

文章编号: 1000-0615(2018)08-1229-12

DOI: 10.11964/jfc.20160110267

秦山核电站温排水附近海域鱼类群落分布空间的差异

蒋朝鹏^{1,2}, 徐兆礼^{1*}, 陈佳杰¹

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业部海洋与河口渔业重点开放实验室, 上海 200090;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 根据秦山核电站温排水扩散数学模拟结果以及在秦山核电站附近海域春季(2010年5月)、夏季(2010年9月)和冬季(2009年12月)渔业资源调查资料, 通过聚类分析方法对鱼类群落分布进行划分, 从不同群落空间分布及种类组成、种类数及多样性的分析等方面, 探讨并分析了秦山核电站温排水对附近海域鱼类群落分布的影响。结果显示, 春、夏和冬季秦山核电站温排水附近海域均划分为2个群落: 温排水影响海域(即群落 I, 以下简称内侧); 位于秦山核电站排水口附近, 温排水排入水域使水温升高, 水温向外侧扩散逐渐降低)和温排水外侧海域(即群落 II, 以下简称外侧)。鱼类群落结构差异表现为春夏季鱼类种类数和多样性指数特征差异一致, 外侧高于内侧, 数量密度差异较大, 夏季和冬季差异明显, 呈相异特征。春季鱼类种类数外侧(14种)>内侧(6种), 尾数和重量多样性指数(H_n')平均值类似, 外侧(2.30和1.93)>内侧(1.76和1.56), 数量密度差异较大, 尾数密度外侧(1.95×10^3 个/km) $>$ 内侧(0.88×10^3 个/km), 而重量密度内侧(6.14 kg/km²) $>$ 外侧(2.26 kg/km²), 主要与春季温排水影响海域鱼类产卵, 鱼类在内侧滞留且体质量较大有关; 夏季与春季类似, 鱼类种类数、尾数和重量多样性指数、尾数和重量密度都是外侧(11种、1.76、1.92、 2.57×10^3 个/km和 9.06 kg/km²) $>$ 内侧(9种、1.75、1.65、 1.98×10^3 个/km和 3.67 kg/km²), 主要因为夏季水温较高, 温排水进入海域改变内侧鱼类群落特征, 表现为内侧低于外侧; 而冬季与夏季正相反, 各指标都是内侧(15种、1.61、1.86、 1.09×10^3 个/km和 8.64 kg/km²) $>$ 外侧(7种、1.24、1.13、 0.84×10^3 个/km和 4.72 kg/km²), 主要与冬季水温较低, 温排水影响海域具有暖池效应, 形成部分鱼类滞留在此越冬有关。温排水对不同适温性的鱼类影响不同, 一些暖温性鱼类能够适应一定的低温, 因而在冬季温排水附近海域鱼类暖温种数和种类数(8种和15种)均为三季最高, 这与物种在温排水的热羽区域分布密集有关, 从而形成温排水附近海域鱼类种类多于其他群落的现象。研究表明, 秦山核电站温排水附近海域鱼类群落分布空间差异显著, 温排水引起的水温变化是主要原因。

关键词: 鱼类; 群落; 温排水; 秦山核电站

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

核电站温排水的排放引起排水口附近海域水温持久性增高, 从而可能改变海洋环境。国内对于温排水排放引起海洋生态的研究已有过报道。例如有针对温排水对水生生态^[1]、浮游动物群落结构^[2-3]、浮游植物群落结构^[4]、鱼卵仔鱼^[5]、水质^[6]等的影响研究。但迄今为止, 国内

有关核电站温排水对附近海域鱼类群落分布差异性影响的研究不多。在国际上, 核电站温排水对海洋生态环境和鱼类分布影响的研究普遍受到重视。例如, 很多发达国家对水生环境热影响进行了研究^[7-10], 美国Hoss等^[11]研究了核电站温排水与鱼群分布的关系, 结果显示, 低温

收稿日期: 2016-01-28 修回日期: 2017-10-15

资助项目: 国家自然科学基金(41176131); 国家重点基础研究发展计划(2010CB428705)

通信作者: 徐兆礼, E-mail: xiaomin1957@126.com

季节鱼群集中分布于热羽区域附近,而在高温季节回避该海域。日本也进行了一些温排水对鱼类生存各阶段影响的相关研究^[12]。

秦山核电厂位于杭州湾西部北岸,现有9台机组,总装机容量达到654.6万kW,年发电量约460亿kW·h,是目前国内核电机组数量最多、装机容量最大的核电厂。秦山核电厂发电所形成的温排水排放达520 m³/s,超过我国多数河流的径流量。另外,加上排水口温排水温升达到8℃。温排水扩散带来的增温效应使得周围海洋环境发生显著的改变,造成海洋生物群落的变化,特别是鱼类群落特征的变化^[13]。但目前针对秦山核电站温排水鱼类群落分布的影响研究甚少。

本实验根据春、夏和冬季在秦山核电站海域开展的渔业资源调查资料,对照秦山核电站温排水扩散数学模拟的结果,分析了春、夏和冬季秦山核电站温排水的排水口附近不同海域鱼类群落分布空间差异,以期核电站温排水对渔业资源影响的现场研究提供一个案例,充实我国在这一领域研究的理论和成果。在实践

上,为核电站工程建设对鱼类资源的影响评价和生态修复措施的制定等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查海域和方法

实验所用数据来自秦山核电站海域温排水进行的渔业资源调查资料,调查航次设12个站位(120.95°~121.06°E, 30.48°~30.51°N, 图1),2009年12月(冬季)、2010年5月(春季)和9月(夏季)共调查36个站位,分别标记为Wi₁~Wi₁₂、Sp₁~Sp₁₂和Su₁~Su₁₂。调查按《海洋调查规范》(GB12673-2007)和《海洋水产资源调查手册》(1981)^[14]进行,调查船为沪南渔49322#,使用单拖网(8.0 m宽×5.0 m高),网目范围2~4 cm,每网拖曳约0.5 h,平均拖速4.63 km/h(2.5 kn)。渔获物中的鱼类按照分类阶元逐级鉴定,确定分类地位,鉴定到种,并对每个品种进行生物学测定。采用Excel和Surfer 8进行数据处理和调查站位分布图等的绘制。

