

美国滨海核电厂温排水混合区的设置及启示

魏新渝, 张 琨, 王韶伟, 徐海峰, 方 圆, 杨端节

(环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 系统调研美国温排水法规标准体系、混合区政策以及滨海核电厂混合区的设置, 并与我国现状进行比较。可以看出, 美国清洁水法和联邦法规给出温排水和水质标准的一般要求, 各个州的水质标准给出水质准则、混合区政策以及对水生生物保护的要求。水质准则给出各种类型水体温度限值(包括温升限值和/或温度上限值); 混合区政策给出混合区的位置、尺寸、形状以及混合区内水质要求; 具体厂址应基于“一事一议”的方式确定混合区范围, 并满足混合区最小化要求, 大部分美国滨海核电厂混合区范围满足州的混合区政策要求; 少数核电厂混合区范围超过了州混合区政策要求, 这些电厂需进行厂址特性热影响研究, 以证明当前的温排水限值能够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。我国当前没有地区差异的水质准则, 无温排水混合区政策、设置方法或导则。美国温排水混合区设置方法和实践有助于我国滨海核电厂温排水混合区的设置和优化, 以减小对水生生物的影响。

关键词: 核电厂; 温排水; 混合区; 水质标准; 水生生物

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)08-0053-11

DOI: 10.11759/hyxx20170222001

直流冷却水系统核电厂从海洋、湖泊和河流中取用大量冷却水(对于一台 1 000 MW 核电机组, 冷却水的取水量约为 50 m³/s), 冷却水经冷凝器后温度升高 7~15℃, 而后大量温排水回到接纳水体中。我国当前所有滨海核电厂均采用直流冷却水系统, 这些电厂规模大, 机组数量多, 温排水量大, 可能的影响范围较大^[1-6]。

我国当前核电厂温排水混合区的设置一般基于数学模型和物理模型相结合的方式确定, 高温升区域(一般≥4℃)常采用物理模型模拟, 而低温升区域(一般大于等于 1℃)使用数学模型^[1-4]。我国大部分核电厂混合区均设置在《海水水质标准》(GB 3097-1997)中的三或四类水体中, 即人为造成的海水温升不超过当时当地水温 4℃^[5]。有些核电厂温排水量大, 影响范围大, 往往需要调整近岸海域环境功能区的要求, 而将水体功能降级^[3-6]。我国当前尚未有温排水混合区设置导则或标准规定^[7-9]。本文系统调研美国温排水法规标准体系、混合区政策以及滨海核电厂混合区的设置, 并与我国现状进行比较, 为我国滨海核电厂混合区导则的制定奠定基础。

1 美国温排水法规标准体系

美国清洁水法(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 $\Delta T_{\max}$)应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^[10]; 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^[11]; 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, 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松于现有水质标准中温度限值的要求。

美国国家环境保护署(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、形状以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

收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-07-23

作者简介: 魏新渝(1982-), 女, 福建古田人, 高级工程师, 博士, 主要从事电厂厂址排水环境影响研究, 电话: 010-82205711, E-mail: weixinyu2004@163.com; 方圆, 通信作者, 工程师, 研究方向为核电厂环境影响, E-mail: fangyuan1014@126.com

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,仍能确保容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。国家污染物排放削减系统(National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES)许可证书写手册^[12]给出了基于水质准则确定温排水温度限值的方法。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,该许可证每五年需更新一次^[13]。EPA 给出了水质基准和混合区政策的一般要求,各个州则根据一般要求设置具体的水质准则和混合区政策。以下分别介绍 EPA 的水质基准和混合区政策以及拥有直流冷却水系统核电厂的滨海各州水质准则及混合区政策。第2节讨论美国滨海直流冷却水系统核电厂如何执行温排水法规标准要求。

1.1 海水水质的温度要求

基于CWA304(a)(1)要求即EPA阶段性出版并更新环境水质基准,当前有效版本为1986年版的水质基准^[14]。该基准反映了水生生物和人类健康的最新科学知识,该基准不是规章,无法律效力。各州环保部门基于该基准确定水质标准中水质准则。1986年版的水质基准规定:对于海洋生物,当夏季温度不超过最大温度限值时,全年由人工热源导致的最大的可接受周平均温升为1℃。并且不应在任何幅度或频率改变每日水体温度循环特点。夏天最大温度限值是指排放区域生物群落的耐受的最高温度,是基于厂址特点建立的。现有研究给出如下区域温度基准:

亚热带区域(Florida州Cape Canaveral和Tampa湾的南部以及Hawaii):短期水温最大值为32.2℃,真实每日平均水温最大值为29.4℃。

North Carolina州的Cape Hatteras至Florida州的Cape Canaveral:短期水温最大值为32.2℃,真实每日平均水温最大值为29.4℃。

New York州的Long Island(南部海岸)至Cape Hatteras:短期水温最大值为30.6℃,真实每日平均水温最大值为27.8℃。

上述真实每日平均水温是指24h水温的平均值。

在1986年的水质基准基础上,滨海各州根据海域水生生物特点给出了具体的温度准则,海水水质根据其认定的功能进行分类,以Massachusetts州为例,分成SA、SB和SC三类。SA类海域被认定为水生生物很好的栖息地,包括具有生物繁殖、迁移、生长和其他重要功能,并可作为一级和二级接触娱乐用水,水域无需净化就适合贝类养殖,有很好的

