

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15285

秦山核电温排水对鱼类分布的影响

蒋朝鹏^{1,2}, 徐兆礼¹, 陈佳杰¹, 孙鲁峰¹, 阙江龙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 2010 年 5 月(春季)、2010 年 9 月(夏季)和 2009 年 12 月(冬季)秦山核电海域渔业资源调查资料以及秦山核电站温排水扩散数学模拟结果, 通过秦山核电温排水海域鱼类季节密度的时空分布、优势种、优势种对鱼类总数的贡献, 探讨并分析了秦山核电海域温排水对鱼类分布的影响。结果显示, 春季、夏季和冬季的尾数密度分别为 5.55×10^3 ind/km²、 22.10×10^3 ind/km² 和 10.52×10^3 ind/km², 重量密度分别为 33.80 kg/km²、59.06 kg/km² 和 66.46 kg/km²。秦山核电海域渔业资源数量季节变化的规律与其他海域相反, 冬季最高, 春夏季较低, 主要与冬季温排水海域具有暖池效应, 形成部分鱼类滞留在此越冬有关。温排水平面分布对鱼类分布有重要的影响。主要表现在夏季温排水区域鱼类密度低于其他水域, 冬季相反, 鱼群滞留在温排水热羽区域, 因而显示出温排水海域有较高的鱼群密度。温排水对不同适温习性鱼类影响不同, 暖温种能够适应一定的低温, 例如, 刀鲚(*Coilia ectenes*)可以在温排水水域越冬, 而对高温有耐受性的棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)夏季在温排水水域成为优势种。鱼类优势种的适温性决定着鱼群的分布特征, 冬季最重要的优势种为刀鲚, 在尾数上的贡献率高达 45.02, 由于该种在温排水的热羽区域分布密集, 形成温排水水域鱼群密度大于周边水域的现象。由于温排水改变了渔场环境, 导致新的越冬场的形成, 有可能形成新的渔汛, 引起当地渔场属性的改变。

关键词: 秦山核电; 温排水; 鱼类; 优势种

中图分类号: S931.1 文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)02-0478-11

秦山核电厂(下简称秦山核电)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 500 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。秦山核电发电所形成的温排水排放达到 520 m³/s, 超过中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^[1]。

滨海核电站温排水的排放, 可能引起排水口附近海域水温大面积持久性增高, 从而改变海洋环境^[2]。有关温排水排放所引起的海洋生态效应

研究, 国内已有若干报道。例如, 刘胜等^[3]对大鵬湾核电站温排水对浮游植物种群结构和数量的影响进行研究; 李亚红等^[4]研究分析了大港发电厂温排水出水口附近海域浮游动物群落结构及平面分布; 谢礼等^[5]研究分析了电厂温排水对附近海域小型底栖动物群落结构的影响; 张维翥^[6]对大亚湾核电站温排水影响鱼卵仔鱼分布的研究; 张俊彬等^[7]研究并分析了阳江东平核电站邻近海域温排水对鱼卵仔鱼的影响。但迄今为止, 国内尚未见核电海域温排水对鱼类分布特征影响的研究。国际上, 核电站温排水对水生生态环境和鱼类分布影响的研究普遍受到重视。例如, 美国、

收稿日期: 2015-07-17; 修订日期: 2015-08-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176131); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201305027-8).

作者简介: 蒋朝鹏(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋科学研究. E-mail: jcpjcp@163.com

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

西欧等发达国家针对水生环境的热影响方面相继进行了研究^[8-11]。美国 Argonne 国立实验所^[12]对核电站温排水与鱼群分布的关系进行了研究分析,结果显示在低温季节鱼群频繁出入于热羽流区域,而在高温季节则回避该海区。在日本则进行了一些与鱼类生存各阶段相关试验及验证研究,为温排水的热影响提供了一些有益的参考^[13]。

本文根据春、夏和冬季在秦山核电海域开展的渔业资源调查资料,对照秦山核电温排水扩散数学模拟的结果,分析研究了春、夏和冬季杭州湾秦山核电海域温排水对鱼类数量分布变化的影响,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,充实中国在这一领域研究的理论和成果。在实践上,为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 研究区域与方法

1.1 调查时间、区域和方法

杭州湾秦山核电温排水海域分别于2010年5月(春季)、2010年9月(夏季)和2009年12月(冬季)进行了渔业资源调查,该海域共设置了12个拖网站位(120.95°~121.06°E, 30.48°~30.51°N)(图1)。调查按《海洋水产资源调查手册》^[14]和《海洋调查规范》(GB12673-2007)进行,渔业资源拖网调查船为沪南渔 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,对渔获物中的鱼类分物种的尾数和重量进行统计,记录网产量,并对每个品种进行生物学测定(记录体长、体重、成幼体等)。依据性腺是否成熟来区分成鱼和幼鱼。

