

附件2

# 《滨海核电厂温排水卫星遥感监测

## 技术规范（征求意见稿）》

### 编制说明

《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》标准编制组

二〇二一年三月

项目名称：2013年度国家环境保护标准制修订项目

项目统一编号：2013-46

承担单位：生态环境部卫星环境应用中心

编制组主要成员：朱利 杨红艳 李家国 王庆涛 赵利民 王晨

冯爱萍 孟斌 周亚明 王楠

# 目录

1 项目背景.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 工作过程.....	1
2 标准制修订的必要性分析.....	3
2.1 环境形势的变化对核电厂温排水管理提出新的要求.....	3
2.2 相关环保标准和环保工作的需要.....	5
3 国内外相关分析方法研究.....	6
3.1 主要国家、地区及国际组织相关标准研究.....	6
3.2 国内相关分析方法研究.....	7
3.3 国外单通道温度遥感反演的研究综述.....	9
3.3.1 卫星遥感反演海表温度原理.....	10
3.3.2 单通道卫星遥感反演海表温度算法综述.....	11
3.4 国内海表温度反演和温排水遥感应应用研究综述.....	15
3.4.1 基于 TIRS 的海表温度反演算法.....	15
3.4.2 环境一号 B 星 (HJ-1B) 红外相机的海表温度反演算法.....	18
3.4.3 唐丹玲等利用 AVHRR 开展大亚湾核电温排水研究.....	20
3.4.4 陈楚群、刑前国利用 Landsat5 TM 开展大亚湾核电温排水研究.....	21
3.4.5 吴传庆利用 Landsat5 TM 开展大亚湾核电温排水监测.....	21
3.4.6 梁春利等利用航空及 Landsat5 TM 开展秦山核电温排水监测.....	22
3.4.7 周颖、巩彩兰利用 HJ-1 做田湾核电温排水研究.....	23
3.4.8 朱利等利用 HJ-1 做大亚湾、田湾核电温排水监测及研究.....	23
3.4.9 张彩等利用不同空间分辨率热红外数据做大亚湾核电温排水监测及研究.....	27
3.4.10 张晓峰等利用 Landsat-8 热红外数据做田湾核电厂温排水分布研究.....	28
3.4.11 王祥等利用不同空间分辨率遥感数据做红沿河核电温排水监测及研究.....	28
3.5 相关海洋监测技术规范.....	29
3.6 实践验证与应用.....	31
3.7 国内外标准与本方法关系.....	31
4 标准制修订的基本原则和技术路线.....	32
4.1 标准编制的依据.....	32
4.2 标准制修订的原则.....	33
4.3 标准制修订的工作流程.....	33
5 标准主要技术内容.....	34
5.1 术语和定义来源.....	34
5.1.1 像元.....	35
5.1.2 空间分辨率.....	35
5.1.3 时间分辨率.....	35
5.1.4 黑体.....	35
5.1.5 比辐射率.....	36
5.1.6 大气校正.....	36
5.1.7 几何校正.....	36
5.1.8 辐射校正.....	36
5.1.9 亮度温度.....	36

5.1.10	海水表面温度.....	36
5.1.11	表皮温度.....	37
5.1.12	温排水.....	37
5.1.13	基准温度.....	37
5.1.14	温升区.....	37
5.2	总则确定依据.....	38
5.2.1	基本原理.....	38
5.2.2	监测目的.....	38
5.2.3	监测内容.....	38
5.2.4	遥感数据源要求.....	38
5.2.5	监测处理流程.....	39
5.3	监测方法依据.....	40
5.3.1	遥感数据选取.....	40
5.3.2	空间裁剪与几何校正.....	40
5.3.3	图像辐射定标.....	40
5.3.4	热红外大气校正.....	41
5.3.5	水陆分离.....	42
5.3.6	云体识别.....	42
5.3.7	亮温提取计算和海表温度获取.....	42
5.3.8	基准温度提取计算.....	44
5.3.9	温升分布提取与统计.....	45
5.4	温排水遥感监测产品制作.....	45
5.5	质量保证和质量控制.....	46
5.5.1	卫星数据质量控制.....	46
5.5.2	卫星数据处理质量控制.....	47
5.5.3	监测结果精度.....	47
6	与开题报告的差异说明.....	48
7	对实施本标准的建议.....	48
8	参考文献.....	49

# 《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范

## (征求意见稿)》编制说明

### 1 项目背景

#### 1.1 任务来源

根据《关于开展 2013 年度国家环境保护标准项目实施工作的通知》（环办函〔2013〕154 号），按照《国家环境保护标准制修订工作管理办法》（国环规科技〔2017〕1 号）的有关要求，开展《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》制修订工作。本项目承担单位为生态环境部卫星环境应用中心，项目统一编号为 2013-46。

#### 1.2 工作过程

第一阶段：成立标准编制小组。

本项目任务下达后，2013 年 1 月《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》编制项目启动，我中心确立了标准编制小组，明确了相关研究内容、完成时间、任务分工和时间安排等。

第二阶段：查询国内外相关标准和文献资料。

2013 年 2 月~5 月，收集整理有关核电厂温排水卫星遥感技术规范的国内外文献，调研核电厂温排水卫星遥感的现有数据源、监测方法、验证方法。

2013 年 6 月~11 月，现有开展的大亚湾和田湾核电厂温排水业务监测项目，开展了核电厂温排水海面试验工作，积极开展了

核电厂温排水卫星遥感监测方法的深入研究。

2013年12月~2014年3月，在前期大量工作的基础上，编制组确定了本标准编制的原则、技术路线和要求，完成了《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》的开题报告和标准文本初稿。

第三阶段：开题论证，确定标准制订的技术路线。

为保证核电厂温排水热异常区域提取技术方法的准确可靠，在该标准编制的各个环节，都广泛征求水环境、热红外等领域专家的相关意见。核电厂温排水标准编制中期，在生态环境部环境标准研究所的主持下于2014年3月11日在北京举行了《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》开题论证会。

论证委员会肯定了该标准编制的技术路线，认为该标准制定前期调查研究充分，内容较为详实、完整、规范。论证委员会一致通过该标准的开题，认为该标准的编制可以为核电厂温排水卫星遥感监测工作提供技术指导。编制组在标准编制后期针对专家论证意见进行了进一步的修改，突出了滨海核电厂温排水卫星遥感温升监测技术要求，明确了温度反演方法为单通道或多通道算法并进一步完善了监测结果的表达方式。

第四阶段：编写标准征求意见稿和编制说明（含方法验证报告）。

2014年3月~2014年10月，根据专家论证的意见对标准进行补充调研和修改完善标准草案，在此基础上编制完成《滨海核

电厂温排水卫星遥感监测技术规范（征求意见稿)》，并编制了标准的编制说明。

2014年11月~2020年11月，对征求意见稿的内容进行复核，同时征求行业相关高校、研究机构、企事业单位的意见，对相关意见进行吸纳处理。

## 2 标准制修订的必要性分析

### 2.1 环境形势的变化对核电厂温排水管理提出新的要求

核电在我国属于新兴的电力企业，从上世纪九十年代初秦山核电厂和大亚湾核电厂相继投运起，到现在只有不到三十年的发展史。目前已建成的及正在建的有大亚湾、岭澳、秦山、田湾、宁德、红沿河、三门和阳江等多个核电厂。出于经济性和便利性的考虑，我国的核电厂主要建在沿海地区，采用直流冷却方式将冷却水直接排回自然水体。截至2020年9月30日，我国滨海核电厂址（基地）已达15个，运行机组49台，在建机组达13台，额定装机容量为51027.16MWe，机组数量的增加也使得核电厂冷却水排海总热量增加。一台电功率为1000MW的轻水堆核电机组约有功率为2000MW的热量经过凝汽器排出。采取直流冷却的方式，全部废热水体进入自然水体，可能造成局部水域水体温度的急剧升高，增加其化学反应速率，影响水生生物的繁殖率及水中溶解氧，造成水的密度和粘度下降，并能加速颗粒物的沉降作用，影响水中悬浮物的沉降速率以及携带泥沙的能力，改变自然水体的水质。同时，温排水还对底栖动物、藻类、鱼类、珊

瑚，甚至岸滩生物造成影响，改变其生存、生长和繁殖习性等。核电厂温排水对水生态环境具有一定影响，加强核电厂温排水热影响的监测是保障滨海海域环境和保持生态系统正常运行的必要措施。另一方面，定期、准确地调查评估温排水的影响范围、强度，是近海岸热排放以及核电厂对海水环境影响评估的重要参考依据。利用实测手段实时监控不同机组满功率运行时核电厂温排水热排放状况，用以验证物理模拟和数学模拟获得的温排水环境预测结果，对于核电厂的后续取排水管理、核电机组的立项申请及可能涉及到的环境影响索赔等都有重要的技术参考意义。

传统的实测手段主要是海面布点实测温度分布，通过空间插值获得表面温度场分布，海面实测费时费力，测量风险较大、时间跨度较长、范围有限，不能成为常规监测的手段。相比传统的地面观测手段，卫星遥感技术具有时效性强、分辨率高、资料获取快捷、长时间序列比对与评价明显、费用低廉等特点，利用卫星遥感技术开展核电厂温排水监测，一方面可以动态、大范围实时地监测温排水分布状况，获取温排水热异常等级、面积、分布区域等信息，大大提高核电厂温排水监测的工作效率并确保监测结果的客观性和准确性，另一方面还可对新建核电厂的环评结果进行验证，在不同机组满功率运行期间开展实时监控，可以为管理部门制定温排水热异常防控措施提供有力技术支持。从另一个角度来说，卫星应用属于高新技术，在环境监管领域的业务应用陆续增加，新的环境形势要求环境监管要更加科学化、高效化。

作为新的技术手段,利用卫星遥感开展温排水监测与评价能够增加监测与管理的准确性和时效性。

为了更好地开展核电厂温排水遥感监测工作,在现有遥感数据源和核电厂监督管理需求的基础上,结合具体核电厂厂址特征及现有示范核电厂温排水遥感监测实例,从温排水遥感监测的内容、指标、数据源、方法、技术流程、专题图制作和报告编制等方面入手,制定统一的技术要求,用以指导、规范各个核电厂温排水遥感监测工作,提高核电厂监督管理水平。

## 2.2 相关环保标准和环保工作的需要

目前我国没有专门的针对核电厂或热电厂的冷却水排放标准,仅仅在一些水环境质量标准中对水体温升提出明确规定,与国外相关标准相比,我国在排放强度、混合区范围、温升范围等方面均没有明确规定,在实际环境监测和环境管理中基本没有可操作性。同时,遥感技术作为新兴技术,在我国环境监测技术规范领域较少涉及。随着卫星遥感技术的不断发展,应用到环境监测和核电厂安全监管中的遥感手段越来越多,卫星遥感应用到环境领域的标准也急需发展。

在新的环境形势和技术标准发展需求下,《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》的制定具有紧迫性。随着核电厂温排水卫星遥感监测应用技术的不断提高,会不断产生新的监测方法及产品。为了有效、正确地利用卫星遥感技术进行核电厂温排水监测,对全国各级生态环境保护管理人员、科研人员、监测人员

提供相应的技术指导，迫切需要制定《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》。该规范通过对核电厂温排水遥感监测方法、产品制作技术进行统一规定，确保监测产品更具科学性与权威性，从而为温排水遥感监测工作提供技术支持。综上所述，为满足核电厂温排水卫星遥感监测应用技术与管理的需要，编制符合我国国情、科学实用的《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》十分必要。

