

基于水文条件的内陆核电 低放废液排放方式优化研究

陈小莉 秦晓 赵懿珺 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于水文条件的内陆核电 低放废液排放方式优化研究

陈小莉 秦晓 赵懿珺 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

核电站在运行过程中产生的低放废液需要排放到地表水体中,内陆地表水体环境敏感目标多且复杂,低放废液排放与水环境的相容性是制约我国内陆核电发展的关键问题之一。本书从内陆核电排放水域的水文条件选取、选择性排放过程优化、排放口型式优化等方面进行了较为深入的研究,在研究中注重理论方法和工程应用相结合,为内陆核电排放领域工程设计、运行、环境影响控制和监管等提供了重要的依据。

本书可供相关科研、工程设计和管理人员阅读。

图书在版编目(C I P)数据

基于水文条件的内陆核电低放废液排放方式优化研究/
陈小莉,秦晓,赵懿珩著. — 北京:中国水利水电出版社,
2017.1

ISBN 978-7-5170-5175-6

I. ①基… II. ①陈… ②秦… ③赵… III. ①核电工
业—废液处理—研究 IV. ①X771.03

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第034074号

书 名	基于水文条件的内陆核电低放废液排放方式优化研究 JIYU SHUIWEN TIAOJIAN DE NEILU HEDIAN DIFANG FEIYE PAIFANG FANGSHI YOUHUA YANJIU
作 者	陈小莉 秦晓 赵懿珩 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 6.75印张 121千字
版 次	2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

为保护环境、实现可持续发展，我国提出了非化石能源比重在2030年达到20%的目标，作为新能源主力的核电迎来了大发展时期。基于目前能源布局的需要以及沿海核电厂址已日益枯竭的现状，发展内陆核电已成为必然的选择。有别于一般的火电厂，内陆核电低放废液排放对水环境的影响关系到内陆地区饮用水及灌溉等用水安全，是目前制约内陆核电规划建设的关键问题之一，本书从排放水力学角度深入系统地开展内陆厂址低放废液排放优化的研究。

全书共分为6章：包括概述，内陆地表水域低放废液排放水动力模拟方法，内陆核电低放废液排放水文条件研究，基于水文过程的内陆核电排放过程控制优化，内陆核电低放废液排放口型式优化研究，结论与展望。

本书是近年来关于内陆核电厂低放废液排放优化领域关键技术研究的总结，在研究中注重新技术的开发和引进，同时立足于实际工程应用需求，提出实用性的成果。本书为内陆核电排放领域工程设计、运行、环境影响控制和监管等提供了重要的参考依据。

本书撰写人有陈小莉、秦晓、赵懿珺。在撰写过程中得到了中国水利水电科学研究院水力学所冷却水研究室各位领导和同事的大力帮助和支持，在此表示感谢。

内陆核电低放废液地表水排放影响十分复杂，排放控制涉及多学科专业的综合，鉴于作者水平和时间有限，书中难免存在不足或欠妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2016年11月于北京

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 国内外核电发展现状及趋势	1
1.2 内陆核电液态流出物排放控制现状	2
1.3 我国内陆核电排放面临的环境相容性问题	4
参考文献	5
第 2 章 内陆地表水域低放废液排放水动力模拟方法	6
2.1 低放废液稀释扩散特点	6
2.2 内陆地表水域水动力及低放废液稀释扩散模型方法	6
2.3 低放废液稀释扩散不同模型的适用性	7
参考文献	10
第 3 章 内陆核电低放废液排放水文条件研究	12
3.1 我国内陆受纳水体类型、水文特征及水动力特点分析	12
3.2 现有低放废液设计水文条件总结分析	15
3.3 水文条件选取对排放结果影响的案例分析	23
3.4 小结	36
参考文献	36
第 4 章 基于水文过程的内陆核电排放过程控制优化	37
4.1 概述	37
4.2 国内外研究现状	37
4.3 研究目的和内容	40
4.4 基于水文过程的低放废液排放分配模型	41
4.5 受纳水域水动力及核素浓度模拟数学模型	42
4.6 案例分析	45
4.7 小结	55
参考文献	56