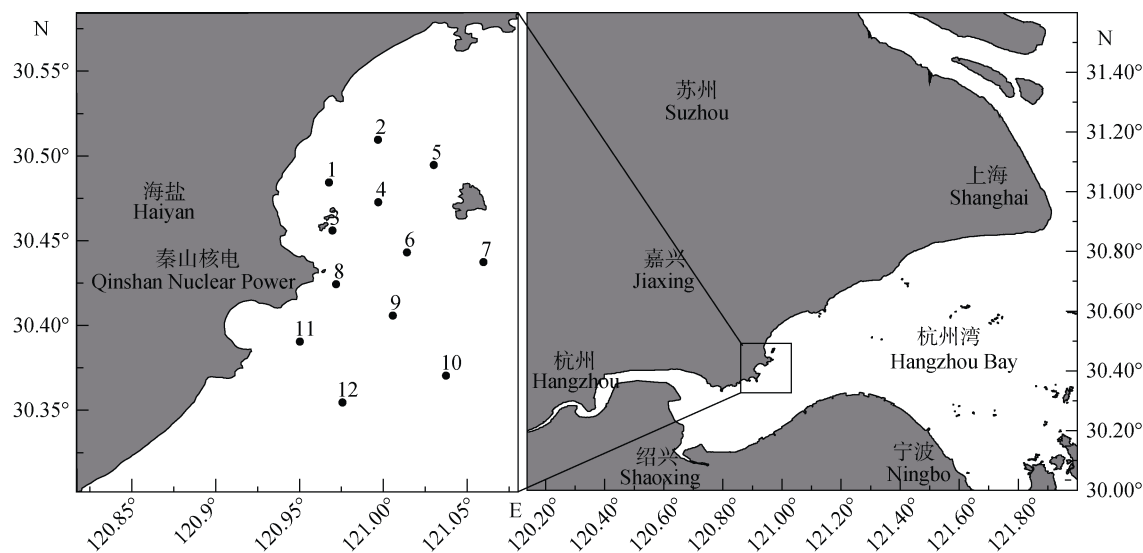


图1 调查站位分布

Fig.1 Sampling stations

1.2 数据处理方法

鱼类资源密度的估算采用的是依据詹秉义提出的扫海面积法^[15],用如下公式计算各站位物种的尾数密度和重量密度。

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

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 ind/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: ind/h);

a_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^[17]的相对重要性指数 (IRI) 来确定, 其计算公式如下:

$$\text{IRI} = (N + W)F$$

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。本文中以 $\text{IRI} \geq 1000$ 的鱼类为主要优势种。

对鱼类数量变化的分析采用的是徐兆礼文献报道中方差贡献分析方法^[18], 分析鱼类数量变化受鱼类优势种的影响, 计算过程中因变量为鱼类总重量密度或总尾数密度, 自变量为各优势种重量密度或尾数密度。本文采用 Excel 和 Surfer8 进行数据处理和调查站位分布图等的绘制。本文秦山核电温排水扩散, 主要引用中国辐射防护研究院针对秦山核电现有 1~3 期工程温排水扩散进行数值模拟的结论^[19-20]。

2 结果与分析

2.1 温排水海域鱼类平均密度

该调查水域春、夏和冬季的 3 次拖网调查中鱼类重量密度冬季最高, 夏季次之, 春季最低; 而尾数密度是夏季最高, 冬季次之, 春季最低。春季、夏季和冬季的重量密度平均值分别为 33.80 kg/km^2 、 59.06 kg/km^2 和 66.46 kg/km^2 , 尾数密度平均值分别为 $5.55 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$ 、 $22.10 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$ 和 $10.52 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$ (图 2)。

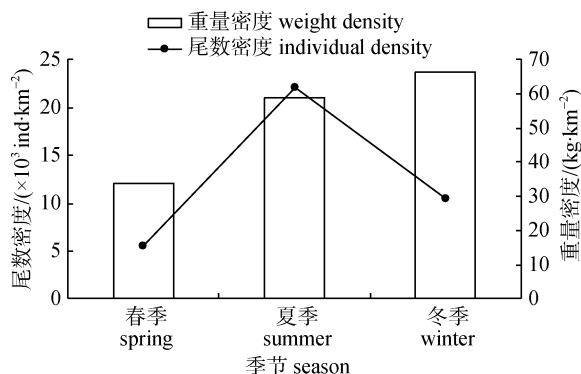


图 2 杭州湾秦山核电海域鱼类平均密度

Fig. 2 Average density of fish in Hangzhou Bay

2.2 温排水影响海域鱼类密度分布特征

春季, 调查水域东南部靠外的 10 号站位鱼类尾数密度最高, 为 $12.32 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$ (图 3)。其中棘头梅童鱼 (*Collichthys lucidus*) 和六丝钝尾虾虎鱼 (*Amblychaeturichthys hexanema*) 尾数密度最高且均为 $3.04 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$, 占接近一半。春季温排水海域鱼类尾数密度分布 (图 3) 无明显规律。

夏季, 调查水域东南部靠外的 10 号站位鱼类尾数密度明显最高, 其尾数密度为 $42.60 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$ (图 3)。其中棘头梅童鱼尾数密度明显高于其他种类, 尾数密度为 $30.45 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$, 且它的出现率为 100%, 数量比例最大为 43.9%。西部的 1 号、3 号和 8 号站位尾数密度均较低, 主要物种均为棘头梅童鱼。夏季鱼类尾数密度分布在温排水海域 (图 3) 呈现南部高, 北部低态势。

冬季, 调查水域北部的 4 号站位鱼类尾数密度最高, 其尾数密度为 $23.94 \times 10^3 \text{ ind/km}^2$, 主要种类为睛尾蝌蚪虾虎鱼 (*Lophiogobius ocellicauda*) 和刀鲚 (*Coilia ectenes*)。依次为西部的 3 号、1 号和 8 号站位, 主要物种分别为刀鲚、棘头梅童鱼和睛尾蝌蚪虾虎鱼。冬季鱼类尾数密度分布在温排水海域 (图 3) 呈现北部高, 南部低态势。

春季, 鱼类重量密度 (图 4) 最高站位出现在调查水域东南部的 10 号站位, 为 104.04 kg/km^2 。主要种类为棘头梅童鱼。春季温排水海域鱼类重量密度分布无明显规律。

夏季, 鱼类重量密度 (图 4) 最高站位出现在调查水域西部的 3 号站位, 重量密度高达 95.12 kg/km^2 。主要种类为棘头梅童鱼和龙头鱼 (*Harpodon nehereus*)。夏季温排水海域鱼类重量密度分布南部高, 北部低。

冬季, 鱼类重量密度 (图 4) 最高站位出现在调查水域东部的 3 号站位, 重量密度为 139.93 kg/km^2 。主要种类是刀鲚。西部的 1 号和 8 号站位重量密度分别为 97.79 kg/km^2 和 87.81 kg/km^2 , 主要种类分别为棘头梅童鱼和刀鲚。冬季温排水海域鱼类重量密度分布北部高, 南部低。

