

doi: 10.7541/2019.019

长江口水生动物食物网营养结构及其变化

徐超^{1,2} 王思凯¹ 赵峰¹ 杨刚¹ 庄平^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业部东海与长江口渔业资源环境科学观测实验站, 上海 200090;
2. 南京农业大学无锡渔业学院, 无锡 214081)

摘要: 为研究长江口水生动物食物网营养结构及其变化, 运用胃含物分析法研究了2016—2017年长江口及其邻近水域捕获的43种水生动物的食性类型与营养结构, 并与20世纪90年代和2006年文献数据进行了比较, 结果表明, 长江口及其邻近水域捕获的水生动物分为4种食性类型: 浮游生物食性、底栖生物食性、游泳生物食性、混合食性, 其中浮游生物食性消费者占绝对优势, 为39.53%; 游泳生物食性消费者所占比例最少, 为11.63%。所分析样品的营养级可分为3级, 其中植食性消费者占优势, 为76.75%; 中级肉食性消费者所占比例最少, 为4.65%; 与20世纪90年代相比, 12种常见鱼类的平均营养级由3.80下降到2.87。长江口水生动物食物网结构较为复杂, 生产者类型包括底栖藻类、浮游植物、有机碎屑3种, 主要由牧食食物链和碎屑食物链构成复杂的食物网。

关键词: 长江口; 水生动物; 食性; 营养级; 食物网

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2019)01-0155-10

河口位于淡水与海水交汇处, 环境因子复杂多变, 受到河流与近海的双重影响。径流和潮汐在此相互消长, 复杂的水动力条件带来生物生态习性的多样性, 使得河口水域几乎包括了所有生态类型的生物群^[1]。长江口是我国第一大河口, 受长江干流径流和海洋潮汐的交互影响, 形成了独特的生境条件, 为众多水生动物的生长和繁殖提供了关键栖息生境。此外, 长江径流输入的大量营养物质, 使其成为近海生产力较高的水域之一, 孕育了丰富的水生生物资源, 支撑着我国近海渔业可持续发展。然而, 长江口也是受人类干扰最为严重的区域, 近年来对长江口资源的大力开发和大型水利工程建设, 使得长江口生态环境质量和生物多样性受到前所未有的胁迫和影响。刘瑞玉等^[2]研究发现, 三峡大坝建成后长江口及其邻近水域水文、水化学和沉积环境条件的变化, 引起生物群落组成及其分布

格局发生改变, 饵料生物下降, 渔业资源减少; 沈新强等^[3]研究显示长江口水域水环境综合质量已处于严重污染水平, 且呈逐年恶化趋势, 长江口捕捞产量一直趋于下降, 目前除凤鲚(*Coilia mystus*)资源尚属稳定外, 其余均已形不成鱼汛。

食物联系是河口生态系统结构与功能的基本表达形式, 能量通过食物链、食物网转化为各营养层次生物生产力, 形成生态系统生物资源产量, 并对生态系统的服务和产出及其动态产生影响。因此, 食物网及其营养动力学过程是河口生态系统动力学研究的重要内容, 进而为研究河口生物资源优势种的交替机制和资源补充机制提供理论依据^[4]。对河口食物网营养结构的研究以传统胃含物分析法为基础、以简化食物网为核心, 碳氮稳定同位素技术和生态系统模型的应用发展^[5]。罗秉征等^[6]运用传统胃含物分析法研究了长江口20世纪90年代

收稿日期: 2018-01-15; 修订日期: 2018-05-24

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M621577); 国家自然科学基金(31600334); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金和农业部海洋渔业可持续发展重点实验室开放课题(2018HY-XKQ01-06); 农业部财政专项 (CJDC-2017-23)资助 [Supported by the China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2017M621577); the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (31600334); the Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS, and Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, P. R. China (2018HY-XKQ01-06); the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (CJDC-2017-23)]

作者简介: 徐超(1992—), 男, 江苏淮安人; 硕士研究生; 研究方向为河口生态学。E-mail: Dexter183@hotmail.com

通信作者: 庄平, 研究员; E-mail: pzhuang@ecsf.ac.cn

鱼类食物网与营养结构,李忠义等^[7]运用稳定同位素技术研究了长江口2005年春季拖网渔获物的营养级,林群等^[8]基于Ecopath模型研究了长江口及毗邻水域2000年和2006年生态系统结构和能量流动。近年来,由于传统拖网作业和高强度的捕捞压力及水域环境污染严重,长江口生物资源结构特征突出地表现为经济种类严重衰退,捕捞对象频繁更替^[9],这些变化可能导致长江口食物网营养结构的改变。因此,本文运用传统胃含物分析法研究了长江口2016—2017年度捕获的43种水生动物的食性类型、营养级及食物网与能量流动,并与以往研究结果进行对比,旨在探讨长江口水生动物种间食物关系、营养级及能流途径的变化情况,从而为长江口水生生物生态学研究、资源评估、保护及合理利用提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

分别于2016年8月(夏季)、11月(秋季),2017年2月(冬季)、5月(春季)在长江口水域(31°00'—31°80'N、121°00'—122°40'E)设置22个站点进行4次拖网调查(图1)。本次调查所使用的调查船功率为45 kW,单船桁杆拖网为桁杆长6 m的双囊网,网具总长15 m,高2 m,网囊孔径2 cm,每个位点拖网时间长0.5h,平均航速3 Kn,捕获的水生动物用自封袋分装写好相应的位点标签,放入冰箱,带回实验室进行处理。

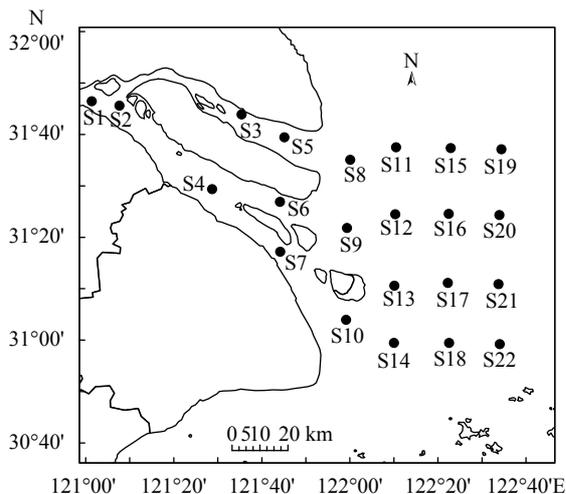


图1 长江口采样地点示意图

Fig. 1 Location of sampling sites in the Yangtze Estuary

1.2 样品的预处理

野外处理 拖网获得的渔获物依据不同种类、不同体长、不同采样位点进行定种分类;记录

各种渔获物的名称并按不同种类进行编号,测量并记录各种渔获物的体长、体重、胃含物重量等,胃含物用10%的甲醛固定保存;解剖后的渔获物分类用自封袋分装放入-20℃冰箱冷冻保存;所有样品带回实验室做进一步处理。

