



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

海洋水团分析

李凤岐 苏育嵩 编著

青 岛 海 洋 大 学 出 版 社
QINGDAO OCEAN UNIVERSITY PRESS

6

面向 21 世纪 课程教材
Textbook Series for 21st Century

海洋水团分析

李凤岐 苏育嵩 编著

青岛海洋大学出版社
Qingdao Ocean University Press

内 容 简 介

本书被列入“面向 21 世纪课程教材”。全书共分十二章,系统地阐述了海洋水团的有关基本概念、主要分析方法与重要研究成果。第一章讲述海洋水团、水型和水系的有关基本概念及原理。第二章介绍与海洋水团密切相关的海洋环流、海洋锋、中尺度涡、跃层和细微结构等知识。第三章至第十章系统讲解了水团划分、分析及预报的主要方法。如:定性的综合分析法,浓度混合分析法,温-盐图解统计分析法,分割法,聚类分析法,判别分析法,正交分解分析法和模糊数学方法。第十一章介绍世界大洋各洋区的环流系统与特征,对世界大洋各洋区主要水团的特征、形成及变性研究的成果进行了系统的综述概括。第十二章分别描述了中国近海各海区的环流概况与特征,系统地总结了对各海区主要水团的形成机理、典型特征和变性过程研究的成果。

本书可作为海洋科学类专业的本科生和研究生的教材,亦可作为相近或有关专业的教学参考用书。对于从事相近专业或有关的科技人员和管理人员,以及有意了解世界大洋或中国近海环流与水团分布、变化和特征的有关人员,也有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

海洋水团分析/李凤岐,苏育嵩编著. -青岛:青岛海洋大学出版社,
1999. 12
ISBN 7-81067-100-6

I. 海… II. ①李… ②苏… III. 海水-水团-分析 IV. P731.16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 49952 号

青岛海洋大学出版社出版发行
(青岛市鱼山路 5 号 邮政编码:266003)

出版人:李学伦

日照日报社印刷厂印刷

新华书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16 印张:25.75 字数:490 千字

2000 年 11 月第 1 版 2001 年 2 月第 2 次印刷

印数:1 101~2 100 定价:40.00 元

序

海洋水团是物理海洋学最早研究的对象之一。由于它与海洋学的基本问题——海洋环流相辅相成从不同方面反映了海洋水体的特征与运动,故在近代物理海洋学的一些重要著作中,多给予较多的篇幅。海洋水团又与海洋渔场、海水养殖、海洋气象和气候变化以及海洋军事活动有密切关系,因而在现代物理海洋学研究中,海洋水团分析不仅仍然充满活力,而且不断扩大其研究的领域。

我国的海洋学家对中国近海和浅海的水团,进行了相当深入地分析研究。对于水团的定义和相关的基本概念与理论,进行了深入地探讨,提出了一些创新性的观点;在分析方法方面,将多元统计分析和模糊数学方法进行了系统地改进与应用,获得了相当多的新成果;针对浅海水团的形成、变性和生消过程,进行了多方面的研究,总结了它们的规律和特点;关于变性水团隶属函数的建立和水团变性的模糊数学分析,表现出鲜明的特色。通过多年的研究积累,从水团的概念、定义到理论和分析方法,已逐渐形成了自己的体系;应用这些理论和方法对中国近海水团分析研究,业已取得了系统的成果。

作者多年从事这方面的教学和科研工作,成果丰硕,《海洋水团分析》一书即为其部分教学经验和科研成果的总结。书中阐述了水团有关的基本概念和理论,系统介绍了主要的分析方法,总结了国内外的重要研究成果,且有对问题的商榷和动态的展望。如此专门论述海洋水团的基本理论、主要方法和研究成果并系统集成于一书者,当属国内、外正式出版的第一部。尤其第十章系统介绍水团分析的模糊数学方法,更有新颖的特色;第十一章关于世界大洋环流和水团的综述以及第十二章对中国近海环流和水团的分析,内容系统,资料丰富,条理清楚,论点分明,是为力作。对海洋科学类专业的本科学生和研究生而言,是很好的教材;对相近专业的科技工作者与从事管理的干部,也很有参考价值。

