

核电厂温排水环境影响评价现状及问题探析

魏国良, 魏新渝, 刘永叶, 张琨, 滕柯延, 王韶伟

环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082

摘要 温排水是核电厂主要的特征排放物, 其对环境的影响正在引起越来越多的关注。本文介绍了温排水对水环境和水生生物的影响, 从温排水影响的范围、控制和管理、监测等方面讨论了中国核电厂温排水环境影响评价和管理现状, 同时介绍了国外在温排水管理方面的做法, 总结了核电厂温排水领域目前存在的主要问题, 提出了加强生态调查和温排水生态效应研究、开展温排水现场监测、充分考虑环境因素确定取排水方案、制定温排水排放和评价标准、加强温排水综合利用研究等针对性建议。

关键词 核电厂; 温排水; 环境影响评价

核电厂由于不产生温室气体及SO₂、NO₂大气污染物, 已成为目前中国电力发展的重点方向之一。《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》提出, 到2020年, 中国核电装机容量达到5800万kW, 在建容量达到3000万kW以上^[1]。中国目前运行和在建核电厂的冷却方式均为一次直流冷却, 在保证核电厂安全运行的同时将大量温排水排入水体。水体升温将对水体理化性质和生物产生一定的不利影响, 近年来其对环境的影响已经引起人们的普遍关注, 也成为核电厂环境影响评价和审查的重要内容之一。中国核电厂温排水环境影响评价已经有多年经验, 但其中仍然存在一些难以解决的问题, 制约着中国核电事业的快速发展。

1 温排水的环境影响

温排水定义为大量排入自然水体的温度高于自然水体水温的水^[2]。由于核电厂排放的温排水量远远大于火电厂, 对水域的影响范围也相对较大,

因而对核电厂温排水的关注度也更高。电厂温排水排入海洋和地表水体后, 首先引起一定范围水体的升温, 而后再引起一系列的生态学效应, 除了在特定水体和季节可能会有一定的正面影响外, 更多的是对水环境和水生生物的负面影响^[3,4]。

1.1 对水环境的影响

水温升高会引起水体的多种物理变化和化学变化, 包括水体密度、水色、透明度、气体溶解度的变化及水体中化学反应和生物降解速率的改变等^[5,6], 这些理化性质的变化可能会导致水体水质下降。由于溶解氧含量与水生生物的生命活动息息相关, 从而成为最受关注的水质指标之一。相关研究表明, 水温与溶解氧含量的相关系数很高, 水体中溶解氧含量随水温升高呈下降趋势^[7]。水体增温会促进有机物分解, 使水中无机盐浓度增加^[8], 同时还会使水中浮游植物的繁殖加快, 蓝、绿藻数量由于温度增高而增加, 加快水体的富营养化进程^[9,10]。此外, 寒冷地区电厂温排水还可能导致

受纳水域冰情的变化, 从而影响冰上活动的生物。例如在中国红沿河核电厂运行后, 温排水可能会引起一定范围内结冰时间延迟和融冰时间提前, 从而影响冰上产仔的斑海豹的栖息和繁殖。

1.2 对水生生物的影响

温度可对浮游植物的生长繁殖及群落结构产生重大影响^[11]。不同的浮游植物有特定的适温范围, 水温适度增高能够促进浮游植物生物量的增加; 但水温增高太多, 则会使浮游植物的生物量大幅降低^[12]; 当温度超出耐受范围时, 浮游植物的代谢活动将受到抑制, 甚至导致死亡。另一方面, 随着水温的升高, 浮游植物群落的优势种将逐渐变为耐热性较强的物种^[13,14]。金腊华等^[15]对湛江电厂周围水域的生态调查研究发现: 当水体适度增温(温升≤3℃)时, 浮游动物的种类数平均增加76%(水温较低的冬季表现明显); 但在水体强增温(温升>3℃)时, 浮游动物种类数减少(夏季自然水温较高时表现明显); 在强增温(温升>4℃), 即水温

收稿日期: 2016-07-13; 修回日期: 2016-07-25

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201509074); 国家科技重大专项(2013ZX06002001)

作者简介: 魏国良, 高级工程师, 研究方向为生态学与环境影响评价, 电子信箱: weiguoliang78@163.com; 王韶伟(通信作者), 高级工程师, 研究方向为核设施环境影响评价, 电子信箱: wangshaowei@chinansc.cn

