

我国滨海电厂 温排水生态影响 监测与评估

WOGUO BINHAI DIANCHANG
WENPAISHUI SHENGTAI YINGXIANG
JIANCE YU PINGGU

张惠荣 叶属峰 纪焕红 编著



科学出版社

2009 年海洋公益性科研经费专项（编号：200905010）项目资助

我国滨海电厂温排水生态影响 监测与评估

张惠荣 叶属峰 纪焕红 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了我国滨海电厂温排水生态环境监测与评估技术,内容包括:滨海电厂温排水生态影响实验;监测技术;数值模拟技术;生态损害评估技术;监测与评估技术应用等。本书通过滨海电厂温排水对海洋生态环境影响的系统分析,科学地提出了滨海电厂温排水项目技术论证中的关键技术,为有效监管滨海电厂温排水对海洋生态环境的影响,完善该领域的法律法规起到技术支撑的作用,尤其对滨海电厂温排水影响面积及邻近海域功能区划调整、温排水混合区界定、开展排水海洋生态动力学等研究具有一定的参考意义。

本书可作为海洋科学和环境科学相关专业的研究生、本科生、教师、科研工作者的参考书,也可供涉海管理工作学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

我国滨海电厂温排水生态影响监测与评估/张惠荣,叶属峰,纪焕红编著. —北京:科学出版社,2015.4

ISBN 978-7-03-044154-6

I. ①我… II. ①张… ②叶… ③纪… III. ①海滨-发电厂-排水-生态环境-环境监测 ②海滨-发电厂-排水-环境生态评价 IV. ①X773

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第080314号

责任编辑:许 健 赵 晶/责任校对:郑金红

责任印制:谭宏宇/封面设计:殷 靓

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

上海叶大印务发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年4月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年4月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:290 000

定价:90.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

电厂温排水对水生生态的影响一直是环境保护领域的重要问题。随着国民经济的快速发展,用电需求急增,国家在滨海区兴建了大量火/核电厂,从而导致温水排放量大增,加大对邻近海域的环境压力。美国环境保护专家预言:产生含热废水的火/核电厂将是未来海洋的最大污染源。如何科学、合理监测与评估滨海电厂温排水的生态影响,已成为我国沿海地区可持续发展中的一个重大科学问题。

国际上对电厂温排水的热影响研究始于20世纪50年代,70年代起该领域的综合研究从室内实验走向野外生态监测,80年代以后向纵深发展,逐渐发展形成一个以热污染(thermal pollution)为核心的综合性生态学研究。我国电厂温排水研究工作始于70年代。90年代初出版了我国第一部有关电厂温排水专著——《水域热影响概论》(金岚,1993)。在这以后,特别是2006年颁布实施《防治海洋工程建设项目污染损害海洋环境管理条例》以来,我国在海洋环境保护中广泛开展了滨海电厂的环境影响评价及温排水的业务化监测与评价。

电厂温排水的研究与管理涉及多学科、多领域。温排水包络线面积也是海域确权、海籍管理和海域使用金数额核定的重要依据之一。尽管滨海电厂建厂前有环境评价,后期有跟踪监测,但监测工作尚缺乏完整的技术体系,尤其是对滨海电厂温排水的污染损害影响没有形成评估技术体系。

《我国滨海电厂温排水生态影响监测与评估》一书系在海洋行业公益性科研经费专项“滨海电厂污染损害监测评估及生态补偿技术研究”(项目编号:200905010)的研究成果基础上编写而成,是我国有关滨海电厂温排水监测与评估研究的新成果。作者精心谋篇布局,以滨海电厂温排水(余热、余氯、核素)对海洋生态环境的污染损害影响为重点,提出建立我国滨海电厂温排水污染损害业务化监测与评估的技术体系;通过调查分析、实证研究与示范应用相结合,构建了完整、清晰的滨海电厂温排水生态影响监测与评估的理论架构。全书分为三大部分:滨海电厂温排水对海洋生态环境影响分析;滨海电厂温排水生态影响实验与监测技术-数值模拟技术-生态损害评估技术;监测与评估技术的应用。该书的出版将为我国滨海电厂温排水温升的业务化监视监测与评估管理提供有力的技术支撑。

作者长期从事海洋管理与业务化技术研究,将海洋行业公益性科研经费专项的研究成果与实践知识相结合,整理出版,以飨读者。相信该书对于广大从事海洋科学、生态学、环境科学研究的科技工作者、教学人员以及从事海洋规划、海洋管理与政策研究的工作人员来说,是一本有益的参考书。希望该书的出版能吸引更多的专家学者和管理人士进一步关心与支持我国海洋环境保护事业,为我国海洋生态文明建设作出贡献。

中国工程院院士

2014年10月31日

前 言

滨海电厂温排水是一个稳定的热水流,挟带着大量的热量注入受纳海域水体,形成一定区域的温升场(水温高于自然水温 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$)。它具有三维空间分布,既有瞬间的变化,又有明显的季节和周年变化。温排水对海洋生态环境的影响具有复合性、多变性、潜在性、累积性等特征。滨海电厂温排水进入水体局部海域,海洋生态环境将受到温升、余氯、核素(核电厂)的影响,成为一种既有能量,又有污染物质和机械损伤等的复合污染体。

