

美国滨海核电厂温排水及生态影响分析和启示

魏新渝, 张琨, 党煜钦, 熊小伟, 车树伟

环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082

摘要 分析了美国滨海 18 个核电厂(31 台核电机组)温排水系统的设计特点及其对水生生物的影响。结果表明,在排水系统设计上,美国滨海厂址考虑了减小温排水对水生生物影响的措施,大部分厂址采用离岸排放,提高排水流速,有些则因地制宜采用缓冲池、设计三级堰、或者将排水口布置在取水口的上游,必要时使用闭式循环冷却水系统等。美国大部分滨海厂址温排水对水生生物的影响较小。中国核电厂机组数量较多,温排水量较大,应重视对水生生物可能产生的不利影响。在排水系统上,中国核电厂存在的主要问题有:近岸排放缺乏促进掺混的考虑,明渠排放对景观优化的考虑不够,有些电厂为了满足近岸海域环境功能区要求而设置的导流设施有碍于温排水的扩散等问题。应研究制定中国核电厂温排水影响评价导则,优化核电厂温排水排水系统的设计和建造,尽可能降低温排水对水生生物可能产生的不利影响。

关键词 滨海核电厂;温排水系统;温排水;水生生物;生态影响

美国核管理委员会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)对过去和当前美国直流冷却水系统核电厂对水生生物的影响进行了评估,认为当前直流冷却水系统核电厂值得关注的有两大问题,即冷却水取水导致的鱼类、贝类等的卷吸效应以及大量温排水对水生生物的影响^[1]。

核电厂温排水可能带来的环境影响得到了较广泛的关注^[2-8]。在一些情况下,增加水体温度或改变昼夜热变化规律对当地的生物群有不利影响,温排水可能会影响水生生物的生长、生存和繁殖,改变群落的多样性和丰度,并可能导致栖息地的变化^[2-5];然而在很多情况下,温排水对水生生物的负面影响较小,或者没有明显的影响^[6-8]。美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, EPA)和 NRC 基于研究报告、监测报告及机构咨询得出结论是:对于大部分核电厂,温排水可能导致生物死亡的影响是小的。但对于少部分直流冷却水系统核电厂,其温排水排入稀释扩散条件差的受纳水体(封闭、半封闭的海湾、浅滩等)或者温排水进入纬度较低的温水环境中等情况时,温排水的影响可能是中等水平,甚至是较大的^[1]。例如, Crystal River 核电厂温排水破坏了排放口周围温排水混合区底栖无脊椎生物及海藻群落,因此设置了辅助塔(机械通风冷却塔)以减小温排水的影响^[9]。相反,对于像 San Onofre 这样的核电厂,其温排水的影响是较小的,因此可通过增加排水温度减小取水量,以降低

取水对水生生物的卷吸效应^[10]。温排水对环境的潜在影响程度与厂址特定因素密切相关,例如地理位置、受纳水体(海水还是淡水)、受纳水体的体积、水交换速率、栖息地等^[11]。

美国在控制温排水的影响方面有较健全的法规标准体系,并且积累了大量的监测和研究数据,其滨海核电厂温排水法规标准的执行情况、排水设施的设计和优化情况、对生态影响监测结果的分析 and 总结,对中国滨海核电厂温排水影响的控制具有很好的参考价值。本文首先简要介绍了美国温排水法规标准体系;调研了美国滨海 18 个核电厂(共 31 台核电机组)排水系统、环境影响特点,以及法规标准的执行情况;并与中国滨海核电厂排水系统进行比较,指出需要进一步优化和考虑的方面,为中国核电厂温排水环境影响评价导则的制定提供技术基础。

1 温排水法规标准体系

美国《清洁水法案》(Clean Water Act, CWA)316(a)条规定,设施温排水限值(温度上限值 T_{max} 以及温升上限值 ΔT_{max})应确保受纳水体中结构稳定的土著贝类、鱼类和其他野生生物种群的生长和繁育^[12];美国联邦法规 40CFR125 条 H 部分给出了 316(a)的具体实施方法和要求^[13];温排水限值是最佳适用技术、州水质标准或者厂址特定热影响研究制定的。若能证明给出的温排水限值能够维持受纳水体中结构稳定

收稿日期:2017-05-02;修回日期:2017-08-03

作者简介:魏新渝,高级工程师,研究方向为核电厂取排水环境影响,电子信箱:weixinYu2004@163.com;车树伟(通信作者),工程师,研究方向为核电厂安全分析,电子信箱:cheshuwei@163.com

引用格式:魏新渝,张琨,党煜钦,等.美国滨海核电厂温排水及生态影响分析和启示[J].科技导报,2017,35(23):94-102;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.23.014

的土著贝类、鱼类及其他野生生物种群的生长和繁育,并且已考虑了温排水与所有其他对物种重要影响(包括杀菌剂的影响、取水卷吸效应的影响、过度捕捞、其他污染源的排放等)的累积影响,则可认为满足316(a)的要求;设立的温排水限值可低于现有水质标准中温度限值的要求。

EPA 和各个州环境保护部门的水质标准包括水质准则、混合区政策以及对水生生物保护的要求。水质准则给出不同区域水体的温升限值和/或温度上限值;混合区政策给出混合区的位置、尺寸、形状及混合区内水质要求;对水生生物保护的要求即316(a)的要求:若具体厂址的温度限值不满足水质准则和混合区政策要求,通过厂址特性热影响研究,仍能确保接纳水体中结构稳定的土著贝类、鱼类和其他野生生物种群的生长和繁育,则满足316(a)的要求。美国国家污染物排放削减系统(NPDES)许可证给出具体的温排水排放限值及监测要求,可能的影响范围,该许可证每5年更新一次^[14]。

可见,美国在控制温排水的影响方面有较健全的法规标准体系。美国核电厂温排水可满足水质准则、混合区政策和水生生物保护3个层次或任一层次的要求,最低要求是满足对水生生物保护的要求,即确保对接纳水体中结构稳定的土著贝类、鱼类和其他野生生物种群的生长和繁育。另外,不同层次有具体的实施方法和导则^[15-17],以确保对水生态系统

