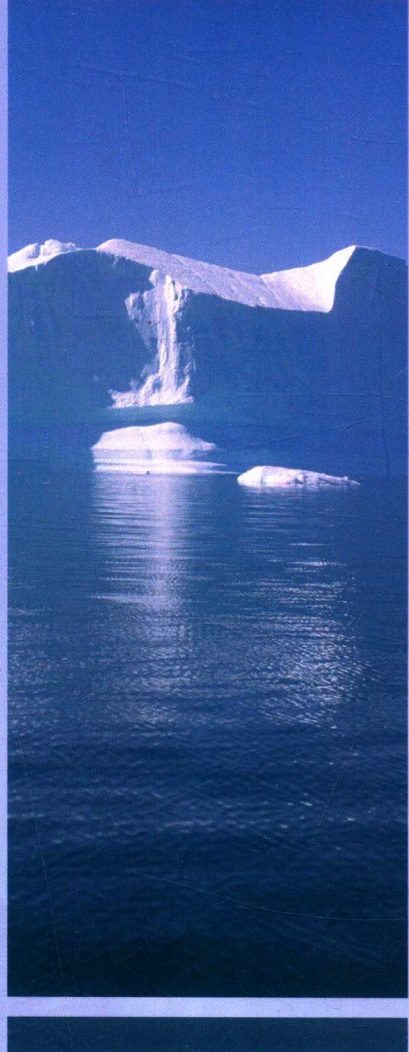




OCEAN

海洋环境分析 监测技术

陈令新 王巧宁 孙西艳 等 编著



科学出版社

本书由以下项目资助

- 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) “热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响” 子课题 “牟平海洋牧场生态安全 and 环境保障” (XDA11020702)
- 科学技术部科技基础性工作专项 “我国典型潮间带沉积物本底及质量调查与图集编研” (2014FY210600)
- 国家海洋局北海分局 “渤海中部公共海域沉积物现场微生物修复项目” (QDZC20150420-002)

海洋环境分析监测技术

陈令新 王巧宁 孙西艳 等 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了海洋环境分析监测领域的相关仪器、方法、技术及发展动态。全书主要包括七个部分：对海洋环境监测的定义、对象、类型和发展趋势进行概述；介绍海洋常规环境，包括针对水文气象、营养盐和叶绿素等的监测技术；介绍海洋典型污染物，包括针对典型重金属、有机物、赤潮毒素和油类的分析监测技术；介绍环境总毒性的生物可视化分析与新型污染物分析监测技术；介绍现代海洋环境立体监测体系的构成与平台，包括立体监测集成系统的基本组成，多元化的监测平台及数据与信息服务网络建设等，以及国内外生态环境立体监测系统；介绍海洋环境业务化的分析监测方案；针对我国未来海洋环境分析监测所面临的挑战，给出了相应的解决思路和建议。

本书可作为高等院校和科研院所环境科学、海洋科学、环境分析监测等领域的本科生、研究生及科研人员的教学参考书，也可供从事海洋环境分析监测领域管理人员和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋环境分析监测技术 / 陈令新等编著. —北京：科学出版社，
2018.5

ISBN 978-7-03-054684-5

I. ①海… II. ①陈… III. ①海洋环境-环境监测 IV. ①X834

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 240236 号

责任编辑：周 杰 / 责任校对：彭 涛

责任印制：张 伟 / 封面设计：铭轩堂

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张：28 3/4

字数：700 000

定价：228.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

编委会名单

主 编：陈令新 王巧宁 孙西艳

编 委：（按姓氏拼音排序）

陈令新	陈权文	付龙文	纪殿盛	纪 灵
姜军成	吕 敏	孙西艳	王 刚	王 娟
王巧宁	王莎莎	王晓艳	王欣然	温国义
吴夏青	吴宜轩	吴园园	夏春雷	赵玉慧
周 娜				