文圣常
2000年10月

前 言

作者多年来一直为海洋系学生讲授“海洋水团分析”课,几易讲稿遂成本书。在即将付梓之际,我们更加感怀赫崇本教授的培育与重托。是赫老,首开我国海洋水团分析之先河,发表了我国第一篇海洋水团分析的论文;也是赫老,力主在海洋系开设有关海洋水团分析的课程。

1964~1965年,徐斯在海洋系开出了“海况分析”课,并编写了相应的讲义。70年代(本书涉及到的年代,除特别指出外,均系20世纪××年代),苏育嵩接任该课程,做了重大改动,重新编写了《海况分析及预报》讲义。此后,李凤岐接任,改编为《水团分析及预报》。80年代教学计划调整,由李凤岐讲授“海洋水团分析”,并编写了《海洋水团分析》讲义,形成了本书的基本框架。后来又为研究生开设“海洋水团分析专题”讲座,收集了更多的资料。积上述多年教学之经验,以及完成国家自然科学基金资助项目研究的成果,写成现今的《海洋水团分析》一书,权且作为对赫老遗愿的一份答卷,也算是对21世纪——海洋世纪的献礼。

海洋水团分析是物理海洋学的重要内容之一,它与物理海洋学研究的核心——海洋环流有着极为密切的关系。海洋水团分析又是物理海洋学最早涉足的研究领域,它可以一直上溯至18世纪关于“湾流水”的分析。海洋水团分析更是经济与军事部门关注的领域,因为它对水产养殖、海洋捕捞、水声通讯和海军活动有着重要的影响。正是由于上述原因,就使得有关海洋水团分析的文献浩如烟海。面对如此的现实,我们在本书内容的编排以及参考文献的选录方面倍感棘手,但受教学计划及篇幅所限,又不得不大幅度压缩,故现在奉献于读者面前的内容,可能过多地反映了作者的取舍意向。当然,我们主观上还想力求做到:讲清基本的概念,介绍重要的方法,总结主要的成果,附录必要的文献。为此,在第一章较详细地阐述了海洋水团的基本概念,第二章简述了与水团分析紧密联系的环流、跃层等内容,第三章至第十章介绍了海洋水团分析的重要方法,其中第十章模糊数学方法反映了我国海洋水团分析的明显特色。由于先行课程教学进度与内容的限制,其中有些内容可能暂时不太适合于本科阶段学习,但作为了解学

科发展趋势与动向是有必要介绍的,况且也可以放在研究生阶段再深入去研读。第十一章介绍了世界大洋水团与环流研究的主要成果;其中关于世界大洋环流概况的介绍,着重于成果与现象的综述性描绘,因为这是从事海洋水团分析需要的背景知识和赖以佐证的有用的资料,相对而言对大洋环流理论与机制则基本没有介绍,因为那是“大洋环流”课程的任务。第十二章综述了我国近海水团、环流研究的基本情况以及最新成果,其中有些就是我们完成国家自然科学基金资助项目——渤、黄、东海水团分布模式研究(编号 49176249)的成果。

本书可作为海洋学专业的本科生和研究生的教材,也可作为相近专业的教学参考用书。对从事有关海洋科研、教学和管理及有意涉猎本领域的人员,也能提供有用的参考。

本书的出版获得青岛海洋大学教材出版基金资助,海洋环境学院和海洋系的领导给予大力支持。王秀芹老师、博士生苏洁、李磊,硕士生刘哲、王忠等协助输入文稿,陶乃蓉老师清绘插图等,使本书得以早日付印,我们谨此向他们及一切关心和支持我们的同志致以衷心的感谢。

