

刍议我国直流冷却电厂冷却用水生态危害与减损

唐森铭¹, 商照荣², 黄浩^{1*}, 张玉生¹

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要:根据我国滨海电厂发电现状与发展趋势, 本研究评述了我国火电和核电厂直流冷却需水量以及电厂规模化直流冷却用水对海洋生态系统的影响, 包括取水卷塞效应导致生物伤害及其机理, 卷载和温排水对海洋生物和海洋生态系统的负面影响。本研究估算了取排水导致的卷塞和卷载损失量。同时, 以大亚湾生态系统变化为例, 探讨了取排水的可能影响, 提出了底栖贝类食物链形成的假设。由于电厂取排水对海洋生态系统构成实际和潜在危害, 因此, 有必要采取措施缓解电厂取水造成的环境影响。在对电厂的取排水海洋环境评估的基础上, 电厂可以利用最佳实践技术(Best Technique Available, BTA), 避免或减轻取排水对海洋生态系统的影响, 维护冷却海水资源开发的可持续性。减损措施不仅有利于海洋生态保护, 也有利于电厂的冷源安全。

关键词:海洋环境科学; 直流冷却; 卷塞; 卷载; 渔业资源; 最佳实践技术

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2020. 04. 016

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2020)04-0590-10

海洋作为全球最大的生态系统, 在全球气候调节、污染物降解以及生态系统健康维护等方面发挥了重要作用。近海海洋水体是生态系统的重要组成部分, 它具有生态平衡、气候调节、净化环境、渔业生产、运输、旅游、教育等重大功能^[1]。除此之外, 人们还利用海水进行降温, 赋予了海水冷却功能。迄今为止, 世界滨海的火电和核电厂绝大多数使用海水进行循环冷却。我国的滨海电厂基本上使用海水直接冷却, 为发电机组降温。随着滨海热电厂数量的增加, 冷却用水量剧增, 余热排放导致高温海水大量进入海洋, 引发了一系列生态与环境问题。电厂取水冷却过程中, 在高温、高压、机械以及药物投放等多种物理化学因子的作用下, 大部分生物不适应突变的环境而死亡, 导致水体中生物消失、水体污染。水生生物的栖息空间、水环境质量和海洋冷却用水需求之间的矛盾日益尖锐, 海洋生态系统结构和服务功能退化^[2-6]。

冷却水使用对生态系统的负面影响伴随着电厂取水冷却过程持续存在。但是, 过去人们主要关注温排水造成的海洋生态系统影响。电厂取水需求增

加后, 人们发现取水口同样存在生物伤害和海洋生态系统危害^[7-9]。当今全球海洋生态系统受到海洋污染、栖息地破坏、过度捕捞和外来物种入侵等四大威胁, 冷却水取水和排水的负面影响几乎涉及了所有方面。温排水改变局部海洋热平衡, 改变水生生物栖息环境; 温排水中的余氯和余热导致水体污染; 取水伤害鱼类和其他小型生物, 成为过度捕捞的又一种方式; 电厂取水口外滋生外来物种, 如斑马贻贝(*Dreissena polymorpha*)等^[10]。目前, 电厂大量取用海水产生的海洋环境影响仍然没有得到充分认识。实际上, 海洋植物的光合作用, 动物觅食、生长和繁殖, 生态系统的稳定和功能正常, 都不能离开海水。海洋是全球生命支持系统的一个基本组成部分, 冷却取水实现了海水降温的附加价值, 但在海洋生命系统内取水, 挤占海洋生态空间的事实很多人混然不知。

本研究以我国规模化冷却取排水为背景, 对海洋生态系统潜在的负面影响进行阐述。特别就电厂冷却取水伴生的卷塞和卷载效应以及对渔业资源和鱼卵、仔稚鱼的影响进行了分析, 提出了冷却用水过

收稿日期: 2019-09-02

基金项目:自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费资助项目(2016009); 生态环境部核电厂取排水指南和监管要求资助项目; 生态环境部核电厂温排水问题研究资助项目

作者简介:唐森铭(1949—), 男, 研究员; E-mail: diatoms@126.com

* 通讯作者: 黄浩(1977—), 男, 博士, 副研究员; E-mail: huanghao@tio.org.cn

程中防范生物伤害的减损措施。本研究旨在为滨海电厂建设以及海洋生态系统保护和修复提供科学依据和技术支撑。

1 电厂对冷却水的需求

1.1 电厂冷却水系统的冷却方式

以核电厂为例,电厂反应堆内铀燃料裂变过程中产生大量的热量,通过传导加热水体,产生蒸汽驱动涡轮机发电。为了提高发电效率,需要将蒸汽冷凝回用,使之再进入加热系统循环使用。限于当前技术,目前还不能够充分利用核能产生的全部热能,大约 2/3 的热量通过海水交换以废热的形式排放进入海洋环境。电厂的冷却降温可通过多种方式进行,不同的冷却方式对海洋环境影响不同,目前在滨海电厂使用的主要有以下 2 种方式。

1.1.1 直流冷却系统 直流冷却系统是使用最多的也是效率最高的热排放方式。海水直流冷却技术以原海水为冷却介质,海水经换热设备完成一次性冷却后,直接排放处理。该技术具有取水温度低、冷却效率高以及系统运行管理简单等优点,但也存在取水量大、工程一次性投资大、排污量大和海洋水体污染明显等问题^[11]。直流冷却系统不会重复利用冷却水,废水排放后在自然环境中冷却。由于废水排放温度不能太高(一般不高于 7℃),因此每天需要抽取数量巨大的海水进行热交换。直流冷却是最简单的热排放方式,低温海水循环后加热,再返回水源地。直流冷却水很少蒸发损耗,但产生了大量热污染,从而改变水质和生物栖息地环境。直流冷却对水质要求高,低温、洁净是首要条件。取水口需防范包括生物在内的各种垃圾堵塞,管道系统需要添加杀生剂灭杀海洋生物,防止生物附着,确保供水顺畅。电厂取水区应回避生态敏感区和高生产力水域,加上限制温排水等,我国滨海发电厂可用的选址不多。