2.3 主要优势种的相对重要性指数

春季, 凤鲚是调查海域最重要的物种 (表 1),

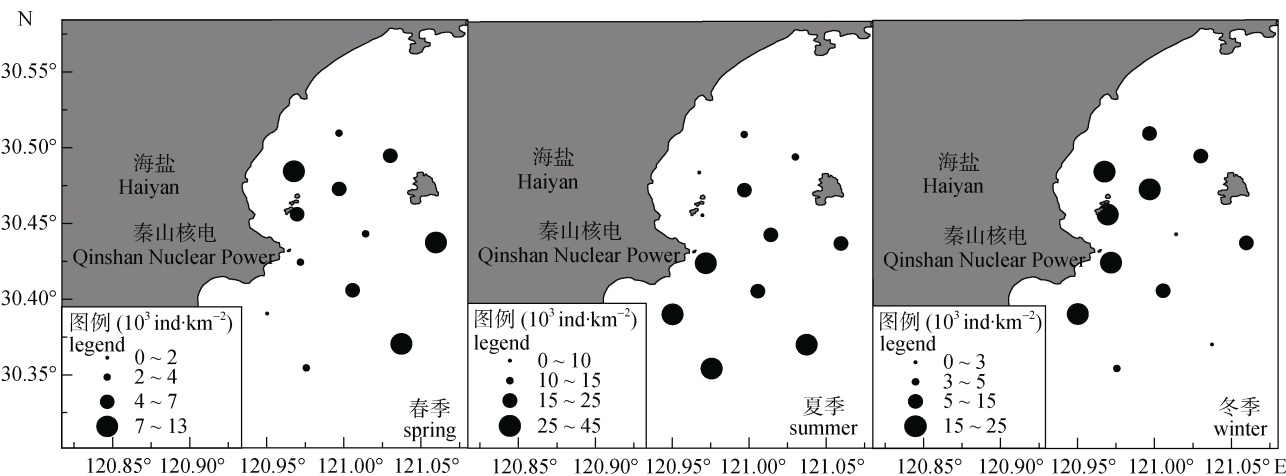


图 3 杭州湾秦山核电海域鱼类尾数密度分布

Fig. 3 Distribution of fish in individual in Hangzhou Bay

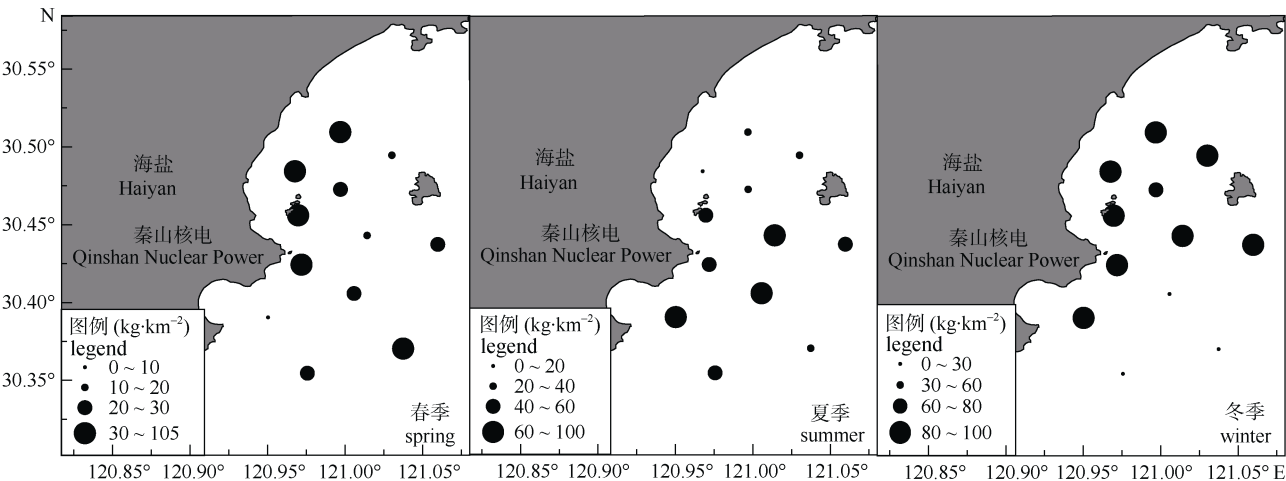


图 4 杭州湾秦山核电海域鱼类重量密度分布

Fig. 4 Distribution of fish by weight density in Hangzhou Bay

表 1 鱼类主要优势种生态特征

Tab. 1 Ecological character of main fish dominant species

取样季节 sampling season	优势种 dominant species	重量密度/(kg·km ⁻²) weight density	尾数密度/(10 ³ ind·km ⁻²) individual density	W%	N%	F%	IRI
春季 spring	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	8.68	1.92	25.67	34.59	91.67	5523.63
	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	15.44	0.55	45.70	9.89	66.67	3705.44
	莱氏舌鲷 <i>Cynoglossus lachneri</i>	3.24	0.79	9.58	14.17	91.67	2177.79
	睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobiuso cellicauda</i>	1.97	0.42	5.82	7.55	100	1336.76
夏季 summer	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	36.26	9.70	61.40	43.90	100	10529.39
	睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobiusocellicauda</i>	3.11	6.65	5.27	30.11	91.67	3242.89
	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	3.29	3.16	5.57	14.28	100	1984.24
	龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>	8.34	0.92	14.12	4.14	91.67	1673.81
冬季 winter	刀鲚 <i>Coiliaetenes</i>	18.37	4.22	27.63	40.15	100	6778.13
	睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobiusocellicauda</i>	10.10	4.14	15.19	39.37	91.67	5001.29
	棘头梅童鱼 <i>Collichthyslucidus</i>	29.83	1.30	44.88	12.32	83.33	4766.99

注: *W* 指优势种的重量百分比, *N* 指优势种的尾数百分比, *F* 指优势种的出现率, *IRI* 指相对重要性指数。
Note: *W* means weight percentage of dominant species in the fish; *N* means individual percentage of dominant species in the fish; *F* means occurrence frequency of dominant species in the fish; *IRI* means dominance.

