

THE BENTHIC BOUNDARY LAYER

Transport Processes and Biogeochemistry

水底边界层

——迁移过程与生物地球化学

〔加〕伯纳德·P. 布德罗

著

〔德〕布·巴克尔·约尔根森

范成新 等 译



NLIC2970937041



科学出版社

水底边界层

——迁移过程与生物地球化学

The Benthic Boundary Layer

Transport Processes and Biogeochemistry

[加]伯纳德·P. 布德罗 [德]布·巴克尔·约尔根森 著
范成新等 译



NLIC2970937041

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是关于海洋、湖泊水底边界层物理、化学、生物和地貌学等学科系统研究的专著,由近 20 位该领域著名专家学者撰写而成。全书共 15 章,主要从底部和沉积物水体的物质迁移与生物地球化学角度,论述了沉积物-水界面上覆水物理性质和水流特征;水底边界层颗粒物和溶质迁移;沉积物表面的微结构及其间隙水运动;沉积物早期成岩和生物引灌作用及与边界层物质交换效应;界面的有机质循环、底部动植物和藻类等生命体行为及影响等。此外还介绍了研究底部边界层湍流、对流扩散和溶质及颗粒迁移的微传感信息获取、高精度采样和模拟等技术手段。

本书可供从事海洋、湖泊和河流沼泽等水域的生物地球化学、水文物理学、界面环境化学、海洋学、地貌学、环境生物学和微观生态学等方面的科研人员、高等院校师生阅读。

Copyright © 2001 by Oxford University Press, Inc.

“THE BENTHIC BOUNDARY LAYER: TRANSPORT PROCESSES AND BIOGEOCHEMISTRY, FIRST EDITION”原版于 2001 年以英语出版。与牛津大学出版社协定出版此翻译版。

图书在版编目(CIP)数据

水底边界层:迁移过程与生物地球化学/(加)布德罗(Boudreau, B. P.)等著;范成新等译. —北京:科学出版社, 2013. 8

书名原文: The benthic boundary layer: transport processes and biogeochemistry
ISBN 978-7-03-038448-5

I. ①水… II. ①布…②范… III. ①水底群落-研究 IV. ①Q178.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 202042 号

责任编辑:朱 丽 杨新政 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京彩虹伟业有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 8 月第一次印刷 印张:23 1/2

字数:457 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者的话

近一个世纪以来,人们的研究涉及了水体底部物质和能量的迁移运动以及生物地球化学过程,但往往只局限在沉积物-水界面这样一个抽象的二维空间内。人们在水体污染等环境问题的研究上较多地关注外部污染源的发生、向水体内部输移过程和机制等,而相对忽视水体内部污染物质的迁移转化和循环的影响。实际上,发生在水体系统内部的,与水、沉积物和生物体等介质的能流和物流相关的生物地球化学微尺度循环,对水体水环境和生态系统的动态演变的诱发或促进作用更应得到重视。由国际著名的加拿大地球物理学家 Bernard P. Boudreau 博士和德国海洋生物学家 Bo Barker Jørgensen 博士主编的 *The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry*, 将我们带到水底边界层这一更为广阔和复杂的研究领域。水底边界层概念的出现,极大地开阔了人们的眼界。应该说该书是海洋和湖泊表层系统变化过程与机理研究中具有里程碑意义的代表性著作之一,具有很高的理论和应用价值。该书以海洋、湖泊和河流等大尺度水体为研究对象,从水底边界层的生物、化学、地质和物理学的宏观和微观研究角度,重点围绕水体底部能流、物流的运动和影响因素,给予了系统和深入的总结。

该书的学术价值在于全面介绍了水底边界层的结构、特征和物质迁移等专业性知识,从水底沙纹、沙丘、生物洞穴等微地形地貌角度,给出了溶质在沉积物-水界面交换的影响,早期成岩和有机质矿化效应,应用了大量的动力学模型为读者验证和计算了影响物质扩散通量方法。作者也首次详细介绍了水底大型底栖生物、植物、细菌和微藻在水底边界层流体中和沉积物内的物理阻碍、堵塞、密闭等行为,以及对底部水流、孔隙水对流、沉积物扩散层形成的影响等。该书还邀请了不同专业学者和技术人员,重点从微观角度和技术实用性方面,较为全面地向读者介绍了海底原位观察和测量装置、传感器探头、三维高分辨多普勒雷达等水底边界层机械化、电子化设备,详细介绍了其原理和对相关结果的解释,为帮助读者尽快汲取水底微观界面的知识提供了途径。