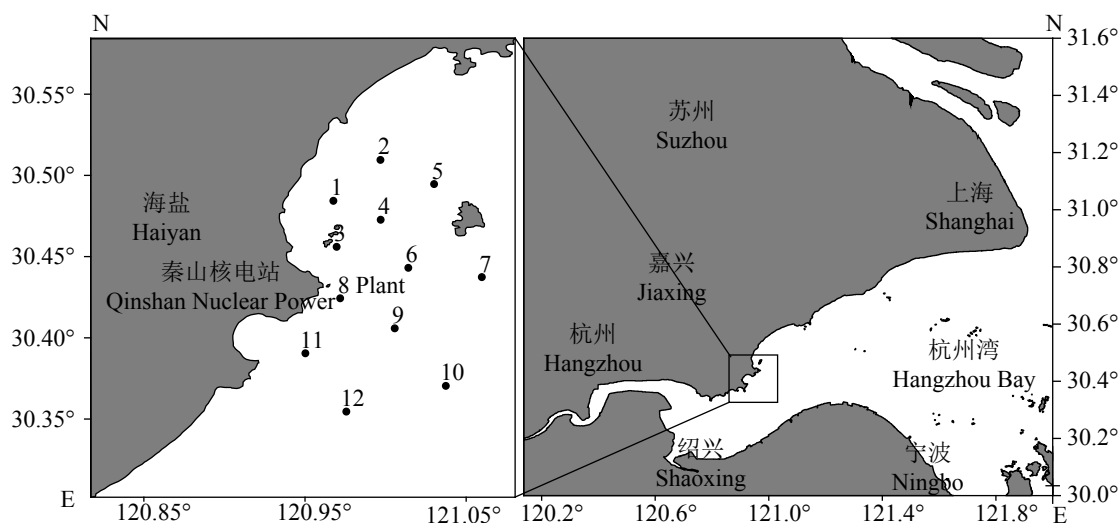


图1 调查站位分布示意图

Fig. 1 Sampling stations

1.2 资源密度计算

鱼类资源密度的估算运用扫海面积法^[15],计算各站位物种的尾数密度和重量密度。公式:

$$\rho_i = C_i \cdot (\alpha_i q)^{-1}$$

式中, ρ_i 指第*i*站的鱼类资源密度(重量密度单

位: kg/km²; 尾数密度单位: 10³个/km²); C_i 指第*i*站每小时拖网渔获物中鱼类数量(重量单位: kg/h; 尾数单位: 个/h); α_i 指第*i*站的网具每小时扫海面积(km²/h)[即网口水平扩展宽度(km)×拖拽距离(km)],本网具网口水平扩展宽度为0.008 km,拖拽距离为拖网速度(km/h)和实际拖网时间(h)的乘积。 q 指网具捕获率(即可捕获系数, $q=1$ -逃逸

率),依据本拖网网具性质,重量和尾数逃逸率均取0.5^[16]。

鱼类优势种依据Pinkas等^[17]的相对重要性指数(IRI)来确定,其计算公式:

$$IRI = (N + W)F$$

式中, N 为某一种鱼类的尾数占全部鱼类总尾数的百分比; W 为某一种鱼类的重量占全部鱼类总重量的百分比; F 为某一种鱼类的出现站位数占调查总站位数的百分比。本实验中以 $IRI \geq 1000$ 的鱼类为主要优势种。

1.3 聚类分析

根据Bray-Curtis^[18]的相似性系数计算各季节不同站位鱼类群落的相似性,对秦山核电站温排水附近海域鱼类资源随时间变化的特征进行分析。

$$S_B = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S |X_{ij} - X_{im}|}{\sum_{i=1}^S |X_{ij} + X_{im}|}$$

式中, S_B 为相似性系数, S 为第 m 站的种类数,第 X_{ij} 和 X_{im} 分别为第 i 种类在 j 和 m 站中的渔获尾数。由于不同群落的差异主要为关键种、优势种和常见种的差异^[19],为减少对相似性分析结果的干扰,分析前剔除出现率低、重要性较低的种类,即将 $IRI \leq 10$ 的种类剔除,再以尾数密度为指标并且站位为样本,进行等级聚类(CLUSTER)。为平衡优势种和非优势种在群落中的作用,计算前对原始数据矩阵开四次方根转换,最后采用类平均法进行聚类分析和非线性多维标度排序分析(NMDS)。

聚类、标序和多样性分析均由PRIMER 5.0软件(Plymouth Marine Laboratory, UK)^[20-23]完成。

1.4 多样性分析

鱼类物种多样性分析采用Shannon-Wiener多样性指数(H'),鱼类重量多样性指数(H'_d)和尾数多样性指数(H'_n)具有不同的生物学含义^[24],需要分别计算 H'_d 和 H'_n 值,公式:

$$H' = - \sum_i \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}$$

式中, n_i 为第 i 种渔获物资源密度, N 为渔获物资源总密度, $H'_{\max} = \log_2 S$ 。

2 结果

2.1 不同海域鱼类群落的划分

秦山核电站温排水邻近海域鱼类各季节各站位聚类和非度量多维标度(NMDS)排序结果基本一致,二者均能较好地反映秦山核电站温排水海域鱼类群落结构,横坐标代表相似性,各站位类群越相似,对应的横坐标数值越大。而通常用胁强系数(stress)检验NMDS结果,当 $stress < 0.2$ 时,可用NMDS二维点图表示;当 $stress < 0.1$ 时,可认为是一个好的排序;当 $stress < 0.05$ 时,具有很好的代表性^[25](图2)。三季NMDS分析结果的胁强系数为0.02~0.07,表明NMDS很好地反映了各站位群落间的相似性程度。

春季,在68.5%相似性水平上,调查区域鱼类可分为2个群落,即1、2、3、4和5号站位分为一组,处在温排水影响较大海域,称为SP I; 6、7、8、9、10、11和12号站位分为一组,为温排水影响较小海域,称为SP II。NMDS排序胁强系数为0.04,很好地反映了各站位群落间的相似性程度。

夏季,在76%相似性水平上,调查区域鱼类可分为2个群落,即1、3、4和8号站位分为一组,也处在温排水影响较大海域,称为SU I; 2、5、6、7、9、10、11和12号站位分为一组,为温排水影响较小海域,称为SU II。NMDS排序胁强系数为0.07。

冬季,在81.5%相似性水平上,调查区域可分为2个群落,即1、2、3、4、5、8和11号站位分为一组,同样处在温排水影响较大海域,称为WI I; 6、7、9、10和12号站位分为一组,为温排水影响较小海域,称为WI II。NMDS排序胁强系数为0.02,能够很好地反映各站位间相似性程度。

2.2 不同群落空间分布特征及种类组成

群落 I 由4~7个站位组成,三季均有出现,主要分布于秦山核电站排水口附近区域;群落 II 由5~7个站位组成,三季均有出现,主要分布于秦山核电站附近海域外侧区域(图3,表1)。

群落 I 稳定分布于调查海域东北部,以栖息于河口、港湾和浅水的河口性鱼类居多。SP I 由睛尾蝌蚪虾虎鱼(*Lophiogobius ocellicauda*)、棘头梅童鱼(*Collichthys lucida*)、凤鲚(*Coilia mystus*)、

