

陈耀辉, 刘守海, 何彦龙, 等. 近 30 年长江口海域生态系统健康状况及变化趋势研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(4): 55–65, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.04.007

Chen Yaohui, Liu Shouhai, He Yanlong, et al. Study on ecosystem health and variation trend at the Changjiang River Estuary in the past 30 years[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(4): 55–65, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.04.007

# 近 30 年长江口海域生态系统健康状况及变化趋势研究

陈耀辉<sup>1,2</sup>, 刘守海<sup>2,3</sup>, 何彦龙<sup>2,3</sup>, 秦玉涛<sup>2,3</sup>, 季晓<sup>2,3</sup>, 张昊飞<sup>2,3</sup>, 徐韧<sup>4\*</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 自然资源部 海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206; 3. 国家海洋局 东海环境监测中心, 上海 201206; 4. 自然资源部 中国极地研究中心, 上海 200136)

**摘要:** 为评估长江口海域生态系统健康状况, 本文以鱼类浮游生物为指示生物, 选择 1986 年、1999 年、2007 年和 2016 年 4 个年份的数据, 选取鱼类浮游生物总种类数、底栖鱼种类数、水层鱼种类数、低耐污鱼种类数、高耐污鱼种类数百分比、杂食性鱼种类数百分比、虫食性鱼种类数百分比、肉食性鱼种类数百分比、鱼类取样个体数、天然杂交种种类数百分比等 10 个评价指标, 采用 1、3、5 赋值法计算 4 个不同年份的河口生物完整性指数 (Estuarine Biotic Integrity Index, EBI), 并以此评价近 30 年长江口海域生态系统健康状况变化趋势。结果显示, 1986 年、1999 年、2007 年和 2016 年 4 个不同年份的 EBI 值分别是 52、40、36、34, 对应的 EBI 等级分别为“好”、“一般”、“一般-差”、“差”。通过分析 EBI 年际变化的结果, 发现近 30 年来长江口海域生态系统健康状况呈现先下降, 而后稳定在较低水平的趋势, 说明长江口海域生态系统亟需及时进行保护和修复工作。

**关键词:** 生态系统健康; 鱼类浮游生物; 河口生物完整性指数; 年际变化

中图分类号: P714<sup>+</sup>.5; P76; Q178.53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)04-0055-11

## 1 引言

20 世纪 60 年代以来, 随着全球经济的发展, 生态环境问题日趋严重, 生态系统健康问题受到了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。由于研究者研究背景的差异, 对生态系统健康的定义各有不同, 至今仍未达成共识, 但是研究者普遍认可: 如果一个生态系统是稳定的和可持续发展的, 那么它就是一个健康的生态系统<sup>[3]</sup>。在生态系统健康的相关研究中, 评价生态系统健康状况是最基础、最重要的一个环节, 目前生态系统健康评价的研究已经涉及到河流生态系统<sup>[4-5]</sup>、湖泊生态系统<sup>[6]</sup>、湿地生态系统<sup>[7-8]</sup>、森林生态系统等<sup>[9]</sup>; 评价方法大致可分为指示物种法和指标体系法两大类<sup>[3]</sup>。生物完整性

指数 (Index of Biological Integrity, IBI) 法属于指标体系法中的一种, 在评价河流生态系统健康的研究中, 它因为能够将物种、种群、群落和生态系统层次的信息整合, 以及能从生态系统的角度更好地反映河流生态系统健康状况而被广泛应用<sup>[10-11]</sup>。

生物完整性是指在天然栖息地中, 群落所具有的种类组成、物种多样性和功能结构特征, 以及该群落所具有的维持自身平衡、保持结构完整和适应环境变化的能力<sup>[12]</sup>。20 世纪 80 年代初, Karr<sup>[11]</sup> 首先提出了以鱼类作为指示生物, 使用 IBI 评价水环境质量及生态系统状况。在此基础上, Deegan 等<sup>[13]</sup> 基于河口生境鱼类群落变化的情况, 进一步提出了河口生物完整性指数 (Estuarine Biotic Integrity Index, EBI) 的

收稿日期: 2019-05-27; 修订日期: 2019-08-28。

基金项目: 国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项 (2016YFC1402305); 海洋公益性行业科研专项 (201305027, 201505004-6); 东海分局青年海洋科技基金项目 (201801)。

作者简介: 陈耀辉 (1994—), 男, 广东省肇庆市人, 研究方向为海洋鱼类浮游生物和海洋生态。E-mail: 1032373560@qq.com

\* 通信作者: 徐韧, 研究员, 主要从事海洋生态环境研究。E-mail: xrhpy@ecs.mnr.gov.cn

概念,并将之应用于马萨诸塞州南部瓦库伊特(Waquoit)海湾和巴特米尔克(Buttermilk)海湾生境质量的评价。此后, Hughes 等<sup>[14]</sup>、Breine 等<sup>[15]</sup>以及刘守海等<sup>[16]</sup>都利用 EBI 的方法对河口海域生态系统健康状况进行了研究,以上研究集中在评价河口生态系统健康状况的现状,尚未出现评价生态系统健康状况变化趋势的研究,而分析一个生态系统健康状况的长期变化有助于了解其驱动机制,并能针对性地对退化的生态系统进行修复。

长江是我国最大的河流,其大量的淡水输入,给长江口海域带来了大量的泥沙和营养物质<sup>[17]</sup>,同时长江口海域也受到台湾暖流、苏北沿岸流和黄海水团等海流水系的综合影响,历史上长江口海域是多种鱼类的产卵场和育幼场<sup>[18]</sup>。然而,由于人类开发活动的加剧,长江口海域面临的生态压力与日俱增<sup>[19]</sup>。近年来,围绕长江口海域生态环境的问题,我国学者开展了大量研究,包括探讨长江口海域水质环境的变化<sup>[20-22]</sup>、评价沉积物生态环境的受污染程度<sup>[23-24]</sup>、研究生物群落与环境因子的关系<sup>[25-27]</sup>等,这些对长江口海域生态系统的研究,最终目的都是了解长江口海域生态系统状况,以便合理利用长江口海域资源,使社会可持续发展。目前,长江口海域生态系统状况不容乐观:水体富营养化程度严重,这不仅导致水质恶化<sup>[22,27]</sup>,而且也使赤潮暴发次数增多<sup>[28]</sup>;底栖生物群落的物种数和生物量都处于较低水平<sup>[26]</sup>;鱼类群落多样性趋于简单化,底层中型鱼类个体减少<sup>[29]</sup>等。为更好地了解长江口海域生态系统健康状况的长期变化趋势,本研究通过计算 1986 年、1999 年、2007 年以及 2016 年 4 个不同年份春季长江口海域鱼类浮游生物的 EBI 值,评价了长江口海域生态系统健康状况近 30 年的变化,以期为长江口海域生物资源的保护和修复以及为利用生物完整性评价河口生态系统健康状况提供参考。