美学价值;SB类海域被认定为是水生生物的栖息地,并为一级和二级接触娱乐用水,水域净化后适合贝类养殖,有良好的美学价值;SC类被认定为水生生物的栖息地,并为二级接触娱乐用水,适合工业冷却用水和过程用水,有好的美学价值^[15]。美国滨海核电厂混合区一般设置在SB和SC类中,各州对应区域的温度要求见表1。可以看出,大部分州规定,夏季(6~8月)水温温升不应超过0.8℃(但Florida州 $\Delta T_{\max}=1.1^{\circ}\text{C}$),并给出了温度上限值;非夏季容纳水体温升不应超过2.2℃,且不得改变水温日循环特点。

在夏季自然水温最大值期间,海洋生态系统承受较大的热压力,有些物种能够继续生活,而热敏感物种则消失,这在热带和温带区域尤其常见。温度上限值可作为在最大自然温度期间添加人工热源是否有害的判据。在非夏季(晚秋、冬天和春天),海域自然水温一般是远低于大部分生物的临界温度值上限。在这些季节,人工热量对水生生物群体有较多微妙的影响。一些海洋物种包括冬季比目鱼和鳕鱼要求周期性冷水温度以维持生理活动,包括生长、繁殖以及鱼卵和仔鱼的成活和生长。推荐的海水温升限值为2.2℃,该值约是混合良好的河口水体昼夜温差变化值的50%。允许的温升值应满足冷水型物种的环境要求,该值恰好落在大部分迁移性海洋生物通过热不连续区域的耐受范围内,并且在受到潮汐循环导致的热冲击时保护底栖或潮间带物种^[16]。

河口和海岸的水生生物群体一般经历昼夜和潮汐的水体温度变化。当动物在昼夜水温度变化区域而不是在一个稳定的温度时,其热耐受性较强;同时,温度的昼夜循环变化有助于减小单次暴露在超过最佳温度的持续时间。该现象在潮间带的贻贝中发现。若贻贝间歇被较冷潮水淹没,夏季低潮其短暂的可耐受暴露温度为29~30℃。在实验室稳定暴露到30℃水温中导致贻贝在9~12h内死亡,而每日6h从30~25℃之间循环暴露,贻贝可存活40d^[16]。

可见,美国各个州水质标准中温度准则是基于水体自然每年及每日温度循环得到的,若温排水满足州水质准则的要求,则满足对结构稳定的土著贝类、鱼类和其他野生生物种群生长和繁育的保护,即满足316(a)的要求^[16-17]。当具体厂址所在海域环境热容量可能被超越时,应基于区域水质准则,通过环境容量分析确定流出物温度限值,并进行实地研究和水质模型以确定温排水混合区的范围和尺度,还要与1.2节的混合区政策要求进行比较,若满足要求,则满足316(a)的要求,如表2中的Pilgrim和Millstone核电厂。

表 1 美国滨海各州水质标准

Tab.1 Water quality standards for the U.S. states adjacent to the ocean

内容	美国滨海各州						
	Massachusetts	Connecticut	New York	New Jersey	Mareland	Virginia	North Carolina
水质	10—6 月 $\Delta T_{\max}=2.2^{\circ}\text{C}$ 7—9 月, $\Delta T_{\max}=0.8^{\circ}\text{C}$, $T_{\max}=29.4^{\circ}\text{C}$ 并 且每日最大平 均温度不超过 26.7°C	10—6 月, $\Delta T_{\max}=2.2^{\circ}\text{C}$, 7—9 月, $\Delta T_{\max}=0.8^{\circ}\text{C}$, $T_{\max}=28.3^{\circ}\text{C}$	10—6 月, $\Delta T_{\max}=2.2^{\circ}\text{C}$, 7—9 月, $\Delta T_{\max}=0.8^{\circ}\text{C}$ 河口: $T_{\max}=32.2^{\circ}\text{C}$	9—5 月, $\Delta T_{\max}=2.2^{\circ}\text{C}$, 6—8 月, $\Delta T_{\max}=0.8^{\circ}\text{C}$, 夏季平均 $T_{\max}=29.4^{\circ}\text{C}$ (河口); $T_{\max}=26.7^{\circ}\text{C}$ (海域)	不超过 32°C 或 本底水温	无温度上限 $\Delta T_{\max}=3^{\circ}\text{C}$ (天然 鲑鱼水域 1°C), 最大小时温度变 化 2°C (天然鲑鱼 水域 0.5°C)	9—5 月, $\Delta T_{\max}=2.2^{\circ}\text{C}$, 6—8 月, $T_{\max}=32.2^{\circ}\text{C}$, 6—9 月 $\Delta T_{\max}=0.8^{\circ}\text{C}$, $T_{\max}=32^{\circ}\text{C}$
准则							近岸: 10—5 月, $\Delta T_{\max}=2.2^{\circ}\text{C}$, $T_{\max}=33.3^{\circ}\text{C}$, 开放海: $\Delta T_{\max}=9.4^{\circ}\text{C}$, $T_{\max}=36^{\circ}\text{C}$
混合区 政策	一半宽度或 一半体积	不超过断面 或流体的体 积 25%	河口: 50%断 面和/或 1/3 岸 宽流体的体 积	河口: 任何时候不超 过断面和/或水体 积的 1/4。或者任何时 间不超过岸与岸之间 表面的 2/3; 开放海 域: 禁止在 1500 英尺 (457.2 m) 的海岸线内	24 h 平均的 大 2°C 温升半径 不超过 1/2 平均 退潮程; 2°C 温 升断面不超过 50% 涉及受纳 水体的断面, 两断面在同一 位置。并且, 24 h 平均底部 2°C 温 升面积不超过 5% 的平均落潮 潮程底部面积	任何方向不超 过从排放点至 对岸之间 1/3 处 的平均深度的 5 倍。建议采用淹 没扩散器, 使得 初始稀释区域 外满足水质准 则	没有定量要 求, 满足 316(a) 的要求及混合 区的一般要求
							离岸排放: 排放口处 大于 9.4°C 温升通过 明渠或封闭管道排 入开放水体的限制: 表面温升不应超过 36°C , 并且排放口必 须离岸足够距离以 确保近岸海水水体 不被加热至许可的 限值 温度限制应保 持在任何一 个完整潮汐周期 的至少 50% 的 时间
核电厂	Pilgrim	Millstone	Indian Point	Oyster Creek、Salem	Calvert Cliff	Surry	Brunswick
							St. Luice、Crystal River
							San Onofre