实验室处理 胃含物置于OLYMPUS SZX9体式显微镜下进行食物种类鉴定,食料生物的残体以不易被消化的器官、肢体或外壳作为鉴定的依据,具体参照表1^[10],拍照并做好相关记录。本实验以胃含物中食物成分的出现频率、空胃率等为参考依据。

1.3 数据分析

本实验各种类营养级的相对量度,参照罗秉征^[6]方法以1、2、3、4、5级表示,1级为自养营养级(浮游植物等);2—5级为异养营养级,其中2级为植食性动物;3级为低级肉食性鱼类;4级为中级肉食性鱼类;5级为高级肉食性鱼类。参照罗秉征^[6]、张波^[11]、窦硕增^[12]、张其永等^[13]对水生生物食性营养级的研究方法,用下列公式计算水生生物营养级(TL)、各食物成分的出现频率(F)及空胃率。

$$\text{营养级} = 1 + \sum (\text{各饵料类群的营养级大小}) \times F \quad (1)$$

$$\text{出现频率} = \frac{\text{某种饵料生物出现的实胃数}}{\text{实胃数}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{空胃率} = \frac{\text{空胃数}}{\text{总胃数}} \times 100\% \quad (3)$$

各饵料类群的营养级大小—苔藓类、介形类、涟虫类、等足类、糠虾类、樱虾类以及甲壳类幼体均为1.1级,珊瑚类、腹足类和瓣鳃类为1.2级,端足类、掘足类和翼足类为1.3级,海绵类、海葵类、星虫类、多毛类、海胆类、海百合类、蛇尾类和海参类为1.4级,水螅类、水母类、歪尾类和桡足类为1.5级,口足类和短尾类为1.6级,长尾类为1.8级,头足类为2.5级,鱼类为2—3级[各种食料生物类群的营养级大小,有一部分系根据Odum和

表1 食物种类的鉴定标准

Tab. 1 Identification standards for different types of food

| 编号No. | 食物种类Food type | 判定指标Standard |
|-------|---------------|--------------|
| 1 | 软体动物 | 硬壳和厣 |
| 2 | 虾类 | 颚足、额剑、尾肢等 |
| 3 | 桡足类 | 第五对胸肢 |
| 4 | 枝角类 | 两对触角、后腹、爪和刺 |
| 5 | 鱼类 | 咽齿、肩胛骨、匙骨等 |
| 6 | 原生动物 | 外壳 |
| 7 | 浮游植物 | 外壳和细胞形状 |
| 8 | 轮虫 | 咀嚼器的形状 |

Heald数据(转引自张其永等^[13])

2 结果

本研究共采集到99种水生动物, 由于部分水生动物的捕获资源量较少且胃含物不易取得与分析, 因此, 选取43种水生动物(其中鱼类9目17科33种, 无脊椎动物10种, 包括虾类8种, 蟹类2种)835个样

品进行胃含物分析研究。

2.1 食性类型

长江口水生动物消费者的食物组成广泛且较复杂, 根据其胃含物中不同食物所属生态类群的出现频率(表 2), 将长江口水生动物消费者分为4种食性类型。

(1)浮游生物食性: 该类型大多是水体中上层鱼

表 2 长江口不同水生动物胃含物中食物所属生态类群出现频率百分比

Tab. 2 Frequency percentage in the food of different aquatic stomachs in the Yangtze River Estuary

| 序号 No. | 种名Species | 浮游生物 Plankton | 底栖生物 Benthic | 游泳生物 Nekton | 空胃率Empty stomach rate (%) |
|-----------|---|------------------|-----------------|----------------|------------------------------|
| | 鳗鲡目 海鳗科 | | | | |
| 1 | 海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i> | 0 | 33.3 | 66.7 | 0 |
| | 鲱形目 鳀科 | | | | |
| 2 | 日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i> | 100.0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 凤鲚 <i>Coilia mystus</i> | — | — | — | 100.0 |
| 4 | 刀鲚 <i>Coilia nasus</i> | — | — | — | 100.0 |
| | 鲱形目 锯腹鳉科 | | | | |
| 5 | 鳊 <i>Ilisha elongata</i> | 34.8 | 33.1 | 32.1 | 0 |
| | 鲤形目 鲤科 | | | | |
| 6 | 贝氏鲻 <i>Hemiculter bleekeri</i> | 100.0 | 0 | 0 | 20.0 |
| 7 | 翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> | 60.0 | 0 | 40.0 | 0 |
| 8 | 鳊 <i>Parabramis pekinensis</i> | 57.1 | 42.9 | 0 | 0 |
| | 鲇形目 鲿科 | | | | |
| 9 | 黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i> | 73.7 | 26.3 | 0 | 17.6 |
| 10 | 光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i> | 83.9 | 16.1 | 0 | 0 |
| 11 | 长吻鮠 <i>Leiocassis longirostris</i> | 24.4 | 33.3 | 42.3 | 0 |
| | 灯笼鱼目 龙头鱼科 | | | | |
| 12 | 龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i> | 40.0 | 32.0 | 28.0 | 19.0 |
| | 鲇形目 鲇科 | | | | |
| 13 | 鲟 <i>Chelon haematocheilus</i> | 100.0 | 0 | 0 | 16.7 |
| 14 | 鲢 <i>Mugil cephalus</i> | 100.0 | 0 | 0 | 8.0 |
| | 鲇形目 马鲛科 | | | | |
| 15 | 四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylum</i> | 22.2 | 55.6 | 22.2 | 0 |
| | 鲈形目 鲈亚目 鲈科 | | | | |
| 16 | 银鲈 <i>Pampus argenteus</i> | 50.0 | 0 | 50.0 | 0 |
| 17 | 灰鲈 <i>Pampus cinereus</i> | 80.0 | 0 | 20.0 | 0 |
| | 鲈形目 狼鲈科 | | | | |
| 18 | 中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i> | 16.7 | 56.7 | 26.6 | 3.7 |
| | 鲈形目 石首鱼科 | | | | |
| 19 | 小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i> | 37.5 | 25.0 | 37.5 | 13.3 |
| 20 | 棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i> | 25.0 | 62.5 | 12.5 | 12.2 |
| 21 | 鳊 <i>Miichthys miuy</i> | 75.0 | 25.0 | 0 | 33.3 |
| 22 | 黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> | 50.9 | 39.1 | 10.0 | 8.7 |
| | 鲈形目 虾虎鱼科 | | | | |
| 23 | 孔虾虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i> | 100.0 | 0 | 0 | 11.1 |
| 24 | 拉氏狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i> | 100.0 | 0 | 0 | 9.1 |
| 25 | 髯须虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i> | 66.7 | 33.3 | 0 | 0 |