### 3 国内外相关分析方法研究

#### 3.1 主要国家、地区及国际组织相关标准研究

##### (1) 美国

1) 标准名称：美国马萨诸塞州电厂的温排水标准。

内容：“在 ZPH (the Zone of Passage and Habitat) 区，最大温升不得超过  $5^{\circ}\text{C}$ ，溶解氧浓度不小于  $5\text{mg/L}$ ；夏季最高温度不超过  $28.33^{\circ}\text{C}$ ”。

2) 标准名称：美国加州对于滨海水体的规定。

内容：“最大温度不超过  $36^{\circ}\text{C}$ ；距离排放系统约  $300\text{m}$  以外的表面不得造成温升超过自然水温  $7.2^{\circ}\text{C}$ ”。

##### (2) 欧盟及成员国

标准名称：欧洲部分国家（比利时、荷兰、法国、意大利）水温排放规定限值。

比利时：最高温度在  $30\text{-}35^{\circ}\text{C}$ ；荷兰：最高温升在  $3^{\circ}\text{C}$ ，排水口最高温度  $30^{\circ}\text{C}$ ；法国：最高温升  $3^{\circ}\text{C}$ ；意大利：最高温升

3°C（海洋），最高温度 30°C（河流），排水口最高温度是 35°C（海洋）。

### (3)日本

标准名称：日本《温排水环境影响调查暂行规定》（1987）。

内容：日本对取、排水在法律上没有强制性规定，国家只发布行政指导性文件，要求电厂提供包含相关内容的环 境评价报告，资料包括：“预测排水口水温上升 1°C 的范围；对水温上升超过 2°C（渔场温升超过 1°C）的范围进行评估；扩建工程温排水对环境的影响也要同时反映到环境影响评估报告中”。

### (4)其他国家

1) 标准名称：印度电厂温排水排放标准（1998）。

内容：“对于海水作为冷却的电厂，新建电厂冷却水排放温升不得超过 7°C，已建电厂冷却水排放温升不得超过 10°C”。

2) 标准名称：埃及电厂温排水排放标准。

内容：“排放口最大绝对温度为 35°C”。

### (5)国际组织

标准名称：世界银行《污染防治手册》。

内容：“混合区边界温升 $\leq 3^{\circ}\text{C}$ ；若未规定混合区边界，则距排放点 100m 处温升不超过 3°C”。

## 3.2 国内相关分析方法研究

我国目前没有专门的冷却水排放标准，仅仅在一些环境法规和环境质量标准中对水体温升提出管理规定。《中华人民共和国

水污染防治法》(2017年修订版)<sup>[1]</sup>规定：“向水体排放含热废水，应当采取措施，保证水体的水温符合水环境质量标准。”我国《海洋环境保护法》<sup>[2]</sup>规定：“向海域排放含热废水，必须采取有效措施，保证邻近渔业水域的水温符合国家海洋环境质量标准，避免热异常对水产资源的危害。”我国《近岸海域环境功能区管理办法》<sup>[3]</sup>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。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，确定混合区的范围。混合区不得影响邻近近岸海域环境功能区的水质和鱼类洄游通道。”针对以上法规规定的管理需求，一些环境质量标准制定了关于具体温升幅度的规定。国家《海水水质标准》(GB3097-1997)<sup>[4]</sup>规定：“对于第一、二类海域海水水质，人为造成的海水温升夏季不超过当时当地 $1^{\circ}\text{C}$ ，其它季节不超过 $2^{\circ}\text{C}$ ；对于第三、四类海域海水水质，人为造成的海水温升不超过当时当地 $4^{\circ}\text{C}$ 。”国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)<sup>[5]</sup>对I~V类水域水温的规定均为“人为造成的环境水温变化应限制在：周平均最大温升 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ，周平均最大温降 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ”。《农田灌溉水质标准》(GB5084-2005)<sup>[6]</sup>规定“水温必须小于(等于) $35^{\circ}\text{C}$ ”。

国外的相关法规或标准手册侧重定量指标，混合区的空间范围也做了一些具体限定，但国内外实际情况不是太一致。我们需要借鉴国外相关标准并结合实际情况，发展符合我国国情的法规

和标准。以上国家现行法规和标准只是规定了工程项目排热造成的海水温升的限值，但未专门制定核电厂温排水的具体排放标准，对温排水热影响的混合区范围、不同等级温升范围没有明确的界定和定量指标，在实际环境管理和环境监测中可操作性较差。当然，《海水水质标准》<sup>[4]</sup>规定“人为造成的海水温升不超过当时当地 4°C”，该标准可以作为本标准项目的依据，通过遥感监测温升幅度并以 1°C 和 4°C 为边界温度来监测温排水温升范围，结合海水功能区的分布，来评价核电厂温排水是否超标。

现阶段，关于核电厂温排水遥感监测的技术规范尚处于空白。本技术规范从温排水遥感监测的内容、指标、数据源、方法、技术流程、专题图制作和报告编制等方面入手，以期指导实际环境监测工作，为符合实际管理需求的核电厂温排水水质标准和正式法规的最终建立奠定技术基础。

### 3.3 国外单通道温度遥感反演的研究综述

热红外传感器的发展，是卫星数据反演海表温度发展的基础。现今国内外热红外传感器在数量和质量上，都较 20 世纪 60 年代有极大提高。目前国外用于反演地表温度的数据主要有美国 NOAA 卫星的 AVHRR 数据，Terra 和 Aqua 卫星的 MODIS 和 ASTER 数据，Landsat 系列卫星的 TM/ETM+ 和 TIRS 数据。

AVHRR 及 MODIS 等热红外数据被广泛应用到海表温度的反演中并取得了一定的成果，如 McClain<sup>[7]</sup>等提出了一种基于 NOAA-AVHRR 热红外图像的 SST 反演方法——多通道海表温

度反演方法 (MCSST), 并反演了 4km 空间分辨率的覆盖全球的海温数据。Minnett<sup>[8]</sup>等提出了针对 MODIS 早晚星数据的基于大气校正算法的 SST 反演算法, 并进行全球海表温度的计算和误差估计。现在, AVHRR 和 MODIS 数据热红外波段 1km 的空间分辨率对于核电厂温排水混合区这样一个中小尺度的监测就不太符合实际需求。目前国外热红外空间分辨率在 100m 左右的大都为单通道设置, 而多通道的 ASTER 开机较少, 数据很难获取, 此外, Landsat8 卫星上的双通道热红外传感器目前辐射定标精度不稳定, 所以只能用单一热红外通道数据。因此, 以下针对核电厂温排水需求的海表温度反演算法均基于单通道热红外数据, 以期能为本技术规范提供有益参考。

### 3.3.1 卫星遥感反演海表温度原理

从理论上讲, 自然界中任何温度高于热力学温度 (0K 或 -273°C) 的物体都不断向外辐射具有一定能量和波谱分布位置的电磁波, 它是物质内部组成和温度的函数, 称为热辐射。热红外遥感利用星载或机载传感器收集、记录地物的这种热红外信息, 作为识别地物和反演地表温度、湿度和热惯量等地表参数的基础。

地表热辐射通过大气层时, 被大气吸收、散射和反射, 热辐射传输方程就是描述热辐射按一定规律传输的方程。如果假设晴空大气, 大气局地热力平衡, 地表为朗伯体, 且不考虑大气分子和气溶胶散射, 则卫星观测到的辐射为遥感器所接收到的热辐

射，可由下述公式<sup>[9]</sup>表示：

$$B_i(T_i) = \tau_i(\theta)\varepsilon_i B_i(T_s) + \tau_i(\theta)(1 - \varepsilon_i)I_i^\downarrow + I_i^\uparrow$$

式中， $B_i(T_i)$  为遥感器接收到的热辐射， $B_i(T_s)$  为地表温度为  $T_s$  的黑体辐射强度， $\tau_i(\theta)$  为波段  $i$  遥感器视角在  $\theta$  处的大气透过率， $\varepsilon_i$  为  $i$  通道地表比辐射率， $I_i^\downarrow$  为大气下行热辐射， $I_i^\uparrow$  为大气上行热辐射。

从式中可以看出，遥感器记录的热辐射主要包括遥感器探测到的经大气衰减后地表热辐射（对应公式  $\tau_i(\theta)\varepsilon_i B_i(T_s)$  部分），大气向上热辐射( $I_i^\uparrow$ )和大气向下热辐射经地表反射后再经大气后到达遥感器的热辐射（对应公式  $\tau_i(\theta)(1 - \varepsilon_i)I_i^\downarrow$  部分）。所有的热红外遥感地表温度（包括海表和陆表）反演算法都是基于热辐射传输方程推导而来的。核电厂温排水卫星遥感监测主要基于上述原理，利用热红外通道的观测数据，通过一系列判别条件将温排水热异常分布从常温背景中识别出来。

### 3.3.2 单通道卫星遥感反演海表温度算法综述

国际上目前具有代表性的单通道算法主要有三种：辐射传输方程法（Radioactive Transfer Equation），Qin 单窗算法<sup>[10]</sup>（Qin ,et al.,2001）和 Jiménez-Munoz & Sobrino<sup>[11]</sup>（2003）普适单窗算法。三种算法的共同特点是在已知地表比辐射率时，利用单一热红外波段反演地表温度，其反演得到的温度受大气廓线数据和地表比辐射率等输入参数的准确性和真实性的影响。

#### 1) 辐射传输方程法

基于辐射传输方程,用大气廓线数据对遥感影像进行大气校正,从而得到地表发射辐射,进而得到地表温度。这种算法过程复杂,并且需要同步大气廓线数据,由于测量的难度,大气数据不可能与卫星同时获取,因此大气剖面数据的非真实性、非实时性导致对地面热辐射的模拟会有较大误差,进而影响了地表温度的反演精度。

$$B(T) = \tau[\varepsilon / B(T_s) + (1 - \varepsilon)I^\downarrow] + I^\uparrow$$

上式中  $B(T)$  是遥感器所观测到的热辐射强度,根据热红外波段的 DN 值计算,为已知值;  $\varepsilon$  是地表比辐射率,  $B(T_s)$  是用 Planck 函数表示的黑体热辐射强度,其中  $T_s$  是地表温度(单位: K);  $\tau$  是大气透射率,可以用大气水分含量来估计,  $I^\downarrow$  和  $I^\uparrow$  分别是大气的下行和上行热辐射强度<sup>[12]</sup>。

$$I^\uparrow = \int_0^z B(T_z) \frac{\partial \tau(\theta, z, Z)}{\partial z} dz$$

上式中  $T_z$  是高程为  $z$  处的大气温度;  $Z$  是遥感器高度,  $\tau(\theta, z, Z)$  代表从高程  $z$  到遥感器高度  $Z$  之间的上行大气水透射率。

展开大气上行辐射公式<sup>[46]</sup>:

$$B(T_a) = \frac{1}{1 - \tau(\theta)} \int_0^z B(T_z) \frac{\partial \tau(\theta, z, Z)}{\partial z} dz$$

上式中  $T_a$  为有效的平均温度,  $B(T_a)$  表示有效的大气平均辐射强度。

$$I^\uparrow = [1 - \tau(\theta)] B(T_a)$$

$$I^\downarrow = 2 \int_0^{\pi/2} \int_\phi^0 B(T_z) \frac{\partial \tau'(\theta', z, 0)}{\partial z} \cos \theta' \sin \theta' dz d\theta'$$