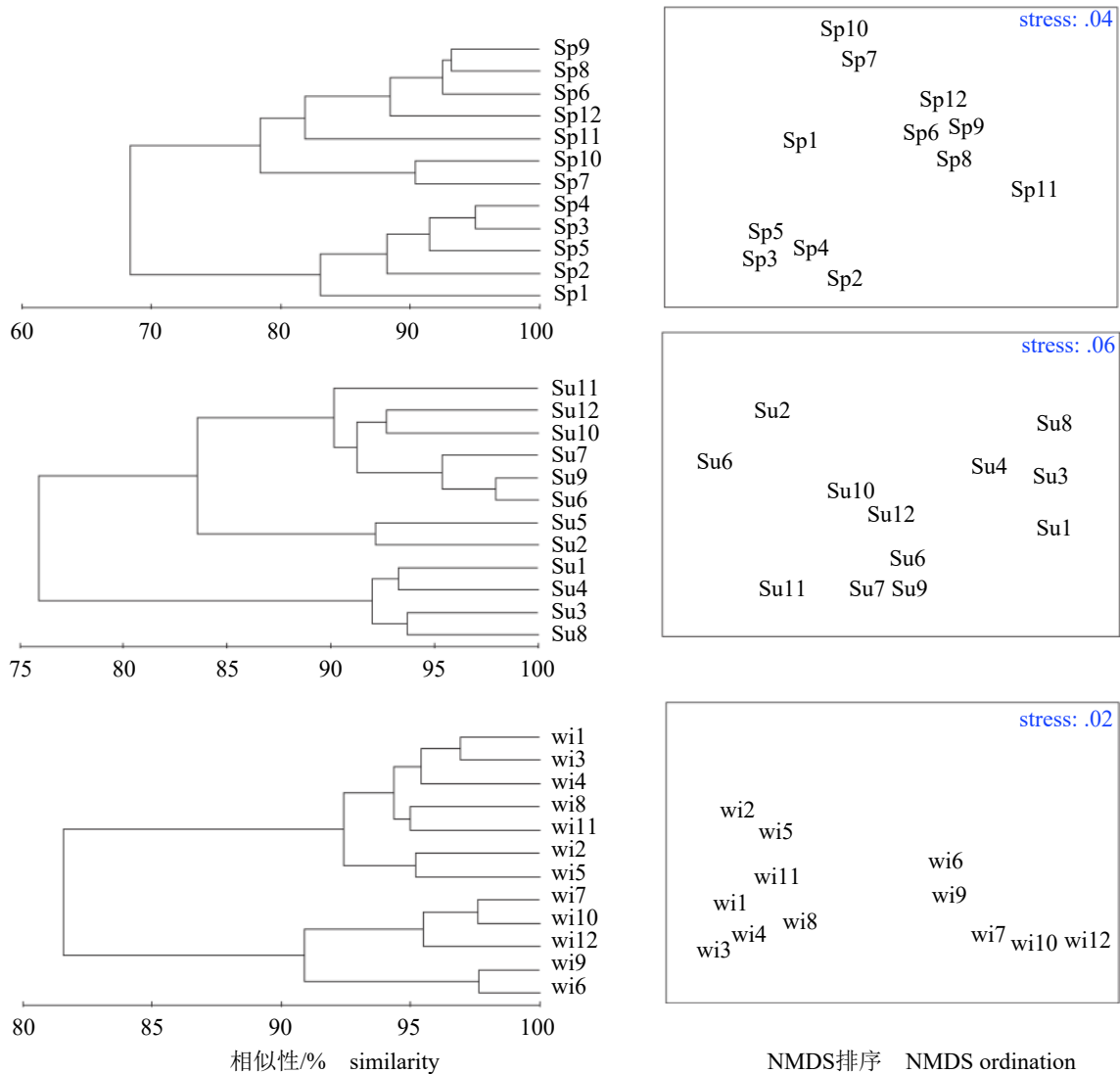


图 2 秦山核电站海域鱼类聚类分析和NMDS排序图

Sp. 春季, Su. 夏季, Wi. 冬季

Fig. 2 Group average clustering and NMDS ordination near the Qinshan Nuclear Power Plant of Hangzhou Bay

Sp. spring, Su. summer, Wi. winter

莱氏舌鳎(*Cynoglossus lighti*)、六丝钝尾虾虎鱼(*Amblychaeturichthys hexanema*)和鲩(*Miichthys miiuy*)等组成, 主要以凤鲚占优势, 占SP I 总尾数的52.94%; SU I 由睛尾蝌蚪虾虎鱼、棘头梅童鱼、凤鲚、龙头鱼(*Harpodon nehereus*)和皮氏叫姑鱼(*Johnius belengerii*)等组成, 主要以棘头梅童鱼占优势, 占SU I 总尾数的56.13%; WI I 由刀鲚(*C. nasus*)、睛尾蝌蚪虾虎鱼、棘头梅童鱼、莱氏舌鳎、短吻舌鳎(*C. abbreviatus*)和鲩等组成, 主要以刀鲚占优势, 占WI I 总尾数的50.21%。

群落 II 主要分布于调查海域南部和东部,

分布区域跨度较大, 以河口和沿岸种占绝对优势。SP II 由半滑舌鳎(*C. semilaevis*)、刀鲚、短吻舌鳎、绯鲢(*Callionymus beniteguri*)、凤鲚、棘头梅童鱼、睛尾蝌蚪虾虎鱼、孔虾虎鱼(*Trypauchen vagina*)、莱氏舌鳎、六丝钝尾虾虎鱼、鲩、花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、龙头鱼、中华海鲈(*Arius sinensis*)、纹缟虾虎鱼(*Tridentiger trionocephalus*)和髯缟虾虎鱼(*T. barbatus*)组成, 主要以六丝钝尾虾虎鱼占优势, 占春季群落 II 总尾数的27.30%; SU II 由窄体舌鳎(*Cynoglossus gracilis*)、刀鲚、凤鲚、黄姑鱼(*Nibea albiflora*)、棘头梅童鱼、睛尾蝌蚪虾虎鱼、龙头鱼、皮氏

