

繁殖洄游期青海湖裸鲤雌雄个体及群体对栖息地底质偏好选择的差异

石小涛 卢建雨 柯森繁 李冬晴 季怀耀 焦易林 王渊洋 祁洪芳 高生辉 涂志英

DIFFERENCES IN HABITAT SUBSTRATE PREFERENCES BETWEEN MALE AND FEMALE INDIVIDUALS AND GROUPS OF *GYMNOCYPRIS PRZEWALSKII* DURING THEIR BREEDING AND MIGRATION PERIOD

SHI Xiao-Tao, LU Jian-Yu, KE Sen-Fan, LI Dong-Qing, JI Huai-Yao, JIAO Yi-Lin, WANG Yuan-Yang, QI Hong-Fang, GAO Sheng-Hui, TU Zhi-Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0064>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

人工模拟条件下青海湖裸鲤自然繁殖环境条件需求研究

ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS OF NATURAL REPRODUCTION OF *GYMNOCYPRIS PRZEWALSKII* UNDER ARTIFICIAL SIMULATED CONDITIONS

水生生物学报. 2022, 46(6): 779–787 <https://doi.org/10.7541/2022.2021.0370>

人工模拟产卵环境中青海湖裸鲤的繁殖行为

REPRODUCTIVE BEHAVIORS OF *GYMNOCYPRIS PRZEWALSKII* IN ARTIFICIAL MIMIC SPAWNING ENVIRONMENTS

水生生物学报. 2021, 45(5): 1120–1128 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.031>

青海湖裸鲤肠道显微结构及基于宏条形码的食性分析

INTESTINAL MICROSTRUCTURE AND DIETARY ANALYSIS BASED ON MACROBARCODE OF *GYMNOCYPRIS PRZEWALSKII*

水生生物学报. 2023, 47(12): 1954–1964 <https://doi.org/10.7541/2023.2023.0047>

沙柳河青海湖裸鲤早期资源发生量及时空分布

THE SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION IN EARLY LIFE HISTORY STAGES OF *GYMNOCYPRIS PRZEWALSKII* IN SHALIU RIVER

水生生物学报. 2022, 46(2): 265–272 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.126>

色林错裸鲤感染匙形双穴吸虫的种群动态和寄生偏好

POPULATION DYNAMICS OF *DIPLOSTOMUM SPATHACEUM* AND ITS PREFERENCE IN INFECTING *GYMNOCYPRIS SELINCUENSIS* FROM SILING LAKE, TIBET AUTONOMOUS REGION, CHINA

水生生物学报. 2023, 47(6): 924–930 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0143>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2024.0064

# 繁殖洄游期青海湖裸鲤雌雄个体及群体对栖息地底质偏好选择的差异

石小涛<sup>1,2</sup> 卢建雨<sup>1,2</sup> 柯森繁<sup>1,2</sup> 李冬晴<sup>1,2</sup> 季怀耀<sup>3</sup> 焦易林<sup>4</sup> 王渊洋<sup>1,2</sup>  
祁洪芳<sup>5</sup> 高生辉<sup>1,2</sup> 涂志英<sup>6</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 宜昌 443002; 3. 贵州乌江水电开发有限责任公司, 贵阳 550002; 4. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 5. 青海湖裸鲤救护中心, 西宁 810016; 6. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002)

**摘要:** 为明晰青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)对栖息地底质的偏好, 研究通过青海湖裸鲤栖息地调查筛选出5种典型栖息地底质类型, 在青海湖支流沙柳河刚北干渠搭建配置有5种底质类型的青海湖裸鲤生境模拟池, 采用偏好指数量化法, 确定了雌雄个体偏好底质类型及偏好强度, 分析了影响青海湖裸鲤底质选择的内外因素。结果表明: (1)单尾青海湖裸鲤雌鱼个体沙砾底质访问时间最长(2540s), 雄鱼个体中小卵石底质访问时间最长(1960s); (2)青海湖裸鲤雌鱼只偏好沙砾底质(PI=6595.8), 雄鱼偏好3种底质类型, 其中中小卵石偏好程度最高(PR=10.3); (3)青海湖裸鲤雄鱼在群体底质选择中会跟随雌鱼的选择偏好, 沙砾底质访问时间最长(2051s)。研究旨在为青海湖裸鲤河道底质改造、“自然”栖息地的营造提供理论依据。

**关键词:** 性别; 群体; 栖息地; 底质偏好; 偏好指数; 青海湖裸鲤

**中图分类号:** S961.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)10-1780-09



青海湖是我国面积最大的内陆咸水湖泊, 地处青藏高原, 是国际重要保护湿地, 国家级自然保护区<sup>[1,2]</sup>。青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*), 当地俗称“湟鱼”, 隶属于鲤形目, 鲤科, 裂腹鱼亚科(*Schizothoracinae*), 裸鲤属(*Gymnocypris*), 是青海湖中唯一的经济鱼类, 具有生命周期长、生长缓慢和性成熟晚等生物学特性<sup>[3-5]</sup>, 在青海湖生态系统中占据不可替代的核心地位<sup>[6]</sup>。20世纪60年代初至90年代末, 受人类活动影响(拦河筑坝、引水灌溉、过度捕捞等)青海湖裸鲤生存受到威胁, 青海湖裸鲤资源量由6.9亿尾降至不足0.25亿尾。在2004年青海湖裸鲤被列入《中国物种红色名录》, 属国家二级濒危保护动物<sup>[7]</sup>。为恢复青海湖裸鲤资

源, 增殖放流及栖息地人工修复等工作逐渐受到重视<sup>[8]</sup>。增殖放流是采用人工繁殖技术孵化鱼卵及培育鱼苗并放流至青海湖, 短期内可实现青海湖裸鲤资源量的提升, 但人工繁殖条件与野外自然水体具有差异性<sup>[9,10]</sup>, 放流的青海湖裸鲤对野外环境的适应性仍然存疑。青海湖裸鲤完成安全且可持续的资源恢复过程核心在于如何修复自然栖息生境, 以营造满足青海湖裸鲤栖息需求的生境条件。鉴于此, 有必要开展青海湖裸鲤对栖息地参数的行为响应研究。

鱼类栖息地质量与鱼类对多种生境因子选择策略息息相关, 主要包括底质、流速、水温、光、声等生境因子<sup>[11-13]</sup>。其中, 河床底质是鱼类栖息地

**收稿日期:** 2024-02-09; **修订日期:** 2024-05-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(52279069); 湖北省自然科学基金计划-创新群体项目(2023AFA005); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(KF2022-10); 国家自然科学基金委员会联合基金(U2340218)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (52279069); the Innovative Research Group Program of Natural Science Foundation of Hubei Province (2023AFA005); Engineering Research Center of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region, the Ministry of Education, and the China Three Gorges University (KF2022-10); National Natural Science Foundation of China, Joint Fund Project; A Study on the Behavioral Mechanisms of Characteristic Fish in the Yangtze River Basin and Ecological Hydraulic Regulation of Fishways (U2340218)]