1984年,联合国海洋污染专家组(GESAMP)撰写了“Thermal Discharges in the Marine Environment”报告,总结了世界各国科学家近几十年在温排水领域的研究成果。其成果对海洋生态环境的影响引起了各沿海国海洋环境学家的高度关注,同时他们提出了重要研究课题。20世纪80年代初,我国科学家就开始了滨海电厂温排水对邻近海域生态影响的调查研究,在现场监测和实验研究、遥感监测技术、数值模拟技术、温排水温升评估标准以及生态影响评估技术等方面取得了相关的研究成果。

随着我国电力工业的快速发展,滨海大型热(核)电厂发展很快,装机容量增长速度居世界首位。据初步统计,东海区三省一市滨海电厂温排水每年排海热量约 $29.245\times 10^{14}\text{kJ}$ (约9900多万吨标准煤)。如此大量的热量通过冷却水排放到周围水域环境中,会引起相应的海洋生态环境问题,这必将受到广大海洋科学家和海洋部门的极度关注。

目前我国对滨海电厂温排水监督管理的认识正在不断提高,该领域的法律法规、标准规范、管理措施(温排水收费、排污许可证等)尚不足以支撑对滨海电厂温排水的监管。技术支撑是管理的先行者,因而研究滨海电厂温排水生态影响监测与评估技术就显得很迫切。

本书是在海洋行业公益性科研经费专项“滨海电厂污染损害监测评估及生态补偿技术研究”(项目编号:200905010)的基础上,对专项研究的成果进行了筛选、归类 and 提炼;总结了滨海电厂温排水项目技术论证中的相关技术,编纂了《我国滨海电厂温排水生态影响监测与评估》。

全书共分7章,第1章概述了国内外滨海电厂温排水对邻近海域生态环境影响的现状以及监测与评估技术的进展,从研究成果中提炼了监测与评估的科学问题;第2章针对滨海电厂温排水对海洋水环境、海洋沉积物、海洋生物以及海洋生态灾害等方面产生的影响,进行了系统的分析,总结了不同环境下的差异特点;第3章介绍了滨海电厂温排水生态影响实验的方法,系在全国首次将海上围隔实验方法应用于温排水的监测和影响评估中,重点介绍了围隔实验的原理与方法,通过开展海上围隔实验分析了我国典型滨海电厂温排水在不同温升条件下对海水水质和海洋浮游生物的影响,阐述了余氯影响实验的设计、方法及对海洋生物的影响;第4章讨论了滨海电厂温排水影响区域监测范

围确定、监测站位布设、监测指标设置、监测频率设定、监测方法与监测数据处理方法,形成了可供相关领域海洋工作者应用的技术方法;第5章系统地介绍了滨海电厂温排水数值模拟技术,阐述了不同海洋环境下不同数值模型的选用以及相关参数、系数(水面综合散热系数)的选取,通过热(核)电厂温排水数值模拟应用,总结了二维、三维数值模型的优点与特点;第6章提出了滨海电厂温排水海洋生态损害评估概念内涵,构建了海洋生态损害评估方法,开发了海洋生态损害评估系统;第7章介绍了象山港国华宁海电厂、胶州湾青岛电厂、田湾核电站、漳州后石华阳电厂等的案例应用,示范了温升计算方法、生态影响评价方法、余氯监测方法以及温排水海洋生态损害评估方法与评估指标标准值的选取。

本书是“滨海电厂污染损害监测评估及生态补偿技术研究”专项研究团体的集体劳动成果。作者经过一年多的策划、构思与整理,始成其稿。在本书撰写过程中,余宙文教授对全书进行了精心的指导与审阅,杨圣云、徐韧、鲍献文、韩树宗、杨红等专家给予了极大的帮助,在此表示由衷的敬意。对在“滨海电厂污染损害监测评估及生态补偿技术研究”专项中付出辛勤劳动的全体参与人员,以及在本书编写过程中辛勤劳作的赵瀛、邓邦平、余静、常小军、王丹等同志致以衷心的感谢,他们的辛苦为本书的撰稿与出版提供了坚实的基础。

限于作者的学识水平与经验,书中不妥与不足之处在所难免,敬请专家和读者不吝指正。

作 者

2014年9月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 滨海电厂温排水对邻近海域生态影响	1
1.1.1 滨海电厂发展趋势及海水冷却水对环境的影响	1
1.1.2 滨海电厂温排水与热污染	2
1.1.3 滨海电厂温排水的特征	3
1.2 国内外研究进展综述	4
1.2.1 温排水对海洋生态环境影响研究进展	4
1.2.2 温排水生态影响相关技术研究进展	8
1.2.3 海洋生态动力学研究进展及其在滨海电厂温排水中的应用探索	12
1.3 主要研究内容	13
第 2 章 滨海电厂温排水对海洋生态环境影响分析	15
2.1 温排水对海洋水环境的影响	18
2.1.1 温升	18
2.1.2 余氯	24
2.1.3 溶解氧	27
2.1.4 pH	29
2.1.5 活性磷酸盐	31
2.1.6 氨氮	32
2.1.7 总汞	33
2.2 温排水对海洋沉积物的影响	34
2.2.1 硫化物	34
2.2.2 有机碳	35
2.2.3 总氮	36
2.2.4 总磷	36
2.2.5 总汞	37
2.3 温排水对海洋生物的影响	37
2.3.1 浮游植物	37
2.3.2 浮游动物	40
2.3.3 底栖生物	43
2.3.4 鱼卵仔稚鱼	45
2.4 温排水对海洋生态灾害的影响	46

