



## 长江口鱼类群落粒径结构特征及群落稳定性评估

杨柯迹<sup>1</sup>, 陈锦辉<sup>2,3</sup>, 赵静<sup>1</sup>, 王学昉<sup>1</sup>, 吴建辉<sup>3</sup>,  
张硕<sup>1</sup>, 马金<sup>1,4,5\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092;

3. 上海海洋大学, 长江口水生生物资源监测与保护联合实验室, 上海 201306;

4. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

5. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 为了解长江口鱼类群落粒径结构特征及群落稳定性状态, 实验基于 2018 年长江口四季鱼类资源与环境调查数据, 利用标准化粒径谱、群落稳定性评估模型对鱼类群落特征进行了探究, 并利用营养指数法对长江口水体生态环境质量状况进行了综合评价。结果显示: ①长江口鱼类粒级主要分布在-2~6 范围内, 曲线穹顶位于 0~3 粒级范围, 鱼类群落以小型鱼类为主, 整体处于受干扰状态; ②北支和南支的鱼类群落存在季节变化, 北支粒径谱曲率夏季最大(-0.04), 秋季最小(-0.41), 生物量与数量相对关系统计量  $W$  值为-0.11~0.12; 南支粒径谱曲率夏季最大(-0.04), 冬季最小(-0.24),  $W$  值为-0.03~0.37; ③南支鱼类群落稳定性系数均值为 0.57, 北支均值为 0.43, 4 个季节南支与北支鱼类群落稳定性程度不同。水质营养指数表明, 北支富营养化程度(18.89)较南支(5.43)高, 且富营养化指数和群落稳定性系数呈显著负相关, 水体富营养化或对长江口鱼类群落系统偏离稳定状态有重要影响。研究表明, 长江口鱼类群落粒径偏小, 鱼类群落稳定性不高, 水质呈富营养化状态。本研究探究了全面禁捕前长江口鱼类粒径结构特征并评估了鱼类群落稳定性, 为长江口禁渔效果评价提供了前期研究依据。

**关键词:** 鱼类群落; 粒径结构; 粒径谱; 水质; 群落稳定性评估模型; 长江口

中图分类号: S 931.2

文献标志码: A

长江口水域生态系统是中国最大的河口生态系统, 长江冲淡水 and 长江口邻近海域水动力过程混合, 环境梯度变化大, 营养物质充足, 为洄游性、河口定居性等不同生态类型鱼类提供了必要的栖息、索饵和繁衍场所<sup>[1-2]</sup>, 尤其是中华鲟 (*Acipenser sinensis*)<sup>[3]</sup>、长江江豚 (*Neophocaena asi-aorientalis*)<sup>[4]</sup> 等珍稀濒危水生动物的重要洄游通

道或栖息场所。长期以来, 受拦河筑坝、水域污染和过度捕捞等人类活动影响, 长江生物多样性持续下降, 长江口鱼类群落结构亦发生一定变化, 群落稳定性受到强烈干扰<sup>[5-6]</sup>。为了保护长江水生生物资源, 长江流域重点水域于 2021 年 1 月 1 日起实施十年禁渔政策, 长江口是长江流域重点水域禁捕的重要部分, 开展长江口鱼类群落结构特

收稿日期: 2021-09-07 修回日期: 2021-11-14

资助项目: 国家自然科学基金(41606146); 上海市科委高校地方能力建设项目(21010502200)

第一作者: 杨柯迹(照片), 从事近海生物与生态学研究, E-mail: 525300710@qq.com

通信作者: 马金, 从事渔业资源学研究, E-mail: jma@shou.edu.cn



征和稳态分析对掌握禁渔前后长江口鱼类群落状态变化有重要意义。

粒径谱是探究鱼类群落粒径大小特征的常用方法, 能够准确反映鱼类群落结构及生态系统营养循环特征, 基于粒径谱特征和群落稳定性模型可以评价不同环境胁迫下鱼类群落的稳定性状况。粒径谱的概念最早由 Sheldon 等<sup>[7]</sup>提出, 粒径谱理论在水生生态系统中的逐步应用为基于鱼类生物量数据研究鱼类群落结构特征提供了新路径, 尤其是在资源量有限或生物鉴定存在不确定性时, 该方法在评估鱼类群落特征方面具有较高应用价值<sup>[8]</sup>。粒径谱在国外研究应用较为广泛, 能够从总体上, 宏观地研究群落或生态系统的结构特征、动态及影响机制<sup>[9-10]</sup>, 比较不同时期群落或生态系统的差异<sup>[11]</sup>, 从某一粒级评估其他粒级生物量<sup>[12]</sup>, 以及探索渔业对群落的动态影响<sup>[13]</sup>。我国在海洋浮游生物<sup>[14-15]</sup>、底栖生物<sup>[16]</sup>粒径谱的研究较为广泛, 也推动了粒径谱理论在鱼类群落生态学中的研究。在河口和内湾, 相关研究运用粒径谱探究了浮游动植物<sup>[17-18]</sup>和底栖动物<sup>[19-20]</sup>的群落粒径结构, 但在鱼类群落中的应用仍待拓展。

长江口鱼类群落生态学的相关研究主要从物种丰度<sup>[2]</sup>、生态位特征<sup>[21]</sup>、鱼类资源多样性与环境因子关系<sup>[1, 22]</sup>等方面对鱼类群落进行了探究, 但受到环境污染和过度捕捞等因素的持续影响, 长江口鱼类资源量的减少对于鱼类群落的研究带来数据方面的限制和研究方法上的挑战。在有限数据的情况下, 可从群落粒径谱角度分析长江口鱼类群落特征并进行群落稳定性评价, 从而进一步丰富长江口鱼类群落研究。同时, 随着禁捕进程的推进, 长江流域重点水域进入十年禁渔期, 从科学研究层面评价禁捕效果是一项重要的研究工作, 在禁捕起步之年显得尤为重要。因此, 本研究基于 2018 年(禁捕前)长江口鱼类资源和环境调查数据, 运用粒径谱和群落稳定性评估模型分析了长江口鱼类群落粒径结构和稳定状态, 并运用富营养指数分析水体富营养化与长江口鱼类群落稳定状态之间的关系, 研究结果可为长江(口)禁捕效果评价提供前期研究基础与参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站位

2018 年的冬季(2月)、春季(5月)、夏季(8月)、秋季(11月)在长江口(31.26°~31.67°N,

121.32°~122.17°E)进行渔业资源和环境监测(图 1)。根据长江口水域地理分支(南北支)和站位分布, 将站位划分为 2 个区域, 北支 Zone1 (Z4、Z5、Z7、Z13、Z15)、南支 Zone2 (Z1、Z3、Z19、Z6、Z9、Z14、Z16)。