1.1.2 内循环冷却系统 该系统利用水体通过冷却塔蒸发带走热量,故也称湿式冷却系统或二次循环冷却系统。与直流冷却系统相比,内循环冷却系统减少了取水量,不向水体排放热量,对水生生态系统的影响减少 95% 左右。因其环境友好,1970 年以来美国大多数电厂选择使用内循环冷却系统^[11]。为了解决淡水不足和直流冷却用水量大的问题,海水循环冷却技术应运而生。该技术应用海水循环冷却取代直流冷却完成热量交换,目前我国已经有十万吨级设备投运^[12],该技术的大型化、工程化及大型发电机组技术进程研制尚需加快。

综上,直流冷却方式效率较高,技术方法相对简

单。为了获得稳定的低温海水供应,大部分电厂建设在滨海地区,以方便取用大量海水,获得最大程度的冷却效益。我国已投入使用的有 47 台和正在建设的有 15 台核电机组全部位于滨海地带^[13],以直流冷却方式运行。与发达国家比较,我国直流冷却电厂占有的比例高,潜在的环境问题较大。

1.2 冷却水用水量

电厂发电需要大量冷却水对涡轮机的高温蒸汽进行冷却,核电厂生产 1×10^6 kW 发电量大约每秒需要冷却水 75 m^3 ,火电厂用水量略低,为每秒 50 m^3 ^[7]。按照 1×10^6 kW 发电量需要冷却水 $75 \text{ m}^3/\text{s}$ 计算,24 h 运行需抽取 $6.48 \times 10^6 \text{ m}^3$ 海水,全年需要冷却水数量为 $2.365 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

我国 2012 年核发电 1.257×10^7 kW,使用冷却水 $2.973 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。根据规划,2020 年我国滨海核电厂装机容量将达到 5.800×10^7 kW,估算每年冷却水使用量达 $1.372 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。我国 2030 年核电装机容量将达到 1.370×10^8 kW 的建议目标,如全部机组仍然使用直流冷却,其用水量将是 2020 年的 2.36 倍,达 $3.240 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (图 1)。

2012 年全国直接利用海水共计 $6.631 \times 10^{10} \text{ m}^3$,主要为火(核)电冷却用水^[18],大约是同年核电厂用水量($2.973 \times 10^{10} \text{ m}^3$)的 2 倍。以大亚湾海水容积为 $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 来算,2012 年我国火(核)电冷却水用量需要 12 个大亚湾的容量,其中仅核电取水一项即消耗了 6 个大亚湾容量的海水以及其中的海洋生物。

未来,环境污染较大的小型电厂建设将受到限制,海水淡化、海水替代工业用水、大生活用海水等不同用途的用水将进一步增加。与世界发达国家比较,我国冷却水使用量还处于较低水平,用水量成倍增长是长期趋势,将来电厂取排水的环境影响将更加严重。

2 直流冷却用水的负面效应

直流冷却是电厂用水量最大的冷却方式,冷却过程中进入冷却系统的生物体在物理和化学作用下几乎没有生还的可能^[8]。温排水重新排入海洋,导致局部水体温度升高,不同程度地改变水体水质和水生生物的栖息环境。在取水口滤网上卷塞的生物,在水流和滤网阻挡下损伤,除了直接死亡外,侥幸逃脱的生物还将面对生存考验,能够存活的机会不多。

2.1 温排水生态效应

直流冷却系统用水除了大量抽取水体降温之外,取水过程对海洋生物和海洋生态施加更为严重

的影响。核电站运行过程中,需要大量的水作为冷却剂。据估算,以两台百万千瓦机组的发电能力计

算,每天排出的热量可以将周边 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 水体的水温提升 $5.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [19]。

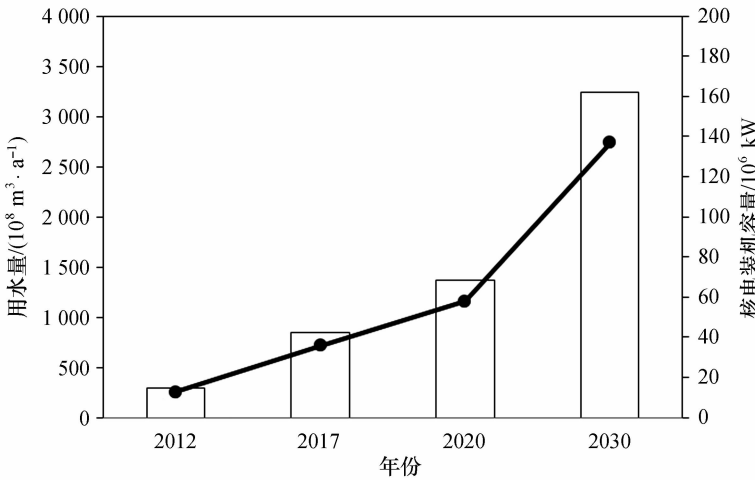


图1 我国滨海核电装机容量与年用水量估算

Fig. 1 Development of total capacity of NPS and annual water consumption estimated in coastal China

