

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17277

人类活动对大亚湾海域鱼类群落多样性及其演替的影响

郭建忠^{1,2}, 陈作志¹, 许友伟¹, 徐姗姗¹, 黄梓荣¹, 李纯厚¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300;

2. 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海海洋大学, 上海 201306

摘要: 根据 2015—2016 年间对大亚湾海域进行的 4 个航次底拖网调查数据, 分析了大亚湾鱼类群落的种类组成和多样性特征。结果表明, 调查共采集到鱼类 131 种, 隶属 14 目、53 科、84 属。其中以鲈形目(Perciformes)占绝对优势(54.20%), 其次是鳗鲡目(Agunilliformes)和鲹形目(Pleuronectiformes), 均占 9.92%。种类数具明显季节变化, 以夏季最高, 69 种; 春季最低, 32 种。鱼类群落优势种组成主要以二长棘犁齿鲷(*Evynnis cardinalis*)、李氏鲷(*Calionymus richardsoni*)、斑鲷(*Clupanodon punctatus*)、竹荚鱼(*Trachurus japonicus*)、黄鳍马面鲀(*Thamnaconus hypargyreus*)、短吻鲷(*Leiognathus brevirostris*)和细条天竺鲷(*Apogon lineatus*)等小型鱼类为主。多样性分析显示, 鱼类物种多样性存在明显的季节差异和空间差异。季节变化上, 多样性指数(H')季节变化范围为 1.516~1.998, 以冬季最高, 秋季最低; 均匀度指数(J')季节变化范围为 0.494~0.869, 以冬季最高, 夏季最低; 丰富度指数(D')季节变化范围为 2.230~3.777, 以夏季最高, 秋季最低。典范对应分析表明, 温度、盐度和水深是影响大亚湾海域鱼类群落结构的主要环境因子。空间分布上, 海湾中部海域鱼类多样性水平高于沿岸海域。与历史资料相比, 由于人类活动对大亚湾生态系统的干扰, 鱼类群落结构发生了较大变化, 优势种组成更替明显, 多样性水平降低, 鱼类群落结构趋向简单化。

关键词: 大亚湾; 鱼类组成; 多样性; 优势种; 季节更替; 人类活动

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)03-0595-13

大亚湾地处广东省惠州市东南, 在惠东县、惠阳区和深圳市之间, 东靠红海湾, 西邻大鹏湾, 濒临南海, 为三面环山的半封闭海湾, 总面积 600 km²。湾内多岛礁、小湾和海港, 生境多样, 自然环境优越且生物资源丰富, 历年平均气温为 21.8℃, 是华南沿海渔业资源重要的种苗繁衍场所^[1], 是我国多种经济鱼类生长发育的优良场所和重要鱼类物种种质资源库^[2], 1983 年设立自然保护区, 1984 年广东省又将大亚湾列为重点经济开发区^[3]。在过去的 30 年间, 海域周边地区经济迅速发展, 大亚湾海域生态环境相应受到影响^[4-5],

鱼类群落的生境受到严重破坏^[6-8], 鱼类群落生态特征也在逐步发生变化^[9]。

对大亚湾海域鱼类群落的研究, 20 世纪 80 年代至今已有多篇报道, 主要集中在鱼类群落的生物学^[10-11]、生态系统^[12]、多样性^[9, 13-14]和群落格局^[15]等研究。本研究根据 2015—2016 年的调查资料, 对大亚湾海域鱼类群落的种类组成和物种多样性进行了研究; 并结合历史资料, 对比分析了 20 世纪 80 年代以来大亚湾鱼类种类组成、多样性及其群落演替的变化特征, 以此来研究人类活动对大亚湾海域鱼类群落多样性及其演替的影响,

收稿日期: 2017-07-20; 修订日期: 2017-08-28.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452904); 广东省自然科学基金项目(2015A030313785); 公益性行业(农业)科研专项(201403008); 国家自然科学基金项目(31100362).

作者简介: 郭建忠(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋生物学研究. E-mail: 1115982121@qq.com

通信作者: 徐姗姗, 博士, 副研究员. E-mail: xushannan@scsfri.ac.cn

旨在为大亚湾海域鱼类物种多样性的保护及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查站位与样品采集

分别于 2015 年 8 月(夏季)、2015 年 12 月(冬季)、2016 年 3 月(春季)和 2016 年 11 月(秋季)在大亚湾海域进行 4 个航次的海洋渔业资源调查。结合海湾的地理形状、海湾利用的现状,选取春季 12 个(S1-S13, 无 S7)、夏季 11 个(S1-S13, 无 S3 和 S7)、秋季 12 个(S1-S13, 无 S7)和冬季 12 个(S1-S13, 无 S3)拖网作业站位进行渔业资源现状调查,其中,为了研究鱼类群落多样性的空间特征,在湾沿岸设置了 7 个站点,分别为 S1, S2, S3, S4, S7, S8, S11; 在湾中部设置了 4 个站点,分别为 S4, S5, S9, S10; 湾口设置 2 个站点, S12 和 S13(图 1)。海洋生态环境、渔业资源现场调查和实验室分析测试等均按《海洋监测规范》(GB-17378-2007)、《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)和《近岸海域环境监测规范》(HJ442-2008)执行,渔业资源按照《海洋渔业资源调查规范》(SC/T 9403-2012)来进行调查。调查船为钢质渔船,功率 135 kW, 取样网具为单船有翼单囊底层拖网,网口周长 102 m, 网衣全长 50 m, 上纲长 51 m, 下纲长 51 m, 网囊网目尺寸 2 cm, 每站拖网 1 h, 拖速 3.4 节, 白天作业。渔获样品在现场进行分类鉴定,并对各个生物种类进行渔业生物学测定。

1.2 渔获物鉴定

按照《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)规范要求,渔获物的种类鉴定与分类标准依据 Nelson^[16]、李明德^[17]和刘瑞玉^[18]的分类系统进行分类,之后进行生物学测定。

1.3 研究方法

鱼类物种的生态优势度用 Pinkas 等^[19]提出的相对重要性指数(Index of Relative Importance, IRI)来评价,包括 3 个重要参数: 鱼类物种个体数(N)、生物量(W)以及出现的频率(F):

$$IRI = (N + W) \times F \quad (1)$$

式中, N 为某一鱼类物种的尾数占捕获总尾数的百分比, W 为某一鱼类物种的重量占捕获总重量

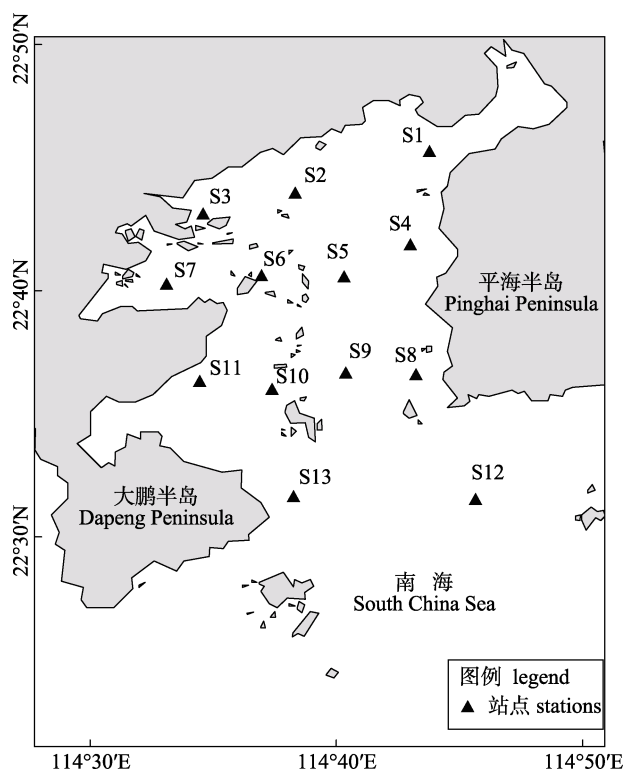


图 1 大亚湾海域采样站位示意图

Fig. 1 Map of sampling stations in the Daya Bay

的百分比, F 为某一鱼类物种的出现的站数占总调查站数的百分比。

相对重要性指数(IRI)等级划分采用王雪辉等^[9]提出的划分依据: $IRI > 1000$ 为优势种; $100 < IRI < 1000$ 为重要种; $10 < IRI < 100$ 为常见种, $1 < IRI < 10$ 为一般种, $IRI < 1$ 为少有种。