本译著出版得到国家自然科学基金重点项目(No. 40730528)和国家水体污染控制与治理科技重大专项湖泊水专项课题(2012ZX07103-005)共同资助。由于译者的文字和理解水平有限,书中难免出现疏漏之处,恳请专家、同行予以批评指正。如遇疑难之处,读者可参阅文中提供的参考文献。

参加全书翻译、审校的有:

第1章范成新译校;第2章桂智凡、蔡元锋译,尹洪斌校;第3章王倩、吴旭东译,何翔、范成新校;第4章王涛译,许笛、范成新校;第5章卢信译,丁士明校;第6章姜永见译,钟继承校;第7章李丹丹、韩存量译,何伟、范成新校;第8章范献方、卑其成译,商景阁、范

成新校;第9章宋洋译,王兆德、范成新校;第10章蔡贤雷、何伟译,范成新校;第11章毛志刚、李静译,张雷、范成新校;第12章尹刚、商景阁译,范成新校;第13章康玉辉、张雷译,范成新校;第14章赵海光译,古小治、范成新校;第15章贾育红译,申秋实、范成新校。

译者

2013年3月于南京

目 录

译者的话

第 1 章 引言	1
参考文献	3
第 2 章 沉积物-水界面上部流体物理学	4
2.1 水底边界层的组成要素	4
2.1.1 结构	4
2.1.2 能级和关联运动	6
2.2 历史回顾	8
2.3 水底边界层的水动力学	9
2.3.1 控制方程	9
2.3.2 对数层和科里奥利偏转	11
2.3.3 恒应力层结构	13
2.4 水动力模型的层次	16
2.4.1 局部闭合	16
2.4.2 涡黏性公式	17
2.4.3 非局部闭合体系	17
2.4.4 近底层离散型湍流模型	18
2.5 边界条件	20
2.5.1 布林克曼层和无滑移条件	20
2.5.2 粗糙度	21
2.5.3 水底边界层的发展,粗糙度均化和水的分流	23
2.5.4 粗糙度的局部效应和底床移动	24
2.6 生物影响	25
2.7 水底边界层的分层	26
2.8 地形影响	28
2.9 波生湍流边界层	29
2.10 底部剪切力估算	30
2.10.1 二次阻力定律	31
2.10.2 半对数速度梯度	32
2.10.3 底层雷诺应力和湍流动能	32
2.10.4 惯性子区域湍流动能耗散率	32
2.11 展望	33

参考文献	33
第3章 水底边界层微尺度的流速测量	39
3.1 热式测速技术	39
3.1.1 传感器设计	40
3.1.2 热传导相关性	42
3.1.3 测速计电路	42
3.1.4 热膜探针校准	43
3.1.5 与水体热膜测量相关问题	43
3.1.6 边界层中热膜测量	44
3.1.7 水底边界层热式测速研究实例	45
3.2 激光测速	45
3.2.1 激光多普勒测速	46
3.2.2 激光多普勒应用	48
3.2.3 粒子成像测速	49
3.2.4 粒子成像测速应用	53
3.3 断层扫描及沉积物中流体	53
3.3.1 断层扫描安装和基本原理	53
3.3.2 断层扫描技术实例和局限性	55
3.4 大尺度声学测量装置	56
3.5 水底边界层的实验槽研究	57
3.5.1 明渠水流特性	57
3.5.2 水槽实验的实际考虑	58
3.5.3 槽中水流的产生	60
3.5.4 特殊目的的水槽设计	60
3.5.5 水底边界层研究的水槽试验	61
参考文献	62
第4章 水底边界层悬浮颗粒迁移	69
4.1 沉降速率	70
4.2 涡流黏度和扩散率	75
4.3 边界条件	80
4.3.1 底部浓度边界条件	80
4.3.2 底部通量边界条件	81
4.3.3 底部边界条件: 非零 $E_s(0^+, t)$	83
4.3.4 来自底床非局部注入模型	84
4.3.5 非局部注入对 γ_0 估算影响	86
4.3.6 底部边界条件小结	87
4.4 结论	87
附录 本章符号说明	87
参考文献	88