第 5 章 内陆核电低放废液排放口型式优化研究 58

5.1 概述 58

5.2 研究现状 58

5.3 T 核电厂址排放口型式优化研究方法 60

5.4 基于 CORMIX 软件的排放口型式初步优化 61

5.5 基于 PLIF 荧光浓度测量技术的排放型式物理模型试验 67

5.6 基于 CORMIX 和 Delft3D 近远区耦合模型的低放废液排放
水域浓度模拟 77

5.7 小结 94

参考文献 95

第 6 章 结论与展望 97

6.1 结论 97

6.2 展望 98

第 1 章 概 述

1.1 国内外核电发展现状及趋势

核电作为高效的能源方式，能够持续稳定地提供大量电力，并且不产生温室气体排放，是世界电力能源的三大支柱之一，在世界能源结构中有着重要的地位。根据 IAEA 的统计^[1]，2015 年全球核电总发电量为 2441TW·h，占全球总发电量的 11.2%。在世界主要发达国家，核电发电量占比大都处于较高水平，例如 2015 年核电发电量比例法国为 76.3%，美国为 19.5%，英国为 18.9%，德国为 14.1%，俄罗斯为 18.6%。从核能发展趋势看^[2]，为了应对碳减排压力和能源需求增长，许多国家开始重新重视核电发展，截至 2015 年 12 月底，全球规划中的机组台数约 88 台^[3]，主要分布在中国、俄罗斯、美国、日本、印度、伊朗。根据 IAEA 的预测^[1]，2015—2030 年全球核能年均增长率平均估值约为 2.85%，未来核电作为碳减排的主力电力能源，仍将获得持续发展。

我国核电起步较晚，20 世纪 90 年代初建成秦山核电站和大亚湾核电站，2006 年我国批准了《核电中长期发展规划（2005—2020 年）》，核电开始进入发展阶段^[4]。截至 2015 年年底^[5]，我国核电商运机组达到 28 台，年核电累计发电量为 1689.93 亿 kW·h，约占全国累计发电量的 3.01%。近年来，我国大气污染严重，化石燃料燃烧是污染的主要来源之一，为保护环境，实现可持续发展，提出了非化石能源比重在 2030 年达 20% 的目标，为实现上述目标，核电将是今后能源发展的重点。

从核电厂址布局看，IAEA 将核电厂址分为滨海、滨河和滨湖三大类，对 2006 年世界运行核电厂 437 台核电运行机组的统计表明：内陆滨河、滨湖核电机组占已投运核电机组总数的 50.1%，其中滨河核电机组占 45.9%，滨湖核电机组占 4.2%^[6,7]，核电大国法国、美国等均在内陆建有大量的内陆核电厂。



我国核电建设初期主要从经济发展需求和环境影响角度优先选择在沿海。随着核电建设的推进和内陆经济发展对能源需求的增加,进入 21 世纪后内陆核电选址和沿海同步开展,国家核安全局对 2007 年 8 月前报送的核电厂址从核安全、环境保护、区域规划和环境区划等方面进行了综合评价,有 70 个厂址列入评价范围,其中内陆厂址 38 个,占 55%。核电建设单位和地方政府积极谋划大力发展内陆核电,多省份不同程度地开展了核电厂址前期工作。目前湖南桃花江核电、湖北咸宁核电及江西彭泽核电等厂址已率先开展了项目可行性论证。但内陆核电推进较为审慎,尤其福岛核事故后国家停止了内陆核电建设。目前我国所有运行及在建机组均集中在沿海地区,由于沿海核电厂址已日趋饱和,发展内陆核电是必然趋势。2016 年 11 月,我国《电力发展“十三五”规划》中提出要深入开展内陆核电研究论证工作和前期准备工作,并认真做好核电厂址资源保护工作,内陆核电仍将持续处于论证阶段。