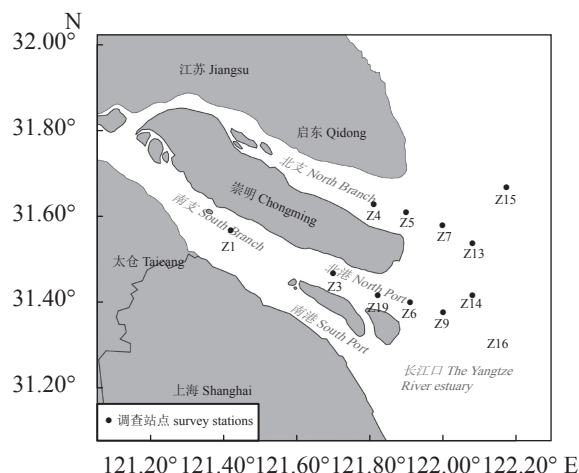


图 1 长江口调查站点图

Fig. 1 Survey stations in the Yangtze River estuary

### 1.2 采样与监测

调查船为“沪崇渔 1511 号”, 调查网具为底拖网, 网高 2 m、网长 10 m、纲长 6 m、网口宽 6 m、囊网网目 0.02 m。在每个调查站位, 以 2 kn 航速拖曳 30 min 后收网整理渔获物, 随即记录每一站位渔获的种类、重量、全长、数量等信息。当渔获量较多时, 随机抽取一定比例的渔获物进行记录, 最后换算成全部渔获物的重量和数量。同步进行水温、盐度、水深、透明度、pH、溶解氧等环境数据的采集, 将水质样本带回实验室用 DR 2800 分光光度计进行无机磷(DIP)、化学耗氧量(COD)、亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ )、硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )、铵盐( $\text{NH}_4^+$ )等指标的测量[无机氮(DIN)是 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 之和]。采样规范和水质分析参照《海洋监测规范(GB17378.3—2007)》<sup>[23]</sup>、《渔业水质标准(GB11607—1989)》<sup>[24]</sup>、《海洋调查规范(GB/T 12763.6—2007)》<sup>[25]</sup>和《海水水质标准(GB3097—1997)》<sup>[26]</sup>。实验过程中操作人员严格遵守实验动物伦理规范, 并按照上海海洋大学伦理委员会制定的规章制度执行。

### 1.3 分析方法

标准化粒径谱 为了解长江口鱼类群落粒径结构特征, 将渔业生物学测定得到的鱼类个体

生物量由低到高进行排序, 以  $\log_2$  转换后的鱼类个体生物量 (g) 划分粒级, 以公比 2 成等比增长为粒径间隔, 作为横轴; 每个粒级单位面积 ( $\text{km}^2$ ) 中的鱼类总生物量 (g) 除以该粒级个体生物量 (g) 的变化幅度, 经  $\log_2$  转换后作为纵轴<sup>[27-28]</sup>。其中, 每个单位面积的鱼类生物量 ( $\text{g}/\text{km}^2$ ) 是由每个粒级中总生物量 (g) 除以该作业面积 ( $\text{km}^2$ ) 得到, 作业面积 ( $\text{km}^2$ ) 是由单个站点作业面积 ( $\text{km}^2$ ) 乘以粒级范围内出现的站点数量得到, 而单个站点作业面积 ( $\text{km}^2$ ) 为调查时的拖曳速度、拖曳时间和网口宽度的乘积。鱼类标准化粒径谱代表了鱼类粒级的丰富程度<sup>[29]</sup>。在稳定状态下, 粒径谱的拟合线呈线性且理论斜率等于  $-1$ <sup>[9]</sup>; 当鱼类群落受外界干扰而处于不稳定状态时, 粒径谱的拟合线为抛物线型, 且曲率或斜率受鱼类粒级大小<sup>[10]</sup>、栖息地环境<sup>[29]</sup> 以及捕捞压力强度<sup>[13]</sup> 等影响。

**生态优势度** 为分析每个粒径组中的优势种, 运用 Pinkas 等<sup>[30]</sup> 提出的相对重要性指标 (IRI) 来界定生态优势种, 当 IRI 值大于 1000 时, 该物种即为该粒径组的优势种<sup>[31-32]</sup>。

$$\text{IRI} = (W_i + N_i) \times F_i \times 10^4 \quad (1)$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  种渔获种类生物量 (重量) 占总生物量 (重量) 的比率;  $N_i$  为第  $i$  种渔获种类尾数占总尾数的比率;  $F_i$  为第  $i$  种渔获种类出现站位数占总站位数的比率。

**ABC 曲线** 采用 ABC 曲线 (abundance-biomass comparison) 分析不同干扰情况下长江口鱼类群落的特征。当生物量优势曲线位于数量优势曲线上方, 表征鱼类群落以生长慢、性成熟晚的大个体鱼类为主, 群落处于未干扰 (稳定) 状态。当两条曲线相交, 则表征鱼类群落中生长快、个体小的鱼类物种增加, 群落处于中度干扰 (或不稳定) 状态。当生物量优势曲线位于数量优势曲线下方, 表征鱼类群落以生长快、性成熟早的小个体鱼类为主, 群落处于重度干扰 (不稳定) 状态<sup>[29, 33]</sup>。

**W 统计量** W 统计量是 ABC 曲线中生物量与数量相对关系的统计量, 当生物量优势曲线位于丰度优势曲线之上时, W 值为正, 反之, W 值为负<sup>[34]</sup>。

$$W = \sum_{j=1}^s \left[ \left( \sum_{j=1}^i B_j \right) - \left( \sum_{j=1}^i A_j \right) \right] / 50 \times (S - 1) \quad (2)$$

式中,  $B_j$  和  $A_j$  分别为生物量 (重量) 和丰度从高到低排序时第  $j$  个物种的生物量 (重量) 和丰度的累

积百分比,  $S$  为群落中的物种数。

**群落稳定性评估模型** 为了客观比较两个区域的鱼类群落稳定性, 筛选表征偏离稳定状态程度的参数, 对各参数进行归一化处理构建群落稳定性评估模型<sup>[17-18]</sup>。选取参数包括标准化粒径谱参数曲率  $C$  (偏离群落稳定状态程度)、拟合优度  $R^2$ 、均方差 MS (衡量两个区域各粒级上样本稳定程度大小) 和  $W$  统计值 (表征不同干扰情况下鱼类群落特征)。对  $R^2$  进行 Zone1 和 Zone2 归一化比较正相关处理; MS 进行 Zone1 和 Zone2 归一化比较负相关处理;  $W$  统计值进行 Zone1 和 Zone2 归一化比较正相关处理。对曲率  $C$  进行基于 Pearson  $\chi^2$  的计算, 得出实际值与期望值之间的偏离程度, 再进行 Zone1 和 Zone2 归一化比较负相关处理。稳定性系数 (stability factor, SF) 为各参数的平均值。

$$\chi^2 = \sum \frac{(A - E)^2}{E} \quad (3)$$

式中,  $A$  为实际测定值,  $E$  为期望测定值。实际测定值与期望测定值越接近, 二者差异越小; 当观察值与期望值相等时,  $\chi^2$  值为 0。运用  $t$  检验比较 Zone1 和 Zone2 稳定性系数的显著性差异。