上式中,  $\theta'$  是大气下行辐射方向,  $\phi$  代表大气层顶端,  $\tau'(\theta', z, 0)$  表示从地表到高程  $z$  处的大气下行透射率, 假定  $\partial\tau'(\theta', z, 0) = \partial\tau(\theta, z, Z)$  是合理的, 则

$$I^\downarrow = [1 - \tau(\theta)]B(T_a^\downarrow)$$

上式中,  $T_a^\downarrow$  为有效的大气向下的平均作用温度。用  $T_a$  代替  $T_a^\downarrow$  不产生实质性的影响, 因此辐射传输方程可归纳为:

$$B(T) = \varepsilon\tau(\theta)B(T_s) + [1 - \tau(\theta)][1 + (1 - \varepsilon)\tau(\theta)]B(T_a)$$

如果能知道地表比辐射率  $\varepsilon$  和大气透过率  $\tau$ , 我们可以从上式中求解  $B(T_s)$ 。

要精确地求解  $T_a$ 、 $\tau$ 、 $\varepsilon$ , 必须知道实时大气剖面资料, 但通常很难获取。一般采用标准大气模拟和通用表达式来求  $T_a$  和  $\tau$ , 对于  $\varepsilon$  则采用经验方法给出。再用 Planck 方程求解地表温度:

$$T_s = k_2 / \ln[1 + k_1 / B(T_s)]$$

上式中  $T_s$  是水表温度(K),  $k_1$  和  $k_2$  分别是常量:  $k_1 = c_1 / \lambda^5$ ,  $k_2 = c_2 / \lambda$  (其中  $c_1 = 1.19104 \times 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $c_2 = 14387.7 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ,  $\lambda$  为有效波长)。

## 2) 谭志豪等提出的单窗算法

由谭志豪等<sup>[14]</sup>提出, 利用已知的水表辐射率、大气透射率和大气平均作用温度三个参数, 根据热辐射传输方程反演水表温度。将 Planck 函数泰勒一阶展开, 引入偏导参数  $L$ , 然后用统计数据对其进行回归分析建立  $L$  与通道亮温之间的关系, 从而能够解得水表温度  $T_s$ :

$$T_s = [a(1-C-D) + b(1-C+D) + C + D]T_{sensor} - DT_a / C$$

上式中  $C = \tau \cdot \varepsilon$  ,  $D = (1 - \tau)[1 + \tau \cdot (1 - \varepsilon)]$ 。

其中,  $a = -67.355351$ ,  $b = 0.458606$ ;  $\varepsilon$  是水面发射率, 一般取  $\varepsilon = 0.98$ ;  $T_s$  是水表实际温度,  $T_{sensor}$  是传感器接收到的辐射亮度温度;  $T_a$  为大气向上平均作用温度(也称大气平均作用温度),  $\tau$  是大气透射率, 根据大气水分含量或是水表附近空气湿度来估计。

表 1 大气透射率估计方程

大气剖面	水分含量 $w/(g \cdot cm^{-2})$	大气透射率估计方程	相关系数平方( $R^2$ )	标准误差(SEE)
高气温	0.4~1.6	$\tau = 0.97429 - 0.08007 \omega$	0.99611	0.00237
高气温	1.6~3.0	$\tau = 1.03141 - 0.11536 \omega$	0.99827	0.00254
低气温	0.4~1.6	$\tau = 0.98200 - 0.09611 \omega$	0.99463	0.00334
低气温	1.6~3.0	$\tau = 1.05371 - 0.14142 \omega$	0.99899	0.00238

### 3) 普适性单通道算法

Jiménez-Munoz&Sobrino<sup>[11]</sup>提出了一种普适性单通道算法, 给出的水表温度反演方程式是:

$$T_s = \gamma \left[ \varepsilon^{-1} (\psi_1 L_{sensor} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta$$

上式中,  $L_{sensor}$  是传感器接收的辐射度(单位:  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ),  $\varepsilon$  是水表比辐射率, 一般取  $\varepsilon = 0.98$ ,  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  和  $\psi_3$  为大气参数。

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 L_{sensor}}{T_{sensor}^2} \left[ \frac{\lambda^4}{c_1} L_{sensor} + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1}$$

$$\delta = -\gamma L_{sensor} + T_{sensor}$$

其中,  $T_{sensor}$  是传感器亮温(单位: K),  $\lambda$  是波段的有效波长,  $c_1$  和  $c_2$  为大气参数, 分别为  $1.19104 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$  和  $14387.7 \mu m \cdot K$ 。

大气函数( $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ )由大气中水蒸汽含量( $\omega$ )的函数而获得,

利用 MODTRAN 模拟得到以下关系式：

$$\Psi_1 = 1/\tau$$

$$\psi_2 = 0.299143 - 2.4448 \cdot \omega - 0.118783 \cdot \omega^2 - 0.169506 \cdot \omega^3$$

$$\psi_3 = -0.0964117 + 1.16037 \cdot \omega + 0.350854 \cdot \omega^2 - 0.0529057 \cdot \omega^3$$

其中  $\tau = 0.941007 - 0.048223 \cdot \omega - 0.041227 \cdot \omega^2 + 0.005197 \cdot \omega^3$ ， $\omega$  为大气水汽含量 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )。

### 3.4 国内海表温度反演和温排水遥感应用研究综述

国内外进行海表温度反演主要采用 MODIS 和 AVHRR 数据，然而由于这两种数据地面分辨率较低，只能进行大尺度的核电厂温排水监测，随着进行中、小尺度核电厂温排水监测的需求越来越多，目前国内主要采用地面分辨率相对较高的 TIRS 和 HJ-1B 红外相机两种数据源进行反演海表温度，并取得较好的成果。由于 TIRS 和 HJ-1B 实际应用中都只有一个热红外通道，所以只能采用单通道算法反演海表温度。

#### 3.4.1 基于 TIRS 的海表温度反演算法

目前有 3 种方法可以用来从 Landsat 数据中反演地表温度。传统的大气校正法，也称辐射传导方程法，是根据卫星高度上遥感器所观测到的热辐射强度的构成来求解地表温度。这一辐射强度可以表达为<sup>[13]</sup>：

$$I = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)I^\downarrow] + \tau + I^\uparrow$$

式中， $I$  是遥感器所观测到的热辐射强度 ( $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$ )， $\varepsilon$  是地表比辐射率， $B(T_s)$  是用 Planck 函数表示的黑体热辐射强度，其中  $T_s$  是地表温度(K)； $\tau$  是大气透射率，可以用大气水分含

量来估计， $I^{\downarrow}$ 和 $I^{\uparrow}$ 分别是大气的下行和上行热辐射强度，可以根据实时大气剖面探测数据获取，或利用诸如 MODTRAN、LOWTRAN 或 6S 等大气模拟程序进行模拟求算。因此，

$$T_s = k_2 / \ln[1 + k_1 / B(T_s)]$$

式中， $T_s$ 是地表温度(K)， $k_1$ 和 $k_2$ 均为常量： $k_1=60.776 \text{ m}\cdot\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$ ， $k_2=1260.56\text{K}$ 。

覃志豪等提出的单窗算法<sup>[14]</sup>用如下公式反演地表温度：

$$T_s = [67.355(C+D-1) + (0.4414(C+D) + 0.4586)T_6 - DT_6] / C$$

式中，C、D的获取方法同上。

Jiménez-Munoz 和 Sobrino 提出的普适性单通道法<sup>[11]</sup>，也可用来从 TM6 数据中反演地表温度，其计算公式为：

$$T_s = \gamma(\varepsilon^{-1}(\psi_1 L(\lambda, T) + \psi_2) + \psi_3) + \delta$$

$$\gamma = 1 / \beta$$

$$\beta = \frac{c_2 L(\lambda, T)}{T^2} \left( \frac{\lambda_c^4}{c_1} L(\lambda, T) + \lambda_c^{-1} \right)$$

$$\delta = -\gamma L(\lambda, T) + T$$

式中， $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$ 是中间变量，分别由下式计算：

$$\psi_1 = 0.14714\omega^2 - 0.15583\omega + 1.1234$$

$$\psi_2 = -1.1836\omega^2 - 0.37607\omega - 0.52894$$

$$\psi_3 = -0.04554\omega^2 + 1.8719\omega - 0.39071$$

$C_1$ 和 $C_2$ 是 Planck 函数的常量，分别为： $C_1=1.19104 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ， $C_2=14387.7\mu\text{m}\cdot\text{K}$ ； $\lambda$ 是 TM6 的有效作用波长， $\lambda=11.457\mu\text{m}$ ； $\omega$ 是大气剖面总水汽含量 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )。

要得到地表、海表真实温度，需要利用辐射传输方程的方法。采用同步实测的大气廓线数据集是最准确的大气校正方法，但是

在大多数情况下,我们通常没有与遥感数据相一致的大气廓线数据。而 Qin<sup>[10]</sup>等人开发的单窗算法中,有效大气温度及水汽含量的估算需基于相应的大气模式。但是,对于海陆交互作用强烈的海岸带来说,则难以划分其上部的大气模式,如果又处于不同纬度带的过渡带,要识别其大气模式则更难。因此,陈楚群<sup>[15]</sup>等人采用日常的气象数据来估算有效平均大气温度及水汽含量,但并不基于大气模式,而是基于对流层中大气温度随高度呈线性降低、水汽随高度增加,运用 Landsat 卫星的 TM、ETM+、TIRS 数据反演近海岸水体 SST 的精度。TM6 波段的 120m 空间分辨率会掩盖一部分地表温度的空间变化信息,覃志豪等<sup>[16]</sup>对比发现采用三次卷积插值重采样 TM6 数据,将其从 120m 重采样为 30m 的空间分辨率,对各子像元进行地类划分;再结合不同地表类型的热惯量特性,确定出每个子像元占原像元的权重和该子像元的辐射亮度;然后用单窗算法反演其温度,得到研究区地表温度的空间分布,此方法能更好地反演地表温度的空间分布特征。于杰<sup>[17]</sup>等尝试采用覃志豪单窗算法、Jiménez-Munoz 单通道算法和 Weng 方法对大亚湾进行海表温度(SST)反演。通过野外测量得到地表发射率、大气平均作用温度和大气透过率 3 个参数,根据大埔气象站记录的大气近地表温度和湿度实测资料,估算出卫星过境时刻大气平均作用温度,并根据近地表实际水气压,估算大气水汽总含量。3 种算法反演的海温分布特征基本一致,反演温度与实测温度的差值平均值分别为 -2.21°C、0.19°C 和 -4.68°C,

Jiménez-Munoz 单通道算法误差最小。

### 3.4.2 环境一号 B 星 (HJ-1B) 红外相机的海表温度反演算法

环境一号卫星星座于 2008 年 10 月发射升空, 包括 A、B 两颗光学卫星, 其中的 B 星 (HJ-1B) 搭载一台红外相机 (IRS), 设有 4 个观测通道。第 1、2 通道位于近红外谱段, 第 3 通道位于中红外谱段, 第 4 通道位于热红外谱段, 如表 2 所示<sup>[18]</sup>。相比于 AVHRR、MODIS 等载荷, 红外相机的优势在于其较高的空间分辨率: 除第 4 通道数据的空间分辨率为 300m 外, 其余 3 个通道数据的空间分辨率都是 150m。同时, 红外相机扫描幅宽为 720km, 可实现对同一地区 4 天一次的观测 (白天)。

表 2 HJ-1B IRS 通道的谱段范围及其典型用途

通道序号	光谱范围 ( $\mu\text{m}$ )	主要用途
1	0.75 ~ 1.10	水陆边界、植被及农业估产、土地利用调查等
2	1.55 ~ 1.75	作物长势、土壤分类、区分雪和云
3	3.50 ~ 3.90	高温热辐射差异、夜间成像
4	10.5 ~ 12.5	常温热辐射差异、夜间成像