**作者简介:** 石小涛(1981—), 男, 博士; 主要研究方向为生态水利。E-mail: sxtshanghai@163.com

**通信作者:** 柯森繁(1992—), 男, 博士; 主要研究方向为生态水利。E-mail: ksfcgtu@163.com

的重要构成要素, 鱼类对不同底质选择偏好行为对改造和优化栖息生境至关重要<sup>[14]</sup>。如在白鹤滩水电站库区支流黑水河(自则木河与西洛河汇口至下游金沙江汇口的近75 km干流河段)底部铺设裂腹鱼产卵偏好的卵石底质, 栖息地质量有明显改善<sup>[15]</sup>。在加利福尼亚州的莫克鲁姆河下游通过增加砾石基质提升了鲑(*Oncorhynchus* spp.)幼鱼存活率(从0提升到超过63%)<sup>[16, 17]</sup>。圣克莱尔湖增设底质结构(石块、植物根团等), 可为该湖泊小型鱼类提供庇护所, 幼鱼提供保育区<sup>[18]</sup>。青海湖裸鲤成鱼每年5—7月份需要从青海湖上溯至其支流完成重要生活史阶段(索饵、产卵)。青海湖支流底质类型多样, 青海湖裸鲤对不同底质类型的偏好仍有待回答。

鱼性别可通过不同方式影响集群行为, 包括直接影响社会性和集群偏好, 由于雌雄两态间接影响雌雄栖息地选择和活动同步性<sup>[19, 20]</sup>。一些集群鱼类在社会行为中表现出强烈的性别隔离现象。如体型较大的雌性孔雀鱼(*Poecilia reticulata*)明显倾向于在同性群体中聚集, 这可能是一种减少雄性骚扰的机制, 雄性孔雀鱼则表现出较弱的社交倾向<sup>[21, 22]</sup>。即使是没有表现出明显雌雄性别性的鱼种, 鱼群也在某种程度上出现性别隔离<sup>[23]</sup>。非生殖期欧洲真鲃(*Phoxinus phoxinus*)雌性和雄性在高捕食风险下雄性表现出对同性的选择偏好<sup>[24]</sup>。个体鱼集群偏好也会有性别选择调节。如雌性食蚊鱼(*Gambusia affinis*)喜欢较大的鱼群<sup>[25]</sup>, 而慈鲷(*Cichlidae*)雌性比雄性更喜欢较小的鱼群<sup>[26]</sup>。每年洄游期, 青海湖裸鲤表现出聚集行为特征, 然而性别对集群行为特征、栖息地底质偏好选择及影响鲜有报道。

鉴于此, 本研究选取青海湖裸鲤为研究对象, 通过开展青海湖裸鲤栖息地原位生境调查, 获取栖息地底质类型参数, 在现场搭建青海湖裸鲤栖息地不同底质的生境模拟池, 采用视频跟踪技术分析雌雄个体及群体对底质选择行为策略, 构建青海湖裸鲤底质偏好指数(PI)确定雌雄个体及群体底质偏好类型。本研究对青海湖裸鲤适宜生境需求分析及评估栖息地质量提供重要数据参考, 对恢复青海湖裸鲤资源具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 前期调研

青海湖裸鲤上溯产卵主要有布哈河、沙柳河、哈尔盖河、泉吉河和黑马河五条河流。每年青海湖裸鲤5—7月份(繁殖洄游期)会上溯至支流中产卵。本试验于青海湖裸鲤繁殖洄游期(2022年6月)在青海湖一级河流沙柳河刚北干渠下游5 km

范围内开展栖息地调查。根据青海湖裸鲤鱼群聚集地, 在调查区域内布置70个调查点。在调查期间, 记录调查点地理位置坐标, 使用皮尺测量和照片记录等方式采集栖息地底质类型、底质大小等数据。以深潭、浅滩、深坨、浅流等鱼类需求栖息地典型地貌特征及发现鱼卵为衡量标准<sup>[11]</sup>, 从70个监测点中筛选出17个具有代表性的栖息地, 列为青海湖裸鲤的典型栖息地, 记录相关的地理位置信息(图1)。使用皮尺测量和照片记录等方式采集栖息地底质类型、底质大小等数据, 参考《河流泥沙颗粒分析规程》(水利部, 1994)和国外生态学研究Cummins分类方法, 设置5个底质类型, 分别为沙(直径 $\leq 0.01$  cm)、沙砾(直径0.1—0.2 cm)、中小卵石(直径2—5 cm)、光滑型-大卵石和大石块(直径10—25 cm)、底泥附着型-大卵石和大石块(直径10—25 cm), 相关底质参数详见表1。

### 1.2 试验鱼捕获及暂养

试验用鱼在每次试验开始前2d网捕于沙柳河刚北渠下游约2 km处, 本研究总共随机捕获了150尾青海湖裸鲤[体长:  $(21.8 \pm 1.7)$  cm]。捕获后立即放入带水容器并持续增氧运送至刚察县青海湖裸鲤救护中心青海湖裸鲤增殖放流站实验室, 暂养于循环养鱼池中恢复48h。为保持试验鱼活性, 暂养期间流水暂养, 暂养水温为 $13.2—14.1^{\circ}\text{C}$  (与沙柳河水温一致), 水体溶解氧浓度不低于 $6.5\text{ mg/L}$ 。在暂养结束后, 选取第二性征明显(雌雄判别方法: 雄鱼通体粗糙, 尾柄和尾鳍上有大量珠星; 雌鱼腹部相对膨胀, 生殖孔呈红色)且活性良好的性成熟(指腹轻按试验鱼腹部, 少量精液或卵粒流出)青海湖裸鲤开展试验。

### 1.3 试验装置

栖息地底质生境模拟池为圆形橡胶水槽(图2a), 槽体直径1.5 m, 槽内深0.45 m, 本试验通过水管放入漏水口内部对试验水槽进行注水(进水流速为 $0.3\text{ m/s}$ )。在每次试验结束后, 需要采用水槽内过滤排水装置(可拆卸)进行排水(排水流速为 $0.4\text{ m/s}$ ), 试验装置进出水方式不会对底质排布产生影响, 试验过程中不再进行注排水操作。试验期间水源为沙柳河自然河水, 水温为 $(16.3 \pm 1.7)^{\circ}\text{C}$ , 溶氧量为 $(5.1 \pm 0.9)\text{ mg/L}$ 。本研究需要将试验水槽均匀划分为5等份(每个底质区域面积占水槽总面积的比例均为 $4/21$ )并排布已筛选好的5种栖息地底质类型(沙、沙砾、中小卵石、光滑型-大卵石和大石块、底泥附着型-大卵石和大石块; 图2b)。