引用格式: 魏国良, 魏新渝, 刘永叶, 等. 核电厂温排水环境影响评价现状及问题探析[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 66-71; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.15.009

超过 35℃ 时,浮游动物的种类和数量都会减少。此外,温排水中携带的余氯也是公认的损害浮游生物的主要因素之一^[16-18]。

当温排水与底层水充分混合并且温度升高到一定程度时,底栖生物的群落组成也可能会出现异常变化。研究表明,水温增高可降低底栖生物的丰富度和多样性,尤其夏季当水温超过 30℃ 时,某些底栖生物的丰富度和多样性与水温呈显著负相关关系^[19]。就不同温升区而言,底栖生物受影响的区域主要为排水口附近温升在 3℃ 以上的强增温区^[20]。

一般在适温范围内,水温升高会促进鱼类的生长,但如果超过其适温范围,则会对某些鱼类的繁殖、胚胎发育、鱼苗成活等产生不良影响。核电厂停堆和启堆导致的冷冲击和热冲击会导致鱼类死亡^[21,22]。成鱼对高温具有回避能力,因而温排水对开阔海域内的成鱼影响较小;但仔鱼运动能力较差,易受局部增温影响,尤其在排水口附近水域^[23]。

2 核电厂温排水的影响范围

2.1 温排水温升包络范围

预测温排水在受纳水域的掺混扩散规律通常有数学模型和物理模型两种研究手段。物理模型试验是按照相似性准则,将原型缩小为一定比尺的模型,在模型中再现与原型相似的流场和温度场,通过对模型中温排水行为特征的观测和对观测数据的分析,引申确定原型的温排水扩散特征^[24];数值模拟计算是将描述水流运动的方程,采用离散化方法,建立数学模型,并通过计算机进行计算,得到时间和空间上离散点各变量的值,从而对流场和温度场进行定量的描述^[25]。

目前,中国滨海核电厂对环境影响评价中温排水影响范围的预测研究,采用的是以数学模型与物理模型相结合的研究方法。数模计算可以模拟大范围海域的潮流场和温排水扩散特性;物模试验能较为准确地模拟取、排水口近区水域的三维水力、热力特性,可较好

地预测近区温升场和机组的取水温升,两种方法具有一定的互补性。从保守角度出发,对于温排水造成的温升包络面积,一般取物模和数模结果中的较大值进行评价。在高温升区,物模试验的等温升线包络面积一般大于数模计算结果;而在低温升区,物模试验结果一般小于数模计算结果。

《海水水质标准(GB 3097—1997)》对人为造成的海水温升的规定^[26]如下:三、四类海水水质要求人为造成的海水温升不超过当时当地 4℃;一、二类海水水质要求人为造成的海水温升夏季不超过当时当地 1℃,其他季节不超过 2℃。根据该标准,目前中国核电厂在确定温排水影响范围时,选择数学模型和物理模型较为常见的做法是:2℃ 及以上温升包络面积取物理模型试验结果,1℃ 及以下温升包络面积取数学模型计算结果。

在温排水影响范围的物模试验和数模计算中,潮型的选择一般为典型大、中、小潮和半月潮,通常给出全潮平均和全潮最大 2 套预测结果,在已开展的核电厂温排水环境影响评价中,已达成选择全潮最大预测结果的基本共识。但在潮型的选择上,目前还没有明确的规定采用何种潮型结果作为温排水环境影响评价的基准。模拟给出的最终结果一般有两种情况:其一为典型大、中、小潮的外包络范围,其二为半月潮的包络范围。这两种情况的结果在等温升线的扩展方向和包络面积上可能会存在一些差异,目前一般取两者当中的较大者进行温排水的环境影响评价。

2.2 温排水混合区

由温排水引起的受纳水体温升超过该水域水质标准的范围称为温排水混合区^[27]。核电厂循环冷却水在经过系统内部的热量交换以后,在排放口处一般会形成 8℃ 左右的温升,因此排放口附近区域的温升必然会超过《海水水质标准(GB 3097—1997)》规定的最高温升限值 4℃。