单通道算法是根据环境卫星传感器上的热红外通道即第四波段获得辐射能。梁珊珊<sup>[19]</sup>等利用 Jiménez-Munoz 和 Sobrino 提出的单通道算法对 HJ-IRS 热红外数据进行水表温度反演。在已知比辐射率的情况下, 只需要输入大气水汽含量就可以利用一个热红外波段的数据反演得到温度。对于水体来说, 其比辐射率可以近似为 1。此时, 可以根据星上辐射亮度、星上亮度温度、有效波长和大气上、下行辐射和大气透过率等几个函数建立与海表温度的关系。其中, 有效波长可以通过通道响应函数获取; 星上

辐射亮度、星上亮度温度由卫星影像定标获得；而通过运行辐射传输模型 MODTRAN4 可以得到大气水汽含量、大气透过率、大气上行辐射和大气下行辐射的拟合关系，大气水汽含量又可通过 MODIS 水汽产品获取，最后反演得到海表温度。

段四波<sup>[20]</sup>针对 HJ-1B 卫星传感器对覃志豪单通道算法和 Jiménez-Munoz&Sobrino 单通道算法进行了修订。

1) 覃志豪单通道算法修订：

覃志豪等在覃志豪单通道算法中定义了一个温度参数  $L = B(T)/[B(T)/\partial T]$ ，参数 L 的数值与温度具有很好的线性关系。根据这一特性，可以建立参数 L 和温度的关系： $L = a + bT$ 。

对于 HJ-1B 卫星热红外波段而言，在温度变化范围为 0-70°C 时，上式的回归系数  $a = -68.035$  和  $b = 0.46372$ ，相关系数的平方  $R^2 = 0.999$ ，RMSE=0.226。当图像的温度变化范围较窄时，对于 0-30°C， $a = -60.8969$ ， $b = 0.439078$ ，RMSE=0.044；对于 20-50°C， $a = -68.3301$ ， $b = 0.464012$ ，RMSE=0.042。

大气透过率估算方程修订： $\tau = 0.9821 - 0.1241\omega$ ，相关系数的平方  $R^2 = 0.967$ 。

大气平均作用温度估算方程修订：

表 3 HJ-1B 热红外波段大气平均作用温度估算方程

大气模式	大气平均作用温度估算方程
热带大气	$T_a = 22.13009 + 0.89852 T_0$
中纬度夏季大气	$T_a = 20.43072 + 0.90507 T_0$
中纬度冬季大气	$T_a = 24.70005 + 0.88894 T_0$
美国 1976 年标准大气	$T_a = 32.58992 + 0.85112 T_0$

表中  $T_0$  为近地表温度。

## 2) Jiménez-Munoz & Sobrino 单通道算法修订

$$\psi_1 = 0.0412\omega^3 + 0.0936\omega + 0.9856$$

$$\psi_2 = -0.7174\omega^3 - 0.8812\omega - 0.3941$$

$$\psi_3 = 0.2639\omega^3 + 0.6499\omega + 0.4703$$

通过大气辐射传输软件 MODTRAN 4 模拟数据对算法进行了精度评价和参数的敏感性分析，并在此基础上考虑 HJ-1B 卫星传感器的噪声等效温差(NE $\Delta$ T)和各种参数的估计误差，进而对算法进行综合误差分析，发现在 NE $\Delta$ T $\leq$ 0.3 K 的情况下，覃志豪单通道算法平均综合误差为 1.14 K，而 Jiménez-Munoz & Sobrino 单通道算法平均综合误差为 0.94 K。基于模拟的 HJ-1B 热红外波段数据，采用修订后的算法进行了地表温度的反演实验，通过对反演结果的分析，发现覃志豪单通道算法反演的地表温度比模拟的地表温度低 1.2K 左右，而 Jiménez-Munoz & Sobrino 单通道算法比模拟的地表温度低 0.8K 左右。从算法验证和应用的结果来看，修订的这两种算法可以方便地应用到对 HJ-1B 热红外波段数据的地表温度反演中。

### 3.4.3 唐丹玲等利用 AVHRR 开展大亚湾核电温排水研究<sup>[21]</sup>

利用 1997 年 11 月至 1999 年 2 月期间 342 幅 1km 的 AVHRR 多波段热红外遥感数据，结合季节、排水量、水流方向以及风向等因素分析了大亚湾核电站温排水对海温的影响规律。分析发现，白天海表温度比夜晚要高；冬季和夏季的温排水在垂直混合分层上存在较强的季节性差异；冬季（12 月至 3 月），温排水在

核电厂附近几公里之内，羽状区域和非羽状区域之间的温度差异在 1.5°C，夏季和秋季（5 月至 11 月）温排水沿着核电厂排水口往南延伸至 8-10 公里处，羽状区域和非羽状区域之间的温度变化大约在 1°C。

#### **3.4.4 陈楚群、刑前国利用 Landsat5 TM 开展大亚湾核电温排水研究<sup>[15]</sup>**

利用 Landsat TM、ETM+热红外数据，将大气效应考虑在内进行近海岸海表水温单窗算法反演。根据对流层中大气温度随高度呈线性降低、水汽随高度呈指数衰减的规律，建立了估算平均大气温度及水汽含量的通用模式。通过与实测数据及 MODIS Terra 海表水温产品比较发现，该算法能够提高运用 TM/ETM+TIR 单波段数据进行近岸海表水温(SST)反演的精度：一方面，反演所得结果更接近于海表实际水温；另一方面，它在一定程度上剔除大气中的水汽对 SST 反演的影响，进而提高海表水温的温度对比度。该大气校正算法只需地表大气温度及相对湿度资料，该算法也无需进行大气模式的界定。

#### **3.4.5 吴传庆利用 Landsat5 TM 开展大亚湾核电温排水监测<sup>[22]</sup>**

吴传庆等人假设地表在 TM 的热红外波段内的发射率一致，就可将该波段的辐射亮度值转换为星上亮温。也就是说假设观测区域在相同时间大气的的影响相同，大气对温度反演的影响为一常数，根据以下公式即可获取该区域的海表温度。

$$L = G \times DN + B$$

$$T = \frac{k_2}{\ln(k_1 / L + 1)}$$

$$T = \frac{k_2}{\ln(k_1 / L + 1)} + a$$

其中， $DN$  为 TM 影像第六波段的像元值， $G$  和  $B$  都是该波段的增益参数， $L$  为该波段的星上辐射强度（单位为  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ）， $k_1$ 、 $k_2$  为反演常量， $T$  为开尔文温度， $a$  根据地面水文资料取值为 4。

表 4 反演参数表

传感器	$G(W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)/DN)$	$B(W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m))$	$k_1(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$	$K_2(kelvin)$
Landsat5	0.055158	1.2378	607.76	1260.56
Landsat7	0.0668	0	666.09	1282.71

分析海表温度反演结果，发现大亚湾核电厂排水口温度，夏季比周围水温高  $4^\circ C$ ，影响半径为 3.5 公里；冬季比周围水温高出  $6^\circ C$  左右，影响半径为 2.5 公里。温排水造成的  $3^\circ C$  以上异常区，夏季为 0.75 平方公里，冬季为 1 平方公里；2003 年改排放方向后，冬季为 1.5 平方公里。无论是相对于整个大亚湾海域还是核电厂所在的小港湾区域，影响都非常小。

### 3.4.6 梁春利等利用航空及 Landsat5 TM 开展秦山核电温排水监测<sup>[23]</sup>

以热红外遥感为主要技术手段，采用以航空遥感技术为主、航天卫星遥感为辅的调查方式，开展夏、冬两季 16 个不同潮汐状况的秦山核电基地附近海域的海面温度遥感调查工作。根据夏、冬两季大小潮的落急、落末、涨急、涨末四个潮汐状态下温

度场扫过的区域，确定出温升包络面积。并据此调查超出 4°C 的温升包络面积和整个温升包络面积，用以说明核电运行对其周边海域造成的热分布的范围和程度。

#### **3.4.7 周颖、巩彩兰利用 HJ-1 做田湾核电温排水研究<sup>[24]</sup>**

周颖等利用普适性单通道算法，在获取环境减灾卫星后经过几何精校正、裁剪等预处理后再进行海面温度反演。温度反演时，首先根据辐射传输方程，建立给定波长、地表发射率、在某一温度下黑体的辐射亮度、大气上行辐射亮度、大气下行辐射亮度、大气透过率和传感器接收到的辐射亮度之间的关系，根据 Plank 公式进行泰勒级数展开推导可反算得到图像亮温；大气上行辐射亮度、大气下行辐射亮度和大气透过率三个大气参数同样是由辐射传输模型 MOTRAN 进行模拟，再根据 MODIS 的 2 级产品 MOD05 水汽产品代替水汽含量，即可获取海表温度。

反演结果与 MODIS 海面温度产品具有一致性，然后依据反演所得海面温度分布图，对不同季节和不同潮汐条件下温排水的分布特征进行了分析，结果表明，夏季温升超过 3°C 的区域明显小于冬季，夏季温排水沿海岸单向扩散，冬季的温升区域呈扇形分布；低潮时温排水扩散范围明显增大，温升超过 3°C 的区域面积超过高潮时的 4 倍；温排水的扩散范围与强度也会随着潮位的涨落而改变。

#### **3.4.8 朱利等利用 HJ-1 做大亚湾、田湾核电温排水监测及研究<sup>[25]</sup>**

朱利等利用辐射传输模型对 HJ-IRS 热红外数据进行水表温

度反演。其主要原理是晴空条件下，不考虑多次散射，假设水平均匀大气，对于一定温度  $T_s$ ，地表的黑体辐射为：

$$B(\lambda, T_s) = \frac{L_{sensor} - L_{up} - \frac{(1-\varepsilon)L_{down}}{\varepsilon}}{\tau(\theta)\varepsilon}$$

式中， $L_{sensor}$  为星上辐亮度（单位： $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ），由卫星影像定标而得； $L_{up}$  和  $L_{down}$  分别为大气上、下行辐射（单位： $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ）； $\tau$  为某一波段遥感器视角在  $\theta$  处的大气透过率； $\varepsilon$  为地物比辐射率，以上各项均为波长的函数。在热红外波段，地物比辐射率  $\varepsilon$  随波长的变化比较平缓，一般  $\varepsilon$  与  $\varepsilon(\lambda_i)$  的差值较小，故可用通道中心波长处的比辐射率代替，海水比辐射率确定为 0.98；利用辐射传输模型 MODTRAN，输入当时当地的地面气象数据和 NCEP 大气廓线数据，结合红外相机的热红外通道响应函数，分别获得大气上行辐射、大气下行辐射和大气透过率。

获得地表辐亮度  $B(\lambda, T_s)$  后，可以直接利用 Planck 公式结合宽等效波长来计算热红外遥感数据所对应的地表温度。利用查找表的方法来提高宽通道辐射亮度向温度转换精度。

根据普朗克方程，当地表温度为  $T_s$  时，对应波长为  $\lambda$ （单位： $\mu m$ ）的黑体辐射为：

$$B(\lambda, T_s) = \frac{c_1 / \lambda^5}{\exp(c_2 / \lambda T_s) - 1}$$

式中， $c_1 = 1.19104 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ， $c_2 = 14387.7 \mu m \cdot K$ 。

上式中存在  $\lambda$  和  $T_s$  两个变量，需先建立  $T_s$  与对应通道等效黑体辐射  $B_{eff}(T_i)$  的查找表，令  $B_{eff}(T_i) = B(\lambda, T_s)$ ，通道等效黑体辐射  $B_{eff}(T_i)$  算式如下：

$$B_{eff}(T_i) = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} B(\lambda, T_i) f(\lambda)}{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f(\lambda)}$$