1.2 内陆核电液态流出物排放控制现状

核电站运行过程中放射性废液的主要来源包括:反应堆厂房各系统产生的设备、阀门和管道的疏水以及引漏水,辅助厂房系统产生的树脂再生水、冲排水及设备去污洗涤水,放射性设备间的地面冲洗水,其他放射性疏水。在出厂之前会进行废液的收集、存储、处理和排放。排放均采用槽式排放,排放前需要经过一段时间衰变、搅拌、活度分析,一般为 60 天以上^[8]。核电厂一般会设置多个储槽,当某个储槽进液超过规定量时,就自动关闭^[9],通过取样测量废液活度,为保证取样时箱内浓度是均匀的,储液箱从一开始进液就一直处于搅拌状态。低于排放浓度控制值的放射性液态流出物,按照核电厂排放管理和执行程序进行排放。液态流出物排放对环境的影响可分为对公众的辐射影响和对非人类生物的辐射影响,对公众的辐射影响主要途径包括饮用、灌溉、养殖和娱乐等产生的内照射和外照射。

内陆核电与水环境相容性评价一般体现在两个方面:一方面是依据公众接受的辐射剂量约束值对排放量进行限制;另一方面是考虑受纳水域浓度累积影响^[10]。对辐射剂量的控制可以导出排放上限值,根据排放槽内的放射性监测值来控制是否排放废液,满足则排放,不满足则返回处理。对受纳水域浓度累积影响的控制则需要通过浓度限值来监督控制排放过程或制订相应控制措施。以法国为例,法国法律规定排入河流经稀释后达到环境接受点的日平均浓度限值除³H 外核素放射性浓度为 0.74Bq/L,³H 放射性浓度为 74Bq/L,滨海核电



站为滨河厂址的 10 倍，滨湖核电站则规定了季度平均值限值，其中除 ^3H 外核素浓度为 3.7Bq/L ， ^3H 浓度为 1480Bq/L 。法国格拉夫林 (Gravelines) 核电站为了做到有计划最低限度排放建有若干流出物存储箱^[11]。为了防止在海水涨潮期间排放渠中的放射性积累，强制要求该电站有两个以上的循环泵用于排放，确保流出物排放具有最小沉积量。在进行二回路废液排放时，直接用二回路废液排放泵的最大流量 ($300\text{m}^3/\text{h}$)。在进行核岛废液排放时，排放必须遵守下列条件：在排放到排水渠（海水，作为天然介质）之前，流出物的稀释因子必须大于等于 500 倍，每天排放到排水渠中的放射性活度应小于等于 8Bq/L （不包括 ^{40}K 和 ^3H ），对于 ^3H 必须小于 800Bq/L 。法国在卢瓦尔河上建有很多核电站，为解决累积排放问题，相关部门从流域管理角度进行管制，要求各电站不能同时排放废液^[12]。从法国卢瓦尔河流域卢瓦尔河昂热站的监测结果看（图 1.1），受核电站排放影响的 ^3H 浓度在限值 74Bq/L 以内。美国 38 个内陆核电厂 2009 年度环境辐射监测报告中，1/2 的核电厂址排水口地表水体中有公共饮用水源的取水点，所有这些公共应用水源样品中的总放射性均小于 1Bq/L ， ^3H 浓度均小于 74Bq/L （美国环保署给出饮用水中 ^3H 浓度指标为 740Bq/L ，但在实际执行中，公共饮用水源的 ^3H 控制值在 74Bq/L 以下）^[13]。我国目前尚无内陆核电运行，沿海核电厂的放射性流出物排放得到了有效的管