由于我们水平有限,本书肯定存在不少问题和谬误,敬请不吝赐教。

作 者

1999 年 12 月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 海洋水团分析的内容及研究史	(1)
1.1.1 海洋水团分析的研究内容	(1)
1.1.2 水团分析的意义	(1)
1.1.3 水团分析的回顾	(2)
1.1.4 中国水团分析研究概况	(3)
§ 1.2 水团的有关概念	(5)
1.2.1 水团的概念与定义	(5)
1.2.2 水型及其与水团的关系	(8)
1.2.3 水系及其与水团的关系	(9)
1.2.4 水团的核心和强度	(10)
1.2.5 水团的边界与混合区	(12)
1.2.6 水团的形成和变性	(13)
§ 1.3 水团的主要指标	(14)
1.3.1 均值指标	(15)
1.3.2 均方差指标	(16)
1.3.3 区间指标	(16)
1.3.4 极值指标	(16)
§ 1.4 中国近海海洋季节与海洋气候区的划分	(17)
1.4.1 中国近海海洋季节划分	(17)
1.4.2 中国近海海洋气候区的划分	(22)
第二章 环流、海洋锋和跃层	(24)
§ 2.1 环流及有关概念	(24)
2.1.1 环流的定义	(24)
2.1.2 海流的主轴、流幅和强度	(25)
2.1.3 水团的运动和海流	(26)
2.1.4 中尺度涡	(28)
§ 2.2 海洋锋	(29)
2.2.1 海洋锋的定义	(29)
2.2.2 海洋锋的分类	(30)
2.2.3 海洋锋的特性、形成与强度	(31)
2.2.4 海洋锋的分布	(33)

2.2.5 研究海洋锋的意义	(35)
§ 2.3 海洋中的跃层	(36)
2.3.1 跃层的形成及其“屏障作用”	(37)
2.3.2 跃层的示性特征	(39)
2.3.3 跃层顶界和底界的确定	(40)
2.3.4 中国近海跃层简介	(40)
§ 2.4 海洋细微结构	(45)
第三章 水团的综合分析法	(47)
§ 3.1 概述	(47)
3.1.1 综合分析法的特点和实用价值	(47)
3.1.2 综合分析法的某些基本原则	(48)
§ 3.2 水团的划分	(50)
3.2.1 水团个数的确定	(50)
3.2.2 水团边界的划法	(50)
§ 3.3 水团消长变化的分析	(55)
3.3.1 水团第一强度变化的分析	(55)
3.3.2 水团第二强度变化的分析	(58)
第四章 水团的浓度混合分析法	(61)
§ 4.1 水团的浓度混合理论	(61)
4.1.1 浓度	(61)
4.1.2 无界水团混合理论	(62)
4.1.3 有界水团混合理论	(67)
§ 4.2 水团个数及核心值的确定	(69)
4.2.1 水团个数及核心值的确定	(69)
4.2.2 水团核心空间位置的确定	(70)
§ 4.3 水团边界的确定	(72)
4.3.1 水团的本体和边界	(72)
4.3.2 两个水团混合的边界	(72)
4.3.3 三个水团边界的确定	(73)
4.3.4 四个水团边界的确定	(75)
§ 4.4 关于某些问题的讨论	(78)
4.4.1 浓度混合分析法的优点	(78)
4.4.2 浓度混合分析法的缺点	(78)
第五章 温-盐图解的统计分析	(80)
§ 5.1 温-盐图解	(80)
5.1.1 温-盐曲线	(80)
5.1.2 温-盐关系	(80)