式中  $f(\lambda)$  为通道响应函数， $\lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ ，即通道响应的波长区间。通过改变温度范围[193.15, 353.15K]，就可以获得对应通道等效辐射值，进而获得温度和辐亮度转换的查找表。通过查找表，可以把对应宽波段的辐亮度转换为地表温度。

除了反演海表温度外，基于 HJ-1B 红外相机的温排水监测还有如下几个主要环节：

➤ 重采样

IRS 数据除第 4 波段的空间分辨率为 300 米外，其余三个波段均为 150 米，因此数据进行几何精校正后应先将数据重采样为 150 米。

➤ 云检测

有云层覆盖海面时会导致海水平均温度降低，因此可根据 IRS 数据第 1、2 波段中云层反射率大于其他地物而将云层剔除。

➤ 水陆分离

水陆分离主要依靠第 1、2 波段中水的反射率小于陆地反射率进行水陆像元的分离。

➤ 基准温度提取

基准温度的提取主要有三种方法：1) 温升混合区最低遥感温度法：即以温升混合区内遥感探测的当天的最低温度作为区内的环境基准温度，这是假定区内的较高水温都是温排水增温造成

的。研究区的范围结合数模资料和历史温升监测资料，确定温排水的最大影响的分布范围，以此来确定温升混合区的范围。2) 邻近区域评价温度法：对于类似宁德、田湾核电厂区域的开放式类型，由于无法确定海湾分布范围，且远、近海区域温度差别较大，可以选择核电厂附近区域内不受温排水影响的区域，以此核心区的平均温度为温排水基准温度。该邻近区域的选择是较为困难的，拟定以多年 MODIS 海表温度产品以及发电前环境一号红外相机海表温度反演数据为基础，结合地形、潮汐等特征分析，选择与温排水影像区域平均温度接近的区域作为邻近区域。3) 遥感平均温度法：平均温度法又将采用二种方法来确定。一是在研究区域内选择不受温排水影响的核心区域，以核心区的平均温度作为基准温度，称其为“无温排水核心区基准温度”；二是以温排水排放的整个海湾的平均温度为参考，先将温排水影响区高于平均温度 1 度及 1 度以上的区域剔除后再统计的全区平均温度，称之为“温排水校正的基准温度”。

#### ➤ 热分布提取及统计

根据温度反演结果，将核电厂附近海域热异常区提取出来并划分为 7 个等级，水温不高于基准温度 ( $<$ 基准温度)，水温高于基准温度但是不超过  $1^{\circ}\text{C}$  ( $<1^{\circ}\text{C}$ )；水温高于基准温度  $1^{\circ}\text{C}$  但是不超过  $2^{\circ}\text{C}$  ( $+1^{\circ}\text{C}$ )；水温高于基准温度  $2^{\circ}\text{C}$  但是不超过  $3^{\circ}\text{C}$  ( $+2^{\circ}\text{C}$ )；水温高于基准温度  $3^{\circ}\text{C}$  但是不超过  $4^{\circ}\text{C}$  ( $+3^{\circ}\text{C}$ )；水温高于基准温度  $4^{\circ}\text{C}$  但是不超过  $5^{\circ}\text{C}$  ( $+4^{\circ}\text{C}$ )；水温高于基准温度

5°C 以上 (>5°C)。最后根据各等级像元数统计热异常区面积。

温排水的卫星遥感监测方法的确定是本标准的关键内容。通过综合研究以上国内外主要核电厂温排水卫星遥感监测方法可以看出,利用单通道算法反演水表温度进行核电厂温排水监测方法比较成熟,适用范围较广,是目前国际上广泛采用的算法。因此,本标准确定以单通道算法反演水表温度为核电厂温排水监测方法,并在此基础上制定卫星监测核电厂温排水应用的流程、方法、产品制作等内容。

### 3.4.9 张彩等利用不同空间分辨率热红外数据做大亚湾核电温排水监测及研究<sup>[26]</sup>

利用相同日期的 HJ-1B 红外相机数据与 Landsat ETM+热红外波段数据,采用时空插值后的 NCEP 大气廓线数据,结合近地面气象观测信息,基于辐射传输模型 MODTRAN 获得通道等效大气参数,实现对 ETM 和 IRS 热红外遥感数据的大气校正,进而反演出大亚湾区域海表温度。

以同日期绝对精度较高的 MODIS 海温产品作为基准,对 HJ-1B 数据、Landsat ETM+数据和 MODIS 反演结果 3 种不同空间分辨率数据在滨海核电厂温排水监测的一致性进行了分析与评价,结果表明,3 种数据源反演的海表温度在空间分布趋势上具有一致性,ETM+与 IRS 反演结果与 MODIS 海温产品相差 1°C 左右,相对而言,ETM+反演结果的精度更高。另外,空间分辨率越高,监测得到的温排水温升等级越多,展现的温升细节越多。

相比而言，1km 空间分辨率的 MODIS 热红外数据不适合温排水监测。从展现细节来说，60m 空间分辨率的 ETM+比较适合温排水监测，且精度较高。IRS 与 ETM+的监测结果相差不大，且具有较短的重访周期和较宽的覆盖范围，可以作为温排水监测的主要遥感数据源。

#### **3.4.10 张晓峰等利用 Landsat-8 热红外数据做田湾核电站温排水分布研究<sup>[27]</sup>**

选取田湾核电站邻近海域在 2015-2017 年受云层覆盖影响较小且对应几个典型潮汐状态的 5 景 Landsat-8 热红外影像数据，并对影像进行辐射定标、几何校正，采用辐射传输方程法反演田湾核电站邻近海域海面温度。通过计算温排水监测区基准温度，进行温升提取，依据反演所得海面温升分布图对温排水的分布特征进行分析。结果表明，田湾核电站温排水的扩散方向和影响范围与潮汐状态密切相关。在涨潮中期阶段，温排水分布范围较小，其中 1℃ 以上温升区域面积不足 10km<sup>2</sup>；在高、低平潮阶段，温排水扩散面积相近，其中 1℃ 以上温升区域面积约 15km<sup>2</sup>；在落潮中期阶段温排水分布范围最大，1℃ 以上温升区域面积可达 30km<sup>2</sup>，但 4℃ 以上高温升区域面积较小。高温升区域多出现在排水口以南至以东附近海域，随着温排水向周围海域扩散，温升逐渐呈衰减分布。

#### **3.4.11 王祥等利用不同空间分辨率遥感数据做红沿河核电温排水监测及研究<sup>[28]</sup>**

采用同时相、不同空间分辨率的 MODIS 数据、HJ-1B 红外相机数据及 Landsat-8 热红外数据计算红沿河核电厂附近海域的海表温度分布信息。基于校正海湾平均温度法提取基准温度，该方法是在海湾平均温度法的基础上进行修正，以覆盖核电厂温排水温升影响区域为原则，以核电厂为中心，选定不受陆源入海及海流影响的  $10\text{km} \times 10\text{km}$  区域作为研究区，先统计研究区内的平均海表温度，再剔除温排水影响区域高于平均温度  $1^\circ\text{C}$  及以上的区域，最后统计剩余区域平均海表温度，以此作为温排水监测区的背景温度。

基于交叉标定后的三种星源数据，获取了不同空间分辨率观测模式下温排水的监测结果，研究表明，三种监测结果趋势性较为一致，温度均从排水口向离岸方向递减，但 MODIS 数据监测结果空间分辨率太低，因而不存在任何扩散细节信息；随着观测数据空间分辨率的提高，温排水扩散细节信息逐渐显现，HJ-1B 监测结果受较低空间分辨率导致陆地与海水的混合像元影响，提升了水边线处观测像元的温度值。在单星观测模式下，空间分辨率的提升也有着较长的重访周期，因此考虑到不同温排水监测区域水文地质条件的差异，在监测工作中应综合利用不同时间及空间分辨率的卫星数据，从而既可以识别温排水扩散范围，又能有较为丰富的数据源。

### 3.5 相关海洋监测技术规范

由中华人民共和国国家海洋局发布的《海洋监测技术规程》

[37]，其中第7部分内容是专门针对卫星遥感技术方法的，本部分内容规定了海洋表面温度遥感算法建立的方法和要求，可为我们制定《滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范》提供参考依据。

标准名称：《海洋监测技术规程》[37]。

标准编号：HY/T 147.7-2013。

内容：海洋表面温度遥感算法建立。

(1) 单通道算法： $SST=a+bT$

式中： $SST$ 为海洋表面温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $a$ 、 $b$ 为经验系数， $T$ 为单通道的亮温，单位为开尔文（ $\text{K}$ ）。

(2) 分裂窗算法

波段选择： $(11\pm 2)\mu\text{m}$ 内的两个波段，或 $(4\pm 1)\mu\text{m}$ 内的两个波段。

算法模型：

a)基本算法： $SST=a_0+a_1T_{ch1}+a_2T_{ch2}$

式中： $SST$ 为海洋表面温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 为经验系数， $T_{ch1}$ 、 $T_{ch2}$ 为单通道的亮温，单位为开尔文（ $\text{K}$ ）。

b)大扫描角度订正算法： $SST=a_0+a_1T_{ch1}+a_2T_{ch2}+a_3(\sec\theta-1)$

式中： $SST$ 为海洋表面温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 为经验系数， $T_{ch1}$ 、 $T_{ch2}$ 为单通道的亮温，单位为开尔文（ $\text{K}$ ）， $\theta$ 为卫星天顶角，单位为弧度（ $\text{rad}$ ）。

### 3.6 实践验证与应用

用现实数据对技术方法进行实践是检验和完善技术方法的重要手段。截至目前，核电厂温排水热异常区域提取技术方案已经成功应用到本单位开展的大亚湾核电基地、田湾核电厂、宁德核电厂、红沿河核电厂、福清核电厂、台山核电厂、防城港核电厂及阳江核电厂温排水遥感监测双月报工作和相应的遥感业务监测工作中。

以上核电厂温排水遥感监测项目均已经完成结题验收。该标准在制定过程中深入分析了目前核电厂温排水地面调查和遥感调查的优缺点，保证技术方法结果的可靠性。

### 3.7 国内外标准与本方法关系

国内相关标准为本标准的制订提供了基础，国家《海水水质标准》（GB3097-1997）和国家《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）提供了水温温升监测重点关注的等级，《摄影测量与遥感术语》（GB/T 14950-2009）<sup>[29]</sup>和《卫星术语》（GJB 421A-97）<sup>[30]</sup>提供了与本标准相关的术语解释，《热红外遥感》<sup>[9]</sup>《遥感物理》<sup>[41]</sup>《海洋科学导论》<sup>[42]</sup>等专著也为本标准提供了相关术语解释。国外相关法规或标准手册更侧重定量指标，比如温升的绝对高值限定等，但与国内实际管理需求不是太符合，本标准将其作为技术背景参考。