鱼类生物多样性分析指标由 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D')和 Pielou 均匀度指数(J')来评价^[20-21]。为了不受鱼类种间、种内个体差异的影响,计算结果更易接近种类间能量分布, Wilhm^[22]提出用生物量取代个体数来计算鱼类物种多样性的方法

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{W_i}{W} \right) \ln \left(\frac{W_i}{W} \right) \quad (2)$$

$$J' = \frac{H'}{H_{\max}} \quad H_{\max} = \ln S \quad (3)$$

$$D' = \frac{S-1}{\ln S} \quad (4)$$

式中, S 为站点的种类数, W 为某一渔获种类的总生物量, W_i 为第 i 站某一渔获种类的生物量, N 为站点所有物种的个体数量。

鱼类群落稳定性采用季节更替指数(seasonal dynamics of replacement index, AI)和迁移指数(Migretory Index, MI)来分析^[9]:

$$AI = \frac{C + D}{A - R} \times 100 \tag{5}$$

$$MI = \frac{C - D}{A - R} \times 100 \tag{6}$$

式中, C 为每个季节新迁入的种类数, D 为每个季节迁出的种类数, A 为每个季节出现的种类数, R 为 4 个季节都出现的种类数。

各季节鱼类物种间优势种的更替采用优势种更替率 R 来表示^[23]; 各季节鱼类物种相似性指数用 Jaccard 相似性指数 J_s 表示^[24]:

$$R = \frac{a + b - 2c}{a + b - c} \times 100\% \tag{7}$$

$$J_s = \frac{c}{a + b - c} \tag{8}$$

式中, a 、 b 分别为相邻季节的优势种数, c 为其共有优势种数。

1.4 环境因子测量

现场监测采样按《海洋监测规范》(GB-17378.5-2007)进行, 通过船载探测仪测得每个站点的水深; 通过 YSI Pro Series 型多功能水质仪采集样品时测量海水环境指标: 盐度、表底层水温、溶解氧(DO)和酸碱度(pH)等物理环境数据。

1.5 数据处理

由于调查方法与以往年份相同, 网具参数与以往基本一致, 只是拖网时间与本次略有所差异, 为了尽量降低误差, 故将所有年份每站位拖网时间均换算为 1 h, 调查数据经标准化校正后, 用 ArcGis10.3 软件和 SPSS19.0 统计分析软件进行数据处理分析, 典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)应用 CANOCO 4.5 软件进行, 排序结果用物种-环境因子关系的双序图来表示。

2 结果与分析

2.1 种类组成

4 次调查共鉴定出鱼类 131 种, 分别隶属 14 目、53 科、84 属, 均属于硬骨鱼纲鱼类。其中, 鲈形目(Perciformes)占绝对优势, 有 71 种, 隶属 23 科 40 属, 占鱼类总物种数的 54.20%; 其次是鳗鲡目(Anguilliformes)和鲹形目(Pleuronectiformes),

均有 13 种, 占鱼类总物种数的 9.92%, 其中, 鳗鲡目有 5 科 7 属, 鲹形目有 4 科 8 属; 其他 11 个目的种类数均少于 10 种, 科、属和种所占比例较低(表 1)。

表 1 大亚湾海域鱼类种、科和属的组成比例
Tab. 1 Compositions of species, family, and genus of fishes in the Daya Bay %

目 order	种 species	科 family	属 genus
鲈形目 Perciformes	54.20	43.40	47.62
鳗鲡目 Anguilliformes	9.92	9.43	8.33
鲹形目 Leuronectiformes	9.92	7.55	9.52
鲉形目 Scorpaeniformes	6.87	5.66	5.95
鲷形目 Tetraodontiformes	4.58	5.66	7.14
鲱形目 Clupeiformes	3.82	5.66	5.95
灯笼鱼目 Myctophiformes	3.05	5.66	4.76
刺鱼目 Gasterosteiformes	2.29	3.77	2.38
鲻形目 Mugiliformes	1.53	3.77	2.38
鲇形目 Siluriforme	0.76	1.89	1.19
鲑形目 Salmoniformes	0.76	1.89	1.19
海龙目 Gasterosteiformes	0.76	1.89	1.19
鲇形目 Siluriformes	0.76	1.89	1.19
鲤形目 Cypriniformes	0.76	1.89	1.19

4 个季节的调查显示, 大亚湾海域鱼类群落组成以硬骨鱼类为主, 鲈形目是其主要类群(71 种), 占种类总数的 54.20%, 其次是鳗鲡目(13 种)和鲹形目(13 种), 各占种类总数的 9.92%。全年 4 个季节都出现的鱼类物种有 3 种, 占种类总数的 2.29%, 分别为卵鳎(*Solea ovata*)、皮氏叫姑鱼(*Johnius belengeri*)和拟矛尾虾虎鱼(*Parachanna polynema*); 3 个季节出现的鱼类物种有 8 种, 占种类总数的 6.11%, 分别为短吻鲷(*Leiognathus brevirostris*)、李氏鳅(*Callionymus richardsoni*)、斑鲷(*Clupanodon punctatus*)、红狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus rubicundus*)、斑鳍白姑鱼(*Argyrosomus pawak*)、矛尾虾虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*)、长丝虾虎鱼(*Cryptocentrus filifer*)和孔虾虎鱼(*Trypauchen vagina*)。鱼类物种组成存在差异, 目、科、属三级水平夏季均最高, 其他三季相差不大, 其中夏季物种最多, 隶属 12 目 41 科 54 属 69 种; 春季物种最少, 隶属 8 目 24 科 30 属 32 种, 如表 2。

表 2 大亚湾海域各季节间鱼类物种分类单元的组成比例
Tab. 2 The proportion of fish species classification units in the Daya Bay by seasons

	目 order		科 family		属 genus		种 species	
	数量 number	百分比/% percentage	数量 number	百分比/% percentage	数量 number	百分比/% percentage	数量 number	百分比/% percentage
春季 spring	8	53.33	24	45.28	30	35.71	32	24.43
夏季 summer	12	80.00	41	77.36	54	64.29	69	52.67
秋季 autumn	9	60.00	27	50.94	35	41.67	41	31.30
冬季 winter	8	53.33	25	47.17	34	40.48	42	32.06
全年 annual	14		53		84		131	

2.2 鱼类群落组成种类优势度

根据 4 次调查结果,运用相对重要性指数(Index of Relative Importance, IRI)来度量大亚湾海域鱼类群落的优势度(表 3)。

春季,共采集到鱼类种类 32 种,其中优势种有 4 种,分别为二长棘犁齿鲷(*Evynnis cardinalis*)、李氏鲷、斑鲷和竹荚鱼(*Trachurus japonicus*),占总种类数的 12.50%;重要种有 10 种,分别为绿斑细棘虾虎鱼(*Acentrogobius chlorostigmatoides*)、圆鳞斑鲆(*Pseudorhombus levisquamis*)、蓑鲉(*Lionfish*)、长丝虾虎鱼、金钱鱼(*Scatophagus argus*)、矛尾虾虎鱼、卵鲷、皮氏叫姑鱼、长棘鲷(*Leiognathus fasciatus*)和斑纹舌虾虎鱼(*Glossogobius olivaceus*),占总种类数的 31.25%;常见种有 8 种,占总种类数的 25%;一般种有 10 种,占总种类数的 31.25%。