5.1.3 温-盐点聚图	(81)
5.1.4 温-盐图解	(83)
§ 5.2 温-盐图解的一维频率分析	(84)
5.2.1 单站温-盐特征的频数分析	(85)
5.2.2 面积和体积的温-盐特征的频率分析	(85)
§ 5.3 海水体积输送的温-盐图解统计	(89)
§ 5.4 温-盐图解频率分析在中国浅海中的应用	(91)
5.4.1 温-盐图解及一维频率分析在东海变性水团分析中的应用	(91)
5.4.2 温-盐图解体积统计在台湾暖流水团分析中的应用	(92)
§ 5.5 温-盐图解上的二维频率分析	(94)
5.5.1 二维等频数面分析	(94)
5.5.2 二维分布密度函数方法	(95)
§ 5.6 温-盐图解上的回归分析	(99)
5.6.1 线性回归线 $\theta(S)$ 和 $S(\theta)$	(99)
5.6.2 非线性回归(回归曲线)	(100)
第六章 水团划分及预报中的分割法	(102)
§ 6.1 引言	(102)
§ 6.2 极差分割法	(103)
6.2.1 有关概念和记法	(103)
6.2.2 最优极差二分割	(104)
6.2.3 三分割	(105)
6.2.4 四分割	(106)
6.2.5 五、六、七分割	(107)
6.2.6 某些问题的讨论	(108)
§ 6.3 最优分割法	(111)
6.3.1 组内变差和总变差	(111)
6.3.2 简便算法及最优性的证明	(113)
6.3.3 实例与计算步骤	(114)
6.3.4 某些问题的讨论	(117)
§ 6.4 AID 方法	(119)
6.4.1 方法概述	(119)
6.4.2 计算步骤	(119)
6.4.3 示例	(120)
6.4.4 几个问题的讨论	(122)
6.4.5 AID 方法与水团的逐级分割	(123)
第七章 水团的聚类分析法	(125)
§ 7.1 相似系数和距离	(125)

7.1.1	相似系数	(125)
7.1.2	距离	(126)
§ 7.2	系统聚类法	(128)
7.2.1	系统聚类的思路与做法	(129)
7.2.2	类间距离与 8 种聚类法	(129)
7.2.3	示例与计算步骤	(133)
§ 7.3	系统聚类有关问题的讨论	(137)
7.3.1	统一递推公式	(137)
7.3.2	关于水团个数的确定	(138)
7.3.3	关于 F 检验	(140)
7.3.4	关于指标的选取	(141)
7.3.5	系统聚类 8 种方法的比较	(141)
§ 7.4	逐步聚类法	(142)
7.4.1	逐步聚类的思路与流程	(142)
7.4.2	逐步检验聚类法	(144)
第八章	水团的判别分析及预报	(148)
§ 8.1	距离判别	(148)
8.1.1	原理简介	(148)
8.1.2	步骤概述	(149)
§ 8.2	两个水团的判别	(150)
8.2.1	引言	(150)
8.2.2	两个水团的线性判别函数	(151)
8.2.3	Fisher 准则下的判别函数	(151)
8.2.4	判据 y_c	(153)
8.2.5	计算步骤与示例	(153)
8.2.6	两个水团多指标的非线性判别	(155)
§ 8.3	多个水团的判别	(155)
8.3.1	逐次二级判别	(155)
8.3.2	Bayes 准则下多个水团的判别	(156)
8.3.3	Fisher 准则下多个水团的判别	(162)
§ 8.4	划分的显著性检验及指标的鉴定评估	(167)
8.4.1	水团划分的显著性检验	(167)
8.4.2	不同准则判别的讨论	(171)
8.4.3	关于指标的选择	(171)
§ 8.5	水团的逐步判别	(173)
8.5.1	逐步判别的思路	(173)
8.5.2	逐步判别的指标(或因子)筛选步骤	(174)