**水质富营养指数** 为了解水体富营养化与长江口鱼类群落稳定状态的相关性, 使用水质富营养指数进行评价。水质富营养指数法是广泛用于中国近海营养状况分析的综合指数法, 它基于现场调查的环境测定值, 利用数学式模式去评估海水状态<sup>[35]</sup>。

$$A = \frac{\text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP}}{4\ 500} \times 10^6 \quad (4)$$

式中, 单位都为  $\text{mg}/\text{L}$ ,  $A$  代表富营养化判断值。当  $A \geq 1$  时, 水质呈富营养化状态; 当  $1 < A \leq 3$  时, 水质呈轻度富营养化状态; 当  $3 < A \leq 9$ , 水质呈中度富营养化状态;  $A > 9$ , 水质呈重度富营养化状态。

## 1.4 数据分析

每个站点生物量数据进行拖曳时间 0.5 h、拖网速度 2 kn 标准化, 分析与作图使用 Microsoft Excel 2019、IBM SPSS Statistics 19 和 R 4.0.2 软件。

## 2 结果

### 2.1 鱼类粒级及优势种组成

2018 年, 长江口 4 个航次调查共捕获鱼类

12种, 隶属于1纲5目6科11属, 全为硬骨鱼纲(Osteichthyes)(表1)。鱼类粒级主要分布在-2~6, 曲线穹顶位于0~3粒级范围,  $R^2$  为0.77 ( $P<0.05$ ), 曲率为-0.11(图2-a)。数量优势度曲线和生物量优势度曲线相交,  $W$  统计量为0.09(图2-b)。其中, -2~6粒级范围内各粒径组均有优势种(表2), 主要为白姑鱼、刀鲚、龙头鱼、棘头梅童鱼、窄体舌鳎和黄颡鱼, 而5~6粒级组未发现优势种。

### 2.2 粒径谱和 $W$ 统计量的季节变动

4个季节, 长江口 Zone1 和 Zone2 的鱼类标准化粒径谱的拟合曲线均大致呈穹顶型(图3)。Zone1 鱼类标准化粒径谱的拟合曲线曲率为-0.41~-0.04, 以夏季最大(-0.04), 秋季最小(-0.41),  $R^2$  分布范围为0.27~0.99, 均方差为0.01~4.44,  $W$  值为-0.11~0.12。Zone2 鱼类标准化粒径谱的拟合曲线曲率为-0.24~-0.04, 以夏季最大(-0.04), 冬季最小(-0.24),  $R^2$  分布范围为0.24~0.79, 均方差为0.36~1.31,  $W$  值为-0.03~0.37(表3)。

### 2.3 群落稳定性模型

通过群落稳定性模型比较分析发现(表4), 2018年冬季 Zone1 和 Zone2 的稳定性系数分别为0.52和0.48, 春季分别为0.25和0.75, 夏季分别为0.20和0.80, 秋季分别为0.76和0.24。4个季节, Zone1 的稳定性系数  $SF$  均值(0.43) 低于 Zone2 (0.57), 但统计检验不显著( $t$  检验,  $P=0.48>0.05$ ), 表明各季节南支与北支鱼类群落稳定性程度有所

差异, 但并不显著。

### 2.4 水域营养水平

南北支水体富营养化水平结果显示, 除春季和夏季南支的富营养化指数( $A$ ) 值小于1外, 其他  $A$  值大小均表明长江口水体处于富营养化状态(表5)。整体上, 四个季节长江口北支水体处于重度富营养化状态( $A$  均值为18.89), 南支水体处于中度富营养化状态( $A$  均值为5.43)。经回归统计分析,  $A$  和  $SF$  呈显著负相关( $R=-0.82, P<0.05$ ), 即水体富营养化程度越高, 鱼类群落稳定性越差。

## 3 讨论

### 3.1 长江口鱼类群落粒径结构特征

基于鱼类群落粒径谱和优势种结果, 可推断2018年长江口鱼类群落以小型鱼类为主, 缺少大型鱼类。人为因素(捕捞等) 被认为是导致鱼体小型化的主要原因之一, 当鱼类群落受捕捞等外界干扰加剧时, 鱼类种类结构逐渐以小个体、生长快的鱼类为主<sup>[36-37]</sup>。本研究发现, 2018年长江口渔获鱼类物种共12种, 4个季节均出现的种类占全年种类数的16.67%, 偶见种类数占比为33.33%, 多为季节性或洄游性鱼类, 定栖性鱼类少, 且小型鱼类数量占据优势地位。过度捕捞可导致大个体鱼类减少, 鱼类群落粒径结构不稳定, 使鱼类群落粒级以小个体粒径为主<sup>[29]</sup>。20世纪80年代, 长江口经济鱼类主要为凤鲚、刀鲚, 可分别形成“

表1 2018年长江口鱼类种类组成表

Tab. 1 Composition of fish species in the Yangtze River estuary in 2018

目 orders	科 families	属 genus	种 species
鲈形目 Perciformes	石首鱼科 Sciaenidae	白姑鱼属 <i>Argyrosomus</i>	白姑鱼 <i>P. argentata</i>
		梅童鱼属 <i>Collichthys</i>	棘头梅童鱼 <i>C. lucidus</i>
		鳊属 <i>Miichthys</i>	鳊 <i>M. miuy</i>
	虾虎鱼科 Gobiidae	蝌蚪虾虎鱼属 <i>Lophiogobius</i>	睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>L. ocellicauda</i>
		狼牙虾虎鱼属 <i>Odontamblyopus</i>	拉氏狼牙虾虎鱼 <i>O. lacepedii</i>
		矛尾虾虎鱼属 <i>Chaeturinchthys</i>	矛尾虾虎鱼 <i>C. stigmatias</i>
		孔虾虎鱼属 <i>Trypauchen</i>	孔虾虎鱼 <i>T. vagina</i>
鲱形目 Clupeiformes	鳀科 Engraulidae	鲚属 <i>Coilia</i>	刀鲚 <i>C. nasus</i> 凤鲚 <i>C. mystus</i>
鳎形目 Pleuronectiformes	舌鳎科 Cynoglossidae	舌鳎属 <i>Cynoglossus</i>	窄体舌鳎 <i>C. gracilis</i>
仙女鱼目 Aulopiformes	狗母鱼科 Synodidae	龙头鱼属 <i>Harpadon</i>	龙头鱼 <i>H. nehereus</i>
鲶形目 Siluriformes	鲿科 Bagridae	黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>	黄颡鱼 <i>P. fulvidraus</i>