## 2 材料和方法

### 2.1 数据来源

2016 年 5 月在长江口海域(30°30'~32°00'N, 121°20'~123°00'E)进行海洋生物多样性监测采样调查,按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)使用大型浮游生物网(网长 280 cm,网口内径 80 cm,网口面积 0.5 m<sup>2</sup>,网目 0.505 mm)进行挂流拖样;用浅水 I 型浮游生物网(口径 50 cm、筛绢 CQ14、孔径 0.505 mm)由底至表进行垂直拖网。鱼类浮游生物样品先用 5% 的福尔马林溶液保存,待下一步回实验室处理;实验室中,先在体视显微镜下对样品进行初步鉴定,而后利用基于线粒体 CO I 序列的 DNA 条形码

技术对未能定种的样品进行 DNA 鉴定,并计数。其他鱼类浮游生物数据分别引自:中国科学院海洋研究所 1986 年 5 月,在 30°35'~32°00'N, 121°20'~124°00'E 范围内进行的浮性鱼卵和仔稚鱼生态调查<sup>[30]</sup>;中国科学院海洋研究所 1999 年 5 月,在 30°30'~32°20'N, 121°00'~123°30'E 范围内进行的生态环境与资源综合调查<sup>[31]</sup>;中国科学院海洋研究所 2007 年 5 月,在 30°45'~32°00'N, 121°00'~123°20'E 范围内进行的渔业资源管理与可持续利用调查<sup>[32]</sup>。采样站位及采样时间见图 1。

参考《拉汉世界鱼类系统名典》<sup>[33]</sup>和《江苏鱼类志》<sup>[34]</sup>统一命名各年份间拉丁文学名相同而中文学名不同或拉丁名和中文学名都不同但实为同一物种的鱼类浮游生物。

### 2.2 评价指标的设置及计算

根据研究区域河口生境的属性,本研究参考 Karr<sup>[11]</sup>、Deegan 等<sup>[13]</sup>、Hughes 等<sup>[14]</sup>及刘守海等<sup>[16]</sup>的研究方法,确定了适合评价长江口海域 EBI 的指标。评价指标分为物种组成、营养类型、鱼类丰度和健康状况 3 大类,共 10 项(表 1);将近 30 年来长江口海域受干扰程度较低的年份获得的数据设置为各指标的期望值,然后将各年份的数据与期望值对比,根据各年份数据偏离期望值的程度,分为“好”、“一般”、“差”3 个层次,分别赋予 5 分、3 分、1 分的评价,最后将各项指标得分相加即为该年份的 EBI 值。

EBI 计算公式:

$$EBI = M1 + M2 + M3 + \dots + M10, \quad (1)$$

式中, M1~M10 意义见表 1。因研究区域鱼类浮游生物包含了在河口育肥、产卵以及栖居的种类,因此 M1 属性包含了河口育肥种、河口产卵种和河口定居种 3 个指标,故赋予 M1 属性 3 个权重。EBI 总分为 60 分,分数越高,代表该研究区域鱼类浮游生物的生物完整性程度越高、生态系统越稳定,则生态系统健康状况越好。

### 2.3 EBI 评价标准以及等级划分

参考 Karr<sup>[11]</sup>的研究,本文将 EBI 的总分划分为 9 个分数段,分属 9 个等级:“极好”58~60;“极好-好”53~57;“好”48~52;“好-一般”45~47;“一般”40~44;“一般-差”35~39;“差”28~34;“差-极差”23~27;“极差”12~22。表 2 列出了各 EBI 值及其对应的 EBI 等级,以及各 EBI 等级的特征描述。

## 3 结果

### 3.1 鱼类浮游生物物种组成

研究发现,春季长江口海域共鉴定鱼类浮游生物

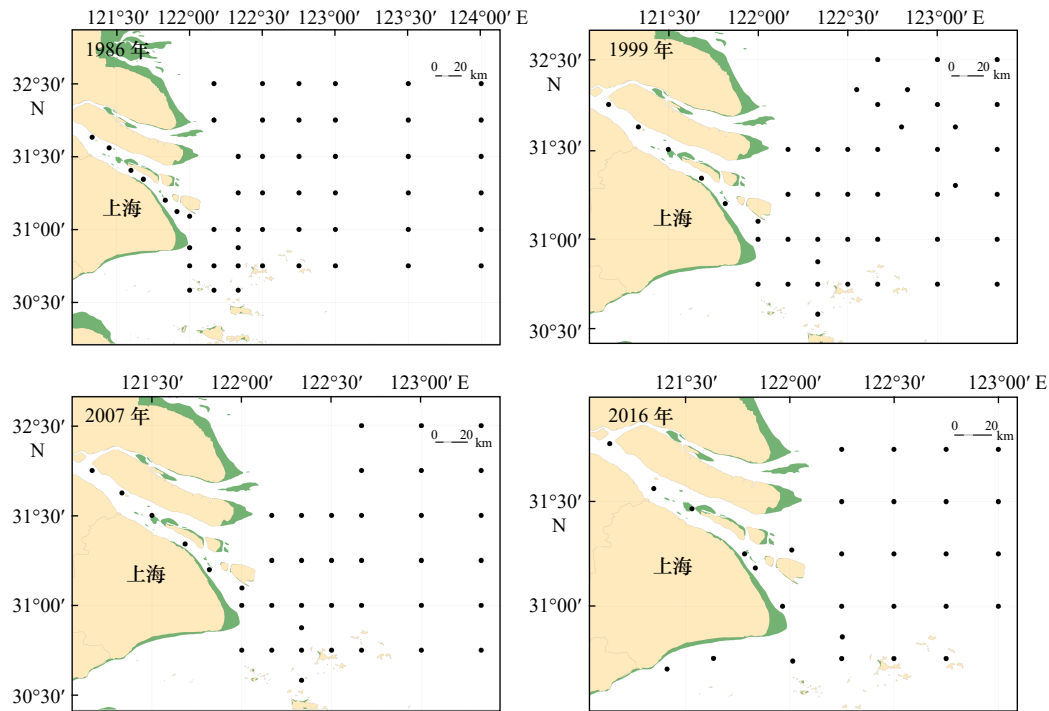


图1 不同调查时期长江口海域鱼类浮游生物采样区域和站位分布

Fig. 1 Survey area and sampling stations of ichthyoplankton in the Changjiang River Estuary in different survey periods

表1 长江口海域 EBI 评价指标体系

Table 1 EBI metric system in the Changjiang River Estuary

属性	指标
种类结构	M1总种类数
	M2底栖鱼种类数
	M3水层鱼种类数
	M4低耐污鱼种类数
	M5高耐污鱼种类数百分比
营养结构	M6杂食性鱼种类数百分比
	M7虫食性鱼种类数百分比
	M8肉食性鱼种类数百分比
鱼类丰度和健康状况	M9鱼类取样个体数
	M10天然杂交种种类数百分比