图中折线代表装机容量,直方图代表冷却水用水量;图中装机容量数据引自资料[14-17]。

长期将 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上热水排入海洋,即视为污染水体 [20]。《海水水质标准》规定,海洋水体符合第一、二类水质标准的,夏季人为造成的海水温升不超过当时当地 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,其他季节不超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$;第三、四类水质的温升不能超过当时当地 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [21]。超过限值,水质降级。热污染减少水体溶解氧含量,大面积的低氧区甚至造成局部水体荒漠化。温升容易导致水体滋生有害致病生物,不利于水生生物正常生长。温排水中的余氯、温度可能对鱼类和贝类生殖、索饵活动造成不利影响,高温区可能导致生物的热冲击而死亡。为了避免温排水的直接影响,通常将排水口附近水域划定为热扩散区,即温排水专用区(混合区),专用区内可以不考虑温排水的影响。但是,专用区内出现的高温海水则可能在海区形成大范围的热障,从而阻断游泳动物的洄游路径,改变产卵区位置。受影响的附近海区不再适合藻类养殖,区域生态系统结构将产生变化。因此,电厂选址需考虑温排水问题,在水体扩散能力良好的开放水域设置排放口,能够最大程度地降低温排水的不利影响。

2.2 卷载机理与影响

温排水导致的温升对海水的物理、化学性质造成影响,电厂取水对水生生物的影响包括取水的机械过程导致生物个体死亡,改变生物群落的种类组成和数量变化。

电厂取用冷却水对水生生物的影响根据其物理作用方式分为卷载和卷塞(见“2.3”)两个部分。卷载是电厂取水后水生生物等在水流裹挟下通过滤网

进入电厂冷却系统的过程。简单地讲,卷载是水体通过滤网之后发生在封闭的冷却系统内的过程。

被卷载的生物体型小,体长或高度一般不大于滤网孔径(约 1 cm)。它们包括微生物、浮游植物、浮游动物(含鱼卵和仔稚鱼)和阶段性浮游生活的底栖生物。鱼卵、仔稚鱼、甲壳动物幼体和贝类幼体等经济生物是主要的受害群体 [8]。

被卷载的生物游泳能力很弱,容易随同水流通过滤网进入冷却系统。这一过程中,被卷载的生物个体小、脆弱,容易受到伤害或死亡。导致生物死亡的因素分为物理伤害和化学伤害。物理伤害包括生物体与水泵内壁、管道和冷却设备的表面摩擦撞击,通过水泵时的高压、挤压和高压水流剪切,冷却水管中急剧温升造成的形态结构变形损伤。化学伤害包括化学物质的灭活处理,为了防范生物附着在冷却系统管壁上导致管道堵塞,在进入冷却系统的水体中添加氯化物,用以杀灭生物幼体等污损生物。

被卷载的生物在各种外力的作用下,即使没有立即死亡,排放进入自然水体后生物个体也会因为机体损伤或变形失去继续生存的能力。一些幼体出现摄食、生长和活动障碍;还有一些生物被病毒、病菌感染,死亡率增加。一般认为卷载受损生物重新进入自然水体后,不能够正常地生长和存活 [22]。在余氯协同作用下,卷载生物可能全部死亡 [23]。

2.3 卷塞机理与影响

卷塞效应指的是进入取水口水流中的水生生物

被滤网拦截、撞击或堵塞在进水口滤网上的物理现象,发生于进水流速大于生物游泳速度时,此时水生生物没有能力躲避撞击或被滤网俘获^[24]。卷塞发生的位置特殊、特征明显,发生位置限于滤网之前或之上;对于通过滤网,随水流进入冷却系统的生物则不形成卷塞,而形成卷载,这是卷塞和卷载区别(图2)。水流进入滤网前生物受损一般为撞击受伤,失去游泳能力,或被俘获、堵塞在滤网上。“卷”表示电厂取水裹挟生物体的作用,“塞”表示撞击发生后,生物体俘获或堵塞在滤网上的结果。卷塞生物的大小随滤网的孔径变化,孔径较大的滤网伤害的生物个体较大,小于滤网孔径的生物成了卷载的对象。正常情况下滤网的孔径通常为1 cm左右,被卷塞的生物体大多是体型较大、体长或横截面直径大于1 cm的生物。

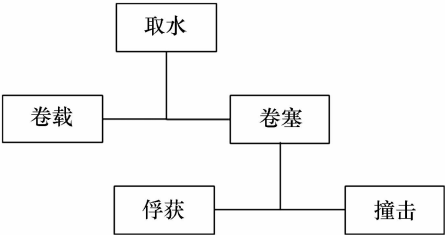


图2 电厂取水冷却过程中卷载和卷塞的关系
Fig. 2 Relations of entrainment and impingement by the water intake of power plant

如图2所示,卷塞可进一步细分为两类,分别是俘获和撞击。俘获是个体较小的鱼类和甲壳动物在高速水流抽吸下被拦截、俘获,嵌入网孔或吸贴在滤网上,形成堵塞。撞击是在海水抽吸过程中个体稍大的生物体被滤网冲撞受伤、失去活动能力,被拦截在滤网上。在水流冲击下,这些生物可能被撕裂破碎,通过滤网进入冷却系统,成为卷载生物的一部分。那些被俘获在滤网上的鱼类,在急流作用下鳃盖不能自主开闭,不能完成呼吸活动,很快就会缺氧窒息死亡。在外力作用下,其他结构脆弱的生物很容易受挤压死亡。卷塞、刮擦或高压水枪清除堵塞生物导致鱼鳞剥离、体表受创、粘液流失感染等。

因流速大,生物挣扎过程中容易受伤,受伤后挣脱,也会失去活动能力。受伤的生物很容易发生二次伤害或重复撞击,即使不出现二次伤害,它们的存活也会面临很多挑战,包括游动、觅食、躲避敌害或繁殖。被卷塞的鱼类不会立即死亡,但随后死亡率加大,甚至达到100%。这些伤害通过两个途径影响动物种群规模,一是个体生物撞击后形体改变,器官结构破坏,导致死亡,直接造成种群的个体数量减少;二