### 1.4 试验方法

本试验分为个体鱼和群体鱼试验。个体鱼试

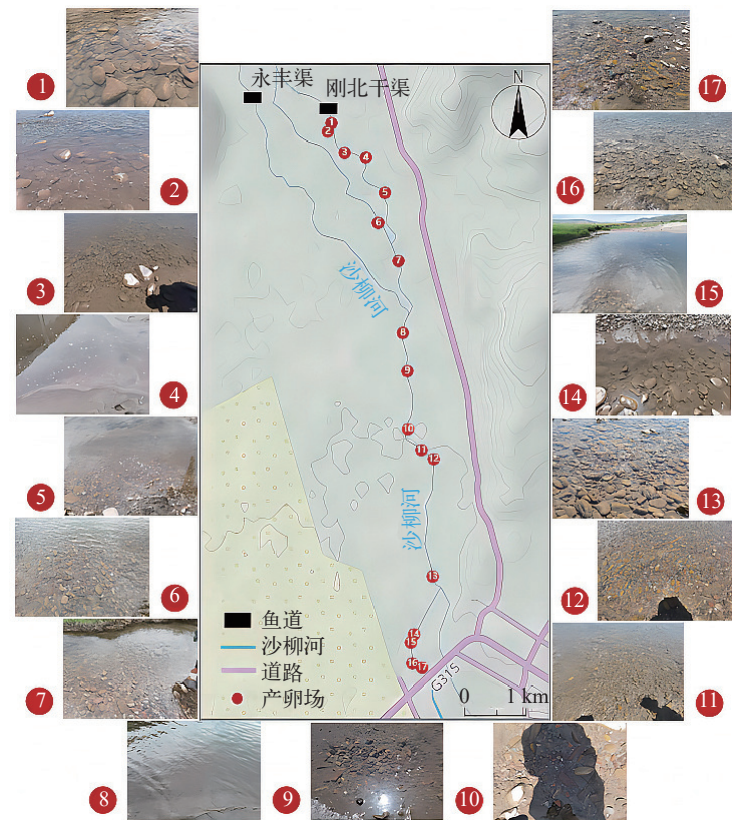


图 1 青海湖裸鲤典型栖息地地理位置图

Fig. 1 Geographic location map of the typical habitat of *Gymnocypris przewalskii*

表 1 栖息地底质类型

Tab. 1 Habitat substrate type

| 栖息地编号<br>Habitat number | 泥沙<br>Sediment | 沙砾<br>Gravel | 中小卵石<br>Small and medium<br>pebbles | 光滑型-大卵石和大石块<br>Smooth type-large pebbles<br>and large stones | 底泥附着-大卵石和大石块<br>Bottom mud attachment-large<br>pebbles and large stones |
|-------------------------|----------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1                       |                |              | √                                   | √                                                            | √√                                                                      |
| 2                       | √√             |              |                                     |                                                              | √√                                                                      |
| 3                       | √              |              | √√                                  |                                                              | √                                                                       |
| 4                       | √√             |              |                                     |                                                              |                                                                         |
| 5                       | √              | √√           |                                     |                                                              |                                                                         |
| 6                       |                | √            | √√                                  |                                                              |                                                                         |
| 7                       |                | √√           | √√                                  |                                                              |                                                                         |
| 8                       | √√             |              |                                     |                                                              | √                                                                       |
| 9                       | √              | √            | √√                                  |                                                              |                                                                         |
| 10                      |                | √            | √                                   | √                                                            |                                                                         |
| 11                      | √              |              | √√                                  |                                                              |                                                                         |
| 12                      |                |              | √√                                  | √                                                            |                                                                         |
| 13                      |                |              | √                                   |                                                              | √√                                                                      |
| 14                      | √√             |              | √√                                  |                                                              | √                                                                       |
| 15                      | √              | √√           | √                                   |                                                              |                                                                         |
| 16                      |                |              |                                     |                                                              | √√                                                                      |
| 17                      |                | √            | √√                                  | √                                                            |                                                                         |

注: “√√”表示占比高; “√”表示占比低  
Note: “√√” represents a high proportion; “√” represents a low proportion

验分为雌雄鱼2组, 每组每次放鱼1尾, 重复12组, 总计24尾, 每尾鱼不重复利用。群体鱼试验设置6个雌雄数量比工况, 分别为♀:♂=0:6、1:5、2:4、3:3、4:2和6:0, 每个工况重复3次, 累计放鱼108尾, 每尾鱼不重复利用。在正式试验前, 先根据上述雌雄判别方法辨别青海湖裸鲤性别, 判别完成后取出过滤水装置并放入自制的带孔圆桶制造青海湖裸鲤适应区, 将试验鱼放入适应区域适应15min, 在适应结束后, 采用摄像头(8 mm, 24 Hz, 海康威视)全过程实时记录青海湖裸鲤对底质的选择行为, 试验时长2h, 试验时间为每天8:00—19:00。试验期间采用便携式温度计(MITIRTP198)实时监测水温, 预警保证水温与暂养水温一致。在试验结束后, 测量每尾鱼的湿重(g)、全长(cm)、体长(cm)和肥满度( $100\text{ g/cm}^3$ )等形态学数据, 测量后的试验鱼放流至沙流河。各工况试验鱼形态学参数详见表2。

1.5 数据分析

为量化雌雄个体及群体对不同底质类型的偏

好程度, 统计了不同底质类型青海湖裸鲤的访问时间。根据不同底质类型中青海湖裸鲤访问时间及计算各底质区域偏好指数来判定青海湖裸鲤的偏好选择区域。底质类型访问时间定义为以青海湖裸鲤鱼头为参考点, 采用视频自动分帧跟踪技术(Logger Pro软件)记录鱼头从进入某一底质区域开始至游出此区域的时间间隔(s), 在2h试验周期内, 累计鱼头在该底质区域的所有间隔时间。底质类型访问时间占比定义为该底质类型访问时间占5种底质类型访问时间总和的比例。为保证群体雌雄裸鲤跟踪的准确率, 进行了群体鱼跟踪预试验, 将已知性别的3尾雌裸鲤和3尾雄裸鲤进行背鳍颜色标记, 再依次放入微生境模拟池, 采用视频自动分帧跟踪技术连续追踪每尾鱼的游泳过程, 结束后比对试验鱼游泳轨迹与鱼体颜色标记处的运动轨迹, 发现不同性别青海湖裸鲤的视频跟踪数据准确率高达100%。为明晰雌雄个体的底质选择偏好, 提出了底质选择偏好指数(PI), 其计算方法: 参考Maia