夏季,共采集到鱼类种类 69 种,其中优势种有 3 种,分别为黄鳍马面鲀(*Thamnaconus hypargyreus*)、短吻鲷和细条天竺鲷(*Apogon lineatus*),占总种类数的 4.35%;重要种有 11 种,分别为南方鲷(*Callionymus meridionalis*)、二长棘犁齿鲷、眼瓣沟虾虎鱼(*Oxyurichthys ophthalmonema*)、犬牙细棘虾虎鱼(*Acentrogobius caninus*)、金线鱼(*Nemipterus virgatus*)、黄斑蓝子鱼(*Siganus oramin*)、巴布亚沟虾虎鱼(*Oxyurichthys papuensis*)、六指马鲛(*Polydactylus sexfilis*)、拟矛尾虾虎鱼、少鳞鲳(*Sillago japonica*)和细条天竺鱼(*Apogonichthys lineatus*),占总种类数的 15.94%;常见种 24 种,占总种类数的 34.78%;一般种 21 种,占总种类数的 30.43%;少见种 10 种,占总种类数的 14.50%。

秋季,共采集到鱼类种类 41 种,优势种 1 种为短吻鲷,占总种类数的 2.44%;重要种有 7 种,分别为拟矛尾虾虎鱼、龙头鱼(*Harpodon neherus*)、斑鳍白姑鱼、李氏鲷、矛尾虾虎鱼、勒氏短须石首鱼(*Umbrina russelli*)和基岛鲷(*Callionymus kaianus*),占总种类数的 17.07%;常见种 16 种,占总种类数的 39.02%;一般种 17 种,占总种类数的 41.47%。

冬季,共采集到鱼类种类 42 种,优势种 1 种为短吻鲷,占总种类数的 2.38%;重要种有 14 种,分别为勒氏短须石首鱼、少鳞鲳、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)、金线鱼、黑边天竺鱼(*Apogonichthys ellioti*)、拟矛尾虾虎鱼、皮氏叫姑鱼、李氏鲷、眼瓣沟虾虎鱼、白姑鱼(*Argyrosomus argentatus*)、红狼牙虾虎鱼、鹿斑鲷(*Leiognathus ruconius*)、双带天竺鲷(*Apogon taeniatus*)和斑鲷,占总种类数的 33.33%;常见种 13 种,占总种类数的 30.95%;一般种 14 种,占总种类数的 33.34%。

2.3 物种多样性

多样性调查结果显示,多样性指数(H')季节变化范围为 1.516~1.998,以冬季最高,秋季最低;均匀度指数(J')季节变化范围为 0.494~0.869,以冬季最高,夏季最低;丰富度指数(D')季节变化范围为 2.230~3.777,以夏季最高,秋季最低(表 4)。各季节间鱼类物种相似性指数 J_s 的变化范围为 0.100~0.177,以春-秋季最大,夏-秋季最小,即:春、秋季鱼类的相似性最高,夏、秋季鱼类的相似性最低(表 5)。季节更替指数 AI 变化范围为 31.82~75.86,以春季最高,夏季最低。迁移指数 MI 变化范围为-2.63~1.52,以夏季最高,秋季最低。AI 和 MI 趋势走向大致相反(图 2)。

表 3 大亚湾海域各季节鱼类主要物种的相对重要性指数(IRI)
Tab. 3 Indices of relative importance (IRI) of fish species in the Daya Bay by seasons

春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
种名 specie	IRI	种名 specie	IRI	种名 specie	IRI	种名 specie	IRI
二长棘犁齿鲷	6475	黄鳍马面鲀	9108	短吻鲷	9557	短吻鲷	1421
<i>Eyynn timer</i>		<i>Thamnerconus hypargyreus</i>		<i>Leioenathus brevirostris</i>		<i>Leioenathus brevirostris</i>	
李氏鲷	1474	短吻鲷	1878	拟矛尾虾虎鱼	568	勒氏短须石首鱼	871
<i>Callionymus richardsoni</i>		<i>Leioenathus brevirostris</i>		<i>Parachaeturichthys polynema</i>		<i>Umbrina russelli</i>	
斑鲷	1210	细条天竺鲷	1047	龙头鱼	421	少鳞鲷	607
<i>Clupanodon punctatus</i>		<i>Apogon lineatus</i>		<i>Harpodon nehereus</i>		<i>Sillago japonica</i>	
竹荚鱼	1151	南方鲷	842	斑鳍白姑鱼	357	黑鲷	596
<i>Trachurus japonicus</i>		<i>Callionymus meridionalis</i>		<i>Argyrosomus pawak</i>		<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	
绿斑细棘虾虎鱼	630	二长棘犁齿鲷	531	李氏鲷	288	金线鱼	406
<i>Acentrogobius chlorostigmatoides</i>		<i>Eyynn timer</i>		<i>Callionymus koreanus</i>		<i>Nemipteras virgatus</i>	
圆鳞斑鲆	492	眼瓣沟虾虎鱼	340	矛尾虾虎鱼	213	黑边天竺鱼	375
<i>Pseudorhombus levisquamis</i>		<i>Oxyurichthys ophthalmonema</i>		<i>Chaeturichthys stigmatias</i>		<i>Apogonichthys ellioti</i>	
蓑鲉	487	犬牙细棘虾虎鱼	251	勒氏短须石首鱼	156	拟矛尾虾虎鱼	324
<i>Pterios volitans</i>		<i>Acentrogobius caninus</i>		<i>Umbrina russelli</i>		<i>Parachaeturichthys polynema</i>	
长丝虾虎鱼	367	金线鱼	193	基岛鲷	137	皮氏叫姑鱼	306
<i>Cryptocentrus filifer</i>		<i>Nemipteras virgatus</i>		<i>Callionymus kaianus</i>		<i>Johnius belengeri</i>	
金钱鱼	278	黄斑蓝子鱼	173			眼瓣沟虾虎鱼	255
<i>Scatophagus argus</i>		<i>Siganus oramin</i>				<i>Oxyurichthys ophthalmonema</i>	
矛尾虾虎鱼	184	巴布亚沟虾虎鱼	163			李氏鲷	249
<i>Chaeturichthys stigmatias</i>		<i>Oxyurichthys papuensis</i>				<i>Callionymus koreanus</i>	
卵鲷	158	六指马鲛	163			白姑鱼	163
<i>Solea ovata</i>		<i>Polydactylus sexfilis</i>				<i>Argyrosomus argentatus</i>	
皮氏叫姑鱼	139	拟矛尾虾虎鱼	159			红狼牙虾虎鱼	158
<i>Johnius belengeri</i>		<i>Parachaeturichthys polynema</i>				<i>Odontamblyopus rubicundus</i>	
长棘鲷	132	少鳞鲷	112			鹿斑鲷	134
<i>Leioenathus fasciatus</i>		<i>Sillago japonica</i>				<i>Leioenathus ruconius</i>	
斑纹舌虾虎鱼	113	细条天竺鲷	102			双带天竺鲷	122
<i>Glossogobius oliyaceus</i>		<i>Apogonichthys lineatus</i>				<i>Apogon taeniatus</i>	
						斑鲷 <i>Clupanodon punctatus</i>	105

表 4 大亚湾海域鱼类物种多样性的季节变化
Tab. 4 Seasonal variation of biodiversity indices of fish species in the Daya Bay

季节 season	种类数 species	多样性指数 H'	均匀度指数 J'	丰富度指数 D'
春季 spring	32	1.541	0.655	2.335
夏季 summer	69	1.523	0.494	3.777
秋季 autumn	41	1.516	0.687	2.230
冬季 winter	42	1.998	0.869	2.919

从空间分布来看,各站位于鱼类物种年均多样性指数 H' 范围为 1.29~1.91。 H' 值最高的 3 个站是湾口的 S13 站和海湾中部的 S5、S6 站,分别为

1.91、1.90、1.83; H' 值最低的 3 个站是近岸的 S1、S2 和 S8 站,分别是 1.29、1.57、1.37。年均均匀度指数 J' 范围为 0.59~0.76。S5、S6、S9、S12 和

表 5 大亚湾海域各季节间鱼类物种相似性指数(J_s)
Tab. 5 Jaccard similarity index (J_s) of fish species among seasons in the Daya Bay

季节 season	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
春季 spring		0.122	0.177	0.175
夏季 summer			0.100	0.156
秋季 autumn				0.153
冬季 winter				