是卷塞伤害了生物的后代,即生物的补充群体或补充量,进入成熟期的个体数量减少,生物种群恢复能力受损,从而间接地影响子代生物的数量。不同发育阶段动物群体数量减少,严重的将导致种群消亡^[24]。卷塞对区域性生物或当地特有种的威胁最大,一旦特有种消失,区域生物多样性将严重受损。

2.4 卷塞对电厂的危害

卷塞除了造成生物死亡外,还容易导致取水口滤网堵塞事件。我国因为多种生物卷塞导致的大规模滤网堵塞事件时有发生。堵塞电厂进水口滤网的生物有浮游植物、水生草本植物、浮游动物、底栖动物和游泳动物等。游泳动物中,鲮鱼(*Mugil cephalus*)、褐篮子鱼(*Siganus fuscescens*)以及刺鲀(*Diodon holacanthus*)等也有报道^[25]。图3是电厂滤网上洗脱的卷塞海洋生物。可见,中、小型水生动物和植物都有可能是电厂滤网上的卷塞生物。



图3 电厂栅网上洗脱的卷塞海洋生物
Fig. 3 Collected marine organisms impinged on the screen of water intake facility

生物数量暴发导致的卷塞,可严重威胁电厂冷源安全。海洋生物或异物堵塞可能导致机组降功率,乃至造成停堆事件。从生态学角度分析,生物数量暴发,以至于发展到堵塞电厂进水口的程度,是海区生态系统出现异常的警告,正常情况下不会如此严重,我国滨海电厂之前没有类似事故的报道。卷塞的发生可以从食物链上行或下行两个方向进行解释。上行是卷塞生物饵料充足,为某些物种的大量增殖提供了食物条件;下行则是捕食压力降低,食物链下层的生物数量不受控制,导致毛虾等生物暴发,

从而增加了卷塞的机会。生物卷塞的原因不仅有生物学因素,还有物理方面的原因,电厂取水口位置、结构和取水方式都与卷塞有关。目前防范卷塞的措施大多数基于对取水方式的改造,从取水设施构造上减少卷塞的影响。

3 取水对渔业资源损失的估算

3.1 渔业资源捕捞压力

海洋渔业资源是人类优质蛋白质的主要来源,它提高了人类生活质量,为人类生存和发展作出了重要贡献,海洋渔业资源的重要性不言而喻。但是过度捕捞加重了海洋渔业资源的负荷,在经济利益的驱动下,沿海地区增船增网,加大了捕捞压力。个体大、经济价值高的顶级捕食者种类被大量捕捞,近海资源衰退、渔场面积缩小、渔汛消失以及渔获物小型化、早熟化,海洋捕捞业面临严峻形势^[26-27]。近海捕捞业捕捞对象从大型转向中小型鱼类和虾类等,渔业资源处于严重退化状态。

3.2 非渔业捕捞的影响

电厂抽取冷却水时使用了拦网获取洁净海水,拦截垃圾和活体生物,避免它们进入冷却水循环系统。拦截相当于非主动捕捞行为,这如同渔民设置的定置网,利用潮流捕捞过往游泳动物和底栖生物。电厂取水相当于一个连续的捕捞作业^[4],伴随电厂取水以及其他工业取水产生的捕捞效果,不具备商业目的,因此又称为非渔业捕捞。特别地,非渔业捕

捞不受休渔期和禁用网具等规定的限制,目前也不在政策法规的管制范围内,因此损害的生物种群难以通过生态保护措施恢复。

现代渔业捕捞的主要对象是海洋中的中大型生物,电厂取水伤害的是海水中的中、小型生物,从而渔业捕捞和电厂取水对渔业资源形成了互补的捕捞压力,两种方式同时作用于海洋生物大小不同的个体。从种群结构角度分析,冷却用水影响的对象是海洋渔业资源的补充量,即大型经济海洋生物的补充群体。尽管补充量减少对当前渔获量影响很小,但它影响了未来资源量,从而导致未来的渔获量波动,严重的将阻碍海洋渔业资源恢复。过度捕捞导致我国渔业资源严重衰退,其中幼体过度捕捞是重要的原因^[28]。中小型鱼类数量减少,不论从补充群体的数量,还是从饵料生物角度看,它们都是阻碍生物种群恢复的重要因素。

电厂取水的滤网网眼细密,运行时间长,影响深远。取水过程拦截和吸入的生物包括海水中的中小型生物,主要有虾、蟹、头足类、小型鱼类和鱼类幼体等(图4)。中小型生物的数量大,是食物链底层生物的重要成员。它们形成的摄食压力对于制约海域赤潮或其他小型生物(如水母和毛虾)暴发具有积极作用。当前各海区(包括电厂附近海域)频发的不同物种的赤潮很可能与摄食压力降低有关。

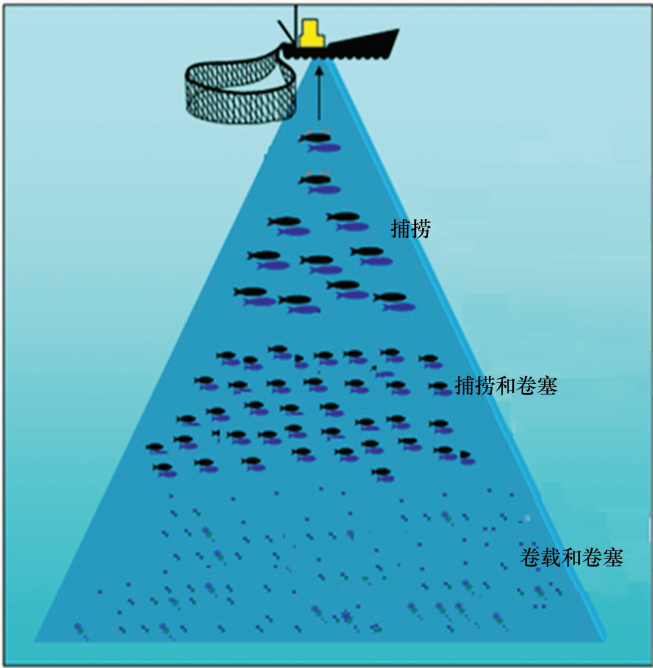


图4 捕捞、卷塞和卷载损害的不同大小个体或发育阶段的生物

Fig.4 Different sizes and life stages of marine organisms caught by fishery activity and by entrainment and impingement associated with the water intake by power plant