前 言

2008 年底,我应聘到中国科学院烟台海岸带研究所工作。该研究所属于资源环境领域的中国科学院系列研究机构。我的这个选择注定要从事环境科学与工程领域的研究。根据研究所的学科布局以及自己的学科背景,于 2009 年初组建了“环境分析监测理论与技术”研究团队,主要开展海洋环境分析监测理论研究与工程技术研发。近年来,国际环境分析监测开始向高灵敏度、高选择性、简便快速、现场实时分析监测方向发展,海洋环境分析监测以发展低功耗小型化海洋生物/化学传感器,能够实现生态环境现场、原位、实时、快速测量的技术为主流方向,并进一步向集成化立体分析监测/观测系统方向发展。如何适应这一发展态势,把握国家战略需求?如何有针对性的创新,解决分析监测的瓶颈问题?如何抓住机遇,开展基础性、战略性和前瞻性研究,成为本人及研究团队必须思考面对的问题。在中国科学院“百人计划”项目、国家自然科学基金项目等的资助下,充分调研现代环境分析监测科技发展态势后,经过思考和探索,我们提出了针对海岸带生态环境分析监测整体思路——利用纳米技术/生物材料和光、电、磁等现代物理的探测技术,发展创新的分析监测原理、方法及仪器装置。在团队同仁的集体努力下,取得了一系列创新性研究成果。可用于实时、在线分析监测仪器和海洋生态环境多参数的在线监测系统就是其中之一。

针对河口、海岸带和近海海洋复杂的分析对象,如何简单快速、灵敏度高、选择性好地分析监测环境(水体如淡水、海水,沉积物和土壤等)有毒有害污染物(重金属、持久性有机污染物、石油类污染物、病原体等)以及各类生源要素,我们做了很多前瞻性、基础性和应用性探索。例如,以海水等基质中高毒性、难降解重金属、典型有机污染物等为主要分析对象,借助贵金属纳米粒子、荧光量子点等具有光学特性的功能化纳米材料,研究其纳米界面反应原理及传感调控机制,发展了基于材料界面的分析传感应用,结合光学探测,建立了典型污染物简单快速、灵敏、特异性纳米光学[比色、紫外-可见、荧光和表面增强拉曼散射(SERS)等]分析检测方法。目前,该类相关研究已结集由科学出版社出版,即《纳米分析方法与技术》一书。对于海洋生态环境分析监测,我们的研发工作尚显肤浅。在海洋领域,多年来我们积极思考,有一些认知,在此梳理出来,与大家分享思路,为真正关心海洋生态环境分析监测的仁人志士提供一定参考。在此,我们结合研

究团队一些研发工作及国内外相关研究成果，系统介绍了海洋环境分析监测领域的相关技术及发展动态。

全书主要包括七部分：第一部分，主要对海洋环境监测的定义、对象、类型和发展趋势进行概述；第二部分，主要介绍海洋常规环境，包括针对水文气象、营养盐和叶绿素等的监测技术；第三部分，主要介绍海洋典型污染物，包括针对典型重金属、有机物、赤潮毒素和油类的分析监测技术；第四部分，主要介绍环境总毒性的生物可视化分析与新型污染物分析监测技术；第五部分，重点介绍现代海洋环境立体监测体系的构成与平台，包括立体监测集成系统的基本组成，多元化的监测平台（如天基、海基、岸基等）及数据与信息服务网络建设等以及国内外生态环境立体监测系统；第六部分，主要介绍海洋环境业务化的分析监测方案；第七部分，针对我国未来海洋环境分析监测所面临的挑战，给出了相应的解决思路与建议。本书由我策划、统稿和定稿。作者主要包括：中国科学院烟台海岸带研究所——陈令新、王巧宁、孙西艳、付龙文、吕敏、吴夏青、夏春雷、王欣然、周娜、王刚、吴宜轩、王莎莎和王晓艳等，多数是“环境分析监测理论与技术”团队成员；国家海洋局烟台海洋环境监测中心站——纪灵、姜军成、纪殿盛、吴园园和陈权文；国家海洋局北海环境监测中心——温国义、赵玉慧、王娟。本书内容包括海洋环境监测概况、海洋常规生态环境分析监测、海洋典型污染物分析监测、环境总毒性与新型污染物分析监测、海洋环境立体监测系统、海洋环境业务化分析监测以及展望与挑战七部分共 14 章。各章的分工协作如下：前言，陈令新；第 1 章，吴夏青、王巧宁；第 2~5 章及第 8 章，王巧宁、孙西艳、陈令新；第 6 章，吴夏青、王欣然；第 7 章，王刚，吴夏青、王欣然、陈令新；第 9 章，夏春雷、付龙文；第 10 章，吕敏、王巧宁、周娜；第 11 章及第 12 章，孙西艳、付文龙、温国义、赵玉慧、王娟；第 13 章，纪灵、姜军成、纪殿盛、吴园园、陈权文；第 14 章，陈令新、王巧宁；校对：王晓艳、王巧宁、陈令新。