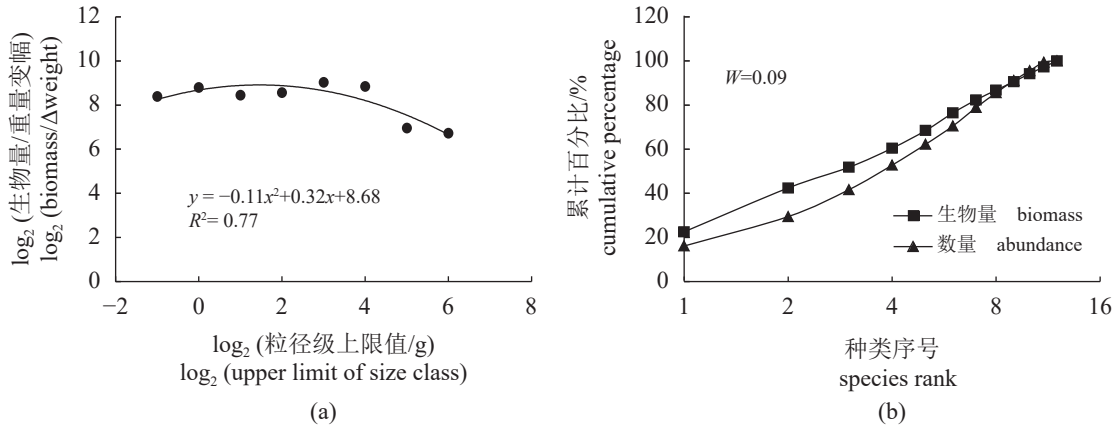


图2 2018年长江口鱼类标准化粒径谱(a)和ABC曲线(b)

Fig. 2 Normalized fish size spectrum (a) and ABC curves (b) in the Yangtze River estuary in 2018

表2 长江口各粒径组的优势种

Tab. 2 Dominant species of each size class in the Yangtze River estuary

粒径 size class	种名 species	重量比率 $W_i$ weight ratio	尾数比率 $N_i$ abundance ratio	出现频率 $F_i$ frequency of occurrence	相对重要性指数 IRI index of relative importance
-2~-1	白姑鱼 <i>Pennahia argentata</i>	0.59	0.63	0.33	4 083.75
-1~-0	白姑鱼 <i>Pennahia argentata</i>	0.21	0.26	0.25	1 181.11
0~1	刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	0.37	0.35	0.33	2 402.58
0~1	刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	0.23	0.25	0.33	1 597.51
0~1	龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	0.28	0.29	0.33	1 902.27
1~2	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	0.21	0.19	0.25	1 001.32
2~3	窄体舌鲷 <i>Cynoglossus gracilis</i>	0.14	0.13	0.42	1 112.09
2~3	黄颡鱼 <i>Tachysurus fulvidraco</i>	0.29	0.28	0.50	2 875.66
3~4	窄体舌鲷 <i>Cynoglossus gracilis</i>	0.29	0.28	0.50	2 845.27
4~5	窄体舌鲷 <i>Cynoglossus gracilis</i>	0.80	0.75	0.25	3 866.27
5~6	-	-	-	-	-

注：“-”表示无数据。  
Notes: “-” indicates no data.

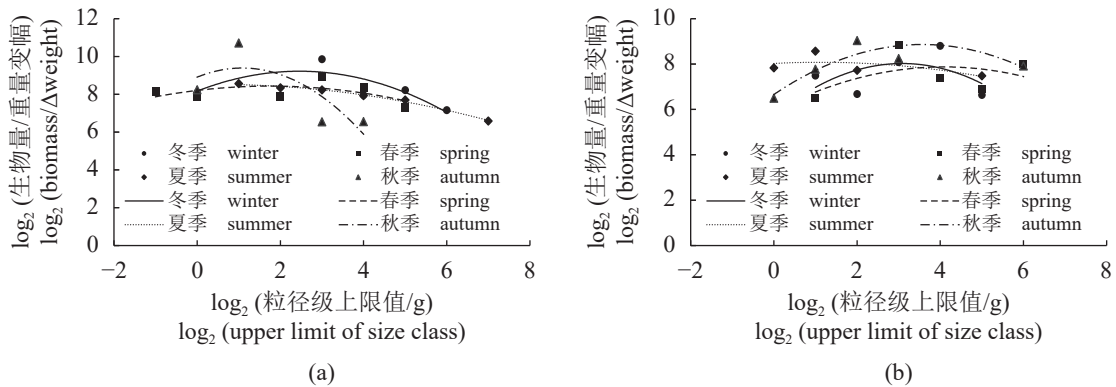


图3 长江口 Zone1 (a) 和 Zone2 (b) 鱼类标准化粒径谱季节变化

Fig. 3 Seasonal variation in normalized fish size spectra in Zone1 (a) and Zone2 (b) of the Yangtze River estuary

凤鲚汛”、“刀鲚汛”，其次是鲮 (*Mugil cephalus*)、  
鲮 (*Cirrhinus molitorella*)、长吻鲢 (*Leiocassis longi-*

*rostris*)、鲢 (*Tenualosa reevesii*)、鲃科 (*Tetraodon-*  
*tidae*)<sup>[38]</sup>。2018 年度调查发现，生物量最大的渔获

表 3 Zone1 和 Zone2 鱼类标准化粒径谱主要参数

Tab. 3 Main statistics of the normalized fish size spectra in Zone1 and Zone2

季节 season	区域 area	拟合方程 fitted equation	曲率( $\chi^2$ ) curvature	相关系数 $R^2$ goodness of fit	均方差 mean square	W统计值 W statistic
冬季 winter	Zone1	$y = -0.17x^2 + 0.86x + 8.17$	-0.17	0.68	0.61	0.11
	Zone2	$y = -0.24x^2 + 1.49x + 5.72$	-0.24	0.24	1.31	0.12
春季 spring	Zone1	$y = -0.07x^2 + 0.26x + 8.21$	-0.07	0.27	0.38	-0.06
	Zone2	$y = -0.12x^2 + 0.95x + 5.94$	-0.12	0.24	1.31	0.26
夏季 summer	Zone1	$y = -0.04x^2 + 0.04x + 8.52$	-0.04	0.99	0.01	-0.11
	Zone2	$y = -0.04x^2 + 0.09x + 8.03$	-0.04	0.41	0.38	0.37
秋季 autumn	Zone1	$y = -0.41x^2 + 0.89x + 8.91$	-0.41	0.62	4.44	0.12
	Zone2	$y = -0.17x^2 + 1.23x + 6.66$	-0.17	0.79	0.36	-0.03

