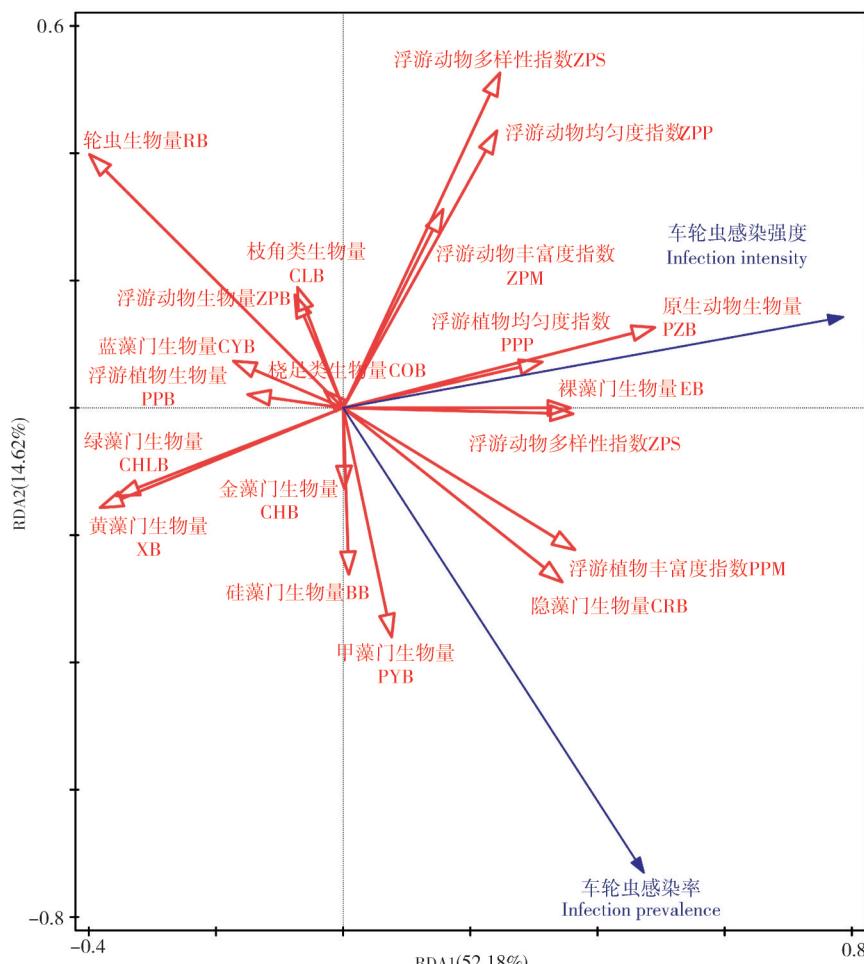


图10 车轮虫感染情况与浮游生物因子的RDA排序图

Fig. 10 RDA sequencing diagram of trichodinid infection and plankton factors

标准<sup>[33]</sup>,综合浮游植物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数,本研究中342#黄颡鱼育苗池水质属于中污染。

在投放黄颡鱼苗后的一段时间内,浮游动物数量持续保持较低水平,随着养殖时间的推移,浮游动物密度和生物量均逐渐增大。浮游动物物种数量上,轮虫(24种)数量最多,其次为原生动物(19种)、枝角类(16种)和桡足类(14种),各个类群差距较小。在所有物种中,独角聚花轮虫的相对密度(39.2%)和优势度(0.14)均最高,该物种为典型的浮游种类,时空分布较为广泛,在春末夏初常大量繁殖<sup>[22]</sup>。而枝角类中则以多刺裸腹溞(0.05)和微型裸腹溞(0.05)优势度最高,二者均为夏季浅水池塘的优势物种<sup>[23]</sup>。

### 3.3 黄颡鱼苗种寄生车轮虫感染与水环境因子的关系

车轮虫作为一种兼性寄生虫,既能寄生于水生动物,又能离开宿主在水体中营自由生活,因此其种群动态受到水环境因子的影响<sup>[18]</sup>。研究表明,车轮虫的感染情况在全年跨度上与水温具有一定的相关性<sup>[11]</sup>,而本研究采样时间跨度较短,水温变化幅度较小(23~31℃),与车轮虫感染情况的相关性也较小。