25科,共62种,其中鉴定到种的有51种,4个种鉴定到属,7个种鉴定到科(表3)。按照长江口海域鱼类浮游生物的生态习性和空间分布的特点,将62种鱼类浮游生物分为淡水型、沿岸型、半咸水型和近海型4种生态类型(表3)。

由图2可知,近30年来,春季(5月份)长江口海域鱼类浮游生物种类数在1986年较高,随后急剧降低,1999年以后稳定在较低水平。在分类阶元为科的水平上,1986年、1999年、2007年及2016年分别

表2 EBI等级划分和对应的特征描述

Table 2 Classification of EBI and the characteristic corresponding to its level

EBI值	EBI等级	特征描述
58~60	极好	鱼类浮游生物群落没有受到人类干扰,所有期望的鱼类浮游生物都能捕获,包括耐受性极差的种类;营养结构平衡;没有天然杂交种、极少感染疾病个体
48~52	好	鱼类浮游生物种类数略低于期望值,耐受性极差的种类消失;营养结构显示环境受到一定压力,但仍极少天然杂交个体
40~44	一般	鱼类浮游生物丰度低,低耐受种少;生态环境质量开始下降
28~34	差	鱼类浮游生物种类变少;耐受性弱的种类更少,耐受性强的种类比例增加;天然杂交种比例上升。
12~22	极差	鱼类浮游生物数量较少,且多为耐受性极强的种类;天然杂交种普遍

为15、15、13、10科,总体呈现出缓慢递减的趋势;在分类阶元为种的水平上,1986年鱼类浮游生物种类数最多,达到30种,而后急剧下降到1999年的20种,此后种类数变化不大,分别为2007年的17种以及2016年的19种。

### 3.2 长江口海域 EBI 指标赋值标准

本研究选择长江口海域受人类干扰较少年份的数据作为 EBI 期望值。鱼类浮游生物是鱼类生活史早期的发育阶段,其物种状况、种群结构组成等受成鱼影响<sup>[35-36]</sup>,在20世纪80年代以前,长江口海域渔业

表 3 长江口海域鱼类浮游生物名录

Table 3 Species categories of ichthyoplankton in the Changjiang River Estuary waters

科	种名	生态类型	1986年	1999年	2007年	2016年
鲱科Clupeidae	远东拟沙丁鱼 <i>Sardinops melanostictus</i>	M	+			
鲱科Clupeidae	青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>	C	+			
鲱科Clupeidae	斑鲚 <i>Konosirus punctatus</i>	M	+			
鳀科Engraulidae	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	M	+	+	+	+
鳀科Engraulidae	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	B	+	+	+	+
鳀科Engraulidae	黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	C	+			
鳀科Engraulidae	康氏侧带小公鱼 <i>Stolephorus commersonii</i>	C			+	
鳀科Engraulidae	赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i>	C			+	
灯笼鱼科Scopelidae	七星底灯鱼 <i>Benthoosema pterotum</i>	M			+	
鲤科Cyprinidae	鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	F				+
鲤科Cyprinidae	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	F				+
鲤科Cyprinidae	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	F				+
鲤科Cyprinidae	鲤科1 Cyprinidae sp.	F		+		
鲤科Cyprinidae	鲤科2 Cyprinidae sp.	F		+		
鲤科Cyprinidae	鲤科3 Cyprinidae sp.	F		+		
银鱼科Salangidae	大银鱼 <i>Protosalanx chinensis</i>	B	+			
银鱼科Salangidae	前颌间银鱼 <i>Hemisalanx prognathus</i>	B	+	+		
银鱼科Salangidae	太湖短吻银鱼 <i>Neosalanx prognathus taihuensis</i>	B	+			
银鱼科Salangidae	有明银鱼 <i>Salanx ariakensis</i>	B			+	
鲻科Mugilidae	鲻 <i>Liza haematocheilus</i>	B	+	+		+
鲻科Mugilidae	前鳞龟鲻 <i>Chelon affinis</i>	B				+
鲻科Mugilidae	梭鲻 <i>Liza carinatus</i>	B			+	
鲻科Mugilidae	鲻 <i>Mugil cephalus</i>	B	+			
鲈科Serranidae	中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	M				+
鲈科Serranidae	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	F				+
鲈科Serranidae	鲈科Serranidae sp.	M	+			
鲷科Sparidae	鲷科Sparidae sp.	M		+		
杜父鱼科Cottidae	松江鲈 <i>Trachidermus fasciatus</i>	B			+	
石首鱼科Sciaenidae	黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	C	+			
石首鱼科Sciaenidae	大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	C		+		
石首鱼科Sciaenidae	小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	C	+	+	+	+
天竺鲷科Apogonidae	细条天竺鲷 <i>Apogon lineatus</i>	M	+		+	
银汉鱼科Atherinidae	白氏银汉鱼 <i>Allanetta bleekeri</i>	C			+	
鲷科Platycephalidae	鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	M	+	+		+
鲷科Callionymidae	单鳍鲷 <i>Draculo mirabilis</i>	M		+		

续表 3

科	种名	生态类型	1986年	1999年	2007年	2016年
鲷科Callionymidae	斜棘鲷属 <i>Repomucenus</i> sp.	M				+
鲷科Callionymidae	鲷属 <i>Callionymus</i> sp.	M	+			
鲷科Stomateidae	银鲷 <i>Pampus argenteus</i>	C	+	+	+	
鲭科Scombridae	蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	M	+			
鲭科Scombridae	鲈 <i>Scomber japonicus</i>	M	+	+		
鲈科Carangidae	竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	M				+
鲈科Ophidiidae	须鲈属 <i>Brotula</i> sp.	M		+		
鳊科Hemirhamphidae	日本下鳊鱼 <i>Hyporhamphus sajori</i>	B				+
鰕虎鱼科Gobiidae	竿鰕虎鱼 <i>Luciogobius guttatus</i>	B	+	+		+
鰕虎鱼科Gobiidae	斑尾刺鰕虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	B				+
鰕虎鱼科Gobiidae	褐吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius brunneus</i>	B				+
鰕虎鱼科Gobiidae	睛尾蝌蚪鰕虎鱼 <i>Lophiogobius ocellicauda</i>	B	+			+
鰕虎鱼科Gobiidae	六丝钝尾鰕虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	B		+	+	
鰕虎鱼科Gobiidae	矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	B				+
鰕虎鱼科Gobiidae	鰕虎鱼科Gobiidae sp.	B				+
鰕虎鱼科Gobiidae	鳊形鰕虎鱼 <i>Taenioides anguillaris</i>	B	+			
鰕虎鱼科Gobiidae	大弹涂鱼 <i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	B	+			
鲷科Scorpaenidae	褐菖鲈 <i>Sebastes marmoratus</i>	C		+		
鲷科Bothidae	大牙斑鲷 <i>Pseudorhombus arsius</i>	M	+			
鲷科Bothidae	褐牙鲷 <i>Paralichthys olivaceus</i>	M	+			
鲷科Soleidae	日本拟鲷 <i>Pseudaesopia japonicus</i>	M				+
舌鲷科Cynoglossidae	焦氏舌鲷 <i>Cynoglossus joyneri</i>	C	+	+		
舌鲷科Cynoglossidae	短吻舌鲷 <i>Cynoglossus abbreviatus</i>	M	+			
舌鲷科Cynoglossidae	窄体舌鲷 <i>Cynoglossus gracilis</i>	M	+			
鲈科Tetraodontidae	东方鲀属 <i>Takifugu</i> sp.	B	+			+
鲈科Tetraodontidae	黄鳍东方鲀 <i>Takifugu xanthopterus</i>	B				+
鲈科Tetraodontidae	鲈科Tetraodontidae sp.	B		+		

