

空天地大数据与水利应用丛书

# 基于无人船水下遥感的 底质分类研究

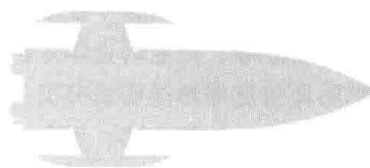
陈曦 雷添杰 邓安军 李京 沈蔚 著

非外借



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

空天地大数据与水利应用丛书



# 基于无人船水下遥感的 底质分类研究

陈曦 雷添杰 邓安军 李京 沈蔚 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

如何从多源声学图像中提取有效信息用于融合, 如何实现有效的信息融合以提高底质分类的精度等, 是业内近年来值得研究的重要问题。鉴于此, 本书重点探讨了融合多源声学图像信息的海洋底质分类方法, 针对融合过程中的关键问题探讨了多源声学图像特征提取与特征选择方法、面向对象的自动底质分类方法以及适用于底质分类的图像信息融合方法, 同时结合实验进行了方法验证和分析。

本书适合相关专业师生作为辅助教材, 也可以作为相关领域工作人员的指导读物。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于无人船水下遥感的底质分类研究 / 陈曦等著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2020. 11

(空天地大数据与水利应用丛书)

ISBN 978-7-5170-9096-0

I. ①基… II. ①陈… III. ①无人驾驶—船舶—水下  
探测—遥感—研究 IV. ①U675.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第212881号

书 名	空天地大数据与水利应用丛书 基于无人船水下遥感的底质分类研究 JIYU WUREN CHUAN SHUIXIA YAOGAN DE DIZHI FENLEI YANJIU
作 者	陈曦 雷添杰 邓安军 李京 沈蔚 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@mwr.gov.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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 249千字
版 次	2020年11月第1版 2020年11月第1次印刷
定 价	68.00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

## “空天地大数据与水利应用丛书”编委会

主 编 吕 娟 雷添杰

副主编 李 京 宋文龙

编 委 (按姓氏笔画排序)

王嘉宝 王世东 田济扬 曲 伟 吕 娟

孙洪泉 苏志诚 杜 冰 李 京 李小涵

李纪人 李翔宇 宋文龙 宋宏权 张亚珍

张鹏鹏 陈 曦 陈 强 陈金平 武志涛

武建军 尚毅梓 岳建伟 金菊良 周 纪

周 磊 胡连兴 宫阿都 徐瑞瑞 郭胜山

黄锦涛 蒋金豹 程结海 雷添杰 路京选

慎 利

主 审 丁留谦 李纪人

# 《基于无人船水下遥感的底质分类研究》

## 参 写 人 员

陈 曦 雷添杰 邓安军 李 京 沈 蔚  
陈建国 吉租稳 王党伟 胡海华 陆 琴  
王嘉宝 李小涵 张亚珍 张鹏鹏

# 前言

无人船水下遥感 (Unmanned Ship Based Underwater Remote Sensing), 即利用无人船平台实现自动化、智能化快速获取水下地形、水下底质、水体物理化学性质等遥感信息的组织、处理、建模和应用分析的技术。近年来, 随着无人船舶航行技术、遥测遥控技术、声学传感器技术、通信技术、GPS 差分定位技术和遥感应用技术的发展, 无人船遥感系统的性能和自动化程度不断提高。作为侧扫声呐、多波束系统和浅地层剖面仪等多源声学遥感设备的载具, 无人船具有灵活机动、自动化水平高、技术相对成熟、安全性高等特点, 因此受到了广泛的关注, 并应用在水环境保护、航道测量、海底线缆探查、水下搜救、水质监测等多个领域。

水下底质分类对海洋、河流、湖泊科学研究、资源开发、环境保护和海权维护具有重要意义。侧扫声呐、多波束系统和浅地层剖面仪等多源探测是声学法底质分类的常用技术, 声学图像是通过上述 3 种技术得到的主要成果之一。基于声学图像分析法的底质分类具有高空间覆盖率、高制图精度和低成本的特点, 是传统采样法、回波波形分析法等方法无法比拟的。但是, 仅基于单一数据源进行自动底质分类的精度偏低, 大量水底多源声学探测数据仍处于利用率较低、有效信息提取依赖人工解译的状态。