续表 2

| 序号No. | 种名Species | 浮游生物 Plankton | 底栖生物 Benthic | 游泳生物 Nekton | 空胃率Empty stomach rate (%) |
|-------|---|------------------|-----------------|----------------|------------------------------|
| 26 | 斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i> | 51.7 | 49.3 | 0 | 14.28 |
| 27 | 矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i> | 52.0 | 48.0 | 0 | 7.1 |
| 28 | 睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobius ocellicauda</i> | 80.7 | 14.3 | 5.0 | 0 |
| | 鲈形目 鲈科 | | | | |
| 29 | 香斜棘鲷 <i>Repomucenus olidus</i> | 84.6 | 15.4 | 0 | 21.4 |
| | 鲈形目 金钱鱼科 | | | | |
| 30 | 金钱鱼 <i>Scatophagus argus</i> | 50.0 | 50.0 | 0 | 0 |
| | 鲈形目 刺鲷科 | | | | |
| 31 | 中华刺鲷 <i>Sinobdella inensis</i> | 100.0 | 0 | 0 | 0 |
| | 鲈形目 舌鲷科 | | | | |
| 32 | 短吻红舌鲷 <i>Cynoglossus joyneri</i> | 45.7 | 54.3 | 0 | 11.4 |
| | 鲈形目 鲈科 | | | | |
| 33 | 黄鳍东方鲀 <i>Takifugu xanthopterus</i> | 61.7 | 27.3 | 11.0 | 8.3 |
| | 无脊椎动物类 | | | | |
| 34 | 安氏白虾 <i>Exopalaemon annandalei</i> | 100.0 | 0 | 0 | 61.8 |
| 35 | 脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i> | 80.0 | 20.0 | 0 | 55.5 |
| 36 | 巨指长臂虾 <i>Palaemon macrodactylus</i> | 100.0 | 0 | 0 | 57.1 |
| | 口虾蛄 <i>Squilla orarotia</i> | 94.7 | 5.3 | 0 | 44.1 |
| 38 | 葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i> | 100.0 | 0 | 0 | 56.7 |
| 39 | 中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i> | 75.0 | 25.0 | 0 | 42.86 |
| 40 | 细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i> | 100.0 | 0 | 0 | 77.0 |
| 41 | 日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i> | 100.0 | 0 | 0 | 77.0 |
| 42 | 三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i> | 78.6 | 0 | 21.4 | 60.0 |
| 43 | 日本鲟 <i>Charybdis japonica</i> | 80.0 | 20.0 | 0 | 61.5 |

注: (1)浮游生物类群包括浮游藻类、水母类、桡足类、磷虾类、樱虾类(毛虾属、莹虾属)、介形类、浮游端足类(蛭亚目)、毛颚类、浮游腹足类(翼足类、异足类)、甲壳类幼体、鱼卵、仔、稚鱼等; (2)底栖生物类群包括底栖藻类、海绵类、水螅类、珊瑚类、海葵类、多毛类、星虫类、苔藓类、腹足类、掘足类、蔓足类、涟虫类、底栖端足类(钩虾亚目、麦秆虫亚目)、糠虾类、等足类、口足类、长尾类、歪尾类、短尾类、蛇尾类、海胆类、海百合类、海参类等; (3)游泳动物类群包括鱼类和头足类(十腕目、八腕目)(转引自张其永等^[13])

Note: (1) Plankton taxa including planktonic algae, jellyfish, copepods, krill, ostracods, planktonic amphipoda (Suborder hyperiidea), chaetognaths, plankton gastropods (heteropoda), crustacea, roe, *et al.* (2) Benthic taxa including benthic algae, sponges, polyps, coral, polychaetes, sipunculoidea, mosses, scaphopods, cirripede, cumacea, benthic amphipoda, mysid shrimp, isopoda, stomatopod, macrura, brachyura, ophiuroid, seurchins, crinoidea, *et al.* (3) Nekton taxa including fish and cephalopod (decapoda, octopoda) (From Zhang *et al.*^[13])

类,以浮游植物、浮游动物(枝角类、桡足类)、有机碎屑、悬浮颗粒物(POM)及较大型的浮游生物如:中国毛虾(*Acetes chinensis*)、甲壳类幼体、鱼卵等为食。包括鲈形目的灰鲷(*Pampus cinereus*)、孔虾虎鱼(*Trypauchen vagina*)、拉氏狼牙鰕虎鱼(*Odontamblyopus lacepedii*)、中华刺鲷(*Sinobdella sinensis*)、鲤形目的贝氏鲷(*Hemiculter bleekeri*)、鲷形目的鲷(*Chelon haematocheilus*)、鲷(*Mugil cephalus*)、鲱形目的日本鲱(*Engraulis japonicus*)、凤鲚(*Coilia mystus*)^[14]共9种。此外,8种无脊椎动物均为浮游生物食性,包括日本鼓虾(*Alpheus japonicus*)、安氏白虾(*Exopalaemon annandalei*)、葛氏长臂虾(*Palaemon gravieri*)、巨指长臂虾(*Palaemon macrodactylus*)、脊尾白虾(*E. carinicauda*)等。

(2)底栖生物食性:该类群鱼类性情较温和,游泳速度较慢,多属于底栖或近底栖鱼类,以底栖藻类、底栖贝类、螺类、底栖端足类、糠虾类等为食。包括鲱形目的黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)、鲈形目的香斜棘鲷(*Repomucenus olidus*)、斑尾刺虾虎鱼(*Acanthogobius ommaturus*)、矛尾虾虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*)、髯须虾虎鱼(*Tridentiger barbatus*)、鲷(*Miichthys miiuy*)、金钱鱼(*Scatophagus argus*)、鲤形目的鳊(*Parabramis pekinensis*)、鲷形目的短吻红舌鲷(*Cynoglossus joyneri*)、鲱形目的刀鲚(*Coilia nasus*)^[15]共11种。此外,2种无脊椎动物三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、日本鲟(*Charybdis japonica*)为底栖生物食性。