表 4 鱼类群落稳定性评估模型结果

Tab. 4 Results of stability assessment model of fish community

季节 season	研究区域 study area	曲率( $\chi^2$ ) curvature	相关系数 $R^2$ goodness of fit	均方差 mean square	W统计值 W statistic	稳定性系数(SF) stability factor
冬季 winter	Zone1	0.54	0.74	0.32	0.48	0.52
	Zone2	0.46	0.26	0.68	0.52	0.48
春季 spring	Zone1	0.53	0.53	0.22	-0.30	0.25
	Zone2	0.47	0.47	0.78	1.30	0.75
夏季 summer	Zone1	0.50	0.71	0.03	-0.42	0.20
	Zone2	0.50	0.29	0.97	1.42	0.80
秋季 autumn	Zone1	0.34	0.44	0.93	1.33	0.76
	Zone2	0.66	0.56	0.08	-0.33	0.24
稳定性系数(SF)均值 average stability factor	Zone1			0.43		
	Zone2			0.57		

表 5 长江口研究水域水体营养水平

Tab. 5 Trophic levels in the study water area of the Yangtze River estuary

季节 season	区域 area	富营养指数 eutrophication index	营养化程度 trophic levels
冬季 winter	Zone1	3.12	中度
	Zone2	10.68	重度
春季 spring	Zone1	21.34	重度
	Zone2	-2.17	贫营养
夏季 summer	Zone1	48.08	重度
	Zone2	-1.44	贫营养
秋季 autumn	Zone1	3.02	轻度
	Zone2	14.68	重度

物仅 1 尾鳊(*Müchthys müuy*) (59.05 g), 未见鲃、鲮、长吻鲃、鲃、河鲃, 并且凤鲢、刀鲢也不多见, 已有研究表明, 长江口及其邻近水域鱼类资源的渔获量有所下降, 以及有向低值化、小型化

发展的趋势<sup>[36, 39]</sup>。另一方面, 采样时间和采样网具的选择性也会造成调查数据的偏颇, 从而给研究结果带来影响。采样时间可能因鱼类的季节洄游而采集不到相关种类, 采样网具的选择性也会造成鱼类样本的体长聚集在一定范围, 从而影响长江口鱼类群落组成及粒径结构调查。

此外, 鱼类群落的能量传递效率也能反映鱼类群体个体大小<sup>[40]</sup>。粒径谱谱线的曲率表示能量在群落中的传递效率, 回归系数  $R^2$  表示不同营养级间的能量传递效率<sup>[41-42]</sup>。本研究中, 长江口鱼类标准化粒径谱拟合曲线呈抛物线型, 曲率为 -0.11, 高于理论值 -1, 谱线陡峭, 进一步证实了长江口鱼类群落中能量传递效率偏低, 以小型鱼类占据优势地位, 缺少大粒径鱼类。

### 3.2 鱼类群落季节变动

鱼类粒径谱参数能够反映群落和生态系统的

结构与功能<sup>[43]</sup>。本研究中, 长江口北支和南支的鱼类群落存在季节变化。

北支粒径谱拟合曲线的曲率大小以夏季最大(-0.04), 春冬季次之, 秋季最小(-0.41), 即夏季谱线平缓, 秋季相对陡峭, 这或许与各季节鱼类物种粒径结构大小以及定居性、偶见性和季节洄游性鱼种有关<sup>[29, 44]</sup>。本研究中睛尾蝌蚪虾虎鱼等定居性鱼类的存在, 白姑鱼、棘头梅童鱼、凤鲚、龙头鱼、窄体舌鳎等洄游性鱼类的出现, 以及鳁等偶见种的出现都会影响粒径谱曲率。冬季, 最小粒径(-1~0)上捕获少量白姑鱼和窄体舌鳎幼鱼, 最大粒径(5~6)捕获1尾窄体舌鳎(31.51 g); 春季正值禁渔期, 白姑鱼等鱼类洄游至此进行产卵育幼, 最小粒径(-2~-1)上捕获鱼类以白姑鱼稚鱼居多, 最大粒径(4~5)捕获2尾窄体舌鳎, 各粒径生物量分布较均匀, 粒径谱曲率较冬季高; 夏季, 鱼类资源经过春季禁渔期的涵养, 最小粒径(0~1)捕获龙头鱼、凤鲚、窄体舌鳎和睛尾蝌蚪虾虎鱼的幼体鱼, 最大粒径(6~7)捕获1尾偶见种鳁(59.05 g), 导致夏季粒径谱曲率最大, 曲线相对平缓; 秋季, 虽然最小粒径(-1~0)上捕获较多刀鲚, 但随着人类捕捞强度加强, 鱼类粒径范围缩小, 缺少高粒径鱼类, 最大粒径(3~4)捕获1尾棘头梅童鱼, 使得该季节粒径谱曲率最小, 曲线相对陡峭。

南支拟合曲线的曲率大小以夏季最大(-0.04), 春秋季节次之, 冬季最小(-0.24), 即夏季谱线平缓, 冬季相对较陡峭, 这或许与矛尾虾虎鱼等定居性鱼类, 棘头梅童鱼、刀鲚和窄体舌鳎等洄游性鱼类, 以及黄颡鱼等淡水鱼类的出现有关。冬季和春季, 当年孵化的刀鲚幼鱼在长江口聚集进行缓冲和育肥, 使得冬季和春季最小粒径(0~1)上均捕获刀鲚幼鱼。冬季, 最大粒径(4~5)捕获矛尾虾虎鱼和黄颡鱼; 春季正值禁渔期, 最大粒径(5~6)捕获1尾黄颡鱼, 粒径结构优于冬季, 粒径谱曲率较冬季大; 夏季, 经过禁渔期的资源养护, 最小粒径(-1~0)捕获到较多睛尾蝌蚪虾虎鱼等小型鱼类, 最大粒径(4~5)捕获多尾黄颡鱼和窄体舌鳎, 其他各粒径生物量分布较均匀, 使得该季节粒径谱曲率最大, 曲线相对平缓。

此外, 人类捕捞强度和长江流域春季禁渔期制度影响鱼类群落粒径结构<sup>[29, 45-46]</sup>, 同时, 粒径谱的谱线曲率随着捕捞压力的增加而减小, 谱线的变动更加陡峭<sup>[29, 47]</sup>。春季, 正值4—6月的禁渔期, 捕捞压力减小, 南北支鱼类群落粒径谱曲率均高