表2 美国滨海核电厂温排水混合区

Tab.2 Mixing zones of thermal discharge for U.S. nuclear power plants in coastal/estuary regions

滨海核电厂	流量(m ³ /s) 排放方式	排放口 $\Delta T_{\max}$ (°C)	排放口 $T_{\max}$ (°C)	热羽范围的预测/实测	满足州混合区政策 或满足 CWA316(a)要求
MA Pilgrim	20, 明渠近岸排放	18(日均值)	38.9(日均值)	1974 年基于表面温度测量表征热羽; 最大表层热羽面积发生在高平潮和落急之间, 8 月当环境温度温度为 17.0°C, 3°C 覆盖面积为 0.87 km ² ; 1994 年基于底部水温测量表征水下热羽, 并且使用数学模型验证和预测最大底部 1°C 温升热羽面积为 0.005 km ² 。满足涨潮和落潮底部热羽特性	州混合区政策
CT Millstone	92, 近岸排放	18(瞬时值)	40.5(瞬时值)	数学模拟四种潮型(落急、低平潮、涨急、高平潮)的外包络	混合区半径为 2438 m 范围(温升 0.8°C 范围)。满足州混合区政策
NY Indian Point	106, 排放渠连接 — 水下出水结构, 流速提升后排放	—	43(瞬时值)4 月 15 日—6 月 30 日, 日平均排放温度不超过 34°C	近区模型(COMIX)和远区模型(MIT)联合模拟涨潮/落潮, 取每月均值与混合区准则比较	平均 2°C 温升范围占表面宽度 54%, 平均断面被热羽占据的比例为 14%至 20%。不满足混合区政策(河口的要求), 业主正在进行替代研究
NJ Oyster Creek	29, 明渠排放	12.8; 18.3(当冷凝器反冲洗、取水结构维护或应急条件下)	41.1; 43.3(当冷凝器反冲洗、取水结构维护或应急条件下)	热羽研究包括使用拖曳式热敏电阻、带有地面真实元件的热红外摄像飞行和数学模型	热羽长度和宽度常超过混合区政策, 即超过岸与岸之间表面的 2/3; 但对水生生态影响小, 满足 316(a)的要求
NJ Salem	127, 离岸深排	15.3	46.1 (6—9 月) 43.3 (10—5 月)	使用三种相关联的模型即环境温度模型、远区模型(RMA-10)和近区模型(CORMIX)表征热羽的最大尺寸和形状。以 24 h 平均 ΔT 表示	夏季, 混合区扩至排放口上游 7.7 km 和下游 6.4 km, 离航道东部边缘不小于 402m。非夏季, 扩展到排放口上游 1km 和下游 1.8 km, 离航道东部边缘不小于 970 m。满足混合区政策
MD Carvert Cliff	152, 离岸深排	6.7	—	染色研究+模型模拟研究	2°C 温升面积大约是 0.34 km ² , 1°C 温升大约 1 km ² , 满足混合区政策
VA Surry	106, 离岸明渠排	—	37.7	5 年的综合性调查(2 年运行前, 3 年运行后)。方法: 固定在浮标上的温度记录仪, 每月用船调查排放的上游和取水附近温度	热羽流维持在近岸区域, 在退潮时延伸至 Hog Point 附近, 在涨潮时向上游扩展并离岸。混合区为排放口外 914 m 范围, 满足混合区政策
NC Brunswick	85.2, 离岸深排	—	—	在混合区边界设置监测点, 每半年监测一次	混合区面积约 8.09 km ² , 小面积(水面 0.49 km ² , 底部 0.004 km ²)温升高于 3.9°C。混合区外满足水质准则

续表

滨海核电厂	流量(m ³ /s) 排放方式	排放口 $\Delta T_{\max}$ (°C)	排放口 $T_{\max}$ (°C)	热羽范围的预测/实测	满足州混合区政策 或满足 CWA316(a)要求
FL St. Luice	50.5~70.6 离岸深排	16.7; 17.8(当节流循环及减少氯使用时)	45; 47.2(当节流循环及减少氯使用时)	使用近区模型模拟热羽范围	表层水温低于 36°C (97°F), 满足开放水域水质准则
FL Crystal River 3	43 近岸排放	9.7	35.8(3 h 的滚动平均值)	数学模拟四种潮型(落急、低平潮、涨急、高平潮)的外包络	混合区在排放口外 3.5 km 范围, 面积小于 9.71km ² 。满足 316(a)的要求
CA San Onofre	106 离岸深排	1 号机组 10 2\3 号机组 11	—	使用近区模型模拟热羽范围	表层温升满足水质准则