8.5.3 Bayes 型判别函数的建立与检验	(178)
8.5.4 Fisher 型判别函数的建立	(179)
§ 8.6 水团的判别预报	(180)
8.6.1 使用指标预报值进行水团的判别预报	(180)
8.6.2 用判别分析法直接预报水团	(181)
8.6.3 用判别分析法直接预报水团的特征	(182)
第九章 水团分析中的正交分解法	(187)
§ 9.1 正交分解法的基本原理	(187)
9.1.1 特征向量与特征值	(187)
9.1.2 时间函数	(190)
9.1.3 正交分解式的对应特征与省略误差	(191)
9.1.4 奇异值分解	(193)
§ 9.2 奇异值分解法及其应用	(195)
9.2.1 数据矩阵的处理	(195)
9.2.2 分析式的建立	(196)
9.2.3 计算结果与分析	(197)
§ 9.3 替代分析法	(201)
9.3.1 一般平均场的局限性	(202)
9.3.2 分解式的建立	(203)
9.3.3 计算结果与分析	(204)
§ 9.4 对应分析法	(206)
9.4.1 方法概述	(206)
9.4.2 计算结果与分析	(208)
第十章 水团分析中的模糊数学方法	(210)
§ 10.1 模糊子集与水团的有关概念	(210)
10.1.1 模糊概念与模糊子集	(210)
10.1.2 水团与模糊子集	(211)
10.1.3 水团的核心、本体、边界及混合区	(212)
10.1.4 水型和水系的模糊集合定义	(213)
§ 10.2 模糊聚类分析	(213)
10.2.1 模糊相似关系与模糊等价关系	(214)
10.2.2 动态聚类图	(217)
10.2.3 几个问题的讨论	(220)
§ 10.3 水团的 Fuzzy 模式划分	(222)
10.3.1 水团核心指标的确定	(222)
10.3.2 Fuzzy 模式的建立	(224)
10.3.3 水团的划分	(226)

10.3.4	几个问题的讨论	(226)
§ 10.4	水团聚类中心的确定	(227)
10.4.1	模糊密度聚类法	(227)
10.4.2	移动格域法	(230)
10.4.3	模糊积分法	(232)
§ 10.5	聚类中心的调整与水团的软划分	(235)
10.5.1	水团的软划分调整	(235)
10.5.2	模糊目标函数聚类算法	(239)
10.5.3	F 统计、 FF 统计和 Fuzzy 伪 F 统计比率	(240)
§ 10.6	水团的模糊分析	(242)
10.6.1	水团特征、模糊度及贴近度	(242)
10.6.2	水团的模糊判别分析及综合评判	(247)
§ 10.7	变性水团隶属函数的拟合	(253)
10.7.1	确定隶属函数的一般原则和方法	(253)
10.7.2	变性水团隶属函数形式的探讨	(253)
10.7.3	变性水团隶属函数的椭圆拟合法	(255)
10.7.4	水团隶属函数的其他拟合方法	(263)
第十一章	世界大洋的环流与水团	(267)
§ 11.1	环流系的划分	(267)
§ 11.2	太平洋的环流	(268)
11.2.1	上层环流	(268)
11.2.2	次表层及其以深各层的环流	(278)
§ 11.3	大西洋的环流	(283)
11.3.1	上层环流	(283)
11.3.2	次表层及其以深各层的环流	(287)
§ 11.4	印度洋的环流	(292)
11.4.1	上层环流	(292)
11.4.2	次表层及中、深层环流	(294)
§ 11.5	南大洋和北冰洋的环流	(295)
11.5.1	南大洋的环流	(295)
11.5.2	北冰洋的环流	(297)
§ 11.6	世界大洋水系的划分	(299)
11.6.1	世界大洋水的温盐特征	(299)
11.6.2	世界大洋水系的划分	(303)
§ 11.7	太平洋的水团	(306)
11.7.1	表层水团	(306)
11.7.2	次表层水团	(310)