仅有一个站位没有出现,且数量比例最大,例如尾数百分比为 34.59%,相对重要性指数为 5523.63,明显高于其他种类。春季出现的凤鲚几乎为成鱼。

夏季,棘头梅童鱼是最重要的物种(表 1),出现率为 100%,且数量比例最大,例如,尾数百分比为 43.90%,重量百分比为 61.40%,相对重要指数为 10529.39,明显高于其他种类。夏季出现的棘头梅童鱼全部为幼鱼。

冬季,最重要的物种为刀鲚、睛尾蝌蚪虾虎鱼和棘头梅童鱼(表 1)。其中,刀鲚出现率为 100%,尾数百分比最大,为 40.15%,重量百分比为 27.63%,相对重要性指数最高,为 6778.13,其次为睛尾蝌蚪虾虎鱼和棘头梅童鱼,他们的相对重要性指数相差不大。

2.4 鱼类优势种数量对鱼类总数量的贡献

从表 2 可见,春季,调查海域鱼类总重量密

度与棘头梅童鱼和凤鲚相关,棘头梅童鱼的重量贡献率高达 0.93,为重量密度最高的种。总尾数密度则仅与棘头梅童鱼相关,该鱼种贡献率高达 0.69,与其他优势种的相关关系不明显。调查海域春季各种幼体比都较小,成鱼居多。

夏季,调查海域总重量密度和总尾数密度与优势种的相关性都较明显,棘头梅童鱼重量的贡献率高达 0.91,为重量密度最高的种,棘头梅童鱼尾数的贡献率高达 0.75,也是尾数密度最高的种。该调查海域秋季各种幼体比都较高,大部分为幼鱼。

冬季,调查海域总重量密度和总尾数密度与优势种的相关性非常明显,棘头梅童鱼重量的贡献率高达 0.85,为重量密度最高的种,刀鲚尾数的贡献率高达 0.67,为尾数密度最高的种。该调查海域冬季各种幼体比相当,成鱼和幼鱼比例相差不大。

表 2 鱼类优势种密度对总密度的贡献
Tab. 2 Contribution of main dominant species to total weight and individual of fishes

取样季节 sampling season	优势种 dominant species	重量 weight			尾数 individual			幼体比 percentage of young fishes %
		β	t	P	β	t	P	
春季 spring	凤鲚 <i>Coilamystus</i>	0.14	3.15	0.01			0.05	21.98
	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	0.93	21.58	0.00	0.69	2.98	0.01	1.61
	莱氏舌鲈 <i>Cynoglossus lachneri</i>			>0.05			>0.05	13.40
	睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobiuso cellicauda</i>			>0.05			>0.05	6.43
夏季 summer	凤鲚 <i>Coilamystus</i>			>0.05	0.20	6.04	0.00	100
	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	0.91	18.38	0.00	0.75	18.59	0.00	100
	睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobiuso cellicauda</i>	0.13	2.80	0.02	0.60	18.36	0.00	100
	龙头鱼 <i>Harpodonne hereus</i>	0.13	2.31	0.05	0.11	2.86	0.02	83.33
冬季 winter	睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobiuso cellicauda</i>	0.31	17.14	0.00	0.59	40.38	0.00	100
	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	0.85	53.23	0.00	0.24	16.87	0.00	11.59
	刀鲚 <i>Coilia ectenes</i>	0.53	29.24	0.00	0.67	45.02	0.00	97.90

注: β 为标准回归系数; t 为 t 检验值; P 为显著性。
Note: β means standard regression coefficient; t means t value; P means significance.

2.5 温排水对鱼类优势种平面分布的影响

研究表明,温排水在冬季对鱼类分布影响比较明显,在其他季节对鱼类的分布影响不明显。根据秦山核电一、二、三期冬季的等温线与渔业资源密度叠加结果(图 5)可见:

冬季,刀鲚数量分布受水温影响明显,尾数

和重量密度分布趋于一致,均呈现较高温度的等温线附近鱼类分布密集,温排水影响海域鱼类尾数和重量密度均是北部高,南部低。在调查海域西部的 1 号、3 号和 8 号站位靠近核电站排水口,刀鲚集中分布在这 3 个站位附近,在正对排水口的 3 号站位刀鲚尾数密度和重量密度都最大。