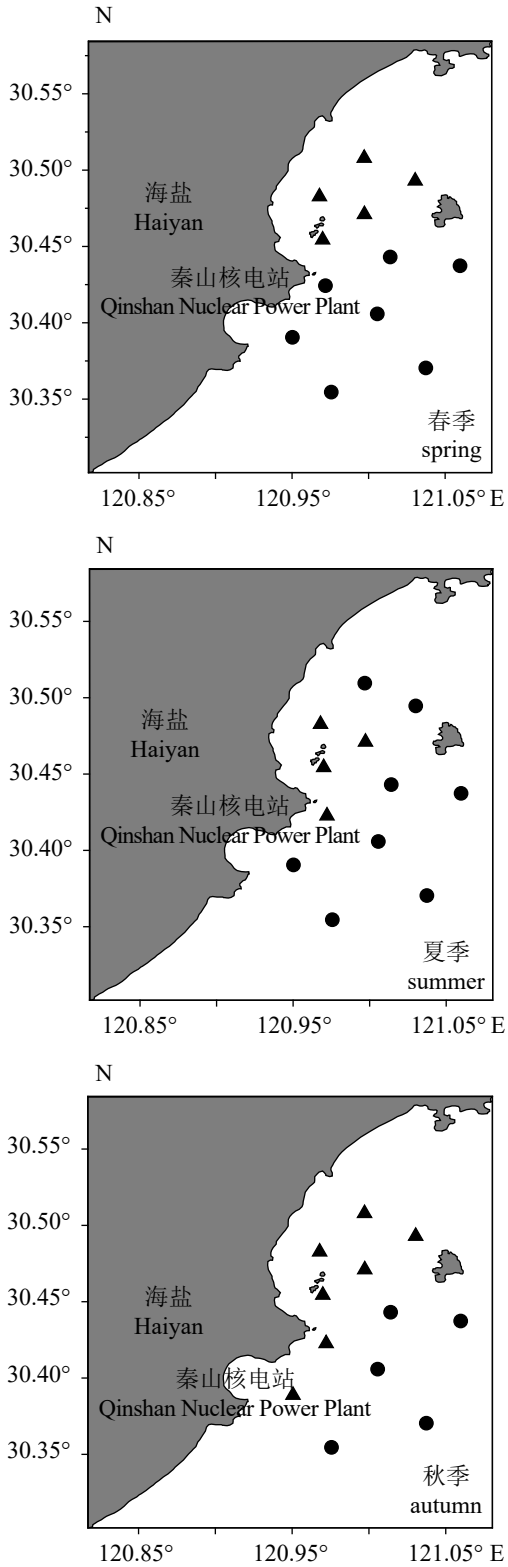


图3 秦山核电站附近海域鱼类群落空间分布
 ▲. 群落 I ; ●. 群落 II
 Fig. 3 Spatial pattern of fish communities near the Qinshan Nuclear Power Plant of Hangzhou Bay
 ▲. group I ; ●. group II

叫姑鱼、多鳞四指马鲛(*Eleutheronema rhadinum*)、纹缟虾虎鱼和中华海鲇组成, 主要以棘头梅童鱼占优势, 占SU II 总尾数的37.57%; WI II 由莱氏舌鳎、孔虾虎鱼、睛尾蝌蚪虾虎鱼、棘头梅童鱼、短吻舌鳎、刀鲚和暗纹东方鲀(*Takifugu fasciatus*)组成, 主要以睛尾蝌蚪虾虎鱼占优势, 占WI II 总尾数的48.93%。

2.3 不同群落空间种类数分布

春季, 鱼类种类数SP II 大于SP I。SP I 鱼类共出现6种, 暖温种5种, 暖水种1种; 平均每个站位出现5种, 秦山核电站排水口附近海域1号站位出现种类最多, 有凤鲚、棘头梅童鱼、睛尾蝌蚪虾虎鱼、莱氏舌鳎、六丝钝尾虾虎鱼和鲉等6种。SP II 鱼类共出现14种, 暖温种7种, 暖水种7种; 平均每个站位出现7.43种, 调查区域中部9号站位出现种类最多, 主要有刀鲚、棘头梅童鱼、睛尾蝌蚪虾虎鱼、莱氏舌鳎和六丝钝尾虾虎鱼等12种(图4, 表2)。

夏季, 鱼类种类数也是SU II 大于SU I。SU I 鱼类共出现9种, 暖温种3种, 暖水种6种; 平均每个站位出现6.75种, 秦山核电站排水口附近海域4号站位出现种类最多, 主要有棘头梅童鱼、睛尾蝌蚪虾虎鱼、凤鲚和皮氏叫姑鱼等8种。SU II 鱼类共出现11种, 暖温种4种, 暖水种7种; 平均每个站位出现6.38种, 调查区域中部9号和10号站位出现种类最多, 均为8种, 2个站位都以睛尾蝌蚪虾虎鱼、棘头梅童鱼、凤鲚、皮氏叫姑鱼和龙头鱼为绝对优势种。

冬季, 鱼类种类数与春夏季相反, SU I 大于SU II。WI I 鱼类共出现15种, 暖温种8种, 暖水种7种; 平均每个站位出现6.43种, 离秦山核电站排水口最近的3号站位出现种类最多, 主要有刀鲚、睛尾蝌蚪虾虎鱼、棘头梅童鱼和短吻舌鳎等9种。WI II 鱼类共出现7种, 暖温种4种, 暖水种3种; 平均每个站位出现4.4种, 调查区域中部6号站位出现种类最多, 主要有睛尾蝌蚪虾虎鱼、棘头梅童鱼、短吻舌鳎和刀鲚等7种。

2.4 温排水海域鱼类多样性分布特征

春季, 尾数多样性指数(H_n')和重量多样性指数(H_d')平均值都是SP II 大于SP I。SP I 以北部的1号站位 H_n' 最大, 向外侧递减。SP II 以中部的9号站位 H_n' 和 H_d' 最大, 以9号站位为中心向两侧逐渐减小(图5, 图6, 表3)。

表 1 各季节不同群落类型鱼类组成

Tab. 1 Fish species composition in different seasons near the Qinshan Nuclear Power Plant

种名 species	春季 spring		夏季 summer		冬季 winter		生态类型 ecological group
	群落 I group I	群落 II group II	群落 I group I	群落 II group II	群落 I group I	群落 II group II	
暗缟虾虎鱼 <i>Tridentiger obscurus</i>					0.11		□
暗纹东方鲀 <i>Takifugu fasciatus</i>						0.04	□
半滑舌鳎 <i>Cynoglossus semilaevis</i>		0.04					■
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>		0.61	0.07	0.18	6.32	1.29	■
短吻舌鳎 <i>Cynoglossus abbreviatus</i>		0.03			0.22	0.27	■
多鳞四指马鲛 <i>Eleutheronema rhadinum</i>			0.11	0.02			■
绯鲷 <i>Callionymus beniteguri</i>		0.04					□
凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	2.80	1.29	2.34	3.56			■
黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>			0.49	0.02			■
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucida</i>	0.52	0.57	12.97	8.07	0.86	1.91	□
焦氏舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>					0.05		□
睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobius ocellicauda</i>	0.52	0.34	4.69	7.64	4.44	3.73	□
孔虾虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i>		0.08				0.04	■
莱氏舌鳎 <i>Cynoglossus lighti</i>	0.91	0.70			0.26	0.35	□
六丝钝尾虾虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	0.09	1.56			0.04		□
龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>			1.36	0.69			■
矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>					0.10		□
鲩 <i>Müchthys müy</i>	0.45	0.27			0.06		□
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengerii</i>			1.00	1.10			■
前鳞骨鲷 <i>Osteomugil ophuyseni</i>					0.04		■
青弹涂鱼 <i>Scartelaos hisophorus</i>					0.03		■
纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trignocephalus</i>				0.09			□
小头栉孔虾虎鱼 <i>Ctenotrypauchen microcephalus</i>					0.04		■
窄体舌鳎 <i>Cynoglossus gracilis</i>			0.07	0.09			□
花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>		0.17					□
中华海鲇 <i>Arius sinensis</i>		0.02		0.02			■
髯缟虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i>		0.02			0.02		■
鲷 <i>Mugil cephalus</i>					0.02		■