11.7.3 中层、深层和底层水团	(314)
§ 11.8 大西洋的水团	(320)
11.8.1 表层和次表层水团	(320)
11.8.2 中层、深层和底层水团	(322)
§ 11.9 印度洋的水团	(328)
11.9.1 表层和次表层水团	(328)
11.9.2 中层、深层和底层水团	(330)
§ 11.10 北冰洋和南大洋的水团	(332)
11.10.1 北冰洋的水团	(332)
11.10.2 南大洋的水团	(335)
第十二章 中国近海的环流和水团	(341)
§ 12.1 中国近海水团环流研究中值得注意的几个因素和关系	(341)
12.1.1 自然地理环境的制约	(341)
12.1.2 气象气候因素的影响	(343)
12.1.3 主体格局与区域特征的互相作用	(344)
12.1.4 理、化、生、地特征分布的兆示	(346)
§ 12.2 中国近海的环流	(348)
12.2.1 上层环流	(348)
12.2.2 中、下层环流, 上升流和涡旋	(352)
§ 12.3 中国近海的水团	(354)
12.3.1 中国近海的水型分布与水系划分	(354)
12.3.2 渤海和黄海的水团	(357)
12.3.3 东海的水团	(362)
12.3.4 南海的水团	(374)
12.3.5 中国近海水团特征及相互关系的判别与模糊分析	(379)
参考文献	(386)

第一章 绪 论

海洋水团分析是物理海洋学的重要内容之一。其研究的起步可追溯到较早的年代,涉及的问题也相当繁杂,经过几代海洋学家的努力,已取得了相当丰硕的成果。本章先介绍与其有关的一些基本概念和知识。

§ 1.1 海洋水团分析的内容及研究史

1.1.1 海洋水团分析的研究内容

海洋水团分析研究的主要内容,是对海洋水体进行宏观的划分,即根据海洋水体的物理、化学和生物等特征,将它们划分为不同的“水团”,分析这些水团形成、变性的特点,研究它们分布、变化及相互影响与作用的规律,从而对大洋或某研究海区海洋水体的来龙去脉给出合理的解释。广义的水团分析,还包括对研究海区内的跃层、海洋锋和环流系统的分析,因为它们与水团有着极为密切的关系。

1.1.2 水团分析的意义

自“水团”这一专用术语出现,距今已逾 80 年,水团分析的研究工作经久不衰,研究的论文和成果报道接连不断,这本身就说明了它所具有的意义。

1. 水团分析在物理海洋学中的地位

追溯海洋科学的历史,几乎从海洋学研究伊始,就用到了“水团”这一概念。运用水团及其有关的概念,对世界大洋水体进行划分和研究之后,又反过来对海洋学的发展,起了巨大的推动作用。经过众多海洋学家不断探索努力研究,海洋水团分析已积累了丰富的成果,从而使水团分析成了海洋学最重要的基础学科——物理海洋学的重要内容之一。早在 20 世纪 40 年代海洋学巨著 *The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology* (Sverdrup *et al.*, 1942, 1946, 1949) 中,关于世界大洋水团环流的论述,占整个水文物理学部分 1/3 以上的篇幅。迟至 20 世纪 70~90 年代,几经再版的 *Descriptive Physical Oceanography* (Pickard *et al.*, 1964, 1975, 1979, 1982, 1990) 以及 *General Oceanography, An Introduction* (Dietrich *et al.*, 1963, 1975, 1980) 之中,关于世界大洋水团和环流的篇章,也大体占类似的比数。水团分析在海洋学中的地位,由此可见一斑。

日本学者的同类著作中,有的也用相当篇幅论述大洋水团环流,有的则从另一角度体现水团分析在海洋学中的地位。例如在《海洋》(友田好文、高野健三,1983;中译本,1990)一书的前言中就指出:“水团可以说是海洋学研究的归宿。”而在《海洋物理学》第1卷(渊秀隆等,1970;中译本《物理海洋学》第1卷,1985)中,更明确说水团是“海洋学的基本问题”。