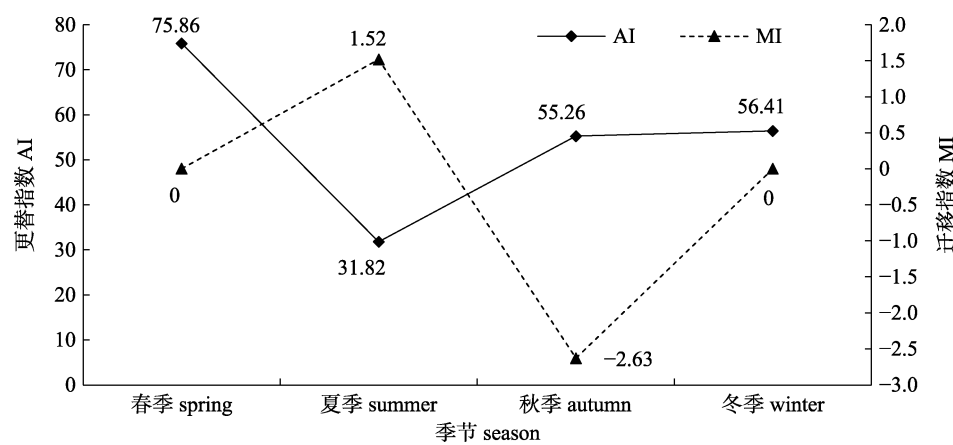


图 2 大亚湾海域鱼类群落更替指数和迁移指数的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of replacement index (AI) and migration index (MI) of fish community in the Daya Bay

S13 站均大于 0.70, 其余各站小于 0.70; J' 值最高的 3 个站是湾口 S13 站和海湾中部的 S5、S9 站, 分别为 0.76、0.76、0.75; J' 值最低的 3 个站是近岸的 S8、S1 和 S2 站, 分别是 0.59、0.59、0.63; 海湾中部均匀度水平高于近岸。年均丰富度指数 D' 范围为 2.19~3.59。 D' 值最高的 3 个站是海湾中部

的 S5、S6 站和湾口的 S13 站, 分别为 3.59、3.31、3.07; D' 值最低的 3 个站是近岸的 S1、S11 站和湾口的 S12 站, 分别为 2.19、2.65、2.47(表 6)。

2.4 环境因子的季节变化

本次调查表明, 大亚湾鱼类群落生存环境的主要因子存在明显的季节性特征。大亚湾海域水

表 6 大亚湾海域各站位鱼类群落多样性指数、均匀度指数和丰富度指数

Tab. 6 Diversity index, evenness index and richness index of fish communities of stations in Daya Bay

指数 index	时间 time	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
多样性指数 diversity index, H'	春季 spring	1.52	1.65	1.76	1.48	2.46	1.47	—	1.09	1.92	1.78	1.84	1.15	1.62
	夏季 summer	1.56	1.10	—	1.97	1.09	1.68	—	0.72	1.33	1.74	1.55	1.65	2.38
	秋季 autumn	0.70	1.53	1.06	1.66	1.72	2.14	—	2.28	1.67	1.43	0.90	1.66	1.45
	冬季 winter	1.74	2.22	—	2.08	2.34	2.03	1.49	1.38	2.30	1.77	2.56	1.91	2.18
	平均 average	1.38	1.62	—	1.80	1.90	1.83	—	1.37	1.80	1.68	1.71	1.59	1.91
均匀度指数 evenness index, J'	春季 spring	0.69	0.75	0.71	0.58	0.93	0.56	—	0.45	0.83	0.81	0.80	0.50	0.68
	夏季 summer	0.54	0.36	—	0.65	0.33	0.50	—	0.21	0.43	0.53	0.53	0.66	0.69
	秋季 autumn	0.36	0.64	0.44	0.80	0.83	0.86	—	0.92	0.80	0.56	0.43	0.80	0.81
	冬季 winter	0.89	0.84	—	0.84	0.94	0.97	0.62	0.77	0.92	0.85	0.92	0.98	0.88
	平均 average	0.62	0.65	—	0.72	0.76	0.72	—	0.59	0.75	0.69	0.67	0.74	0.76
丰富度指数 richness index, D'	春季 spring	1.68	2.11	2.58	2.76	3.86	3.19	—	1.96	2.42	2.10	1.90	1.98	2.40
	夏季 summer	3.72	3.33	—	3.76	4.45	4.33	—	4.49	3.21	4.03	2.58	2.70	4.95
	秋季 autumn	1.52	2.26	2.40	1.77	2.00	2.67	—	3.61	2.06	2.77	1.78	2.34	1.59
	冬季 winter	2.04	3.19	—	3.34	4.06	3.04	1.84	1.85	3.02	2.10	4.33	2.89	3.34
	平均 average	2.24	2.72	—	2.91	3.59	3.31	—	2.98	2.68	2.75	2.65	2.47	3.07

注: “—”表示未调查。
Note: “—” means no investigation.

温变化范围为 17.80~30.10℃, 年均值为 23.18℃, 其中, 夏季最高, 冬季最低; 水深变化范围为 2.86~19.50 m, 年均值为 9.57 m, 其中, 夏季最高, 春季最低; 盐度变化范围为 30.78~35.73, 年均值为 33.22, 其中, 夏季最高, 秋季最低; pH 变化范围为 6.62~8.71, 年均值为 7.96, 其中, 冬季最高, 秋季最低, 海水略呈弱碱性; 溶解氧(DO)变化范围为 4.10~13.23, 年均值为 6.82 mg/L, 其中, 春季最高, 秋季最低(表 7)。

2.5 典范对应分析

鱼类群落物种与环境因子的 CCA 排序结果表明(图 3), 各季节环境因子对鱼类群落结构的影响作用存在差异, 春季环境因子的重要性依次为盐度、水深、DO、pH 和温度; 夏季为水深、盐度、温度、pH 和 DO; 秋季为水深、DO、温度、盐度和 pH; 冬季为温度、水深、DO、盐度和 pH。从整体来看, 温度、盐度和水深是影响大亚湾海域鱼类群落结构的主要环境因子。其中, 春季, 与第 1 排序轴呈正相关的环境因子为溶解氧(DO)和温度, 呈负相关的环境因子为盐度、水深和 pH; 与第 2 排序轴呈最大正相关和负相关的环境因子分别为 DO 和盐度。夏季, 与第 1 排序轴呈正相关的环境因子为温度、盐度和水深, 呈负相关的环境因子为 DO 和 pH; 与第 2 排序轴呈最大正相关和负相关的环境因子分别为水深和 pH。秋季, 5 个因子均与两个排序轴呈正相关。冬季, 与第 1 排序轴呈正相关的环境因子为 DO、pH 和盐度, 呈负相关的环境因子是温度和水深; 与第 2 排序轴呈最大正相关和负相关的环境因子分别为 DO 和温度。

3 讨论

3.1 物种多样性特征

大亚湾海域鱼类物种多样性呈现海湾中部高于沿岸海域的特点, 且海湾中部海域 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 、均匀度指数 J' 、丰富度指数 D' 和种类数均高于沿岸海域。Shannon-Wiener 多样性指数 H' 和均匀度指数 J' 的季节变化均以冬季最高, 最低值分别出现在秋季和夏季, 丰富度指数 D' 夏冬高, 春秋低, 且均匀度指数 J' 的季节变化和空间变化都不大, 说明鱼类群落的均匀度受生境条件改变的影响较小, 这与朱鑫华等^[25]和宋普庆等^[26]的研究相一致。鱼类群落物种的分布与其栖息地的生态环境密切相关, 本次研究表明盐度、水深和温度等环境因子是影响鱼类群落物种分布的主要因素, 这与邱永松^[27]研究相一致。李圣法等^[28]研究指出鱼类多样性变化与主要种类的优势度、鱼类的繁殖生长以及人为捕捞有着密切的关系。本研究通过分析物种多样性与主要环境因子的相关性表明(表 8), 温度、盐度和 pH 对该海域物种多样性有影响($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 而其他环境因子与物种多样性没有相关性($P>0.05$), 这可能与底拖网渔获种类与表层因子关系不密切有关, 或者受捕捞干扰引起其多样性变化有关^[26]。夏季, 气温回升, 水温较高, 营养盐丰富(表 7), 浮游动植物大量繁殖为鱼类带来丰富的营养饵料, 促进鱼类的繁衍和生长, 加上春夏季是鱼类产卵的高峰期^[3], 幼鱼较多, 6—8 月份为南海伏季休渔期, 故其种类数最多, 丰富度指数最大^[29], 但由于调查时间处于 8 月份下旬禁渔期并未结束就开始调查, 受捕捞影响, 多样性指数