注: ■. 暖水种; □. 暖温种

Notes: ■. warm-water species; □. warm-temperature species

夏季, H_n' 和 H_d' 平均值都是 SU II 大于 SU I。SU I 以北部 4 号站位 H_n' 和 H_d' 平均值最大, SU II 以中部的 9 号站位 H_n' 和 H_d' 平均值占绝对优势, 分别向两侧逐渐减小。

冬季, 与春夏季相反, H_n' 和 H_d' 平均值都是 WI I 大于 WI II。WI I 以秦山核电排水口附近 H_n' 和 H_d' 平均值较大, WI II 在 H_n' 和 H_d' 上都是以中部站位较大, 分别向两侧逐渐减小。

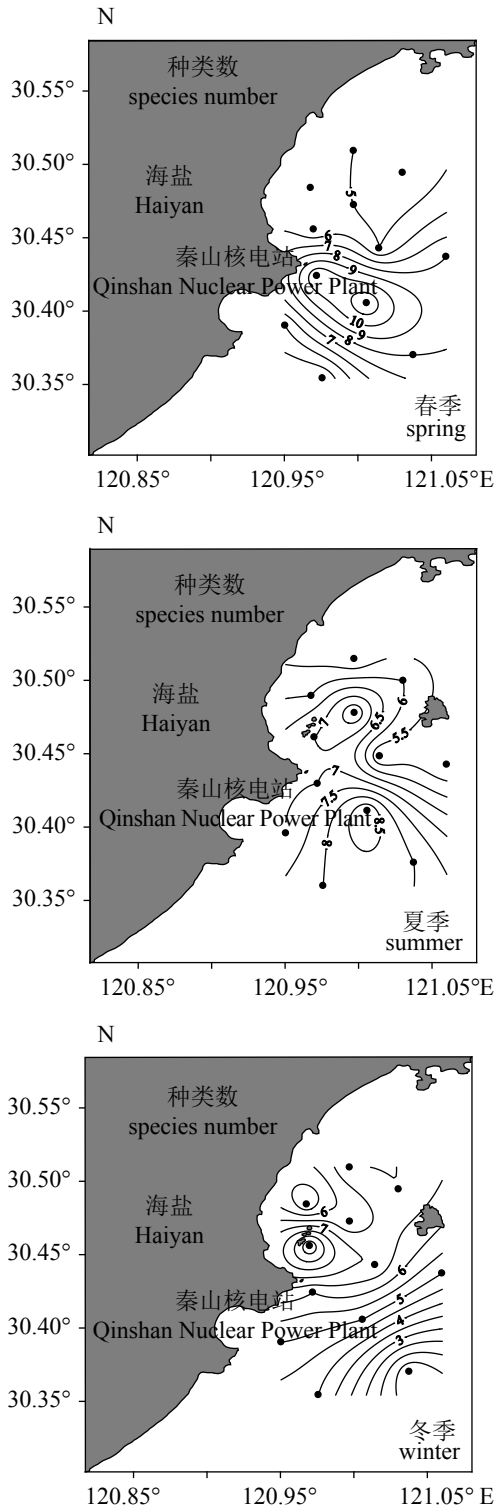


图 4 杭州湾秦山核电站海域鱼类种类数分布示意图
 Fig. 4 Fish species number near the Qinshan Nuclear Power Plant of Hangzhou Bay

2.5 不同群落鱼类密度特征

春季, SP II 尾数密度高于 SP I, 重量密度则与之相反(表4)。SP I 尾数密度最高出现在排

表 2 各群落不同季节鱼类种类数

Tab. 2 Fish species number in different seasons near the Qinshan Nuclear Power Plant

生态类群 ecological group	春季 spring		夏季 summer		冬季 winter	
	群落 I group I	群落 II group II	群落 I group I	群落 II group II	群落 I group I	群落 II group II
	暖温带 warm-temperature species	5	7	3	4	8
暖水种 warm-water species	1	7	6	7	7	3
小计 subtotal	6	14	9	11	15	7
总计 total	14		13		17	

水口附近的3号站位, 为6.59个/km²; 重量密度最高出现在1号站位, 3号站位次之, 分别为70.87 kg/km²和34.74 kg/km²。SP II 尾数和密度最高均出现在调查水域东南部的10号站位, 分别为12.32×10³个/km²和104.04 kg/km²。

夏季, SU II 尾数和重量密度均高于SU I (表4)。SU II 尾数密度最高出现在调查水域东南部靠外的10号站, 为37.12×10³个/km²; 而重量密度在5号站位最高, 为223.88 kg/km²。SU I 尾数和重量密度最高均出现在调查水域西部的3号站位, 分别为42.60×10³个/km²和65.77 kg/km²。

冬季, 与春夏季相反, WI I 尾数和重量密度均高于WI II (表4)。WI I 尾数和重量密度最高均出现在调查水域北部的4号站位, 分别为23.94×10³个/km²和97.79 kg/km²; WI II 尾数密度最高出现在6号站位, 为16.01×10³个/km²; 重量密度最高均出现在7号站位, 为139.93 kg/km²。

3 讨论

3.1 温排水附近海域鱼类群落差异

春、夏和冬季秦山核电站温排水海域鱼类群落存在差异。调查海域鱼类分为两个群落, SP I 春、夏和冬季各站位分布在温排水出水口附近海域, SP II 春、夏和冬季各站位分布在温排水海域外侧(图2, 图3)。

群落 I 位于秦山核电站排水口附近, 春季和夏季分别以暖水性凤鲚和暖温性棘头梅童鱼占优势, 而冬季以暖水性的刀鲚和暖温性的睛尾蝌蚪虾虎鱼占优势; 群落 II 位于调查海域南部, 春季主要以暖温性的六丝钝尾虾虎鱼和暖水性凤鲚占优势, 夏季主要以暖温性棘头梅童鱼和