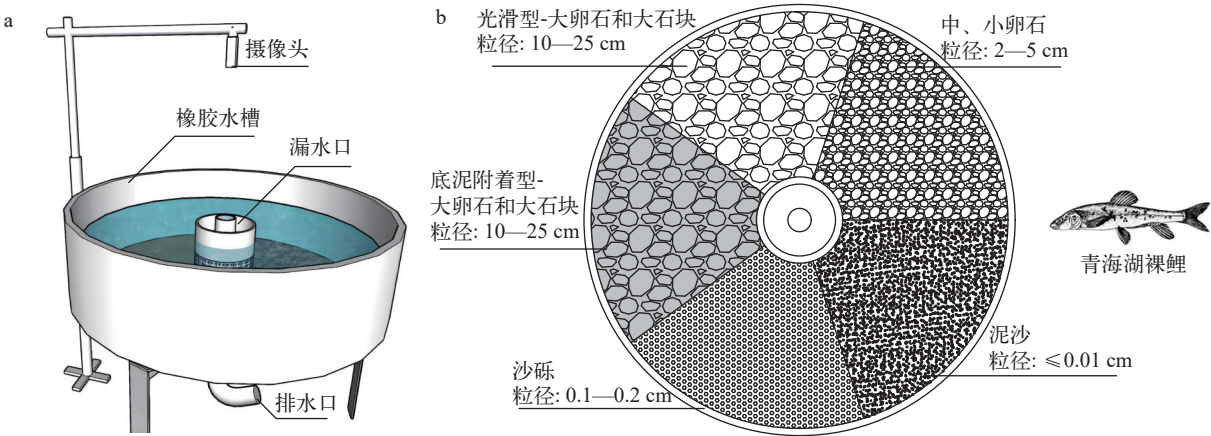


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the test device

a. 试验装置示意图; b. 试验装置顶部俯视图

a. schematic diagram of the test device; b. top view of the top of the test device

表2 试验鱼的相关参数

Tab. 2 Relevant parameters of test fish

| 工况<br>Working condition | 样本量<br>Sample size | 湿重<br>Natural weight (g) | 全长<br>Full length (cm) | 体长<br>Body length (cm) | 肥满度Fatness<br>( $100\text{ g/cm}^3$ ) |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 雌鱼个体                    | 12                 | 117.1±28.0               | 26.8±1.6               | 22.9±1.4               | 0.60±0.07                             |
| 雄鱼个体                    | 12                 | 109.1±46.2               | 25.8±2.6               | 22.2±2.3               | 0.61±0.09                             |
| ♀:♂=0:6                 | 18                 | 108.3±30.1               | 25.3±1.9               | 22.3±2.1               | 0.65±0.04                             |
| ♀:♂=1:5                 | 18                 | 104.3±44.0               | 25.5±3.4               | 21.5±2.0               | 0.61±0.09                             |
| ♀:♂=2:4                 | 18                 | 109.4±44.7               | 25.3±2.0               | 22.0±2.1               | 0.66±0.24                             |
| ♀:♂=3:3                 | 18                 | 99.6±22.8                | 25.4±1.9               | 21.7±1.7               | 0.60±0.06                             |
| ♀:♂=4:2                 | 18                 | 80.3±23.6                | 23.6±2.2               | 20.2±2.1               | 0.59±0.03                             |
| ♀:♂=6:0                 | 18                 | 101.1±16.7               | 26.1±1.6               | 22.4±1.6               | 0.57±0.03                             |

注: 肥满度=湿重(g)/全长<sup>3</sup>(cm)<sup>[27]</sup>; ♀:♂表示6尾中雌雄各自数量

Note: Fat fullness= wet weight (g)/ full length of <sup>3</sup> (cm); ♀:♂ indicates the number of males and females in tails

和Volpato (2016)<sup>[28]</sup>公式理念,先计算每尾鱼在不同底质类型的访问时间,基于访问时间计算区域面积。5种底质累积区域面积平均值与该底质区域面积的差值为偏好指数(PI),若PI值>0,即代表青海湖裸鲤偏好该底质,PI值<0即不偏好。当偏好底质个数>2时,用偏好率PR表示最偏好底质相对于其他偏好底质的偏好程度。

试验数据采用Microsoft Excel 2022软件进行处理和统计,采用SPSS 22.0软件进行统计学分析,采用Origi 2022软件进行图形绘制,每组试验鱼形态学参数采用均值±标准差(mean±SD)描述。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析不同底质类型之间青海湖裸鲤访问时间的差异性, $P<0.05$ ,代表显著性差异。

## 2 结果

### 2.1 不同底质类型下青海湖裸鲤雌雄个体访问时间

不同底质类型下雌雄个体的底质访问时间有显著差异。结果表明,雌鱼对不同底质类型访问时间排序为沙砾>中小卵石>泥沙>光滑型-大卵石和大石块>底泥附着型-大卵石和大石块。雌鱼在沙砾底质上的访问时间显著高于其他底质( $P<0.05$ )。雄鱼对不同底质类型访问时间排序为中小卵石>沙砾>底泥附着型-大卵石和大石块>泥沙>光滑型-大卵石和大石块。雄鱼在中小卵石、沙砾、底泥

附着型-大卵石和大石块底质上的访问时间显著高于其他底质类型( $P<0.05$ ; 图3)。

### 2.2 青海湖裸鲤雌雄个体对不同底质类型的选择偏好

通过计算青海湖裸鲤雌雄个体对不同底质类型的选择偏好PI值,发现青海湖裸鲤雌鱼只偏好沙砾底质(PI=6595.8),对其他底质类型均不偏好。雄鱼对多个底质类型有偏好选择行为,偏好程度从大到小分别为中小卵石(PI=3116.8)>沙砾(PI=777.3)>底泥附着型-大卵石和大石块(PI=552.8)。中小卵石底质相对于其他偏好底质的偏好率PR=10.3 (图4)。

### 2.3 青海湖裸鲤不同雌雄群体数量比的底质类型访问时间

通过统计不同群体雌雄数量比在5个底质类型上的访问时间,发现当群体只有雄鱼(♀:♂=0:6)时,中小卵石的访问时间占比最大,为27% (图5)。当群体中只要有雌鱼(♀:♂=1:5、2:4、3:3、4:2、0:6)均发现沙砾底质的访问时间最长,占比分别为29%、24%、25%、36%和35% (图5)。通过视频观察,雌雄数量比失衡时(♀:♂<1),50%以上的雄鱼会跟随雌鱼进行活动,主要表现为雌鱼选择某一底质,雄鱼会追逐雌鱼选择同样底质(图6)。