第 5 章 沉积物-水界面溶质迁移	93
5.1 平整固相近表面的溶质迁移	93
5.1.1 经典的涡流扩散理论	93
5.1.2 周期性边界层模型	97
5.1.3 高阶闭合模型	99
5.2 多孔界面的质量迁移	100
5.2.1 多孔性和渗透性影响	100
5.2.2 表面粗糙度影响	102
5.2.3 沉积物表面的不稳定性和反应性	104
5.3 反应中的水底边界层质量迁移	107
5.3.1 反应时间尺度影响	107
5.3.2 湍流和非线性反应	107
5.4 结论与展望	109
参考文献	109
第 6 章 沉积物表面的微结构和性质	113
6.1 综合研究	113
6.2 沉积物-水界面的可视化	114
6.3 寻求一个相关途径	118
6.4 沉积物表面的微尺度性质	118
6.5 沉积物性质的时间变化	120
6.6 光学性质	122
6.7 结论	126
参考文献	126
第 7 章 渗透性沉积物中的孔隙流	130
7.1 对流迁移简介	130
7.1.1 分子扩散与对流迁移	130
7.1.2 孔隙水迁移的物理过程和达西定律	130
7.1.3 海洋环境中的对流迁移	131
7.2 对流迁移机制	132
7.2.1 水流引起的对流迁移	132
7.2.2 波浪引起的沉积物中对流	139
7.2.3 密度驱动的对流迁移	144
7.3 对流迁移影响	145
7.3.1 对流产生的时空上分布带	145
7.3.2 对流对沉积物地球化学影响	148
7.3.3 对流对自然环境影响	152
7.4 总结及未来研究建议	154
参考文献	155

第8章 边界层研究中的生物地球化学微电极	163
8.1 电化学微电极	168
8.1.1 参比电极	168
8.1.2 Ag/Ag ⁺ 半电池微电极	168
8.1.3 离子交换微电极	169
8.1.4 连续极化或非极化微电极	171
8.1.5 离子防渗膜气体微电极	173
8.1.6 电化学微电极的仪器设备	175
8.2 光学微电极	176
8.2.1 场辐射微探针	177
8.2.2 辐射和标量辐射微探针	178
8.2.3 荧光和表面测定微探针	178
8.2.4 光纤微电极:光学微电极	178
8.2.5 光纤微电极的仪器设备	180
8.3 生物微电极	181
8.3.1 甲烷生物微电极	181
8.3.2 硝酸盐生物微电极	182
8.4 扩散率和水流速微电极	183
8.4.1 扩散率微电极	183
8.4.2 流量微电极	184
8.5 电极插入造成的物理扰动	184
8.6 总结和展望	185
参考文献	186
第9章 成岩过程和沉积物-水物质交换	192
9.1 生物地球化学过程和水底边界层作用	193
9.1.1 水底边界层的直接作用过程:氧气吸收	194
9.1.2 水底边界层的间接作用过程:反硝化	199
9.1.3 水底边界层的反应过程:铁锰循环	201
9.1.4 不依赖水底边界层的过程	204
9.2 溶质分布特征和通量的定量模拟	205
9.2.1 成岩作用模型概述	205
9.2.2 固体的溶解和沉淀	207
9.2.3 沉积物中的氧吸收	208
9.2.4 沉积物和扩散边界层中的反应性迁移	210
9.3 固体物质交换模拟	211
9.4 本章思考	214
参考文献	214