表 7 大亚湾海域主要环境因子的季节变化
Tab. 7 Seasonal changes in major environmental factors in Daya Bay

季节 season	pH		溶解氧/(mg/L) DO		盐度 salinity		水温/℃ temperature		表层水深/m surface depth	
	范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean
春季 spring	7.26~8.71	7.94	8.03~13.23	10.54	31.05~32.94	31.90	17.90~20.90	19.39	3.90~19.00	9.48
夏季 summer	7.89~8.32	8.12	4.10~8.88	5.51	32.73~35.73	34.85	26.20~30.10	28.56	3.30~19.00	9.66
秋季 autumn	6.62~8.56	7.46	4.28~5.75	4.86	30.78~32.57	31.83	24.40~26.60	25.41	2.86~19.50	9.55
冬季 winter	8.10~8.52	8.32	5.84~7.46	6.37	33.71~34.67	34.31	17.80~21.20	19.36	3.80~19.50	9.59

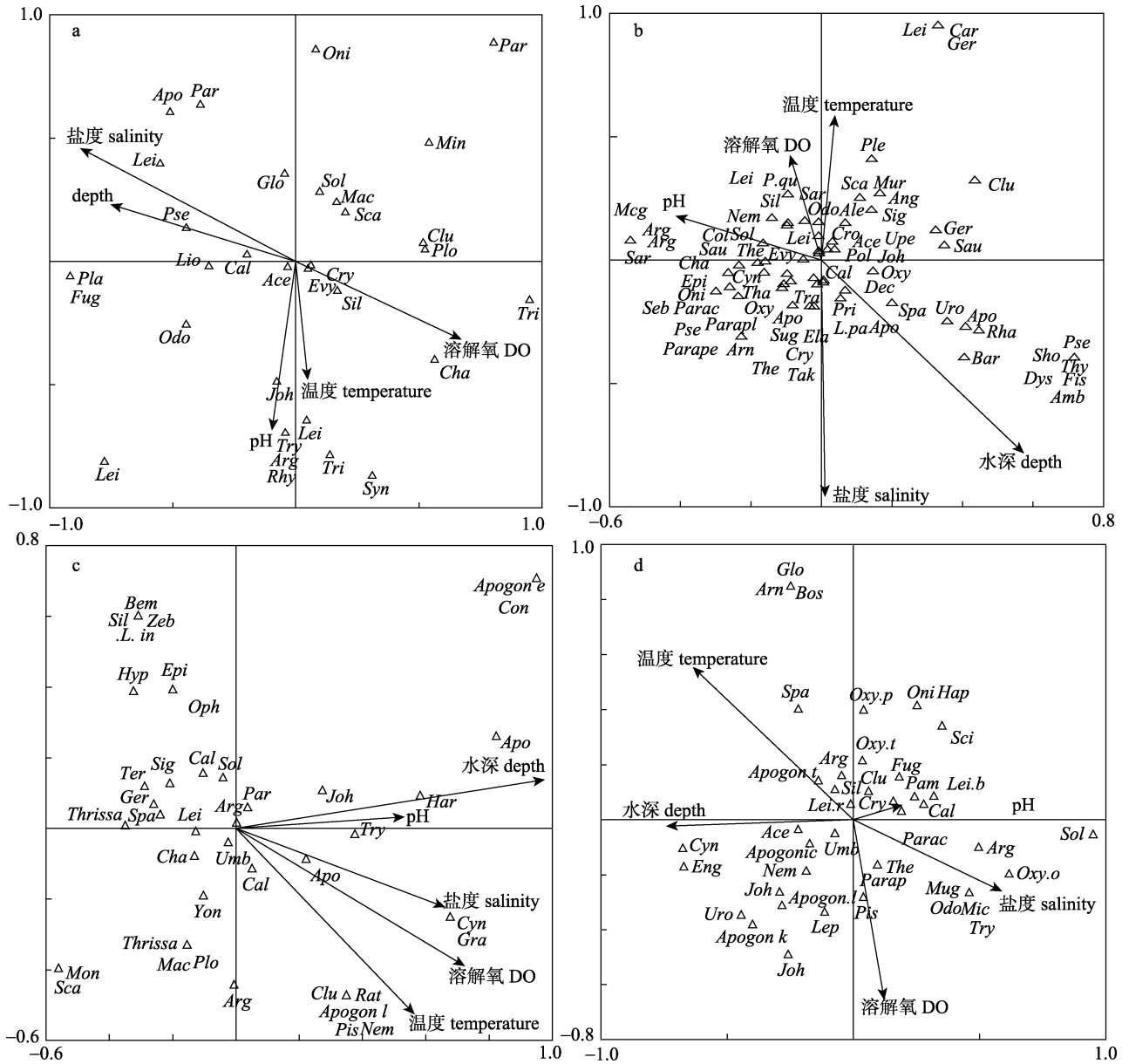


图 3 大亚湾海域鱼类群落物种-环境因子典范对应分析排序图
a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季.

Fig. 3 Ordination diagram of CCA based on fish community species and environmental factors in the Daya Bay area
a. spring; b. summer; c. autumn; d. winter.

表 8 大亚湾海域鱼类物种多样性与环境因子的相关性

环境因子 environmental factor	多样性指数 H'		均匀度指数 J'		丰富度指数 D'	
	r	P	r	P	r	P
盐度 salinity	0.156	0.296	-0.084	0.574	0.540	0**
水深 depth	0.168	0.260	0.193	0.194	0.072	0.631
水温 temperature	-0.291	0.047*	-0.531	0**	0.356	0.014*
酸碱度 pH	0.269	0.068	0.137	0.358	0.367	0.011*
溶解氧 DO	0.049	0.742	0.076	0.612	-0.160	0.283

注: r 表示环境因子与鱼类物种多样性的相关系数; * 表示显著差异 ($P<0.05$); ** 表示极显著差异 ($P<0.01$).
Note: r means correlation coefficient between fish species diversity and environmental factors; * means significant difference ($P<0.05$); ** means extremely significant difference ($P<0.01$).

降低; 冬季, 气温较低, 盐度较高(表 7), 且受部分鱼类洄游及捕捞压力减小的影响, 鱼类种类数和优势种较多(表 3), 多样性指数和均匀度指数最大。湾中部海域年均水深(10.79 m)大于沿岸海域(7.59 m), 年均水温(23.18℃)低于沿岸海域(23.36℃), 生物资源丰富, 且受人类活动影响较少, 生存环境较好, 物种多样性相对较高; 而沿岸海域长期受岸边人类活动影响, 居民生活废水及工厂污水任意排放到湾内, 造成水温高于湾中部, 鱼类栖息地环境受到破坏^[4-5], 且受捕捞过度影响, 物种多样性相对较低。