多源声学图像具有多维、多源、异构的特点, 其提供的信息既有较大的差异性, 又有良好的互补性。多源声学图像信息融合是水下测绘、水生态、水下地质调查、水声学等领域的研究趋势。但是, 目前基于无人船遥感平台, 融合多源声学图像进行自动底质分类的方法处在探索阶段, 怎样通过无人船获取的多源声学图像提取有效信息, 以及怎样实现有效的信息融合以提高底质分类的精度是有待突破的关键问题。

围绕上述问题, 本书针对无人船平台获取的水下多源声学遥感数据, 研究了融合多源声学图像信息的水下底质分类方法, 针对融合过程中的几个关键问题, 重点讨论了多源声学图像特征提取与特征选择方法、面向对象的自动底质分类方法和

适用于底质分类的图像信息融合方法，并结合实验进行了方法验证和分析。本书研究工作的主要内容体现在以下方面。

(1) 改进了面向底质分类的多源声学图像预处理方法。从多源声学图像的形成原理出发，讨论了融合多源声学图像信息进行底质分类的可行性，并通过改进侧扫声呐和浅地层剖面声呐图像预处理方法为底质分类提供条件。

(2) 研究了多源声学图像的特征信息提取方法。分别从定性和定量角度分析了不同水下底质在水下地貌、地形和浅地层剖面图像中的特征，并给出了部分特征的定量提取方法；分析了具有代表性的 36 种水下地貌图像特征量、11 种水下地形特征量和 12 种水下浅层剖面图像特征量。为了降低通过经验选取的特征量之间的冗余性，提出了基于相关性聚类的特征筛选方法；为了提高所选特征量对底质分类的有效性，又提出了最大相关最小冗余算法 (mRMR) 与粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 的特征选择方法。通过上述过程提取的特征量既可作为底质分类的依据，又可作为多源声学图像信息特征级融合的研究对象。

(3) 研究了多源声学图像的分类信息提取方法。基于面向对象的分类思想，对于水下地貌和地形图像，依次采用多尺度分割方法，结合 mRMR 与 PSO 算法的特征选择方法，以及包括 K-近邻、朴素贝叶斯、决策树、支持向量机和随机森林 5 种常用的监督分类算法进行了底质分类研究；根据水下浅层剖面图像仅描述水底表层底质一维分布的特点，提出了一种面向对象的、基于滑动窗口的浅层剖面图像监督分类方法。实验结果表明，不同分类算法对不同底质类型的分类效果各有优劣；地貌数据更适合对砾石、粗砂、细砂和泥等底质进行分类，地形数据更适合对礁石和沙波的分类；基于滑动窗口的浅层剖面图像监督分类方法可有效分辨黏土、粉砂、卵石、基岩等底质在浅层剖面图像中的水平分布，总体分类精度高于 90.83%。通过上述过程得到的分类信息既可单独应用，又可作为多源声学图像信息决策级融合的研究对象。

(4) 在上述研究的基础上，进一步探索了多源声学图像信息融合的综合模型和融合方法。其中，综合模型结合了信息融合的混合模型 (OB)、基于主题 (THB) 和基于空间特征、面向应用的 (SFBAO) 浅层声学数据集成与融合模型，以及面向底质分类的特征级与决策级融合模型，形成从宏观到微观的技术框架；融合方法采用了融合多源声学图像特征信息的特征级融合方法，以及融合多源声学图像分类信息的决策级融合方法，围绕后者提出了基于 Dempster-Shafer 证据推理的多源声学图像决策级融合方法，并讨论了证据融合顺序设计、基本信度分配函数构建、证据合成规则选取和决策规则选取

的方法。最后，对本书介绍的底质分类方法进行了综合比较，结果表明特征级融合与决策级融合可提高基于单一数据源的底质分类精度，在分类数据的输入顺序和数量设定合理的情况下，决策级融合可在总体精度上超过特征级融合。在对特定底质类型的分类精度方面，特征级和决策级融合的结果又具有较好的互补性。

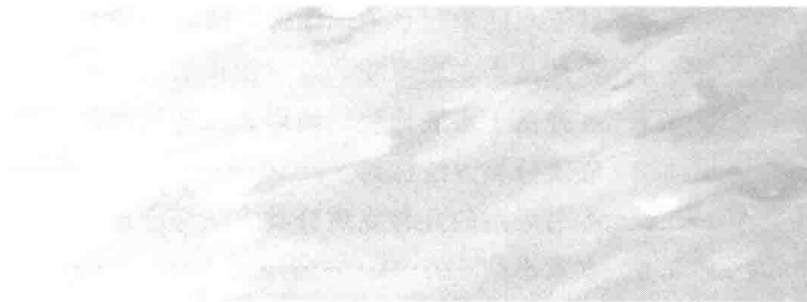
本书获得“十三五”国家重点研发计划课题“不同类型区水库和湖泊淤积调查分析与基础数据库（2017YFC0405201）”、中国水利水电科学研究院科技成果转化基金“水库泥沙淤积与调控技术成果集成与转化（SE1003A012017）”资助，并入选“遥感青年科技人才创新资助计划”。