《近岸海域环境功能区管理办法》(国家环境保护总局令第 8 号)第九

条^[28]规定:对入海河流河口、陆源直排口和污水排海工程排放口附近的近岸海域,可确定为混合区。确定混合区的范围,应当根据该区域的水动力条件,邻近近岸海域环境功能区的水质要求,接纳污染物的种类、数量等因素进行科学论证。混合区不能影响邻近近岸海域环境功能区的水质和鱼类洄游通道。

目前中国还没有统一规定温排水混合区的大小,只有部分省份针对核电厂温排水明确划定了温排水混合区。在当地政府未划定温排水混合区范围的情况下,可按照《近岸海域环境功能区管理办法》的相关规定,科学论证后确定出混合区的范围。

3 核电厂温排水环境影响的控制和管理

核电厂址一般选择在远离人类活动的区域,厂址所在的近岸海域一般为一类或二类环境功能区,相应的海水水质为一类或二类水质,核电厂温排水导致的海水温升往往会超过原有的海水水质标准。在中国,核电厂温排水温升与近岸海域环境功能区的水质要求不相符的现象普遍存在,已成为影响核电厂项目审批的主要原因之一。解决温排水温升超标的方法可归为管理措施和工程措施 2 类。

3.1 管理措施

管理措施即调整近岸海域环境功能区划,使温排水温升与受纳海域的水质标准相符合。通常的做法是将一类或二类水质标准调整为三类或四类水质标准,即将冬季 2℃ 温升包络范围和夏季 1℃ 温升包络范围调整为三类功能区,执行三类水质标准;将 4℃ 以上温升包络范围划为温排水混合区。实际上,管理措施并不能真正减少温排水对环境的影响,人为调整环境功能区的边界并不能缓解受纳海域水质的降低,海洋生物的活动区域也不会因为人为划界而改变。从保护环境的角度看,管理措施并不是值得提倡的办法。考虑到核电厂污染物的排放特点,除大量的温排水外,其他类型污染物排放量很少,因此目前新的调整措施为仅放宽水温的

管理要求,除水温外的其他水质指标如化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐等仍然执行原来较高的水质标准,这样可以避免其他污染物的误排。

国外控制和管理温排水的环境影响更多的是考虑温升对水生生物的影响。

美国《清洁水法》(CWA)规定的国家污染物排放削减制度(NPDES)及各州对水质标准的规定中均含有温排水温升和水体温度最高限值的相关内容,这些规定的目的之一是维持温排水受纳水域中鱼类、贝类和其它水生生物的

生存和发展^[29]。欧盟于2000年10月通过了在水政策领域的团体行动框架指令(Water Framework Directive, WFD),目的是加强保护和改善水环境^[30]。基于WFD,各国制定了各自的温排水温度限值要求(表1^[31])。

表1 部分国家、地区或组织的水温限值规定

Table 1 Water temperature limit in some countries, regions or organizations

国家、地区或组织	排放口环境水温 T 或最大温升 ΔT	混合区边缘温升 $\Delta T'$	混合区范围
世界银行	—	$\Delta T' \leq 3^{\circ}\text{C}$	若未规定混合区,则以距排放点 100 m 处作为混合区边界
美国加利福尼亚州	$T \leq 36^{\circ}\text{C}$	—	距排放系统 300 m 外的水体表面温升不超过 7.2°C
美国纽约州	—	10—6月, $\Delta T' \leq 2.2^{\circ}\text{C}$; 7—9月, $\Delta T' \leq 0.8^{\circ}\text{C}$	—
美国伊利诺伊州	12—3月, $T < 16^{\circ}\text{C}$; 4—11月, $T < 32^{\circ}\text{C}$	—	—
美国佛罗里达州	10—5月, $T < 32.2^{\circ}\text{C}$ 6—9月, $T < 33.3^{\circ}\text{C}$	—	—
法国	在鲑鱼水域取排水温差 $< 1.5^{\circ}\text{C}$, 混合后温度 $\leq 25^{\circ}\text{C}$; 在鲤鱼水域取排水温差 $\leq 3^{\circ}\text{C}$, 混合后温度 $\leq 28^{\circ}\text{C}$; 在饮用水处取排水温差 $\leq 3^{\circ}\text{C}$, 混合后温度 $\leq 25^{\circ}\text{C}$	—	—
加拿大安大略省	$T < 30^{\circ}\text{C}$	$\Delta T' \leq 10^{\circ}\text{C}$	—
中国台湾	$T \leq 42^{\circ}\text{C}$	$\Delta T' \leq 4^{\circ}\text{C}$	距排放口 500 m 处的水体表面温升不得超过 4°C
印度	$\Delta T \leq 7^{\circ}\text{C}$ (对于 1999 年 6 月 1 日后投运的新热电厂); $\Delta T \leq 10^{\circ}\text{C}$ (对于 1999 年 6 月 1 日之前已有的热电厂)	—	—