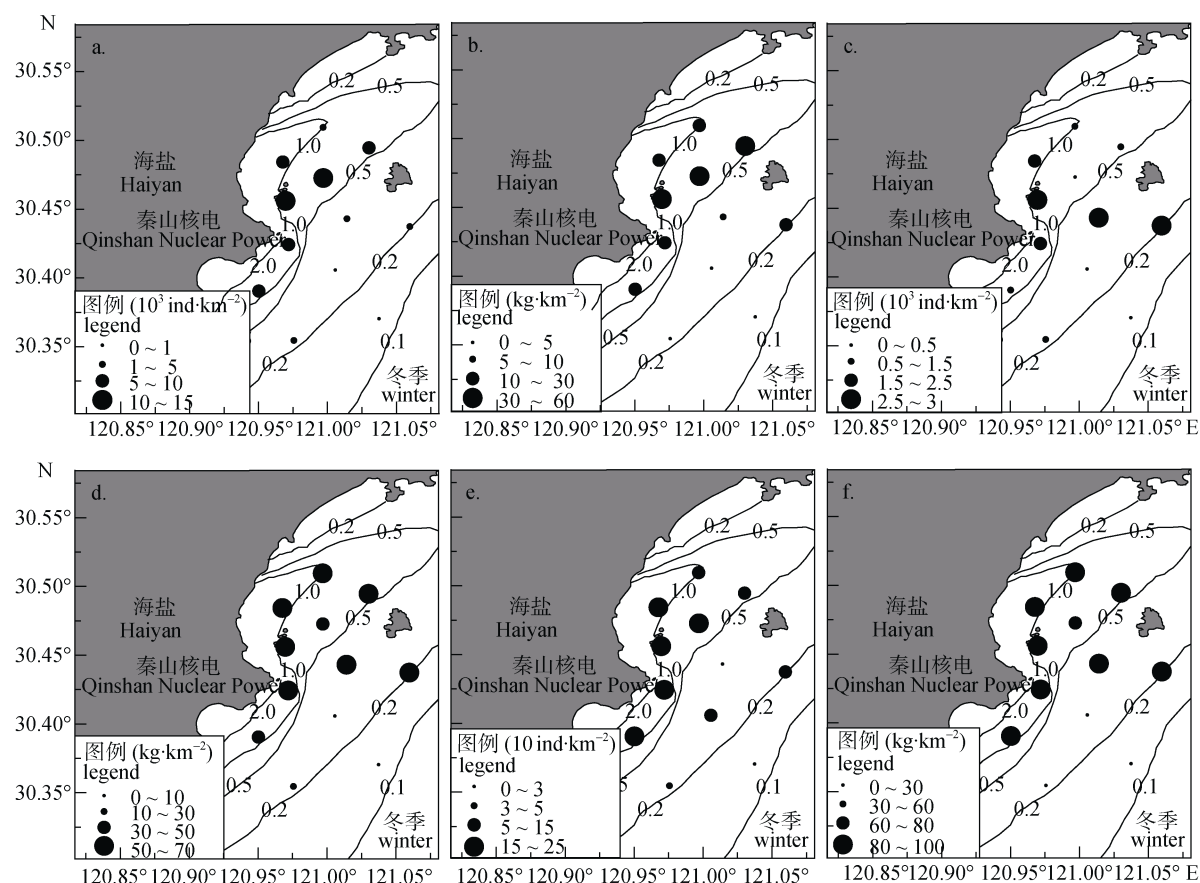


图 5 冬季鱼类与温排水扩散数值模拟

a. 刀鲚尾数密度; b. 刀鲚重量密度; c. 棘头梅童鱼尾数密度; d. 棘头梅童鱼重量密度; e. 冬季尾数密度; f. 冬季重量密度。

Fig. 5 Numerical simulation on the diffusion of fish and warm water in winter

a. Individual density of *Coilia ectenes*; b. Weight density of *Coilia ectenes*; c. Individual density of *Collichthys lucidus*; d. Weight density of *Collichthys lucidus*; e. Individual density of winter; f. Weight density of winter.

冬季棘头梅童鱼重量密度分布和尾数密度分布趋势一致, 但重量和尾数分布与该海域温度分布关系不明显。位于核电站排水口的 1 号站位棘头梅童鱼尾数和重量密度均较多, 正对排水口的 3 号和 8 号站位尾数和重量密度比较多。

总体来看, 调查海域冬季鱼类数量分布与水温分布密切相关, 呈现出高温区鱼类重量密度和尾数密度分布密集, 且在调查海域的北部分布多, 南部少。调查海域西部的 1 号、3 号和 8 号站位位于秦山核电排水口, 冬季尾数和重量密度较大, 鱼类在这 3 个站位分布集中。

3 讨论

3.1 温排水对鱼类数量季节变化的影响

秦山核电温排水影响的海域不同季节鱼类密

度变化与其他水域明显不同, 其中冬季鱼类重量密度为 66.46 kg/km^2 , 春季为 33.80 kg/km^2 , 而夏季为 59.06 kg/km^2 (图 2)。调查海域冬季鱼类重量密度最高, 春季最低, 夏季较春季有所回升, 冬季鱼类尾数密度也比春季高。可见这一海域季节变化规律与其他海域不同, 出现冬季密度高而夏季低的这种相反规律。

冬季鱼类重量密度高于春夏季鱼类重量密度。约为夏季的 1.13 倍, 约为春季的 1.97 倍, 可能与温排水排放形成鱼类越冬场环境效应有一定的关系。冬季, 在核电站温排水海域水温高于其他海域, 导致部分鱼类聚集在此越冬。刀鲚原来在舟山渔场越冬, 本次调查, 该种类冬季却聚集在这一海域越冬, 因而形成冬季鱼类重量密度高于春夏季这样与其他水域^[21]不同的规律。

夏季鱼类密度比冬季低, 鱼类表现出对高温的回避效应^[22]。在浙江近海, 夏季鱼类数量往往高于冬季, 如蔡萌等^[23]报道的浙江三门湾夏季重量密度约为冬季的 3.4 倍, 尾数密度约为冬季的 6.3 倍。而本次调查中, 夏季鱼类密度比冬季低, 这可能与夏季水温较高, 当温度较高时, 主要表现为鱼类对高温水域的回避效应, 部分鱼类由于不耐高温游离这一海域, 因此夏季空间分布的特征与冬季相反。另外, 鱼类春夏季是鱼类从仔鱼长成幼鱼的季节, 由表 2 可见, 夏季幼体比较高, 几乎均为幼鱼, 导致尾数较多, 因此夏季鱼类尾数较高。

总体来讲, 冬季温排水进入水体使局部水温升高, 不同鱼类对温度的适应性不同, 因此温排水海域冬季具有暖池效应, 温度环境的改变可能导致新的越冬场的形成。反之, 夏季鱼类对温排水海域产生回避效应。秦山核电站温排水不仅对鱼类数量季节变化有影响, 还对鱼类数量的平面分布有影响。

3.2 温排水影响海域鱼类数量平面分布特征

秦山核电温排水排放对鱼类的影响较明显。在温排水海域, 冬季主要表现为鱼类聚集在温排水热羽区域, 温排水区域鱼类数量高于非温排水区域。夏季与此相反, 鱼类有偏离温排水水团的倾向。