鉴于笔者水平有限，书中错误和不足在所难免，欢迎读者朋友不吝指正，不胜感谢！

**著者**

2020年1月

# 目录



## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究现状 .....	6
1.3 存在的问题 .....	12
1.4 研究内容与技术路线 .....	13
1.5 本书的组织结构 .....	14
<b>第 2 章 水底多源声学图像的形成原理</b> .....	16
2.1 水底声学图像的成像理论 .....	16
2.2 侧扫声呐的声学图像形成原理 .....	28
2.3 多波束系统的声学图像形成原理 .....	36
2.4 浅地层剖面仪的声学图像形成原理 .....	40
2.5 多源声学图像的比较 .....	47
2.6 本章小结 .....	48
<b>第 3 章 多源声学图像的特征分析</b> .....	49
3.1 水底多源声学图像的底质特征描述 .....	49
3.2 实验数据及研究区概况 .....	52
3.3 多源声学图像的特征提取 .....	58
3.4 基于相关性聚类的多源声学图像特征筛选方法 .....	68
3.5 本章小结 .....	76
<b>第 4 章 面向对象的多源声学图像底质分类方法</b> .....	77
4.1 水底多源声学图像分割 .....	77
4.2 水底多源声学图像的特征选择 .....	82
4.3 面向对象的水底多源声学图像分类 .....	92
4.4 本章小结 .....	106
<b>第 5 章 面向水下底质分类的多源声学图像信息融合方法</b> .....	108
5.1 面向水下底质分类的多源声学图像融合综合模型 .....	108

5.2	基于水底地貌、地形图像的特征级融合与底质分类方法 .....	113
5.3	一种基于水底地貌、地形图像的决策级融合与底质分类方法 .....	117
5.4	一种基于水底地貌、地形和浅地层剖面图像的决策级融合与 底质分类方法探讨.....	129
5.5	本书采用的几种底质分类方法综合比较 .....	134
5.6	本章小结 .....	136
<b>第 6 章</b>	<b>总结与展望</b> .....	<b>138</b>
6.1	本书的主要结论和创新点 .....	138
6.2	研究展望 .....	139
<b>参考文献</b>	.....	<b>141</b>
<b>致谢</b>	.....	<b>153</b>

## 绪 论

水体是全球生命支持系统的一个基本组成部分，也是一种有助于实现可持续发展的宝贵财富（联合国《21 世纪议程》），对海洋、河流、湖泊等水体的全面认知、开发、利用和保护越来越受到全人类的高度重视。

地表水体的底层处于地球内、外圈层的边界，是自然演化与人类活动的重要承载面，对水下底质的研究有多方面的意义。第一，从水底科学研究的角度来看，水下底质可反映水下自然现象、性质以及变化规律，是海洋、湖泊地质学，地球物理学，地球化学，水下生物学，海洋工程学等多个学科的重要研究对象之一；第二，从水下资源开发的角度看，海洋、河流、湖泊底质蕴含的矿产资源、海底能源、生物基因资源、海洋渔业资源等具有重要的经济价值。第三，从水下空间利用的角度看，了解水下底质对于海洋、内河交通运输、水下管线铺设、滩涂利用和围海造地等水下及近海工程具有重要意义；第四，从海洋主权和海洋安全维护的角度看，基于水下探测的海底勘察在维护国家的海洋权益（大陆架、专属经济区）、分享国际海底权利、保障国家海洋安全，以及水下应急搜救、海洋地质灾害防护等领域也发挥着重要作用。

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 无人船水下遥感应用

无人船水下遥感（Unmanned Ship Based Underwater Remote Sensing），即利用无人船平台实现自动化、智能化快速获取水下地形、水下底质、水体物理化学性质等遥感信息的组织、处理、建模和应用分析的技术。近年来，随着无人船舶航行技术、遥测遥控技术、声学传感器技术、通讯技术、GPS 差分定位技术和遥感应用技术的发展，无人船遥感系统的性能和自动化程度不断提高。作为侧扫声呐、多波束系统和浅地层剖面仪等多源声学遥感设备的载具，无人船具有灵活机动、自动化水平高、技术相对成熟、安全性高等特点，因此受到了广泛的关注，并应用在水环境保护、航道测量、海底线缆探查、水下搜救、水质监测等多个领域（张锡越等，2018；李斌等，2015）。