的保护,又不影响核电事业的发展。

在中国《中华人民共和国水污染防治法》规定,“向水体排放含热废水,应当采取措施,保证水体的水温符合水环境质量标准”;《中华人民共和国海洋环境保护法》规定,“向海域排放含热废水,必须采取有效措施,保证邻近渔业水域的水温符合国家海洋环境质量标准,避免热污染对水产资源的危害”;《GB 3838—2002地表水环境质量标准》规定,“人为造成的环境水温变化应限制在周平均最大温升 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ”;《GB3097—1997海水水质标准》规定“第一类和第二类水体,夏季人为温升不得超过 1°C ,其他季节不得超过 2°C ;第三类和第四类水体,人为温升不得超过 4°C ”。与美国不同,中国对温排水的要求是满足水体质量标准,而水体质量标准中温度要求没有地方标准,也没有区域差异的具体要求。此外,中国目前还没有制定核电厂温排水影响的评价导则,难以对不同接纳水体环境下核电厂温排水对水生生物的影响进行准确和规范的评价^[18-19]。

2 美国滨海核电厂排水系统特点及生态影响

表1列出了美国滨海的18个核电厂(31台核电机组,其中6台机组已停运)的机组状态、排水系统的特点以及温排水影响程度等^[20-38]。下面对美国滨海核电厂使用闭式循环冷却

表1 美国滨海核电厂排水系统特点和生态影响

Table 1 Characteristics of thermal discharge systems and their ecological effects for American NPPs in coastal regions

电厂名称	机组	运行许可证开始和结束时间	冷却系统	温排水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排水设施	生态影响
Maine Yankee	1	1996年永久性关闭	一次循环(OT)	27	近岸排水	—
Seabrook	1	1990—2032	OT	25	离岸1524 m喷射排水	小
Pilgrim	1	1972—2012	OT	20	近岸排水。长274.3 m的梯形排放渠,为了快速混合渠设计较窄	小
Millstone	1	永久关闭	OT	26.5		
	2	1975—2015	OT	33	近岸排水。通过缓冲池后排水	小
Shoreham	3	1986—2026	OT	57		
	1	建完未运行	OT	36	离岸扩散器排放	—
Indian Point	2	1973—2013	OT	106	近岸排水。陆域排放渠连接水下出水结构,将流速增至3.0 m/s后进入水体	小—大
	3	1976—2016				
Oyster Creek	1	1969—2009	OT	29	近岸排水。低水头稀释泵夏季降低排水温度,冬季将排水抽回取水口除冰	小
Hope Creek	1	1986—2026	自然通风冷却塔	2.9	取水口上游458 m处离岸深排	小
Salem	1	1976—2016	OT	127	6根直径3 m管(间距4.6 m)离岸152 m水深9.5 m排至取水结构的上游	小
	2	1981—2021				
Calvert Cliffs	1	1974—2014	OT	152	4根4×4 m混凝土导管排至海湾底部。离岸约260 m,水深3 m处	小
	2	1976—2016				

表 1 美国滨海核电厂排水系统特点和生态影响(续)

Table 1 Characteristics of thermal discharge systems and their ecological effects for American NPPs in coastal regions (continued)

电厂名称	机组	运行许可证开始和结束时间	冷却系统	温排水量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	排水设施	生态影响
Surry	1	1972—2012	OT	106	离岸明渠排。填石防波堤将排放渠向河延伸 340 m, 出口尺寸减小而使得水以 1.8 m/s 喷射形式回到 James 河	小
	2	1973—2013				
Brunswick	1	1976—2016	OT	85.2	离岸深排。温排水通过 10 km 陆域排放渠至消力池, 而后泵送至长 609.6 m 埋管离岸排至大西洋。排放深度为 3 m。在排放管附近的海底是沙地, 没有吸引鱼底质。底部无植被覆盖, 有强烈西向和南向沿岸流。	小
	2	1974—2014				
St. Lucie	1	1976—2016	OT	50.5~ 70.6	离岸深排。第一根排放管管径 3.7 m, 延伸到离岸 460 m 处, 端点为 Y 型端口; 第二根管服务于两台机组运行时, 4.9 m 管径, 延伸到离岸 1040 m 处, 端点为多端口的扩散器。	小
	2	1983—2023				
Turkey Point	3	1972—2012	闭式循环冷却渠	0	冷却渠系统占地 2700 hm ² , 包含 32 条渠道, 温排水从电厂往南送, 并由 8 条渠将水送回电厂。渠总长 270 km, 有效水面积 1560 hm ²	小
	4	1973—2013				
Crystal River	3	1977—2017	OT 或 OT+机械通风冷却塔	43	近岸排。2.6 km 陆域排放渠向西延伸至排放点, 近岸排至水晶湾。南堤从排放点再往西延伸 1.9 km。当 1、2 和 3 号在最大泵容量下运行时, 低潮排放渠的流速是 0.7 m/s。疏浚维持排放渠深度 3 m	小—中
South Texas Project	1	1988—2028	闭式循环冷却湖	17	离岸深排。在取水下游 3 km 处, 7 根与岸边成 45° 排放管(管径 91 cm) 进入河流, 管间距 76 m	小
	2	1989—2029				
Diablo Canyon	1	1984—2024	OT	108	近岸排。重力作用下水从汽轮机厂房流至排水结构。水流过横向平台安装垂直冲击块的 3 个堰(增加混合减小进入水体氧化物量)回大海表面	小
	2	1985—2025				
San Onofre	1	永久关闭	OT	21.5	通过离岸 762 m 水深 7.6 m 处立管排放	小
	2	1982—2022				
	3	1983—2023				

水系统、近岸排水和离岸排水的特点及生态影响等做概括性的分析。

闭式循环冷却水系统温排水量小, 对环境影响小, 但造价和能源消耗较高, 一般是在直流冷却水系统不可用时, 经管理部门批准, 选择采用该排放方式, 美国有 3 个滨海核电厂使用闭式循环冷却水系统。直流冷却水系统的排水方式包括近岸排水和离岸排水, 大部分美国滨海核电厂采用离岸排水方式, 只有 7 个使用近岸排水。相对于近岸排水, 离岸排水能够使混合区高温升区域较小, 并且降低对近岸水域的影响(近岸水域一般是水体中生物生产力最高和最敏感的区域, 并且这些水域常有娱乐用途); 美国当前很多州的温排水混合区政策中要求采用离岸排放, 例如, 新泽西州最近规定, 温排水混合区禁止在距海岸线 457.2 m 范围内^[39]。为减小近岸排水的生态影响, 核电厂一般采取降低进入受纳水体的温