2. 水团分析与经济和国防建设的关系

海洋中的不同水团,具有各不相同的理化和生物特征。海洋中的鱼类,在其生长发育的不同阶段,往往要求一定的理化环境和饵料。因而,水团的分布、运动和变性,对渔场的形成和变动,对渔期的早晚、渔获量的多寡等等,就有着重要而明显的影响(苏育嵩,1980)。为了实现科学捕鱼,增加人民膳食结构中海洋鱼类高蛋白的摄入量,海洋渔业部门对水团分析也越来越重视。

水团、跃层和海洋锋,不仅影响鱼类聚散和洄游路线,而且对航运、交通,特别是对水面和水下军事活动有很大的影响。海洋中的声道分布与水下通讯、侦察的关系,早已为各国海军所重视,水团、跃层对潜艇活动与水中武器的使用,也有不容忽视的影响。

海水具有十分特殊的热性质(叶安乐等,1992),作为大气的下垫面,它对大气的热状况和各种尺度的运动的影响,无论如何是不能低估的。海洋是大气热能的主要来源,每年由海洋输入大气的热量,不下 $124.0 \times 10^{22} \text{ J}$,为陆地下垫面输入热量的4倍多,为大气直接吸收(水汽、二氧化碳、臭氧和云层的吸收)的太阳辐射的2倍多。然而,不同水团的热性质相差很大,因此对大气的影响就有很强的区域性。如北冰洋气团和热带气团的形成,显然与下垫面水团的热性质密切相关。入海气团的变性、热带西太平洋暖水库的形成与影响,以及尺度更大的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)等等,已成为国际海洋和气象科学研究的重要课题,由此也就引发了对海洋水团研究的进一步的重视。

1.1.3 水团分析的回顾

水团分析可以说是海洋学中最早开辟的研究领域之一。早在1770年,Franklin分析大西洋的湾流水时,就已经孕育了水团这一概念。1916年Helland-Hanson首次把“水团”这一专用术语引入海洋学中,并首创了温-盐图解分析水团的方法(Sverdrup *et al.*, 1942)。1927年,Jacobsen应用温-盐图解研究两个各自均匀的水团的混合问题,得出了“线性反比关系”的著名结论。1929年,Defant首次给水团以明确定义。30年代,Wüst提出了分析水团的核心法(核心层法)。40年代大洋水团分析取得了丰硕的成果,Sverdrup(1942,1946,1949)进行了出色的概括与总结;ШТОКМАН 和 ИВАНОВ 等则建立和发展了水团分析的温-盐曲线解析理论和几何学方法。从50年代开始,概率统计方法逐渐应用于水团

分析中,较早的成果如 Cochrane 和 Montgomery, 70~80 年代, Галеркин 等陆续发表有关的论文。水团分析在 60~80 年代,既有众多的成果问世,也出现了新的转机。前者如 Тимофеев 等(Тимофеев, Панов, 1962), Reid (Reid Jr, 1965) 和 Мамаев (Мамаев, 1970; Mamayev, 1975) 等人的专著,以及用较多篇幅讨论大洋水团与环流的许多物理海洋学或海洋学著作,接连不断地出版或再版。后者则是中尺度涡的发现和发现,卫星监测、浮标站及大量新型连续自记仪器的广泛应用,使得人们对海洋水团与环流、海洋锋等的认识,又来了一个飞跃,亦即由传统的气候式分析,进到了天气式研究的新阶段。

由于水团的形成、散布和变性,与海洋环流是息息相关而又相辅相成的,因此施托梅尔等在“论世界大洋的深层环流”的系列论文(Stommel *et al*, 1960~1972)中就从热盐环流角度,以箱式模型等方法,研究了世界大洋深层和底层水团的形成与运动,例如北大西洋深层水团的下沉与散布,南极底层水团在威德尔海与罗斯海的形成及扩展等等。如异军突起,近年来迅速发展的数值方法,也为水团分析提供了新的研究手段、展示了新的方向。因为水团的形成和变化,是海洋-大气系统耦合作用及海水大规模运动(大洋环流)与扩散、混合的结果,所以,借助于数值方法,对上述动力和热力学过程进行数值求解、模拟和试验,肯定有助于弄清海洋水团的来龙去脉(高野健三, 1985)。Bryan (Bryan *et al*, 1979) 和 Cox (Cox, 1989) 等人,已在这方面进行了探索与研究。当然,数值方法本身也有其局限性,在中纬度的中国浅海,由于四季交替明显,岸线、岛屿、底形复杂,数值方法遇到的困难就很多。