作为一种低成本、低风险、高效能的水面遥感平台，无人船不仅可装载光学、微波、激光雷达等水面遥感设备，以及温度、盐度、深度、酸碱度、水体溶解氧等水体传感器，还可搭载侧扫声呐、多波束系统和浅地层剖面仪等多种水下声学遥感设备，从而具备了水下声学遥感探测的综合功能（Lee S. 等，2017；Thompson D. 等，

2019)。由于无人船比传统测量船减少了船员生命维持等系统，因此可做到灵活机动，能适应较恶劣的水面环境，且能够在能源补给充分的情况下不间断作业，具有传统测量船无法比拟的优势。

当前无人船水下遥感系统的基本组成包括动力系统、导航系统、通信系统、船体平台、传感器系统和岸基遥控与处理系统（图 1-1）。其中，动力系统为无人船提供航行和定点停泊所需的动力和能源；导航系统为无人船和远程控制终端提供船舶实时定位信息和航线、航向等导航信息，包括船舶姿态感知、环境感知、障碍物识别、人机交互、智能路径规划、组合导航等子系统（陈佳，2013）；通讯系统用于传输无人船自身状态、远程控制、图像及数据流等信息；船体平台包括适用于不同任务的无人船体以及为传感器系统提供的支架和设备接口等；传感器系统通常包括 GNSS 导航与姿态传感器、声学多普勒流速剖面仪（Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP）、测深仪以及侧扫声呐、多波束系统和浅地层剖面仪等多种水下声学遥感设备；岸基遥控与处理系统包括无人船航线记录与控制系统、无人船状态与环境感知信息处理系统以及针对传输回来的水下遥感数据进行处理与分析的系统等。