相比于技术标准规范，国内外在海表温度遥感反演和温排水遥感监测方面都有较好的研究基础，可以充分地为本标准提供成

熟的技术方法。而编制单位已有的工作基础和业务能力为本标准技术方法的合理性提供了保障。

## 4 标准制修订的基本原则和技术路线

### 4.1 标准编制的依据

GB3097-1997 海水水质标准<sup>[4]</sup>

GB3838-2002 地表水环境质量标准<sup>[5]</sup>

GB5084-2005 农田灌溉水质标准<sup>[6]</sup>

GB/T 14848-93 地下水环境质量标准<sup>[31]</sup>

GB 17378-2007 海洋监测规范<sup>[32]</sup>

GB/T 15968-2008 遥感影像平面图制作规范<sup>[33]</sup>

GJB 421A-97 卫星术语<sup>[30]</sup>

GJB 2700-96 卫星遥感器术语<sup>[34]</sup>

GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语<sup>[29]</sup>

GB/T 17798-2007 地理空间数据交换格式<sup>[35]</sup>

DZ/T 0143-1994 卫星遥感图像产品质量控制规范<sup>[36]</sup>

HY/T 147.7-2013 海洋监测技术规程 第7部分：卫星遥感技术方法<sup>[37]</sup>

HJ 610-2011 环境影响评价技术导则-地下水环境<sup>[38]</sup>

《中华人民共和国环境保护法》（主席令第22号）<sup>[39]</sup>

《中华人民共和国环境影响评价法》（主席令第77号）<sup>[40]</sup>

《中华人民共和国水污染防治法》（2017年修订版）<sup>[1]</sup>

《中华人民共和国海洋环境保护法》（主席令第26号）<sup>[2]</sup>

《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）<sup>[3]</sup>

## 4.2 标准制修订的原则

本标准制定过程中主要参考的基本原则有：

### （1）适用性、可操作性原则

本标准的内容应具有普遍适用性，方法应具有可操作性，能够为环境监测及管理等相关业务部门进行温排水监测提供技术参考。

### （2）科学性、先进性原则

本标准在编制过程中应积极借鉴和利用国内外相关研究成果，运用可靠的原理、成熟先进的技术和科学的方法，保证制定的标准具有科学性和先进性。

### （3）经济技术可行性原则

标准中采用的技术方法应经济可行，确保按照该标准开展温排水卫星遥感监测时，涉及到的卫星遥感数据源比较容易获取、方法比较容易实现，监测成本较低，经济可行。

## 4.3 标准制修订的工作流程

本标准编制工作的流程如图 1 所示。

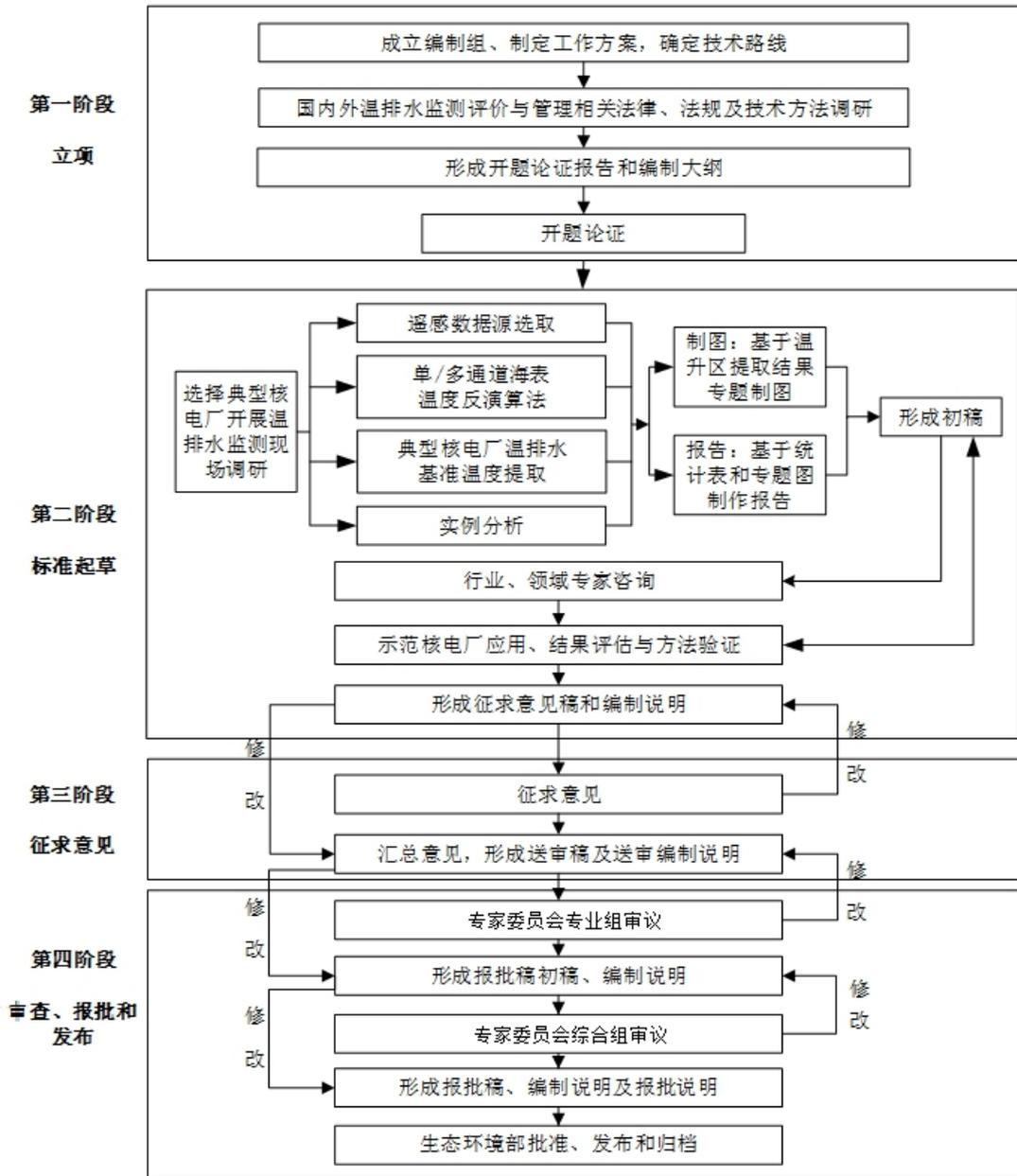


图 1 工作流程图

## 5 标准主要技术内容

### 5.1 术语和定义来源

在核电站温排水卫星遥感监测中，需要考虑遥感数据选取与处理，热异常统计与分析，以及遥感专题图制作和报告编制等各方面的的问题，其中有关像元、分辨率等遥感传感器术语，黑体、比辐射率、亮度温度、动力学温度、表皮温度等涉及到热红外遥

感的术语，涉及到大气校正、几何校正、辐射校正等遥感处理术语，涉及到温排水基准温度、影响区域等专门热异常监测定义，以上均需要在规范中明确规定。

### **5.1.1 像元**

包含空间和光谱两个变量的遥感图像数据单元。其中，空间变量确定了分辨单元的像元在具体信道中的光谱响应强度。数字图像中由每个数字值代表相应的地面面积单元。该数字值代表按要求的取样间隔对遥感器输出的模拟信号的取样。

该定义出自《GJB 421A-97 卫星术语》<sup>[30]</sup>。

### **5.1.2 空间分辨率**

在扫描成像过程中一个光敏探测元件通过望远镜系统投射到地面上的直径或对应的视场角度。

该定义出自《GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语》<sup>[29]</sup>。

### **5.1.3 时间分辨率**

传感器能够重复获得同一地区影像的最短时间间隔。

该定义出自《GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语》<sup>[29]</sup>。

### **5.1.4 黑体**

指如果某一物体对任何波长的辐射全部吸收，该物体称为绝对黑体，在自然界是不存在的，在理论上具有重要地位。实验室可以通过人工制造出接近于黑体的表面。

该定义出自《热红外遥感》（电子工业出版社，2006，田国良，第3页）<sup>[9]</sup>。

### 5.1.5 比辐射率

指物体在温度  $T$ ，波长  $\lambda$  处的辐射出射度  $M_1(T, \lambda)$  与同温度、同波长下的黑体辐射出射度  $M_2(T, \lambda)$  的比值。

该定义出自《GJB 2700-96 卫星遥感器术语》<sup>[34]</sup>。

### 5.1.6 大气校正

消除或减弱卫星遥感影像在获取时在大气传输中因吸收或散射作用引起的辐射畸变。

该定义出自《GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语》<sup>[29]</sup>。

### 5.1.7 几何校正

为消除影像的几何畸变而进行投影变换和不同波段影像的套合等校正工作。

该定义出自《GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语》<sup>[29]</sup>。

### 5.1.8 辐射校正

对由于外界因素，数据获取和传输系统产生的系统的、随机的辐射失真或畸变进行的校正。

该定义出自《GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语》<sup>[29]</sup>。

### 5.1.9 亮度温度

当一个物体的辐射亮度与某一黑体的辐射亮度相等时，该黑体的物理温度就被称之为该物体的亮度温度。

该定义出自《遥感物理》（北京大学出版社，2005，徐希孺，第 389 页）<sup>[41]</sup>。

### 5.1.10 海水表面温度

指海洋表层海水温度，一般指海水表面到 0.5 米水深的平均动力学温度。

该定义出自《海洋科学导论》（高等教育出版社，1999，冯士筳等，第 405 页）<sup>[42]</sup>。

#### **5.1.11 表皮温度**

又称皮肤温度，在给定波长范围内，电磁辐射穿透的那一层的温度就是皮肤温度。在热红外中，由于电磁辐射只有表面非常薄的穿透深度，所以热红外中的皮肤温度就是目标薄层表面的温度。

该定义出自《海洋科学导论》（高等教育出版社，1999，冯士筳等，第 405 页）<sup>[42]</sup>。

#### **5.1.12 温排水**

核电厂用于冷却降温的水体进入自然水体扩散后，形成在空间上温度高于其周边水体的混合水体，即为温排水。

该定义由编制组给出。

#### **5.1.13 基准温度**

为客观提取和评价温排水的影响区域和强度而设定的一个评价基准。

该定义由编制组给出。

#### **5.1.14 温升区**

温排水所在或影响的空间区域，也叫温升混合区。

该定义由编制组给出。

## 5.2 总则确定依据

### 5.2.1 基本原理

核电厂温排水卫星遥感监测主要是调查核电厂温排水导致的附近海域海水温度升高的区域及其分布,主要原理是热红外遥感器探测温排水区域与正常海水水体热辐射能量差异。对于采取直流冷却的滨海核电厂,大量的余热经冷却水进入海洋环境,形成持续的温排水现象。温排水与四周海域海水相互混合,形成以排放口为中心的递减型热排放分布,越远离排放口,温升等级越小。利用中高分辨率星载热红外遥感数据可以获取核电厂温排水热扩散区域海水表面温度空间分布,海表温度与温排水基准温度的差异可获得热分布不同等级的海表平面分布,统计不同温升(即温度升高)等级像元数即可获得不同温升等级分布面积。

### 5.2.2 监测目的

基于核电厂温排水主要产生水体热异常现象,监测的主要目的为:通过卫星遥感热红外数据获得滨海核电厂附近海域海表温度平面分布,进而获得海上温排水造成的水体热异常区位置、形状及面积。

### 5.2.3 监测内容

监测内容主要有两部分:(1)获取温排水空间分布范围。(2)获取不同温升等级的分布位置与面积。

### 5.2.4 遥感数据源要求

核电厂温排水遥感监测对数据源的要求主要如下:

a)空间分辨率：对于发电机组电功率总和为 1000MW（含）以上，且采用直流冷却方式将冷却水排回自然水体的滨海核电站，空间分辨率至少要求在 300 米，100 米以内更为合适。

b)波段设置：在热红外谱段 8.0-12.5 $\mu\text{m}$  范围内具有单通道或多通道，用于温升区提取；在可见近红外通道范围内至少具有红、绿、蓝三通道或近红、红、绿三通道，用于云检测和水陆分离。

### 5.2.5 监测处理流程

监测的技术流程如图 2 所示。流程图中方框内容代表处理过程，斜框内容代表数据或成果。根据监测目的和监测内容，从地面接收的卫星遥感数据源开始，经历空间裁剪、几何校正、辐射校正、温度反演、基准提取得到最终的热异常分布，并制图与编写报告。具体方法后文详述。