2.4.1 赤潮灾害·····	46
2.4.2 水母灾害·····	48
第3章 滨海电厂温排水生态影响实验 ·····	49
3.1 围隔实验·····	49
3.1.1 原理与方法·····	49
3.1.2 温升对海洋水质的影响·····	52
3.1.3 温升对海洋浮游生物的影响·····	61
3.2 余氯对海洋生物的影响实验·····	66
3.2.1 实验设计·····	67
3.2.2 实验方法·····	67
3.2.3 余氯浓度控制方法·····	69
3.2.4 实验结果·····	71
第4章 滨海电厂温排水监测技术 ·····	85
4.1 监测范围确定·····	85
4.1.1 国内外电厂温升范围研究概况·····	85
4.1.2 典型电厂环评预测温升影响范围·····	86
4.1.3 监测范围设定原则与方法·····	87
4.2 监测站位布设·····	88
4.2.1 断面布设原则·····	88
4.2.2 监测站位布设·····	89
4.2.3 对照站选择·····	90
4.3 监测指标设置·····	90
4.3.1 海洋生态环境常规监测指标·····	90
4.3.2 污染性监测指标·····	92
4.3.3 社会调查指标·····	93
4.4 监测频率设定·····	93
4.4.1 频率设定原则·····	94
4.4.2 监测频率确定·····	94
4.5 监测方法·····	94
4.5.1 水温·····	95
4.5.2 余氯·····	95
4.5.3 ^3H ·····	100
4.6 监测数据处理方法·····	102
4.6.1 温升及包络面积计算方法·····	102
4.6.2 温排水生态影响评价方法·····	103
第5章 滨海电厂温排水数值模拟技术 ·····	106
5.1 温排水数值模拟技术进展概述·····	106
5.2 温排水数值模型介绍·····	108

5.2.1 MIKE2I 模型	109
5.2.2 DELFT3D 模型	109
5.2.3 FLUENT 模型	109
5.2.4 POM 模型	110
5.2.5 ECOM 模型	110
5.2.6 FVCOM 模型	111
5.3 二维温排水数值模拟原理和计算方程	111
5.3.1 二维模型控制方程	112
5.3.2 二维模型定解条件	113
5.3.3 相关参数、系数取值	113
5.3.4 水面综合散热系数	114
5.4 三维温排水数值模拟原理和计算方程	120
5.4.1 三维模型控制方程	122
5.4.2 三维模型定解条件	122
5.4.3 湍流封闭方法	124
5.4.4 三维温排水温度场预测模拟方案	125
5.5 温排水温升影响的数值模拟应用	128
5.5.1 核电厂温排水温升影响的数值模拟应用	128
5.5.2 火电厂温排水温升影响的数值模拟应用	134
第 6 章 滨海电厂温排水海洋生态损害评估技术	138
6.1 温排水海洋生态损害评估进展概述	138
6.2 温排水海洋生态损害评估概念内涵	139
6.2.1 温排水海洋生态损害概念的提出	139
6.2.2 温排水海洋生态损害评估的内涵	139
6.3 温排水海洋生态损害评估方法	140
6.3.1 温排水的影响	140
6.3.2 评估内容	141
6.3.3 评估指标体系构建	142
6.3.4 评估值参数依据	143
6.3.5 生态损害价值评估方法	144
6.4 温排水海洋生态损害评估系统开发	147
6.4.1 专题数据库设计	148
6.4.2 数据库接口设计	151
6.4.3 监测评估系统开发	152
第 7 章 监测与评估技术应用	160
7.1 监测技术应用	160
7.1.1 温升计算方法应用	160
7.1.2 生态影响评价方法应用	163

7.1.3 余氯检测方法应用	166
7.2 评估技术应用.....	169
7.2.1 温排水海洋生态损害评估方法	169
7.2.2 评估指标标准值的选取.....	170
7.2.3 案例应用	170
参考文献	173

第 1 章 绪 论

1.1 滨海电厂温排水对邻近海域生态影响

1.1.1 滨海电厂发展趋势及海水冷却水对环境的影响

随着我国经济和社会的快速发展,电厂工业增长速度日益加快。到 2009 年年底,我国电站的总装机容量仅次于美国,但装机容量增长速度居世界首位。无论装机容量或发电量,长期将仍以火/核电厂为主。根据中国电力企业联合会发布的《2008 年全国电力工业统计快报》,全国年发电量为 34334 亿 kW·h,其中火力发电量为 27793 亿 kW·h,约占全部发电量的 80.95%,同比增长 2.17%;核电发电量为 684 亿 kW·h,约占全部发电量的 1.99%,同比增长 8.79%。