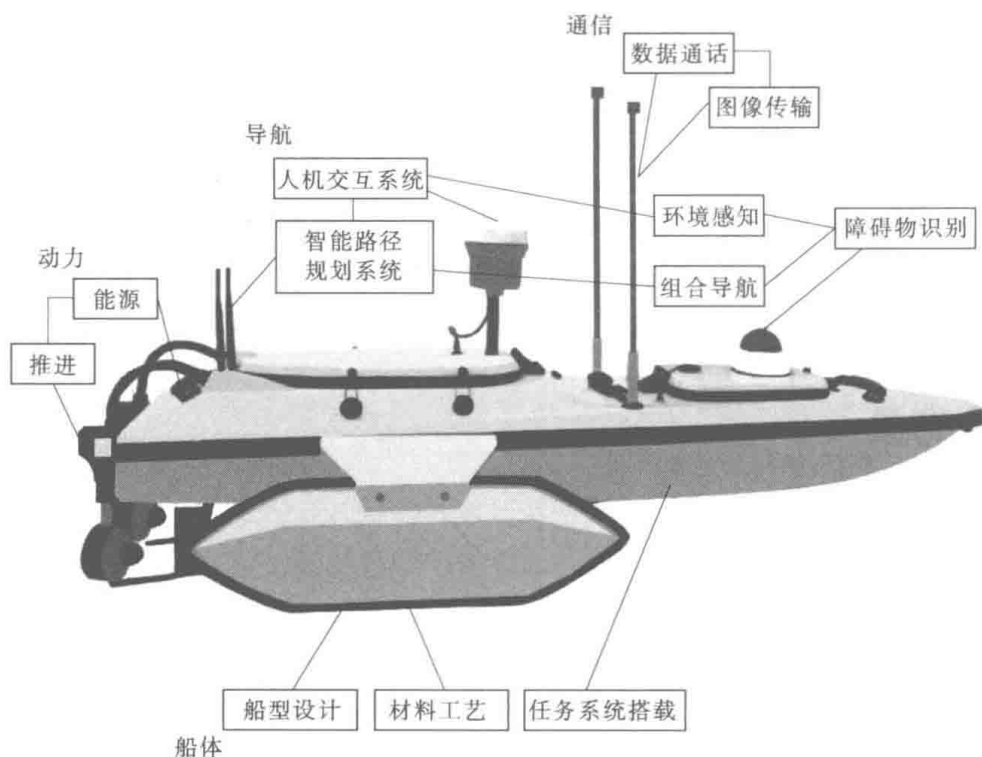


图 1-1 无人船水下遥感系统组成图

目前，基于无人船平台的水下遥感系统主要应用可分为水下调查与测量、防务两个大方向（蒲进菁等，2020；高宗江等，2017；金久才等，2015）。其中，水下调查与测量方面的应用包括水下测绘、水下底质调查、水下目标检测、物理海洋（气象、水文）观测、水体生化指标监测、水生物观测等；防务方面的应用主要包括重点港口、水下构筑物（大坝、水下电缆、管道等）、航道区域的巡检，以及水下搜救、军事防御等。

国内外已有大量机构进行无人船技术的研发工作（蒲进菁等，2020），其中企业包括

美国的科学应用国际公司 (Science Applications International)、通用动力公司 (General Dynamics)、诺格公司 (Northrop Grumman Corporation), 以色列的埃尔比特系统公司 (Elbit Systems)、拉斐尔先进防务系统公司 (Rafael)、以色列航空工业公司 (IAI), 英国的奎纳蒂克公司 (QinetiQ)、ASV 公司, 德国的阿特拉斯电子公司 (Atlas Elektronik), 法国的 ECA 公司, 日本的雅马哈公司, 中国的云洲智能科技有限公司等; 科研院所、高校包括美国海军研究局 (Office of Naval Research, ONR)、美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、中国科学院沈阳自动化研究所、中国船舶重工集团公司旗下各研究所、哈尔滨工程大学、海军工程大学、上海海事大学、大连海事大学、上海大学等。

我国无人船技术随着国家及地方政府、科研院所和企业的不断投入, 已逐步与国外技术缩小差距, 从前期的专用遥控船 (不具备自主控制能力) 逐渐发展出自主式无人船等产品。但目前大型无人船以及具备复合功能的水下遥感无人船系统尚处于研制和发展阶段。

综上所述, 无人船具有机动性强、灵活、不间断测量成本低、安全性高等特点, 可弥补传统水下测绘和调查在环境复杂、恶劣的水域作业的局限性, 因此成为各国军、民用装备研制的热点。基于无人船平台的水下遥感系统主要应用于水下调查与测量、水下防务等领域。随着各国对海洋发展战略的重视以及对水下空间开发力度的加大, 无人船水下遥感技术将扮演越来越重要的角色。随着 5G、人工智能技术、卫星通讯与导航技术的发展, 无人船遥感系统与新技术、新材料的深度融合将有望引领无人船遥感行业的技术突破和应用创新。

目前基于无人船平台的水下遥感系统主要用于内陆河流、湖泊及浅海区域常规调查, 面临的主要问题包括无人船方面的稳定性、安全性、数据传输效率、船载信息处理效率、定位与测量精度等, 以及水下遥感系统信息处理方面的数据获取精度、数据组织效率、信息融合方法、数据后处理与应用扩展等。本书主要围绕后者, 即基于无人船平台的水下遥感系统在水下底质分类中的信息处理技术与应用展开论述。

### 1.1.2 水下底质的粒级划分

早在航海时代早期的 1873—1876 年, 英国海洋调查船 Challenger 号就对来自各大洋的海底沉积物进行了分类, 并由英国海洋学家编制了世界第一幅大洋底质图<sup>[1]</sup>。最初的海洋底质图上的分类主要包含砂、软泥、贝壳、混有砂的软泥等。

1958 年, 《海洋与湖沼》杂志第 1 卷第 2 期刊登了译自苏联科学院海洋研究所著名地质学家 M. B. 克利诺娃教授的文章, 介绍了海底底质图的编制原则、编制方法, 并分析了我国黄海、东海的底质分布特征及成因。该论文介绍了以十进制分类原则为基础的底质机械分级分类方法, 将海洋底质分为石块、巨砾、砾石、石子、砂、粉砂和泥共 7 类, 后 6 类又各分为粗、中、细三个细分的组, 这成为早期我国科学家对东海和南海底质进行初步研究的分类标准<sup>[2]</sup>。

我国 2008 年 2 月起施行的《海洋调查规范 第一部分: 总则》(GB/T 12763.1—2007) 国家标准对海洋底质按粒级标准的划分和命名规则如表 1-1 所示<sup>[3]</sup>。