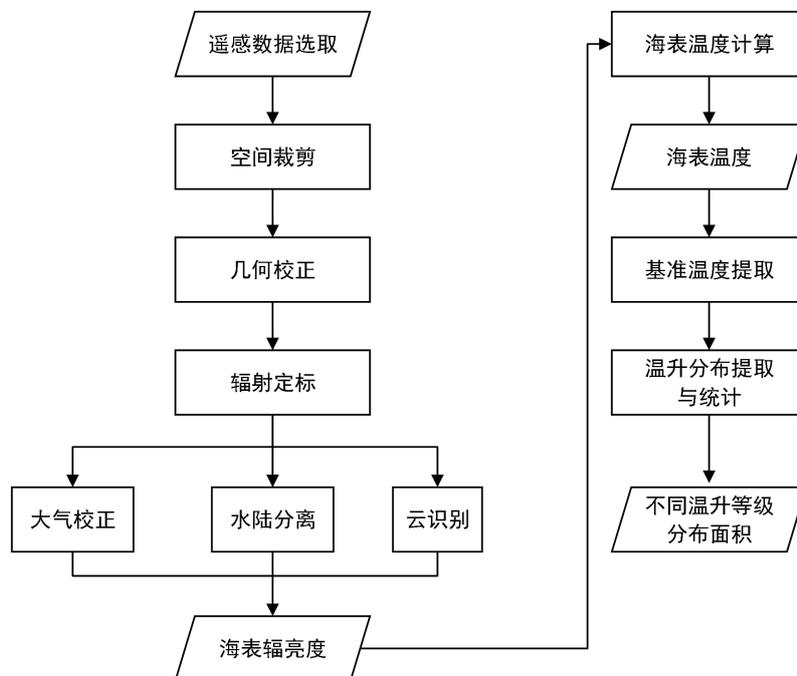


图 2 核电站温排水卫星遥感监测处理流程

## 5.3 监测方法依据

### 5.3.1 遥感数据选取

选择好遥感数据源，需要考虑遥感数据的有效性，以选择合适监测的遥感数据。对于参与温排水范围计算的卫星遥感数据，要保证原始数据没有条带影响和避免覆盖研究区域的云层所占比例过多，无法得到有效监测结果。选取的遥感数据要完全覆盖核电厂温排水影响区域；在核电厂温排水影响区域内，云覆盖率推荐不超过 5%。

### 5.3.2 空间裁剪与几何校正

以核电厂温排水排放口为中心，以完全覆盖温排水影响区域为原则，裁剪范围依据制图的具体需求，空间裁剪有利于后续数据处理的效率；基于参考影像或空间点位坐标信息，进行几何校正，校正精度控制在 1 个像元以内。

空间裁剪范围与几何校正精度参考编制单位正在开展的“核电厂温排水遥感监测”业务技术要求。

### 5.3.3 图像辐射定标

基于卫星数据头文件提供的信息，利用绝对定标系数将灰度值(digital number, DN)图像转换为表观辐亮度图像，计算公式为：

$$L_{sensor} = DN * gain + L_0$$

式中， $L_{sensor}$  为表观辐亮度；DN 为灰度值；gain 为绝对定标增益； $L_0$  为绝对定标系数偏移量（gain 和  $L_0$  一般在卫星数据头文件中都能直接找到）。

### 5.3.4 热红外大气校正

热红外波段的卫星遥感大气校正主要去除水汽、气溶胶等对地表热辐射的吸收和散射的影响。输入卫星过境时刻的大气温湿廓线数据，基于辐射传输模型的方法（如 MODTRAN 模型），获得大气透过率、大气上行辐射和大气下行辐射三个基本参数，进而获得海面水体辐射的辐亮度值，即海表温度为  $T_s$ （单位，K）的黑体辐射为：

$$L(T_s) = \frac{L_{sensor} - L_{up}}{\tau \varepsilon} - \frac{(1 - \varepsilon)L_{down}}{\varepsilon}$$

上式中， $L_{sensor}$  为表观辐亮度（单位： $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ），由卫星影像辐射校正获得； $L_{up}$  和  $L_{down}$  分别为大气上下行辐射（单位： $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ）； $\tau$  为大气透过率； $\varepsilon$  为地表比辐射率，以上各项均为波长的函数。在热红外波段，地物比辐射率  $\varepsilon$  随波长的变化比较平缓，一般  $\varepsilon$  与  $\varepsilon(\lambda_i)$  的差值较小，故可用通道中心波长处的比辐射率代替，海水比辐射率取 0.98。当然海水比辐射率会随泥沙含量、盐度、海浪状况有所变化，在高视场角条件下，平静海面的比辐射率可降低到 0.95 左右。海水比辐射率取值参见参考文献<sup>[41]</sup>（徐希孺编著,遥感物理,北京大学出版社,2005,410 页）。

对于热红外通道波段范围较宽的传感器， $L_{up}$ 、 $L_{down}$ 、 $\tau$  三个参量随波长变动较大，需考虑热红外通道响应特征，其有效值往往通过与通道响应函数卷积而得，即：

$$i = \frac{\int i(\lambda)f(\lambda)d\lambda}{\int f(\lambda)d\lambda}$$

上式中 $i$ 分别代表 $L_{up}$ 、 $L_{down}$ 和 $\tau$ 。

热红外数据大气校正方法参见参考文献<sup>[43]</sup>（朱利,赵利民,王桥,张爱玲等.核电站温排水分布卫星遥感监测及验证[J].光谱学与光谱分析,2014,34(11):3079-3084.）。

### 5.3.5 水陆分离

水陆分离是利用海水水体和陆地近红外波段和短波红外波段的反射率存在的较大差异来区分,获得水体掩膜。利用水体掩膜得到水体区域。

具体方法需要根据选择的遥感数据波段设置来处理,具体方法可参见参考文献<sup>[44]</sup>（周成虎,杜云艳,骆剑承.基于知识的AVHRR影像的水体自动识别方法与模型研究[J].自然灾害学报,1996,03:102-110.）。

### 5.3.6 云体识别

云体识别是利用云在可见光和红外波段与植被、土壤、雪和水域等不同下垫面的反射率和辐射亮温值存在差异来识别云,获得云掩膜,进而获得温排水排放口附近海域无云覆盖的水体区域表观辐亮度 $L$ 值。

具体方法需要根据选择的遥感数据波段设置来处理,具体方法可参见参考文献<sup>[45]</sup>（宋小宁,赵英时.MODIS图象的云检测及分析[J].中国图象图形学报,2003,09:112-116.）。

### 5.3.7 亮温提取计算和海表温度获取

亮度温度（简称亮温）是辐射出与观测物体相等的辐射能量

的黑体的温度，是可以直接被遥感器探测到的物理量。由于自然界的物体不是完全黑体，因而习惯用一个具有比该物体的真实温度低的等效黑体温度来表征物体的温度。亮度温度并非物体真实温度。获得地表海面水体辐射的辐亮度后，可以直接利用 Planck 公式计算热红外遥感数据对应的亮温。然而，在 Planck 公式中，除了温度之外，波长也是一个变量，对于热红外宽通道而言， $B(\lambda, T)$  随  $\lambda$  的变化较大，如果中心波长代替波长的变化，将造成 0.3~0.7K 左右的温度反演误差，并且这一误差随目标温度的升高而增大。本标准推荐采用查找表方法计算亮度温度，具体方法如下。

首先建立黑体温度与对应热红外通道等效辐亮度  $B_{eff}(T_i)$  的关系：

$$B_{eff}(T_i) = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} B(\lambda, T_i) f(\lambda)}{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f(\lambda)}$$

式中， $f(\lambda)$  为通道响应函数， $\lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ ，即通道响应的波长区间， $B(\lambda, T_i)$  为温度  $T_i$ 、波长  $\lambda$  的黑体辐亮度，根据下式普朗克方程计算得到：

$$B(\lambda, T_i) = \frac{c_1 / \lambda^5}{\exp(c_2 / \lambda T_i) - 1}$$

式中， $c_1 = 1.19104 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ， $c_2 = 14387.7 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

利用上式可以构建热红外通道辐亮度与温度关系查找表，通过查找表，地表辐亮度  $L(T_s)$  对应的温度值即为海表温度  $T_s$  值。

亮温提取计算参见参考文献<sup>[43]</sup>(朱利,赵利民,王桥,张爱玲等。

核电站温排水分布卫星遥感监测及验证[J].光谱学与光谱分析,2014,34(11):3079-3084.)

### 5.3.8 基准温度提取计算

#### ➤ 基本原则

核电厂温排水基准温度的提取对于最终温升区范围的大小和客观性环境评价有重要意义。为避免反演表面温度精度不准给基准提取造成不利影响,温排水基准温度以当天遥感图像反演的海表温度结果为基础,不宜采用当地地基手段实测的动力学海表温度(包括浮标测量手段和船只测量手段),当然历史平均的地基实测温度资料可作为参考。本技术规范推荐以下几种常用方法进行基准温度提取,对于同一个核电厂,遥感监测温排水基准温度提取方法需保持一致,以保证遥感监测与评价的一致性。

#### ➤ 常用方法及依据

##### (1) 离散多点平均法

基于数模结果,在温升混合区最大包络线外选取多点,利用多点遥感反演温度值的平均值作为基准温度。

##### (2) 海湾平均温度法

在海湾空间范围内,先扣除数模模拟的温升混合区,再以扣除后的海湾平均海表温度为基准温度。

##### (3) 临近区域替代方法

对于开放式海域类型,由于无法确定海湾分布范围,且远近海区域温度差别较大,可以在对历史温度数据统计的基础上,选

定不受温排水影响的最为相近的临近稳定区域,以此区域的平均温度为基准温度。

以上原则和常用方法参见参考文献<sup>[46]</sup> (朱利.基于环境1号红外相机的田湾核电站温排水遥感监测研究.第十七届中国环境遥感应用技术论坛,北京,2013,63-67)。

### 5.3.9 温升分布提取与统计

在通过遥感影像获得海表温度和基准温度之后,根据温升结果为海表实际温度减去基准温度的原理得到核电厂附近区域的温升结果与范围。

根据各级温升水体所占的像元数及影像的空间分辨率大小,计算各级温升的分布面积和所占比例。

表5 不同温升强度分级与制图规范

温升强度	温升范围	R值	G值	B值
一级温升	[+1℃, +2℃)	255	255	0
二级温升	[+2℃, +3℃)	255	0	195
三级温升	[+3℃, +4℃)	255	170	0
四级温升	[+4℃, +5℃)	255	0	0
五级及以上温升	≥5℃	115	0	0

## 5.4 温排水遥感监测产品制作

监测产品以文字、专题图及统计表格等形式表示核电厂温排水遥感监测结果。文字信息是指描述核电厂温排水卫星遥感监测结果的有关信息:包括时间、范围、卫星及传感器等。核电厂温排水专题图包括图名、图例、比例尺、核电厂温排水导致的热异常分布信息以及其他人为热分布源导致的热异常分布信息。统计表格包括核电厂温排水热异常面积总体统计分析和不同等级的

热异常面积分级统计分析，包括热异常分布的面积、面积比例、最小温度、最大温度、平均温度和标准差等信息。

产品制作参考编制单位正在开展的“核电厂温排水遥感监测”业务技术要求。

由于核电厂附近区域的人为热源不仅包括核电基地温排水，还可能包含其他人为热污染源，监测过程中常常出现几个热源产生的温升区连成片的现象，此时区分各自的贡献较为困难，因此温升区的统计基于以下两个原则：