## 3 讨论

### 3.1 不同性别青海湖裸鲤底质偏好分析

鱼类适宜栖息地的河床营造关键前提是摸清鱼类对河床底质的偏好选择。不同鱼种对底质偏好类型具有互异性。岩原鲤(*Procypris rabaudi*)幼鱼偏好大砾石(10—15 cm)底质,出现频次高达63.9%<sup>[29]</sup>;多数石斑鱼(*Epinephelus* spp.)喜栖息于岩礁底质海区,如赤点石斑鱼(*Epinephelus akaara*)多栖息在管状礁体内部,或挤入礁体间的窄缝和礁体遮挡的阴影区内<sup>[30]</sup>。大尺寸底质在背流面形成的低流速及视觉隔离效应有利于某些鱼类觅食、躲避捕食者及节省运动能耗。然而,本研究依据青海湖裸鲤底质访问时间及底质偏好指数发现雌鱼只偏好一种小尺寸底质类型(沙砾底质),雄鱼偏好3种底质类型,其中中小卵石偏好程度最高。总体而言,雌雄青海湖裸鲤均偏好较小粒径的底质(0.1—5 cm)。青海湖裸鲤属于长日照鱼类<sup>[31]</sup>,光照时间充足,性腺迅速发育。沙柳河刚北干渠的水流较浅,小粒径底质可能更有利于青海湖裸鲤鱼体处于长时间日照覆盖,促进其生长发育。筑巢是鱼类繁殖期较为常见的一种行为,筑巢行为需借助底质形成聚卵窝。雄性尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)在繁殖期更倾向于在沙子上筑巢,形成聚卵窝以吸引雌性

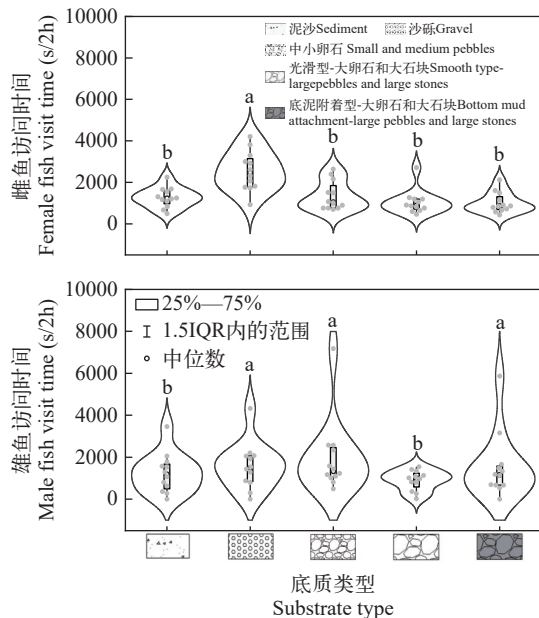


图3 不同性别青海湖裸鲤不同底质的访问时间

Fig. 3 Visit duration of different substrates of *Gymnocypris przewalskii* of different genders

小写字母不同表示差异达到显著水平(\* $P<0.05$ )

Different lower case letters indicate a significant level (\* $P<0.05$ )

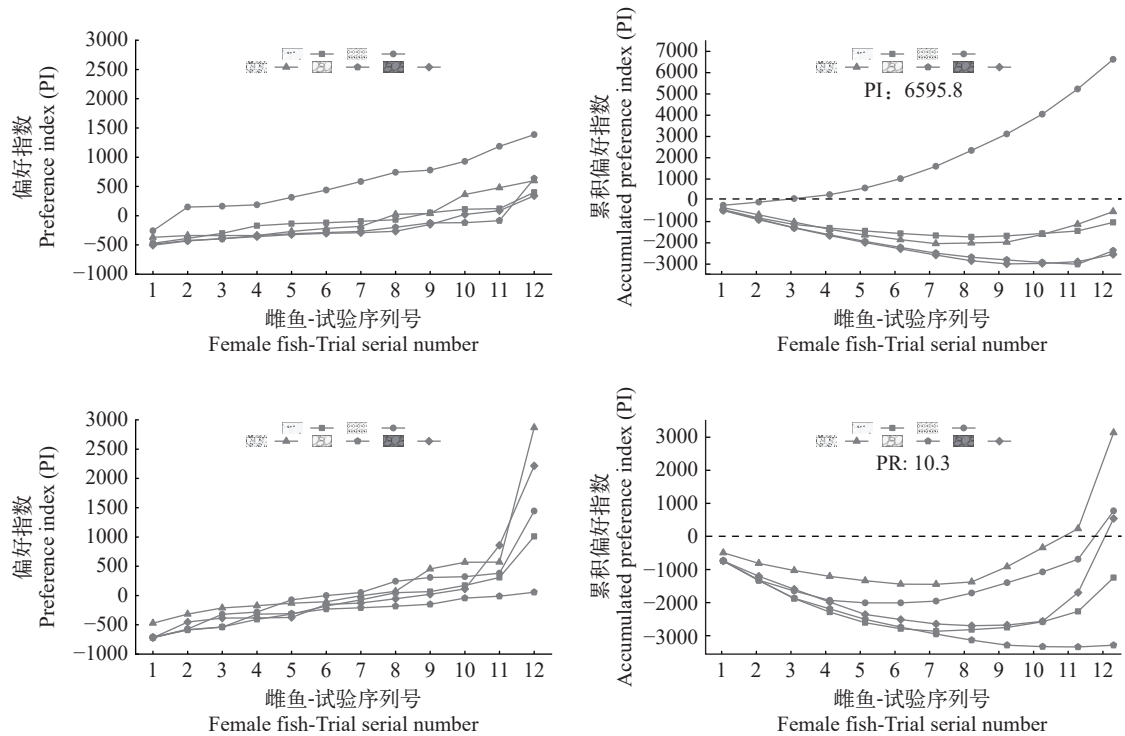


图4 青海湖裸鲤雌雄个体对不同底质类型的偏好指数

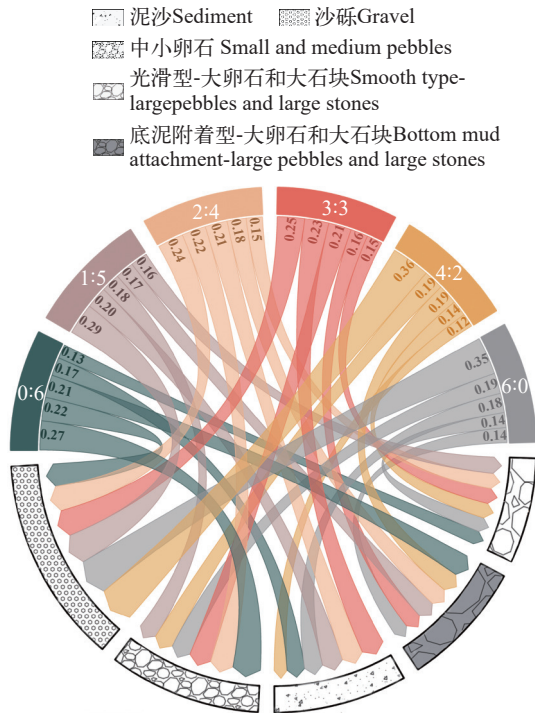
Fig. 4 Preference index of male and female individuals for different substrate types of *Gymnocypris przewalskii*