1.1.4 中国水团分析研究概况

在解放前的中国,水团分析研究可以说是完全空白。1958~1960 年的全国海洋综合调查,对中国水团分析研究的开展,是一个巨大的推动。1959 年,赫崇本等发表了关于黄海冷水团的研究论文。1964 年出版的《中国近海的水系》,对中国近海的水团分布、消长变化规律等进行了相当全面而系统的分析,尤其对中国浅海水团的特征和划分的依据,颇有新颖的见解。由于中国近海大陆架海域甚为宽阔,又位于中纬度温带季风区,水团的季节变化及混合变性极为显著,因而,围绕水团的概念,特别是浅海水团的定义及分析方法,中国学者进行了不少的研究。针对浅海水团变性显著的特点,引入了变性水团的概念(苏育嵩, 1980),以此观点对渤海、黄海、东海和南海区的水团,进行了较深入的分析,取得了相当多的研究成果。

从分析的对象看,关于夏季黄海底层的冷水团,关于长江冲淡水团,关于黑潮水系的各水团,是分析较深入其成果也较多的。从分析的海区看,渤海、黄海和东海的西半部,南海的北部海区,由于调查资料多,分析较系统深入。黄、东海的

东半部、台湾海峡、南海中部和南部,由于自己的调查资料比较少,前些年研究还不够深入;近年来则加强了调查研究,进展迅速,令人注目。

从分析的方法看,中国学者的工作是多方面的,而且颇有创新。综合分析法用得较早也较普遍。从 60 年代开始,对浓度混合分析法和概率统计方法的应用,做了不少探索。70 年代以来,动力学分析(毛汉礼等,1963;袁业立,1979;乐肯堂,1984;缪经榜等,1990,1991;袁业立等,1993)、多元统计分析和模糊数学等方法,都已广泛应用。其中特别是多元统计分析方法和模糊数学方法,在中国浅海水团分析研究中,经移植、改造与创新,已经形成了中国海洋水团分析的突出特点,并且在预报方面迈出了可喜的一步。

从水团分析所用指标看,已逐步从单指标或二指标(温度和盐度)的分析,走向包括化学、生物等多指标的分析。海洋多学科的综合调查,为水团多元分析提供了重要的条件,而模糊数学等方法的推广与应用,则把中国浅海水团分析推上了一个新高度。

从研究的部门看,青岛海洋大学(前山东海洋学院),中国科学院海洋研究所和南海海洋研究所,国家海洋局第一、二、三海洋研究所,水产科学研究院的黄海、东海和南海三个水产研究所,山东省海洋水产研究所,福建省海洋研究所以及台湾省的高校和研究机构,都有相当的人员从事这方面的研究,取得了大量的研究成果。

1986 年 9 月,中国海洋湖沼学会水文气象学会召开学术年会时,曾就“中国海水团问题”举行专题讨论会。仅此一点即可看出水团分析在中国海洋学界被重视的程度。专题讨论会的召开,对推动中国水团分析研究工作的进一步发展,已经起了而且还会继续发挥明显的作用。中国学者撰写的水团分析的文章,散见于各类学报、各种调查研究综合报告和刊物中,数量甚多,查阅不太方便。《浅海变性水团分析和预报研究》专辑(青岛海洋大学学报,1989,第 19 卷第 1 期(I),1~528 页),汇总了部分有代表性的论文和研究成果,有一定参考价值。

表 1-1 简要列出了国内外水团分析研究的概况。