升、提高排放流速等方法以降低对水生生物的影响。

2.1 闭式循环冷却水系统

由表 1 可知, 美国有 3 个滨海核电厂使用闭式循环冷却水系统, 即 Hope Creek 核电厂使用海水自然通风冷却塔, Turkey Point 核电厂 3 和 4 号机组使用冷却渠系统以及 South Texas 工程 1 和 2 号机组使用冷却池散热系统。

Hope Creek 核电厂位于特拉华河河口, 包含一座电功率为 1061 MWe 的沸水堆(BWR), 使用闭式循环冷却水系统。其闭式循环冷却水系统包括一座自然通风冷却塔及其相关的取水、循环和排放设施。冷却塔的下泄流和其他电厂流出物(流量 $2.53 \times 10^5 m^3/d$) 通过水下管道排放至取水口上游 458 m 处。这是当前全世界运行核电厂中唯一使用咸水的自然通风冷却塔的核电厂^[28]。该闭式循环冷却水系统温排水对水生生物的影响小。NRC 于 2011 年批准了 Hope Creek 核电厂延

寿申请^[29]。

Turkey Point 电厂位于比斯坎湾,3 和 4 号机组为压水堆(PWR),采用闭式循环冷却渠冷却系统。冷却渠系统占地面积大约 27 km²,包含 32 条渠道,将温排水从电厂往南输送,并由 8 条渠道将水送回电厂(图 1)^[35]。渠道大约 60 m 宽水深为 0.3~1 m,渠道之间用 27 m 宽的护堤分开。渠的总长度为 270 km,有效水面积约 15.6 km²。冷却渠系统的补给水来自处理后的电厂工艺水、降雨径流以及可能的地下水渗透,无地表水的补给,也不往周围海域排放温排水。因此,无需评价温排水对环境的影响。

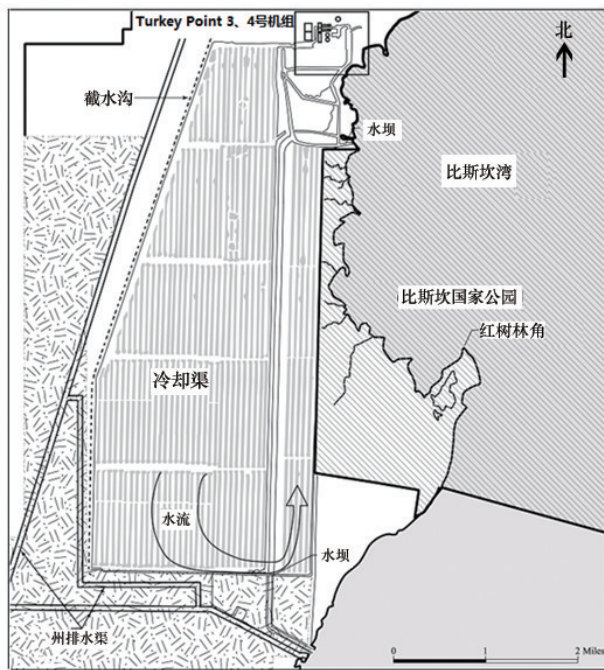


图1 Turkey Point 厂址冷却渠系统

Fig. 1 Turkey Point site cooling canal system

South Texas Project(STP)位于德克萨斯州科罗拉多河口,有 2 台 PWR 机组。STP 使用冷却池散热系统,从冷却水池中吸取水,并将温排水排放至冷却池中。冷却池面积为 28.3 km²,周围由长为 20 km 的水泥筑堤围成,衬里为黏土。为了提高冷却池水位和维持冷却池的水质,需从科罗拉多河下游取水 and 排水(17 m³/s)。排放位置在取水设施下游 3 km 处,有 7 根与岸边成 45° 的排放管(管径为 91 cm)深入河流,管间距为 76 m。NPDES 许可证排放量限值为 5.45×10⁶ m³/d,并且不应超过科罗拉多河在排放点处流量的 12.5%,当排放点处科罗拉多河流量小于 22.7 m³/s 时,禁止 STP 排放废水。得克萨斯州行政法规规定每日平均温度限值为 35℃,每日最大温度限值为 36℃。STP 温排水热羽影响范围小,没有明显改变河流的生物种群,对水生生物的影响小^[37]。

可见,闭式循环冷却水系统温排水量小,温排水的影响小。当前除了上述运行核电机组使用闭式循环冷却水系统

外,处于联合执照(COL)申请的美滨海核电厂均使用闭式循环冷却水系统,包括 South Texas 工程 3 和 4 号机组与 1 和 2 号机组一样将使用冷却池散热系统;Turkey Point 电厂 6 和 7 号机组使用机械通风冷却塔,取水来自迈阿密 Dade County 的市政污水处理厂的出水。

2.2 近岸排水

大部分美国滨海核电厂排水方式采用离岸排放,近岸排放的只有 Maine Yankee、Pilgrim、Millstone、Indian Point、Oyster Creek、Crystal River 和 Diablo Canyon 7 个核电厂。当前 Maine Yankee 已于早期关闭,无法找到相关排水设施的资料;其他核电厂因地制宜,采取了工程措施,减小温排水的影响。Pilgrim 核电厂的排水渠设计较窄,以提高温排水排放速率;Millstone 核电厂利用废弃的花岗岩采石场,将其作为温排水缓冲池,以降低排至接纳水体中的温度;Indian Point 核电厂采用陆域排放渠连接水下出水结构的排水系统,将流速增至 3.0 m/s 后进入接纳水体;Oyster Creek 核电厂使用 3 台低水头稀释泵,夏季将取水中的一部分直接送至排水口,以降低排水温度;Crystal River 核电厂采用辅助冷却塔降低温排水温度,使得排放口温度不超过 35.8℃;Diablo Canyon 核电厂使用三级堰加速混合和降温后近岸排水。以下介绍 4 个典型近岸厂址核电厂的排水系统特点及环境影响。