图5 青海湖裸鲤雌雄群体数量比在不同底质类型下访问时间占比分布

Fig. 5 Distribution of visit time of male and female populations in Qinghai Lake under different substrate types

排卵<sup>[32-34]</sup>。本研究通过视频观察发现青海湖裸鲤雌鱼也存在修筑“产卵窝”行为<sup>[35]</sup>, 当处在沙砾底质处常采用臀鳍和尾鳍剧烈抖动的方式推动沙砾运

动。尽管本研究未发现青海湖裸鲤产卵, 但推测受性激素水平影响, 雌鱼可能倾向于易扰动的沙砾底质, 形成聚卵窝为卵子着床提供庇护所。

### 3.2 青海湖裸鲤群体底质偏好分析

雌雄鱼互动社交集群性在自然界中是普遍存在的现象。如雄性鲈(*Myxoperca venenosa*)会将身体扭成“S”形诱惑雌鲈; 黑线鳉(*Melanogrammus aeglefinus*)会通过发出活泼轻快的气泡声引诱雌性; 雄性章鱼(*Octopodidae*)会用触手抚摸雌性进行求爱<sup>[36]</sup>。相反地, 孔雀鱼会出现明显的性别隔离现象, 雄性孔雀鱼会花费更多的时间游离多个鱼群之间。青海湖裸鲤为体外受精鱼种, 相对于体内受精的孔雀鱼会有更高的生殖成本<sup>[37]</sup>, 弱化了性别隔离现象。在产卵场集群的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichys nobilis*)等大鱼群鱼类, 数量庞大且产卵鱼群的雌雄性比相对平衡, 产卵活动多为雌雄鱼成对进行, 但也会出现2—3尾雄鱼追逐1尾雌鱼的现象<sup>[38]</sup>。在野外环境中, 青海湖裸鲤大量聚集且性选择偏好和交尾配比均为1:1<sup>[4]</sup>, 可能雌雄数量比一旦失调(即 $\text{♀}:\text{♂} \leq 1$ ), 雄鱼追随雌鱼选择相同底质的现象凸显。通过现场视频观测也发现雄性青海湖裸鲤进行伴游、追逐和潜尾等一系列追随雌性青海湖裸鲤的互作行为。本研究青海湖裸鲤雌鱼已进入生殖阶段, 群体鱼底质选择中雄鱼与雌鱼表现出相同底质偏好, 可能受生殖策略影响, 即

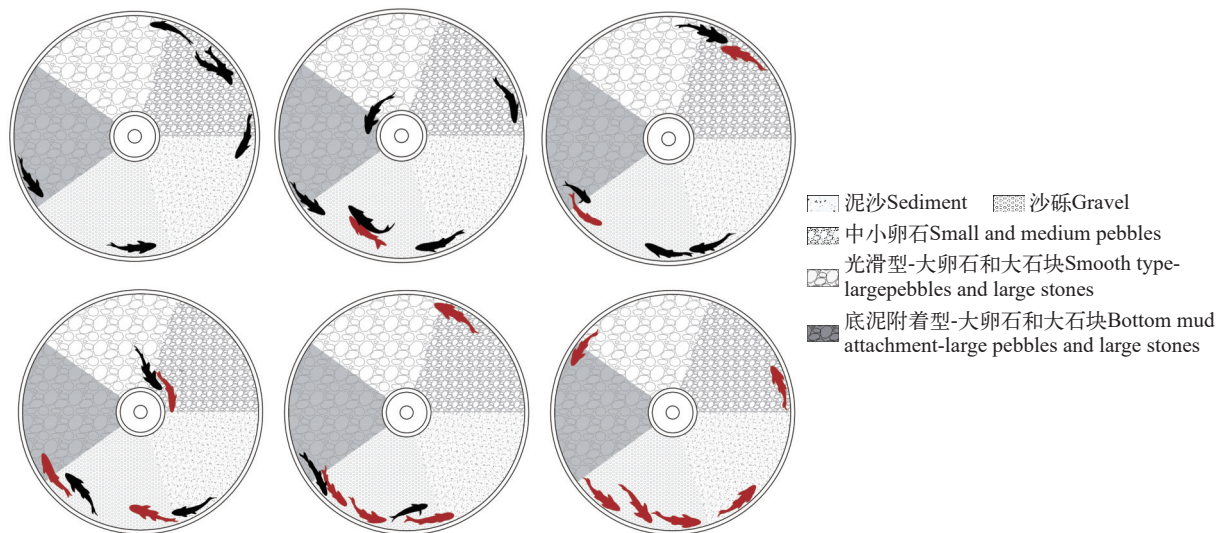


图6 青海湖裸鲤雌雄群体对不同底质的行为选择示意图(红色-♀, 黑色-♂)

Fig. 6 Schematic diagram of behavioral selection on different substrates by male and female groups of Qinghai Lake naked carp (red-♀, black-♂)

雌鱼释放的产卵信号引诱雄鱼在底质选择中表现出与雌鱼较强的底质选择同步性, 削弱了雄鱼对底质的本能选择。在后续底质选择偏好研究中, 需要分析产卵期和非产卵期雌雄裸鲤群体对不同底质选择的差异性。

不同鱼种会根据性别进行鱼群选择, 如性成熟的雄性斑马鱼(*Danio rerio*)在不受环境的干扰下首选雌性鱼群<sup>[39]</sup>; 成熟雄性食蚊鱼同样更喜欢雌鱼鱼群<sup>[40]</sup>。雌性和雄性亚成体三刺鱼(*Gasterosteus aculeatus*)会根据感知捕食风险水平和鱼群性别, 做出不同行为决策。在高捕食风险下, 雄性亚成体三刺鱼显著偏好雄性鱼群; 在低捕食风险下, 雄鱼更倾向于与异性互动<sup>[41]</sup>。本试验青海湖裸鲤处在相对安全稳定的环境中, 野外水体中不同水域青海湖裸鲤面对的捕食风险等级不同, 如青海湖裸鲤洄游通过(泉吉河)鱼道上溯会遭遇水鸟捕食的高风险率, 在有捕食风险胁迫下雄鱼是否仍能表现出与雌鱼相同的底质选择偏好仍需进一步研究。