与国内外已出版的同类书籍比较，本书主要侧重技术介绍，针对海洋环境分析监测的主要对象，分别详细介绍了实验室分析监测方法、原位在线监测方法、自动监测方法，分析不同监测方法的优缺点及其在现代海洋生态环境监测中的应用，既从微观（针对不同分析监测对象）方面，也从宏观方面（海洋立体监测）进行了综述。采用从海洋分析监测的对象、类型、发展等内容递进式合理安排本书结构。因此本书兼具海洋分析监测的工具书和现代海洋分析监测先进技术指导书于一体的海洋环境监测领域书籍。该书对海洋环境监测方法的探索、监测仪器的研制和立体监测系统的构建都具有重要的指导意义，对我国海洋环境监测事业的发展具有推动作用。海洋环境分析监测是国家“海洋强国”建设的重要组成部分。国家对海洋生态环境的高度重视，将促进海洋环境分析监测领域的飞速发展。同时，国外海洋环境分析监测仪器技术与产品的大量涌入，给国内科研人员带来了巨大的压力与冲击。我们希望通过本书的出版发行，能够使分析监测人员与科研人员及时

了解国内外分析与监测动态，有助于相关研发，也有助于高等院校和科研院所的海洋学院相关专业的建设和发展。

本书得到了中国科学院战略性先导科技专项（A类）“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”子课题“牟平海洋牧场生态安全 and 环境保护”（XDA11020702）、科学技术部科技基础性工作专项“我国典型潮间带沉积物本底及质量调查与图集编研”（2014FY210600）、国家海洋局北海分局“渤海中部公共海域沉积物现场微生物修复项目”（QDZC20150420-002）等项目资助，集中国科学院烟台海岸带研究所、国家海洋局烟台海洋环境监测中心站、国家海洋局北海环境监测中心相关专家的力量，共同编写，我对他们辛勤的付出表示诚挚的谢意！同时，感谢所有关心本书成书和出版的同事、同学的支持和帮助。限于著者的专业水平和知识范围，疏漏和不妥之处在所难免，恳请广大读者和同仁不吝指正。

陈令新

2018 年春于烟台

目 录

第一部分 海洋环境监测概况

第1章 海洋环境监测概况	3
1.1 海洋环境监测的定义	3
1.1.1 环境监测	3
1.1.2 海洋观测	4
1.1.3 海洋环境监测	4
1.2 海洋环境监测的对象	4
1.2.1 海洋水文气象参数	4
1.2.2 海洋物理化学参数	5
1.2.3 海洋生物参数	5
1.2.4 海洋放射性参数	6
1.3 海洋环境监测的类型	6
1.4 海洋环境监测的发展	7
1.4.1 国际海洋环境监测发展简介	7
1.4.2 传感器技术在海洋环境监测中的应用	12
1.4.3 我国海洋环境监测发展简介	16
1.4.4 海洋环境监测发展趋势	21
参考文献	24

第二部分 海洋常规生态环境分析监测

第2章 海洋水文气象监测	29
2.1 海洋气象监测	29
2.1.1 常规监测方法	31
2.1.2 浮标/潜标风速风向监测	32
2.1.3 卫星风速风向监测	32
2.2 海洋水文监测	33
2.2.1 温、盐、深监测	33
2.2.2 溶解氧/pH/浊度监测	37
2.2.3 潮汐/波浪/海流监测	41
2.3 海洋水文气象监测发展趋势	43
参考文献	45