2.2.1 Millstone 核电厂

Millstone 核电厂位于康涅狄格州,共有 3 台机组,1 号机组为 BWR,2010 年许可证到期,已经永久性停堆。2 号和 3 号机组均为 PWR,已于 2005 年获得延寿许可证。厂址布置如图 2 所示。温排水排入一个废弃的花岗岩采石场,而后排至开阔海域。当前 NPDES 许可证限制在采石场切割处排放口的最大温度为 40.6℃,最大温升为 17.8℃。排放口外的混合区边界不超过半径 2438 m 范围。温排水不得导致接纳水体平均温升超过 2.2℃,不得导致接纳水体水温超过 28.3℃。

Millstone 核电厂业主自 1979 年开始的温排水影响研究表明,温排水对岩石潮间带群落的影响是有限的,范围大约是排放口附近 150 m 岸线。冷水型物种(角叉菜属、礁膜属和胶黏藻属)消失或出现的季节缩短;温水型物种出现或出现的季节延长(如刺松藻、马尾藻和提克江藻)。在研究年中,Millstone 核电厂附近泡叶藻丰度增加;泡叶藻丰度增加也在 Millstone 机组关闭时的生长季节发生。因此,泡叶藻丰度的增加可能是其他因素如环境温度条件、营养物和光条件导致的。Millstone 附近苦草床的监测显示未受温排水的影响。

1972 年,由于热冲击以及气泡病导致采石场内鱼类的死亡。而后业主设置鱼屏障以防止大鱼进入采石场水域。在采石场中的水温有时会超过一些物种的死亡温度,然而在采石场口处,Millstone 核电厂一直能够满足 NPDES 温排水限值要求。NRC 人员结合监测和研究结果,认为温排水影响一般只限于临近采石场口附近区域,不大可能出现对迁徙鱼类造成热屏障。核电厂温排水对鱼类和贝类可能的影响小^[23]。

综合上述, Millstone 核电厂温排水满足康涅狄格州水质标准要求, 温排水影响小。

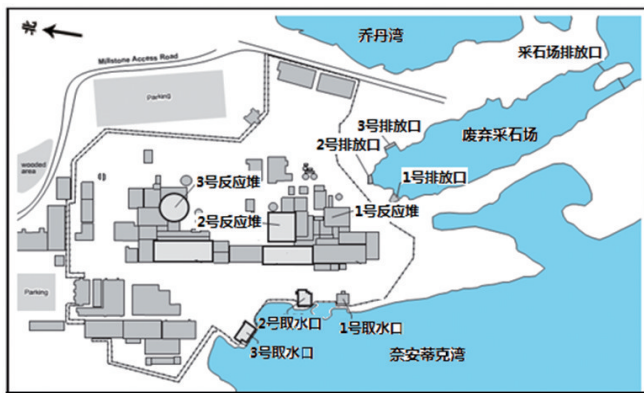


图2 Millstone核电厂址布置

Fig. 2 Millstone nuclear power plant site layout

2.2.2 Indian Point核电厂

Indian Point 核电厂位于纽约州哈德逊河口东岸。两台机组取水量为 $106 \text{ m}^3/\text{s}$, 冷却水经冷凝器后, 通过 6 根直径 240 cm 的管进入排放渠中。排放渠宽 12 m, 排放渠通过位于 2 号机组南部的出水结构(图 3)将温排水排至哈德逊河, 出水结构位于水深约 3.7 m 处, 长度为 76.8 m, 包含 12 个 $1.2 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$ 的排放接口, 流速由 1.4 m/s 增至 3.0 m/s 后进入受纳水体。当前 NPDES 许可证规定, 最大排放温度不超过 43°C ; 每年 4 月 15 日至 6 月 30 日, 每日平均排放温度不超过 34°C 。当排放渠的温度超过 32.2°C 时, 申请者应维持排放流速不低于 3 m/s 。

采用近区模型 (COMIX) 和远区模型 (MIT) 对涨潮/落潮情景进行了模拟分析, 结果表明: 当 Indian Point 核电两台核电机组满功率运行时, 平均 2.2°C 温升范围占表面宽度 54% (8 月退潮) 至 100% (7 和 8 月涨潮), 平均断面被热羽占据的比例为 14% (6 月和 9 月) 至 20% (7 月和 8 月)。若考虑与哈德逊河口其他火电厂 Bowline Point 和 Roseton 的累积影响, 则在 Indian Point 核电厂址处哈德逊河表层被热羽占据的宽度从 36% (9 月退潮) 变至 100% (所有研究月中的涨潮)。在涨平潮时, 表层宽度被 2.2°C 热羽占据的比例为 99% 至 100% (所有研究月)。平均断面被热羽占据的比例为 27% (6 月退潮) 至 83% (8 月涨潮)^[24-25]。可见, Indian Point 核电厂虽然采取了提高流速的工程措施, 但温排水仍然不满足纽约州水质标准要求 (在任何潮型下, 至少 50% 的河口横截面积和/或流体体积以及岸与岸之间最少 1/3 表面, 添加人工热源后温升不超过 2.2°C , 或者不超过 28.3°C), 业主正在进行厂址特性热影响研究^[26], 以满足 316(a) 的要求。

Indian Point 核电厂周围冷水性鱼类如大西洋小鳕和彩虹胡瓜鱼, 可能极易受到温排水导致的温度变化的影响。这两种物种的数量均在下降, 尤其是彩虹胡瓜鱼, 其在哈德逊河流中濒临灭绝。由于在这个方面没有开展针对性的研究,

目前难以准确估计可能的影响程度 (影响程度取决于温排水热羽的幅度和范围、各生命阶段水生生物对温度的敏感性以及导致死亡或次死亡效应的可能性)^[25]。除了温排水影响外, Indian Point 核电厂取水对水生生态系统影响也较为突出, 当前 NRC 尚未批准该电厂的延寿许可。