(3) 游泳生物食性: 该类型既有底层鱼类, 又有中上层鱼类, 性凶猛贪食, 游泳活动能力强, 以游泳动物(鱼类、头足类)鳙、鲮、龙头鱼、矛尾鰕虎鱼、水母等为食。包括鲈形目的中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、银鲳(*Pampus argenteus*), 鲇形目的长吻鲇(*Leiocassis longirostris*), 灯笼鱼目的龙头鱼(*Harpadon nehereus*)以及鳗鲡目的海鳗(*Muraenesox cinereus*)共5种。

(4) 混合(底栖生物和游泳生物)食性: 该类型鱼类食谱很广, 在长江口鱼类中种类较多, 其食物类群既有底埋生物、底面层生物又有底层生物和游泳生物。包括鲱形目的鳙(*Ilisha elongata*), 鲈形目的黄姑鱼(*Nibea albiflora*)、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)、睛尾蝌蚪虾虎鱼(*Lophiogobius ocellicauda*), 鲈形目的黄鳍东方鲀(*Takifugu xanthopterus*), 鲇形目的四指马鲛(*Eleutheronema tetradactylum*), 鲤形目的翘嘴鲌(*Culter alburnus*)共8种。

2.2 营养级

本研究分析了43种水生动物的营养级(表3), 结果表明, 这43种水生动物营养级主要集中在2.0—4.0级, 其中植食性鱼类和无脊椎动物类位于最低的2.0—3.0级, 低级肉食性鱼类在3.0—3.5级, 中级肉食性鱼类位于最高的3.5—4.0级。在所有消费者中, 植食性消费者所占比例最高为76.75%, 低级肉食性鱼类为18.60%, 中级肉食性鱼类最低为4.65%。在所有鱼类样品中, 海鳗营养级最高为3.68; 而在无脊椎动物样品中, 三疣梭子蟹营养级最高为2.53。

罗秉征等^[6]曾经分析了长江口20世纪90年代60种常见鱼类的营养级大小。本研究选取了所采集物种中与之相同的12种鱼类进行比较分析, 结果表明这12种鱼类在2016—2017年的营养级比20世纪90年代普遍偏低(图2)。

2.3 食物网及能流途径

根据各消费者的胃含物种类, 本研究确定了长江口水生食物网3种主要的生产者类型, 即底栖藻类、浮游植物和有机碎屑及POM。结合各消费者的取食关系和营养级, 绘制了长江口水生生物食物网3种能流途径(图3)。

(1) 底栖藻类→中下层植食性鱼类(鲮等)→低级肉食性鱼类(龙头鱼等)→中级肉食性鱼类(海鳗)。

(2) 浮游植物→植食性无脊椎动物(葛氏长臂虾等)→低级肉食性鱼类(小黄鱼等)→中级肉食性鱼类(海鳗)。

(3) 有机碎屑、POM→中上层植食性鱼类(鳊

表3 长江口水生动物2016—2017年及20世纪90年代营养级
Tab. 3 Trophic levels of aquatic animals in the Yangtze Estuary during 2016 to 2017 and in the 1990s

| 种类Species | 数量Number | 体长范围Length range (mm) | 营养级TL2016—2017 | 营养级TL90s |
|--|----------|-----------------------|----------------|----------|
| 植食性鱼类Herbivorous fish | | | | |
| 贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i> | 25 | 40—107 | 2.1 | |
| 鲮 <i>Chelon haematocheilus</i> | 36 | 124—209 | 2.1 | |
| 鳙 <i>Mugil cephalus</i> | 25 | 95—155 | 2.1 | |
| 中华刺鲃 <i>Sinobdella sinensis</i> | 3 | 119—121 | 2.1 | |
| 日本鳊 <i>Engraulis japonicus</i> | 15 | 41—93 | 2.1 | 3.5 |
| 孔虾虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i> | 9 | 77—115 | 2.1 | |
| 拉氏狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i> | 11 | 83—183 | 2.1 | |
| 香斜棘鲃 <i>Repomucenus olidus</i> | 14 | 30—41 | 2.13 | |
| 光泽黄颡鱼 <i>pelteobagrus nitidus</i> | 32 | 63—117 | 2.16 | |
| 黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i> | 34 | 55—105 | 2.2 | |
| 金钱鱼 <i>Scatophagus argus</i> | 2 | 70—90 | 2.2 | |
| 睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobius ocellicauda</i> | 35 | 52—58 | 2.23 | |
| 黄鳍东方鲀 <i>Takifugu xanthopterus</i> | 12 | 82—120 | 2.35 | |
| 灰鲳 <i>Pampus cinereus</i> | 5 | 111—137 | 2.38 | |
| 长吻鲇 <i>Leiocassis longirostris</i> | 3 | 124—224 | 2.4 | |
| 黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> | 23 | 80—161 | 2.45 | 3.8 |
| 鳊 <i>Parabramis pekinensis</i> | 13 | 220—222 | 2.49 | |
| 矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i> | 30 | 38—110 | 2.58 | 3.6 |
| 短吻红舌鲷 <i>Cynoglossus joyneri</i> | 35 | 98—195 | 2.59 | 3.8 |
| 斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i> | 7 | 51—180 | 2.61 | |
| 髯须虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i> | 13 | 82—97 | 2.73 | |
| 鳊 <i>Miichthys miiuy</i> | 30 | 41—86 | 2.77 | 4.15 |
| 翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> | 14 | 180—230 | 2.86 | |
| 低级肉食性鱼类Low-grade carnivorous fish | | | | |
| 鳙 <i>Ilisha elongata</i> | 12 | 117—127 | 3.0 | 3.4 |
| 棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i> | 41 | 42—128 | 3.0 | 3.6 |
| 四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylum</i> | 9 | 76—147 | 3.02 | |
| 小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i> | 15 | 83—109 | 3.04 | 3.8 |
| 银鲳 <i>Pampus argenteus</i> | 6 | 92—115 | 3.05 | 3.1 |
| 龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i> | 21 | 75—202 | 3.09 | 4.3 |