表 1-1 海洋底质等比制 ( $\phi$  值标准) 粒级分类表

粒组类型	粒级名称		粒径范围		$\phi = -\log_2 d$		代号
	简分法	细分法	mm	$\mu\text{m}$	$d$	$\phi$	
岩块 (R)	岩块 (漂砾)	岩块	$>256$		256	-8	R
		粗砾	256~128		128	-7	CG
			128~64		64	-6	
			64~32		32	-5	
砾石 (G)	砾石	中砾	32~16		16	-4	MG
			16~8		8	-3	
		细砾	8~4		4	-2	FG
			4~2		2	-1	
砂 (S)	粗砂	极粗砂	2~1	2000~1000	1	0	VCS
		粗砂	1~0.5	1000~500	1/2	1	CS
	中砂	中砂	0.5~0.25	500~250	1/4	2	MS
	细砂	细砂	0.25~0.125	250~125	1/8	3	FS
		极细砂	0.125~0.063	125~63	1/16	4	VFS
粉砂 (T)	粗粉砂	粗粉砂	0.063~0.032	63~32	1/32	5	CT
		中粉砂	0.032~0.016	32~16	1/64	6	MT
	细粉砂	细粉砂	0.016~0.008	16~8	1/128	7	FT
		极细粉砂	0.008~0.004	8~4	1/256	8	VFT
黏土 (泥)(Y)	黏土	粗黏土	0.004~0.002	4~2	1/512	9	CY
			0.002~0.001	2~1	1/1024	10	
		细黏土	$<0.001$	$<1$	1/2048	$>11$	FY

近年来,刘志杰等<sup>[4]</sup>讨论了谢帕德分类法和福克分类法,提出基于这两种分类法按照单一优势粒级的原则对含砾沉积物做进一步细分,以砾石、泥、砂、粉砂、黏土为端元构建细分的命名体系。温朝江等<sup>[5]</sup>讨论了底质专题图符号系统的逻辑设计,参照《中国海图图式》(GB 12319—1998)中的底质类型符号体系<sup>[6]</sup>,提出以主要成分的粒级分类为主、物质成分为辅的专用底质类型符号体系,其粒级分类标准采用岩块、砾石、砂、粉砂、黏土的划分体系,并可按照粒级和物质成分继续细分。总的来说,我国对浅海、河流、湖泊底质类别的分类方法在国外底质分类体系的基础上不断完善,按照粒级划分可分为岩块、砾石、砂、粉砂、黏土(泥)五大类。

### 1.1.3 现有的水下底质探测方法

水下底质探测方法目前可分为传统采样法和遥测法两种。传统的水下底质采样法一般为机械式采样。根据国家海洋地质地球物理调查规范<sup>[3]</sup>，水下底质采样一般要求测定水深，做表层采样和柱状采样。底质表层采样一般使用蚌式、箱式、多管式、自返式采样器或拖网等设备；柱状采样常使用重力活塞、震动活塞及浅钻等取样设备。上述采样设备有各自适用的底质类型，因此选择采样设备时还需对被采样区的底质类型有大致了解。采样后底质分类可基于样本的性状，如颜色、气味、厚度、稠度、黏性等进行判别，也可采用筛析法、沉析法或激光法鉴别样本的粒径组分。机械式采样法能获得底质准确而详细的信息，但往往采样效率低、测量成本高、测量条件要求高、采样数据不连续，因此不适用于大面积底质调查<sup>[7-8]</sup>。

水下底质遥测法包括光学探测法和声学探测法。其中，光学探测法利用可见光、激光等光电信号，提供与人类视觉直观感知相一致的水底高清晰度图像。但电磁波在水中的衰减特性使得光学探测方法不适宜大范围、混浊水体等条件下的底质探测。声学探测法是目前新兴的水下底质遥测方法，声波在水中的传播能力优于微波和可见光，而且水底声学反射、散射、衰减和声速变化等特征可用于了解底质的粗糙度、硬度、粒度等特性，因此可用于底质类别判断。声学底质探测法是一种经济、快捷的间接探测手段，特别是在采样资料稀少（或底质不便于取样）、需要了解大面积水下底质分布、对底质分布制图的空间精度要求较高的情况下，声学探测法具有采样法和光学探测法无法比拟的优势，声学法底质探测与分类又因此被称为“声学遥感”<sup>[9]</sup>。