3.2 工程措施

减少温排水环境影响的工程措施可划分为两种不同方式:减少排放源项和废热回收利用。

1) 减少排放源项。

减少排放源项即从源头上减少温排水的排放量。对于一次直流冷却方式而言,冷却水取多少排多少,废热排放量几乎没有减少的空间,但闭式循环冷却方式则是另外一种完全不同的情形。闭式循环冷却技术即通常所说的“冷却塔”,与直流冷却方式最大的不同在于,冷却塔将核电厂的最终热阱由海水变为大气,核电厂的绝大部分废热通过冷却塔排入大气当中,而进入海水的

温排水量非常少^[32]。冷却塔主要有自然通风冷却塔和机械通风冷却塔两种,在美国、法国等核电大国已经有大量的应用。冷却塔在缓解温排水环境影响的同时,热量进入大气也会产生其他环境影响,主要有雾羽荫屏^[33,34]、飘滴沉积^[35]、下雾^[36]、结冰^[37]、噪声^[38]等,但与大量温排水对海洋环境的影响相比,冷却塔的环境影响相对较小。世界主要核电国家核电厂冷却系统的应用情况如表2^[39]所示。可以看出,滨海核电厂主要采用一次直流冷却方式,内陆核电厂主要采用闭式循环冷却方式。另外,国外核电厂还有通过设置冷却池或冷却渠的方式达到降低入海水温的目的,其

基本原理是增加温排水在大气中的散热时间和散热面积^[39,40]。冷却池或冷却渠的缺点是需要占用大量的土地或海滨湿地。

2) 废热回收利用。

核电厂的热效率约为 30%,其余约 70%的热量以废热的形式排入环境当中。一台百万 kW 级的核电机组温排水排放量在 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,但由于温升较低,核电厂温排水可谓“量大质低”的余热资源,因此核电厂温排水的回收利用比较困难。目前,中国已运行核电厂的温排水绝大多数直接排入大海,一方面造成大量资源的浪费,另一方面还对海洋生态造成了较大的压力。国外自

表2 世界主要核电国家核电厂直流冷却和闭式循环冷却应用情况
Table 2 Application of once-through cooling and closed-cycle cooling in NPP in the world

国家	咸水直流/台	咸水闭式循环/台	淡水直流/台	淡水闭式循环/台	反应堆总数/台
美国	22	1	40	41	104
法国	18	0	8	32	58
日本	55	0	0	0	55
俄罗斯	4	0	25	3	32
中国大陆	25	0	0	0	25
韩国	20	0	0	0	20
英国	19	0	0	0	19
加拿大	1	0	17	0	18
印度	6	0	4	8	18
德国	3	0	4	10	17
乌克兰	0	0	11	4	15
瑞典	10	0	0	0	10

20世纪70年代开始已开展了一系列针对电厂余热利用的研究和工程实践^[41,42],对电厂温排水利用的方式主要有温水养殖和热泵技术等^[43]。利用电厂温排水进行水产养殖,可以减少养殖过程对气候条件的依赖,使养殖品种的生长期延长,产量提高。热泵可以从低温热源中提取热量用于供热,热泵的供热量远大于它所消耗的机械能,因此热泵技术是一种低温余热利用的节能技术。美国和日本在电厂余热利用方面有较多的工程实践,中国在这方面的经验较少,尤其在核电厂温排水的利用方面目前还是空白。目前,中国东北某核电厂出于保护重要水生生物的目的,拟与当地政府合作,将核电厂温排水作为工业利用的热源,从而达到大大减少排入环境的温排水量的目的,这将是国内核电厂温排水综合利用的首例。

4 温排水的监测

目前中国核电厂温排水监测多采用遥感技术,包括卫星遥感和航空遥感,秦山、大亚湾、田湾等核电基地均开展了若干次的温排水遥感监测活动,以及相关科学研究工作。遥感技术具有成本低、速度快、资料同步性好、观测范围大等优点,但同时也存在云干扰、空间分辨率不足等技术难题。