2002 年以来,电力工业经历了体制改革和快速发展的特殊时期,电力结构和技术水平发生了很大变化。300MW 以上规模的机组得到了迅速发展,有力地支持了国民经济的快速发展。火、核电厂由于提供热机冷源和各种设备冷却降温的需要,在火、核电厂运行过程中需用大量的冷却水连续供应。为了满足电厂对海水冷却水的大量需求,国家电力工业部及各沿海省、市相继在河口或沿海地区建设了一批滨海电厂,近年来建大型热(核)电厂的数量不断增加。目前,我国所有的核电厂厂址均位于沿海。

根据国家发展与改革委员会、海洋局和财政部 2005 年 7 月发布的《海水利用专项规划》,每年全球直接利用海水作工业冷却水的总量为 6000 亿 m^3 左右;我国 2003 年利用海水作冷却水的用量为 330 亿 m^3 左右,应用最多的行业是电力、石化、化工等,其中电力企业利用海水作冷却水的量占全国海水作冷却水总量的 90%左右;至 2020 年,我国海水直接利用能力将达到 1000 亿 m^3/a 。按温升 8°C 计算,进入水体的热量将达到 $7.56 \times 10^{17} \text{kJ}$,折合标准煤 1.1 亿 t。对应于冷却水量的大幅增加,冷却水引起的环境问题越来越多,也越来越复杂。

就现有技术条件来看,火、核电厂的能量转化效率比较低。火电厂大约 40%的热能被转化为电能,约 60%的热量被排入海水和空气中;核电厂转变成电能的能量更低,只占约 32%,其余 68%则排入海水和空气中。在近岸、海湾等水资源充足的条件下,从取水口进水,经过电厂内部后的“热水”直接于排水口排放,或者采用循环供水或部分循环供水的方式将来自电厂的“热水”经过冷却降温,再抽回电厂循环使用。作为机组冷源,冷却水经过热交换器后,温升 $8 \sim 10^\circ\text{C}$,成为“温水”流出。温排水具有热量大、水量大的特点。一般说来,百万千瓦级的火电厂,需冷却水量为 $30 \sim 40 \text{m}^3/\text{s}$,同级核电厂需冷却水量为 $50 \sim 60 \text{m}^3/\text{s}$ 。运行中的火、核电厂的热效率比较低,一般由冷却水带走的能量为发电量的 1.4 倍(火电)至 2.5 倍(核电)。据不完全估算,仅东海区三省一市滨海电厂温排水每年排入海水的热量约 $29.245 \times 10^{14} \text{kJ}$,折合 9900 多万吨标准煤。如此大量的热量通过冷却水排放到周围水域环境中,会引起相应的海洋环境问题。

滨海电厂以周围自然海水作为冷却水体,为了防止水生生物对冷却系统的阻塞,因此采取连续或间歇添加液态氯来除去污损生物或降低生物附着活性,从而使得其在我国电厂冷却系统中得到普遍应用。余氯及其产物具有强氧化性,除能抑制水生生物生长外,还能与水中的无机物和有机物反应产生有毒的副产品,如冰溴酸、溴仿等卤化物或其他有毒物质。另外,核电站排放的低放射性废水进入海水以后,其随着水团的运移和扩散作用而被进一步稀释。一部分被海洋生物的摄食作用而吸收富集,另一部分则被海洋悬浮颗粒物所吸附,并随着沉降运动进入海洋沉积物中。由于很多放射性核素具有颗粒活性,所以海洋沉积物对放射性核素的累积和富集也受到很多专家的重视。

1.1.2 滨海电厂温排水与热污染

当前我国的电力建设,每年新增的装机容量和电厂温排水带入自然水域的热量均居世界首位,大型火、核电厂或电厂群大量排热导致的生态环境影响已日益引起重视。火、核电厂的气体排放会使大气近海面层气温升高,同时电厂温排水挟带相当多的热量被排入各种不同的受纳水体中(海洋、河口、河流、湖泊等),使该水体水温升高,产生对水生生态系统的热影响(thermal effect)(金岚,1993)。这种影响包括有益、有害两个方面。温排水对水生生态系统造成的大量、复杂、直接、间接的影响,大多数需要较长时间才能显现出来。而温排水排放特点是总排放量很大、热密度很小、属低温废热、温度随季节而变化。

当温排水对水生生物产生伤害作用时,也就会对受纳水体生态系统产生不利影响,这种情况称为热污染(thermal pollution)(金岚,1993)。不是所有的热排放都会产生不利影响,因此,不应将热排放所致的水体增温统称为热污染。20世纪60年代末,美国国家环境保护局(EPA)为制定“水质评价标准”,组织有关单位和学者研究废热排放对水生生物的影响。70年代中期,国外很多学者以现场为对象做综合性跨学科的研究,认为废热的排入导致受纳水体特性的改变,通常是趋于不利的效应,从而对热污染的概念更具体化了。1976年国外公害资料报道中热污染的定义是:热污染使水体温度升高,增加其化学反应速率,并影响水生生物的繁殖率;氧的溶解度随温度升高而降低;水的密度和黏度下降,并能加速粒状物的沉降速率,影响河流中悬浮物的沉降速率及河流挟带淤泥的能力(金岚,1993)。