注: 一为核电厂未进行监测的参数

可见,美国海水水质标准有大区域的要求,各个州则根据州内水体保护目标有具体要求。我国仅在《海水水质标准》(GB3097-1997)中规定“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 ;符合第三类和第四类水质标准的水体,人为温升不得超过 4°C ”。我国当前水体质量标准中温度要求没有区域差异,没有地方标准,也没有温度上限值要求。然而,我国海域横跨暖温带、亚热带和热带,统一的海水水质标准无法确保不同受纳水体中生物种群的生长和繁育。为了有效控制温排水的影响,我国当前应借鉴美国的经验,结合代表性生物的生物学和生态学参数研究不同区域各类别水体的温度接受准则。

美国滨海各州海水水质准则中的温度要求与我国海水水质标准中的第一类和第二类水体的要求基本相当。我国当前核电站温排水混合区范围常被定义为 4°C 温升包络范围^[5],对 1°C 温升影响范围常进行近岸环境功能区划的调整,而使其满足三类环境功能区的要求^[6]。由美国水质准则要求可知,在满足混合区最小化的前提下,在不降低该水域整体功能的情况下,混合区范围可以设置在符合二类水质标准的水体而无需调整近岸海域环境功能区划。

1.2 混合区政策

混合区是指在水体中设定有限的区域,在该区域对排入的污水进行初始稀释,其水质允许超过水质标准中的水质准则。在美国,混合区应满足美国 CWA303 颁布的水质标准以及 CWA316(a)条款的要求^[10]。

1.2.1 混合区的一般要求

为了指导州或部落制定混合区政策,EPA 提供了混合区政策的一般要求,包括:(1)混合区不破坏整个水体认定的功能;(2)混合区内温升不会导致通过混合区生物的死亡;(3)考虑到可能的暴露方式,在混合区中温升不会导致严重的人类健康风险;(4)混合区不得使重要区域例如生物索饵场、产卵场、濒危物种的栖息地、含敏感生物区域、贝类栖息地、渔业水域、饮用水水源、滨海娱乐区域受到威胁。在不破坏整个水体认定的功能方面,应确保不同类型混合区不重叠(防止不同类型污染物的协同效应),并且避免抱岸热羽。近岸水域一般是水体中生物生产力最高和最敏感的区域,并且这些区域常常被用作娱乐用途。抱岸热羽一般不与受纳水体混合,而维持近岸底栖区域或滨海娱乐区域较高的水温,从而对水体认定的用途产生负面影响^[18]。

温排水在水体中实际物理混合过程可分为 2 个截然不同的区,即近区和远区。近区是指温排水初始喷射动量、浮力和排水口的特点起主导作用的混合区域,该区域常被认为是初始稀释区域。扩散器和排放口的设计者通常努力使近区的初始混合和稀释最大。当排出流遇到诸如表面、底部或内部环境密度分层的边界条件后,近区中止并过渡到远区。远区是指周围环境主导混合过程的区域。在远区中排出流的初始动量和浮力均为零,混合主要是周围环境条件的作用。总之,近区是初始排出流特征和浮力控制的典型区域,而远区是由周围环境条件控制的区域^[7]。

对于水生生物准则的制定,近区对应于急性效应,远区对应于慢性效应,如图 1 所示。在近区,急性和慢性准则可能都会被超越,但在该区域边界满足急性准则。划定急性混合区以防止通过的生物死亡。下一个混合区常被称为慢性混合区,慢性准则可能被超越,但满足急性准则,在慢性混合区边界处满足慢性准则。划定慢性混合区以保护整个水体的认定的用途^[18]。

表 1 中各个州水质标准的温度要求即慢性温度准则。有些州规定了急性混合区的范围和要求,例如 Oregon 州温排水混合区要求是鱼暴露到 32°C 或更高温度的时间应低于 2 s,以防止鱼的急性损伤或瞬时致死^[19];Florida 州规定,当排放口(POD)处 $\Delta T \geq 9.4^{\circ}\text{C}$ 温排水通过明渠或封闭管道排入开放水体时,受纳水体表层温升不应超过 36°C ^[20]。我国研究者结合厂址代表性物种的温度耐受性能研究给出了特定厂址的急性混合区边界的温度限值要求,即典型北方和南方滨海核电站温排水混合区边缘温升限值的推荐值分别为 3.6 和 3.06°C ^[21-22]。急性混合区范围和边界处温度限值可由区域水生生物特点(游泳能力、温度耐受能力)以及水文条件(流速)确定。

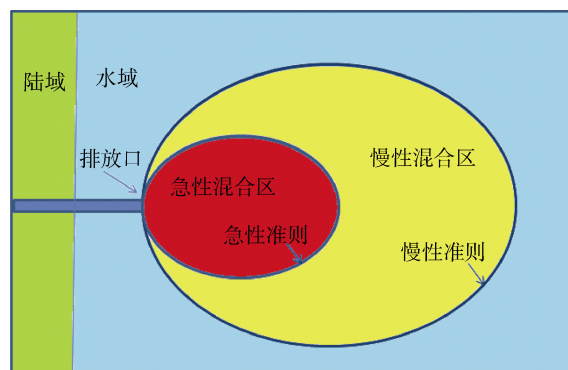


图 1 急性和慢性水生生物准则对应的混合区^[18]