鱼类是一种对水温的变化敏感的变温动物, 其体温调节能力比较弱。盛连喜等^[24]报道结果表明温排水对鱼类有十分重要的影响, 一些鱼类比较适合在温暖的环境下生存。受秦山核电站排水口位置以及水文动力环境影响, 温排水水团主要影响调查海域的北部, 使得调查海域北部温度高于南部。鱼群在冬季趋向于较暖的水体栖息, 而温排水海域水温比其他海域水温高, 使得一些鱼类比较喜好温排水海域水温, 因此造成冬季调查海域鱼类分布北部高, 南部低的特征, 温排水对鱼类分布影响主要表现为鱼类趋向温排水海域栖息。

春季水温范围与一些鱼类生存温度较接近, 叠加温排水后的水温对鱼类影响不大, 表现上显示出春季调查海域鱼类分布规律不明显(图 3 和图 4), 温排水对鱼类分布影响较小。

夏季水温本身较高, 而叠加温排水之后往往会高于鱼类正常生活的温度。由此, 造成一些鱼类向受温排水影响较小的南部水域转移, 因此表现出鱼类分布南部高北部低的与冬季相反的趋势。夏季温排水对鱼类分布影响主要表现在温排水对鱼类的驱赶作用。

从总体上讲, 冬季鱼类集中分布在热羽区域, 而夏季回避该区域。秦山核电海域受热排放的影响, 冬季温排水排入水体使水体温度环境改变引起鱼类在温排水区域分布较多, 而夏季温排水影响下鱼类远离温排水区域, 最终形成不同水温环境下鱼类数量分布的差异, 影响着核电站附近水文环境。

3.3 温排水对不同温度适应优势种分布的影响

温排水平面分布对鱼类分布有重要影响, 而这种影响主要是通过优势种分布来实现的。由于不同优势种的适温性不同, 对温排水的响应也不同。这里以暖温性的刀鲚和暖水性棘头梅童鱼为代表进行分析。

刀鲚是中国重要的经济鱼类, 分布在中国渤海和通海江河, 如长江和钱塘江等^[25]。刀鲚是暖温性鱼类, 平时生活在海里, 每年 2 月初亲鱼由海入江并溯江而上进行生殖洄游, 每年 3 月、4 月的生殖季节逐渐及集中分布, 沿江进入湖泊、支流或通海江河干流中繁殖活动。刀鲚对水温环境要求较高, 每年的 3 月刀鲚进入杭州湾进行繁殖活动, 幼鱼顺水洄游至河口育肥生长和越冬, 不做远距离洄游^[26]。秦山核电海域由于温排水的影响冬季水温与其他海域春季水温相近, 因此刀鲚提前在冬季就开始繁殖活动, 并分布在长期较高水温的温排水海域越冬。刀鲚在冬季出现并成为优势种, 温排水进入秦山核电温排水海域后该海域成为刀鲚的越冬场。根据徐钢春等^[27]水温对刀鲚幼鱼指标影响的实验结果, 20~24℃是刀鲚幼鱼生长发育的适温范围。在温度为 16~28℃时, 刀鲚幼鱼耗氧率随着温度升高而升高, 呈幂函数关系, 即刀鲚幼鱼随着温度升高而其窒息点升高速率变大。因此, 冬季刀鲚密度较大, 分布集中在温排水海域, 温排水导致刀鲚进入核电温排水海域

越冬, 使该海域成为刀鲚的越冬场。

棘头梅童鱼是温水性的小型经济鱼类, 其适温范围广, 主要分布在东海和黄海。每年的4—6月和9—10月是棘头梅童鱼的渔汛旺盛时期。棘头梅童鱼在浅海短距离洄游, 主要在河口咸淡水交汇处栖息。棘头梅童鱼虽然适温范围广, 但夏季水温很高, 棘头梅童鱼回避该海域而向温排水海域外侧转移。因此, 夏季棘头梅童鱼远离调查海域北部的温排水区域。

综上所述, 刀鲚提前进入温排水海域越冬, 棘头梅童鱼能够适应高温环境, 对温度要求不严格, 而夏季温度过高棘头梅童鱼也会表现出回避作用。优势种刀鲚和棘头梅童鱼的这种对温度的适应性影响着总数量的变化。

3.4 鱼类优势种对总数量变化的贡献

秦山核电海域春、夏和冬季渔业资源调查数据经过相对重要性指数 $[IRI=(N+W)F]$ 计算(表2)并分析, 结果显示主要优势种对总分布的贡献较大, 鱼类总数量分布与优势种分布密切相关。

冬季主要优势种刀鲚的数量分布呈现出温排水海域北部高南部低的趋势, 与鱼类数量分布基本一致。鱼类各物种对鱼类密度回归的贡献分析结果显示(表1和表2), 刀鲚只在冬季出现, 尾数密度和重量密度的百分比都较高, IRI 和 β 值有明显的优势。可见, 冬季鱼类数量变化动力主要来自优势种刀鲚的回归贡献。

春季主要优势种凤鲚的数量分布与鱼类数量分布基本一致, 呈现出核电站排水口分布较多, 其他站位分布无规律。表1和表2显示, 春季凤鲚尾数密度和重量密度的百分比均较高。可见, 春季鱼类数量变化动力主要来自优势种凤鲚的回归贡献, 两者有着非常密切的关系。

夏季主要优势种棘头梅童鱼的数量分布呈现出南部高北部低的变化趋势, 与鱼类分布变化一致。表1和表2显示, 夏季棘头梅童鱼的尾数密度和重量密度的百分比都较高, IRI 和 β 值有明显的优势。可见, 夏季鱼类数量变化动力主要来自优势种棘头梅童鱼回归贡献, 两者有着非常密切的关系。

综上所述, 冬季优势种刀鲚贡献最大, 它的数量分布与冬季总数量变化一致, 夏季优势种棘头梅童鱼的贡献最大, 它的数量分布与鱼类总数量分布一致。温排水海域鱼类主要优势种数量分布影响鱼类总数量分布, 最终影响渔场环境。