第 10 章 水底边界层的原位采样技术	221
10.1 方法	221
10.1.1 颗粒物迁移的测定	221
10.1.2 溶质通量的测定	223
10.1.3 平台和运载器的布设	225
10.2 限制因素	227
10.2.1 空间尺度和时间变化问题	227
10.2.2 仪器影响	228
10.3 新出现实验对策	231
10.3.1 有关尚未解决的浅水区问题	231
10.3.2 BIOPROBE 的深海应用	236
10.4 结论	238
参考文献	238
第 11 章 生物引灌区内物质迁移与反应	243
11.1 生物引灌区内一般性迁移特性	243
11.2 掘穴、生物引灌与沉积物流体化	245
11.3 生物湍流扩散模拟	248
11.4 生物产生的对流	251
11.5 表观源-汇或非局部交换模型	252
11.6 生物引灌区内成岩作用分布	256
11.7 模拟平均微环境的迁移模型	257
11.8 溶质迁移与反应动力学的相互作用	262
11.9 生物成因的沉积物构造以及微尺度迁移	265
11.10 生物扰动区结构以及生物地球化学	267
11.11 结论	269
参考文献	269
第 12 章 水底通量对有机质循环的驱动	275
12.1 海底溶质交换速率和机制	275
12.2 大陆架上的生物地球化学循环	277
12.3 大陆坡上的生物地球化学循环	281
12.4 深海底部生物地球化学循环	284
参考文献	288
第 13 章 底部水流中的大型动物和植物	292
13.1 传感场的水流修正作用	293
13.1.1 化学传感	293
13.1.2 其他传感信息	295
13.2 水流对质量和动量传递的影响	297
13.2.1 与大型植物有关的质量和动量传递	297

13.2.2 其他水底环境的质量和动量传递	301
13.3 底栖种群与幼体动力学	302
13.3.1 产卵与受精	302
13.3.2 生物分散	304
13.3.3 着生与生息	306
13.3.4 着生概率	308
13.4 结论	309
参考文献	309
第14章 扩散边界层中的生物体	320
14.1 生命体黏性世界	321
14.1.1 生物在低雷诺数流体中的迁移	321
14.2 扩散迁移	323
14.2.1 溶质向运动颗粒物的迁移	323
14.2.2 颗粒物周围的扩散区	324
14.3 水底扩散边界层	326
14.3.1 水底边界层的微电极测量	328
14.3.2 水底边界层的动力学研究	328
14.3.3 表面粗糙度	332
14.3.4 水底边界层对微电极的干扰	333
14.3.5 扩散边界层厚度	334
14.4 扩散限制因素的克服	336
14.4.1 硫细菌梯度	337
参考文献	339
第15章 界面生物膜和微生物垫	343
15.1 生物膜和微生物垫的结构和组成	346
15.1.1 结构分析方法	346
15.1.2 结构组分染色	346
15.1.3 模型生物膜实例研究	348
15.2 生物膜和微生物垫功能	349
15.2.1 边界层作用	350
15.2.2 传质阻力的衰减	351
15.2.3 生物膜模型测定	353
15.2.4 生物膜和微生物垫中传质迁移	356
15.3 生物膜和微生物垫传质研究新方法	357
参考文献	359
通用符号列表	362

第1章 引言^①

水底边界层(benthic boundary layer, BBL)是由部分沉积物和水柱中水体组成,直接受水体和沉积物性质分布及过程影响。该水层对于海洋、湖泊甚至河流都有重要的生物学、化学、地质学和物理学意义和作用。例如,水底部是水流、波浪和湍流能量的主要耗散地,也是热量、溶质或颗粒物在水柱和底层间交换的场所,在其邻近地区沉积物质的成岩作用最为激烈,同时也是多种底栖动物、植物和微生物的生存之地(见第13~15章)。此外,水底边界层亦是溶质和悬浮颗粒物在垂直和横向交换转运最激烈的场所(见第4、5、9章),是发生强烈化学和生物反应的区域。

水底边界层存在许多不同的定义或概念,这取决于研究者所关心的研究尺度、性质和现象。不同学科研究者根据他们各自领域的重要程度而有所侧重,继而提出不同的定义、术语和标准测量方法。

底床附近水柱的物理化学性质多存在较大梯度,这主要是因为底床受自身性质的影响。在物理海洋学上,水底边界层厚度是由摩擦作用的高度决定的,而这个高度在海岸带和深海地区差异非常大。在深海地区,通常相当于埃克曼尺度(Ekman scale),即 u_* / f 的值,其中 u_* 为摩擦速度, f 为科里奥利参数(科氏参数)。在大陆架地区,水底边界层的厚度是由与最低海拔相匹配的可能流量决定的。在浅水水体或感潮地区,因密度分层限定其厚度可能是整个水柱高度。

