

核电厂温排水对近岸海域浮游生物群落的影响评估

农君晴

中广核陆丰核电有限公司 广东 汕尾 516500

摘要: 本文聚焦核电厂温排水对近岸海域浮游生物群落的影响。先阐述温排水特征及对浮游生物的作用机理,包括直接与间接影响;接着分析温排水扩散特征、温度场分布及时间变异性;随后介绍研究区域选取、监测方法等;最后探讨浮游植物、动物群落响应及整体响应模式。结果表明,温排水使浮游生物群落呈梯度响应,长期或形成新平衡,超阈值会破坏稳定性。

关键词: 核电厂; 温排水; 近岸海域; 浮游生物群落; 影响评估

引言: 核电厂运行产生的温排水排放至海洋,对近岸海域生态环境影响显著,其中浮游生物群落作为海洋生态系统的基础,受温排水影响尤为突出。浮游生物对环境变化敏感,温排水带来的温度、溶解氧等改变会直接或间接影响其生理活动、群落结构与生态功能。研究温排水对近岸海域浮游生物群落的影响,对评估核电厂生态效应、保护海洋生态环境具有重要意义。

1 核电厂温排水对海洋浮游生物的作用机理

1.1 温排水的基本特征

核电厂温排水是机组运行过程中,海水作为冷却介质吸收发电余热后排放的高温水体,其核心特征表现为温度升高、排放持续稳定且水量巨大。滨海核电厂多采用海水直流冷却方式,温排水出口与进水口的温差可达7-10℃,排放量与机组装机容量正相关,大型核电厂日均温排水量可达数十万吨甚至上百万吨。温排水除温度异常外,还具有盐度、溶解氧等理化指标的轻微波动,且排放口附近水体存在明显的热梯度。与自然水体相比,温排水具有扩散性强、影响范围相对固定的特点,其温度衰减速率与海域水动力条件密切相关,近岸浅水区衰减较慢,外海深水区衰减较快,同时温排水的理化特性也会随季节、潮态变化出现小幅波动,为后续影响海洋浮游生物奠定了基础。

1.2 温度升高对浮游生物的直接影响

温度升高对海洋浮游生物的直接影响主要体现在生理代谢、生长繁殖及生存存活三个方面,且不同类群浮游生物的响应存在显著差异。温度作为浮游生物代谢的关键调控因子,适度升高可加快酶促反应速率,提升呼吸作用和光合作用效率,促进浮游植物的生长繁殖;但当温度超过适宜范围,会破坏酶的空间结构,导致代谢紊乱,抑制浮游生物的生理活动^[1]。对于浮游植物,高温会缩短其细胞周期,改变叶绿素合成效率,部分耐热物

种丰度上升,而喜冷物种则会因生理不适逐渐衰退。对于浮游动物,高温会加速其发育进程,缩短生命周期,同时影响其摄食和繁殖能力,导致幼体存活率下降、种群数量波动。

1.3 温度升高对浮游生物的间接影响

温度升高对海洋浮游生物的间接影响主要通过改变海洋环境理化条件、破坏食物链结构及引发种间竞争失衡实现,其影响范围远大于直接影响。温度升高会降低海水溶解氧含量,尤其在温排水聚集区,低氧环境会抑制浮游生物的呼吸作用,同时影响水体中营养盐的迁移转化,改变氮、磷等营养物质的浓度和比例,间接影响浮游植物的光合作用效率。温度升高会改变浮游生物的分布格局,导致喜温物种向周边扩散,喜冷物种迁移,打破原有种间竞争平衡,优势物种发生更替。温度变化会影响浮游生物的捕食关系,改变浮游动物对浮游植物的摄食压力,进而通过食物链级联效应,影响整个浮游生物群落结构,甚至间接影响更高营养级生物的生存。

2 核电厂温排水扩散特征与温度场分布

2.1 不同季节温排水扩散特征

核电厂温排水的扩散特征具有显著的季节性差异,核心影响因素为季节更替导致的水动力条件、海水温度及气象因素变化。夏季海域水温较高,温排水与周边海水的温差相对较小,且夏季盛行偏南风,近岸海流流速较慢,温排水扩散速度平缓,扩散范围相对集中,多局限于排放口附近海域,高温区聚集明显。冬季海域水温较低,温排水与周边海水的温差较大,且冬季海流流速较快,盛行偏北风,温排水扩散速度加快,扩散范围更广,高温区呈条带状向远海延伸,温度衰减速率相对较慢^[2]。春秋两季为过渡季节,温排水扩散特征介于冬夏之间,扩散范围和速度受季风和海流交替影响,呈现不稳定状态,且春秋潮态变化明显,涨落潮会进一步影响