从中国几大核电基地已开展的温排水影响范围的监测实践和相关研究成果看,利用卫星或航空遥感监测手段,基本能反映核电厂温排水的扩散规律。与模型预测的结果相比较,二者的一致性较好:温排水扩散方向和形态比较一致,遥感监测的温排水温升包络面积一般小于模型预测的面积,符合模型预测偏保守的认识。但也有个别厂址个别时段出现遥感监测结果大于模型预测结果的情况,说明模型预测仍存在一定的不确定性。

5 结论及建议

虽然核电厂温排水的环境影响问题已经讨论了多年,每个核电项目都开展了温排水环境影响的预测和评价,但其中仍有一些问题长期存在,需要进一步研究并加强管理。

1) 进一步加强生态调查和温排水生态效应研究。目前核电厂所在海域的生态调查多是因项目审批的需要而开展的,存在连续性不够、可比性不强的问题。应结合核电厂温排水排放的时间节点和影响范围制定针对性的调查方案,开展定期连续跟踪调查,对历次调查结果进行深入对比分析,以其变化来反映温排水的影响。目前开展的温排水生物影响研究多集中于个体和

种群层次,进一步的研究工作还应在群落和生态系统层次开展。

2) 开展模型预测、遥感监测、现场监测三者的比较研究。温排水影响范围的数模计算和物模试验以及遥感监测都存在一定的局限性和不确定性,因此预测结果和与监测结果存在一定偏差。应开展核电厂温排水现场监测工作,通过定点连续监测了解温排水的真实扩散规律。现场监测结果可用于预测模型的校正和改进,使之更具实用性,还可以指导后续的遥感监测工作。

3) 充分考虑环境因素,优化取排水方案。核电厂的取排水方案在设计时,除工程因素和经济因素以外,还应更多的考虑环境因素。核电厂所在海域不同,其生态敏感性也不相同,例如在生态脆弱性较高的封闭海湾建设核电厂时,应采用将海洋生态影响降至最小的取排水方案。如有条件,可采用冷却塔方案,如果必须采用一次直流冷却方式,在温排水出流方式上也可作相应的优化设计,如深排、喷射散热等。

4) 制定温排水排放和评价标准。中国目前没有规定核电厂温排水排放的温度限值,温排水环境影响评价主要参考《海水水质标准》对海水温升的规定。核电厂温排水的固有温升必然导致温排水温升超标的情况,为后续的评价和管理带来一系列困难。因此,可借鉴国外的相关做法,制定中国核电厂温排水的排放标准,根据当地水生生物的适温习性,制定有地域特性的温升限值。