大尺度的流体动力学定义趋向于将水底边界层看作是墙体。实际上,埃克曼尺度与沉积物-水界面现象几乎没有相关性,因此本书在这方面不做任何深度的讨论。就小尺度而言,水底边界层有其超常和独特的性质,这比其作用来说可能更为重要(图1.1)。具体来说,在厘米级尺度水平,水体内部的摩擦引起涡流混合会在沉积物表面构建出一个黏性亚层(viscous sublayer)(见第2章)。在最接近沉积物-水界面处的水膜仅有十分之一毫米厚,此层中分子扩散超过涡流扩散,从而带我们进入扩散边界层(diffusive boundary layer, DBL),也就是众所周知的扩散亚层(见第5章)。

这些与流量相关的特定区被明确界定为不渗透的沉积物和具有适度耗能的层位,它们不会造成沉积物的再悬浮。在多孔沙层中,沙覆盖于大陆架的大部分区域,并在湖泊和河流底床上广泛存在。对于这样的沙层,受水动力影响的沉积物就决定了布林克曼层(Brinkman layer)尺度,其厚度可能不超过一个或几个沙粒的粒径。然而,在多孔沉积物中,水流和沉积物表面形貌的综合作用会促使形成横向压力梯度,从而导致其上部厘米级到分米级的水体对流(见第7章)。这种流动对溶质和颗粒物在沉积物和水之间的通量有显著的影响。

此外,由界面生物和物理活动引起沉积物生物扰动和引灌等,均能增强水-沉积物之

^① 本章作者: Bernard P. Boudreau, Bo Barker Jørgensen.

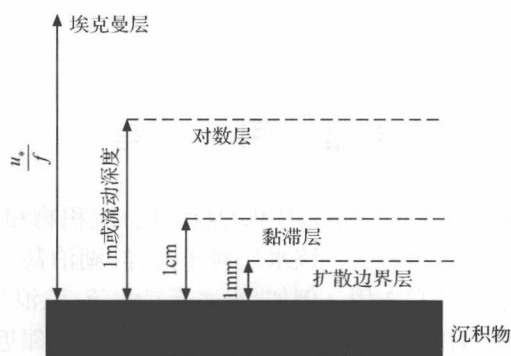


图 1.1 水底边界层组成的理想模型

在沉积物-水界面之上是埃克曼层，在这层中地球自转和底部的摩擦对其结构有重要影响；对数层，在这层中速度以对数形式变化；黏滞层，在这层中分子之间的黏滞效应非常重要；扩散边界层，在这层中溶质的扩散被分子扩散控制。在界面以下，物理过程被沉积物的流变学、地球动力学性质控制，然而溶质迁移是由在孔隙中分子的扩散、内部的活动（如生物引灌或生物扰动）、物理的扰动或水压相关的流动控制的。颗粒物的运移与溶质的迁移较为相似。

间的溶质和颗粒物的交换（见第 11 章）。相反，底部栖息的细菌、微藻和无脊椎动物产生的黏稠物对沉积物表层孔隙的堵塞、固化和密闭，会减弱对流运动并削弱其对沉积物的影响（见第 6 章）。因此，本书特设置专门章节来重点阐述发生在底床上部几分米内的现象和过程（见第 9、12 章）。

借助新技术的应用和新探索工作的实施，围绕水底边界层的研究正不断向前推进。水动力的性质现在已能用高时空分辨率的仪器和海量数据记录测量下来（见第 3 章）。比如，利用微型化和皮肤摩擦型的流量传感器，通过微粒影像速度测量法或激光多普勒流速仪（LDA）的 2D 和 3D 流速测量仪器，室内试验水槽的使用以及如深海机器人等一些仪器装置，可直接观察床底和现场进行数据收集，这些方法主要应用于边界层流场和湍流性质的测量（见第 10 章）。在最小的尺度范围内，利用微传感器对各种化学和物理参数进行测量，已成为理解沉积物-水界面的物质交换过程和微生物活性行为极其重要的手段（见第 8、14 和 15 章）。同时，理论和数值模拟的研究进展使得利用大量、复杂现场数据来验证有关水底边界层现象的假设、定量理解水底边界层过程变为可能（见第 2、4、5、9 和 11 章）。