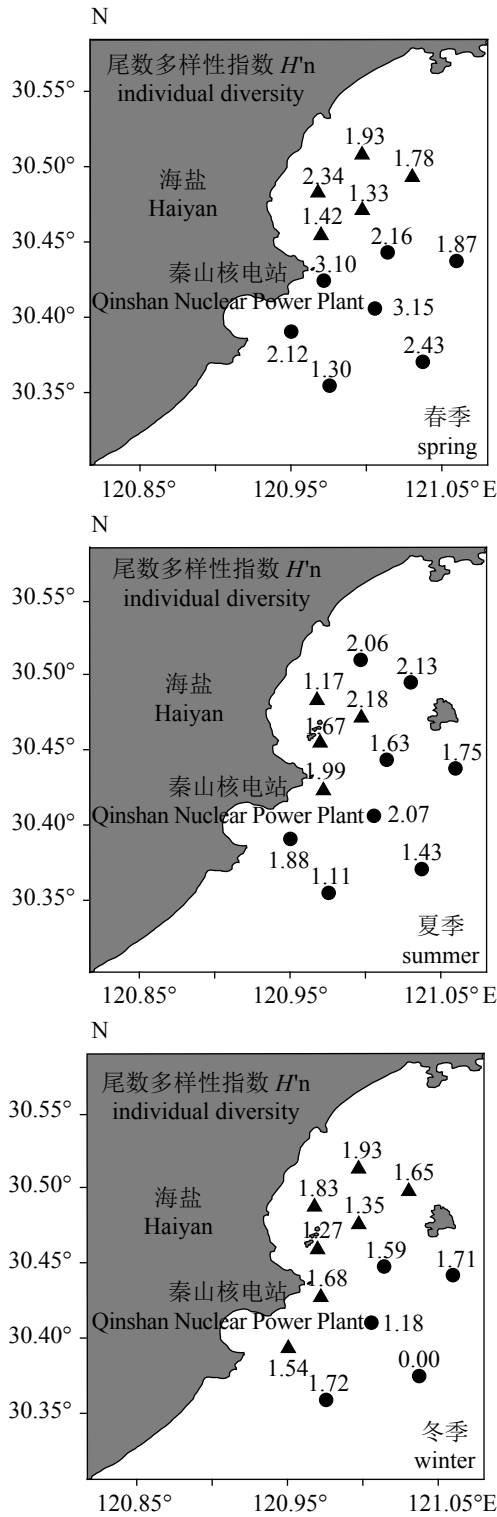


图 5 杭州湾秦山核电站海域鱼类尾数多样性指数 (H'_n) 值分布示意图

Fig. 5 Distribution of fish individual diversity (H'_n) near the Qinshan Nuclear Power Plant of Hangzhou Bay

睛尾蝌蚪虾虎鱼以及暖水性的凤鲚占优势，而冬季主要以暖温性的睛尾蝌蚪虾虎鱼占优势。

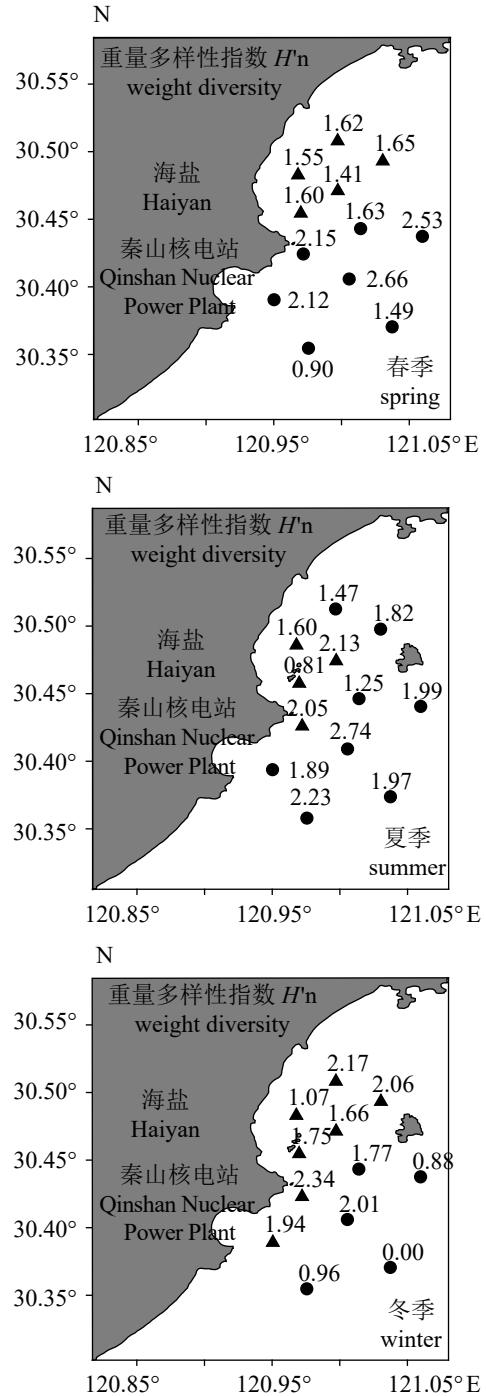


图 6 杭州湾秦山核电站海域鱼类重量多样性指数 (H'_d) 值分布示意图

Fig. 6 Distribution of fish weight diversity (H'_d) near the Qinshan Nuclear Power Plant of Hangzhou Bay

群落 I 和群落 II 存在的差异为主要物种的差异性。不同海域的环境因素对鱼类分布起限制作用，使其分布不同的种类，从而形成不同的鱼类群落。

表3 各群落不同季节鱼类多样性指数

Tab. 3 Fish diversity in different seasons near the Qinshan Nuclear Power Plant

多样性指数(H') diversity index	春季	spring	夏季	summer	冬季	winter
	群落 I	群落 II	群落 I	群落 II	群落 I	群落 II
尾数多样性(H_n') individual diversity	1.76	2.30	1.75	1.76	1.61	1.24
重量多样性(H_d') weight diversity	1.56	1.93	1.65	1.92	1.86	1.13

表4 各群落不同季节鱼类密度

Tab. 4 Fish density in different seasons near the Qinshan Nuclear Power Plant

密度 density	春季	spring	夏季	summer	冬季	winter
	群落 I	群落 II	群落 I	群落 II	群落 I	群落 II
尾数密度/ ($\times 10^3$ 个/ km^2) individual density	0.88	1.95	1.98	2.57	1.09	0.84
重量密度/ (kg/km^2) weight density	6.14	2.26	3.67	9.06	8.64	4.72

3.2 温排水附近海域鱼类种类数分布

秦山核电站温排水附近海域鱼类种类数分布有一定的特征。鱼类种类数冬季在群落 I 分布较多, 而春夏两季鱼类均在群落 II 较多。冬季鱼类种类数分布与春、夏季相异的现象可能与温排水有关。

根据历史资料表明, 每年夏季鱼类到该海域产卵索饵洄游, 冬季返回深海越冬^[26]; 俞存根等^[27]对不同季节鱼类种类比较中, 第三季度(89种)>第二季度(78种)~第四季度(75种)>第一季度(39种)。本次调查中鱼类冬季种类数最多(17种), 春季(14种)和夏季(13种)相差不大(表2); 冬季鱼类种类数、暖温种和暖水种都是群落 I 比群落 II 多, 而春季和夏季都是群落 II 比群落 I 多; 整体分析, 鱼类种类数、暖温种和暖水种都是冬季群落 I 比春、夏季群落 I 多, 而群落 II 比春、夏季都少(图4, 表2)。形成冬季与春、夏季种类数差异的原因与秦山核电站温排水进入海域有关, 冬季水温普遍较低, 鱼类本应洄游, 但温排水进入水体后水温有所升高, 一些鱼类在此聚集, 从而形成鱼类种类冬季比春、夏季多, 群落 I 比群落 II 多的现象。春、夏季水温相对较高, 尤其是在夏季水温普遍较高, 温排水进入水体之后水温更高, 一些鱼类无法长期在温排水海域生存繁殖, 从而对该海

域有回避趋势, 但群落 II 水域水温受温排水的排入影响较小, 尤其在春季水温比较适合鱼类产卵。因此形成了这种冬季与春、夏季群落 I 和群落 II 鱼类种类数差异性。