注: M. 近海型; B. 半咸水型; C. 沿岸型; F. 淡水型; +. 获取年份。

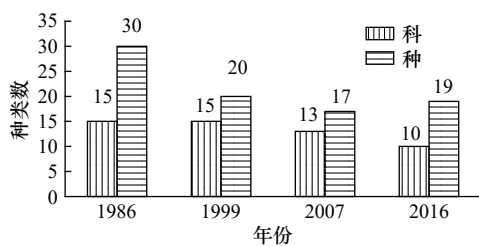


图2 春季(5月)长江口海域物种数量变化  
Fig. 2 Changes in the number of species in the Changjiang River Estuary waters in spring (May)

资源的开发利用程度在正常范围, 鱼类群落基本保持完整状态<sup>[29,37]</sup>, 故本文参考1986年鱼类群落资料设置期望值。根据1、3、5赋值法, 得到长江口海域河口生物完整性各指标的赋值标准(表4)。

### 3.3 长江口海域河口生物完整性变化趋势

长江口海域在1986年、1999年、2007年和2016年4个不同时期的EBI值分别为52、40、36和34(表5), 对应的EBI等级分别为“好”、“一般”、“一般-差”和“差”, 生物完整性呈现出先下降后保持平稳

表 4 EBI 指标赋值标准

Table 4 EBI metrics score criteria

属性	指标	评分标准		
		1	3	5
物种组成	M1总种类数	<18	18~28	>28
	M2底栖鱼种类数	<8	8~10	>10
	M3水层鱼种类数	<12	12~18	>18
	M4低耐污鱼种类数	<16	16~25	>25
	M5高耐污鱼种类数百分比	>20%	5%~20%	<5%
营养结构	M6杂食性鱼种类数百分比	>45%	20%~45%	<20%
	M7虫食性鱼种类数百分比	<20%	20%~45%	>45%
	M8肉食性鱼种类数百分比	<1%	1%~5%	>5%
鱼类丰度和健康状况	M9鱼类取样个体数	<60	60~90	>90
	M10天然杂交种种类数百分比	>1%	0~1%	0

表 5 鱼类浮游生物 EBI 值

Table 5 EBI values of ichthyoplankton

属性	1986年	1999年	2007年	2016年
M1总种类数	5	3	1	3
M2底栖鱼种类数	5	3	1	3
M3水层鱼种类数	5	1	3	1
M4低耐污鱼种类数	5	3	3	1
M5高耐污鱼种类数百分比	3	3	3	1
M6杂食性鱼种类数百分比	3	5	5	3
M7虫食性鱼种类数百分比	1	1	3	1
M8肉食性鱼种类数百分比	5	5	5	5
M9鱼类取样个体数	5	5	5	5
M10天然杂交种种类数百分比	5	5	5	5
EBI值	52	40	36	34

的趋势。在物种组成大类的指标(M1~M5)中,各年份 EBI 得分的趋势与 EBI 总分趋势相似,1986-1999 年先下降,1999 年以后保持平稳;而营养结构与鱼类丰度和健康状况两大类指标的 EBI 得分则一直维持稳定状态。

## 4 讨论

### 4.1 鱼类浮游生物群落结构变化

在温带河口地区,鱼类浮游生物群落一般以生活在河口地区的鰕虎鱼科和在河口地区季节性产卵的

鲱科、鳀科等居多<sup>[38-41]</sup>。本研究中,春季长江口海域鱼类浮游生物主要类群为鳀科、鰕虎鱼科、石首鱼科、鲤科等,分属于淡水型鱼类、半咸水型鱼类、沿岸型鱼类、近海型鱼类 4 种生态类型<sup>[30, 42]</sup>,其中鳀科的风鲚和日本鳀、石首鱼科的小黄鱼为 4 个时期都出现的种类;鲱科的鲛、鲮科的鲮、鲳科的银鲳和鰕虎鱼科的斑点竿鰕虎鱼在 3 个时期出现;其余出现 2 次的有 7 种;只出现 1 次的高达 48 种。研究发现,近 30 年春季长江口海域鱼类浮游生物群落结构的变化主要是 4 个时期中只出现 1 次的偶见种引起的。与常见种相比,这些偶见种对环境的适应能力弱,当环境条件适合,这些种类增加,物种多样性也变大;当环境恶化,它们不能适应就会逃逸或死亡,则鱼类浮游生物物种多样性迅速变小<sup>[43]</sup>。鱼类浮游生物群落结构的变化与成鱼群落结构的变化密切相关<sup>[36]</sup>。近年来,长江口近岸水域鱼类物种多样性降低,种类组成由 20 世纪 60 年代的以底层中型优质鱼类为主转变为 21 世纪以中上层小型低值杂质鱼类为主的较为简单的群落结构生态类型<sup>[37]</sup>,鱼类群落结构逐步趋于简单<sup>[44-45]</sup>,大型个体鱼类减少<sup>[37, 46]</sup>,而如鰕虎鱼科的矛尾鰕虎鱼等生命周期短的小型鱼类占优势<sup>[45, 47]</sup>。据统计,21 世纪鱼类浮游生物优势种多是凤鲚、白氏银汉鱼等中小型鱼类<sup>[48]</sup>。

本研究发现,长江淡水输入量的变化会对长江口海域鱼类浮游生物群落变化产生影响。近 30 年来淡水种只出现在 1999 年和 2016 年,据中国泥沙公报数据(<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb>)以及张晓晓等<sup>[49]</sup>的研究,2016 年年径流量明显比其他 3 个年份要大;尽管 1986 年、1999 年和 2007 年 3 年的年径流量相近,但 1999 年 5 月长江中下游降水偏多<sup>[50]</sup>,这导致长江口海域淡水输入量增加。Faria 等<sup>[51]</sup>在对瓜地亚纳(Guadiana)河口及其邻近海域鱼类浮游生物群落与环境因子关系的研究中同样发现径流对河口鱼类浮游生物有重要影响。