非渔业捕捞截获和伤害的生物不在渔业生产统计范畴,至今未有年鉴给予统计记载,因此其生物资源损失尚未得到足够的关注。

3.3 大亚湾渔业资源变化原因

对生物群体的捕捞,还可能影响渔业资源的种类结构。以大亚湾为例,调查发现电厂运行后大亚湾仔稚鱼种类组成出现了异常。1994 年之前的主要种类斑鰹 (*Clupanodon punctatus*) 和鲷科鱼类的鱼卵和仔稚鱼数量显著减少,鳀 (*Engraulis japonicus*) 和小公鱼 (*Anchoiella* sp.) 鱼卵以及鳀科和银汉鱼科的仔稚鱼也未再出现。但小沙丁鱼 (*Sardinella* spp.) 鱼卵和仔稚鱼数量明显增多,高值鱼类被低值鱼类所取代。大亚湾上世纪八十年代以中上层鱼类占优势,而九十年代底层和近底层鱼类为主要物种^[29]。

此外,渔业产量也发生了明显变化。研究发现,电厂建设后大亚湾的初级生产力没有减少,甚至还有增加,但是估算的大亚湾渔业潜在产量高于实际渔业产量^[30]。长期的数据分析表明,大亚湾内渔获率处于持续下降过程中^[31]。显然,潜在渔业产量和实际渔业产量之间存在落差,初级生产力没有全部转化为应捕的渔获量。从能量守恒角度看,低渔获率之外必定还有一个能量传递的分支,从而分流了本应该高一些的渔业产量。

已有报道表明,大亚湾的温排水和水体的富营养化与有机颗粒物有密切联系^[32]。尽管有的颗粒物来自湾内养殖业和陆源径流,但电厂温排水提供了源源不断的有机颗粒物,其中有活的生物个体,还有死亡的小型 and 微型浮游生物、破碎的有机体和可溶有机物絮凝体。丰富的有机颗粒物为底栖生物提供了充足的饵料。双壳贝类动物是滤食性底栖生物,可以摄取悬浮有机物,这可能是大亚湾波纹巴菲蛤 (*Paphia undulate*) 在电厂运行后成为底栖生物优势种的原因。

电厂运行后湾内出现大量波纹巴菲蛤,从而一度成为捕捞业的一项主业,表明湾内出现了从悬浮碎屑到底栖贝类食物链的结构。王肇鼎等(2003)在大亚湾观察到渔业资源结构从中上层鱼类为主转变为底层和近底层生物为主,软体动物的生物量上升极快,相对生物量由 1985 年的 28.7% 上升为 1996 年以后的 89.9%^[29]。袁涛萍(2016)和张舒怡(2017)研究表明大亚湾内底栖滤食性生物是主要生物量贡献者,以底栖生物为主的食物链结构至今仍然存在^[33-34]。这能够解释大亚湾渔获率降低的原因,即碎屑食物链分流了原本应该较高的渔获量。

电厂建设以来,大亚湾周边环境发生了很大的变化。尽管气候以及周边发展因素对大亚湾渔业资源有很大的影响,难以直接将电厂的取排水活动与宏观资源的变化进行联系。但多年调查的结论认为,即使存在其他因素,也不能够排除大亚湾沿岸工业建设和电厂取排水的影响^[35]。

3.4 资源损失估算

3.4.1 鱼卵和仔稚鱼 卷载是电厂取排水影响普遍关注的问题,针对卷载主要的生物对象鱼卵、仔稚鱼的损失进行分析,其损失量计算公式^[36]如下:

$$W_i = D_i \cdot Q \cdot P_i \quad (1)$$

式(1)中: W_i 为第*i*种类生物资源年损失量(尾), D_i 为第*i*种类生物资源平均分布密度(尾/ m^3), Q 为电厂年取水总量(m^3), P_i 为第*i*种类生物资源全年出现的天数占全年的比率(%)。

我们取海水中鱼卵、仔稚鱼的全年平均分布密度为 1 尾/ m^3 ,即 $D_i = 1$ (该数值在不同海区和季节有所变化,一些区域甚至更高)。因此这里 P_i 值为 100%,于是有

$$W_i = Q \quad (2)$$

根据公式(2),结合上文估算的 2012、2020 年我国滨海核电海水冷却水使用量,仅鱼卵、仔稚鱼,2012 年和 2020 年分别损失 2.973×10^{10} 尾和 1.372×10^{11} 尾。设定鱼卵、仔稚鱼能够长成鱼苗的存活率分别为 1% 和 5%^[36],这里取 1% 下限计算,设定每尾鱼苗定价 1 元,那么 2012 年和 2020 年的经济损失分别达到 2.973 亿元和 13.72 亿元。这里仅计算核电取水 1 项的鱼卵、仔稚鱼损失,如果加上其他取水活动(见“1.2”)产生的生物死亡数量,上述数据显然被低估。

本研究中卷载的生物基本上是肉眼难以辨识的种类,但由于取水背后巨大的用水基数,这些小型生物就有了更大的经济学和生态学意义。特别地,沿海某些海区的鱼卵、仔稚鱼分布密度甚至高达数百个或尾每立方米,这种情况下长期大量抽取冷却水的影响更不可以忽视。