综上所述, 鱼类种类数冬季群落 I 比春、夏季群落 I 都多, 群落 II 正相反; 冬季鱼类种类数群落 I 比群落 II 多, 而春、夏季正相反。引起这种现象与以往数据不同的原因与温排水的排入有关。

3.3 温排水附近海域鱼类多样性平面分布

温排水对鱼类影响不仅仅在种类数上, 还引起了鱼类多样性指数的变化。冬季群落 I 尾数和重量多样性指数平均值都比群落 II 高, 而春、夏季正相反, 群落 II 尾数和重量多样性指数平均值都比群落 I 高。冬季鱼类多样性平面分布与春、夏季相异的现象也可能与温排水有关。

冬季群落 I 尾数和重量多样性指数都比群落 II 高, 说明群落 I 比群落 II 物种更丰富。温度是影响游泳动物群落结构最主要的环境因子^[26](图5, 图6, 表3), 冬季水温普遍较低, 而温排水进入附近海域使水体温度有所回升, 一些适应此温度的鱼类没有洄游, 因此群落 I 物种多样性高于群落 II。春、夏季水温较高, 温排水进入群落 I 使得水温更高, 一些鱼类回避高温区向群落 II 转移, 造成群落 II 物种多样性比群落 I 高。

温排水进入海域使得附近海域温度升高, 影响了该海域物种多样性分布。冬季温排水使较低的水温有所回升, 利于鱼类生存, 提高了该海域群落 I 物种多样性指数; 而春、夏季温排水使该水域的温度更高, 一些鱼类回避该海域, 降低了群落 I 物种多样性。

3.4 温排水对附近海域不同群落鱼类数量密度的影响

秦山核电站温排水附近海域不同群落数量密度各不相同。冬季与夏季群落 I 与群落 II 的鱼类数量密度相反, 夏季鱼类数量密度在三季中最高, 这可能与温排水的排入有关。

冬季群落 I 尾数密度、重量密度和数量密度均比群落 II 高(表4); 而夏季和春季群落 II 分别在数量密度和尾数密度比群落 I 高; 但春季群落 I 重量密度比群落 II 大。夏季群落 I 尾数密度比春、冬季都大, 夏季群落 II 尾数和重量

密度都比春、冬季群落Ⅱ大,说明三季中夏季两个群落鱼类数量密度最大,鱼群较多。这可能是因为温排水排入该海域引起鱼群数量增多,温度是游泳动物集群的主要限制因素,水温的变化直接引起群落变化^[28-30]。冬季水温较低,温排水进入海域引起排水口附近的群落Ⅰ水温升高,改变鱼类群落数量密度,形成群落Ⅰ和Ⅱ尾数和重量密度上的差异。

研究表明,温排水排入海域引起鱼类群落数量分布差异。冬季群落Ⅰ鱼类数量密度高于群落Ⅱ,而夏季相反,夏季鱼类数量密度在三季中最高。因此,温排水影响调查海域最大的为群落Ⅰ,冬季有增加群落Ⅰ数量密度的趋势,而夏季有削弱趋势。

在论文构思和撰写过程中沈晓民老师给予很大帮助,陈佳杰、胡剑和刘守海等帮助样品采集和鉴定,特此致谢。

参考文献:

- [1] 邓锐,高卫平,黄亮,等. 电厂温排水对水生生态的影响研究[J]. 水文, 2009, 29(S1): 144-146, 112.
Deng R, Gao W P, Huang L, *et al.* Effects of thermal discharge from a power on aquatic ecology[J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(S1): 144-146, 112(in Chinese).
- [2] 金琼贝,盛连喜,张然. 电厂温排水对浮游动物的影响[J]. 环境科学学报, 1989, 9(2): 208-217.
Jin Q B, Sheng L X, Zhang R. Effects of thermal discharge from a power plant on zooplanktons[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1989, 9(2): 208-217(in Chinese).
- [3] 徐晓群,曾江宁,曾淦宁,等. 滨海电厂温排水对浮游动物分布的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 933-939.
Xu X Q, Zeng J N, Zeng G N, *et al.* Effects of thermal water discharged from coastal power plant on distribution of zooplankton[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(6): 933-939(in Chinese).
- [4] 唐森铭,严岩,陈彬. 春夏季大亚湾核电厂温排水对海洋浮游植物群落结构的影响[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(3): 373-382.
Tang S M, Yan Y, Chen B. Impacts of thermal effluent on the phytoplankton community structures nearby Dayawan Nuclear Power Station in spring and summer[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(3): 373-382(in Chinese).
- [5] 林昭进,詹海刚. 大亚湾核电站温排水对邻近水域鱼卵、仔鱼的影响[J]. 热带海洋, 2000, 19(1): 44-51.
Lin Z J, Zhan H G. Effects of thermal effluent on fish eggs and larvae in waters near Daya Bay nuclear plant[J]. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(1): 44-51(in Chinese).
- [6] 黄向阳,谢磊. 江水源热泵系统温排水对江水水温及水质的影响[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 34-36.
Huang X Y, Xie L. Effect of warm water discharge of river water resources heat pump system on water temperature and water quality[J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(7): 34-36(in Chinese).
- [7] 姜礼燾. 核(热)电站对渔业环境影响及其对策的研究[J]. 现代渔业信息, 1992, 7(8): 4-9.
Jiang L F. Study on the influences and countermeasures on fishery environment of nuclear power station[J]. *Modern Fisheries Information*, 1992, 7(8): 4-9(in Chinese).
- [8] 张继民. 电厂温排水对水生生物的热影响及水质影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
Zhang J M. Study on the thermal effect on hydrobiont and water quality for thermal discharge[D]. Nanjing: Hohai University, 2006 (in Chinese).
- [9] Brett J R. Temperature tolerance in young pacific salmon, genus *oncorhynchus*[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1952, 9(6): 265-323.
- [10] Brungs W A, Jones B R. Temperature criteria for freshwater fish: Protocol and procedures[R]. U.S. EPA-600/3-77-061, 1977.
- [11] Hoss D E, Costonl C, Baptist J P, *et al.* Effects of temperature cop-per and chlorine on fish during simulated entrainment in power-plant condenser cooling systems[J]. IAEA-SM, 1975, 189(19): 519-527.
- [12] Thurston R V, Russo R C, Luedtke R J, *et al.* Chronic toxicity of ammonia to rainbow trout[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1984, 113(1): 56-73.
- [13] 姜雪. 新常态下秦山核电电能消纳优化与探索[J]. 中国核工业, 2016(5): 42-44.
Jiang X. The optimization and exploration of nuclear power generation absorption in Qinshan under the new normal[J]. *China Nuclear Industry*, 2016(5): 42-44(in Chinese).
- [14] 黄海水产研究所. 海洋水产资源调查手册[M]. 2版. 上