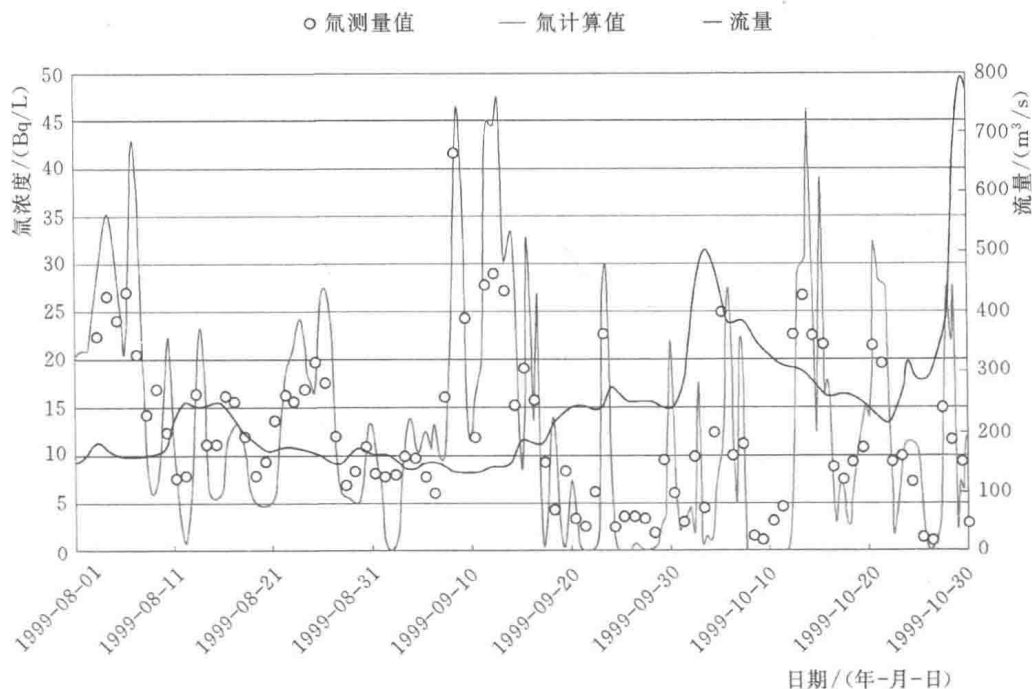


图 1.1 法国卢瓦尔河昂热站 ^3H 浓度与流量随时间变化过程^[14]



理和控制, 液态 ^3H 的排放与全球压水堆的排放水平基本相当^[10]。

内陆核电如果建在流量较小的受纳水域附近, 为了满足受纳水体的水质要求, 对废液的存储和择机排放要求较高, 本书的侧重点亦在于水体浓度达标, 从受辐照总水平角度的优化暂不考虑。

1.3 我国内陆核电排放面临的环境相容性问题

与滨海核电厂址相比, 内陆核电排放受纳水体环境容量大大减小, 且辐照途径更为复杂, 因此内陆液态流出物排放标准要严于滨海核电厂。从国外已有经验看, 虽然对内陆厂址未明确规定排放浓度限值, 但实际执行中仍需要考虑水域浓度累积影响而针对性地采取适当措施, 我国内陆水域水文和环境因素有自身特点, 不能完全照搬国外经验, 需要有针对性地开展研究论证。

在规划设计方面, 我国内陆核电规划起步较晚, 至今尚未有运行实例, 目前取排水工程设计往往借用内陆火电厂设计理念, 对核电厂低放废液排放安全问题理解不够全面、深刻, 在前期论证中低放废液排放领域存在诸多问题尚未很好解决。

在核电低放废液排放方式和水域影响评价方面, 我国内陆核电也面临新的技术问题。低放废液不同于电厂常规的温排水持续排放, 其产生量少, 可以采取存储、选择性间歇排放的方式。我国多数内陆河流域来流量季节性分布极不均匀, 采用低放废液选择性排放方式可以避免不利环境来流条件, 降低排放对水环境的影响。目前关于选择性排放方式的理念已有, 而如何实施尚缺少深入研究; 同时针对选择性排放, 采用以往的单一恒定流控制水文条件评价水环境影响已不再适宜, 需要依据选择性排放特点, 有针对性地开展研究内陆核电低放废液的水文控制条件。

由于低放废液放射性污染的特殊性, 尽快降低污染物浓度、减轻其对水环境的影响十分重要。为此, 加强排放口近区低放废液出流与环境水体掺混稀释是需要引起重点关注的问题。现有国内常用的电厂温排水在排放口型式设计方面不甚精细, 对于小流量的低放废液排放快速掺混要求不尽适用, 内陆核电低放废液排放适宜的出流型式研究还十分欠缺。

为了解决上述内陆核电低放废液排放面临的诸多问题, 实现我国内陆核电与水域环境资源安全协调健康发展, 迫切需要对内陆核电低放废液排放方式及其对水域环境影响开展系统深入的科学研究。