温排水的扩散方向和范围,导致其扩散格局呈现阶段性变化。

2.2 温升等值线空间分布

核电厂温排水温升等值线的空间分布呈现以排放口为中心、向周边辐射衰减的规律,且受地形、水动力条件影响显著。排放口附近为温升高值区,等值线密集,温升幅度可达4-10℃,随着距离排放口距离增加,温升幅度逐渐降低,等值线逐渐稀疏,直至与周边自然海水温度持平。近岸浅水区因水深较浅、水动力条件较弱,温排水扩散受阻,温升等值线呈现圆形或椭圆形分布,高温区范围相对较小;外海深水区因水深较大、海流流速较快,温排水与自然海水快速掺混,温升等值线呈现条带状分布,高温区范围更广,温度衰减更均匀。温升等值线的空间分布还与潮态相关,涨潮时等值线向近岸收缩,落潮时向远海延伸,且不同季节等值线的疏密程度和覆盖范围存在差异,夏季等值线更密集,冬季更稀疏。

2.3 温排水影响的时间变异性

核电厂温排水对海域的影响具有明显的时间变异性,主要体现在日内、季节及年际三个时间尺度。日内尺度上,受涨落潮影响,温排水的扩散范围和温度场分布呈现周期性变化,涨潮时海水顶托温排水,使其扩散范围缩小、温度升高;落潮时海水携带温排水向远海扩散,范围扩大、温度降低,这种变化与潮周期同步,周期约为12小时。季节尺度上,如前文所述,冬夏两季温排水的扩散特征和影响范围差异显著,春秋两季为过渡状态,同时季节变化导致的浮游生物群落更替,也会改变温排水影响的生态效应。年际尺度上,温排水的影响受核电厂运行负荷、海域水动力条件年际波动及全球气候变化影响,运行负荷越高,温排水排放量越大,影响越显著;水动力条件年际变化会改变温排水扩散规律,进而影响其长期生态效应。

3 研究区域与监测方法

3.1 典型核电厂选取

典型核电厂的选取需遵循代表性、典型性和可操作性原则,优先选取滨海运行时间较长、装机容量较大、温排水影响具有典型性的核电厂。选取时需综合考虑核电厂的冷却方式、温排水排放量、出口温差及周边海域生态环境特征,重点选取采用直流冷却方式、温排水排放量较大(日均数十万吨以上)、出口温差7-10℃左右的核电厂。同时,需考虑研究区域的海域类型,优先选取近岸浅水区、海湾等温排水扩散易监测、生态环境敏感的区域,如辽宁红沿河核电厂、山东某核电厂等,这类核电厂周边海域浮游生物资源丰富,温排水影响显著,

且具备完善的监测基础。另外,选取的核电厂需运行稳定,可保证长期监测数据的连续性,便于开展温排水对浮游生物影响的长期研究,同时兼顾区域代表性,覆盖不同纬度、不同海域类型的核电厂,确保研究结果的普适性。

3.2 监测站位布设

监测站位的布设需结合温排水扩散特征和浮游生物分布规律,采用“梯度布设”原则,确保全面覆盖温排水影响区、过渡区和背景区。以核电厂温排水排放口为中心,沿扩散方向布设多条监测断面,每条断面布设不同数量的监测站位,排放口附近加密布设,向远海逐渐稀疏^[3]。具体而言,在排放口周边500米范围内布设核心监测站,监测温排水高值区浮游生物及温度变化;在500-2000米范围内布设过渡监测站,监测温排水温度衰减及浮游生物群落过渡特征;在2000米以外布设背景监测站,作为对照,监测自然状态下的浮游生物及海水温度。同时,结合潮态、海流方向,在关键位置增设补充监测站,确保监测数据的代表性,每条断面垂向布设表层、中层、底层监测点,全面捕捉不同水层的温度及浮游生物分布特征。

3.3 采样与分析方法

采样与分析方法需遵循标准化、规范化原则,确保监测数据的准确性和可比性。采样时间结合季节和潮态,每季度采样一次,每次采样覆盖涨潮、落潮和平潮三个潮态,确保捕捉不同时间尺度的变化特征。采样工具采用标准化采水器,表层水样采集海面下0-0.5m的水体,中层和底层水样根据水深合理布设采集深度,同时采用温盐仪缓慢投放至水底,进行剖面温度观测,垂向水温数据分层间隔不大于0.1m。浮游植物采样采用浮游生物网拖网采集,浮游动物采样结合拖网和采水法,采样后立即固定保存,防止样品变质。分析方法上,海水温度采用温盐仪现场测定,浮游植物通过显微镜观察鉴定种类、计数丰度,浮游动物采用分类鉴定、计数分析,同时测定海水溶解氧、营养盐等理化指标,采用荧光法测定叶绿素a浓度,确保分析数据的科学性和可靠性。