- 海: 上海科学技术出版社, 1981: 8.
- Yellow Sea Fisheries Research Institute. Survey Manual for Marine Aquatic Resources[M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1981: 8 (in Chinese).
- [15] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 18-46, 124-130.
- Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 18-46, 124-130 (in Chinese).
- [16] 杨吝, 张旭丰, 谭永光, 等. 南海区拖网网囊最小网目尺寸选择性研究[J]. 中国水产科学, 2003, 10(4): 325-332.
- Yang L, Zhang X F, Tan Y G, *et al.* Selectivity study on minimum mesh size of bottom trawl codend in South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(4): 325-332(in Chinese).
- [17] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, Bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. Fish Bulletin. California Department of Fish and Game, 1971(152): 1-105.
- [18] Bray J R, Curtis J T. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin[J]. *Ecological Monographs*, 1957, 27(4): 325-349.
- [19] 王雪辉, 林昭进, 杜飞雁, 等. 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2225-2235.
- Wang X H, Lin Z J, Du F Y, *et al.* Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2225-2235(in Chinese).
- [20] Brazner J C, Beals E W. Patterns in fish assemblages from coastal wetland and beach habitats in Green Bay, Lake Michigan: a multivariate analysis of abiotic and biotic forcing factors[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(8): 1743-1761.
- [21] Clark K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure[J]. *Austral Ecology*, 1993, 18(1): 117-143.
- [22] Clarke K R, Warwick R M. Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation[M]. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, 1994.
- [23] 历红梅, 蔡立哲, 林丽珠, 等. 深圳湾潮间带底栖动物群落结构的等级聚类与非度量多维标度排序[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(3): 735-740.
- Li H M, Cai L Z, Lin L Z, *et al.* Using hierarchical clustering and no-metric MDS to explore spatio-temporal variation of benthic community at intertidal in Shenzhen Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2001, 40(3): 735-740(in Chinese).
- [24] 金显仕, 邓景辉. 莱州湾渔业资源群落结构和生物多样性的变化[J]. 生物多样性, 2000, 8(1): 65-72.
- Jin X S, Deng J Y. Variations in community structure of fishery resources and biodiversity in the Laizhou Bay, Shandong[J]. Chinese Biodiversity, 2000, 8(1): 65-72(in Chinese).
- [25] Khalaf M A, Kochzius M. Changes in trophic community structure of shore fishes at an industrial site in the Gulf of Aqaba, Red Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 239: 287-299.
- [26] 王淼, 洪波, 张玉平, 等. 夏、冬季杭州湾北部游泳动物群落结构[J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(3): 56-62.
- Wang M, Hong B, Zhang Y P, *et al.* Community structure of nektons in northern Hangzhou Bay in summer and winter[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2015, 35(3): 56-62(in Chinese).
- [27] 俞存根, 陈全震, 陈小庆, 等. 舟山渔场及邻近海域鱼类种类组成和数量分布[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(3): 410-417.
- Yu C G, Chen Q Z, Chen X Q, *et al.* Species composition and quantitative distribution of fish in the Zhoushan fishing ground and its adjacent waters[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(3): 410-417(in Chinese).
- [28] 奥德姆. 生态学基础[M]. 孙儒泳, 译. 3版. 北京: 人民教育出版社, 1981: 320-346.
- Odum E P. Fundamentals of Ecology[M]. Sun R Y, Trans. 3rd ed. Beijing: People's Education Press, 1981: 320-346 (in Chinese).
- [29] 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): 303-311.
- 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): 303-311(in Chinese).
- [30] Colvocoresses J A, Musick J A. Species associations and community composition of middle Atlantic Bight continental shelf demersal fishes[J]. Fishery Bulletin, 1984, 82(2): 295-313.

Spatial differences of fish community distribution in the adjacent sea areas of thermal discharge from Qinshan Nuclear Power Plant

JIANG Chaopeng^{1,2}, XU Zhaoli^{1*}, CHEN Jiajie¹

(1. Key and Open Laboratory of Marine and Estuary Fisheries, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the mathematical simulation results of thermal discharge diffusion and the data taken from fishery resources surveying of the adjacent sea areas of Qinshan Nuclear Power Plant during spring (May,2010), summer (Sept.,2010) and winter (Dec.,2009), we divided the fish community distribution through cluster analysis method, explored and analyzed the effects of thermal discharge from Qinshan Nuclear Power Plant on fish community distribution of the adjacent sea areas, from the aspects of spatial distribution and species composition, species number and diversity of different communities, etc. The result showed that the adjacent sea areas of thermal discharge of Qinshan Nuclear Power Plant were divided into two communities in spring, summer and winter, namely: the sea areas affected by thermal discharge (i.e. community I, hereinafter referred to as the inside; located near the outlet of Qinshan Nuclear Power Plant, thermal discharged into the water made water temperature rise, the water temperature decreased outward diffusion) and the sea areas outside of the thermal discharge (i.e. community II, hereinafter referred to as the outside). Differences of fish community structure showed differences of the characteristics of fish species quantity and diversity index were consistent in spring and summer, the outside was higher than inside, quantity density had a large difference, and the differences were significant in summer and winter, showing distinct characteristics. The quantity of fish species outside (14 kinds) > inside (6 kinds) in spring, the average value of individuals and weight diversity index (H_n') was similar, outside (2.30 and 1.93) > inside (1.76 and 1.56), quantity density had large difference, individual density outside (1.95×10^3 ind/km) > inside (0.88×10^3 ind/km), and weight density inside (6.14 kg/km²) > outside (2.26 kg/km²), mainly related to thermal discharge in spring affected fish spawning, fish assembled inside and had higher weight; similar to spring, in summer, the quantity of fish species, individuals and weight diversity index, individuals and weight density were all outside (11 kinds, 1.76, 1.92, 2.57×10^3 ind/km and 9.06 kg/km²) > inside (9 kinds, 1.75, 1.65, 1.98×10^3 ind/km and 3.67 kg/km²), mainly because the temperature of the sea water in summer was higher, thermal discharge into the sea water changed the characteristics of fish community inside, showed inside was lower than outside; and the winter was opposite to summer, all indicators were inside (15 kinds, 1.61, 1.86, 1.09×10^3 ind/km and 8.64 kg/km²) > outside (7 kinds, 1.24, 1.13, 0.84×10^3 ind/km and 4.72 kg/km²), mainly because the temperature of the sea water in winter was lower, probably related to thermal discharge making the proximal sea regions warmer than the surrounding sea waters, which could benefit the fish assemblies in winter because of a warm pool effect. Thermal discharge has different effects on fishes with different adaptabilities to temperature; some warm temperature fishes can be adapted to relatively low temperature, so the quantity of warm temperate fish species and fish species (8 kinds and 15 kinds) in the adjacent sea areas of thermal discharge were all the highest in winter among the three seasons, which was related to species distributed densely in the hot thermal discharge plume areas, thus formed the phenomenon that fish species in the adjacent sea areas of thermal discharge had more kinds than other communities.

Key words: fish; community; thermal discharge; Qinshan Nuclear Power Plant

Corresponding author: XU Zhaoli. E-mail: xiaomin1957@126.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41176131); National Basic Research Program of China (2010CB428705)