3.4.2 补充量损失 到目前为止,我们没有电厂取水导致的生物损失统计数据。本研究引用两个例子推算沿海渔业资源补充量损失。李铁军等(2017)对发电容量为 300 MW 的舟山火电厂二期项目卷载和余氯产生的渔业资源损失量进行了估算^[37]。以海区调查数据为基础,计算结果表明卷载造成的渔业损失量每年达到 132.26 t,余氯导致的损失每年达到 41.37 t,合计年损失量为 173.63 t。已知 300 MW 火电厂每年需用冷却水约为 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$,计算可

知每亿立方米用水每年消耗的渔业资源量大约为 34.73 t。

徐兆礼等(2007)对火(核)电厂因卷载和余氯导致的渔业资源损失量进行了估算^[23]。LNG 接收站取水量约为 $1.02 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 其年资源损失量为 176.80 t, 计算可得每亿立方米用水每年的资源量损失为 173.33 t。由于各地海洋环境、生物量背景、取水口设施各不相同, 上述两个损失量数据不在同一个数量级上, 差异难免。这里权且取 34.73 t 和 173.33 t 的平均值 104.03 t 作为每亿立方米冷却取水每年附带的渔业资源损失量, 那么 2012 年的火(核)电取水量为 $6.631 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 附带的渔业资源量损失大约为 $6.90 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2003—2012 年全国海洋捕捞产量的平均值为 $1.276 \times 10^7 \text{ t}$ ^[38]。比较之下, 电厂取水导致的渔业资源损失占比不大, 相当于当时全国全年海洋渔获量的 0.54%。但是, 在沿海渔业资源过度捕捞的现状下, 考虑到一座核电厂通常集中了 4 台以上百万千瓦级的机组, 局部海域的渔业资源实际上承受了很大的捕捞压力。在高生产力区和海湾内水域, 取排水导致渔业资源的损失将更高, 一些地方出现的用海纠纷说明取排水影响不仅是理论的问题, 而且是现实的问题。

1993—1994 年调查表明, 电厂滤网上卷塞的海洋生物仔稚鱼、虾类、头足类和水母类的死亡率分别为 95.5%、97.3%、96.3% 和 96.8%, 对卷塞死亡的仔稚鱼数量的统计表明, 取水滤网上的鱼类年死亡量达到 2.4×10^7 尾; 这些鱼类多数为鲱科和鲛科鱼类, 少部分为鲷科鱼类的幼体; 计算结果表明, 滤网上卷塞死亡的仔稚鱼数量相当于该电厂所在海湾鱼类现存量的 3%~5%^[39]。如包括卷载受伤和逃逸的鱼类, 实际损失会更大。类似地, 相关报道表明, 有的电厂取水导致的鱼类死亡数量甚至超过捕捞业的数量^[11]。

4 对策和措施

4.1 优化取水方式的必要性

如前文所述, 滨海电厂装机容量增加, 在继续使用海水直流冷却的前提下, 我国对海洋冷却水的需求势必大量增加。与此同时, 我国渔业、交通运输、旅游娱乐、围海造地、排污倾倒、工矿等海洋产业用海需求旺盛, 综合用海规划比例增加, 行业间用海矛盾日渐突出。特别在渔业用海为主导的用海方式下, 电厂取排水用海发展空间必然受限。为了维护海洋环境健康, 减少取排水对海洋生态的影响, 合理

规划电厂取排水数量和取水方式尤其必要。

我国海洋属国家所有, 海洋用水处于共享的状态。冷却水取用存在着水质污染, 损害生物和渔业资源等问题。为了获得最大利益, 海洋建设工程对生态系统的不利影响, 尤其是对海洋生物的生长、繁殖和种群保护问题考虑不够。除了经济因素外, 缺乏明确的取水设施运行环境保护法规和标准也是重要的原因^[9]。随着国家增强环境保护的力度, 遏制海洋资源破坏和污染, 保证我国海洋产业的可持续发展, 今后我国电厂建设中优化改造直流冷却方式, 推动发展内循环冷却将成为必然。

4.2 最佳实践技术要求

在充分了解环境影响的基础上, 防范取水对水生生物的危害、加载先进技术、避免对生态系统的潜在危害是基于现状的权益措施, 也是目前能够接受的缓解电厂取水环境影响的方法。根据电厂所在位置和取水环境的生态特点, 优化取排水装置、减少冷却水取水和温排水负面影响并考虑建造成本的技术称为最佳实践技术 (Best Technique Available, BTA)^[40]。该技术是今后电厂取排水设施优化的发展方向。

BTA 需要考虑两个方面的问题。一是它的环境属性, 二是技术本身的适用性。与海洋环境需求不匹配的技术, 不符合电厂实际需求的技术都不是 BTA。为了合理使用 BTA, 必须首先了解电厂取排水海区的海洋环境与生态系统, 对当地生物、环境和工程特征进行多要素全面调查和判别。此后, 还得根据实际情况区别对待和评价^[41]。

BTA 的判定准则与电厂附近海区的生物生态环境有关。鱼类以及甲壳动物等经济物种、在生态系统结构与功能中起重要作用的关键物种、区域珍稀濒危物种、危害冷源安全的卷塞或卷载物种等重要代表物种的状态及其数量是考核当前取排水装置是否符合 BTA 要求的重要指标。如果电厂位于非生态敏感区, 取排水影响海区内不存在重要代表物种以及与之相关的重要食物链关联种, 那么可认为当前取排水装置属于 BTA。反之, 需要对当前的装置进行优化或加载实用的 BTA。如果电厂认为它的当前设施已经是 BTA, 不再需要对当前设施进行改造, 则电厂需要向主管部门提供当前运行的取排水设施不存在直接和间接破坏或影响重要代表物种的证据, 以便审核。