参考文献

- [1] IAEA. Reference data series No. 1, Energy, Electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050 [R]. 2016 Edition. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
- [2] 李琼慧, 郭基伟, 王乾坤. 2030 年世界能源与电力发展展望 [J]. 电力技术经济, 2009, 21 (4): 4-9.
- [3] IAEA. Reference data series No. 2 Nuclear power reactors in the world [R]. 2016 Edition. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
- [4] 欧阳予. 世界主要核电发展国家核电发展战略与我国核电规划 [J]. 现代电力, 2006, 23 (5): 1-10.
- [5] 中国核能行业协会. 2015 年 1—12 月全国核电运行情况 [EB/OL]. 2016-1-23. <http://www.china-nea.cn/html/2016-01/35019.html>.
- [6] 中国核能行业协会课题组. 内陆核电厂需关注的问题及不同类型核电机组适应性的分析 [J]. 中国核工业, 2009, (2): 24-29.
- [7] 王绍伟, 等. 国外内陆核电状况及我国内陆核电建设亟待解决的问题 [J]. 辐射防护, 2013, 33 (6): 390-395.
- [8] 徐宏明, 郑国文, 张勇. 秦山核电厂放射性流出物监测和排放管理: 全国放射性流出物和环境监测与评价研讨会论文汇编 [C]. 中国核学会辐射防护学会, 中国环境学会核安全与辐射环境专业委员会, 2003: 7.
- [9] 张晶. 液态流出物排放的特点及处理措施 [J]. 核电工程与技术, 2007 (4): 19-27.
- [10] 陈晓秋. 内陆核电厂放射性液态流出物排入环境的审管控制 [J]. 核安全, 2010 (4): 14-18.
- [11] 潘京全. 法国格拉夫林核电站放射性流出物排放与管理方法介绍 [J]. 辐射防护通讯, 1991, (02): 33-41.
- [12] 龙茂雄, 赵成昆, 罗兰英. 法国内陆核电站选址的经验与启示 [J]. 国防科技核工业, 2011, (04): 24-27.
- [13] 周如明. 国外内陆核电水环境评估报告给我国的启示 [J]. 中国核工业, 2012, (06): 21.
- [14] Françoise Siclet. Transfer in the Loire river basin down to the estuary of nuclear power plants radioactive discharges [J]. Hydroécol. Appl. 2001, 13 (2): 43-83.

第 2 章 内陆地表水域低放废液排放 水动力模拟方法

2.1 低放废液稀释扩散特点

低放废液一般伴随核电厂冷却塔弃热水或温排水排放,进入受纳内陆水域后,一般经历三个阶段^[1]:第一阶段为初始混合段,废水以一定流速进入环境水体,在排放口附近形成浮力射流或羽流,与周围水体发生剧烈掺混,出流的初始动量和浮力决定了初始稀释倍率;第二阶段为完全混合段,废水一边随流向下游输移,一边沿横断面混合,直至整个水体截面或斜温层上部水体完全均匀,在此阶段主要受紊动扩散的影响;第三个阶段为长距离弥散段,放射性核素浓度在断面上基本均匀分布,纵向离散起主导作用,需考虑较长距离和较长时间的弥散,以及水体中放射性核素与悬浮物、底部沉积物之间可能的相互作用。污染物输移扩散近区和远区的混合时间和空间尺度差异较大,近区混合一般在几分钟内完成,空间范围一般仅为 $10^1 \sim 10^2 \text{ m}$ 量级,而远区影响一般在几天甚至几月内,远区空间范围在 $10^2 \sim 10^5 \text{ m}$ 量级^[2,3]。

2.2 内陆地表水域水动力及低放废液稀释扩散模型方法

低放废液在地表水体的输移扩散模拟研究方法包括物理模型和数学模型。物理模型基于相似理论与量纲分析原理,采用缩尺模型模拟工程水域的水动力和污染物输移扩散特性,物理模型试验中用于核素模拟的常用示踪剂包括罗丹明 B、荧光素钠、氯化钠等。物理模型的优点在于可以较好模拟排口近区排水射流与周围环境水体的卷吸掺混效应、温差浮力效应等,能够真实再现近区复杂的三维紊动特性;其不足是模拟范围有限,无法模拟核素的自身衰减等影响。物理模型多在工程设计阶段采用,用于确定取排水口的具体型式、细部结构、尺寸等,为设计提供参考^[4-7]。