车轮虫喜生于溶氧量低、氨氮和亚硝酸盐氮含量高的水体<sup>[11]</sup>,此外,养殖水体中的氨氮和亚硝酸盐氮含量升高会对黄颡鱼苗种的体表和鳃造成损伤,导致其免疫能力下降,使得车轮虫感染率上升,感染强度增大<sup>[12]</sup>。饲料投喂量往往与养殖水体的理化因子密切相关,当过量投喂时,水中残饵的降解会对养殖水体的溶氧、氨氮和亚硝酸盐氮产生一定的影响<sup>[40]</sup>,进而影响车轮虫的种群动态<sup>[9]</sup>。相关分析结果表明,饲料投喂量与车轮虫的感染率呈显著正相关,而本研究所调查的杂交黄颡鱼苗种摄食量大、生长速度快,饲料投喂量相较于其他品种更高,因此在养殖过程中应该合理控制饲料投喂量,避免产生过多残饵<sup>[41]</sup>,并尽量选择在增氧机开启时投喂。

生物因子中,轮虫生物量、原生动物生物量、裸藻门生物量、隐藻门生物量、甲藻门生物量、绿藻门生物量、黄藻门生物量及浮游动物多样性指数是影响车轮虫种群动态变化的主要生物因子,其中轮虫生物量是反映车轮虫种群动态变化的关键生物因子。晶囊轮属、多肢轮属的轮虫具有发达的咀嚼器,可捕食包括车轮虫在内的原生动物<sup>[29]</sup>,因此其种群

动态与车轮虫种群动态呈负相关关系。表壳虫属、拟铃壳虫属等原生动物与车轮虫适宜的水环境条件相似<sup>[42]</sup>,这可能是二者种群动态呈正相关的原因。车轮虫偏好于有机质和氮丰富的富营养水体,隐藻、裸藻同样喜生于此类水体,而黄藻则喜生于贫营养水体<sup>[29]</sup>。因此,建议黄颡鱼苗种下塘前先科学肥水,待池塘水体中轮虫达到高峰期再投放苗种。日常养殖中注意观测水体藻相和透明度,并及时根据水色和透明度调节水体肥度,可降低黄颡鱼苗种车轮虫病发病的风险。

综上,本研究首次探究了黄颡鱼苗种寄生车轮虫的种群动态变化规律及其与水环境之间的关系,车轮虫种群动态主要与溶氧、氨氮、亚硝酸盐氮、饲料投喂量、轮虫生物量、原生动物生物量、裸藻门生物量、隐藻门生物量、甲藻门生物量、浮游动物多样性指数、浮游植物丰富度指数等水环境因子有关,其中氨氮和轮虫生物量是反映车轮虫种群动态变化的关键水环境因子。因此,在黄颡鱼苗种养殖中应重点关注上述水环境指标,并及时通过科学增氧、严控水质、日常观察浮游生物等操作以预防车轮虫病的发生。以上结果为黄颡鱼苗种车轮虫病害的生态防控提供一定的理论依据。

## 参考文献 References

- [1] 赵元著. 网状车轮虫 *Trichodina reticulata* Hirschman & Partsch, 1955的世界地理分布特点及寄主特异性分析[J]. 内江师范学院学报, 2012, 28(2): 1-6.ZHAO Y J. Analysis on geographic distribution and host specificity of *Trichodina reticulata* Hirschman & Partsch, 1955[J]. Journal of Neijiang Normal College, 2012, 28 (2) : 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [2] 于莎莎. 浙江宁波地区部分海、淡水经济鱼类外寄生车轮虫的研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2012.YU S S. Study on the external parasitic trichodinids of some marine and freshwater economic fish in Ningbo, Zhejiang Province [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [3] 詹子锋. 寄生游走类纤毛虫的分类学和分子系统学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.ZHAN Z F. Taxonomy and molecular systematics of parasitic mobilids [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [4] VIGUÈS B, DAMAJ R. The adhesive disc in the mobilid ciliate *Trichodina pediculus*: evidence for centrin-related, calcium-sensitive filaments[J]. Cytoskeleton, 2012, 69(2): 113-124.
- [5] BASSON L, VAN AS J G. Trichodinidae and other ciliopho-