续表 3

| 种类Species | 数量Number | 体长范围Length range (mm) | 营养级TL2016—2017 | 营养级TL90s |
|---|----------|-----------------------|----------------|----------|
| 凤鲚 <i>Coilia mystus</i> | 33 | 75—151 | — | 3.1 |
| 中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i> | 27 | 80—203 | 3.12 | 4.4 |
| 中级肉食性鱼类Intermediate carnivorous fish | | | | |
| 刀鲚 <i>Coilia nasus</i> | 37 | 91—245 | — | 3.6 |
| 海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i> | 5 | 355—412 | 3.68 | 4.2 |
| 植食性无脊椎动物Herbivorous invertebrate | | | | |
| 安氏白虾 <i>Exopalaemon annandalei</i> | 34 | 33—41 | 2.1 | |
| 巨指长臂虾 <i>Palaemon macrodactylus</i> | 14 | 26—41 | 2.1 | |
| 葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i> | 30 | 32—50 | 2.1 | |
| 细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i> | 5 | 15—18 | 2.1 | |
| 日本鼓虾 <i>Alpheus japonicas</i> | 13 | 22—35 | 2.1 | |
| 口虾蛄 <i>Squilla orarotia</i> | 34 | 69—91 | 2.15 | |
| 脊尾白虾 <i>E. carinicauda</i> | 18 | 46—59 | 2.28 | |
| 中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i> | 7 | 38—64 | 2.31 | |
| 日本螯蟹 <i>Charybdis japonica</i> | 13 | 24—57 | 2.28 | |
| 三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i> | 35 | 24—107 | 2.53 | |

等)→低级肉食性鱼类(四指马鲛等)→中级肉食性鱼类(海鳗)。

一些植食性鱼类如鲮、鳊、贝氏鲮以浮游植

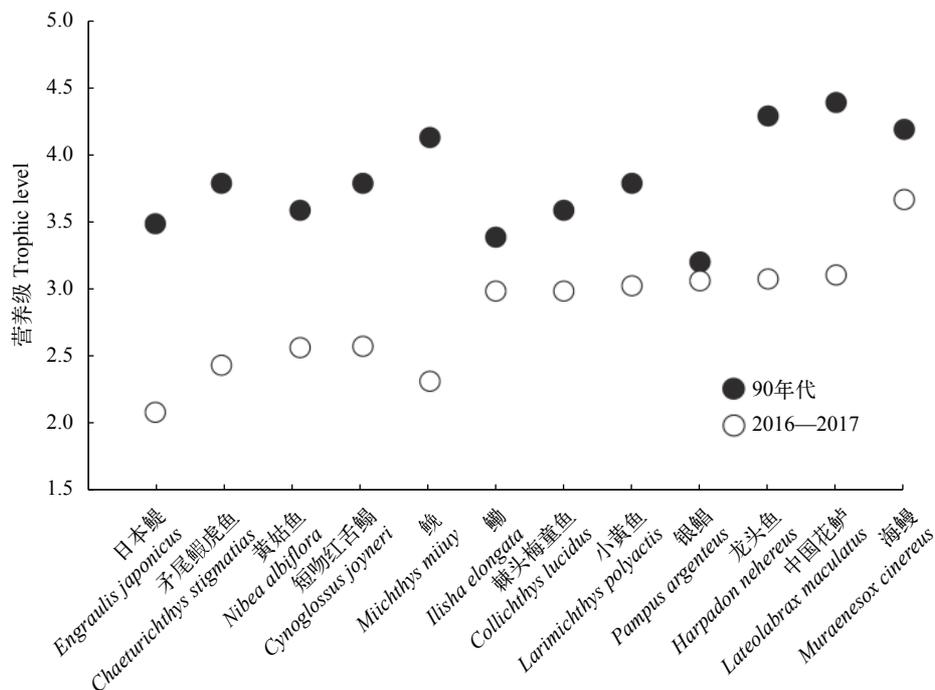


图2 长江口12种鱼类20世纪90年代与2016—2017年营养级大小比较

Fig. 2 Comparing the trophic level of 12 fish species in the Yangtze Estuary in the 1990s and during 2016 to 2017

物(绿藻、硅藻等)、浮游动物(桡足类、枝角类、糠虾类、磷虾类等)为主要食物,同时又被大型凶猛鱼类如中国花鲈、刀鲚、龙头鱼、海鳗等捕食。底栖虾、蟹类如脊尾白虾、安氏白虾、葛氏长臂虾、三疣梭子蟹既捕食小型底栖饵料生物,同时又被其他鱼类如四指马鲛、棘头梅童鱼等捕食。各种河口食物链紧密连接在一起,构成了长江口错综复杂的食物网(图4)。

3 讨论

研究发现长江口水生动物的食性类型分为4种,营养级介于2.0—4.0级。长江口水生生物的食物网结构较为复杂,主要由牧食食物链和碎屑食物链构成的复杂食物网。此外,长江口水生生物资源栖息环境日益遭到破坏,生物资源量处于退化状态,平均营养级与历史相比有所降低^[16,17]。

3.1 资源种类

长江口近海渔业资源在我国海洋渔业上占有举足轻重的地位^[18]。长江口渔业生物主要包括鱼类、甲壳类、头足类共3个生态类群^[19]。从各生态类群的渔获重量占总渔获量不同季节平均百分比可见:每个季节都是以鱼类为主要优势群,所占比例在70.65%—88.10%;头足类和甲壳类则为次要组成部分,在各个季节所占的重量百分比都较低。其中,甲壳类所占总渔获量百分比平均值为15.78%;头足类所占总渔获量百分比最高为4.80%,最低仅

为0.10%。从各生态类群种类数的季节及年间变化可知, 群落生物量、多样性以夏秋季节最大, 春冬季节最小。其中, 鱼类种类秋季最多, 春季最少; 甲壳类种类秋季最少, 其余三季种类差异不大; 头足类种类四季变化差异均不明显。这与李建生等^[20]研究的长江口2000—2002年渔场渔业生物群落结构的季节变化结果相吻合。此外, 本次研究中长江口2016—2017年水生生物季节间总种类数的变化为从春季经夏季到秋季呈现上升的趋势, 从冬季到来年春季呈下降的趋势。种类数和资源密度的最

低值并不出现在同一季节, 造成这种差异的原因可能与渔业生物的群体构成有关, 因为夏季主要是产卵群体, 个体相对较大, 所以虽然种类数较少但是资源密度值却不是最低的^[20]。

2017年度捕获的水生生物种类共65种, 相同取样位点2016与2015年度捕获的水生生物种类则分别为73种和84种。这表明长江口水生生物的种类逐步减少, 资源量逐渐降低。长江口经济鱼类包括: 银鲈、鳊、黄姑鱼、凤鲚、刀鲚、棘头梅童鱼、龙头鱼等^[21]。目前, 主要经济种群都已处于过渡利用的状态。由于不遵循自然规律, 捕捞压力过大, 结果反而使单位产量下降, 水生生物中主要传统经济种类日益减少, 而一些非经济种类和不可食用幼体的比重增加, 渔获质量下降。生物资源作为一种可更新的资源, 必须进行繁殖保护, 加强科学管理与合理开发利用, 才能达到可持续利用长江口水生生物资源^[21]。