### 1.1.4 水下底质声学分类方法

现代水下底质声学分类主要基于对声学数字信号的分析，根据所用的数据形式不同，底质的声学分类方法可分为回波波形分析法、反向散射强度分析法和声学图像分析法。

回波波形分析法主要使用垂直作用于水底的声波，获取从水底返回的回波信号，并根据信号的波形特征建立与不同水下底质的硬度、粗糙度、声阻抗等物理性质的关系，再根据底质的物理性质建立与底质类别的关系从而实现底质分类<sup>[10-11]</sup>。基于回波波形分析法的底质分类有着较明确的物理机制，目前已有一些比较成熟的软件可供使用<sup>[12]</sup>。但是回波波形分析法基于垂直入射的声波，因此测量覆盖的范围较小，得到的底质分布图往往需要进行空间插值，因此降低了底质分布制图的空间精度。

反向散射强度分析法有两种主要方式，一种是通过建立反向散射强度值、波束入射角与底质物理性质的关系，再根据底质的物理性质建立与底质类别的关系；另一种方式是对反向散射强度信号进行声速校正、地形校正、入射角度校正后转化为与入射角无关的反向散射强度数据，再通过建立反向散射强度与底质类别的关系实现底质分类<sup>[13]</sup>。反向散射强度分析法需要通过大量实验建立强度数据值与底质类别的关系，而且需要准确测定波束入射角等参数，对测量设备和数据处理有较高的技术要求。

声学图像分析法主要基于侧扫声呐、多波束系统或浅地层剖面仪将记录的声信号转化为声学图像，通过图像的灰度变化反映底质表面或剖面的反向散射强度或纹理特征，

而反向散射强度和图像纹理特征与地形、地貌以及底质的物理性质有密切关系。声学图像分析法有较多的数据来源,相比于回波波形分析法和反向散射强度分析法,声学图像既可以覆盖较大的空间范围,又包含了底质的反向散射和纹理信息,更便于人工解译分析或使用计算机自动分类,因此基于声学图像分析的水下底质分类已成为研究热点<sup>[14]</sup>。

侧扫声呐 (Side Scan Sonar, SSS) 通过记录声波斜入射情况下的水底反向散射信号强度而形成声学图像。侧扫声呐图像的灰度值不仅与水下底质的物理性质有关,还与声波传播路径、声脉冲入射角度、水底粗糙度以及水底地形等诸多因素有关,因此是一种水底地貌成像方式。

多波束系统也称为多波束回声测深仪 (Multi-beam Echo Sounder, MBES), 通过在垂直于航向的平面内发射大量声波束而获取几十甚至上百个深度数据,可记录一定宽度内全覆盖的水深信息,同时也可记录相应的反向散射强度数据。因此,一些多波束系统不仅可得到水底地形图,还可实现与侧扫声呐相同的功能得到水底地貌图像。多波束系统生成的图像具有较高的位置精度,通过精确校正可得到与入射角无关的反向散射强度数据,达到反向散射强度分析法的技术要求,但是多波束系统生成的地形、地貌图像的空间分辨率往往比侧扫声呐图像低。

浅地层剖面仪 (Sub-bottom Profiler, SBP) 发射垂直入射的声脉冲与底质作用,通过连续记录产生的回波信号而形成水底浅地层剖面声学图像。这种声学图像反映水底表层及浅地层底质的声学反射和透射特征,既可采用回波波形分析法进行底质分类,又可用图像分析法进行底质和地层剖面的分类。但是,与回波波形分析法存在的问题一样,浅地层剖面仪发射的声信号在水底平面上的覆盖范围较小,得到的底质分布图往往需要进行空间插值。

综上所述,声学图像分析法用于底质分类是一种既有潜力又有挑战的方法。一方面,各类声学图像反映的是水底的声学特征,是对底质物理性质的间接描述,因此其底质分类有各自的局限性;另一方面,各类声学成像设备为声学图像分析法提供了丰富的数据源,这些数据源虽然有较大的差异性,但也有互补性,因此,充分结合侧扫声呐、多波束系统、浅地层剖面仪等声学设备形成的水底地貌、地形和浅地层剖面图像信息,结合采样资料或直接观测资料进行水下底质分类正受到越来越多的关注,具有很大的应用潜力<sup>[9-10][15]</sup>。

## 1.2 研究现状

基于各类声学图像的水下底质分类是近年来研究的热点,这一方面得益于相关硬件、软件的逐渐丰富;另一方面得益于相关理论和方法的发展进步。基于单一类型声学图像的水下底质分类目前已积累了一些研究成果,根据数据源不同可分为基于侧扫声呐图像、基于多波束反向散射强度和测深数据以及基于浅地层剖面图像的分类研究。随着研究的深入和实践经验的丰富,一些研究已经提出了多源声学数据融合的思想,结合多种声学数据进行底质分类或水底目标识别已在一些应用中得到了实践,但仍以人工综合判读为主,信息