本文分析了不同性别青海湖裸鲤及青海湖裸鲤群体对不同底质类型偏好的差异, 未来仍需在天然河道中开展原位监测试验, 探明在捕食胁迫、水流条件及光照强度变化下青海湖裸鲤对底质的偏好选择。此外, 根据本研究青海湖裸鲤雌雄鱼偏好的底质类型, 可在青海湖裸鲤产卵洄游路线上择取局部微生境单元, 进行河道底质改造, 长序列监测评估青海湖裸鲤在该单元的生存及繁殖状态, 验证底质选择的合理性并进行优化调整, 为青海湖裸鲤“自然”栖息地营造提供理论依据和技术支撑。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

#### 参考文献:

- [1] Zhang H, Tan X C, Shi J Q, *et al.* Spatial and temporal distribution of *Gymnocypris przewalskii* larvae in the Buha River of the Qinghai Lake [J]. *Ecological Science*, 2009, **28**(5): 443-447. [张宏, 谭细畅, 史建全, 等. 布哈河青海湖裸鲤鱼苗鱼卵的时空分布研究 [J]. *生态科学*, 2009, **28**(5): 443-447.]
- [2] Yang Y Q, Yi X F, Li N. Analysis on trophic structure of main waterbirds in Qinghai Lake based on stable isotopic technology [J]. *Zoological Research*, 2009, **30**(4): 418-422. [杨月琴, 易现峰, 李宁. 利用稳定同位素技术分析青海湖优势水鸟的营养级结构 [J]. *动物学研究*, 2009, **30**(4): 418-422.]
- [3] Tan L F, Xu D P, Qi H F, *et al.* The spatial and temporal distribution in early life history stages of *Gymnocypris przewalskii* in Shaliu River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(2): 265-272. [谈龙飞, 徐东坡, 祁洪芳, 等. 沙柳河青海湖裸鲤早期资源发生量及时空分布 [J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(2): 265-272.]
- [4] Zhou Y H, Wu Y H, Zhang P M, *et al.* Reproductive behaviors of *Gymnocypris przewalskii* in artificial mimic spawning environments [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(5): 1120-1128. [周杨浩, 吴艳红, 张平梅, 等. 人工模拟产卵环境中青海湖裸鲤的繁殖行为 [J]. *水生生物学报*, 2021, **45**(5): 1120-1128.]
- [5] Shi J Q, Tang H Y, Qi H F, *et al.* Observation on the gonad maturation of *Gymnocypris przewalskii* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2004, **34**(3): 7-9. [史健全, 唐洪玉, 祁洪芳, 等. 青海湖裸鲤性腺发育观察 [J]. *淡水渔业*, 2004, **34**(3): 7-9.]
- [6] Wang J L, Wu Y F. *Gymnocypris przewalskii* [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 1975: 29-30. [王基琳, 武云飞. 青海湖裸鲤 [J]. *水产科技情报*, 1975: 29-30.]

- [7] Wang C R. Hydroacoustic stock assessment of (*Gymno-cypris przewalskii*) in Qinghai Lake [D]. Wuhan: Hua-zhong Agricultural University, 2011: 23-25. [王崇瑞. 青海湖裸鲤资源水声学评估 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011: 23-25.]
- [8] Shi J Q, Wang J L. Present situation and countermeasures of fishery resources in Qinghai Lake [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 1995, **22**(1): 42-43. [史建全, 王基琳. 青海湖渔业资源的现状及对策 [J]. 水产科技情报, 1995, **22**(1): 42-43.]
- [9] Näslund J, Johnsson J I. Environmental enrichment for fish in captive environments: effects of physical structures and substrates [J]. *Fish and Fisheries*, 2016, **17**(1): 1-30.
- [10] Johnsson J I, Brockmark S, Näslund J. Environmental effects on behavioural development consequences for fitness of captive - reared fishes in the wild [J]. *Journal of Fish Biology*, 2014, **85**(6): 1946-1971.
- [11] Wu X. Research progress on water environment conditions of river fish habitat [J]. *Agriculture and Technology*, 2022, **42**(22): 87-90. [邬鑫. 河流鱼类栖息地水环境条件研究进展 [J]. 农业与技术, 2022, **42**(22): 87-90.]
- [12] Shalgimbaeva G M, Mugue N S, Isbekov K B, *et al.* Ural (Zhayik) River spawning grounds of the sturgeon (Acipenseridae) in the republic of Kazakhstan: modern situation [J]. *Journal of Ichthyology*, 2022, **62**(7): 1439-1453.
- [13] Xu J, Sang W, Dai H, *et al.* A detailed analysis of the effect of different environmental factors on fish phototactic behavior: directional fish guiding and expelling technique [J]. *Animals*, 2022, **12**(3): 240.
- [14] Allouche S. Nature and functions of cover for riverine fish [J]. *Bulletin Français De La Pêche et De La Pisciculture*, 2002(365/366): 297-324.
- [15] Du H, Wei Q W, Zhang H, *et al.* Changes of bottom substrate characteristics in spawning ground of Chinese sturgeon downstream the gezhouba dam from impounding of three gorge reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(9): 3124-3131. [杜浩, 危起伟, 张辉, 等. 三峡蓄水以来葛洲坝下中华鲟产卵场河床质特征变化 [J]. 生态学报, 2015, **35**(9): 3124-3131.]
- [16] Barlaup B T, Gabrielsen S E, Skoglund H, *et al.* Addition of spawning gravel-a means to restore spawning habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), and Anadromous and resident brown trout (*Salmo trutta* L.) in regulated rivers [J]. *River Research and Applications*, 2008, **24**(5): 543-550.
- [17] Merz J E, Setka J D, Pasternack G B, *et al.* Predicting benefits of spawning-habitat rehabilitation to salmonid (*Oncorhynchus* spp.) fry production in a regulated California River [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, **61**(8): 1433-1446.
- [18] St. Clair River Bi-National Public Advisory Council. Delisting Targets for Loss of Fish/ Wildlife Habitat Beneficial Use Impairment of the St. Clair River Area of Concern. 2013.
- [19] Bartolino V, Ciannelli L, Bacheler N M, *et al.* Ontogenetic and sex-specific differences in density-dependent habitat selection of a marine fish population [J]. *Ecology*, 2011, **92**(1): 189-200.
- [20] Drymon J M, Dedman S, Froeschke J T, *et al.* Defining sex-specific habitat suitability for a northern gulf of Mexico shark assemblage [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020(7): 35.
- [21] Magurran A E, Seghers B H. Sexual conflict as a consequence of ecology: evidence from guppy, *Poecilia reticulata*, populations in Trinidad [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 1994, **255**(1342): 31-36.
- [22] Griffiths S, Magurran A. Sex and schooling behaviour in the Trinidadian guppy [J]. *Animal Behaviour*, 1998, **56**(3): 689-693.
- [23] Richards E L, van Oosterhout C, Cable J. Sex-specific differences in shoaling affect parasite transmission in guppies [J]. *PLoS One*, 2010, **5**(10): e13285.
- [24] Griffiths S W, Orpwood J E, Ojanguren A F, *et al.* Sexual segregation in monomorphic minnows [J]. *Animal Behaviour*, 2014(88): 7-12.
- [25] Agrillo C, Dadda M, Bisazza A. Sexual harassment influences group choice in female mosquitofish [J]. *Ethology*, 2006, **112**(6): 592-598.
- [26] Reddon A R, Balk D, Balshine S. Sex differences in group-joining decisions in social fish [J]. *Animal Behaviour*, 2011, **82**(2): 229-234.
- [27] Jiao Y L, Shi X T, Xu J W, *et al.* The upstream behavior of *Schizothorax wangchiachii* after crossing the dam at Songxin hydropower Station in Heishui River, a tributary of the Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **35**(2): 1-12. [焦易林, 石小涛, 许家炜, 等. 金沙江支流黑水河松新电站短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii*)过坝后上溯行为 [J]. 湖泊科学, 2022, **35**(2): 1-12.]
- [28] Maia C M, Volpato G L. A history-based method to estimate animal preference [J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 28328.
- [29] Feng X B, Zhu Y J, Li X, *et al.* Habitat suitability index model and minimum habitat area estimation of young *Procypris rabaudi* (Tchang): a simulation experiment in laboratory [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(1): 227-234. [冯宪斌, 朱永久, 李茜, 等. 试验条件下岩原鲤幼鱼栖息地适宜性模型及最小栖息面积估算 [J]. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 227-234.]
- [30] He D R, Shi Y M. Attractive effect of fish reef model on black porgy (*Sparus macrocephalus*) [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1995, **34**(4): 653-658. [何大仁, 施养明. 鱼礁模型对黑鲷的诱集效果 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1995, **34**(4): 653-658.]