3.2 物种多样性与资源量的关系

大亚湾鱼类群落多样性指数 H' 和均匀度指数 J' 均随着鱼类资源量的增加而减小, 丰富度指数 D' 随资源量的增加而增加(图 4)。由统计检验表明, 资源量与 J' 呈极显著负相关性($r=-0.580$, $P<0.01$), 与 D' 呈显著正相关性($r=0.338$, $P<0.05$), 而与 H' 无相关性($r=-0.260$, $P>0.05$)。同时, 本次调查鱼类资源量以夏季最高(632.62 kg/km²), 秋季次之(344.90 kg/km²), 冬季最低(115.39 kg/km²), 而春季为 156.02 kg/km², 受捕捞压力影响, 从而导致夏季 D' 最高, J' 最低, 冬季 J' 最高, 说明夏季鱼类物种分布不均匀, 但种类数最多; 而冬季鱼类物种分布较均匀。同时, 冬季 D' 较高的原因可能与初级生产力、湾外洄游鱼类有关^[3]。多样性指数 H' 由高到低依次为冬季、春季、夏季、秋季, 与资源量的季节变化大致相反, 且 H' 与资源量无相关性($P>0.05$), 说明夏季鱼类群落结构相对简单, 而冬季鱼类群落结构较复杂, 这主要与人类活动干扰程度有关。4 个季节鱼类群落生物量与数量的相对关系统计量 W 分别为-0.065、-0.165、-0.075 和 0.168, 表明夏季受人类活动干扰程度最大, 捕捞量大, 而冬季受人类活动干扰程度最小, 捕捞量小。

3.3 与历史调查资料对比分析

鱼类种类数发生变化。本次调查共采集鱼类种类数 131 种, 与 1985 年(157 种)相比, 鱼类物种数下降了 16.56%, 而与 2004—2005 年(107 种)相比, 则增加了 22.43%。由于历史上对于大亚湾海域底拖网调查的历史资料较少, 缺乏 4 个季节连

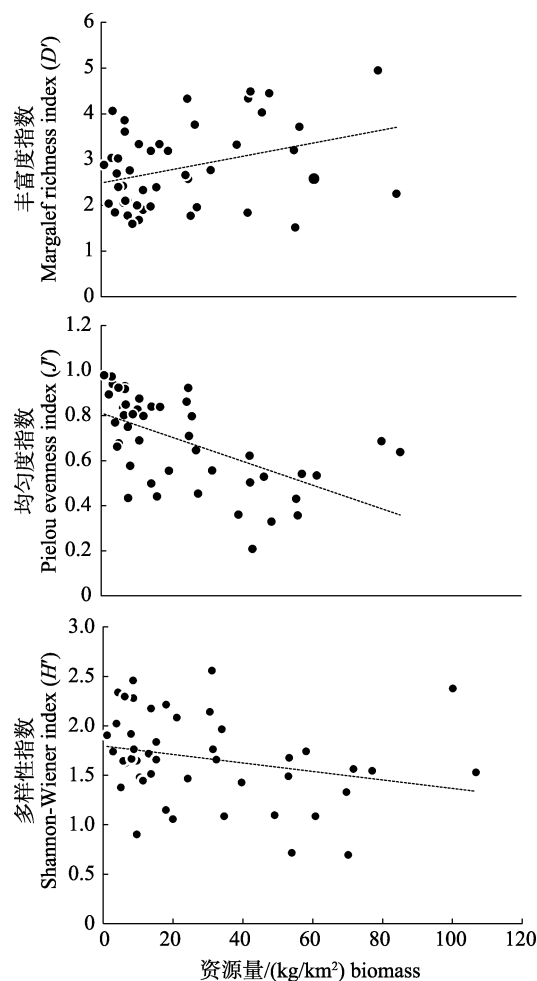


图 4 大亚湾海域鱼类群落多样性指数与资源量的相关关系

Fig. 4 Relationships between species diversity and biomass in the Daya Bay

续作业数据, 因此根据历史调查资料选取 1985—2016 年期间具有可比性调查年份中的春季(3—5 月)进行比较。由图 5 可知, 春季鱼类种类数呈波动下降态势, 由线性回归直线方程 $y=-2.8x+58.13$ ($P<0.05$) 可知, 30 多年来大亚湾春季鱼类种类数总体上呈下降趋势。从鱼类组成来看, 优势种更替明显(表 9)。由 20 世纪 80 年代以大型中上层鱼类为主^[3]转变为 2004—2005 年以近底层鱼类为主^[9], 演变到现在以近底层和底层鱼类为主; 由 1985 年以斑鲷、带鱼和银鲳等体质量大的经济鱼类为主^[3], 演变为现在除斑鲷仍为优势种外, 其余优势种被小型和较为低值的二长棘犁齿鲷幼鱼、李氏鲷和竹荚鱼所替代, 且鱼类小型化和低值化趋势比较明显, 群落组成趋向简单化。物种多

样性水平总体呈下降趋势,表明鱼类群落结构向简单化发展。本次调查多样性指数 H' 季节变化范围 (1.516~1.998) 和 年 均 值 (1.645) 均 低 于 2004—2005 年(2.40~3.82; 3.15); 均匀度指数 J' 季节变化范围(0.494~0.869)和年均值(0.676)均高于 2004—2005 年(0.46~0.65; 0.58)(图 6)。

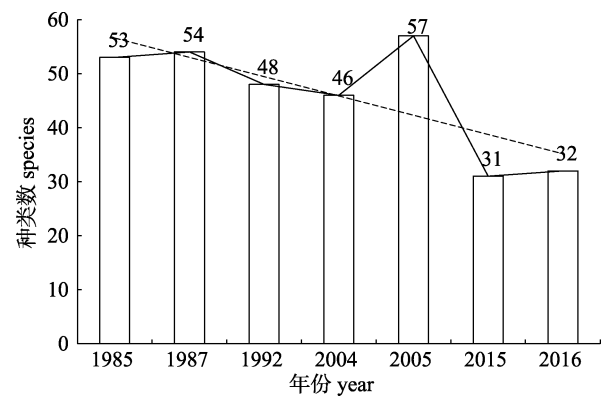


图 5 大亚湾海域不同年代的春季鱼类种类数变化
实线为波动趋势,虚线为线性项。
Fig. 5 Changes in the number of fish species from different years of the Daya Bay in Spring
The solid line is the trend of fluctuation, and the dotted line is linear term.

大亚湾海域主要是受人类活动驱动的复合生态系统^[5], 30 多年来,受人类活动的影响,鱼类物种多样性总体上呈下降态势,鱼类群落结构演替显著,由复杂化向简单化演变。造成该现象的主要原因有以下几个方面:第一,人类捕捞压力增大,尤其是选择性捕捞^[32],导致群落中体质量大的经济鱼类比例减少,资源量及多样性降低,鱼类组成主要以体质量小,未成熟的低值鱼类为主^[33]。据统计,1985 年以来人类捕捞强度逐步上升,1985—1997 海洋捕捞量呈上升趋势^[34], 1997—2015 年由于渔业资源的下降而呈现下降趋势,但 2010—2015 年,鱼类捕捞量增加了 3.21%,而优质鱼类捕捞量则下降 31.48%^[35],说明随着人类捕捞强度的增大,造成渔业资源量下降,优质鱼类减少,鱼类群落结构发生改变。第二,捕捞作业结构发生明显的变化。自 2003 年以后主要以流刺网占绝对优势^[34],而流刺网具有全年不休渔、被动式捕捞特点和较高的选择性,且随着经济鱼类资源的衰退,主要渔获物种组成个体日趋小型化,

表 9 大亚湾海域不同年份春季鱼类组成比较
Tab. 9 Comparison of fish species composition in different years of the Daya Bay in spring