- rans (Phylum Ciliophora) : woo PTK fish diseases and disorders [M]. Oxford, UK: Cab international, 2006: 154-182.
- [6] WANG Z, ZHOU T, YANG H, et al. First diagnosis of ectoparasitic ciliates (*Trichodina* and *Chilodonella*) on farmed juvenile yellow catfish, *Tachysurus fulvidraco* in China [J]. Aquaculture research, 2019, 50(11): 3275-3285.
- [7] 刘攀. 江苏射阳地区黄颡鱼鲺车轮虫的形态分类学研究及其防控药物的毒性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012. LIU P. Morphological taxonomy study on *Trichodina* sp. parasitic on *Pelteobagrus* sp. in Sheyang Jiangsu Province and toxicity study on the insecticide [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李鸶鸶, 张洪玉, 王佳迪, 等. 车轮虫病防治药物及安全性研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(4): 546-555. LI S S, ZHANG H Y, WANG J D, et al. The research progress and safety of trichodinosis prevention medicine [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23 (4) : 546-555 (in Chinese with English abstract).
- [9] NILSEN F. Description of *Trichodina hippoglossi* n. sp. from farmed Atlantic halibut larvae *Hippoglossus hippoglossus* [J]. Diseases of aquatic organisms, 1995, 21: 209-214.
- [10] GARCIA F, FUJIMOTO R Y, MARTINS M L, et al. Protozoan parasites of *Xiphophorus* spp. (Poeciliidae) and their relation with water characteristics [J]. Arquivo brasileiro de medicina veterinária e zooteenia, 2009, 61(1): 156-162.
- [11] 章海鑫, 肖丹, 吴翔, 等. 武汉市黄陂区黄颡鱼车轮虫病的流行病学调查[J]. 江西水产科技, 2013(3): 23-30. ZHANG H X, XIAO D, WU X, et al. Epidemiological investigation on trichodiniasis of *Tachysurus fulvidraco* in Huangpi District, Wuhan [J]. Jiangxi fishery science and technology, 2013 (3) : 23-30 ( in Chinese).
- [12] ZHANG L Q, LI Y, WEI O, et al. Correlation analysis between abundance of *Trichodina* spp. and water quality parameters [J]. Agricultural science & technology, 2017, 18(7): 1318-1321.
- [13] VOIGT M. Protozoan ectocommensals of toadish and soldier crab as indicators of organic pollution in the Brisbane River estuary [D]. Queensland, Australia: University of Queensland, 1993.
- [14] BROEG K, ZANDER S, DIAMANT A, et al. The use of fish metabolic, pathological and parasitological indices in pollution monitoring [J]. Helgoland marine research, 1999, 53 (3) : 171-194.
- [15] 汤俊宏, 孙松. 长江口几种优势桡足类对微型浮游动物的摄食研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 148-156. TANG H J, SUN S. Predation of several dominant copepods on microzooplankton in Changjiang River estuary [J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2015, 46 (1) : 148-156 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张武昌, 陈雪, 李海波, 等. 海洋浮游纤毛虫摄食研究综述[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(1): 276-289. ZHANG W C, CHEN X, LI H B, et al. Marine planktonic ciliates grazing: a review [J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2016, 47 (1) : 276-289 (in Chinese with English abstract).
- [17] 夏润林. 草鱼主要寄生虫动态变化与水生态因子关系研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2014. XIA R L. Study on the relationship between dynamic changes of main parasites and aquatic ecological factors in grass carp [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈红雕. 咸淡水池塘草鱼寄生虫种群动态变化及其与生态因子的关系 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. CHEN H D. Dynamic changes of grass carp parasite population in salty and fresh water ponds and its relationship with ecological factors [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [19] KLEIN B M. The "dry" silver method and its proper use [J]. The journal of protozoology, 1958, 5(2): 99-103.
- [20] LOM J. A contribution to the systematics and morphology of endoparasitic trichodinids from amphibians, with a proposal of uniform specific characteristics [J]. The journal of protozoology, 1958, 5(4): 251-263.
- [21] VAN AS J G, BASSON L. A further contribution to the taxonomy of the Trichodinidae (Ciliophora; Peritrichia) and a review of the taxonomic status of some fish ectoparasitic trichodinids [J]. Systematic parasitology, 1989, 14(3): 157-179.
- [22] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961. WANG J J. Chinese freshwater Rotifera. [M]. Beijing: Science Press, 1961 (in Chinese).
- [23] 蒋燮治, 塘南山. 中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979. JIANG X Z, DU N S. Fauna of China, Arthropoda, Crustacea, freshwater Cladocerans [M]. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese).
- [24] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱 [M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011. ZHOU F X, CHEN J H. Atlas of freshwater micro-organisms and benthos [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [25] 陈茜. 浙江省主要常见淡水藻类图集 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. CHEN X. Atlas of main common freshwater algae in Zhejiang Province [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010 (in Chinese).
- [26] 郑洪萍. 福建省大中型水库常见淡水藻类图集 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012. ZHENG H P. Atlas of common freshwater algae in large and medium-sized reservoirs in Fujian Province [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012 (in Chinese).
- [27] 施择. 滇池常见浮游藻类图册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014. SHI Z. Dianchi common phytoplankton handbook [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).