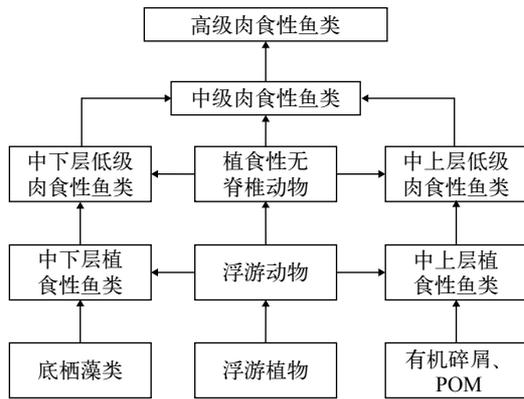


图3 长江口水生食物网能流途径简化模式

Fig. 3 Simplified model of energy flow path for Yangtze Estuary Aquatic animals' food web

3.2 食性

本研究胃含物分析结果表明长江口水生动物的食性分为浮游生物食性、底栖生物食性、游泳生物食性、混合食性4种类型。罗秉征等^[6]研究了长江口20世纪90年代鱼类食性类型, 同样分为4种食性类型, 其中浮游生物食性鱼类以桡足类, 如哲水蚤、剑水蚤及猛水蚤等浮游动物为主要食物; 本

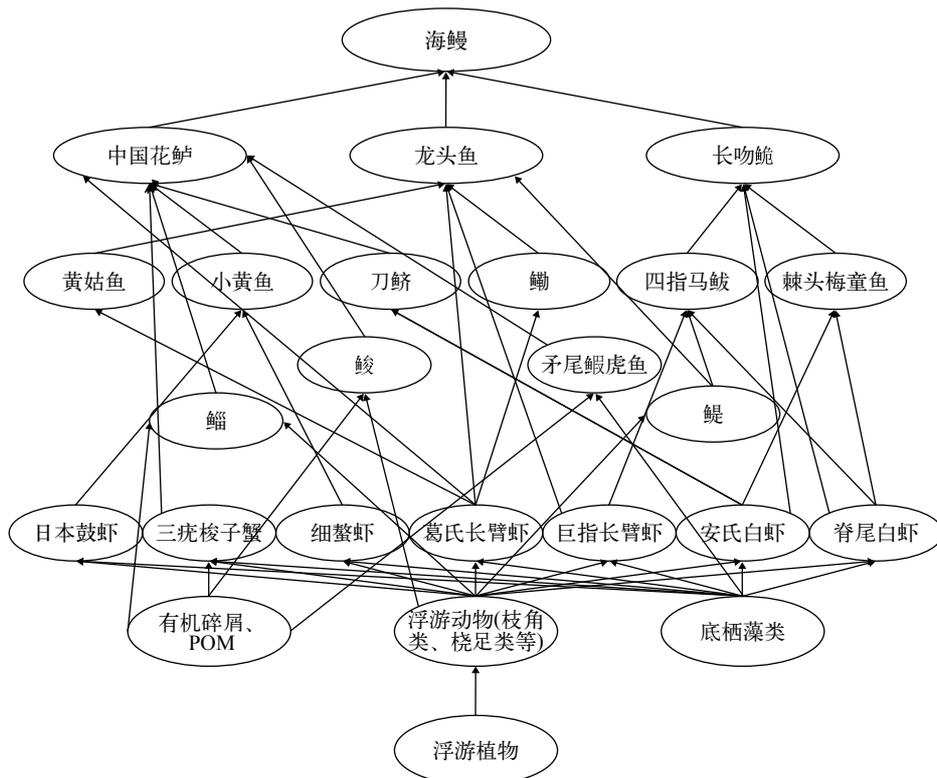


图4 长江口主要水生生物食物网

Fig. 4 Food web of main aquatic in the Yangtze Estuary

实验中浮游生物食性鱼类则主要以浮游植物、有机碎屑、POM等为主要食物,且浮游植物及有机碎屑在食物中所占比例较大。造成这一差异的原因主要与采样位点有关,本实验采样点集中在长江口门及口内水域,而罗秉征等^[6]的研究则集中在长江口外及外海水域;此外,随着长江径流源源不断的入海和营养物质的大量输入,使得长江口有来自陆地淡水或由海水带来的大量碎屑、细菌和其他异养性微生物,河口可以将它们分解成溶解的颗粒有机物^[22],从而为长江口浮游生物食性鱼类提供了丰富的食源。

此外,在本实验中浮游生物食性种类最多,所占比例最大,为39.53%;游泳生物食性种类最少,所占比例最小,仅为11.63%。由于目前长江口捕捞压力的增大,长江口水生生物的资源量锐减,经济价值低、个体小、年龄结构简单和营养层次低的类群在长江口及其邻近海域占据优势地位^[23]。因而长江口浮游生物食性水生生物所占比例越来越高,游泳生物食性水生生物所占比例逐渐降低。

3.3 营养级

本研究结果表明长江口水生动物营养级集中在2.0—4.0级,普遍小于罗秉征等^[6]、张波等^[11]在长江口的研究结果。一方面同一物种的营养级大小降低,例如12种优势鱼类营养级大小均小于20世纪90年代的研究值,平均营养级从3.80下降到2.87,中国花鲈与前期研究值相差甚至达到1.28级;另一方面高营养级物种种类和数量降低,如低级肉食性鱼类所占比例由20.00%^[6]下降到18.60%。

随着捕捞强度的增大,长江口水生生物资源量处于退化状态。李建生等^[24]研究发现长江口渔场渔业生物资源2003年各调查航次代表季节的渔业生物种类数与2000—2002年各年份同期相比,种类数有不同程度的降低。以底拖网为主的捕捞渔业使底层的大型经济鱼类迅速减少,渔业生物捕食关系发生改变,水生生物逐渐由肉食性、长寿的底层鱼类向浮游生物食性、短寿的上层鱼类转变^[23];此外,长江口及其邻近海域由于长期受到环境污染和渔场海洋环境条件的变化,如三峡大坝的成功截流、洋山港深水码头以及长江口深水航道治理工程的建设等因素,从而导致水生生物群落结构发生显著变化^[25]。Ryder等^[26]指出,过度捕捞和环境退化使生物群落的生态系统失去恢复力和完整性,生态系统的稳定性变差,使依赖生态系统产出的渔业产量在质和量2个方面具有不可预见性的变化。因而长江口水生生物的营养级降低很大程度上应该是环境因素和捕捞因素的共同作用结果^[27]。此外,本