当我们回顾对水底边界层及其功能认识发展过程时，对比 25 年前出版的关于这一领域的专著《水底边界层》（McCave, 1976），我们会发现在许多方面已经取得了惊人的进展，但也有一些方面进展还很小。在当时，水底边界层的若干性质尚不能测定出来，即使在实验室内也无法获得。然而在今天，用先进的仪器甚至在海底也能很容易直接测量获得。例如，多普勒雷达使我们可以在现场以 3D 高分辨率持续地对深水区域边界层的流量进行测定。不过，对水底边界层复杂物理特征，水体流动性和沉积物地形之间的相互作用方面的了解，仍然是有限的。

光电子技术的快速发展以及最近在计算机处理能力方面的变革，特别是个人笔记本电脑的应用，为有效收集和大批量处理数据提供了可能。从海量数据中提取有用信息和

对大量时空序列数据做出合理解释,正成为研究水底边界层物理和化学所必备的能力和技巧。由于高流速、波浪作用,或不稳定流造成短时相和无序时长出现的极高剪切力,对沉积物的迁移、底部的形态和扰动都有着决定性的作用。现场测量也必须捕获这些活动事件,以提供一个更为真实的底部动态影像。

最复杂和不可预测的是生物与它们物理化学环境之间的相互作用。生物对水底边界层的影响几乎是全方位的,如湍流减弱、动力集合、底泥沉积和再悬浮、边界粗糙程度、界面形态、沉积物孔隙率和扩散速率、营养物交换、孔隙水化学等,这些将可能是未来 25 年所要面临的挑战性研究课题。

面对分析水底边界层,特别是深水区的技术难点,1976 年 Ian McCave 就清楚地认识到新仪器的重要性:“边界层工作需要设计出能在海底运动并能提供足够能量运行的传感器,以及能长时间记录数据的机械化设备。这种装备能够进行以沉积物-水作为参考面的现场测量。”虽然这个构想是在 25 年前的科幻小说中出现的,但现在的科学仪器发展已经把小说变成事实(见第 10 章)。在过去的几十年间,已研制出一系列可移动式的机械化装备。这些设备最初多为短时间应用或用于位置固定,然而,最近移动探测器已经发展到可在海底运行几个星期或几个月,而且可进行反复测量和操作。它们可从一个地方移动到另一地方,以满足在各种沉积物表面上应用,并可避免由自身和试验而带来的扰动影响。而且,长期定时记录水底不同季节的影像,为人们提供了令人惊叹的高动态环境中的沉积物-水界面的图像。

本书简要概括了当前一些关于水底边界层过程和现象的知识,包括界面上下所发生的一些现象,目的是系统地整合一些当前在不同领域关于水底边界层观点。本书可为高级研究人员和学生在这个诱人的水体世界中继续深入研究水底生物学、化学、地质学时,提供珍贵的信息。

最后,我想感谢牛津大学出版社的职员:Joyce Berry, Nancy Hoagland, Mia McIver, 特别要感谢我们的编辑 Lisa Stallings,感谢他们的帮助和支持。Jay Silver(Dalhousie)为本书绘制了图表,在此也一并感谢。

参考文献

McCave, I. N. ed. (1976), *The Benthic Boundary Layer*. Plenum, New York

第2章 沉积物-水界面上部流体物理学^①

水底边界层是海洋环境组成的一部分,直接受海床和上覆水界面层的影响。以近界面的水流摩擦为主导的流动对很多区域的大尺度水循环具有较大的影响,这种影响在一些沿海地区,尤其以风浪为主的地方表现得更加明显(Clarke and Brink, 1985)。本章主要对湍流(turbulent flow)、边界层的流体进行阐述,而这些过程通常要显著小于区域尺度上的循环。本章主要对海底的物质交换和能量传递(见第3章)、热传递、沉积物(见第4章)、溶质(见第5、7、9、10、11、12章),以及生物(见第6、8、14、15章)进行深入的探讨。