1) 确定最大 1 度温升区范围，如有超过该温升范围的区域则不作为统计对象，该范围考虑到数模模拟的最大 1 度温升区范围，也考虑历史监测到可能温排水的温升影响范围；

2) 基于温升区影响贯通原则，如果温升分布是离散的，以最接近核电厂温排水排放口的温升分布区域为统计对象，与其离散分布的温升区不作为统计对象。

## 5.5 质量保证和质量控制

### 5.5.1 卫星数据质量控制

卫星数据的获取是对核电厂温排水进行遥感监测的基础性工作。其质量的高低直接关系到后续工作的开展和最终结果的精度。该标准主要从三个方面对卫星数据进行质量控制：

- 辐射定标系数要采用最接近卫星过境时刻发布的辐射定标系数；
- 在选取卫星数据时要选取研究区域覆盖云层较少或无云

的影像，参考原则是遥感图像云层覆盖在提取范围内不超过 5%的数据为有效数据；

- 要选取传感器正常状态下获取的数据，或者是可以减弱其影响的数据，从而避免条带的影响。

### 5.5.2 卫星数据处理质量控制

由于通常获取的卫星数据只是经过几何粗校正，不足以满足温排水卫星遥感监测的需求。因此要对获取的影像进行必要的处理，从而纠正遥感图像相对于地表目标存在的几何变形。另外云层厚薄会影响温排水监测，云掩膜的精度会影响温排水热异常分布的精度；水陆混合像元易被误判为热异常像元，所以水体掩膜准确性影响温排水监测的精度。

- 为保证卫星遥感监测结果具有一致性和可比较性，几何位置配准精度控制在 1 个像元以内；
- 提高云掩膜和水体掩膜的精度，减小云层和水陆混合像元对温排水监测的影响。

### 5.5.3 监测结果精度

为评估温排水遥感监测精度，采取海面星地同步试验测量方法进行卫星遥感监测比对与验证。利用测量水体动力学温度的仪器，测量排水口周边大范围内（包含温升混合区）水体温度，通过空间插值将海面测量离散值形成连续温度场，进而提取温排水空间范围与等级，将海面测量与遥感监测结果进行比对，分析二者结果的一致性和可靠性，采用相对误差对二者结果进行评估。

$$\text{相对误差} = \frac{S_{RS} - S_{FE}}{S_{FE}} \times 100\%$$

其中， $S_{RS}$  为遥感监测的温升总面积或各强度面积， $S_{FE}$  为海面试验测量的温升总面积或各强度面积，总面积相对误差建议控制在 15% 以内为宜。

## 6 与开题报告的差异说明

开题报告选择具体的卫星遥感数据源（如 HJ-1B 红外相机或 Landsat5 TM）为例来开展监测流程说明，这样的缺陷是限制了温排水监测的遥感数据源。修改后的标准的技术内容，不限定具体数据源，以具有热红外波段设置的数据来替代，适应范围更广。

## 7 对实施本标准的建议

通过卫星遥感开展核电厂温排水监测，获得多时相的温升分布范围，可以为核电监管部门对温排水产生的水体热异常监管提供持续的技术支持，可以对核电厂附近水域功能分区的合理性提供支持，对附近水域生物、渔业、养殖等生态保护提供管理依据，敦促核电企业通过工程措施或温排水热循环利用等手段，来降低工业排放对环境的热影响。本标准实施后，需要结合核电厂前期环评阶段开展的数模、物模结果，加强核电厂温排水实时监测和后评估工作，相关管理部门需对核电厂环保部门提出监测要求，基于本标准开展相关监测工作。下一步修订需结合本标准在具体实施中产生的技术管理问题来修改。如果核电厂从沿海发展到内

陆, 环境热影响将更大, 相关技术细节需要进一步修订。为了更好地实施本标准, 需要开展相关科研攻关, 开展各个核电厂区域的本底和基准温度研究, 开展遥感、实测与数模、物模多种手段并行的综合温排水管理机制研究。

## 8 参考文献

- 
- [1] 《中华人民共和国水污染防治法》(2017年修订版)
  - [2] 《中华人民共和国海洋环境保护法》(主席令第26号)
  - [3] 《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)
  - [4] 《海水水质标准》(GB 3097-1997)
  - [5] 《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)
  - [6] 《农田灌溉水质标准》(GB5084-2005)
  - [7] McClain, E.P., et al., Multi-channel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures [J]. *Advances in Space Research*, 1982. 2(6): 43-47.
  - [8] P. J. Minnett, O. B. Brown, et al. Sea-surface temperature measurements from the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on Aqua and Terra[J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, 9: 20-2.
  - [9] 《热红外遥感》(电子工业出版社, 2006, 田国良等, 第12-21页)
  - [10] Qin, Z., Karnieli, A., Berline, P., A mono-window algorithm for retrieving Land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001(22):3719-3746.
  - [11] Jiménez-Munoz, J. & Sobrino, J., A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003(108):4688-4695.
  - [12] Carson T N; Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J] 1997(03) doi:10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
  - [13] JIM NEZ-MU OZ JC, CRISTOBAL J, SOBRINO JA, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 339—349.
  - [14] 覃志豪, LI Wen juan, Zhang Ming hua 等. 单窗算法的大气参数估计方法. *国土资源遥感*, 2003, 6, 2.
  - [15] 邢前国, 陈楚群, 施平. 利用 Landsat 数据反演近岸海水表层温度的大气校正算法[J]. *海洋学报*, 2007, 29(3): 25-26.
  - [16] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. *国土资源遥感*. 2004, (3): 28~32.
  - [17] Jing Yu, Dan ling Tang, Li jun Yao. Long-Term Water Temperature Variations in Daya Bay, China Using Satellite and In Situ Observations. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2010.5, 21(2).
  - [18] 周纪, 李京, 赵祥等. 用 HJ-1B 卫星数据反演地表温度的修正单通道算法[J]. *红外与毫米波学报*. 2011, 30(1): 61-67.
  - [19] 梁珊珊, 张兵, 李俊生等. 环境一号卫星热红外数据监测核电站温排水分布—以大亚湾为例[J]. *遥感应用*. 2012(2): 41-46.
  - [20] DUAN Si-Bo, YAN Guang-Jian, QIAN Yong-Gang, et al. Two single-channel algorithms for retrieving land surface temperature from the simulated HJ-1B data[J]. *Progress in Natural Science*(段四波, 阎广建, 钱永刚, 等. 利用 HJ-1B 模拟数据反演地表温度的两种单通道算法. *自然科学进展*), 2008, 18(9): 1001—8001.

- [21] Tang D L, Kester D R, Wang Z D, et al. AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China [J]. China Remote Sensing of Environment, 2003, 84: 506-515.
- [22] 吴传庆, 王桥等. 利用 TM 影像监测和评价大亚湾温排水热污染[J]. 中国环境监测, 2006, 22(3): 80-84.
- [23] 梁春利, 李明松. 不同潮汐状况下的核电站近岸温度场航空遥感测量研究[J]. 中国核科学技术进展报告(第一卷). 2011, 01: 189~193.
- [24] 周颖, 巩彩兰, 匡定波等. 基于环境减灾卫星热红外波段数据研究核电厂温排水分布[J]. 红外与毫米波学报. 2012, 31(6): 544-549.
- [25] 朱利, 吴传庆等. 基于环境一号红外相机的田湾核电站温排水遥感监测[J]. 中国环境科学, 2012, 32(S1): 62~67.
- [26] 张彩, 朱利, 贾祥等. 不同空间分辨率热红外数据在近海核电厂温排水监测一致性研究. 遥感信息. 2015; 30(02): 71-6.
- [27] 张晓峰, 徐京萍, 张曼祺等. Landsat-8 热红外数据监测田湾核电站温排水分布. 海洋科学进展. 2019; 37(03): 518-25.
- [28] 王祥, 苏岫, 张浩等. 不同空间分辨率遥感数据在核电站温排水监测中的应用研究. 海洋环境科学. 2020; 39(04): 646-51.
- [29] GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语
- [30] 《卫星术语》(GJB 421A-97)
- [31] GB/T 14848-93 地下水环境质量标准
- [32] GB17378-2007 海洋监测规范
- [33] GB 15968-2008 遥感影像平面图制作规范
- [34] GJB 2700-96 卫星遥感器术语
- [35] GB/T 17798-2007 地理空间数据交换格式
- [36] DZ/T 0143-1994 卫星遥感图像产品质量控制规范
- [37] HY/T 147.7-2013 海洋监测技术规程 第 7 部分: 卫星遥感技术方法
- [38] HJ 610-2011 环境影响评价技术导则-地下水环境
- [39] 《中华人民共和国环境保护法》(主席令第 22 号)
- [40] 《中华人民共和国环境影响评价法》(主席令第 77 号)
- [41] 《遥感物理》(北京大学出版社, 2005, 徐希孺, 第 389 页)
- [42] 《海洋科学导论》(高等教育出版社, 1999, 冯士筭等, 第 405 页)
- [43] 朱利, 赵利民, 王桥, 张爱玲等. 核电站温排水分布卫星遥感监测及验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 3079-3084.
- [44] 周成虎, 杜云艳, 骆剑承. 基于知识的 AVHRR 影像的水体自动识别方法与模型研究[J]. 自然灾害学报, 1996, 03: 102-110.
- [45] 宋小宁, 赵英时. MODIS 图象的云检测及分析[J]. 中国图象图形学报, 2003, 09: 112-116.
- [46] 朱利. 基于环境 1 号红外相机的田湾核电站温排水遥感监测研究. 第十七届中国环境遥感应用技术论坛, 北京, 2013, 63-67.
- [47] SOBRINO J A, JIM NEZ-MUOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90: 434—440.
- [48] 陈良富, 徐希孺. 热红外遥感中大气下行辐射效应的一种近似计算与误差估计. 遥感学报, 1999, 8, 3(3).
- [49] 吕海滨, 周立, 陈丽. 国内温排水研究进展[J]. 水利科技与经济. 2012, 18(9): 1-3.
- [50] 孙恋君, 王凤英, 朱晓翔. 田湾核电站温排水环境影响遥感调查[J]. 中国辐射卫生. 2011, 20(3): 330-332.
- [51] 赵利民, 余涛, 田庆久等. HJ-1B 热红外遥感数据陆表温度反演误差分析[J]. 光谱学与光谱分析. 2010; 30(12): 3359-3362.
- [52] 朱利, 顾行发, 王桥等. 我国东海海面温度定量遥感反演研究. 遥感技术与应用. 2008, 10.
- [53] 陈文召, 李光明, 徐竟成等. 水环境遥感监测技术的应用研究进展[J]. 中国环境监测. 2008, 24(6): 6-11.
- [54] 王坚. 卫星遥感技术用于水体热污染监测的方法研究[J]. 中国西部科技. 2005, 5: 50 -51.

- 
- [55] 朱晓翔,刘建琳,王凤英.核电站温排水环境影响研究方法调查评价[J].电力科技与环保.2010,26(1):8-10.
- [56] ALBERT P, BENNARTZ R, PREUSKER R, et al. Re-mote sensing of atmospheric water vapor using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J].Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2005,22:309—314.
- [57] KERN A, BARTHOLY J, BORB S E, et al. Estimation of vertically integrated water vapor in Hungary using MODIS imagery[J]. Advances in Space Research, 2008,41: 1933—1945.
- [58] WAN ZM, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data [J].Remote Sensing of Environment,2002,83: 163—180.
- [59] WAN ZM. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products [J].Remote Sensing of Environment,2008,112: 59—74.
- [60] J.A. Barsi, J.L. Barker, J.R. Schott. “An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument.” IGARSS03, 21-25 July 2003, Centre de Congres Pierre Baudis, Toulouse, France.