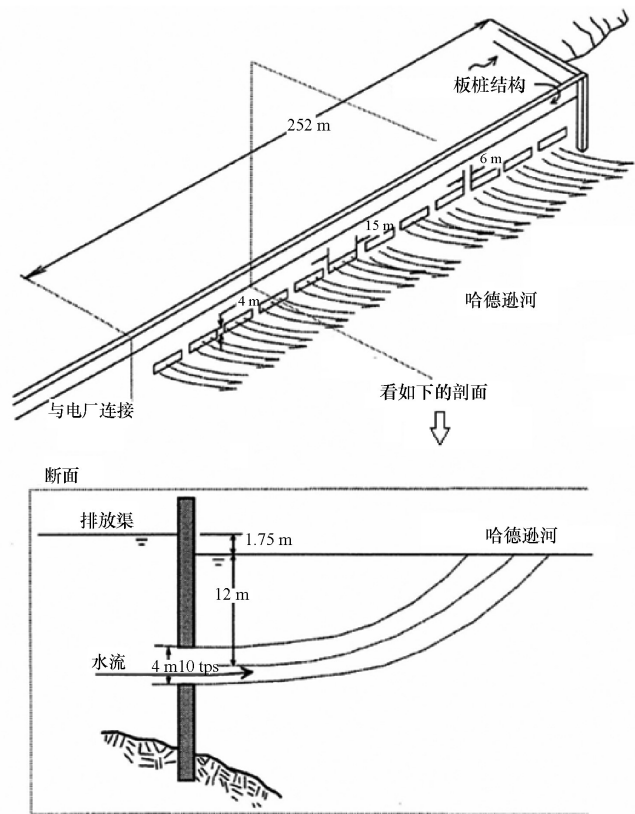


图3 Indian Point核电厂排水结构

Fig. 3 Discharge structures of Indian Point Nuclear Power Plant

2.2.3 Oyster Creek核电厂

Oyster Creek 核电厂 (1 台 BWR 机组) 位于新泽西州。冷却水取自巴尼加特湾, 采用与 Forked River 下游连接的明渠取水, 采用与 Oyster Creek 连接的明渠排水, 使用 3 台低水头轴流稀释泵, 每个泵的额定流量为 $16.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。稀释泵的功能是夏季降低排放温度, 冬季则将排放的水抽至取水口除冰。Oyster Creek 核电厂执行的是新泽西州环境保护部门确定的适用于巴尼加特湾、Forked River 和 Oyster Creek 的地表水质标准, 即温排水混合区外受纳水体环境水温 9 月至 5 月温升不应超过 2.2°C , 6 月至 8 月不应超过 0.8°C , 也不会导致水温超过 29.4°C ; 任何时候, 温排水混合区不应超过断面和/或水体体积的 1/4, 也不能超过岸与岸之间表面的 2/3 区域。

1969 至 1976 年间, 业主进行了一系列研究。带有地面元件的红外热摄像飞行测量结果表明, 热羽长度和宽度常超过州水质标准, 因此需进行厂址特性热影响研究, 以满足 316(a) 的要求。在 1999 至 2004 年监测研究期间, 仅发生过一次

(2002年9月23日)由于稀释泵停运而发生热冲击导致鱼类死亡的事件。核电站温排水的影响是局部的,仅限于排放渠、Oyster Creek 和巴尼加特湾临近部分;并且没有导致巴尼加特湾发生明显变化。NRC 得出结论是,Oyster Creek 核电站温排水的影响小,满足 316(a)的要求^[27]。

2.2.4 Diablo Canyon 核电站

Diablo Canyon 核电站(2台 PWR 机组)位于加利福尼亚州太平洋岸边。温排水在重力作用下从提升的汽轮机厂房流至排水结构中。在排水结构中,温排水流经横向平台安装垂直撞击块的3个堰后进入大海表面(图4)。设计的级联效应促进温排水与空气的接触,并降低温排水中杀菌剂含量。进入受纳水体后,温排水与受纳水体混合并沿着海水表层扩散。根据1995—2008年期间完成的全面温排水影响分析结果,Diablo Canyon 核电站温排水影响没有明显改变或增加当地生物群落。对鱼类和贝类资源热冲击的影响小^[28]。

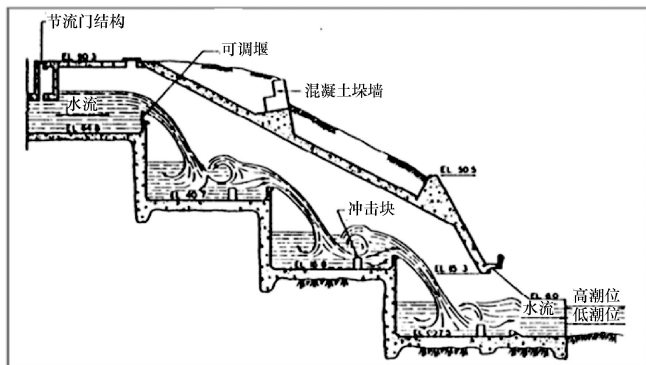


图4 Diablo Canyon 核电站排水结构

Fig. 4 Discharge structures of Diablo Canyon Nuclear Power Plant

Millstone 和 Diablo Canyon 核电站温排水均排放至开放海域。对于开放海域,美国大部分州对温排水混合区的大小没有具体要求,但在确定具体厂址温排水混合区的实际范围时,混合区应遵循最小化原则,即应用可获得的技术优化排放口的位置、设计和运行,将混合区限制在一个尽可能小的区域内,以使其不干扰认定用途,或不干扰认定用途的水体段内的水生生物群落^[40]。Millstone 和 Diablo Canyon 核电站温排水热羽能够满足上述要求,两个核电站温排水影响小。

Indian Point 和 Oyster Creek 核电站温排水均排至河口海域。对于河口和海湾,美国各州对温排水混合区的要求是:任何时间温排水混合区不超过断面和/或水体体积的 1/4 至 1/2;和/或任何时间不超过岸与岸之间表面 1/2 至 2/3^[16]。两个核电站温排水混合区范围均不满足州水质标准要求,故应进行厂址特性热影响研究。Indian Point 核电站厂址附近有濒危物种的出现,当前数据无法支持是否对其造成影响,应进一步开展相关研究。Oyster Creek 核电站的温排水影响范围有限,没有对水生生物造成明显影响,故满足 316(a)要求。

2.3 离岸排水

美国滨海核电站 18 个厂址中 8 个采用离岸淹没式排放, 1 个采用离岸明渠排放。有些厂址虽然位于滨海,但由于距离水体较远,需要采用位于陆地上的排水明渠与水体的排水结构(例如 Surry)或淹没排水管道(如 Brunswick)相接的方式。以下分别介绍 Salem 和 Surry 核电站的排水系统特点及生态影响。