对于水底边界层的研究已经有相关的报道,主要是关于深海边界层特定地点观察的综述(Wimbush and Munk, 1970; Armi and Millard, 1976; Bowden, 1978; Grant et al., 1985),模型和试验方法的简述(Sleath, 1984, 1990; Richards, 1990),以及对大陆架环境的近海底层流动的深入探讨(Smith, 1977; Soulsby, 1983; Grant and Madsen, 1986)。此外,对地球边界层物理学的一般性介绍可参考 Tennekes 和 Lumley(1972)以及 Stull(1989)的著作。边界层动力学的定量分析以及相关的微尺度的迁移现象可参考 Kays 和 Crawford(1980)的文章。在 Cantwell(1981), Boudreau 和 Guinasso(1981), Robinson(1991)和 Smith(1996)文章中有关于具有稳定且有受限制特点的湍流的论述,认为湍流在主导动量和标量转移机制方面起到重要作用,我们在本书适当的地方借鉴了这些资料和并外加报道了一些新的研究成果。

以下章节着重以定性和历史的视角论述水底边界层的关键问题。首先我们介绍了决定水底边界层内流动的方程式,并评估这些具有垂直结构特点的运动的时间尺度。在这个方程式决定的情景下,我们简要概述了在定量分析和边界层湍流研究中使用的水动力模型的类型。接下来是个简短的讨论专题,在这部分我们讨论了在边界层流体上施加不同边界条件下如静态的、粗糙的和运动的流体的水动力情况。本概述主要着重于稳定流体的动力学。波浪边界层是大陆架地区最突出的边界层,将有专门的章节做详细讨论(Grant and Madsen, 1986; Myrhaug, 1990),这里只做简要的论述。然而,对复杂流体的动力学的认识还仅仅是刚开始(Trowbridge and Agrawal, 1995)。

2.1 水底边界层的组成要素

2.1.1 结构

水底边界层是由平均流态、波浪、湍流构成的,每个组成要素可以根据其在时间和空间上尺度进行分类(图 2.1 和图 2.2)。平均流态是指在小时时间尺度或更长的时间内保

^① 本章作者: W. Brian Dade, Andrew J. Hogg, Bernard P. Boudreau。

持一个相对稳定的状态。平均流态通常与潮汐和盆底范围流动密切相关。通常,水底边界层的流速在 $1\sim 20\text{cm/s}$ 内。然而,浅水区的流速可达几米每秒。由于水底边界层本身受地球自转作用限制,流量在垂直方向上可发展至几十米甚至上千米。波浪与在流中不耗能且受重力驱动的波动较一致。这种波动的返回周期通常以秒计。在水底边界层内,湍流是指高频率的不规则的运动(涡旋),主要出现在流体经历陡降的底部。

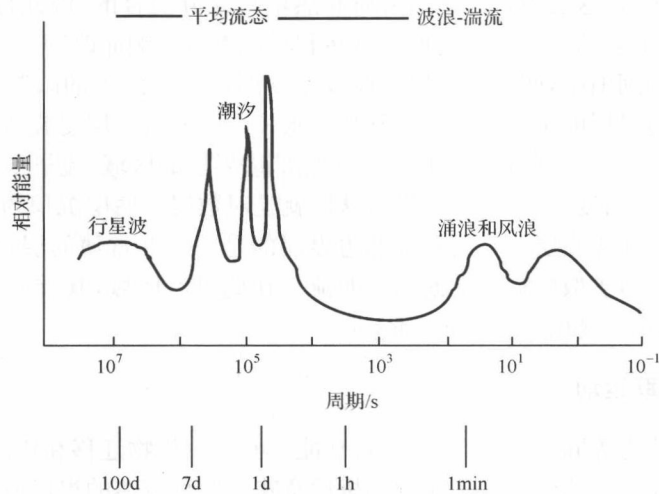


图 2.1 海洋中波高峰时运动能量光谱图解

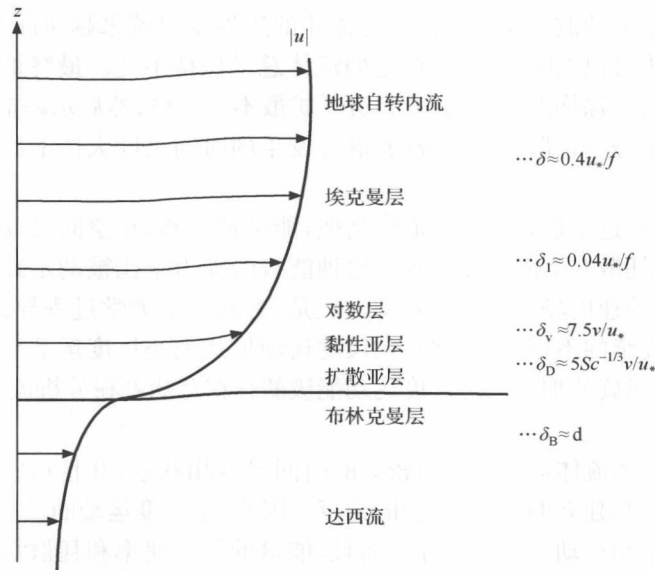


图 2.2 以传统方式区别的水底边界层的垂直结构示意图(包括沉积物和上覆水体)