5) 加强温排水综合利用的研究。随着中国核电机组的不断增多,将有越来越多的温排水排入环境,对环境的影响也将越来越大。应尽快转变思路,充分重视对余热资源的综合利用。在国家提倡循环经济和节约型社会的背景下,相关科研单位应积极开展温排水综合利用的技术研究。核电企业可与当地政府合作,结合当地的发展规划,寻求适合的温排水利用方式,实现经济效益、生态效益、社会效益的共赢。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国国务院. 国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划(2014—2020年)的通知[EB/OL]. 2014-11-19[2016-0701]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm.
State Council of the PRC. Issued by the general office of state council of the People's Republic of China on the strategic plan of action on energy development (2014-2020)[EB/OL]. 2014-11-19 [2016-0701]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm.
- [2] 全国科学技术名词审定委员会. 电力名词: 第2版[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 13.
China National Committee for Terms in Sciences and Technologies. Chinese terms in electric power: (2 Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2009: 13.
- [3] Barnett P R O. Effects of warm water effluents from power stations on marine life[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1972, 180(1061): 497-509.
- [4] Hillman R E, Davis N W, Wennemer J. Abundance, diversity, and stability in shore-zone fish communities in an area of long island sound affected by the thermal discharge of a nuclear power station[J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1977, 5(3): 355-381.
- [5] 贺益英, 赵懿珺. 电厂温排水热污染防治对策初探[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(Z2): 183-186.
He Yiyang, Zhao Yijun. Discussions on preventing and controlling countermeasures against the thermal pollution of warm water discharged from power plant[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(Z2): 183-186.
- [6] 夏星辉, 吴琼, 牟新利. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 124-133.
Xia Xinghui, Wu Qiong, Mou Xinli. Advances in impacts of climate change on surface water quality[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 124-133.
- [7] 徐镜波. 热排放对水库溶解氧的影响[J]. *环境科学学报*, 1993, 13(3): 339-346.
Xu Jingbo. Effect of thermal discharge from power plants on dissolved oxygen content of reservoirs[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1993, 13(3): 339-346.
- [8] Chen C W, Weintraub L H Z, Herr J, et al. Impacts of a thermal power plant on the phosphorus TMDL of a reservoir[J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(suppl 1): 217-223.
- [9] 徐梦佳, 于磊, 赵彦伟, 等. 水库温排水增温模拟及其对富营养化影响分析[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(6): 1180-1188.
Xu Mengjia, Yu Lei, Zhao Yanwei, et al. The simulation of reservoir water warming by thermal discharge and research on reservoir eutrophication[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1180-1188.
- [10] 李春新. 象山港电厂温排水对水体富营养化影响的模拟与评价研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
Li Chunxin. The study of water eutrophication simulation and assessment on the effects of power plant thermal effluent in Xiangshan Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [11] Li X Y, Li B, Sun X L. Effects of a coastal power plant thermal discharge on phytoplankton community structure in Zhanjiang Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 81(1): 210-217.
- [12] Sanders J G, Ryther J H, Batchelder J H. Effects of copper, chlorine, and thermal addition on the species composition of marine phytoplankton[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1981, 49(1): 81-102.
- [13] Rajadurai M, Poornima E H, Narasimhan S V, et al. Phytoplankton growth under temperature stress: Laboratory studies using two diatoms from a tropical coastal power station site[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2005, 30(4): 299-305.
- [14] 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.
Liu Sheng, Huang Hui, Huang Liangmin, et al. Ecological response of phytoplankton to the operation of Daya Bay nuclear power station[J]. *Marine Environmental Science*, 2006, 25(2): 9-12.
- [15] 金腊华, 黄报远, 刘慧璇, 等. 湛江电厂对周围水域生态的影响分析[J]. *生态科学*, 2003, 22(2): 165-167.
Jin Lahua, Huang Baoyuan, Liu Huixuan, et al. Impact analysis of Zhanjiang thermal power plant to aquatic ecosystem in Maxiehai canal[J]. *Ecologic Science*, 2003, 22(2): 165-167.
- [16] Choi D H, Park J S, Hwang C Y, et al. Effects of thermal effluents from a power station on bacteria and heterotrophic nanoflagellates in coastal waters [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 229: 1-10.
- [17] Poornima E H, Rajadurai M, Rao T S, et al. Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2005, 30(4): 307-316.
- [18] Chuang Y L, Yang, H H, Lin, H J. Effects of a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and periphyton in subtropical coastal waters[J]. *Journal of Sea Research*, 2009, 61(4): 197-205.
- [19] Arieli R N, Almogi-Labin A, Abramovich S, et al. The effect of thermal pollution on benthic foraminiferal assemblages in the Mediterranean shoreface adjacent to Hadera power plant (Israel)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(5): 1002-1012.
- [20] 赵升, 刘旭东, 张爱君, 等. 黄岛电厂温排水对大型底栖生物群落的影响[J]. *环境监测管理与技术*, 2013, 25(4): 18-23.
Zhao Sheng, Liu Xudong, Zhang Aijun, et al. Effects of thermal water discharged from Huangdao Power Plant on structure of macrozoobenthos[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2013, 25(4): 18-23.
- [21] Ash G R, Chymko N R, Gallup D N. Fish kill due to 'cold shock' in lake Wabamun, Alberta[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1974, 11: 1822-1824.
- [22] Deacutis C F. Effect of thermal shock on predator avoidance by larvae of two fish species[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1978, 107(4): 632-635.
- [23] 林昭进, 詹海刚. 大亚湾核电站温排水对邻近水域鱼卵、仔鱼的影响[J]. *热带海洋*, 2000, 19(1): 44-51.
Lin Zhaojin, Zhan Haigang. Effects of thermal effluent on fish eggs and larvae in waters near Daya Bay Nuclear Power Plant[J]. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(1): 44-51.
- [24] 崔学坤. 潮汐水域温排水物理与数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