2.3.1 Salem 核电站

Salem 核电站(2台 PWR 机组)紧邻 Hope Creek 核电站。Salem 核电站近岸取水,在取水上游离岸淹没式排水。温排水通过 6 根相邻的直径为 3 m 的管道排出,管间距为 4.6 m,在离岸 152 m 水深 9.5 m 处将温排水排至取水结构的上游。排放方向与盛行的潮流方向垂直。在满功率运行时,温排水流量约为 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$,排放速率为 3 m/s。

Salem 核电站排放口位于特拉华河口水质区域 5,在指定的温排水混合区外非夏季时(9月至5月)温升不得高于 2.2°C ,夏季时(6月到8月)不得高于 0.8°C ,河流全年最大温度不超过 30°C 。温排水混合区是基于“一事一议”方式确定的。Salem 核电站的温排水混合区是季节性的,在夏季,Salem 核电站温排水混合区扩展到排放口上游 7710 m 和下游 6430 m,离航道东部边缘不小于 402 m。在非夏季,混合区扩展到排放口上游 1000 m 和下游 1800 m,离航道东部边缘不小于 970 m。NPDES 许可证给出了在夏季,最大允许排放温度为 46.1°C ;在非夏季,最大允许排放温度为 43.3°C ;全年最大允许排放温升为 15.3°C 。

Salem 核电站温排水以速率 3 m/s 垂直于盛行的潮流方向排出,较高的出口速度产生快速稀释,使得高温升被限制在排放口附近温排水近区。在近区,由于高流速和湍流,鱼及其他游泳生物基本上避开了高温升区域。另外,离岸排放将高温升的热羽限制在河口生产力最低的区域^[29]。从排放位置和设计看,Salem 核电站温排水对水生生物的负面影响小。

为确定热羽对水生生物的影响,1968—1999 年进行了广泛研究。1995 年,业主更新了代表性重要物种(RIS)的热耐受性、热偏好以及逃避温度,并针对热羽对这些物种可能的负面影响进行了评价,结果表明,Salem 核电站的热羽以及设定的混合区将不会对特拉华河口水生生物和娱乐使用产生负面影响。在 1999 年的 316(a)论证中,特拉华河口生物群体分析结果表明,自 Salem 运行以来,可观察到的河口物种组成或生物丰度改变是在水质自然变化导致的变化范围内。没有发现有害物种或压力耐受物种的增加,几乎所有 RIS 物种的幼体的丰度均增加。蓝背鲱鱼的下降是整个海岸范围的变化,而与 Salem 核电站的运行无关^[41]。基于上述结果,NRC 认为,Salem 核电站温排水影响小。

2.3.2 Surry 核电站

Surry 核电站(2台 PWR 机组)位于维吉尼亚州詹姆士河口,从詹姆士河绕过霍格岛的下游处取水,冷却水通过泵送

至取水渠,而后流至厂址两个取水前池中,泵送至汽轮机冷凝器。通过冷凝器后的温排水流过隧道进入 800 m 的陆域排放渠,而后通过填石防波堤铸成的长 340 m 的排放渠,排放渠出口尺寸减小使得温排水以 1.8 m/s 流速排至霍格岛的上游。该电厂的特殊性在于将排放口设置在取水口上游 10 km 处,该设计能够保护位于取水口下游较咸水体中的牡蛎床,使其免受热羽的影响。

业主进行了为期 5 年的综合性调查(包括核电厂运行前的 2 年调查和运行后的 3 年调查),调查结果表明:热羽维持在近岸区域,并且在退潮时延伸至霍格角(位于霍格岛的最北点)附近,在涨潮时向上游扩展并离岸。临近排放点温度超过环境温度 2.8℃ 区域覆盖河水表面面积的 30%。随着与排放口距离的增加,温升迅速下降,在混合区(排放口外 914m 范围)外的温升很少超过 2.8℃。

Surry 核电厂附近鱼类群体的研究表明,鱼类种群随着月份和季节而变化,运行前和运行后的多样性指数没有明显不同或者运行后的值较高。自然和人为的干扰导致 Surry 核电厂周围鱼类种群短期的变化,但长期看,幼鱼种群保持相对多样化和稳定性。因此, Surry 核电厂温排水没有导致鱼类群落明显损害。Surry 核电厂附近底栖生物的研究表明,在核电厂附近发现大量的文蛤。文蛤对温排水没有偏好或回避,其主要是喜好厂址附近粉质黏土基质;美国牡蛎主要生长在厂址下游较盐水域,蓝蟹在厂址附近偶尔出现;这些生物没有受到核电厂温排水的明显影响^[32]。NRC 得出的结论是, Surry 核电厂温排水的影响小,无须缓解措施。

3 讨论和启示

3.1 闭式循环和直流冷却水系统

与直流冷却水系统相比,闭式循环冷却水系统可显著减少取水流量(减少量可达 98% 以上);温排水量小,对水生生物的负面影响小^[42]。美国 CWA316(a) 对闭式循环冷却水系统实行豁免监管。在能源供应方面,由于闭式循环的效率较低,可能会影响电厂的能源供应,尤其体现在夏季用电高峰时;闭式循环冷却水系统的投资费用高于直流冷却水系统,还存在占地面积较大、景观隔断等问题^[43]。因此,在确定滨海核电厂冷却方式时应综合考虑不同冷却方式的环境影响、能源供应、经济成本以及占地和景观等问题。

当前,中国尚无采用闭式循环冷却水系统的滨海核电厂址。

3.2 离岸排水和近岸排水

美国所有采用离岸排放的滨海核电厂均能满足水质标准的要求,即混合区满足相对尺寸的要求(任何时间温排水混合区不超过断面和/或水体体积的 1/4 至 1/2;或者任何时间不超过岸与岸之间表面 1/2 至 2/3),混合区外满足水质准则的要求。有些离岸深排的核电厂如 St. Luice 和 San Onofre 核电厂,表层水温就能满足水质准则要求,温排水混合区范围满足最小化的要求^[40]。美国所有采用离岸排放的滨海核电厂

温排水影响均较小。

然而,对于近岸排放的核电厂,温排水混合区范围常超出各个州规定的混合区的相对尺寸要求,例如 Indian Point 和 Oyster Creek 核电厂。对于不满足州混合区政策要求的核电厂,业主应进行厂址特性热影响研究,以确保接纳水体中结构稳定的土著贝类、鱼类及其他野生生物生长和繁育^[47]。当前,近岸排放的 Indian Point 核电厂虽然采取了减小温排水影响的工程措施,但其温排水的影响仍未被证实是小的。