于冬季。夏季, 经过春季禁渔期的涵养<sup>[45-46]</sup>, 鱼类资源得到一定恢复, 因此, 南北支鱼类群落粒径谱曲率较春季高。熊美华等<sup>[45]</sup>的研究也认为实施禁渔有助于促进长江鱼类群落结构改善。秋季, 人类捕捞强度逐渐增大, 导致南北支曲率均减小。4个季节均未出现粒径7以上的鱼类物种, 可能主要与过度捕捞有关, 这与徐楠珊等<sup>[44]</sup>的研究结果一致。

### 3.3 群落稳定性与影响因素

鱼类影响水域生态系统的结构和功能变动, 鱼类物种组成和数量变化反映水域生物群落结构<sup>[37]</sup>。本研究中  $W$  统计量虽为正值, 但数量与生物量优势曲线相交, 参考 Warwick 等<sup>[48]</sup>的研究标准, 长江口鱼类群落整体处于不稳定状态, 这或许与鱼类亲体补充量、生长等内在因素<sup>[37]</sup>、人为因素(如过度捕捞)<sup>[38]</sup>以及水域环境<sup>[49]</sup>有关。

补充、生长等内在因素在鱼类群落结构稳定性中发挥着重要作用<sup>[37]</sup>。鱼类生长快意味着可能存在能流过剩和积累, 出现能流渠道被阻塞, 相反, 鱼类生长缓慢意味着能流可能出现空缺和不衔接, 这两种情况都会导致能流转化效率低, 影响鱼类群落稳定状态<sup>[50]</sup>。本研究发现, 长江口鱼类群落总体处于受干扰状态, 缺少大型捕食者, 小型鱼类堆积, 能流循环效率低, 造成生态系统向着反方向发展, 即退行演替, 引起鱼类群落结构和功能变化的机制也可能包括环境变化、污染以及人类捕捞等。

高强度的捕捞作业也是造成长江口原有群落结构解体、鱼类平均营养级降低的重要因素之一<sup>[36]</sup>。鱼类群落在稳定状态下, 生物量以生命周期长的大个体鱼类为主<sup>[29, 33]</sup>, 随着外界干扰(如捕捞)强度的增加, 鱼类群落结构发生变化<sup>[41]</sup>, 鱼类群落组成由大个体、性成熟晚的种类发展为较小个体、生长快的种类<sup>[37]</sup>。调查发现, 长江口缺乏大粒径鱼类, 窄体舌鳎、鳁等较高生物量个体鱼类数量不多, 而白姑鱼、刀鲚和龙头鱼等低生物量鱼类个体数量则相对较多, 过度捕捞或许是产生这一现象的主要因素。

此外, 鱼类群落结构的稳定性变化是对水域环境变化的响应<sup>[49]</sup>。据国内外学者研究发现, 影响鱼类群落结构稳定性的自然因素包括时空差异、温盐变化和環境变化等<sup>[49]</sup>, 而水质也是导致系统偏离稳定状态的重要影响因素之一<sup>[17]</sup>。长江口处

于特殊的地理位置, 其水质会受到陆源输入和海洋的影响<sup>[51]</sup>。长江陆源径流将长江流域内的高氮、高磷水体(工业排污、流域面源污染、市政排污的水体)运输到长江口, 加之台湾暖流、黑潮等海流水团的影响, 使长江口海域的生态环境复杂化<sup>[52]</sup>。随着人类活动增加, 长江口水域富营养化日益严重, 引起水生藻类大量增殖, 导致水中溶解氧含量减少、水质恶化, 破坏鱼类栖息环境, 影响鱼类群落稳定性<sup>[53]</sup>。

### 3.4 展望

保护长江口鱼类资源和修复生态环境, 需要采取合理措施(如降低陆源污染物排放、禁渔和休渔等)减少外来胁迫, 禁渔政策实施消除了捕捞因素对长江口鱼类群落的影响与胁迫, 随着禁渔政策实施进程以及禁渔效果评价的需要, 本研究借助粒径谱方法探究了禁捕前(2018年)长江口鱼类群落特征及其稳定性, 后续将运用粒径谱等方法对比分析禁捕前后长江口鱼类群落特征及其稳定性变化, 为长江口鱼类资源保护提供研究支撑。

感谢辽宁省海洋水产科学研究院副研究员宋伦老师以及上海海洋大学 FSA Lab 的老师和同学在论文完成过程中的大力帮助。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [1] Kindong R, Wu J H, Gao C X, *et al.* Seasonal changes in fish diversity, density, biomass, and assemblage alongside environmental variables in the Yangtze River estuary[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(20): 25461-25474.
- [2] Dai L B, Hodgdon C, Tian S Q, *et al.* Comparative performance of modelling approaches for predicting fish species richness in the Yangtze River estuary[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 35: 101161.
- [3] 陈锦辉, 刘健, 吴建辉, 等. 长江口中华鲟幼鲟补充量波动特征分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(3): 381-387.
- Chen J H, Liu J, Wu J H, *et al.* Analysis on the fluctuation features of recruitment for juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* in the Yangtze River estuary[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(3): 381-387 (in Chinese).
- [4] 张枫, 张保卫, 唐文乔, 等. 长江口江豚的遗传多样性现状及种群动态[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(5): 656-665.
- Zhang F, Zhang B W, Tang W Q, *et al.* Analysis of genetic diversity and population dynamics of the narrow-ridged finless porpoise in the Yangtze River estuary[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(5): 656-665 (in Chinese).
- [5] 陈锦辉, 王学昉, 田思泉, 等. 长江口及邻近水域渔业资源监测现状分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(1): 122-136.
- Chen J H, Wang X F, Tian S Q, *et al.* A review of the development of fishery resources monitoring in the Yangtze River estuary and its adjacent waters[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(1): 122-136 (in Chinese).
- [6] 田佳丽, 王银平, 李佩杰, 等. 长江近口段近岸段鱼类群落多样性现状[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(2): 320-330.
- Tian J L, Wang Y P, Li P J, *et al.* Species diversity of fish in the section near the Yangtze River estuary[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(2): 320-330 (in Chinese).
- [7] Sheldon R W, Parsons T R. A continuous size spectrum for particulate matter in the sea[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1967, 24(5): 909-915.
- [8] Graham N A J, Dulvy N K, Jennings S, *et al.* Size-spectra as indicators of the effects of fishing on coral reef fish assemblages[J]. *Coral Reefs*, 2005, 24(1): 118-124.
- [9] Jung S, Houde E D. Fish biomass size spectra in Chesapeake Bay[J]. *Estuaries*, 2005, 28(2): 226-240.
- [10] Benoit D M, Giacomini H C, Chu C, *et al.* Identifying influential parameters of a multi-species fish size spectrum model for a northern temperate lake through sensitivity analyses[J]. *Ecological Modelling*, 2021, 460: 109740.
- [11] Jennings S, Blanchard J L. Fish abundance with no fishing: predictions based on macroecological theory[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2004, 73(4): 632-642.
- [12] Andersen K H. Size spectrum theory[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2019: 15-37.
- [13] Blanchard J L, Andersen K H, Scott F, *et al.* Evaluating targets and trade-offs among fisheries and conservation objectives using a multispecies size spectrum model[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(3): 612-622.
- [14] 陈怡翔. 基于粒径理论的南海和东海浮游动物群落生