数学模型基于对水动力方程和物质输运方程的求解模拟低放物质在水域内的输移扩散,其优点在于建模方便快捷,模拟范围不受限制,不足之处是模型参数如扩散系数等的正确选取对计算结果的准确性、精度影响较大。数学模型按模拟的空间维数,可分为零维模型、一维模型、二维模型、三维模型,其中零维模型非常粗略,仅为对流量的加权平均,常用作其他模型的初始值和估算值。

2.3 低放废液稀释扩散不同模型的适用性

低放废液浓度分布、在环境敏感点及取水点的浓度、扩展宽度以及混合距离是环境影响评价中关注的主要问题。下面根据低放废液排放进入受纳水域后的3个阶段分别介绍不同模型的适用性。

1. 初始混合段

初始混合段,一般呈现出明显的三维紊动特性,其范围较小,一旦排放源的初始动量和浮力效应消失,此阶段就结束了。如果需充分了解排口近区的流动特性、稀释特性、确定排放口的型式、位置、尺寸等,宜采用局部区域物理模型试验并配合以精细的三维数学模型;否则可选用一般的估算模式或射流模型。

核电厂低放废液通常随温排水一起排入受纳水体,在排口近区表现为浮射流。浮射流的研究方法主要有量纲分析法、积分方程法和微分方程法,相对应的数学模型为长度比尺模型、射流积分模型和紊流模型。

(1) 长度比尺模型。最早浮射流的研究采用量纲分析法,主要依托物理模型试验,通过对多组试验数据进行量纲分析,拟合得到经验公式。长度比尺模型是量纲分析法的延伸,使用通过试验推导得出的半经验公式。1993年美国康奈尔大学Jirka等建立的基于长度比尺的CORMIX模型,实际上就是含有大量试验数据的专家系统,可根据不同的初始条件选择应用^[8]。长度比尺模型很大程度上依赖于合适的模型选择和合理的参数选取,这些决定了其应用的局限性。

(2) 射流积分模型。浮力射流的积分模型是早期工程上常用的方法,以流动自相似假定为基础,对射流厚度作线性扩展假定或对射流从侧边卷吸流体的流量作卷吸假定,根据动量、热量、质量守恒原理,对与射流轴线垂直的横断面积分获得^[9]。该类模型能考虑射流和周围水流的相互作用。

积分模型比微分模型简单,但其应用前提是要对一些参数进行假定,仅适



用于一些简单的排水出流条件（如稳态、排放型式简单、出流不受边界影响）。射流积分模型虽然能估算出射流近区速度、温度、浓度的空间变化，但对于有横流的湍浮力射流问题，实测资料表明上述假定并不符合。

（3）紊流模型。与积分模型相比，微分模型能诠释更多的水动力现象，这就涉及紊流模型问题。紊流模型不仅能模拟射流，还可反映温差异重流、浮力流、回流等复杂的现象。对于工程问题而言，关注的是时均流速场、温度场以及浓度场，用时均紊流模型已经能达到工程精度的要求。求解紊流时均微分方程的关键是增加雷诺应力项使方程封闭并且有唯一解。根据对雷诺应力作出的假定或处理方式不同，目前常用有 $k-\epsilon$ 模型、雷诺应力方程模型与代数应力模型。

在近区模拟中， $k-\epsilon$ 模型应用比较广泛，具有收敛快、计算量相对少、精度适宜的优点。模型采用紊流动能 k 和能量耗散率 ϵ 的方程对 $N-S$ 方程进行封闭模拟。核电厂低放废液随温排水排入受纳水体后，浮力与出流动量是主导因素。标准的 $k-\epsilon$ 模型是基于 Boussinesq 假定提出，假设雷诺应力与时均速度梯度成正比。这对各向同性的紊流模拟是合理的，但对浮力流、温差异重流、浮力回流等各向异性问题并不合适。因而有关学者对 $k-\epsilon$ 模型进行了浮力修正，如添加浮力源项、对紊动涡黏系数进行修正等^[10]。浮力修正后的 $k-\epsilon$ 模型可以反映出浮力作用，但修正关系式又往往具有一定经验性，也缺乏通用性，对某些各向异性的紊动流依然无能为力。