可见,相对于近岸排放,温排水采取离岸排放尤其是离岸深排时影响范围小,对水生生物的影响小。中国当前采取离岸深排的电厂主要有三门 3、4 号机组、方家山核电厂、陆丰核电厂、昌江核电厂和石岛湾核电厂。

3.3 与中国核电厂温排水的比较及启示

1) 当前中国滨海核电厂址共有 17 个,每个厂址机组数量较多(大于等于 4 台机组),温排水量较大(按单台机组 50 m³/s 计,则取水量在 200 m³/s 以上),大于美国滨海厂址的温排水量(≤152 m³/s),温排水量越大,其可能的影响也越大。

2) 中国滨海电厂温排水近岸排放有红沿河、海阳和宁德核电厂,但均未采取工程措施以提高温排水流速或降低温排水进入接纳水体的温度。

3) 对于离岸明排放,中国福清核电厂排水明渠西导流堤长 1921.3 m,东导流堤长 3498.86 m。防城港核电厂排水明渠长约 6.2 km。这两个电厂以长明渠离岸排水方式,存在景观隔断的影响,美国滨海核电厂中没有类似排水方式,应考虑进行景观优化。

4) 为满足近岸功能区的要求,有些电厂设置导流堤,改变排水方向,例如红沿河 5、6 号机组,田湾和漳州核电厂,这些设施减小了温排水的排放速度,降低了温排水与接纳水体的掺混能力。这种排水方式与美国 Millstone 核电厂使用废弃采石场作为缓冲池而后排入大海的方式不同,后者不占用海域,NPDES 控制的排放口是在缓冲池与海域的连接处。

5) 中国当前缺少核电厂温排水环境影响评价导则、监测及后评估要求,应尽快制定相关规定以规范核电厂温排水影响评价。

综上所述,在排水结构设计上,美国滨海厂址考虑了减小温排水对水生生物影响的措施,大部分厂址采用离岸排放,提高排水流速,有些则因地制宜采用缓冲池、设计三级堰、或者将排水口布置在取水口的上游,必要时使用闭式循环冷却水系统等。美国大部分滨海厂址温排水对水生生态的影响小。

中国核电厂厂址机组数量较多,温排水量较大,应重视温排水对水生生物可能产生的不利影响。在排水系统上,中国核电厂存在的主要问题有:近岸排放缺乏促进掺混的考虑,明渠排放对景观优化的考虑不够,有些电厂为了满足近岸海域环境功能区要求而设置的导流设施有碍于温排水的扩散等问题。应研究制定中国核电厂温排水影响评价导则,对核电厂温排水对水生生物的影响进行准确和规范的评价,

在此基础上优化核电厂温排水排水系统的设计和建造,尽可能降低温排水对水生生物可能产生的不利影响。

参考文献 (References)

- [1] United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC). Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants (NUREG-1437 vol. 1)[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/v1/>.
- [2] 蒋朝鹏, 徐兆礼, 陈佳杰, 等. 秦山核电温排水对鱼类分布的影响[J]. 中国水产科学, 2016, 23(2): 478-488.
Jiang Chaopeng, Xu Zhaoli, Chen Jiajie, et al. Effects of the thermal discharge from Qinshan Nuclear Plant on the distribution pattern of fish [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(2): 478-488.
- [3] 林昭进, 詹海刚. 大亚湾核电厂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 Zhaojin, Zhan Haigang. Effects of thermal effluent on fish eggs and larvae in waters near Daya Bay Nuclear Plant[J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(1): 44-51.
- [4] 张露, 黄莹莹, 陈雪初, 等. 电厂温排水对铜绿微囊藻生长影响的模拟研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 1181-1196.
Zhang Lu, Huang Yingying, Chen Xuechu, et al. Simulation study on effects of thermal discharge from an electric power plant on Microcystisaeruginosa[J]. China Environmental Science, 2015, 35(4): 1181-1196.
- [5] 商照荣, 唐森铭, 陈晓秋. 保障生态安全促进核能工业发展[J]. 核安全, 2008(4): 1-12.
Shang Zhaorong, Tang Shenmin, Chen Xiaoqi. Ensuring ecology safety, furthering the development of nuclear energy[J]. Nuclear Safety, 2008(4): 1-12.
- [6] 蔡泽平, 陈浩如. 大亚湾两种重要经济虾类热效应[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1115-1122.
Cai Zheping, Chen Haoru. Thermal effects of temperature on two commercially important shrimp species in Daya Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1115-1122.
- [7] 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.
Zhang Junbin, Huang Zengyue. An investigation on fish eggs and larvae in sea area around Yangjiang Nuclear Power Plant[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 78-84.
- [8] 傅强, 朱礼鑫, 沈益绿, 等. 滨海电厂温排水对临近海域浮游动物生态特征的影响研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(7): 25-33.
Fu Qiang, Zhu Lixin, Shen Anglv, et al. Survey and comparison of seasonal influences of thermal discharge from coastal power plant on zooplankton community[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(7): 25-33.
- [9] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 44 regarding Crystal River Unit 3 Nuclear Generating Plant[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML11-13/ML11139A153.pdf>.
- [10] U S NRC. GEIS Appendix F: methodology for assessing impacts to aquatic ecology and water resources[R/OL]. (1996-05-01) [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/v2/>
- [11] United States Environmental Protection Agency. Benefits analysis for the final section 316(b) existing facilities rule, EPA 821-R-14-005[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.regulations.gov/docket?D=EPA-HQ-OW-2008-0667>.
- [12] United States Congress. Federal water pollution control act (Clean Water Art)[R/OL]. [2017-08-04]. <http://www.epw.senate.gov/water.pdf>.
- [13] U S EPA. Criteria for determining alternative effluent limitations under section 316(a) of the Act[J]. Federal Register, 1979, 44: 32948.
- [14] U S EPA. NPDES Home, Overview[EB/OL]. [2017-08-04]. <http://water.epa.gov/polwaste/npdes/>.
- [15] U S EPA. NPDES permit writers' manual[R/OL]. [2017-08-04]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/pwm_20-10.pdf.
- [16] U S EPA. 316(a) technical guidance-thermal discharges[R/OL]. [2017-08-04]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100POG8.PDF?Dockey=9100POG8.PDF>.
- [17] U S EPA. Interagency 316(a) technical guidance manual and guide for thermal effects sections of nuclear facilities environmental impact statements[R/OL]. [2017-08-04]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100QPG9.PDF?Dockey=9100QPG9.PDF>.
- [18] 苏州热工研究院有限公司. 广东太平岭核电厂一期工程环境影响报告书[R/OL]. [2017-08-04]. http://www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/20-1510/W020151019504005345046.pdf.
- [19] 苏州热工研究院有限公司. 浙江三澳核电厂一期工程环境影响报告书(选址阶段)[R/OL]. [2017-08-04]. http://www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/201611/W020161107405009026642.pdf.
- [20] NextEra Energy Seabrook, LLC. Applicant's environmental report - operating license renewal stage Seabrook Station Unit 1[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications/seabrook/seabrook-er.pdf>.
- [21] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 46 regarding Seabrook Station, final report[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1520/ML15209A575.pdf>.
- [22] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 29 regarding Pilgrim Nuclear Power Station final report [R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0719/ML071990020.pdf>.
- [23] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plant supplement 22 regarding Millstone Power Station, Units 2 and 3 final report[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0519/ML051960295.pdf>.
- [24] Entergy Nuclear Indian Point 2 & 3, LLC. Applicant's environmental report operating license renewal stage[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0712/ML071210530.pdf>.
- [25] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 38 regarding Indian Point Nuclear Generating Unit Nos. 2 and 3 final report main report and comment responses[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1033/ML103350405.pdf>.
- [26] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 38 regarding Indian Point Nuclear Generating Unit Nos. 2 and 3, draft Report for comment[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1535/ML15351A422.pdf>.
- [27] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 28 regarding Oyster Creek Nuclear Generating Station final report-main report[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0701/ML070100234.pdf>.
- [28] PSEG Nuclear, LLC. Applicant's environmental report-operating li-