- 态学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Chen Y X. Study on zooplankton community ecology based on body size theory in South China Sea and East China Sea[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020 (in Chinese).
- [15] 王永志. 南海北部及邻近西北太平洋小型浮游动物摄食生态研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- Wang Y Z. Studies on microzooplankton grazing in the northern South China Sea and its adjacent northwestern Pacific Ocean[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019 (in Chinese).
- [16] 张苗苗. 苍南沿浦湾秋茄种植前、后大型底栖动物群落结构及次级生产力变化研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
- Zhang M M. Study on the changes of community structure and secondary productivity of macrobenthos before/after planting of *Kandelia candel* in Yanpu Bay, Cangnan[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [17] 宋伦, 宋广军, 王年斌. 辽东湾浮游生物粒径结构稳定性分析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3117-3126.
- Song L, Song G J, Wang N B. Ecological stability of plankton biomass size structure in Liaodong Bay[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10): 3117-3126 (in Chinese).
- [18] 宋伦, 王年斌, 杨国军, 等. 鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2790-2802.
- Song L, Wang N B, Yang G J, *et al.* The stress response of biological communities in China's Yalu River estuary and neighboring waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2790-2802 (in Chinese).
- [19] 华尔, 张志南. 黄河口邻近海域底栖动物粒径谱研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(5): 971-978.
- Hua E, Zhang Z N. Benthic organism biomass size spectra in Huanghe River adjacent waters[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(5): 971-978 (in Chinese).
- [20] 张青田, 胡桂坤. 渤海湾近岸底栖动物的生物量粒径谱研究[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(2): 81-84,88.
- Zhang Q T, Hu G K. Biomass size spectra of zoobenthos in coastal area of Bohai Bay, China[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 33(2): 81-84,88 (in Chinese).
- [21] 苗中博, 王思凯, 彭彪彪, 等. 长江口盐沼湿地鱼类群落优势种的时空生态位特征[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(10): 1210-1221.
- Miao Z B, Wang S K, Peng B B, *et al.* Characteristics of spatial and temporal ecological niches of the dominant species of fish assemblages in the saltmarsh wetlands of the Yangtze River estuary[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(10): 1210-1221 (in Chinese).
- [22] 吴建辉, 戴黎斌, 戴小杰, 等. GAM模型和BRT模型在长江口鱼类群落多样性预测中的比较[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 644-652.
- Wu J H, Dai L B, Dai X J, *et al.* Comparison of generalized additive model and boosted regression tree in predicting fish community diversity in the Yangtze River estuary, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 644-652 (in Chinese).
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输, GB 17378.3—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 5-26.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. The specification for marine monitoring—Part 3: Sample collection storage and transportation, GB 17378.3-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 5-26 (in Chinese).
- [24] 国家环境保护局. 渔业水质标准: GB 11607—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- State Environmental Protection Administration. Water quality standard for fisheries: GB 11607-1989[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990 (in Chinese).
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查, GB/T 12763.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-157.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey, GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-157 (in Chinese).
- [26] 国家环境保护局, 国家海洋局. 海水水质标准: GB 3097—1997[S]. 北京: 环境科学出版社, 2004.
- State Environmental Protection Agency, State Oceanic Administration. Marine water quality standard: GB 3097-1997[S]. Beijing: Environmental Science Press, 2004 (in Chinese).

- [27] Sprules W G, Munawar M. Plankton size spectra in relation to ecosystem productivity, size, and perturbation[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1986, 43(9): 1789-1794.
- [28] Sheldon R W, Prakash A, Sutcliffe Jr W H. The size distribution of particles in the ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 1972, 17(3): 327-340.
- [29] 徐姗楠, 郭建忠, 范江涛, 等. 大亚湾夏季鱼类生物量粒径谱年际变化特征[J]. *南方水产科学*, 2020, 16(4): 28-38.  
Xu S N, Guo J Z, Fan J T, *et al.* Annual variation in fish biomass size spectrum in Daya Bay, South China Sea in summer[J]. *South China Fisheries Science*, 2020, 16(4): 28-38 (in Chinese).
- [30] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. *Fishery Bulletin*, 1971, 152(1): 1-105.
- [31] 吴倩, 李潮, 高天扬, 等. 流溪河保护区鱼类群落结构及其时空变动[J]. *水产科学*, 2020, 39(2): 234-244.  
Wu Q, Li C, Gao T Y, *et al.* Community structure and spatio-temporal variation of fish in Liuxi River reserve[J]. *Fisheries Science*, 2020, 39(2): 234-244 (in Chinese).
- [32] 刘燕山, 谷先坤, 唐晟凯, 等. 东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 769-780.  
Liu Y S, Gu X K, Tang S K, *et al.* Fish community structure and its relationship with main environmental variables in the East Taihu Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 769-780 (in Chinese).
- [33] Yemane D, Field J G, Leslie R W. Exploring the effects of fishing on fish assemblages using Abundance Biomass Comparison (ABC) curves[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2005, 62(3): 374-379.
- [34] 赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 等. 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状[J]. *生物多样性*, 2021, 29(3): 361-372.  
Zhao Y, Niu C Y, Li X J, *et al.* Fish diversity and resource status in the Yangxian Section of the Hanjiang River under the context of inter-basin water transfer[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(3): 361-372 (in Chinese).
- [35] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. *海洋环境科学*, 1983, 2(2): 41-55.  
Zou J Z, Dong L P, Qin B P. Primary study on the eutrophication and HAB problems in Bohai Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 1983, 2(2): 41-55 (in Chinese).
- [36] 韩求稳, 王丽, 等. 基于生态通道模型的长江口水域生态系统结构与能量流动分析[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4907-4918.  
Han R, Chen Q W, Wang L, *et al.* Analysis of the ecosystem structure and energy flow of the Yangtze River estuary and adjacent seas, based on the Ecopath model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4907-4918 (in Chinese).
- [37] 党莹超, 戴小杰, 吴峰. 淀山湖鱼类群落结构季节性变化分析[J]. *水产科学*, 2021, 40(3): 361-368.  
Dang Y C, Dai X J, Wu F. Seasonal variations in fish community structure in the Dianshan Lake[J]. *Fisheries Science*, 2021, 40(3): 361-368 (in Chinese).
- [38] 庄平, 张涛, 李圣法, 等. 长江口鱼类[M]. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2018: 3-616.  
Zhuang P, Zhang T, Li S F, *et al.* Fishes of the Yangtze Estuary[M]. Second edition. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 3-616 (in Chinese).
- [39] 张涛, 庄平, 章龙珍, 等. 长江口近岸鱼类种类组成及其多样性[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(6): 817-821.  
Zhang T, Zhuang P, Zhang L Z, *et al.* Composition and diversity of fish species in the coast of the Yangtze River Estuary[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, 16(6): 817-821 (in Chinese).
- [40] Kerr S R. Theory of size distribution in ecological communities[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1974, 31(12): 1859-1862.
- [41] 周林滨, 谭焯辉, 黄良民, 等. 水生生物粒径谱/生物量谱研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3319-3333.  
Zhou L B, Tan Y H, Huang L M, *et al.* The advances in the aquatic particle/biomass size spectra study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3319-3333 (in Chinese).
- [42] dos Santos R M, Hilbers J P, Hendriks A J. Evaluation of models capacity to predict size spectra parameters in ecosystems under stress[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 79: 114-121.
- [43] Silvert W, Platt T. Energy flux in the pelagic ecosystem: a time-dependent equation[J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(4): 813-816.
- [44] 徐姗楠, 郭建忠, 陈作志, 等. 胶州湾鱼类生物量粒径谱特征[J]. *水产学报*, 2020, 44(4): 596-605.  
Xu S N, Guo J Z, Chen Z Z, *et al.* Biomass particle size spectrum of fish in the Jiaozhou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(4): 596-605 (in Chinese).