滨海电厂循环冷却水中赋存的余热量十分巨大,温排水可引起严重的热污染。一般情况下,滨海火、核电厂温排水的温度一般比环境受纳水体温度高 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。在局部海区,如果温排水常年注入,就会产生热污染的问题。

尽管世界上大多数海区的热污染还不十分明显,但已经发生了一些热污染的危害事件。据报道,全球因为热污染导致嗜热性生物致病的病例在不断增加,至今全球已经有400多例与福氏耐格里(*Naegleria fowleri*)感染有关的神经系统疾病,并导致病人死亡。这些疾病的产生是因为病人接触了热排放污染的河流、海水以及污水等,这些场所发现有大量的福氏耐氏阿米巴虫繁殖生长。随着气候变暖和沿海热排放规模加大,这一类污染导致的病原虫致病事例将会增长(金岚,1993)。

1978年夏季,我国望亭发电厂的温排水直接排入望虞河,使水温高达 40°C 以上,造成渔业损失73t,三水作物损失1.8万t,蚌珠损失4.4万只(金岚,1993)。装机容量大的电站,有时还会引起大范围水域内生物消失。例如,美国佛罗里达州的比斯坎湾,一座核电站排放的温排水使排水口处水温增加 8°C ,造成附近1.5km海域内生物消失(金岚,1993)。

此外,我国台湾核二电厂排水口附近发现“秘雕鱼”(这些鱼的脊柱呈规则性的上下左右双S型弯曲,有的眼睛还向外凸)和核三电厂附近在夏季出现“珊瑚白化”现象(共生藻死亡或脱离珊瑚体外,整株珊瑚会失去色彩而显现出白色骨骼),这些现象足以引起公众对温排水的高度关注。

1.1.3 滨海电厂温排水的特征

滨海电厂温排水是一个稳定的热水流,每秒都将挟带大量的热量注入受纳水体,使排水口附近一定体积的水温高于自然水温 $2\sim 10^{\circ}\text{C}$,这一区域称为温度场。它呈三维空间分布,既有瞬时变化,又有较明显的季节和周年变化规律(金岚,1993)。温排水对海洋生态环境的影响具有复合性、多元性、正负两面性、非污染性、潜在累积性等特征。

首先,温排水是一种既有能量,又有污染物质和机械损伤等的复合污染体。对于管道冷却水而言,水体的生物会受到机械卷载、温升、余氯的三重影响。温排水进入邻近海域之后,水体局部海域的海洋生态环境会受到温升、余氯的双重效应,未使用余氯作为防污损生物附着的,其他物质也会和温升一样对周围海域产生协同效应。对于核电站而言,还存在放射性核素对海洋生态环境污染的问题。

其次,与船舶溢油、化学危险品等其他污染物质相比,温排水导致的海洋生态环境影响不仅是负面影响,而且具有正反两面性。温排水的排放对邻近海域的影响却因季节、温升幅度以及生物的不同而产生不同的影响。例如,在高温的夏季,温排水的排放使周围水体强增温($\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$),其对海洋生态环境产生的影响是不利的、负面的、消极的;而在其他季节,如冬季,温排水的排放使周围水体适度温升($\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$),可以增加水体中浮游生物的种类和含量,其对海洋生态环境产生的影响是有利的、正面的、积极的。而机械卷载、余氯等对冷却水水体中浮游生物、鱼卵仔鱼的损伤,乃至对海洋生态环境产生的影响,无可争议是负面的、有害的。

再次,温排水属于冷却水,它对于水体的影响与化学污染物质不同。一般的化学污染是向水体输送化学物质,当化学物质累积到一定程度,可以使水体丧失原本的使用功能,而温排水是向水体输送热量,属于物理性质的影响。温排水挟带了大量的热量进入水体,引起温升的影响主要局限于排水口附近的局部区域,且不会在评价水域中产生污染累积效应,因为由温排水导入海水的热量最终将通过潮流带到外海和通过海面散热完全排放到大气中。

最后,温排水对水域生态环境热影响存在潜在性、累积性。电厂温排水排放对水域乃至生态系统的影响看起来似乎不及一般常说的化学物质水污染危害大,但其是多方面的、长期的。当然更应看到,热污染的危害更多且更主要的是从根本上、整体上改变水