3.5 温排水对渔场环境和渔场属性的影响分析

温排水排放不仅能改变附近海域水温分布, 还能引起温排水海域鱼类对栖息地季节的选择, 对附近海域鱼类种类组成以及数量分布均有一定程度的影响。温排水促使附近海域水温升高, 导致附近海域成为鱼类越冬场, 改变渔场属性。

温排水排放改变了当地海域水温季节特征, 温排水海域成为鱼类的越冬栖息地。查阅以往资料显示刀鲚越冬场是舟山渔场, 在杭州湾冬季并未发现刀鲚, 而春夏季节出现刀鲚比例较大, 例如, 陈华等^[28]在舟山渔场调查研究中3月出现刀鲚比例较大, 6月比3月暖温种数量上增加较多, 而冬季并未发现刀鲚。本文中冬季出现刀鲚并且成为优势种, 说明冬季刀鲚数量变化与温排水影响密切相关。可见, 温排水影响了当地海域渔场属性, 在冬季成为部分鱼类的越冬场, 可能形成一个新的渔汛。

温排水对当地海域水温平面分布也造成影响, 对出水口附近海域水温影响最大。例如, 冬季水温温度梯度密集分布, 鱼群在较高等温线附近分布密集, 并且集中在温排水排放范围内, 水团交汇处两侧温度较高侧鱼类分布集中, 可能形成一个新的渔场。

综上, 秦山核电海域温排水对附近海域水温以及鱼类数量分布和栖息地季节变化均有着不同程度的影响。温排水能引起渔场水温环境的变化, 形成暖池效应, 从而引起温排水海域鱼类群落、种类和数量分布的变化, 导致鱼类越冬场的环境效应, 改变了附近渔场属性。

致谢: 本文撰过程中沈晓民老师在论文构思和写作过程给予很大帮助, 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] Zhang H R, Zhao Y, Yang H, et al. Study on the temperature

- rise characteristics and influence effects of thermal discharge from coastal power plant in Xiangshan Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013(2): 274–281.[张惠荣, 赵瀛, 杨红, 等. 象山港滨海电厂温排水温升特征及影响效应研究[J]. 上海海洋大学学报, 2013(2): 274–281.]
- [2] Yu F, Zhang Y X. The review on the effects of thermal effluent from nuclear plants on the marine ecosystem[J]. Radiation Protection Bulletin, 2008(1): 1–7.[於凡, 张永兴. 滨海核电站温排水对海洋生态系统影响的研究[J]. 辐射防护通讯, 2008(1): 1–7.]
- [3] Liu S, Huang H, Huang L M, et al. Ecological response of phytoplankton to the operation of Daya Bay nuclear power station[J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(2): 9–12. [刘胜, 黄晖, 黄良民, 等. 大亚湾核电站对海湾浮游植物群落的生态效应[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(2): 9–12, 25.]
- [4] Li Y H, Zhou Z, Zhao X F, et al. Impact of Thermal Water Discharge on Zooplankton in the Sea Area near Dagang Power Plant[J]. Environmental Protection Science, 2014(3): 5–8. [李亚红, 周箴, 赵小芳, 等. 大港发电厂温排水对附近海域浮游动物影响研究[J]. 环境保护科学, 2014(3): 5–8.]
- [5] Xie L, Lin X, Zhu Y-F. Community structure of meiofauna near Guohua Power Plant in Ninghai in Xiangshan Bay[J]. Ecological Science, 2012(2): 167–172. [谢礼, 林霞, 朱艺峰. 象山港国华宁海电厂附近海域小型底栖动物的群落结构[J]. 生态科学, 2012(2): 167–172.]
- [6] Zhang W Z. The influences of thermal water from the nuclear power station on the distribution of fish eggs and larvae of sparidae in Daya Bay[J]. Tropic Oceanology, 1996, 15(4): 80–84.[张维翥. 核电站温排水对大亚湾鲷科鱼卵仔鱼分布的影响[J]. 热带海洋, 1996, 15(4): 80–84.]
- [7] Zhang J B, Huang Z Y. An investigation on fish eggs and larvae in sea area around planning Yangjiang nuclear plant[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 78–84.[张俊彬, 黄增岳. 阳江东平核电站邻近海区鱼卵和仔鱼调查研究[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 78–84.]
- [8] 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.[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.]
- [9] Zhang J M. Study on the thermal effect on hydrobiont and water quality for thermal discharge[D]. Nanjing: Hehai University, 2006. [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.]
- [10] Brett J R. Temperature tolerance in young Pacific salmon, genus *Oncorhynchus*[J]. J Fish Res Board Can, 1952, 9(6): 265–323.
- [11] Environmental Research Laboratory-Duluth. Temperature criteria for freshwater fish: Protocol and procedures[R]. U. S. EPA- 600/3-77-061, 1977.
- [12] Hoss D E, Costonl C, Baptist J P, et al. Effects of temperature copper and chlorine on fish during simulated entrainment in power-plant condenser cooling systems[J]. IAEA-SM, 1975, 189(19): 519–527.
- [13] Thurston R V, Russo R C, Luedtke R J, et al. Chronic toxicity of ammonia to rainbow trout[J]. Trans Am Fish Soc, 1984, 113: 56–73.
- [14] Yellow Sea Fisheries Research Institute. Survey manual for marine aquatic resources (Second Edition)[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press of China, 1981: 8.[黄海水产研究所. 海洋水产资源调查手册(第 2 版)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 8.]
- [15] Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995: 18–46, 124–130. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 18–46, 124–130.]
- [16] Yang L, Zhang X F, Tan Y G. 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. [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.]
- [17] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna and bonito in California waters[J]. Fish Bull California Depart Fish Game, 1971(152): 1–105.
- [18] Xu Z L. Dynamics of medusa abundance in the East China Sea[J]. Acta Zoologica Sinica, 2006, 52(5): 854–861.[徐兆礼. 东海水母类丰度的动力学特征[J]. 动物学报, 2006, 52(5): 854–861.]
- [19] Xu Z L. Qinshan nuclear power expansion project of thermal discharge numerical simulation, numerical simulation of low level radioactive wastewater special report[R]. Shanghai: East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, 2007. [徐兆礼. 秦山核电扩建项目温排水数值模拟、低放废水数值模拟专题报告[R]. 上海: 中国水产科学研究院东海水产研究所, 2007.]
- [20] Xu Z L. The expansion project of Qinshan nuclear power plant cooling water physical model, mathematical model of the test report[R]. Shanghai: East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, 2009. [徐兆礼. 秦山核电扩建项目(方家山核电项目)温排水物理模、数模补充试验报告[R]. 上海: 中国水产科学研究院东海水产研究所, 2009.]
- [21] Xu J, Wang C, Xu Z L. On the seasonal quantitative changes of the fish resources in the south area of northern Jiangsu shoal[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(1):