- Cui Xuekun. The physical model experiment and numerical simulation of heated discharge in tidal area[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [25] 高燕芳. 潮汐水域水力热力特性的模拟及工程应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- Gao Yanfang. Simulation and application about hydraulic and thermal characteristic in tidal area[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
- [26] 中华人民共和国环境保护部. 海水水质标准 GB 3097—1997[S]. 北京: 环境科学出版社, 2004.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Sea water quality standard GB 3097—1997[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004
- [27] 国家能源局. 电厂温排水环境影响评价技术规范: NB/T 20299—14[S]. 北京: 新华出版社, 2014.
- National Energy Administration. Technical specification in assessing the environmental impact of thermal discharge for nuclear power plants: NB/T T20299—2014[S]. Beijing: Xinhua Press, 2014.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 近岸海域环境功能区管理办法[EB/OL]. 1999—12—10, http://www.mep.gov.cn/gkml/zj/jl/200910/t20091022_171814.htm.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Regulations on offshore environmental function division[EB/OL]. 1999—12—10, http://www.mep.gov.cn/gkml/zj/jl/200910/t20091022_171814.htm.
- [29] EPA. National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES)[EB/OL]. [2016—07—10]. <http://water.epa.gov/polwaste/npdes>.
- [30] European Commission. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy [EB/OL]. [2016—07—10]. <http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework>.
- [31] 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 water from nuclear power plant[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 53—56.
- [32] Torres M J F, Beviotectionlantg up mixing zone of thermal discharge and of the council of combined cooling—and—stripping tower for coastal power plants [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 26: 1—8.
- [33] Chahine A, Matharan P, Wendum D, et al. Modelling atmospheric effects on performance and plume dispersal from natural draft wet cooling towers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136: 151—164.
- [34] Carhart R A, Policastro A J, Dunn W E. An improved method for predicting seasonal and annual shadowing from cooling tower plumes[J]. Atmospheric Environment, 1992, 26(15): 2845—2852.
- [35] Meroney R N. CFD prediction of cooling tower drift[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(6): 463—490.
- [36] Ghosh R, Ray T K, Ganguly R. Cooling tower fog harvesting in power plants: A pilot study[J]. Energy, 2015, 89: 1018—1028.
- [37] Policastro A J, Dunn W E, Carhart R A. A model for seasonal and annual cooling tower impacts[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(3): 379—395.
- [38] Schmitz S. Reducing pump noise in cooling tower applications[J]. World Pumps, 2004(456): 24—29.
- [39] Electric Power Research Institution. Program on technology innovation: tradeoffs between one—through cooling and closed—cycle cooling for nuclear power plants[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institution, 2012.
- [40] United States Nuclear Regulatory Commission. Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants, supplement 17, regarding dresden nuclear power station, units 2 and 3, final report[R]. Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission, 2004.
- [41] Beall S E, Yarosh M M. Status of waste heat utilization and dual purpose plant projects[R]. Tenn: Oak Ridge National Laboratory, 1973.
- [42] Lanford T E. Ecological effects of thermal discharges[M]. London: Elsevier Applied Science, 1990.
- [43] 毕闻彬. 滨海电厂温排水管理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- Bi Wenbin. Research on the management of the warm water of coastal power plant[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

The current situations and problems in environmental assessment of thermal discharge from nuclear power plant in China

WEI Guoliang, WEI Xinyu, LIU Yongye, ZHANG Kun, TENG Keyan, WANG Shaowei

Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China

Abstract The thermal discharge is the main characteristic emission of a nuclear power plant and its environmental impact is attracting more and more attention. This paper reviews the effects on the water environment and the aquatic organisms, and the current environmental assessment and management for the thermal discharge from nuclear power plants in China, focusing on the diffusion range, the monitoring, and the control and management of adverse effects. At the same time the practices of managing thermal discharge abroad are discussed. In view of the major problems in the present assessment and management, some effective control measures are suggested, including the investigation of ecological effects, the on-site monitoring, the optimizations of the water intake and drainage based on a full consideration of environment, the introduction of the standards on the emission and its evaluation, and the comprehensive utilization of thermal discharge.

Keywords nuclear power plant; thermal discharge; environmental impact assessment

(编辑 韩丹岫)