第3章 营养盐分析监测	46
3.1 氮的分析检测	47
3.1.1 比色法	48
3.1.2 分光光度法	48
3.1.3 改进的分光光度法	51
3.1.4 紫外光谱法	56
3.1.5 发光分析法	57
3.1.6 色谱法	62
3.1.7 电化学法	64
3.1.8 生物传感器	68
3.2 磷的分析监测	71
3.2.1 分光光度法	71
3.2.2 改进的分光光度法	72
3.2.3 发光分析法-荧光法	73
3.2.4 电化学法	74
3.2.5 色谱法	75
3.3 硅的分析监测	76
3.3.1 分光光度法	77
3.3.2 离子色谱法	77
3.3.3 电化学法	78
3.4 营养盐同时在线分析监测	78
3.4.1 流动注射分析	79
3.4.2 微流体技术	80
3.4.3 营养盐原位分析仪	80
参考文献	83
第4章 叶绿素分析监测	89
4.1 实验室分析方法	89
4.1.1 光谱法	89
4.1.2 色谱法	92
4.2 现场连续监测	96
4.3 遥感法	98
4.3.1 叶绿素机载激光荧光雷达监测系统	99
4.3.2 叶绿素卫星遥感监测系统	101
参考文献	105

第三部分 海洋典型污染物分析监测

第5章 重金属分析监测	111
5.1 光学法	113

5.1.1	原子吸收分光光度法	113
5.1.2	原子荧光分光光度法	116
5.1.3	原子发射光谱法	117
5.1.4	分光光度法	118
5.1.5	改进的分光光度法	124
5.1.6	化学发光分析法	127
5.2	电化学监测方法	130
5.2.1	溶出伏安法	131
5.2.2	化学修饰电极	136
5.2.3	电位分析法	138
5.3	电感耦合等离子体质谱法	141
5.4	生物监测方法	143
5.4.1	重金属监测指示生物	144
5.4.2	现代生物方法在重金属监测中的应用	149
5.5	重金属快速在线分析监测	154
	参考文献	154
第6章	有机污染分析监测	164
6.1	有机污染物	164
6.1.1	种类与特点	164
6.1.2	污染形式	165
6.1.3	危害	167
6.2	色谱法	167
6.2.1	原理与特点	168
6.2.2	分类	168
6.3	有机质谱法	172
6.3.1	与 GC 联用	173
6.3.2	与 LC 联用	174
6.4	光谱法	175
6.4.1	荧光分析法	175
6.4.2	分光光度法	177
6.4.3	表面增强拉曼光谱法	178
6.4.4	其他分析法	180
6.5	生物毒性检测	180
6.5.1	作用机理影响因素	181
6.5.2	检测类型	183
	参考文献	184
第7章	油类污染分析监测	187
7.1	油类污染简介	187

7.1.1 类型及来源	187
7.1.2 油污特点	188
7.1.3 污染影响机制	189
7.1.4 危害	190
7.2 化学监测法	191
7.2.1 重量法	192
7.2.2 光学法	192
7.2.3 其他分析法	197
7.2.4 测定方法比较	199
7.3 遥感法	199
7.3.1 基本计算方法	200
7.3.2 遥感分析类型	201
7.4 溢油量评估法	204
7.5 应急监测与处理	206
7.6 生物修复法	207
7.7 溢油鉴定与事故防止	209
参考文献	210
第8章 赤潮毒素分析监测技术	213
8.1 赤潮毒素简介	213
8.2 生物毒性法	221
8.2.1 传统生物检测法	221
8.2.2 免疫学检测法	223
8.2.3 细胞毒性检测法	227
8.2.4 神经受体结合检测法	229
8.3 化学分析法	229
8.3.1 高效液相色谱-紫外检测法	229
8.3.2 高效液相色谱-荧光检测法	230
8.3.3 高效液相色谱-质谱检测法	230
8.4 赤潮毒素传感器	231
8.4.1 细胞传感器	231
8.4.2 免疫传感器	232
8.4.3 表面等离子体共振传感器	232
8.5 海洋赤潮毒素监测系统	233
参考文献	233