- [28] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.HU H J,WEI Y X.The freshwater algae of China[M].Beijing:Science Press,2006 (in Chinese).
- [29] 赵文.水生生物学[M].北京:中国农业出版社,2005.Aquatic biology[M].Beijing:China Agricultural Press, 2005 (in Chinese).
- [30] 张觉民,何志辉.内陆水域渔业自然资源调查手册[M].北京:农业出版社,1991.ZHANG J M,HE Z H.Handbook of investigation of fishery natural resources in inland waters [M]. Beijing:Agriculture Press,1991 (in Chinese).
- [31] 陈雪梅.淡水桡足类生物量的测算[J].水生生物学集刊,1981,7(3):397-408..CHEN X M.Calculation of biomass of freshwater copepods [J]. Journal of aquatic biology, 1981, 7 (3):397-408 (in Chinese).
- [32] 范正年.测定淡水枝角类生物量的两种方法比较[J].动物学杂志,1988,23(5):29-31.FAN Z N.Comparison of two methods for measuring freshwater Cladocera biomass [J]. Chinese journal of zoology, 1988,23(5):29-31 (in Chinese).
- [33] 董立新,周绪申.浮游植物多样性指数在内陆水体污染类型评价中的应用简述[J].海河水利,2017(5):57-60.DONG L X,ZHOU X S.Brief introduction of the application of phytoplankton diversity index in the assessment of inland water pollution types [J].Haihe water resources, 2017 (5) : 57-60 (in Chinese).
- [34] ŠMILAUER P,LEPŠ J.Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5[M].Cambridge,UK:Cambridge University Press,2014.
- [35] 年跃刚,宋英伟,李英杰,等.富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨[J].环境科学研究,2006,19(1):67-70.NIAN Y G, SONG Y W, LI Y J, et al.Regime shift theory and ecological restoration discussion in eutrophic shallow lakes [J].Research of environmental sciences, 2006, 19 (1) : 67-70 (in Chinese with English abstract).
- [36] 张澎浪,孙承军.地表水体中藻类的生长对pH值及溶解氧含量的影响[J].中国环境监测,2004,20(4):49-50.ZHANG P L,SUN C J.The influence of algae growing on pH and DO in surface water[J].Environmental monitoring in China,2004,20 (4):49-50 (in Chinese with English abstract).
- [37] 刁晓君,黄彩虹,何连生,等.白洋淀草型与藻型湖泊沉水植物群落结构差异及影响因素[J].湿地科学,2013,11(3):366-371.DIAO X J, HUANG C H, HE L S, et al.Difference in community structure of submerged macrophytes and related influence factors between macrophytic and algal regions of Baiyangdian Lake [J].Wetland science ,2013, 11(3) : 366-371 (in Chinese with English abstract).
- [38] 裴梦婷,郑维友,张恒,等.黄颡鱼早繁鱼苗集约化养殖池塘浮游植物及水质监测[J].贵州农业科学,2019,47(6):68-72.PEI M T,ZHENG W Y,ZHANG H, et al.Phytoplankton and water qualities monitoring in intensive aquaculture ponds of *Pelteobagrus fulvidraco* from early propagation [J].Guizhou agricultural sciences, 2019, 47 (6) : 68-72 (in Chinese with English abstract).
- [39] 张爱芳,黄江峰,章海鑫,等.黄颡鱼夏花培育池水质及浮游生物数量和类型的变化[J].水产学杂志,2021,34(2):71-75.ZHANG A F, HUANG J F, ZHANG H X, et al.Changes in water quality and density of plankton in a juvenile yellow catfish rearing pond [J].Chinese journal of fisheries, 2021,34(2): 71-75 (in Chinese with English abstract).
- [40] 封高茂,陈文静,丁立云,等.黄颡鱼池塘养殖技术试验推广总结[J].江西水产科技,2018(1):7-9.FENG G M, CHEN W J,DING L Y, et al.Summary of experiment and popularization of pond culture technology of *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. Jiangxi fishery science and technology, 2018(1) : 7-9 (in Chinese).
- [41] 张保发,陈碧波,曹胜欢,等.黄颡鱼“黄优1号”养殖技术[J].科学养鱼,2021(9):45-47.ZHANG B F, CHEN B B, CAO S H, et al. Culture techniques of *Pelteobagrus fulvidraco* “Huangyou No.1” [J].Scientific fish farming, 2021(9):45-47 (in Chinese).
- [42] 沈韫芬.原生动物学[M].北京:科学出版社,1999.SHEN Y F. Protozoology [M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese).