实验调查采样主要以底拖网为主,拖网生产的渔获物组成主要以底层及中下层鱼类为主,中上层鱼类如鳊、刀鲚等也占有一定比例,因而计算得出的营养级整体较低。

部分鱼类如鳊的营养级2.77级与张波等^[11]的4.15级相差较大,这与捕获鳊个体的大小有关,鳊平均体长421.6 mm,为肉食性鱼类,食量大,以鱼虾为主要饵料^[28],而捕获到的鳊平均体长仅63.5 mm,因此营养级相差较大;又如长吻鳊为肉食性鱼类,因为主要是冬、春季捕获,摄食量少且捕获的体长较短,平均体长仅为182.3 mm,因此营养级较低,仅为2.4级。此外这两种鱼类营养级的降低还与饵料种类的变化及捕捞压力等有关。

3.4 食物网

从构建的简化食物网分析,长江口渔业资源群落食物网的顶级捕食者从高营养级阶层生物逐渐转变为中低营养级阶层生物,食物链越来越短。通过食物网和能流途径可以发现:浮游植物、底栖藻类、有机碎屑等在食物网中作为初级生产者作为初级消费者浮游动物提供食物;而初级消费者浮游动物则被次级消费者底栖无脊椎动物及植食性鱼类所摄食;次级消费者又被低、中级肉食性鱼类所捕,能量逐级传递,从而构成长江口复杂的食物网。其中葛氏长臂虾、安氏白虾、脊尾白虾、巨指长臂虾、三疣梭子蟹等在食物网中作为重要的食物饵料起着关键作用,由于它们大多数是长江口及邻近水域的优势生物种,在该地区分布广、数量较多、栖息时间较长、所以为该地区经济鱼类的繁衍和持续提供了可靠的食物保证^[6]。同时,由于它们本身也是重要的可开发经济渔获物,所以合理利用及保护这些渔业资源对保护该水域渔业生产力及其生物多样性具有重要意义。

总之,长江口水生生物一方面通过摄食空间及摄食方式的不同产生隔离,在一定程度上避免了时空上的摄食竞争;另一方面通过营养生境的重叠及捕食者与被捕食者的相互捕食关系把长江口水生生物通过复杂的食物链、食物网连接起来,从而保证了该水域水生生物持续、稳定的发展^[6]。

参考文献:

- [1] Zhang X G, Xian W W. Energy flow and network analysis of the Yangtze Estuary ecosystem during 1985—1986 [J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(7): 60—72 [张效嘉, 线薇薇. 1985-1986年长江口生态系统能流网络分析. 海洋科学, 2016, 40(7): 60—72]
- [2] Liu R Y, Luo B Z. Three Gorges project affects the eco-

- logy and fishery around estuary of Yangtze River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1987, **7**(4): 37—40 [刘瑞玉, 罗秉征. 三峡工程对长江口生态和渔业的影响. 水土保持通报, 1987, **7**(4): 37—40]
- [3] Shen X Q, Chao M, Quan W M, *et al.* The current situation and restoration research of the Yangtze River estuarine ecosystem [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, **13**(4): 624—630 [沈新强, 晁敏, 全为民, 等. 长江河口生态系现状及修复研究. 中国水产科学, 2006, **13**(4): 624—630]
- [4] Tang Q S. Strategies of research on marine food web and trophodynamics between high trophic levels [J]. *Marine Fisheries Research*, 1999, **20**(2): 1—6 [唐启升. 海洋食物网与高营养层次营养动力学研究策略. 海洋水产研究, 1999, **20**(2): 1—6]
- [5] Yan Y R, Lu H S, Jin X S. Marine fish feeding ecology and food web: progress and perspectives [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, **35**(1): 145—153 [颜云榕, 卢伙胜, 金显仕. 海洋鱼类摄食生态与食物网研究进展. 水产学报, 2011, **35**(1): 145—153]
- [6] Luo B Z, Wei S, Dou S Z. Study on food web and trophic structure of fish in the Changjiang River Estuary [J]. *Studia Marina Sinica*, 1997, **38**(1): 143—153 [罗秉征, 韦晟, 窦硕增. 长江口鱼类食物网与营养结构的研究. 海洋科学集刊, 1997, **38**(1): 143—153]
- [7] Li Z Y, Zuo T, Dai Q F, *et al.* Trophic level analysis of organisms from Changjiang estuary and adjacent waters of southern Yellow Sea in spring with stable isotope technology [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, **17**(1): 103—109 [李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 运用稳定同位素技术研究长江口及南黄海水域春季拖网渔获物的营养级. 中国水产科学, 2010, **17**(1): 103—109]
- [8] Lin Q, Jin X S, Guo X W, *et al.* Study on the structure and energy flow of the Yangtze River estuary and adjacent waters ecosystem based on ecopath model [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, **2**(2): 28—36 [林群, 金显仕, 郭学武, 等. 基于Ecopath模型的长江口及毗邻水域生态系统结构和能量流动研究. 水生态学杂志, 2009, **2**(2): 28—36]
- [9] Shan X J, Jin X S. Diversity of fish community structure in the spring-time offshore waters at the Yangtze River estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, **42**(1): 32—40 [单秀娟, 金显仕. 长江口近海春季鱼类群落结构的多样性研究. 海洋与湖泊, 2011, **42**(1): 32—40]
- [10] Huang X F, Xu B W, Chen J C. Energy flow and trophic structure of the Wuli Lake ecosystem based on an ecopath model [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, **19**(3): 471—481 [黄孝峰, 邢旭文, 陈家长. 基于Ecopath模型的五里湖生态系统营养结构和能量流动研究. 中国水产科学, 2012, **19**(3): 471—481]
- [11] Zhang B, Jin X S, Tang Q S. Functional groups of high trophic level communities in adjacent waters of Changjiang estuary [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(2): 344—351 [张波, 金显仕, 唐启升. 长江口及邻近海域高营养层次生物群落功能群及其变化. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 344—351]
- [12] Dou S Z, Yang J M. Feeding habit and seasonal variation in food content of *Cynoglossus Semilaevis* in the Bohai Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, **12**(4): 368—376 [窦硕增, 杨纪明. 渤海南部半滑舌鳎的食性及摄食的季节性变化. 生态学报, 1992, **12**(4): 368—376]
- [13] Zhang Q Y, Lin Q M, Lin Y T, *et al.* Food web of fishes in Minnan-Taiwan Chientan fishing ground [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1981, **3**(2): 275—290 [张其永, 林秋眠, 林尤通, 等. 闽南-台湾浅滩渔场鱼类食物网研究. 海洋学报, 1981, **3**(2): 275—290]
- [14] Guo A, Chen F, Jin H W, *et al.* Food composition and seasonal changes of *Coilia mystus* in the East China Sea and Yellow Sea [J]. *Marine Fisheries*, 2014, **36**(5): 402—408 [郭爱, 陈锋, 金海卫, 等. 东、黄海凤鲚的食物组成及其食性的季节变化. 海洋渔业, 2014, **36**(5): 402—408]
- [15] Fan Y C, Liu Q G, Hu Z J, *et al.* Diet of *Coilia nasus* in Dianshan Lake of Shanghai [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, **25**(6): 847—854 [凡迎春, 刘其根, 胡忠军, 等. 上海淀山湖刀鲚食性研究. 上海海洋大学学报, 2015, **25**(6): 847—854]
- [16] Palomares M L. A multiple regression model for predicting the food consumption of marine fish populations [J]. *Australian Journal of Marine and Fresh Water Research*, 1989, **40**: 259—284
- [17] Chao M, Quan W M, Li C H, *et al.* Changes in trophic level of marine catches in the East China Sea region [J]. *Marine Sciences*, 2005, **29**(9): 51—55 [晁敏, 全为民, 李存厚, 等. 东海区海洋捕捞渔获物的营养级变化研究. 海洋科学, 2005, **29**(9): 51—55]
- [18] Luo B Z. Resource Band Environment in the Yangtze Valley [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 1992, **1**(1): 24—30 [罗秉征. 河口及近海的生态特点与渔业资源. 长江流域资源与环境, 1992, **1**(1): 24—30]
- [19] Deng J Y, Jin X S. Study on fishery biodiversity and its conservation in LaiZhou Bay and Yellow River Estuary [J]. *Zoological Research*, 2000, **21**(1): 76—82 [邓景耀, 金显仕. 莱州湾及黄河口水域渔业生物多样性及其保护研究. 动物学研究, 2000, **21**(1): 76—82]
- [20] Li J S, Li S F, Ren Y P, *et al.* Seasonal variety of fishery biology community structure in fishing ground of the Yangtze estuary [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, **11**(5): 432—439 [李建生, 李圣法, 任一平, 等. 长江口渔场渔业生物群落结构的季节变化. 中国水产科学, 2004, **11**(5): 432—439]
- [21] Li J S, Li S F, Chen J H. The composition and diversity of fishes on fishing grounds of Changjiang estuary [J]. *Marine Fisheries*, 2006, **28**(1): 37—41 [李建生, 李圣法, 程