雷诺应力方程模型从各向异性前提出发，直接封闭求解雷诺应力的输运方程，计算应力分量，具有较高精度。但从实际工程应用而言，雷诺应力方程模型虽然精度高，但十分复杂，计算量过于庞大，在工程实践中难以普及。

代数应力模型是雷诺应力方程模型的一种简化，把微分方程中的雷诺应力项转化为代数式并保留原方程的基本性质，仍然能反映紊流各向异性的特征，计算量比雷诺应力方程模型大为减少，而精度比 $k-\epsilon$ 模型有所提高。但是代数应力模型经常遇到收敛上的困难。

（4）物理模型。上述数学模型均具有其适应局限性，精细模拟近区的紊流模型是发展方向，但目前在工程上还未广泛应用。物理模型在近区模拟上目前还具有不可替代的作用，对于确定排口型式、高程、尺寸以及排水射流特性具有明显优势；同时为数学模型提供验证数据也是非常必要的。

2. 完全混合段

第二阶段，低放废液随流输移，并在紊动扩散的作用下向横断面扩展。

对于大多数河流，一般宽深比大于 10，垂向扩散会很快完成，以横向扩



散为主。因此,可忽略垂向扩散,一般按照二维流动处理。二维数学模型是目前工程应用最多的模型,发展也比较成熟。可分为平面二维浅水环流模型与深度平均的 $k-\epsilon$ 模型。

(1) 平面二维浅水环流模型。对于大范围江河,水深往往相对较小,且地形多变、岸线形状复杂,为简化计算,往往忽略物理量沿水深方向的变化,将 $N-S$ 方程沿水深方向积分,从深度平均的平面二维水流运动方程出发并计算。该模型未涉及密度、温度分层问题,一般假定密度不随温度变化;同时假定自由面变化比较缓慢,不计由于流动非恒定、地形变化、风应力等作用而产生的动水压力,压力服从静压分布。对湍流的模拟一般采用黏性系数为常数的扩散模型或黏性系数和速度相关的零方程模型。

平面二维浅水环流模型在冷却水工程、环境工程中应用非常广泛^[11-15],工程需求又促进其发展,目前已非常成熟。模型可计及惯性力、重力、科氏力、湍流黏性应力、风应力、底部摩擦力的作用,还能考虑水下地形、自由水面变化的影响,物质方程中考虑核素随水流输移、扩散、衰减等物理现象,既可用于恒定流动,也可用于非恒定流动。数值计算方法主要有:分布杂交法、有限差分法、有限元法、有限体积法等。

平面二维浅水环流模型,模拟范围大、守恒性好,在模拟远区核素输移扩散上具有明显优势。其不足在于:它属于远区模型,无法反应近区三维的水力、热力、浓度特性;由于深度平均的缘故,扩散系数不仅反应扩散效应,还计入了各变量沿深度分布不均匀导致的离散效应。扩散系数的取值范围较宽,一般为 $10^0 \sim 10^2$ 量级。

(2) 深度平均的 $k-\epsilon$ 模型。深度平均的 $k-\epsilon$ 模型最早由 W. Rodi 于 1980 年提出,其基本思想是:用 $k-\epsilon$ 模型封闭雷诺时均方程,仿照平面二维浅水环流模型思路,不仅对速度、温度、浓度等时均量沿水深取平均,而且对湍动能、湍流耗散率也取深度平均。深度平均的 $k-\epsilon$ 模型同样无法反映排口近区的特性。

对于小型河流,其深度和宽度与河流长度相比很小,可以仅考虑其纵向长度方向上的水流梯度变化而忽略深度与宽度方向上的变化,采用一维模型进行模拟计算,即模拟的水体内质点的水动力、温度、浓度等要素只沿一个方向有梯度存在,而在另外两个方向上均匀分布。通常,纵向移流占主导地位,可忽略纵向扩散。