- [31] Yu L X. Preliminary study on spawning habits of *Gymnocypris przewalskii* [J]. *Global Market Information Guide*, 2016(22): 107-108. [俞录贤. 青海湖裸鲤亲鱼产卵习性初探 [J]. 环球市场信息导报, 2016(22): 107-108.]
- [32] Mendonça F Z, Gonçalves-de-Freitas E. Nest deprivation and mating success in Nile tilapia (Teleostei: Cichlidae) [J]. *Revista Brasileira De Zoologia*, 2008, **25**(3): 413-418.
- [33] Mendonça F Z, Volpato G L, Costa-Ferreira R S, et al. Substratum choice for nesting in male Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. *Journal of Fish Biology*, 2010, **77**(6): 1439-1445.
- [34] Freitas R H A, Volpato G L. Motivation and time of day affect decision-making for substratum granulometry in the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2013, **29**(1): 239-241.
- [35] Yu L X. Discussion on the influence of river cut-off on reproductive migration of *Gymnocypris przewalskii* [J]. *Hebei Fisheries*, 2017(1): 28-30. [俞录贤. 浅议河流断流对青海湖裸鲤生殖洄游的影响 [J]. 河北渔业, 2017(1): 28-30.]
- [36] You K R. Courtship art of marine male animals [J]. *Ocean World*, 1998(7): 21. [游克仁. 海洋雄性动物的求爱艺术 [J]. 海洋世界, 1998(7): 21.]
- [37] Magurran A E, Seghers B H. A cost of sexual harassment in the guppy, *Poecilia reticulata* [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1994, **258**(1351): 89-92.
- [38] Zhao S L. Research progress in fish ethology [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, **31**(9): 102-104. [赵世亮. 鱼类行为学研究进展 [J]. 畜牧与饲料科学, 2010, **31**(9): 102-104.]
- [39] Ruhl N, McRobert S P. The effect of sex and shoal size on shoaling behaviour in *Danio rerio* [J]. *Journal of Fish Biology*, 2005, **67**(5): 1318-1326.
- [40] Agrillo C, Dadda M, Serena G. Choice of female groups by male mosquitofish (*Gambusia holbrooki*) [J]. *Ethology*, 2008, **114**(5): 479-488.
- [41] Rystrom T L, Clement V F, Rick I P, et al. Shoal sex composition and predation risk influence sub-adult threespine stickleback shoaling decisions [J]. *Behavioural Processes*, 2018(157): 495-501.

## DIFFERENCES IN HABITAT SUBSTRATE PREFERENCES BETWEEN MALE AND FEMALE INDIVIDUALS AND GROUPS OF *GYMNOCYPRIS PRZEWALSKII* DURING THEIR BREEDING AND MIGRATION PERIOD

SHI Xiao-Tao<sup>1,2</sup>, LU Jian-Yu<sup>1,2</sup>, KE Sen-Fan<sup>1,2</sup>, LI Dong-Qing<sup>1,2</sup>, JI Huai-Yao<sup>3</sup>, JIAO Yi-Lin<sup>4</sup>, WANG Yuan-Yang<sup>1,2</sup>, QI Hong-Fang<sup>5</sup>, GAO Sheng-Hui<sup>1,2</sup> and TU Zhi-Ying<sup>6</sup>

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 4. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 5. Qinhai Naked Carp Rescue Center, Xining 810016, China; 6. College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Restoring the natural habitat of *Gymnocypris przewalskii* is an important strategy to protect its resources. Among the essential elements of this habitat, riverbed substrate stands out, underscoring the necessity to discern the substrate preferences of *G. przewalskii* for habitat creation. Through a comprehensive habitat survey, this study identified five typical substrate types. Subsequently, a simulation pond featuring these substrate was constructed in the Gangbei Canal of Shaliu River, a Qinghai Lake tributary. Employing quantitative preference index methods, we evaluated the substrate preferences and intensity of both male and female *G. przewalskii* individuals. Additionally, we analyzed the internal and external factors influencing substrate selection in *G. przewalskii*. The results showed that (1) Females *G. przewalskii* exhibited the longest visit durations on gravel substrate (2540s), while males favored small and medium pebble (1960s); (2) Females displayed a preference solely for sandy and gravel substrate (PI=6595.8), whereas males preferred all three substrate types, particularly small and medium pebbles (PR=10.3); (3) Male *G. przewalskii* individuals tended to follow females' substrate preference in group selection, with gravel substrate attracting the longest visit durations (2051s). This study aims to provide a theoretical basis for river substrate modification and the creation of "natural" habitats conducive to *G. przewalskii*.

**Key words:** Gender; Group; Habitat; Substrate preference; Preference index; *Gymnocypris przewalskii*