### 4.2 长江口海域河口生物完整性指数

鱼类浮游生物是河口生态系统的重要组成部分<sup>[52]</sup>。由于自身运动能力弱,鱼类浮游生物对环境扰动能够做出相对快速的响应<sup>[53]</sup>,故对环境变化敏感;另外,鱼类浮游生物既是主要的被捕食者,又是次级生产力的重要消费者,充当着生物量消费者和生物能量转换者的角色<sup>[54]</sup>,是长江口海域生态系统食物链中重要环节。因此鱼类浮游生物这一类群可以作为评价长江口海域生态系统健康状况的指示生物。

本研究选取鱼类浮游生物的物种组成、营养结

构、鱼类丰度和种群状况3大类属性指标,评价了近30年长江口海域鱼类浮游生物群落的生物完整性。研究发现,长江口海域的EBI等级发生了从“好”、“一般”、“一般-差”到“差”的变化,表明近30年长江口海域生态系统内鱼类浮游生物的生物完整性由好变差,也从一定程度上表明人类活动对长江口海域鱼类浮游生物群落的干扰在增强。EBI等级在1986年为“好”层次,表明当时长江口海域生态系统受到的人为干扰较少,鱼类浮游生物群落营养结构较平衡,低耐受性种类较多而天然杂交种较少,河口生物完整性程度较高;1999年以后,EBI等级稳定在“一般”到“差”层次,鱼类浮游生物种类数以及低耐污鱼种类数都出现一定程度的下降,高耐污鱼种类增加,生物完整性程度较差。从EBI评分可以看出,1986年到1999年之间EBI得分的降低,鱼类浮游生物种类结构的变化是主要原因,其中低耐污鱼种类数减少以及总种类数下降又是种类结构变化的主要原因,且物种总种类数下降是由低耐污鱼种类数的减少而造成的。研究发现,营养结构类型3个指标的值在4个时期中并没有太大变化,包含了海洋食物链中位于第二营养级的日本鳀、康氏小公鱼、细条天竺鲷和风鲚等;位于第三营养级的小黄鱼、黄姑鱼、鲷以及各种舌鲷等;位于第四营养级的龙头鱼、鲈鱼、蓝点马鲛、带鱼等<sup>[55]</sup>,反映出鱼类浮游生物群落营养结构保持稳定,群落生态功能可以维持正常运转。

#### 4.3 长江口海域生态系统健康状况的变化

鱼类浮游生物的生物完整性程度能够反映生态系统的健康状况<sup>[56]</sup>。本文EBI显示近30年来长江口海域生态系统健康状况由20世纪80年代中期“好”下降为21世纪初以来“差”。除了从EBI方面反映了近年来长江口海域生态系统健康状况变差外,许多研究者从其他角度对长江口生态系统健康状况进行了研究,同样发现近年长江口海域生态系统健康状况较差。在使用指标体系法评价长江口海域生态健康状况的研究中,周晓蔚等<sup>[57]</sup>使用压力-状态-响应指标结构模型发现1996—2005年这10年该海域都处在“亚健康-病态”状态。叶属峰等<sup>[58]</sup>通过物理化学指标、生态学指标和社会经济学指标3大类30个指标评价2002—2004年的生态系统健康状况,发现2002—2004年该海域总体上处于“亚健康”状态。众多使用渔业资源和生态环境数据,利用Ecopath模型探讨生态系统内部营养结构和能量流动的变化研究发现,2000—2016年长江口海域生态系统均处于“不成熟”的发展阶段,生态系统稳定性较低、抗干扰

能力弱,生态系统健康状况较差<sup>[59-61]</sup>。

长江口海域生态系统同时受到人类活动和自然状况变化的影响,生态系统健康状况的变化也受到多种因素的影响,包括渔业捕捞<sup>[29,62]</sup>、长江径流<sup>[63]</sup>、环境污染<sup>[64]</sup>、滩涂围垦<sup>[65]</sup>等。研究发现,长江口海域健康状况近30年的变化主要与渔业捕捞、环境污染、长江径流量等因素相关,它们降低了生态系统的稳定性,使生态系统可持续性减弱。中等捕捞强度会使鱼类多样性增加,但过高的捕捞强度又会使多样性下降<sup>[66]</sup>,根据东海区渔业统计年鉴对捕捞力量的统计结果:从1951年开始至2002年,东海区的捕捞力量呈现逐年增加的趋势,其中主要从80年代初期开始急剧增加<sup>[29]</sup>;此外,80年代对捕捞网具进行了改革,使捕捞网具对于鱼类更有针对性,且幼鱼的捕捞量急剧上升<sup>[62]</sup>。环境污染直接造成生物栖息地环境质量下降,严重威胁到许多物种的生存<sup>[67]</sup>。近30年来,长江口海域水体无机氮和活性磷酸盐的含量不断升高<sup>[27]</sup>,活性磷酸盐和无机氮含量在1987—2005年之间都出现了2次明显跃升,2005年以后保持高位震荡,水体富营养化程度较高;另外,有机污染物也不断增多,从1986年的115种增加到21世纪初的308种<sup>[68]</sup>。据大通站多年输沙量资料显示,长江入海口输沙量在20世纪50年代至2004年间急剧下降<sup>[22]</sup>,而后保持较低的输入量,输沙量的减少,使长江口海域海水的自净能力下降<sup>[69]</sup>,导致生态系统自我调节能力减弱。

## 5 结论

近30年来,长江口海域鱼类浮游生物群落结构发生了变化。鱼类浮游生物种类数在1986年较高,有16科29种,之后开始下降为1999年15科20种,2007年13科17种,2016年10科19种,整体呈现出由高变低,而后稳定在较低水平的趋势。

本研究中1986年、1999年、2007年以及2016年4个不同时期的EBI值分别为52、40、36、34,对应的EBI等级分别是“好”、“一般”、“一般-差”、“差”,表明1986年长江口海域生态系统受人类干扰少,鱼类浮游生物群落物种多样性丰富,生物完整性程度较高,生态系统稳定性高,自我恢复能力强,生态系统健康状况良好;进入21世纪后,自然因素和人类活动双重影响对长江口海域生态系统干扰的加重,使物种种类数和低耐污种数都出现一定程度的下降,生态系统健康状况变差。

