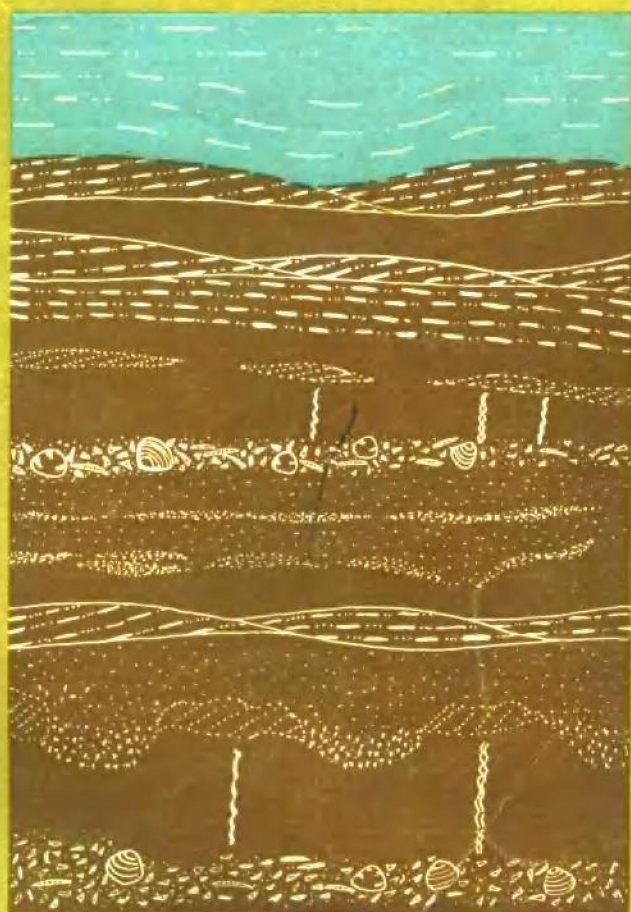


沉积构造与环境解释

《沉积构造与环境解释》编著组 编著



科学出版社

京)

24012

沉积构造与环境解释

《沉积构造与环境解释》编著组 编著

5433/11



00274982



200388598



科学出版社

1985

内 容 简 介

本书包括沉积构造与沉积环境解释两方面的内容。第一—三章从成因分类入手,采用文字和照片相结合的方式,系统地介绍物理、化学和生物作用在沉积物表面和内部所形成的各种沉积构造,论述它们的主要特征、成因及环境分布。第四章阐述根据原生沉积构造序列解释沉积环境的原理,着重描述和解释地质记录中常见的冲积扇、河流、三角洲、海岸-陆架、潮坪及浊流沉积的原生沉积构造序列。书中附有我国不同地区和不同时代的各种沉积构造的照片 268 张。

本书可供从事石油、煤炭等沉积矿产普查、勘探与开发以及沉积岩石学和沉积学研究的有关人员参考,也适合于作为沉积构造手册和地质院校沉积岩石学的补充教材。

沉积构造与环境解释

《沉积构造与环境解释》编著组 编著

责任编辑 周明鉴

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984 年 5 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

1985 年 10 月第二次印刷 印张: 5 1/4 插页: 40

印数: 4,143—5,156 字数: 111,000

统一书号: 13031 · 2565

本社书号: 3526 · 13—14

定价: 4.50 元

前 言

近年来,随着我国沉积学和沉积岩石学研究以及沉积环境分析工作的开展,特别是石油、煤炭等沉积矿产勘探、开发工作的迅速发展,已在沉积构造和应用沉积构造解释沉积环境方面积累了相当丰富的实际资料。为了适应日益发展的生产实践的需要和促进研究工作的进一步深入,现在有必要把大量分散的资料进行汇总,加以系统整理和详细描述,并赋予成因解释和环境意义,以供从事沉积矿产勘探、开发和沉积岩与沉积学研究的有关人员参考。这是编写本书的目的。

在本书中,我们采用文字和实物照片相结合的方式,从成因分类入手,着重介绍物理、化学和生物作用在沉积物表面和内部所形成的各种沉积构造,尤其是那些在环境解释中有用的沉积构造,论述它们的主要特征、成因及环境分布。考虑到广泛开展沉积环境分析的实际需要,我们将沉积构造与沉积环境结合起来,总结、描述并解释地质记录中常见的六种碎屑沉积环境——冲积扇、河流、三角洲、海岸、潮坪、浊流——所形成的沉积构造序列。为了便于对比和实际应用,我们从收集到的上千张沉积构造照片中精选了两百多张附于本书中,其中不仅有我国不同地区古代和现代的各种沉积构造,而且也包括了地表露头和钻井岩心中的沉积构造。