我国滨海电厂分布在不同纬度, 各电厂附近海区的生态系统结构、生物种类和数量、生产力和生物价值、功能区划管理要求等都有很大的不同。因此

电厂的 BTA 赋予了特殊性,即 A 电厂的 BTA 通常不能应用于 B 电厂。从 BTA 具有的环境属性上看,环境不同,则不能将 A 电厂相关联的现状资料应用于 B 电厂。要求提供电厂的专属数据,这既有数据使用上的要求,也是管理部门判定采用的技术是否符合 BTA 的需求^[42]。

4.3 减损措施

除了需要主管部门审核外,落实到 BTA 上,减缓电厂取水卷塞、卷载影响的措施有以下几个方面:

①改变取水口的位置,将取水口从高生产力区域转移到低生产力区域,或者从生态高敏感海域移到低敏感海域。将取水口从近岸浅海区移到远岸深水区是不错的选择。改变取水口位置需要在全面的现状调查基础上确定,权衡得失;不可因为改变位置后,解决了生物卷载问题,又出现了生物卷塞问题。

②设置多个取水口,降低取水口进水流速,减少卷载生物的数量。降低进水流速需要在保证发电功率不受影响的前提下进行。安装变速泵,根据发电量调整进水流速;安装多个抽水泵,根据需求使用其中相应数量的水泵能够起到调节流量的作用。

③在进水口前加装不同的网具装置,分流可能出现的卷塞生物。通过物理方式拦截防止生物体进入冷却系统的装置,包括滚网、楔形网和水下滤网。通过导引鱼类改变游泳方向的设备有鱼梯和斜网,这一类设施通常配置避鱼装置或导鱼渠。改变鱼类活动行为的装置有变流盖、声墙、光幕、气幕等。

加装不同滚网、导流渠以及使用不同物理手段避免生物卷塞,有多种措施可供选择。如在电站进水管内两道渔网之间隔离出一段空间,其中生长着高密度鱼类,形成一段鱼渠。鱼渠内鱼类个体大、游泳能力强,可能摄食随同水流进入鱼渠的中小型浮游动物,从而起到降低卷载生物数量的效果。

受到环境限制,运行环境的影响代价大,而没有合适 BTA 可以使用的电厂,申请退役或者转为海水内循环冷却方式不失为合理的选择。此外,生态补偿也是一个替代途径^[8]。控制和改善海洋生态环境质量,保障海洋生态安全,合理统筹使用海水资源

是大势所趋,相信我国滨海电厂冷却水使用的负面影响将会得到根本改善。

4.4 电厂冷源安全

近年来,生物卷塞、卷载产生的损失和危害不局限于海洋生态系统和渔业资源。间接效应已经发生,随着近海资源利用和开发强度增加,海洋生物种类组成失衡,一些物种数量暴发,赤潮和水母暴发等事件频频发生,成为近年滨海电厂生物卷塞事件频发的原因。卷塞生物监测、预报、预警和控制是滨海电厂冷源安全面临的新挑战。开展电厂取水生态危害监测与调查,了解生物暴发原因,制定防范措施和减损方法,除了推进内循环冷却运营方式外,研制新的生物减损办法和技术,推进 BTA 实施,维护海洋生态系统的正常运行,保证海洋资源的可持续利用,不容置疑是今后电厂优化取水的工作重点。电厂取水推广应用 BTA,改变电厂冷却方式,不仅有利于环境,也有利于资源保护和恢复,对电厂安全运营也具有重要意义。

5 结论

发展我国电力能源建设是近、中期国家规划,可以预见,我国滨海电厂建设规模和机组热功率将不断增大,在直流冷却仍作为当前滨海电厂降温排热的主要方式下,电厂取排水挤占水生态空间带来的海洋环境负面影响将进一步扩大。电厂取排水的卷塞和卷载效应导致海洋生物损伤和死亡,损害海水作为海洋生物栖息和繁殖场所的固有属性。取排水影响渔业资源中的中小型生物、鱼卵、仔稚鱼以及其他生物幼体。这些生物位于食物链中下层,它们本身是其他生物的饵料和人类蛋白质来源,同时也是渔业资源的重要补充量,取排水导致的渔业资源损失应予以足够重视。此外,大量取水和温排水导致的生态系统变化,某些物种数量暴发,取水口堵塞等生物灾害影响电厂冷源安全。在役和拟建电厂可以通过改建或加载 BTA,改善取水环境,对避免、减缓取水伤害生物种群以及对电厂安全生产而言,是互利共赢的措施。

参考文献:

- [1] 康旭, 张华. 近海海洋生态系统服务功能及其价值评价研究进展[J]. 2010, 27(5): 60-64.
- [2] BARNETT P. Effects of warm water effluents from power stations on marine life[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1972, 180(61): 497-509.
- [3] CARPENTER E, PECK B. Cooling water chlorination and productivity of entrained phytoplankton[J]. Marine Biology, 1972, 16(1): 37-40.
- [4] 潘明祥, 王肇鼎. 核电站冷却水系统对水生生物的机械损伤[J]. 南海研究与开发, 1999(2): 66-80.