对于水深较大,分层特性明显的河流,宜采用三维数学模型进行模拟计算。对于工程研究而言,需要关注的水域范围较大(采用直流供水系统的海域



工程至少需要几百平方千米;采用二次循环供水系统河道取排水工程一般需要至少 20km 以上河道范围),如果采用全三维模型,计算量非常大。同时,由于水平与水深尺度差别较大,地形与岸线变化复杂,又有自由水面波动等因素,目前在核电低放废液模拟中,完全采用真三维模型还有一定难度,因此常采用沿水深方向分层的准三维模型^[16]。

(3) 长距离弥散段。低放废液运动至长距离弥散段后,浓度沿断面混合均匀,且此段的核素已经得到比较充分的稀释,浓度相对较低。一般情况下,采用一维数学模型即可^[17]。

依据低放废液排放领域不同的研究目的,一般采用不同的数学或物理模型方法,这将在后续章节中进行介绍。由于污染物输移扩散近区和远区物质与环境水体混合的时间和空间尺度差异较大,在一个数学模型中同时模拟近远区十分困难,近远区耦合模拟是实际应用的一个难点,近年来在这方面有一些新的突破性研究。在物理模型试验领域,高速摄影和片光技术等先进试验手段的发展应用使得研究近区射流扩散场更为便利,克服了以往散点测量的局限性。这些新技术的应用也将在后续章节中进行介绍。

参考文献

- [1] 费希尔,等.内陆及近海水域中的混合 [M].北京:水利电力出版社,1987.
- [2] M J Baptist, W S J Uijtewaal. Transport and mixing of cooling water - guidelines and modeling practice [Z]. Delft, 2005.
- [3] 陈小莉,郭有,纪平,等.电厂温排水模型研究进展:水力学与水信息学进展 2015 [C].武汉:武汉理工大学出版社,2015.
- [4] 桑敏慧.核电厂低放射性废水污染物理模型试验 [J].电力环境保护,1989,(4): 15-21.
- [5] 樊宜,贺益英,杨楠,等.一种水域浓度场的多通道荧光测试系统和方法 [P].北京:CN102519927A,2012-06-17.
- [6] 陆汉柱,罗岸,付波,等.海南昌江核电厂低放废水排放物理模型试验研究 [J].广东水利水电,2011,(5): 1-3.
- [7] 张强,梁洪华,熊麒麟.盐度计在核电厂低放废水模型试验中的应用:水力学与水信息学进展 2015 [C].武汉:武汉理工大学出版社,2015.
- [8] Robert L. Doneker and Gerhard H. Jirka. Comix User Manual A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters [R]. Washington D C, 2007.
- [9] 郭振仁.污水排放工程水力学 [M].北京:科学出版社,2001.
- [10] 郝瑞霞,周力行,陈惠泉.冷却水工程中湍浮力射流的三维数值模拟 [J].水动力



- 学研究与发展, 1999, 14 (4): 92 - 100.
- [11] J Jiang, D B Fissel, D Topham. 3D numerical modeling of circulations associated with submerged buoyant jet in a shallow coastal environment [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2003, 58 (3): 475 - 486.
- [12] Monica Fossati, Pablo Santoro, Santiago Urrestarazu, et al. Numerical study of the effect of a power plant cooling water discharge in the montevideo bay [J]. Journal of Applied Mathematics, 2011, Article ID 970467, 23 pages.
- [13] M Abbaspour, A H Javid, P. Moghimi, et al. Modeling of thermal pollution in coastal area and its economical and environmental assessment [J]. Int. J. Environ. Sci. Tech, 2005, 2 (1): 13 - 26.
- [14] 李海珠. 日本核电站温排水对环境影响的评价 [J]. 核工程研究与设计, 2007 (1): 14 - 16.
- [15] 王丽霞, 孙英兰, 田晖. 热扩散预测方法研究概况 II. 热扩散的研究现状 [J]. 海洋科学, 1997 (06): 16 - 17.
- [16] 乾爱国, 段杰辉, 纪平. 内陆核电站低放射性废水排放的三维计算 [J]. 水利学报, 2007, 38 (12): 1495 - 1499.
- [17] F Siclet, M Luck, et al. Radionuclides concentrations in the Loire river system resulting from routine discharges of five nuclear power plants: assessment of dose to man [J]. Radioprotection, 2002, 37 (4): 399 - 410.