Fig. 1 Mixing zones for acute and chronic aquatic life criteria

1.2.2 州温排水混合区政策

表 1 总结了美国拥有直流冷却水系统核电站的滨海各州, 包括 Massachusetts^[15, 23]、Connecticut^[24]、New York^[25]、New Jersey^[26]、Virginia^[27]、North Carolina^[28]、Florida^[20]和 California^[29]的混合区政策。可以看出, 对于河口和海湾, 温排水混合区有相对尺度要求, 对于开放海域, 大部分州无混合区大小的限制。

对于河口和海湾, 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。Virginia 州则规定: 温排水混合区任何方向不超过从排放点至对岸之间 1/3 处的平均深度的 5 倍。建议采用淹没式扩散器, 使得初始稀释区域外满足水质准则^[27]。

对于开放海域, 大部分州没有规定温排水混合区范围要求。New Jersey 州规定: 温排水混合区禁止在距海岸线 457.2 m 范围内^[26]; California 州规定: 离岸排放, 并且最大排放温升 $\Delta T_{\max}=11^{\circ}\text{C}$; 不得导致海岸线附近、任何海洋底质表面自然水体温升超过 2.2°C , 或者表层 2.2°C 等温升线超过自排放系统往外 304.8 m 范围。表层温度限制应确保在任何一个完整潮汐周期至少 50% 的时间满足要求^[29]。

由上述可知, 美国有较完善的温排水混合区管理要求; 而我国当前尚无混合区政策、管理规定或设置导则, 为了有效控制温排水影响, 应借鉴美国经验并结合我国特点尽快制定混合区管理规定或设置导则, 以约束混合区的位置、尺寸、形状以及混合区内水质要求, 使混合区对水生生物的影响最小化。

1.2.3 具体厂址温排水混合区的确定

具体厂址温排水混合区范围应基于“一事一议”方式确定。首先基于现有可行的控制温排水排放的技术给出排放口温排水温度限值, 通过水质模型和实地测量研究分析热羽影响范围及混合区范围; 若厂址温排水可能超过区域环境容量, 则应基于水质准则通过环境容量分析反推厂址的温排水限值, 进而通过水质模型和实地测量研究分析热羽影响范围及混合区范围^[12]。上述方法确定的混合区范围若满足混合区政策的要求, 则满足 CWA316(a)的要求; 若不满足则应通过厂址特性热影响研究, 证明确定的温排水混合区仍能确保容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, 则也满足 CWA316(a)的要求^[17]。

在确定具体厂址温排水混合区的实际范围时, 混合区尺寸应遵循最小化原则, 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, 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。温排水混合区最小化原则根据其边界落在实际混合近区还是远区, 分为近区准则和远区准则, 具体要求如下^[23]。

近区准则: 对于淹没式排放, 即温排水从接近海底的排放口排放, 在近区边界处温排水满足水质准则, 并且没有违反混合区的其他限制, 则可认为混合区是最小化的。

远区准则——反降级准则: 使用温排水远区作为混合区, 需核实以满足如下反降级要求: (a) 是否有更小环境影响的合理可用或可行的替代厂址、冷却方式或排放方式; (b) 在设计和运行上是否已最大程度降低混合区的影响范围; (c) 混合区是否会破坏水体整体性功能(包括现有和认定的功能)。

当具体厂址的混合区范围不满足 1.2.2 节的要求, 则申请者可提交申请混合区的专题论证报告, 建立替代混合区, 替代混合区应确保容纳水体中结构稳定的土著贝类、鱼类和其他野生生物生长和繁育^[17]。

可见, 在美国的温排水法规标准体系中, 州规定的混合区政策是可以被超越的, 但温排水必须满足对水生生物保护的要求, 即确保容纳水体中结构稳定土著的贝类、鱼类和其他野生生物生长和繁育, 例如 Oyster Creek 核电站温排水混合区不满足州混合区政策要求, 但满足对水生生物保护的要求, 详见第 2 节。

2 美国滨海核电站温排水混合区的设置

表 2 给出了滨海核电站 Pilgrim^[30]、Millstone^[31]、Indian Point^[32]、Oyster Creek^[33]、Salem^[34]、Carver Cliff^[35]、Surry^[36]、Brunswick^[37]、St. Lucie^[38]、Crystal River^[39]和 San Onofre^[40]核电站的流量、排放方式、排放口温升和温度的最大值(即 $\Delta T_{\max}$ 和 $T_{\max}$)、热羽范围的预测和实测方法以及混合区范围。

由表 2 可知, 美国核电站厂址机组数量较小, 温排水流量较小, 一般低于 $150\text{ m}^3/\text{s}$; 东北部濒临大西洋的核电站的排放口 $\Delta T_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 最大值较高, 分别在 18°C 和 40°C 左右, 例如 Pilgrim、Millstone、Indian Point 和 Oyster Creek 核电站。这主要是由于这些区域水生生物丰富, 是很多重要经济鱼类(如冬季比目鱼、鲑鱼)的产卵场和索饵场, 这些地区水生生物的受到取水的卷载影响比温排水更为显著^[30-33], 故核电站采取降低取水量, 提高排水温度, 以对水生