体理化特性,进而严重影响水生态系统的结构和功能。

1.2 国内外研究进展综述

1.2.1 温排水对海洋生态环境影响研究进展

1. 温升对海洋生态环境的影响

一般来说,滨海电厂排放的温排水温度比受纳水体高 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。大量的温排水排入海洋,首先引起水体温度升高,其次是因水温升高后导致的多种理化性质的改变,最受关注的是水体中溶解氧含量的变化。从文献资料来看,研究温排水对海洋水体溶解氧含量变化的影响的资料较少,而研究温排水对湖泊、水库的影响的资料较多,但两者的作用机理相同,都对研究温排水对海洋生态环境的影响具有一定的借鉴与指导意义。例如,徐镜波(1990)研究了大伙房水库的水温和溶解氧的关系,分析认为:除底层外,水库表层溶解氧含量与水温呈负相关,增温水体每升高 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$,表层溶解氧含量要减少 $1.0\sim 3.0\text{mg/L}$;水温低于 40°C 时,溶解氧含量仍大于 4.0mg/L 。盛连喜和孙刚(2000)研究了电厂热排水对三个水库水体溶解氧含量影响,其研究结果与徐镜波(1990)的基本一致,但同时指出,由于水库水温升高造成水体分层,深层溶解氧含量相当低。胡国强(1989)研究认为水温升高还会加速底泥中有机物的生物降解,使耗氧量增加,加重水体的缺氧。

水体中硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐是水生生物生长和繁殖的重要营养因素。根据对湖泊、水库的影响研究结果,温升会使氨氮、总磷含量增加,增温区的硅酸盐含量较自然水温区高(金岚,1993)。许炼烽(1990)研究认为,电厂温排水的大量排放,使水域中溶解氧减少和水质自净能力下降,促进底泥中磷的释放,使水中氮磷比更趋于适合富营养化特征藻类的增殖需要,在某种程度上加速了富营养化的发生。温升还能引起水体的 pH 及总硬度等指标的变化,从全年平均状况来看,温排水会使水体的 pH 增大,非离子态氨(NH_3)的含量也会随着水温和 pH 的升高而增高(徐镜波等,1994)。盛连喜和孙刚(2000)报道,非离子态氨对水生生物有害,其含量随着水温的升高而升高。Chen 等(2000)报道,热排放还有可能使水色变浊,透明度降低,氨氮含量增高,水质矿化度增高,总磷、总氮含量增高。

据报道,水温增高会使一些毒物的毒性增高,如水温由 8°C 升高到 18°C 时,氰化钾对鱼类的毒性将增加一倍;水温增至 30°C 时,铜、锌、镉 3 种金属离子对浮游动物和底栖动物的毒性增加 $2\sim 4$ 倍。Friedlander 等(1996)的研究表明,热污染可使水体中产生有毒物质的毒性增大、腐殖质增多、水体恶化等环境效应。

水温对海洋生态系统和各类海洋生物活动起着极为重要的作用,它对生物个体的生长发育、新陈代谢、生殖细胞的成熟及生物生命周期都有显著的影响。在自然条件下,海洋水温的变化要比陆地和淡水环境小得多,因此海洋生物对温度的忍受程度也较差,热污染对它们的影响更大,且即使温度变化很小,但作用时间长期持续,对海洋环境的影响也是不可忽视的。滨海电厂温排水邻近水域温度升高,进而使溶解氧含量降低,这将会对生物产生不利影响,特别是在夏季,高温对生物的胁迫作用会因温排水的升温而

强化,加之溶解氧含量减小会造成生物的缺氧,甚至窒息。

浮游植物处于整个食物链的底端,极易受到温度变化的影响,其结构变化必然会影响整个生态系统。Blake 等(1976)研究发现,温升 3°C ,蓝绿藻将成为佛罗里达州坦帕湾海水中浮游植物的优势种。Anderson 等(1994)研究认为,从 0°C 升温到 10°C 后,波罗的海南部海域的浮游植物群落由典型的春季种群(硅藻和甲藻为优势种)向夏季种群(自养兼异养的鞭毛虫为优势种)演替。Chen(1992)指出,温排水作用的季节性作用明显,尤其在夏季热效应影响较大,会使某些藻类暂时消失,使浮游植物的基本种类组成发生改变。曾江宁(2008)对象山港国华宁海电厂温排水对海洋生态影响的试验表明,随着水温的升高,浮游植物群落的优势种逐渐变为耐热性较强的物种。但亦有相关研究表明,温排水对浮游植物的种类和数量有一定的促进作用,如彭云辉等(2001)研究发现,大亚湾核电站运转后受纳水体中浮游植物量比运转前高 1 个数量级;金腊华等(2003)报道,当水体适度增温($\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$)时,群落中的种类数增加,其中浮游植物的种类数平均增加 50%;刘胜等(2006)研究发现,大亚湾核电站运行后浮游植物种类较丰富,甲藻与暖水性种类的数量增多。