第四部分 环境总毒性与新型污染物分析监测

第9章 环境总毒素的生物监测方法	239
9.1 在线生物监测	239

9.2 个体行为分析监测技术	239
9.2.1 二维行为跟踪技术	240
9.2.2 三维多目标行为跟踪	246
9.2.3 应用实例	248
9.3 浮游藻类的自动鉴别技术	249
9.3.1 浮游藻类的检测方法	249
9.3.2 浮游藻类检测装置	251
9.3.3 浮游植物图像的自动识别技术	254
9.4 基于行为的环境总毒素的分析方法	255
9.4.1 水生生物的行为数据分析	255
9.4.2 数学及计算分析方法的研究	256
参考文献	259
第10章 新兴污染监测	261
10.1 抗生素和抗性基因污染监测	261
10.1.1 抗生素概述	261
10.1.2 抗性基因概述	269
10.1.3 抗生素检测方法	274
10.1.4 抗性基因污染监测	276
10.2 纳米颗粒污染监测	281
10.2.1 概述	281
10.2.2 纳米污染检测方法	285
10.2.3 纳米检测方法展望	295
10.3 放射性污染分析监测	296
10.3.1 概述	296
10.3.2 放射性污染检测方法	298
10.3.3 海洋放射性检测展望	301
10.4 复合污染分析监测	301
10.4.1 概述	301
10.4.2 复合污染的检测技术及展望	303
参考文献	303

第五部分 海洋环境立体监测系统

第11章 海洋环境立体监测系统	315
11.1 海洋环境立体监测系统概念	316
11.2 海洋环境立体监测系统基本组成	316
11.3 海洋立体监测平台建设及集成技术	318
11.3.1 天基海洋环境监测平台	318
11.3.2 空基海洋环境监测平台	325

11.3.3 岸基海洋环境监测平台	327
11.3.4 海基海洋环境监测平台	331
11.3.5 海底海洋环境监测平台	338
11.4 数据与信息服务系统建设	358
11.4.1 数据通信与管理	360
11.4.2 数据处理与信息服务	363
参考文献	365
第12章 国内外海洋立体监测系统介绍	371
12.1 全球海洋观测系统 (GOOS) 计划	371
12.2 全球海洋实时观测网 (Argo)	374
12.3 美国近海海洋观测实验室 (COOL)	375
12.4 加拿大“海王星”海底观测网	377
参考文献	381

第六部分 海洋环境业务化分析监测

第13章 我国海洋生态环境的业务化监测	385
13.1 我国海洋环境业务化监测概述	385
13.1.1 海洋环境业务化监测历史沿革	385
13.1.2 海洋环境业务化监测的特点及分类	388
13.1.3 海洋环境业务化监测的目的	389
13.2 我国海洋环境业务化监测工作方案	392
13.2.1 业务化监测工作方案的编制	392
13.2.2 指导思想及总体目标	392
13.2.3 业务化监测工作内容	393
13.3 海洋环境业务化监测的流程	404
13.3.1 业务化监测调查工作	404
13.3.2 业务化监测实验分析工作	413
13.4 海洋环境业务化监测全过程质量控制	424
13.4.1 样品采集前的准备工作	424
13.4.2 样品采集过程的质量控制	426
13.4.3 样品的储存与运输的质量控制	429
13.4.4 实验室分析质量控制	430
13.5 我国海洋环境业务化监测网络体系建设	432
13.5.1 我国海洋环境业务化监测网络体系现状	432
13.5.2 业务化监测网络体系发展需求及总体思路	433
参考文献	435

结语 展望与挑战

第14章 海洋环境分析监测展望与挑战	439
索引	444

第一部分

海洋环境监测概况

| 第 1 章 | 海洋环境监测概况

第三次科技革命以来,科学技术迅猛发展,全球经济飞速提升,人类对各种资源的需求不断增加,经过上百年的过度开发,陆地资源日益匮乏,而不断增长的人口对资源的需求却永无止境。资源危机越来越严重,未来发展唯一的出路便是海洋。海洋约占地球表面积的 71%,含有超过 $1.35 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 的水,海洋中蕴含了丰富的矿产资源、能源资源和各种生物资源等。人类经济社会要可持续的发展和增长,唯有从陆地经济向海洋经济转型。20 世纪,人们已经对海洋进行了一定程度的探测与开发,但海洋对人类来说仍然是陌生的。目前已探索的海底只有 5%,还有 95% 的海底对人类来说依旧神秘。要想真正了解海洋、利用海洋,必须继续加大海洋科技的研究与发展,当务之急便是加大对海洋的观测、探测力度,以便让巨大的海洋资源能够为人类所用。