融合的层次较低。

### 1.2.1 基于侧扫声呐图像的水下底质分类方法研究现状

侧扫声呐图像是一种水底地貌图像,基于侧扫声呐图像的底质分类主要利用不同底质在图像中的灰度和纹理信息,可用于识别一些特定的底质大类如岩石、砾石、砂、泥等。有关研究主要围绕三方面开展,一是研究适用于侧扫声呐图像底质分类的灰度和纹理特征量;二是在此基础上研究用于底质分类的自动分类算法;三是直接采用人工识别方法或使用商业软件进行底质分类。

#### 1.2.1.1 侧扫声呐图像的灰度和纹理特征研究

侧扫声呐图像的灰度特征主要通过灰度直方图统计量进行描述,常用的特征量包括均值、标准差、偏度、峰度、能量、熵、变异系数、灰度直方图的分位数、极差等参数<sup>[16-23]</sup>。侧扫声呐图像的纹理特征常被作为判别水下底质类型的重要特征描述量。王雷<sup>[24]</sup>、李庆武等<sup>[25]</sup>总结了目前常用的纹理信息提取方法并划分为4类:统计分析法、结构分析法、频谱分析法以及模型分析法。其中,统计分析法包括灰度共生矩阵法<sup>[22-23][26]</sup>、高阶统计量法<sup>[27]</sup>、分形几何法<sup>[24][28-30]</sup>等;结构分析法包括形态学分解<sup>[31]</sup>、拓扑纹理描述<sup>[32]</sup>等;频谱分析法包括小波分析法<sup>[33-35]</sup>、傅里叶谱分析法<sup>[21][36-37]</sup>、纹理能量法<sup>[38]</sup>等;模型分析法常用模型包括马尔可夫模型<sup>[24][39-41]</sup>、Tamura模型<sup>[42]</sup>、Gabor滤波器模型<sup>[24][43-44]</sup>等。虽然上述几类可概括目前常见的大部分声学图像纹理信息提取方法,但根据特征量的构造方法和统计指标不同,还可对上述方法再做细分<sup>[24][45-46]</sup>。例如,采用梯度算子(如Roberts算子、Sobel算子等)对图像进行变换并计算灰度共生矩阵统计量,形成了灰度-梯度共生矩阵法<sup>[46]</sup>;考虑原图像中各像素与其邻域内所有像素的灰度值联合分布,形成了邻域灰度共生矩阵<sup>[24]</sup>。常用的灰度共生矩阵(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)纹理描述方法还可导出多个统计指标,Haralick等<sup>[26]</sup>首次提出14个基于GLCM的统计指标(Haralick等,1973);在国内外水底声学图像分类相关研究中常用的包括角二阶矩、对比度/反差度、相关系数、方差、逆差矩/惯性矩、熵等<sup>[21][23][47-48]</sup>。

目前提出的侧扫声呐图像特征描述量已非常丰富,但是实际应用中往往根据特征提取方法的可实现性主观选择用于图像分类的特征量,一些研究甚至认为提取的特征量越多越好。实际上,很多特征量具有高度相关性,也并非所有特征都有助于侧扫声呐图像分类,根据具体数据怎样合理地进行特征选择仍需要进一步研究。

#### 1.2.1.2 侧扫声呐图像自动分类算法研究

侧扫声呐图像自动分类算法的研究中,李庆武等<sup>[49]</sup>基于Contourlet变换后的纹理特征,应用支持向量机算法对图像大小为 $64 \times 64$ 的5种典型底质侧扫声呐样本图像进行分类(李庆武等,2011);熊明宽等<sup>[16-17]</sup>基于灰度和纹理共6种特征量,分别应用支持向量机、遗传小波神经网络等算法对泥、砂、礁石3种底质的典型样本图像进行了分类研究(熊明宽等,2012、2014);杨词银等<sup>[38][50]</sup>基于纹理能量特征、邻域灰度共生矩阵特征,应用K-均值聚类算法和三层BP神经网络分类算法对大小为 $64 \times 64$ 的泥、砂、石3种底质的典型样本图像进行分类(杨词银等,2005);胡玉薇<sup>[30]</sup>研究了水下声学图像的分