温升对浮游动物的分布和生活习性的影响,因增温的幅度不同,其产生的影响亦不同。水温升至 30°C 以上,在强增温水域($\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$)时,大多数浮游动物停止繁殖,甚至死亡或种类灭绝;在中增温水域,浮游动物的产量可能增高也可能降低;而在弱增温水域($\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$)中,多数情况下不会对其种群有不利影响,浮游动物的种类、数量和生物量都有所增加,在冬季尤为明显(邹仁林,1996)。金腊华等(2003)研究认为,在水体强增温($\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$)时,水生生物群落中种类开始减少,特别是夏季,即水温超过 35°C 时,浮游动物的种类和数量都会减少,群落多样性降低,有些种类的数量明显减少,而个别耐热种数量增多,并成为优势种;而当水体适度增温($\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$)时,浮游动物的种类数平均增加 76%。Roemmich 和 Gowan(1995)研究认为,1951 年以来,南加利福尼亚海域大型浮游动物生物量降低了 50%,造成这种现象的直接原因便是海水温度的升高。海洋桡足类是次级生产力的主要承担者,占浮游动物净生物量的 60%~80%,其在生态系统的物质循环与能量流动中起着重要作用。有研究表明,夏季海水温度普遍较高,轻微的温升即可对桡足类的生存造成较大影响。例如, Hoffmeyer 等(2005)发现,在阿根廷巴伊亚布兰卡港河口区,4 个季节中温排水引起的汤氏纺锤水蚤(*Acartia tonsa*)死亡率,以盛夏季节最高、冬季最低。金琼贝等(1991)等室内模拟试验表明,当水温超过 30°C ,随着温度的升高,桡足类生物量显著降低。对印度滨海电厂的调查结果也表明,电厂运行后,桡足类的生物密度显著降低,而电厂关闭后,邻近水体恢复到自然水温,桡足类的种群数量也得以恢复(Suresh et al., 1996)。

底栖动物迁移能力相对弱,在受到热排放冲击的情况下很难回避,容易受到不利的影响。在自然高温水温情况下若再提高水温,动物生长有可能受到抑制或导致死亡,主要反映在强增温区底栖动物的消失;而在自然水温低的情况下,底栖动物种类和数量会增加。胡德良和杨华南(2001)研究指出,湘潭电厂温排水对底栖生物的不利影响主要是高增温区($\Delta T > 6^{\circ}\text{C}$)会减少底栖动物栖息地;在 7~9 月高温季节还会使丰度和生物多样性指数下降;而在自然水温 $< 26^{\circ}\text{C}$ 的季节里,中、低增温区($\Delta T < 4^{\circ}\text{C}$)底栖动物种

类和数量比自然水体丰富,多样性指数值较高。许炼烽等(1991)通过室内控温实验研究认为,温升不利于近江牡蛎的生长,其生长量随着温度升高而降低,当水温 $>30^{\circ}\text{C}$ 时,牡蛎的性腺成熟减慢和孵化率明显降低,畸形率升高,从而影响到牡蛎的繁殖。钱树本和陈怀清(1993)研究发现温排水改变了底栖海藻的群落结构,大量种群消失,而刺松藻等个别海藻的生物量却提高了。王友昭等(2004)研究发现,大亚湾,特别是西部水域(核电站附近),底栖生物种类明显减少,尤其是夏季。还有研究表明,大亚湾核电站温排水会造成珊瑚白化或者褪色现象,甚至会导致珊瑚停止生长(陈镇东等,2000)。

大量余热进入受纳水体后,会改变鱼类等水生生物在水体中的正常分布,引起群落结构的变化,甚至会引起鱼类异常发育事件的发生,对某些有洄游习惯的鱼类造成严重影响。Sandstroem等(1997)研究发现,核电站的温排水使鲈鱼生长能力降低,在其个体很小的时候就成熟,产卵时间提早,产卵期延长,尽管受精率提高了,但很少有受精卵能正常发育至孵化。林昭进和詹海刚(2000)研究发现,大亚湾核电站温排水对整个大鹏澳水域鱼卵和仔鱼的总数量及其季节变化均无明显影响,对鱼卵死亡率的影响也不显著,但鱼类的种群结构发生了一定的改变,如小沙丁鱼(*Sardinella* spp.)鱼卵和仔鱼数量明显增多,斑鰹(*Clupanodon punctatus*)和鲷科(*Sparidae*)鱼类的鱼卵和仔鱼数量显著减少。研究还发现,热排放对邻近水域鱼类的产卵活动影响较为明显,而对仔鱼的生存及分布影响不大。此外,不同增温区对鱼类的影响也不同,通常增温 $>3^{\circ}\text{C}$ 对某些鱼类的危害比较明显,如大亚湾核电站运行后邻近水域中银汉鱼科的仔鱼消失,河鲈的数量迅速减少,有些种群变化会表现出滞后效应;增温幅度 $<3^{\circ}\text{C}$ 对鱼类则表现出有利的影响,一定范围内种群数量随水温升高而提高,并且鱼类的迁入增多、迁出减少,其个体数量也增加(蔡泽平和陈浩如,1999;姜礼燾,2000)。金琼贝等(1989)研究表明,强增温区抑制了饵料生物的生长而导致鳙鱼生物量低于弱增温水体和自然水体。

2. 余氯对海洋生态环境的影响

滨海电厂冷却水中的余氯通过排放系统进入海洋环境中,在 $\text{pH}>7$ 时主要产物为氯胺,但其衰减速度较快。刘兰芬等(2004)的余氯衰减实验表明,在不考虑环境水的稀释作用,排水口余氯含量经过20h后由 0.25mg/L 衰减至 0.01mg/L ,远比在自来水中的衰减速度快。由于余氯衰减很快,且影响范围有限,若在考虑温排水热污染影响的前提下,余氯对邻近海域的影响是有限的。