- [5] 张穗, 黄洪辉, 陈浩如, 等. 大亚湾核电站余氯排放对邻近海域环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(2): 14-18.
- [6] 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, 28(1): 1-7.
- [7] HANSON C, JAMES R, LI H. Entrapment and impingement of fishes by power plant cooling-water intakes: an overview[J]. Marine Fisheries Review, 1977, 39(10): 7-17.
- [8] FERRY-GRAHAM L, DORIN M, LIN P. Understanding entrainment at coastal power plants: informing a program to study impacts and their reduction[R]. California: California Energy Commission, 2008: 1-38.
- [9] 魏新渝, 张琨, 熊小伟, 等. 电厂取水设施运行对水生生物影响与减缓措施[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(4): 1-10.
- [10] SIMARD M, PAQUET A, JUTRAS C, et al. North American range extension of the invasive Asian clam in a St. Lawrence River power station thermal plume[J]. Aquatic Invasions, 2012, 7(1): 81-89.
- [11] FLEISCHLI S, HAYAT B. Power plant cooling and associated impacts: the need to modernize US power plants and protect our water resources and aquatic ecosystems[R]. Beijing: Natural Resources Defense Council, 2014: 1-4.
- [12] 李亚红. 海水循环冷却在中国的发展研究[J]. 盐业与化工, 2016, 45(6): 9-13.
- [13] 新能源网. 中国 47 台运行核电机组安全状况良好[EB/OL]. [2020-06-25]. <http://www.china-nengyuan.com/news/155371.html>.
- [14] 国家信息中心经济预测部. 中国历年装机容量. 发电量. 用电量统计[EB/OL]. [2020-06-25]. <https://www.docin.com/p-1563201656.html>.
- [15] 国家统计局. 中华人民共和国 2017 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2020-06-25]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228_1585631.html.
- [16] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014—2020 年)[EB/OL]. [2017-06-27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm.
- [17] 朱学蕊. 我国核电仍有较大发展空间[N]. 中国能源报, 2019-04-08(12).
- [18] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2012[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [19] 余娜. 中国核电站冷却水“热污染”调查[J]. 中国能源, 2016(2): 82-88.
- [20] 陈晓秋, 商照荣. 核电厂环境影响审查中的温排水问题[J]. 核安全, 2007(2): 46-50.
- [21] 国家环境保护局, 国家海洋局. 海水水质标准: GB 3097—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [22] MAYHEW, DAVID A, LOREN D, et al. A comparative review of entrainment survival studies at power plants in estuarine environments[J]. Environmental Science and Policy, 2000, 3(S1): 295-301.
- [23] 徐兆礼, 张凤英, 陈渊泉. 机械卷载和余氯对渔业资源损失量评估初探[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(5): 246-251.
- [24] CHARLES H, JAMES R, HIRAW W. Entrapment and impingement of fishes by power plant cooling-water intakes: an overview[J]. Marine Fisheries Review, 1977, 39(10): 7-17.
- [25] LIAO Y, CHEN L, SHAO K, et al. Temporal changes in fish assemblage from the impingement data at the second nuclear power plant, northern Taiwan[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2004, 12(5): 411-417.
- [26] 冯森, 郑炳文. 我国海洋捕捞业现状与发展[J]. 福建水产, 1999(2): 67-73.
- [27] 张偲, 宋珊珊. 我国海洋捕捞业的困境与转型路径[J]. 现代经济信息, 2013(14): 392 - 392.
- [28] 柳卫海, 詹秉义. 东海区渔业资源变动分析[J]. 上海海洋大学学报, 1999(1): 19-24.
- [29] 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.
- [30] 宋星宇, 王生福, 李开枝, 等. 大亚湾基础生物生产力及潜在渔业生产量评估[J]. 生态科学, 2012, 31(1): 13-17.
- [31] 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.
- [32] 谢福武, 刘华雪, 黄洪辉, 等. 大亚湾浮游植物粒级结构对温排水和营养盐输入响应[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 55-64.
- [33] 袁涛萍. 大亚湾大型底栖动物群落生态研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2016.
- [34] 张舒怡. 大亚湾大型底栖动物群落及其环境影响因子研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2017.
- [35] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 85-95.
- [36] 中华人民共和国农业部渔业局. 建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程: SC/T 9110—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [37] 李铁军, 郭远明, 鲍静娇, 等. 舟山电厂二期工程余氯和机械卷载对渔业资源损失量评估[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(8): 16-19.
- [38] 熊敏思, 缪圣赐, 李励年, 等. 全球渔业产量与海洋捕捞业概况[J]. 渔业信息与战略, 2016(3): 218-226.

[39] 国家海洋局第三海洋研究所. 广东大亚湾核电站海洋生态调查与研究(试运行阶段)[R]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 1995.

[40] 生态环境部. 核动力厂取排水环境影响评价指南: HJ 1037—2019[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.

[41] TAFT E. Fish protection technologies: a status report[J]. Environmental Science and Policy, 2000, 3(S1): 349-359.

[42] DAHLBERG M D. A review of survival rates of fish eggs and larvae in relation to impact assessments[J]. Marine Fisheries Review, 1979, 41(3): 1-12.

Ecological impacts of coastal power plants associated with once-through cooling in China and mitigation: a preliminary evaluation

TANG Sen-ming¹, SHANG Zhao-rong², HUANG Hao^{1*}, ZHANG Yu-sheng¹

(1. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing 100082, China)

Abstract: According to the status quo and developments of coastal power plants, including thermal and nuclear power plants, in China, the quantity of seawater demanded by once-through cooling (OTC) power plants is estimated. Besides, the impacts of impingement with its mechanism and entrainment caused by water intake and warm water discharge on the aquatic organisms and marine ecosystem are discussed. Taken the examples of marine ecosystem changes in Daya Bay before and after the running of power plants, the effects of cooling water intake and discharge are probed. Thus, the hypothesis for the formation of dominant benthic food chain is put forward. Due to the potential and actual negative effects, it is necessary to mitigate the marine environmental impacts of OTC. Based on the site-specific environmental assessment, the best technique available (BTA) shall be adopted for the sustainable use of seawater cooling resource. As a result, the mitigation favors not only for the cool source safety of the power plant but also for the marine environment protections.

Key words: marine environmental science; once-through cooling; impingement; entrainment; fishery stock; best technique available

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2020. 04. 016

(责任编辑:方建勇)