物的整体影响最小化。运行期间, 核电厂需监测排放口处的 $\Delta T_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 的日均值、瞬时值或滚动平均值; Brunswick 核电厂每半年监测一次混合区边界温度^[37]。

核电厂一般使用水质模型和实地测量研究分析热羽的影响范围。使用近区(COMIX 模型)和远区模型(MIT、RMA-10)相结合的方式模拟涨潮和落潮(落急、低平潮、涨急、高平潮)热羽影响范围。根据水质准则或水生生物耐温特点, 混合区的范围取模拟结果的小时均值、日均值或月均值。实地测量研究方法包括贴在浮标上固定点表层温度记录器、拖曳式热敏电阻(船测)、红外热摄像飞行等。

由表 2 可知美国滨海核电厂温排水混合区有如下特点: (1)在河口区域温排水导致的表面温升和横截面温升影响范围满足相应的混合区政策要求, 超出混合区政策要求, 则需证明满足对水生生物保护的要求, 如 Indian Point、Oyster Creek 核电厂; (2)对于温排水可能影响重要底栖生物的区域, 需预测底部温升影响范围; (3)由于有夏季和非夏季水质准则要求, 因此有些核电厂给出不同季节的(夏季和非夏季)的混合区范围; (4)混合区没有固定的形状, 有些以排放口为圆心的圆形, 有些则为矩形或不规则图形; (5)对于离岸深排的核电厂如 St. Luice 和 San Onofre 核电厂, 表层水温能满足水质准则要求, 混合区范围满足最小化的要求(即近区准则); (6)对于近岸排放的核电厂, 混合区外满足水质准则, 混合区的设置没有导致水体功能降级, 对水生生物的影响小, 满足混合区最小化的要求(即远区准则), 例如 Millstone 核电厂 2 号和 3 号机组(电功率共为 2116 MW)混合区范围(温升 0.8°C 热羽范围)是排放口外半径为 2 438 m 区域, 混合区的设置没有降低水体功能并且对水生生物的影响小^[31]。

我国当前具体核电厂混合区的设置是基于“一事一议”的原则^[1-3, 5], 我们的前期工作^[41]已经对当前运行和在建的核电厂混合区的设置情况进行了统计, 我国核电厂两台机组运行时温排水 4°C 温升影响范围为 $1.76 \times 10^{-4} \sim 2.72 \times 10^{-3} \text{ km}^2/\text{MW}$ 之间^[41]。美国 Millstone 核电厂 4°C 温升影响范围为排放口外半径约为 609.6 m 区域, 面积约为 0.57 km^2 , 即 $2.7 \times 10^{-4} \text{ km}^2/\text{MW}$ ^[32], 该值在我国两台机组温升影响范围内, 可见, 虽然我国核电厂使用的预测模型和方法(物理模型和数学模型耦合的方法)与美国(使用数学模型和实地测量研究相结合的方法)不同, 但结果较为接近。然而, 我国在混合区位置的最优化、尺寸的最小化等方面仍

然有很大的优化空间, 急需参考美国的混合区政策并结合我国国情制定出混合区政策或管理办法, 以优化混合区的设置, 使对水生生物的影响最小化。

3 结语

美国清洁水法以及联邦法规给出温排水和水质标准的一般要求, 各个州的水质标准给出水质准则、混合区政策以及对水生生物保护的要求。水质准则给出各种类型水体温度限值(包括温升限值和/或温度上限值)要求; 混合区政策给出混合区的位置、尺寸、形状以及混合区内水质要求; 具体厂址应基于“一事一议”的方式确定混合区范围, 并满足混合区最小化的准则要求, 大部分美国滨海核电厂混合区范围满足州的混合区政策要求; 少数核电厂混合区范围超过了州混合区政策要求, 这些电厂需进行厂址特性热影响研究, 若能证明当前的温排水限值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, 则也满足清洁水法的要求。

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三个层次或任一层次的要求, 不同层次有具体的实施方法和导则, 以确保对水生生物的保护, 又不影响核电事业的发展。

我国当前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。为了有效控制温排水的影响, 我国当前应借鉴美国的经验, 结合代表性生物的生物学和生态学参数研究不同区域各类别水体的温度接受准则。

我国当前尚无温排水混合区政策及其实施方法和导则, 应参考美国滨海核电厂混合区设置的实践经验并结合我国厂址的特点, 给出滨海核电厂温排水混合区的设置导则, 约束混合区位置、尺寸、形状以及混合区内的水质, 满足混合区最小化的要求, 防止水体功能降级, 维持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。

参考文献:

- [1] 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].[2015-10-12]. http://www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/201510/W020151019504005345046.pdf.
Suzhou Nuclear Power Research Institute (SNPI). Environmental Impact assessment report for Taipingling Nuclear Power Plant In Guangdong[R/OL]. [2015-10-12].