EBI值能够反映长江口海域生态系统的健康状况,但今后仍需要对鱼类浮游生物进行更多的调查,

包括关注鱼类浮游生物物种、种群、群落的变化, 研究环境变化对鱼类浮游生物群落的影响, 以及探究鱼类浮游生物对环境变化的响应等, 进一步完善 EBI 评价指标体系, 使之能更精确评价长江口海域生态系统健康状况。

#### 参考文献:

- [1] Rapport D J, Thorpe C, Regier H A. Ecosystem medicine[J]. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 1979, 60(4): 180–182.
- [2] Costanza R, Mageau M. What is a healthy ecosystem?[J]. *Aquatic Ecology*, 1999, 33(1): 105–115.
- [3] 孙燕, 周杨明, 张秋文, 等. 生态系统健康: 理论/概念与评价方法[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 887–896.  
Sun Yan, Zhou Yangming, Zhang Qiuwen, et al. Ecosystem health: theory, concept and assessment methods[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 887–896.
- [4] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1191–1194.  
Tang Tao, Cai Qinghua, Liu Jiankang. River ecosystem health and its assessment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1191–1194.
- [5] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉, 等. 基于底栖动物完整性指数的河口健康评价[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 242–247.  
Zhou Xiaowei, Wang Liping, Zheng Binghui, et al. Estuary health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Yangtze estuary and its adjacent waters[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 242–247.
- [6] Xu F L, Dawson R W, Tao S, et al. A method for lake ecosystem health assessment: an Ecological Modeling Method (EMM) and its application[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 443(1/3): 159–175.
- [7] Mo M H, Wang X L, Wu H J, et al. Ecosystem health assessment of Honghu Lake Wetland of China using artificial neural network approach[J]. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(4): 349–356.
- [8] Zhu W T, Liu Y Y, Wang S T, et al. Development of microbial community-based index of biotic integrity to evaluate the wetland ecosystem health in Suzhou, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191: 377.
- [9] Xiao F J, Ou Y H, Zhang Q, et al. Forest ecosystem health assessment and analysis in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(1): 18–24.
- [10] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数[J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661–4672.  
Qu Xiaodong, Liu Zhigang, Zhang Yuan. Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the benthic-index of biotic integrity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4661–4672.
- [11] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21–27.
- [12] Karr J R, Dudley D R. Ecological perspective on water quality goals[J]. *Environmental Management*, 1981, 5(1): 55–68.
- [13] Deegan L A, Finn J T, Ayvazian S G, et al. Development and validation of an estuarine biotic integrity index[J]. *Estuaries*, 1997, 20(3): 601–617.
- [14] Hughes J E, Deegan L A, Weaver M J, et al. Regional application of an index of estuarine biotic integrity based on fish communities[J]. *Estuaries*, 2002, 25(2): 250–263.
- [15] Breine J J, Maes J, Quataert P, et al. A fish-based assessment tool for the ecological quality of the brackish Schelde estuary in Flanders (Belgium)[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 575(1): 141–159.
- [16] 刘守海, 张昊飞, 何彦龙, 等. 基于河口生物完整性指数评价上海周边海域健康状况的初步研究[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(8): 1494–1501.  
Liu Shouhai, Zhang Haofei, He Yanlong, et al. The preliminary study of ecosystem health assessment in shanghai adjacent waters, in China, based on estuarine biotic integrity index[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(8): 1494–1501.
- [17] Hua E, Zhang Z N, Zhou H, et al. Biodiversity of free-living marine nematodes in the Yangtze River estuary and its adjacent waters[J]. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 2014, 127(1): 23–34.
- [18] 李建生, 胡芬, 林楠. 长江口及邻近海域春季仔、稚鱼的生态分布研究[J]. *南方水产科学*, 2015, 11(1): 1–8.  
Li Jiansheng, Hu Fen, Lin Nan. Ecological distribution of fish larvae and juveniles in the Yangtze River estuary and its adjacent waters in spring[J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(1): 1–8.
- [19] 张继民, 刘霜, 唐伟, 等. 海洋生态脆弱性评估理论体系探析[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(8): 30–33.  
Zhang Jimin, Liu Shuang, Tang Wei, et al. Theoretical system of vulnerability assessment of marine ecosystem[J]. *Ocean Development and Management*, 2009, 26(8): 30–33.
- [20] Gao X L, Song J M, Li N, et al. Spatial distribution and diurnal variation of chemical oxygen demand at the beginning of the rainy season in the Changjiang (Yangtze) River Estuary[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2007, 25(3): 254–260.
- [21] An Q, Wu Y Q, Wang J H, et al. Assessment of dissolved heavy metal in the Yangtze River estuary and its adjacent sea, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 164(1/4): 173–187.
- [22] 杨颖, 徐韧. 近30 a来长江口海域生态环境状况变化趋势分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(10): 101–107.  
Yang Ying, Xu Ren. The environment variation trend in the Changjiang River estuary in the past 30 a[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(10): 101–107.