年份 year	种类数 species	优势种 dominant species
1985 ^[3]	53	斑鲷(<i>Clupanodon punctatus</i>)
		银鲳(<i>Pampus argenteus</i>)
		条鲷(<i>Leiognathus rivulatus</i>)
		带鱼(<i>Trichiurus japonicus</i>)
		真鲷(<i>Pagrosomus major</i>)
1987 ^[30]	54	斑鲷(<i>Clupanodon punctatus</i>)
		条鲷(<i>Leiognathus rivulatus</i>)
		带鱼(<i>Trichiurus japonicus</i>)
		竹荚鱼(<i>Trachurus japonicus</i>)
		裘氏小沙丁鱼(<i>Sardinella jussieu</i>)
		二长棘犁齿鲷(<i>Eynn timer cardinalis</i>)
		丽叶鲷(<i>Caranx kalla</i>)
1992 ^[30]	48	斑鲷(<i>Clupanodon punctatus</i>)
		条鲷(<i>Leiognathus rivulatus</i>)
		裘氏小沙丁鱼(<i>Sardinella jussieu</i>)
		带鱼(<i>Trichiurus japonicus</i>)
		鳗鲡(<i>Plotosus anguillaris</i>)
2004 ^[11]	46	黄斑蓝子鱼(<i>Siganus oramin</i>)
		短吻鲷(<i>Leiognathus brevirostris</i>)
		康氏小公鱼(<i>Stolephorus commersoni</i>)
		斑鲷(<i>Clupanodon punctatus</i>)
		裘氏小沙丁鱼(<i>Sardinella jussieu</i>)
2005 ^[11]	57	短吻鲷(<i>Leiognathus brevirostris</i>)
		康氏小公鱼(<i>Stolephorus commersoni</i>)
		斑鲷(<i>Clupanodon punctatus</i>)
		前鳞骨鲷(<i>Osteomugil ophuyseni</i>)
		青鳞小沙丁鱼(<i>Sardinella zunasi</i>)
2015 ^[31]	31	前鳞骨鲷(<i>Osteomugil ophuyseni</i>)
		李氏鳅(<i>Callionymus richardsoni</i>)
		二长棘犁齿鲷(<i>Eynn timer cardinalis</i>)
		黄斑鲷(<i>Leiognathus bindus</i>)
		龙头鱼(<i>Harpodon nehereus</i>)
		二长棘犁齿鲷(<i>Eynn timer cardinalis</i>)
2016	32	李氏鳅(<i>Callionymus richardsoni</i>)
		斑鲷(<i>Clupanodon punctatus</i>)
		竹荚鱼(<i>Trachurus japonicus</i>)
		绿斑细棘虾虎鱼
		(<i>Acentrogobius chlorostigmatoides</i>)

为保证渔获率,流刺网网目规格逐渐小型化,捕获鱼类主要以中上层鱼类为主,且 2014—2016 年大亚湾刺网渔船数量所占总捕捞渔船比例均高于

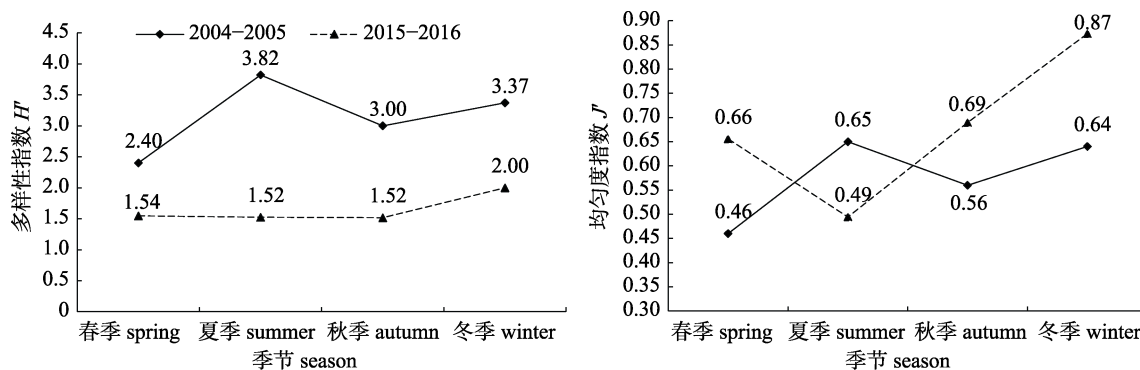


图6 大亚湾海域不同年代的多样性指数和均匀度指数季节变化

Fig. 6 Seasonal changes of diversity index and evenness index of the fishes in different years in the Daya Bay

80%^[35], 加上过度捕捞, 致使中上层鱼类数量减少, 而近底层和底层鱼类数量增加, 鱼类群落结构发生改变。第三, 海域环境因子发生变化。沿岸居民生活及工程建设等人类活动造成大亚湾水温、盐度、叶绿素 a 和无机氮(TIN)含量上升, COD 和 pH 值下降^[6], N/P 比率偏离正常生态系统^[7], 局部海域正逐步向富营养化过度^[4], 物种多样性下降, 资源量降低^[5, 7]。第四, 鱼类栖息地遭到破坏。随着对大亚湾沿岸海域的开发利用, 填海和炸山等人类活动破坏了大亚湾的海底地形, 渔业资源衰退, 种类更替明显, 主要经济种资源量减少^[34]。如真鲷, 20 世纪 80 年代末期每年 1—4 月份渔获率最高可达 10 kg/h 以上, 2003—2005 年同期调查已基本很难捕获真鲷成鱼, 幼鱼平均渔获率也在 1 kg/h 以下^[34], 而本次调查真鲷的成鱼和幼鱼均未捕获到。今后为了更好地了解掌握大亚湾海域鱼类群落的演变动态, 应尽可能在保护生态环境的前提下增加调查频次, 统一调查网具类型、网目尺度和作业方法, 以获取更多高质量的连续观测数据, 为渔业资源可持续开发利用提供科学依据。

参考文献:

- [1] Li N N, Dong L N, Li Y Z, et al. Taxonomic diversity of fish species in the Daya Bay, the South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(6): 863-870. [李娜娜, 董丽娜, 李永振, 等. 大亚湾海域鱼类分类多样性研究[J]. 水产学报, 2011, 35(6): 863-870.]
- [2] Du F Y, Li C H, Liao X L, et al. The variety of zooplankton biomass in Daya Bay[J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(S1): 37-39. [杜飞雁, 李纯厚, 廖秀丽, 等. 大亚湾海域浮游动物生物量变化特征[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(S1): 37-39.]
- [3] Xu G Z. Environments and Resources of Daya Bay[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1989: 245-272. [徐基昭. 大亚湾环境与资源[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1989: 245-272.]
- [4] Wang Z D, Lian J S, Hu J X, et al. Degradation status and characteristics of ecological environment in Daya Bay[J]. Ecological Science, 2003, 22(4): 313-320. [王肇鼎, 练健生, 胡建兴, 等. 大亚湾生态环境的退化现状与特征[J]. 生态科学, 2003, 22(4): 313-320.]
- [5] Li C H, Xu S N, Du F Y, et al. Responses of the Daya Bay ecosystem to human activities and health assessment[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2015, 5(1): 1-10. [李纯厚, 徐姗楠, 杜飞雁, 等. 大亚湾生态系统对人类活动的响应及健康评价[J]. 中国渔业质量与标准, 2015, 5(1): 1-10.]
- [6] Wang Y S, Lou Z P, Sun C C, et al. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(11): 1871-1879.
- [7] Wang Y S. Ecological Environments and Biological Resources of Daya Bay[M]. Beijing: Science Press, 2014: 36-60. [王友绍. 大亚湾生态环境与生物资源[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 36-60.]
- [8] Yu J, Du F Y, Chen G B, et al. Research on coastline change of Daya Bay using remote sensing technology[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(4): 512-516. [于杰, 杜飞雁, 陈国宝, 等. 基于遥感技术的大亚湾海岸线的变迁研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 512-516.]
- [9] Wang X H, Du F Y, Qiu Y S, et al. Variations of fish species diversity, faunal assemblage, and abundances in Daya Bay in 1980-2007[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2403-2410. [王雪辉, 杜飞雁, 邱永松, 等. 1980—2007 年大亚湾鱼类物种多样性、区系特征和数量变化[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2403-2410.]