- http: //www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/201510/W020151019504005345046.pdf.
- [2] 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]. [2016-11-04]. http: //www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/201611/W020161107405009026642.pdf.
SNPI. Environmental Impact assessment report for the First phase project of Sanao Nuclear Power Plant (sitting phase) [R/OL]. [2016-11-04]. http: //www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/201611/W020161107405009026642.pdf.
- [3] 苏州热工研究院有限公司, 上海核工程研究设计院. 三门核电厂 3、4 号机组环境影响报告书(建造阶段)[R/OL]. [2016-11-09]. http: //www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/201611/W020161114377644106977.pdf.
SNPI, Shanghai Nuclear Engineering Research Design Institute. Environmental Impact assessment report for Sanmen Nuclear Power Plant Units 3 and 4 (construction phase)[R/OL]. [2016-11-09]. http: //www.zhb.gov.cn/xxgk/gs/wqgs_1/201611/W020161114377644106977.pdf.
- [4] 丁跃平, 郭远明, 李铁军, 等. 三门湾春季温排水增温效应数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(4): 101-107.
Ding Yueping, GuoYuanming, Li Tiejun, et al. The numerical simulation studies of the effect of increasing temperature on warmly discharged water in Sanmen-Bay[J]. Marine Sciences, 2015, 39(4): 101-107.
- [5] 国家能源局. 核电厂温排水环境影响评价技术规范[S]. NB/T20299-2014.
National Energy Administration. Technical specifications for environmental impact assessment of thermal discharge in nuclear power plants [S].NB/T20299-2014.
- [6] 李立立, 郭佩芳, 于宁. 滨海核电厂环境功能区调整问题分析[J]. 海岸工程, 2010, 29(3): 28-36.
Li Lili, GuoPeifang, Yu Ning. Analysis on Re-adjustment of Coastal Functioning Zone for Constructing a Nuclear Power Station[J]. Coastal Engineering, 2010, 29(3): 28-36.
- [7] 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.
Chen Xiaoqiu, Shang Zhaorong. The Issue of Thermal Discharge in Reviewing the Environmental Impacts Report for Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Safety, 2007, (2): 46-50.
- [8] 於凡, 张永兴, 杨东. 滨海核电站温排水的混合区设置[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 53-56.
Yu Fan, Zhang Yongxing, Yang dong. An exploratory study on setting up mixing zone of thermal discharge from nuclear power plant[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 53-56.
- [9] 刘永叶, 杨阳, 王亮, 等. 核动力广温排水混合区范围的可接受性论证的初步研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(11): 1402-1408.
Liu Yong-ye, Yang Yang, Wang Liang, et al. Preliminary Study on Acceptability of Scope of Thermal Discharge Mixing Zone for Nuclear Power Plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(11): 1402-1408.
- [10] United States Congress. Federal Water Pollution Control Act (Clean Water Art) [S]. [2002-11-27]. http: //www.epw.senate.gov/water.pdf.
- [11] United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). Criteria for Determining Alternative Effluent Limitations under Section 316(a) of the Act [R].Federal Register, 1979, 44 FR 32948.
- [12] U.S. EPA. NPDES Permit Writers' Manual [R/OL]. 2010, https: //www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/pwm_2010.pdf.
- [13] U.S.EPA. NPDES Home, Overview[R/OL]. http: //water.epa.gov/polwaste/npdes/.
- [14] U.S. EPA. Quality criteria for water (gold book) [S]. 1986, https: //nepis.epa.gov/EPA/html/DLwait.htm?url=/Exe/ZyPDF.cgi/00001MGA.PDF?Dockey=00001MGA.PDF.
- [15] Massachusetts Department of Environmental Protection. 314 CMR 4.00: MASSACHUSETTS SURFACE WATER QUALITY STANDARDS, 2006, http: //www.mass.gov/eea/docs/dep/service/regulations/314cmr04.pdf.
- [16] U.S. EPA. 316(a) Technical Guidance—Thermal Discharges, DRAFT[R/OL]. 1974-09. 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, DRAFT[R/OL]. [1977-05-01]. https: //nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100QPG9.PDF?Dockey=9100QPG9.PDF.
- [18] U.S. EPA. Water Quality Standards Handbook Chapter 5: General Policies, Office of Water Office of Water [S]. https: //www.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/handbook-chapter5.pdf.
- [19] State of Oregon Department of Environmental Quality. Regulatory Mixing Zone Internal Management Directive, Part One: Allocating Regulatory Mixing Zones[R/OL]. 2012.5, http: //www.deq.state.or.us/wq/pubs/imds/draft/mixingzone1.pdf.
- [20] Florida Department of Environmental Protection. Surface water quality standards [S]. [2015-05-19]. https: //www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/fl_section62-302.pdf.
- [21] 李静晶, 张永兴, 刘永叶, 等. 核电厂温排水混合区边缘的温升限值研究——以某核电厂为例[J]. 海洋