右边的方程可用来计算这些亚层的厚度(另见第 5、7、9 章)。

湍流是造成水底边界层中物质垂直迁移的主要因素,因此受到广泛的关注。近海床界面的垂直湍流运动和波浪已经消失殆尽,是以动量黏滞迁移为主的。这就是黏滞亚层,尽管非常薄,但由于强大阻力阻碍动量的迁移因而速度在这层变化最大。在水底边界层上流动并不是顺畅的,有类似粗糙亚层的运动方式。黏滞亚层在水底边界层的下部,在该层中剪应力相对来说是恒定的,因而又称之为恒应力层(constant stress layer)。恒应力层也是一个流动区,在这层中相当多的溶质和热量是充分混合的,因此称之为恒定流层。然而,恒应力层水平运动的方向常受地球自转和科氏参数影响而改变。

在海洋和大型湖泊中,底部边界层的厚度不受周围环境深度的限制。由于地球自转的效应使得水底边界层的全部厚度扩展到整个水柱。底部边界层受旋转作用的最外层是埃克曼层(Ekman layer)。在高于底床但小于底部边界层的区域,流量不受地球自转的影响,并且平均速度随高度呈对数形式增加,这层就是对数层。底层沉积物下面可能存在压力驱动的达西流。连接底层沉积物和底部边界层的是一个非常薄的层,该层由于上面的湍流运动导致剪应力扩散影响到下面的达西流。在此过渡区域,其重要意义尚在讨论之中,这层被称为布林克曼层(Brinkman layer)。

2.1.2 能级和关联运动

湍流流动被认为等同于扩散,因其具备动能、动量、污染物迁移和传递的能力,其能力远超过分子扩散速度。湍流运动明显的随机性意味着两种流体的组成最初是相邻的然后随时间而分开。

将部分流体用被动示踪法如高温或示踪染料标记,在湍流流体中,能量和物质的迁移通过平流输送。湍流的波动将导致被标记流体的边界变得越来越扭曲和不规则。然而,如果分子扩散行为可以忽略不计,则标记的流体总量保持不变。最终被标记的流体边界将演变为小范围高示踪梯度的结构,并且分子扩散不可忽略;然后示踪剂将迅速和背景流体混合。当混合是分子扩散独自完成的,混合发生的时间尺度大体上比无湍流运动时间还短。

虽不尽相同,但这个过程与湍流能级类似,能量被转移,在空间尺度上逐渐变小的运动,直到黏滞能量耗散在下限尺度出现。这种能级的动力学比被动示踪剂的混合更加复杂,因为它们涉及的速度场与自身有互动。但是,有几个动力学过程导致运动尺度减少:①在高剪切区中连续的不稳定性;②从大尺度运动形式到小尺度运动形式转变中能量的抽走;③涡流伸展涡旋的加强。跨尺度运动能级的存在意味着在分析流体动力学时,黏滞性绝不应被忽略。

最小空间尺度的流体运动往往与较短的时间尺度相联系,并且这些运动相对于那些大尺度的平均流态是独立的,不受它们的约束。因此,小尺度运动的动力学仅取决于提供给它们能量的速率和运动学的黏滞性。而且,能量的供应速率和耗散可能非常相近。这些条件是形成普遍均衡理论(Kolmogorov, 1941)的基础。决定小尺度运动的参数有耗散速率 $\epsilon (L^2/T^3)$ 和运动学黏滞系数 $\nu (L^2/T)$, 其中 L 代表长度, T 代表时间。因此,仅仅从空间尺度分析,长度、时间和黏滞性的科尔莫戈罗夫尺度分别用 l_k 、 t_k 和 u_k 来表示。