目前人类对海洋的开发大部分集中在近岸水体,如水产养殖、石油开采、港口建设等。它们在给人们带来大量资源和巨大经济效益的同时,也带来了一系列的海洋污染问题。加之大量的生活生产废水、固废大量倾倒入海洋,近海海洋生态环境日益恶化,近海富营养化加剧,赤潮频发,石油泄漏时有发生,各种金属污染和水产养殖污染日益严重,海洋的自净能力远不足以净化所有污染物,部分海域生境退化,生物多样性大大降低。这种竭泽而渔的做法严重影响人类社会的可持续发展。人类在开发海洋的同时,更应该注重海洋的保护,而海洋保护离不开海洋环境监测技术。可以说海洋监测是海洋事业的基础,通过海洋环境监测能够全面、及时、准确地掌握海洋环境的变化规律及人类活动对海洋环境的影响,为海洋的开发、管理和保护提供科学依据和技术支撑。海洋环境监测是海洋环境预测预报、减灾防灾的基础工作,是预防和改善海洋环境污染的有效手段,同时也是海洋资源开发的技术支撑。只有做好海洋环境监测工作,切实保护好关乎人类未来的海洋,才能真正做到人类社会的可持续发展。

1.1 海洋环境监测的定义

1.1.1 环境监测

环境监测 (environmental monitoring) 是通过对影响环境质量因素的代表值的测定,确定环境质量 (或污染程度) 及其变化趋势 (奚旦立, 2004)。环境监测发展初期,主要是针对污染进行监测,但随着工业污染的加重以及监测技术的提高,现代环境监测不仅对环境污染和环境质量进行监测,同时也涉及对生物和生态的监测。

1.1.2 海洋观测

海洋观测 (marine observation) 是指利用各种仪器设备直接或间接地对海洋的物理、化学、生物学、地质学、地貌学、气象学及其他海洋状况进行观测,为海洋环境保护、海洋资源探索、海洋经济发展、防灾减灾、国防安全等提供可靠的数据。海洋观测基本可以分为三类:海洋气象观测、海洋水文水质观测和海底观测。

1.1.3 海洋环境监测

我国《海洋监测规范》(GB/T 17378.1—2007)对海洋环境监测 (marine monitoring) 做了如下定义:在设计好的时间和空间内,使用统一的、可比的采样和检测手段,获取海洋环境质量要素和陆源性入海物质资料,以阐明其时空分布,变化规律及其与海洋开发、利用和保护关系的全过程。国家标准中定义的海 洋环境监测主要是针对海洋环境质量及污染物的监测,随着海洋环境污染的加重及人们对环境特别是海洋环境保护重视程度的不断提高,海洋环境监测的定义需要与时俱进,加大海洋生态平衡和海洋灾害等方面的监测力度,以切实保护好海洋环境,使海洋经济能够实现可持续发展。

1.2 海洋环境监测的对象

海洋环境监测常规监测主要包括海洋气象观测、海水分析、沉积物分析和生物监测四大部分,目的是对海洋环境质量及污染状况做出准确判断,但随着海洋污染的加重,海洋监测的对象也在不断增加,如赤潮毒素、油污污染和放射性污染的监测受到了越来越多的关注。表 1-1 所示是现代海洋监测较常见的监测对象。

表 1-1 现代海洋环境监测的监测对象

参数	监测对象
海洋水文气象参数	透明度、风速、方向、气压、气温、水温、流速、流向、波浪等
海洋物理化学参数	pH、溶解氧、生化耗氧量、重金属、油类、有机污染物、营养盐等
海洋生物参数	叶绿素 a、浮游及底栖生物多样性、赤潮毒素等
海洋放射性参数	³ H、 ¹⁴ C、 ⁹⁰ Sr、 ¹²⁹ I、 ¹³⁷ Cs 和 ²³⁹ Pu、 ²⁴⁰ Pu、 ²⁴¹ Pu 等

1.2.1 海洋水文气象参数

海洋水文气象监测是海洋监测中的重要环节。海洋水文气象监测最直观的作用便是进行海洋气候、海洋灾害预报。海洋气候的变化会直接影响海水养殖、海岸工程建设及海上