- 环境科学, 2011, 30(3): 414-417.
- Li Jingjing, Zhang Yongxing, Liu Yongye, et al. Temperature rise limits in the edge of mixing zone for thermal discharged from nuclear power plants—A case of nuclear power plant[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(3): 414-417.
- [22] 刘永叶, 陈鲁, 乔亚华, 等. 典型北方滨海核电厂温排水混合区边缘温升限值研究[J]. 环境工程, 2016, (11): 60-63.
- Liu Yongye, Chen Lu, QiaoYahua, et al. Study on temperature rise limits on the edge of the mixing zone of thermal discharge from a typical coastal npp in northern China[J]. Environmental Engineering, 2016, (11): 60-63.
- [23] Massachusetts Department of Environmental Protection. Massachusetts surface water quality standards implementation policy for mixing zones [S]. [1993-01-08]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/mawqs-mixing-zone.pdf>.
- [24] Connecticut Department of Energy and Environmental Protection. Water Quality Standards [S]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/ctwqs.pdf>.
- [25] New York State Department of Environmental Conservation. Part 704 Criteria Governing Thermal Discharges [S]. [https://govt.westlaw.com/nycrr/Browse/Home/NewYork/NewYorkCodesRulesandRegulations?guid=I0a173c80b5a111dda0a4e17826ebc834&originationContext=documenttoc&transitionType=Default&contextData=\(sc.Default\)](https://govt.westlaw.com/nycrr/Browse/Home/NewYork/NewYorkCodesRulesandRegulations?guid=I0a173c80b5a111dda0a4e17826ebc834&originationContext=documenttoc&transitionType=Default&contextData=(sc.Default)).
- [26] New Jersey Department of Environmental Protection. Water Quality Standards [S]. 2014-12, <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/njwqs.pdf>.
- [27] Virginia State Water Control Board. Water Quality Standards[S].[2010-12-28]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/vawqs.pdf>.
- [28] North Carolina Department of Environment and Natural Resources Sections. Classifications and Water Quality Standards Applicable to Surface Waters and Wetlands of North Carolina [S]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/nc-classifications-wqs.pdf>.
- [29] California State Water Resources Control Board. Water Quality Control Plan for Control of Temperature in the Coastal and interstate Waters and Enclosed Bays and Estuaries of California [S]. http://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/tmdl/records/state_board/2008/ref2501.pdf.
- [30] U.S. NRC. Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants Supplement 29 Regarding Pilgrim Nuclear Power Station Final Report [R/OL]. 2007, <https://www.nrc.gov/docs/ML0719/ML071990020.pdf>.
- [31] U.S. NRC. Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants Supplement 22 Regarding Millstone Power Station, Units 2 and 3 Final Report [R/OL]. 2005, <https://www.nrc.gov/docs/ML0519/ML051960295.pdf>.
- [32] 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]. 2010, <https://www.nrc.gov/docs/ML1033/ML103350405.pdf>.
- [33] 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]. 2007, <https://www.nrc.gov/docs/ML0701/ML070100234.pdf>.
- [34] 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]. 2011, <https://www.nrc.gov/docs/ML1108/ML11089A021.pdf>.
- [35] U.S. NRC. Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants: Regarding Calvert Cliffs Nuclear Power Plant - Final Report [R/OL]. 1999, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/supplement1/>.
- [36] 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]. 2002, <https://www.nrc.gov/docs/ML0233/ML023310717.pdf>.
- [37] 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]. 2006, <https://www.nrc.gov/docs/ML0609/ML060900480.pdf>.
- [38] 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]. 2003, <https://www.nrc.gov/docs/ML0313/ML031360705.pdf>.
- [39] U.S. NRC. Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants Supplement 44 Regarding Crystal River Unit 3 Nuclear Generating Plant, Draft Report for Comment [R/OL]. 2011, <https://www.nrc.gov/docs/ML1113/ML11139A153.pdf>.
- [40] U.S. NRC. GEIS Appendix F: Methodology for Assessing Impacts to Aquatic Ecology and Water Resources [R/OL]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/v2/>.

[41] 魏新渝, 商照荣, 杨端节, 等. 核电厂直流冷却和闭式循环冷却方案比选调研报告[R]. 2015, NNSA-189.
Wei Xin-yu, Shang Zhao-rong, Yang Duan-jie, et al.

Investigation report on nuclear power plants with once-through cooling system compared with closed-circuit cooling system[R]. 2015, NNSA-189.

Insights on the development of thermal discharge mixing zones from U.S. nuclear power plants in coastal regions

WEI Xin-yu, ZHANG Kun, WANG Shao-wei, XU Hai-feng, FANG Yuan, YANG Duan-jie
(Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China)

Received: Feb. 22, 2017

Key words: Nuclear power plant; Thermal discharge; Mixing zone; Water quality standard; Aquatic biota

Abstract: In this study, we investigated U.S. acts, regulations, standards, and policies with respect to thermal discharge and mixing zones and their applications to U.S. nuclear power plants in coastal regions, which we then compared with current Chinese situations. We found that general requirements regarding thermal discharge are provided by the U.S. Clean Water Act and the Code of Federal Regulations. The water quality standards for each state contain water quality criteria, mixing zone policies, and the requirements for the protection of aquatic biota. Water quality criteria include temperature limits (temperature increases and/or maximum temperatures) for various types of water. U.S. state mixing zone policies describe mixing zones in terms of location, maximum size, shape, and in-zone water quality. Individual mixing zones for specific discharges are defined on a case-by-case basis using the state mixing zone policies, and must ensure that the mixing zone size is minimized. Most thermal discharge mixing zones from U.S. nuclear power plants in coastal regions meet their respective mixing zone policies. For those unable to meet the mixing zone standards, site specific studies are conducted to determine the impacts of the thermal discharges to ensure the projection and propagation of balanced, indigenous populations of shellfish, fish, and wildlife in and on the body of water into which the discharge occurs. In China, there are no regional differences in water quality criteria and there are no policies, implementation methods, or guidelines for mixing zones. Therefore, the U.S. development of methods and practical experiences for thermal discharge mixing zones can help in the development and optimization of strategies for the thermal discharge mixing zones of Chinese nuclear power plants, thereby reducing the impacts on aquatic biota.

(本文编辑: 康亦兼)