- [10] Chen T, Lin J B, Guo J F, et al. A study on status of red sea bream *Pagrosomus major* stock in Daya Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 30-35. [陈涛, 林金铄, 郭金富, 等. 大亚湾真鲷资源状况研究[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 30-35.]
- [11] Jin L, Xu H L, Zhang Z M, et al. Species composition and age structure of fish in the Daya Bay in spring and autumn[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(1): 71-80. [金亮, 徐华林, 张志敏, 等. 大亚湾春秋季节鱼类种类组成及年龄结构分析[J]. 台湾海峡, 2011, 30(1): 71-80.]
- [12] Wang X H, Du F Y, Qiu Y S, et al. Study on the ecosystem model of Daya Bay I. A preliminary approach on energy flow model[J]. South China Fisheries Science, 2005, 1(3): 1-8. [王雪辉, 杜飞雁, 邱永松, 等. 大亚湾海域生态系统模型研究 I: 能量流动模型初探[J]. 南方水产, 2005, 1(3): 1-8.]
- [13] Sun B Q, Li H X, Yan Y. Fish community diversity in the western Daya Bay waters[J]. Fisheries Science, 2007, 26(7): 394-399. [孙宝权, 李恒翔, 严岩. 西大亚湾海域鱼类群落的多样性研究[J]. 水产科学, 2007, 26(7): 394-399.]
- [14] Jiang Y E, Lin Z J, Huang Z R. Biodiversity of fishery resources in the continental shelf of northern South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2009, 5(5): 32-37. [江艳娥, 林昭进, 黄梓荣. 南海北部大陆架区渔业生物多样性研究[J]. 南方水产, 2009, 5(5): 32-37.]
- [15] Wang X H, Du F Y, Qiu Y S, et al. Fish community pattern in the Daya Bay, northern South China Sea[J]. Ecological Science, 2015, 34(6): 64-70. [王雪辉, 杜飞雁, 邱永松, 等. 大亚湾鱼类群落格局分析[J]. 生态科学, 2015, 34(6): 64-70.]
- [16] Nelson J S. Fishes of the World, 4th Edition[J]. Fish & Fisheries, 2006, 7(4): 334.
- [17] Li M D. Fish Taxonomy[M]. Beijing: China Ocean Press, 1998: 28-47. [李明德. 鱼类分类学[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 28-47.]
- [18] Liu R Y. Checklist of Marine Biota of China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 598-1065. [刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 598-1065.]
- [19] Pinkas L, Oliphant S, Iverson I. Food habits of albacore, bluefin tuna and bonito in Californian waters[J]. Fish Bulletin, 1971: 527-536.
- [20] Ma K P. Measurement of biotic community diversity I α diversity (Part 1)[J]. Biodiversity Science, 1994, 2(3): 162-168. [马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.]
- [21] Yuan H R, Chen P M, Qin C X, et al. Seasonal variation of fish community structure in Zhelin Bay, the South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(2): 26-35. [袁华荣, 陈丕茂, 秦传新, 等. 南海柘林湾鱼类群落结构季节变动的研究[J]. 南方水产科学, 2017, 13(2): 26-35.]
- [22] Wilhm J L. Use of Biomass Units in Shannon's Formula[J]. Ecology, 1968, 49(1): 153.
- [23] Yang G M, He D H, Wang C S, et al. Study on the biological oceanography characteristics of planktonic copepods in the waters north of Taiwan Island II. Community characteristics[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 21(6): 72-80. [杨关铭, 何德华, 王春生, 等. 台湾以北海域浮游桡足类生物海洋学特征的研究 II. 群落特征[J]. 海洋学报, 1999, 21(6): 72-80.]
- [24] Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone. I[J]. New Phytologist, 1912, 11(2): 37-50.
- [25] Zhu X H, Wu H Z, Xu F S, et al. Study on nekton community diversity and correlation factors in Huanghai and Bohai area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(3): 102-112. [朱鑫华, 吴鹤洲, 徐凤山, 等. 黄渤海沿岸水域游泳动物群落多样性及其相关因素的研究[J]. 海洋学报, 1994, 16(3): 102-112.]
- [26] Song P Q, Zhang J, Lin L S, et al. Nekton species composition and biodiversity in Taiwan Strait[J]. Biodiversity Science, 2012, 20(1): 32-40. [宋普庆, 张静, 林龙山, 等. 台湾海峡游泳动物种类组成及其多样性[J]. 生物多样性, 2012, 20(1): 32-40.]
- [27] Qiu Y S. The regional changes of fish community on the northern continental shelf of South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 1988, 12(4): 303-313. [邱永松. 南海北部大陆架鱼类群落的区域性变化[J]. 水产学报, 1988, 12(4): 303-313.]
- [28] Li S F, Cheng J H, Li C S, et al. Seasonal changes on fish community diversity in the middle part of the East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2005, 27(2): 113-119. [李圣法, 程家骅, 李长松, 等. 东海中部鱼类群落多样性的季节变化[J]. 海洋渔业, 2005, 27(2): 113-119.]
- [29] Liu A X. Preliminary study on changes of fishery resources in Daya Bay before and after closure[J]. Marine and Fisheries, 2017(2): 60-61. [刘爱霞. 休渔期前后大亚湾渔业资源变动初步研究[J]. 海洋与渔业, 2017(2): 60-61.]
- [30] Wang Y S. Ecological Environments and Biological Resources of Daya Bay[M]. Beijing: Science Press, 2014: 333-349. [王友绍. 大亚湾生态环境与生物资源[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 333-349.]
- [31] Huang Z R. Investigation report on fishery resources in Daya Bay[R]. Guangzhou, 2015. [黄梓荣. 大亚湾渔业资源调查报告[R]. 广州, 2015.]
- [32] Stamoulis A, Torreele E. The response of the North Sea demersal fish community to changing fishing pressure as

- seen through the prism of the large fish indicator[J]. Fisheries Research, 2016, 181: 222-233.
- [33] Wang D X, Chen G B, Tang Y, et al. Underwater acoustics assessment on fishery resources in the Southern Daya Bay[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2017, 45(6): 95-98. [王东旭, 陈国宝, 汤勇, 等. 大亚湾南部海域渔业资源声学评估[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(6): 95-98.]
- [34] South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Huizhou Marine and Fishery Bureau. Research report on marine environmental protection planning of Huizhou City[R]. Huizhou, 2008: 48-51. [中国水产科学研究院南海水产研究所, 惠州市海洋与渔业局. 惠州市海洋环境保护规划研究报告[R]. 惠州, 2008: 48-51.]
- [35] Huizhou Statistical Bureau. Huizhou Statistical Yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016: 292-293. [惠州市统计局. 2016 年惠州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016: 292-293.]

The effects of anthropogenic activities on the diversity and succession of fish community in Daya Bay

GUO Jianzhong^{1,2}, CHEN Zuozhi¹, XU Youwei¹, XU Shannan¹, HUANG Zirong¹, LI Chunhou¹

1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The aim for the present study was to analyze data from four otter trawl surveys (conducted between 2015 and 2016) in order to investigate variation in the composition and diversity of fish species in Daya Bay, South China. The data included 131 species, which belonged to 84 genera, 53 families, and 14 orders. Species of the Perciformes were the most predominant, accounting for 54.20%, followed by those of the Agunilliformes and Pleuronectiformes, each accounting for 9.92%. Seasonal (temporal) variations of species number were obvious, with the greatest number of species observed during summer ($n = 69$) and the lowest observed during spring ($n = 32$). The predominant fish species included *Eynniss cardinalis*, *Callionymus richardsoni*, *Clupanodon punctatus*, *Trachurus japonicus*, *Thamnaconus hypargyreus*, *Leiognathus brevirostris* and *Apogon lineatus*. Diversity analysis revealed significant seasonal and spatial differences in fish species diversity. The diversity index (H') ranged from 1.516 to 1.998, with the greatest value observed during winter and the lowest during autumn, whereas the evenness index (J') ranged from 0.494 to 0.869, with the greatest value observed during winter and the lowest during summer, and the richness index (D') ranged from 2.230 to 3.777, with the greatest observed during summer and the lowest during autumn. Model analysis indicated that temperature, salinity, and water depth are the main environmental factors affecting the structure of the fish community in Daya Bay. In terms of spatial distribution, fish diversity was greater in the middle of the bay than in coastal waters. Compared with historical data, the fish community structure has changed significantly, as a result of disturbance from anthropogenic activities, including obvious changes in the composition of dominant species and reduced diversity, suggesting the simplification of fish species appeared in this bay.

Key words: Daya Bay; fish composition; diversity; dominant species; seasonal change; anthropogenic activity

Corresponding author: XU Shannan. E-mail: xushannan@scsfri.ac.cn