- 家骅. 长江口渔场鱼类组成和多样性. 海洋渔业, 2006, 28(1): 37—41]
- [22] Dürr H H, Laruelle G G, van Kempen C M, *et al.* World-wide typology of near shore coastal systems: Defining the estuarine filter of river inputs to the oceans [J]. *Estuaries Coasts*, 2011, 34: 441—458
- [23] Jin X S, Shan X J, Guo X W, *et al.* Community structure of fishery biology in the Yangtze River estuary and its adjacent waters [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 9(29): 4761—4772 [金显仕, 单秀娟, 郭学武, 等. 长江口及其邻近海域渔业生物的群落结构特征. 生态学报, 2009, 9(29): 4761—4772]
- [24] Li J S, Cheng J H. Analysis on the dynamic of fishery biological resources on the fishing grounds of the Changjiang estuary [J]. *Marine Fisheries*, 2005, 27(1): 33—37 [李建生, 程家骅. 长江口渔场渔业生物资源动态分析. 海洋渔业, 2005, 27(1): 33—37]
- [25] Chen J Y, Chen S L. Ecological environment changes in the Changjiang Estuary over recent 20 years [J]. *Water Purification Technology*, 2002, 1(4): 1—3 [陈吉余, 陈沈良. 近20年来长江口生态系统变化. 净水技术, 2002, 1(4): 1—3]
- [26] Ryder R A, Kerr S R, Taylor W W, *et al.* Community consequences of fish stock diversity [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1981, 38: 1856—1866
- [27] Finney B P, Gregory-eaves I, Douglas M S V, *et al.* Fisheries productivity in the northeastern Pacific Ocean over the past 2,200 years [J]. *Nature*, 2002, 416: 729—733
- [28] Zhuang P, Wang Y H, Li S F, *et al.* Fishes of the Yangtze Estuary [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers. 2006, 345—348 [庄平, 王幼槐, 李圣法, 等. 长江口鱼类. 上海: 上海科学技术出版社. 2006, 345—348]

TROPHIC STRUCTURE OF FOOD WEB AND ITS VARIATION ON AQUATIC ANIMALS IN THE YANGTZE ESTUARY

XU Chao^{1,2}, WANG Si-Kai¹, ZHAO Feng¹, YANG Gang¹ and ZHUANG Ping^{1,2}

(1. *Scientific Observing and Experimental Station of Fisheries Resources and Environment of East China Sea and Yangtze Estuary, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China*; 2. *Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China*)

Abstract: In order to provide basic information for protecting and rational utilizing resources of the Yangtze Estuary, feeding types, trophic level, energy flow, and food web, 43 aquatic animals were studied by using stomach content analysis. The species were classified into four groups according to their feeding habit: plankton feeding, benthic feeding, nekton feeding, and mixed feeding (benthic and nekton feeding). Among the samples collected in this study, the plankton predators were dominant accountings for 39.53%, and the nekton predators had the minimum dominancy, accounting for 11.63%. The results of trophic level showed that according to the dietary habits, these aquatic animals can be also divided into 3 different groups, which herbivorous consumers were dominant, and accounted for 76.75%, while intermediate carnivorous fish had the minimum dominancy, accounting for 4.65%. Through the overfishing and environmental degradation, the trophic levels of the 12 common fish in the Yangtze Estuar were generally lower than those of the 1990s, the average trophic level dropped from 3.80 to 2.87. According to each consumer's stomach content, this study determined the benthic algae and phytoplankton, and organic detritus, including particulate organic matter (POM), as the main producers of the Yangtze Estuary aquatic food web, and drew their own energy flow. Eventually, based on the nutritional relationship among different aquatic animals, this study proposed a simplified model for the Yangtze Estuary aquatic animals' food web.

Key words: The Yangtze Estuary; Aquatic animals; Feeding habit; Trophic level; Food web