- [23] 王丽萍,周晓蔚,郑丙辉,等.长江口及毗邻海域沉积物生态环境质量评价[J].*生态学报*,2008,28(5):2191-2198.  
Wang Liping, Zhou Xiaowei, Zheng Binghui, et al. Sediments eco-environmental quality assessment in the Changjiang estuary and its adjacent waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2191-2198.
- [24] 滕德强,吕颂辉,郭福星,等.长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属分布和潜在生态危害评价[J].*海洋地质与第四纪地质*,2012,32(2):11-19.  
Teng Deqiang, Lü Songhui, Guo Fuxing, et al. Distribution pattern of heavy metals in surface sediments of the Yangtze estuary and adjacent areas and its ecological risk[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(2): 11-19.
- [25] 蒋玫,沈新强,陈莲芳.长江口及邻近水域春季鱼卵仔鱼分布与环境因子的关系[J].*海洋环境科学*,2006,25(2):37-39,44.  
Jiang Mei, Shen Xinqiang, Chen Lianfang. Relationship between with abundance distribution of fish eggs, larvae and environmental factors in the Changjiang estuary and vicinity waters in spring[J]. *Marine Environmental Science*, 2006, 25(2): 37-39, 44.
- [26] 蔡文倩,孟伟,刘录三,等.长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法[J].*环境科学*,2013,34(5):1725-1734.  
Cai Wenqian, Meng Wei, Liu Lusan, et al. Assessing the benthic ecological status in Yangtze River estuary using AMBI and M-AMBI[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(5): 1725-1734.
- [27] Jiang Z B, Liu J J, Chen J F, et al. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years[J]. *Water Research*, 2014, 54: 1-11.
- [28] Liu L, Zhou J, Zheng B H, et al. Temporal and spatial distribution of red tide outbreaks in the Yangtze River Estuary and adjacent waters, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 72(1): 213-221.
- [29] 李建生,李圣法,丁峰元,等.长江口近海鱼类多样性的年际变化[J].*中国水产科学*,2007,14(4):637-643.  
Li Jiansheng, Li Shengfa, Ding Fengyuan, et al. Analysis on annual change of fish diversity in Yangtze estuary offshore water area[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(4): 637-643.
- [30] 杨东莱,吴光宗,孙继仁.长江口及其邻近海区的浮性鱼卵和仔稚鱼的生态研究[J].*海洋与湖沼*,1990,21(4):346-355.  
Yang Donglai, Wu Guangzong, Sun Jiren. The investigation of pelagic eggs, larvae and juveniles of fishes at the mouth of the Changjiang River and adjacent areas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, 21(4): 346-355.
- [31] 朱鑫华,刘栋,沙学绅.长江口春季鱼类浮游生物群落结构与环境因子的关系[J].*海洋科学集刊*,2002,44:169-179.  
Zhu Xinhua, Liu Dong, Sha Xueshen. Relationship between community structure of ichthyoplankton and environmental factors in the estuary of Changjiang River in spring[J]. *Studia Marina Sinica*, 2002, 44: 169-179.
- [32] 刘淑德,线薇薇.长江口及其邻近水域鱼类浮游生物群落的时空格局[J].*生物多样性*,2009,17(2):151-159.  
Liu Shude, Xian Weiwei. Temporal and spatial patterns of the ichthyoplankton community in the Yangtze estuary and its adjacent waters[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(2): 151-159.
- [33] 伍汉霖,邵广昭,赖春福,等.拉汉世界鱼类名典[M].基隆:水产出版社,1999.  
Wu Hanlin, Shao Guangzhao, Lai Chunfu, et al. Latin-Chinese Dictionary of Fishes Names[M]. Keelung: The Shuichan Press, 1999.
- [34] 倪勇,伍汉霖.江苏鱼类志[M].北京:中国农业出版社,2006.  
Ni Yong, Wu Hanlin. Fishes of Jiangsu Province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [35] 丁月旻,线薇薇.秋季长江口鱼类浮游生物群落时空结构[J].*中国海洋大学学报(自然科学版)*,2011,41(10):67-74.  
Ding Yuemin, Xian Weiwei. Temporal and spatial structure of ichthyoplankton assemblages in the Yangtze estuary during autumn[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(10): 67-74.
- [36] 肖欢欢,张崇良,徐宾铎,等.黄海中南部近岸海域春季鱼类浮游生物群落空间格局研究[J].*海洋学报*,2017,39(8):34-47.  
Xiao Huanhuan, Zhang Chongliang, Xu Binduo, et al. Spatial pattern of ichthyoplankton assemblage in the coastal waters of central and southern Yellow Sea in the spring[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(8): 34-47.
- [37] 程家骅,丁峰元,李圣法,等.夏季东海北部近海鱼类群落结构变化[J].*自然资源学报*,2006,21(5):775-781.  
Cheng Jiahua, Ding Fengyuan, Li Shengfa, et al. Changes of fish community structure in the coastal zone of the northern part of East China Sea in Summer[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 775-781.
- [38] Drake P, Arias A M. Composition and seasonal fluctuations of the ichthyoplankton community in a shallow tidal channel of Cádiz Bay (S. W. Spain)[J]. *Journal of Fish Biology*, 1991, 39(2): 245-263.
- [39] Whitfield A K. Fishes and the environmental status of South African estuaries[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 1996, 3(1): 45-57.
- [40] Monteleone D M. Seasonality and abundance of ichthyoplankton in Great South Bay, New York[J]. *Estuaries*, 1992, 15(2): 230-238.
- [41] Strydom N A, Whitfield A K, Wooldridge T H. The role of estuarine type in characterizing early stage fish assemblages in warm temperate estuaries, South Africa[J]. *African Zoology*, 2003, 38(1): 29-43.
- [42] 罗秉征.河口及近海的生态特点与渔业资源[J].*长江流域资源与环境*,1992,1(1):24-30.  
Luo Bingzheng. Ecological characteristics and fishery resources of the Yangtze River Estuary and adjacent sea[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1992, 1(1): 24-30.
- [43] 单秀娟,线薇薇,武云飞.三峡工程蓄水前后秋季长江口鱼类浮游生物群落结构的动态变化初探[J].*中国海洋大学学报*,2005,35(6):936-940.  
Shan Xiujian, Xian Weiwei, Wu Yunfei. Dynamic changes in the ichthyoplankton community structure after the sluice of the Three-Gorges Dam[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(6): 936-940.