## Population dynamics of trichodinids on yellow catfish larvae and juveniles and their correlation with aquatic environmental factors

ZHANG Enze, GU Zemao

College of Fisheries, Huazhong Agricultural University/National Aquatic Animal Diseases Para-reference Laboratory (HZAU)/Hubei Engineering Technology Research Center for Aquatic Animal Diseases Control and Prevention, Wuhan 430070, China

**Abstract** In order to investigate the ecological regulatory factors influencing *Trichodina* infection in yellow catfish larvae and juveniles, a population dynamics study of trichodinids was conducted at a yellow catfish seedling farm in Wuhan City, Hubei Province, from May to June 2023. We detected trichodinid infection in yellow catfish larvae and juveniles, identified trichodinid species using morphological and molecular methods, measured physicochemical water quality factors, and quantitatively analyzed plankton. Besides, the correlations between trichodinid infection and aquatic environmental factors were examined using Spearman correlation and redundancy analysis. The results indicated that the prevalence of trichodinid infection ranged from 26.7% to 93.0%, with infection intensity ranging from 1 to 21. Six trichodinid species were identified, including *Trichodina hyperparasitis* Chen & Hsieh, 1984. The water temperature in the yellow catfish seedling pond ranged from 23.0 °C to 31.5 °C, Secchi disk depth ranged from 53.0 to 109.0 cm, pH ranged from 6.8 to 8.5, ammonia nitrogen concentration ranged from 0.1 to 1.3 mg/L, nitrite nitrogen concentration ranged from 0.003 to 0.020 mg/L. A total of 54 genera and 73 species of zooplankton were identified, with *Conochilus unicornis* as the dominant species. Zooplankton density ranged from 1 171.30 to 28 712.02 ind./L, biomass ranged from 0.54 to 14.97 mg/L, the Shannon–Wiener diversity index ranged from 0.56 to 1.32, the Pielou evenness index ranged from 0.22 to 0.49 and the Margalef richness index ranged from 2.31 to 4.28. A total of 59 genera and 131 species of phytoplankton have been identified, with *Chlorella* sp. as the dominant species. Phytoplankton density ranged from  $1.88 \times 10^5$  to  $5.61 \times 10^6$  ind./L, biomass ranged from 0.38 to 8.04 mg/L, the Shannon–Wiener diversity index ranged from 0.53 to 1.64, the Pielou evenness index ranged from 0.16 to 0.49 and the Margalef richness index ranged from 3.66 to 6.86. Besides, dissolved oxygen, ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, feed quantity, rotifer biomass, protozoan biomass, Euglenophyta biomass, Cryptophyta biomass, Pyrrophyta biomass, zooplankton Shannon–Wiener diversity index, and phytoplankton Margalef richness index were the primary aquatic environmental factors. Among these, the ammonia nitrogen and rotifer biomass were the most pivotal factors. Therefore, in practical aquaculture production, the population density of trichodinids can be regulated by adjusting the aforementioned aquatic environmental factors.

**Keywords** trichodinid; yellow catfish; larvae and juvenile; population dynamics; aquatic environmental factor; dynamic change; correlation

(责任编辑:边书京)