- cense renewal stage Hope Creek Generating Station Unit 1 [R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications/hope-creek/hope-creek-envir-rpt.pdf>.
- [29] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 45 regarding Hope Creek Generating Station and Salem Nuclear Generating Station, Units 1 and 2, final Report [R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1108/ML1108A0-21.pdf>.
- [30] Baltimore Gas and Electric Company. Application for license renewal Calvert Cliffs Nuclear Power Plant Units 1 and 2[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications/calvert-cliffs/ccv3.pdf>.
- [31] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants: regarding Calvert Cliffs Nuclear Power Plant - final report [R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/supplement1/>.
- [32] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 6 regarding Surry Power Station, Units 1 and 2, final report[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0233/ML023310717.pdf>.
- [33] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 25 regarding Brunswick Steam Electric Plant, Units 1 and 2, final report[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0609/ML060900480.pdf>.
- [34] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 11 regarding St. Lucie Units I and 2, final report[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0313/ML031360705.pdf>.
- [35] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 5 regarding Turkey Point Units 3 and 4, final report[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML0202/ML020280119.pdf>.
- [36] Progress Energy. Applicant's environmental report-operating license renewal stage Crystal River Unit 3[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications/crystal/crystal-envir-rpt.pdf>.
- [37] U S NRC. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 48 regarding South Texas Project, Units 1 and 2[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1332/ML1332A890.pdf>.
- [38] Pacific Gas and Electric Company (PG&E). Environmental report of Diablo Canyon Power Plant (DCPP) Units 1 and 2[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications/diablo-canyon/dcpp-er.pdf>.
- [39] New Jersey Department of Environmental Protection. Water quality standards[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/njwqs.pdf>.
- [40] Massachusetts Department of Environmental Protection. Massachusetts surface water quality standards implementation policy for mixing zones [R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/mawqs-mixing-zone.pdf>.
- [41] PSEG Nuclear, LLC. Applicant's environmental report - operating license renewal stage Salem Nuclear Generating Station Units 1and 2[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications/salem/salem-envir-rpt.pdf>.
- [42] Electric Power Research Institution. Program on technology innovation: tradeoffs between one-through cooling and closed-cycle cooling for nuclear power plants, technical report[R/OL]. [2017-08-04]. <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000-0000001025006&Mode=download>.
- [43] U.S. Department of Energy Electricity. Reliability impacts of a mandatory cooling tower rule for existing steam generation units[R/OL]. [2017-08-04]. <https://www3.epa.gov/region1/npdes/merrimackstation/pdfs/ar/AR-1169.pdf>.

Analysis and enlightenment from Thermal discharges and their ecological impacts of American nuclear power plants in coastal regions

WEI Xinyu, ZHANG Kun, DANG Yuqin, XIONG Xiaowei, CHE Shuwei

Nuclear and radiation safety center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China

Abstract The characteristics of thermal discharges and their ecological impacts for 18 American nuclear power plant (NPP) sites in coastal regions (31 units) were analyzed. It was found that, for the designs of thermal discharge systems, most American NPPs use offshore discharge systems which also increase the flow velocities at the discharge points. Other NPPs' thermal discharge systems are designed in accordance with local conditions, such as using buffer pool to decrease water temperatures before discharges, designing three weirs to create mixing of the thermal discharges with air; arranging thermal discharge points upstream from withdrawal points; when necessary, using closed-cycle cooling systems. The adverse impacts of thermal discharges on aquatic organisms are small for most American NPPs in coastal regions. As the Chinese NPPs' site has more units, the larger amounts of heated water were discharged into the receiving water, and the adverse impacts of thermal discharges on aquatic organisms may be more obvious. Chinese NPPs have following main problems in the designs of thermal discharge systems: the near shore discharge systems don't have mixing promotion measures; landscape optimization in the design of discharge canals is not considered enough; In order to meet the requirements of the coastal functional areas, some NPPs set up diversion facilities which hinder the heat dissipations. Therefore, we need to make guidelines for thermal discharge evaluations, optimize the designs and constructions of NPPs thermal discharge systems, and minimize the possible adverse effects of thermal discharges on aquatic organisms.

Keywords nuclear power plants in coastal regions; thermal discharge system; thermal discharge; aquatic organisms; ecological impacts
(责任编辑 祝叶华)