3.4 数据统计与分析方法

数据统计与分析方法主要用于处理监测获得的温度数据、浮游生物数据及理化指标数据,揭示温排水与浮游生物的相关性及变化规律。首先对原始数据进行整理和校验,剔除异常值,确保数据完整率不小于95%,采用Excel进行数据录入和基础统计,计算各监测站位的温度平均值、浮游生物丰度、多样性指数等基础指标。然后采用SPSS、R语言等统计软件,进行相关性分析,探究温

度升高与浮游生物丰度、群落结构的相关性；采用聚类分析、主成分分析等方法，分析浮游生物群落的时空变化特征，区分温排水影响区与背景区的群落差异。结合遥感温度反演数据，采用平均绝对误差（MAE）指标验证反演精度，整合多源监测数据进行综合分析，量化温排水对浮游生物的影响程度，为后续研究提供数据支撑和科学依据。

4 浮游生物群落对温排水的响应

4.1 浮游植物群落的响应

浮游植物群落对核电厂温排水的响应主要体现在种类组成、丰度及多样性的变化上，且具有明显的季节性差异。在温排水影响区，温度升高会导致浮游植物群落优势种发生更替，耐热性强的硅藻（如中肋骨条藻）比例上升，而喜冷的甲藻比例下降，尤其在夏季，温排水的升温效应显著，会明显刺激浮游植物种群生长，改变群落组成。温排水核心区浮游植物丰度通常高于背景区，这是由于适度升温加快了浮游植物的生长繁殖速率，同时温排水带来的轻微营养盐输入也为其生长提供了条件；但当温度过高或升温持续时间过长，会导致浮游植物多样性下降，优势种单一化，甚至出现有害藻华暴发的风险。浮游植物的群落结构还会随温排水扩散梯度呈现规律性变化，从核心区到背景区，耐热物种丰度逐渐降低，喜冷物种丰度逐渐升高，群落多样性逐渐恢复至自然水平。

4.2 浮游动物群落的响应

浮游动物群落对温排水的响应主要表现为种群数量、优势种组成及群落结构的改变，且响应程度受温度升高幅度和暴露时间影响。温排水导致的温度升高会直接影响浮游动物的生长发育和繁殖，多数浮游动物的适宜温度范围较窄，温度升高会缩短其生命周期，改变其摄食行为，导致幼体存活率下降，进而影响种群数量。在温排水影响区，浮游动物优势种会向耐热类群更替，如哲水蚤类中的耐热物种丰度上升，而喜冷的猛水蚤类丰度下降，部分年份还会出现夜光藻等物种暴发，取代原有优势种^[4]。同时温排水导致的溶解氧下降和浮游植物群落变化，会间接影响浮游动物的食物来源，进一步加剧其种群波动，核心区浮游动物多样性通常低于背景区，且随着与排放口距离增加，群落结构逐渐趋于稳定，与自然状态下的群落结构差异逐渐缩小。

4.3 浮游生物群落整体响应模式

核电厂温排水影响下，海洋浮游生物群落整体呈现“梯度响应、季节差异、动态平衡”的响应模式，且响应程度与温排水的扩散范围、温度梯度密切相关。从空间梯度来看，以温排水排放口为中心，呈现“核心区-过渡区-背景区”的梯度响应特征：核心区温度最高，浮游生物群落多样性最低，优势种单一，以耐热类群为主；过渡区温度逐渐衰减，浮游生物群落多样性逐渐升高，优势种更替明显，耐热类群与自然类群共存；背景区温度恢复自然水平，浮游生物群落结构与自然状态基本一致。从时间尺度来看，夏季温排水升温效应显著，群落响应最明显；冬季升温效应较弱，群落响应相对温和；春秋两季为过渡状态，群落结构处于动态调整中。长期来看，浮游生物群落会逐渐适应温和的升温环境，形成新的动态平衡，但当温排水温度超出耐受阈值或排放异常时，会打破这种平衡，导致群落结构破坏，影响海洋生态系统稳定性。

结束语

核电厂温排水对近岸海域浮游生物群落影响复杂，在空间上呈梯度变化，时间上有季节差异，长期或形成动态平衡。了解这种影响模式，有助于科学评估核电厂的生态效应，为制定合理的环境保护措施提供依据。未来需持续监测，深入研究温排水与其他因素的协同作用，以更好地保护海洋生态系统，实现核电发展与生态保护的协调共进。

参考文献

- [1]冯玮,王勇智,高昂.滨海核电厂平面布置方案优化——以冷却方式和排水工程优化为例[J].海岸工程,2025,44(3):242-252.
- [2]韩涛,王有军,潘万松,等.基于高通量测序技术的核电厂温排水区表层细菌多样性分析[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2024,41(3):213-218.
- [3]李忠义,王蕾,王志杨,等.海阳核电站温排水对水域游泳生物群落结构的影响[J].广东海洋大学学报,2025,45(4):51-59.
- [4]孙钰,李美霖,杨永,等.阳江核电站邻近海域毛虾渔业生物学特征及渔获量与环境因子的关系[J].海洋渔业,2025,47(6):760-769.