- [45] 熊美华, 杨志, 胡兴坤, 等. 长江中游监利江段鱼类群落结构研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9): 2109-2118.  
Xiong M H, Yang Z, Hu X K, *et al.* Studies on fish community structure in Jianli section of the middle reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(9): 2109-2118 (in Chinese).
- [46] 刘晓霞, 周天舒, 唐文乔. 长江近口段沿岸4种珍稀、重要鱼类的资源动态[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 552-559.  
Liu X X, Zhou T S, Tang W Q. Resource dynamic of 4 species of rare important fish in coastal region of the Jingjiang section of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4): 552-559 (in Chinese).
- [47] Macpherson E, Gordo A, Garcia-Rubies A. Biomass size spectra in littoral fishes in protected and unprotected areas in the NW Mediterranean[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 55(5): 777-788.
- [48] Warwick R M, Clarke K R. Relearning the ABC: taxonomic changes and abundance/biomass relationships in disturbed benthic communities[J]. Marine Biology, 1994, 118(4): 739-744.
- [49] Yu H C, Xian W W. The environment effect on fish assemblage structure in waters adjacent to the Changjiang (Yangtze) River estuary (1998–2001)[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(3): 443-456.
- [50] 纪炜炜, 李圣法, 陈雪忠. 鱼类营养级在海洋生态系统研究中的应用[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 878-887.  
Ji W W, Li S F, Chen X Z. Application of fish trophic level in marine ecosystem[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 878-887 (in Chinese).
- [51] 尹艳娥, 沈新强, 蒋玫, 等. 长江口及邻近海域富营养化趋势分析及与环境因子关系[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 622-629.  
Yin Y E, Shen X Q, Jiang M, *et al.* Analysis on the trend of eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and in the adjacent East China Sea and its relation to environmental factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(4): 622-629 (in Chinese).
- [52] 张璇. 长江口及邻近海域营养盐的历史演变及其在赤潮中的作用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
Zhang X. Historical comparison on evolution of nutrient and its function on the harmful algae blooms in Yangtze River estuary and its adjacent sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [53] Zhu Z Y, Wu Y, Zhang J, *et al.* Reconstruction of anthropogenic eutrophication in the region off the Changjiang estuary and central Yellow Sea: from decades to centuries[J]. Continental Shelf Research, 2014, 72: 152-162.

## Size structure and community stability assessment of fish community in the Yangtze River estuary

YANG Keer<sup>1</sup>, CHEN Jinhui<sup>2,3</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>, WANG Xuefang<sup>1</sup>, WU Jianhui<sup>3</sup>,  
ZHANG Shuo<sup>1</sup>, MA Jin<sup>1,4,5\*</sup>

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

2. Shanghai Aquatic Wildlife Conservation Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 200092, China;

3. Joint Laboratory for Monitoring and Conservation of Aquatic Living Resources in the Yangtze River Estuary, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The Yangtze River estuary is the largest estuary ecosystem in China. It has sufficient nutrients and provides necessary habitat, bait and breeding grounds for different ecological types of fish. With the advancement of the policy “Yangtze River Great Protection”, the key waters of the Yangtze River basin have entered a ten-year fishing ban. From the perspective of scientific research, evaluating the effects of fishing bans is an important research task and carrying out such research has an essential ecological significance for fisheries protection and recovery in the Yangtze River estuary. Based on the fishery and environmental survey data in the four seasons in 2018, the size structure characteristics and community stability were studied using the normalized fish size spectrum and stability assessment model to improve the understanding of fish community in the Yangtze River estuary. Meanwhile, the water quality of the Yangtze River estuary was evaluated using the eutrophication index method. The results showed the following. ① The size classes ranged from -2 to 6, and all the dome of all fish size spectrum curves located in the size class of 0 and 3, indicating that the fish community was dominated by small fishes and was in a disturbed state. ② There were seasonal changes in fish communities of the North Branch and the South Branch, with the maximum fish size spectral curvature in summer (-0.04) and the minimum in autumn (-0.41) and  $W$  values of -0.11 to 0.12 in the North Branch, and the maximum fish size spectral curvature in summer (-0.04) and the minimum in winter (-0.24) and  $W$  values of -0.03 to 0.37 in the South Branch. ③ The average stability factor of South Branch was 0.57, while it was 0.43 in the Northern Branch, which indicated that the stability of the fish community was different in four seasons. The eutrophic coefficient indicated that the eutrophication levels of the North Branch (18.89) was higher than that of the South Branch (5.43), and there was a significant negative correlation between the eutrophication index and the stability factor, which indicated that eutrophication may have an important influence on the deviation of the community system from the stable state. In general, the size class of the fish community is small, the community stability is weak, and the water quality is eutrophic in the Yangtze River estuary. This study explored the characteristics of fish community size structure and evaluated its community stability in the Yangtze River estuary before the implement of the fishing ban in the Yangtze River basin, thus providing a preliminary research for evaluating the effect of the fishing ban on the Yangtze River estuary ecosystem.

**Key words:** fish community; size structure; size spectrum; water quality; stability assessment model; the Yangtze River estuary

**Corresponding author:** MA Jin. E-mail: [jma@shou.edu.cn](mailto:jma@shou.edu.cn)

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (41606146); Shanghai Municipal Science and Technology Commission Local Capacity Construction Project (21010502200)