- 108–116.[徐捷, 王晨, 徐兆礼, 等. 苏北浅滩南部海域鱼类资源密度季节变化特征[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(1): 108–116.]
- [22] Jiang L F. Effects of thermal shock on fishes[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2000(2): 77–81.[姜礼燧. 热冲击对鱼类影响的研究[J]. 中国水产科学, 2000(2): 77–81.]
- [23] Cai M, Xu Z L. Species composition and density of fishes in the Sanmen Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009, 18(2): 2198–2205.[蔡萌, 徐兆礼. 浙江三门湾冬季鱼类种类组成和数量变化[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(2): 2198–2205.]
- [24] Sheng L X, Hou W L, Zhao G. Entrainment effect of power plant cooling system on young fish and postlarve shrimp[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1994 (1): 47–55.[盛连喜, 侯文礼, 赵国, 等. 电厂冷却系统对梭幼鱼和对虾仔虾卷载效应的初步探讨[J]. 环境科学学报, 1994(1): 47–55.]
- [25] Wang D T, Yang J, Jiang T, et al. A comparative study of the morphology of different geographical populations of *Coilia nasus*[J]. Journal of fisheries of China, 2012, 36(1): 78–90.[王丹婷, 杨健, 姜涛, 刘洪波, 沈新强. 不同水域刀鲚形态的分析比较[J]. 水产学报, 2012, 36(1): 78–90.]
- [26] Ge K K, Zhong J S, Wu M Q. Distribution and abundance of larval japanese grenadier anchovy *Coiliasus* in the surf zone of the Yangtze River estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(6): 923–930.[葛珂珂, 钟俊生, 吴美琴, 等. 长江口沿岸碎波带刀鲚仔稚鱼的数量分布[J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 923–930.]
- [27] Xu G C, Nie Z J, Bo Q K. Effects of water temperature on oxygen consumption rate, asphyxiant point, blood glucose content, and muscle and liver glycogen content of juvenile *Coilia nasus*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3116–3120.[徐钢春, 聂志娟, 薄其康, 等. 水温对刀鲚幼鱼耗氧率、窒息点、血糖及肌肝糖元指标的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3116–3120.]
- [28] Chen H, Xu Z L. On the quantitative change of the fish in the sea area of Qushan island during spring and summer[J]. Marine Fisheries, 2009, 31(2): 179–185.[陈华, 徐兆礼. 舟山渔场衢山岛海域春夏季鱼类数量变化[J]. 海洋渔业, 2009, 31(2): 179–185.]

Effects of the thermal discharge from Qinshan Nuclear Plant on the distribution pattern of fish

JIANG Chaopeng^{1,2}, XU Zhaoli¹, CHEN Jiajie¹, SUN Lufeng¹, QUE Jianglong¹

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 data taken from fishery resource surveying of the sea areas around Qinshan Nuclear Plant during spring (2010-05), summer (2010-09) and winter (2009-12) and the mathematical simulation results of thermal discharge diffusion in Qinshan Nuclear Plant, we studied the temporal and spatial distribution pattern of fish assemblies, the dominant species, and the contributions of dominant species to fish quantities in the water of Qinshan Nuclear Plant. The results showed that the density of fish in terms of individuals was highest in summer (22.10×10^3 ind/km²), intermediate in winter (10.52×10^3 ind/km²) and lowest in spring (5.55×10^3 ind/km²). However, the seasonal variation in fish quantities in terms of weight was different from other waters. The fish density in terms of weight was highest in winter (66.46 kg/km²), intermediate in summer (59.06 kg/km²), and lowest in spring (33.80 kg/km²). The seasonal variation in fish resource quantities was different to other seas; the densities in terms of weight were higher in winter than those in spring and summer. This was probably related to thermal discharge from the plant 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. Thus, fish assemblies aggregated in the thermal plume of the plant to overwinter. Horizontal distribution of thermal discharge has an important effect on fish distribution patterns. The fish density in the thermal discharge seas in summer was generally lower than other seas and was the opposite in winter: fish may have been stranded in the hot thermal discharge plume areas, thus showing a higher fish density. Thermal discharge has different effects on fishes with different adaptabilities to temperature; the warm temperature species that are adapted to relatively low temperature, such as *Coilia ectenes*, can overwinter in the thermal discharge seas, while *Collichthys lucidus*, which has high thermal tolerance, became the dominant species in the thermal discharge-impacted seas in summer. The adaptability to temperature of the dominant species of fish determines the distribution characteristics of fishes; the most important dominant species in winter was *Coilia ectenes*, whose contribution rate on the mantissa was up to 45.02. They aggregated densely in the hot thermal discharge plume area, which caused the fish density in the thermal discharge seas to be greater than the surrounding waters. The thermal discharge-induced change in the fishes' environment led to the formation of new wintering grounds, which would be likely to form a new fishing season, leading to changes in local fishery attributes.

Key words: Qinshan Nuclear Plant; thermal discharge; fish; dominant species

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