研究表明,进行氯化的冷却水,其排放口邻近海域的浮游植物的光合作用和呼吸作用受到抑制,初级生产力下降。Eppley等(1976)通过实验研究了余氯对海洋浮游植物初级生产力的影响,发现当初始余氯浓度为 0.1mg/L 时,经2~4h后浮游植物的光合作用速度下降了50%;而 0.01mg/L 的初始余氯浓度经24h后也使浮游植物的光合作用速度下降了50%。Langford(1988)研究表明, 0.2mg/L 的氯可以直接杀死冷却水中60%~80%的藻类。Shafiq等(1993)发现印度东部海岸某一电厂排水口的初级生产力显著低于进水口,当余氯浓度为 $0.05\sim 0.20\text{mg/L}$ 时,排水口的初级生产力降低30%~70%;当余氯浓度为 $1.10\sim 1.50\text{mg/L}$ 时,初级生产力降低80%~83%;而冷却系统不加入余氯时,仅降低16%~17%。电厂温排水中的余氯对邻近水域中的浮游植物的影响(以 0.01mg/L

为阈值)可达数千米范围。Eppley 等(1976)曾估算 San Qnofre 电厂温排水对邻近水域有机碳的损失达到 15~30kg/d。

浮游植物具有较强的恢复潜能,但余氯的排放可能导致浮游植物群落的优势种发生更替。Saravanane 等(1998)在滨海电厂排水口有效氯浓度控制在 0.2~0.5mg/L 时,将取水口、冷却管内、排水口的 3 份水样进行室内培养,硅藻的初始浓度分别为 413 个/ml、352 个/ml 和 381 个/ml,达到同一细胞密度($6.7 \times 10^4 \sim 8.3 \times 10^4$ 个/ml)分别需要 3d、6d 和 8d,说明余氯对浮游植物的损伤能得到较快恢复。但恢复后的浮游植物种类组成发生了变化,电厂取水口、冷却管内、排水口水样的藻类培养试验表明,透明海链藻(*Thalassiosira*)在培养初期所占比例与其他浮游植物接近,但在冷却管内和排水口水样的培养后期却成为优势种,优势度达到 100%。此外,不同水质条件下,氯对浮游植物的影响程度不一。当海水中总颗粒物和溶解有机碳占比例较高时,大量活性氯被消耗,同样浓度的氯对浮游植物的影响较小。

浮游动物虽是水生生态系统的重要组成部分,但目前对浮游动物受氯影响的研究报道较少。浮游动物对氯较敏感,较低浓度的氯即可对浮游动物产生明显的影响。浮游动物对余氯的敏感程度与水温密切相关,温度高时,敏感性提高,即余氯对水生动物的毒害作用增强。例如,桡足类汤氏纺锤水蚤的 48h 半致死浓度(LC₅₀)余氯浓度为 0.029mg/L。Capuzzo 等(1976)用美洲龙虾蚤状幼体进行研究,也发现在相同浓度下,30℃条件下的死亡率明显高于 20℃条件下的。Cairns 和 Dickson(1977)认为温度的升高将使生物的代谢加强,从而增加了对氧的需求,而余氯抑制了氧的供应,结果使生物因缺氧窒息而死。浮游动物受余氯连续暴露影响的浓度低于间歇暴露的浓度。

余氯可造成贝类滤食率、足活动频率、外壳开闭频率、耗氧量、足丝分泌量、排粪量等亚致死参数的降低,从而使贝类失去附着能力。当余氯浓度低于 1mg/L 时,贝类仍可以打开外壳进行摄食,但摄食速率降低;当余氯浓度更高时,贝类被迫关闭外壳,依靠体内积蓄的能量和缺氧呼吸作用生存,直至能量完全消耗或代谢废物达到毒害水平。Klerks 等(1996)通过实验研究表明,0.5mg/L 浓度的余氯可以使斑马纹贻贝(*Dreissena polymorpha*)幼体在 2h 内全部死亡。余氯对贝类的影响存在体龄、物种和季节等差异。

3. 机械卷载对海洋生物的影响

除温升、余氯外,温排水产生过程中还伴随着对海洋生物的机械损伤。因冷却吸入大量海水,经挡网、水泵、冷凝器后,水中挟带的浮游生物、鱼卵、鱼苗、幼鱼可能受到伤害,导致死亡。研究显示,卷载效应对浮游动物损伤率较浮游藻类高。据 Robert 等(1957)的调查,被卷载的浮游动物几乎 100%被杀死,但同时指出,仅在排水口邻近水域见到其数量减少外,距排放口不远的水域其数量却明显增加,由于这样的区域水温适宜,浮游动物的数量常比取水口高出几倍甚至几十倍。沈楠(2007)研究发现,长山热电厂取排水浮游动物的卷载损伤率为 67.6%~75.5%,浮游动物中尤其是枝角类因体积较大而损伤较大。盛连喜等(1994)研究发现胶州湾青岛电厂对浮游藻类的机械损伤率为 11.98%~27.08%,浮游动物损伤率为 31%~90%,受损最重的类群是桡足类和无节幼虫。盛连喜等(1994)研究了胶州湾青岛电厂冷却水系统对梭幼鱼和虾仔虾的卷载致死率,