- [44] 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 Tao, Zhuang Ping, Zhang Longzhen, 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.
- [45] 沈新强, 史赟荣, 晁敏, 等. 长江口鱼类群落分类学多样性变动的分析[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(4): 1-7.  
Shen Xinqiang, Shi Yunrong, Chao Min, et al. Analysis of taxonomic diversity of fish community in Yangtze River estuary[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(4): 1-7.
- [46] 康斌. 鲮对生源要素循环的作用及长江河口渔业资源现状[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.  
Kang Bin. Effects of *Liza haematocheila* T. & S on nutritional elements cycle and the fisheries resources in the Yangtze estuary[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [47] 史赟荣, 晁敏, 全为民, 等. 2010年春季长江口鱼类群落空间分布特征[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1141-1151.  
Shi Yunrong, Chao Min, Quan Weimin, et al. Spatial variation in fish community of Yangtze River estuary in spring[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1141-1151.
- [48] 刘淑德, 线薇薇. 三峡水库蓄水前后春季长江口鱼类浮游生物群落结构特征[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 82-87.  
Liu Shude, Xian Weiwei. Ichthyoplankton community structure characteristics during spring in Yangtze River estuary before and after impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10): 82-87.
- [49] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 1950-2005年大通河流域径流变化特征及影响因素[J]. 水文, 2013, 33(6): 90-96.  
Zhang Xiaoxiao, Zhang Yu, Xu Haojie. Variation characteristics of runoff and its driving forces in Datong river basin from 1950 to 2005[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(6): 90-96.
- [50] 陈秀凤. 长江中下游出现强降雨局地遭冰雹龙卷风袭击-1999年5月[J]. 气象, 1999, 25(8): 58-61.  
Chen Xiufeng. Hailstones and tornadoes hit areas with heavy rain in the middle and lower reaches of the Yangtze River in May 1999[J]. Meteorological Monthly, 1999, 25(8): 58-61.
- [51] Faria A, Morais P, Chicharo M A. Ichthyoplankton dynamics in the Guadiana estuary and adjacent coastal area, South-East Portugal[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2006, 70(1/2): 85-97.
- [52] 刘淑德, 线薇薇, 刘栋. 春季长江口及其邻近海域鱼类浮游生物群落特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2284-2292.  
Liu Shude, Xian Weiwei, Liu Dong. Characteristics of ichthyoplankton assemblages in Yangtze estuary and adjacent waters in spring[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2284-2292.
- [53] Duffy-Anderson J T, Busby M S, Mier K L, et al. Spatial and temporal patterns in summer ichthyoplankton assemblages on the eastern Bering Sea shelf 1996-2000[J]. Fisheries Oceanography, 2006, 15(1): 80-94.
- [54] 万瑞景, 姜言伟. 渤、黄海硬骨鱼类鱼卵与仔稚鱼种类组成及其生物学特征[J]. 上海水产大学学报, 2000, 9(4): 290-297.  
Wan Ruijing, Jiang Yanwei. The species and biological characteristics of the eggs and larvae of osteichthyes in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2000, 9(4): 290-297.
- [55] 罗秉征, 韦晟, 窦硕增. 长江口鱼类食物网与营养结构的研究[J]. 海洋科学集刊, 1997, 38(1): 143-153.  
Luo Bingzheng, Wei Sheng, Dou Shuozen. Study on food web and trophic structure of fish in the Changjiang River estuary[J]. Studia Marina Sinica, 1997, 38(1): 143-153.
- [56] Karr J R, Fausch K D, Angermeier P, et al. Assessing Biological Integrity in Running Waters: A Method and its Rationale[M]. Chicago: Illinois Natural History Survey Special Publication, 1986, 5: 1-28.
- [57] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉. 长江口及毗邻海域生态系统健康评价研究[J]. 水利学报, 2011, 42(10): 1201-1208, 1217.  
Zhou Xiaowei, Wang Liping, Zheng Binghui. Ecosystem health assessment for the Changjiang River Estuary and its adjacent sea area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10): 1201-1208, 1217.
- [58] 叶属峰, 刘星, 丁德文. 长江河口海域生态系统健康评价指标体系及其初步评价[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 128-136.  
Ye Shufeng, Liu Xing, Ding Dewen. Ecosystem health assessment of the Changjiang River Estuary: indicator system and its primary assessment[J]. Haiyang Xuebao, 2007, 29(4): 128-136.
- [59] 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[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 28-36.  
Lin Qun, Jin Xianshi, Guo Xuewu, 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.
- [60] 韩瑞, 陈求稳, 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 Rui, Chen Qiwen, Wang Li, 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.
- [61] 徐超, 王思凯, 赵峰, 等. 基于Ecopath模型的长江口生态系统营养结构和能量流动研究[J]. 海洋渔业, 2018, 40(3): 309-318.  
Xu Chao, Wang Sikai, Zhao Feng, et al. Trophic structure and energy flow of the Yangtze Estuary ecosystem based on the analysis with Ecopath model[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(3): 309-318.
- [62] 黄晋彪, 张雪生. 长江口刀鲚资源试析[J]. 水产科技情报, 1989(6): 173-175.  
Huang Jinbiao, Zhang Xuesheng. Analysis of *Coilia ectense* resources in Changjiang Estuary[J]. Fisheries Science & Technology Information, 1989(6): 173-175.

- [63] 刘录三, 郑丙辉, 李宝泉, 等. 长江口大型底栖动物群落的演变过程及原因探讨[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 134–145.  
Liu Lusan, Zheng Binghui, Li Baoquan, et al. Long-term trends of macrobenthos in Changjiang Estuary, China in relation to environmental changes[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(3): 134–145.
- [64] 王金辉, 黄秀清, 刘阿成, 等. 长江口及邻近水域的生物多样性变化趋势分析[J]. 海洋通报, 2004, 23(1): 32–39.  
Wang Jinhui, Huang Xiuqing, Liu Acheng, et al. Tendency of the biodiversity variation nearby Changjiang Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(1): 32–39.
- [65] 杜景龙, 杨世伦, 陈广平. 30多年来人类活动对长江三角洲前缘滩涂冲淤演变的影响[J]. 海洋通报, 2013, 32(3): 296–302.  
Du Jinglong, Yang Shilun, Chen Guangping. Influence of human activities on the evolution of the tidal flat of Yangtze River delta front during the last 30 years[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(3): 296–302.
- [66] Washington H G. Diversity, biotic and similarity indices: A review with special relevance to aquatic ecosystems[J]. Water Research, 1984, 18(6): 653–694.
- [67] 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 等. 生物多样性丧失机制研究进展[J]. 科学通报, 2014, 59(6): 430–437.  
Wei Fuwen, Nie Yonggang, Miao Haixia, et al. Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(6): 430–437.
- [68] 孔定江, 李道季, 吴莹. 近50年长江口的主要有机污染的记录[J]. 海洋湖沼通报, 2007(2): 94–103.  
Kong Dingjiang, Li Daoji, Wu Ying. Evolution of organic pollution in the Changjiang River estuary in the past fifty years[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007(2): 94–103.
- [69] 单秀娟, 钱薇薇, 武云飞. 长江河口生态系统鱼类浮游生物生态学研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2004(4): 87–93.  
Shan Xiujuan, Qian Weiwei, Wu Yunfei. Progress of studies on ichthyoplankton ecology of Changjiang River estuary[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2004(4): 87–93.

## Study on ecosystem health and variation trend at the Changjiang River Estuary in the past 30 years

Chen Yaohui<sup>1,2</sup>, Liu Shouhai<sup>2,3</sup>, He Yanlong<sup>2,3</sup>, Qin Yutao<sup>2,3</sup>, Ji Xiao<sup>2,3</sup>, Zhang Haofei<sup>2,3</sup>, Xu Ren<sup>4</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technology, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201206, China; 3. East China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Shanghai 201206, China; 4. Polar Research Institute, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200136, China)

**Abstract:** In order to assess the health status of ecosystem on the Changjiang River Estuary waters, the ichthyoplankton is used to be indicators. Selecting 10 evaluation indices, which are the total number of ichthyoplankton species, number of benthic species, number of column species, number of intolerant species, proportion of tolerant species, proportion of omnivores, proportion of insectivorous, proportion of carnivores, number of individuals in each sample, proportion of hybrid. This study calculates the estuarine biotic integrity index (EBI) value of the 1986, 1999, 2007 and 2016 by using 1, 3, and 5 approximation of value assignment, and assesses the change trend of the ecosystem health in the Changjiang River Estuary water in recent 30 years. The results show that in 1986, 1999, 2007 and 2016, the EBI values were 52, 40, 36 and 34, respectively, and the corresponding EBI levels were “good”, “fair”, “fair-poor” and “poor”, respectively. By analyzing the results of EBI annual changes, it was found that the health status of ecosystem in the Changjiang River Estuary in recent 30 years showed a trend of declining first and then maintaining at a low level, indicating that the ecosystem of the Changjiang River Estuary waters is urgent to carry out timely protection and restoration.

**Key words:** ecosystem health; ichthyoplankton; the estuarine biotic integrity index; interannual variability