本书是在叶连俊、严钦尚、吴崇筠等沉积学家的倡导、鼓励和关心下,由中国科学院地质研究所陈景山和陈昌明、武汉地质学院孙永传、王德发和郑浚茂、同济大学张国栋和朱静昌负责编著的。参加单位及人员还有(按笔划为序):大港油田地质研究所张服民,中国矿业学院煤田地质系张鹏飞和殷宗昌,中国科学院地质研究所黄家宽和田兴有,辽河油田研究院金万连,江汉石油管理局勘探开发研究院刘安林,西安矿业学院地质系傅炳章,江苏省石油勘探指挥部石油地质大队郑肇信和余孟信,地质矿产部第一石油指挥部地质综合研究大队邓康龄和王庭斌,地质矿产部第二石油指挥部石油地质大队陈晓东,同济大学海洋地质系王益有、项立嵩、董荣鑫、王慧中和吴邦毓,武汉地质学院古生物教研室杨式溥和王珍和以及石油教研室李蕙生和马正,胜利油田地质科学研究院王素民和何立琨。其中,杨式溥和傅炳章提供了一些非常精美的照片。此外,王尧、王国忠、王清晨、王挺梅、田端孝、朱海虹、许耀明、庄振业、杨培基、李明诚、李福新、沈耀庭、沙庆安、吴振明、张荫本、陈志明、陈其英、陈家怀、赵东旭、赵希涛、侯方浩、洪庆玉、徐志明、高键、黄乃和、崔德树、强子同、傅泽明、曾学思、惠斌耀、盛章琪等同志以及国家地震局地质研究所遥感地质组也提供了一部分沉积构造照片。显然,本书是集体研究的成果。在写作过程中,得到了沉积学会、各有关单位的领导和同志们们的热情关心与大力支持;不少人提出了许多宝贵的建议和意见;武汉地质学院北京研究生部照相室王树元和中国科学院地质研究所照相室桂文立与张亚光负责完成了大部分照片的洗印工作。对此,我们一并表示深切感谢!

值得指出的是,这本篇幅有限的小册子,显然不可能包罗沉积构造及其环境解释方面的所有内容。而且,由于我们水平有限,所掌握的材料也不够,必然还会有许多精美的沉积构造照片尚未能收集到,缺点和错误在所难免,敬请读者不吝赐正。

目 录

绪言	(1)
第一章 物理成因的沉积构造	(3)
一、流动构造	(3)
(一) 波痕	(3)
(二) 冲刷痕	(13)
(三) 压刻痕	(15)
(四) 其它表面痕迹	(18)
(五) 层理	(21)
(六) 叠瓦状构造	(31)
二、准同生变形构造	(32)
(一) 负载构造	(33)
(二) 球状与枕状构造	(33)
(三) 滑塌构造	(34)
(四) 喷出构造	(34)
(五) 碎屑脉	(34)
(六) 旋卷层理	(35)
(七) 碟状构造	(35)
(八) 坑丘构造	(36)
三、暴露构造	(36)
(一) 雨痕和冰雹痕	(37)
(二) 干裂	(37)
第二章 化学成因的沉积构造	(39)
一、结晶构造	(39)
(一) 晶体印痕与假晶	(39)
(二) 鸟眼构造	(40)
(三) 示顶底构造	(40)
二、压溶构造	(41)
(一) 缝合线	(41)
(二) 叠锥构造	(42)
三、增生与交代构造	(42)
(一) 结核	(42)
(二) 葡萄状构造	(45)
第三章 生物成因的沉积构造	(46)
一、生物遗迹	(46)
(一) 足迹	(46)
(二) 爬迹	(46)

(三) 停息迹	(47)
(四) 潜穴	(47)
(五) 钻孔	(49)
二、生物扰动构造	(49)
三、生物生长构造	(52)
四、植物根痕	(53)
第四章 根据原生沉积构造序列解释沉积环境	(54)
一、冲积扇沉积的原生构造序列	(55)
二、河流沉积的原生构造序列	(56)
(一) 蛇曲河沉积的原生构造序列	(56)
(二) 辫状河沉积的原生构造序列	(58)
三、三角洲沉积的原生构造序列	(60)
四、海岸-陆架沉积的原生构造序列	(62)
五、潮坪沉积的原生构造序列	(64)
六、浊流沉积的原生构造序列	(67)
七、近岸水下扇沉积的原生构造序列	(68)
参考文献	(70)
索引	(73)

CONTENTS

INTRODUCTION	(1)
CHAPTER 1. PHYSICAL SEDIMENTARY STRUCTURES.....	(3)
Current Structures.....	(3)
Ripples	(3)
Scour marks	(13)
Tool marks.....	(15)
Other surface marks	(18)
Bedding	(21)
Imbricated structures	(31)
Penecontemporaneous Deformation Structures	(32)
Load structures	(33)
Ball-and-pillow structures	(33)
Slump structures	(34)
Ejected structures	(34)
Clastic dykes	(34)
Convolute bedding	(35)
Dish structures	(35)
Pit and mound structures	(36)
Exposed Structures	(36)
Raindrop imprints and hailstone imprints	(37)
Mud cracks.....	(37)
CHAPTER 2. CHEMICAL SEDIMENTARY STRUCTURES	(39)
Crystallization Structures.....	(39)
Crystal imprints and casts	(39)
Birdseye structures	(40)
Geopetal structures	(40)
Pressure-Solution Structures.....	(41)
Stylolites	(41)
Cone-in-cone structures	(42)
Accretion Structures	(42)
Concretions and nodules	(42)
Cluster structures.....	(45)
CHAPTER 3. BIOGENIC SEDIMENTARY STRUCTURES.....	(46)

Lebensspuren	(46)
Tracks.....	(46)
Trails	(46)
Resting traces	(47)
Burrows	(47)
Borings	(49)
Bioturbation Structures.....	(49)
Biogrowing Structures	(52)
Root and Rootlet Traces.....	(53)
CHAPTER 4. DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS AS INTER- PRETED FROM SEQUENCES OF PRIMARY SEDIMENTARY STRUCTURES.....	(54)
Sequence of Primary Structures in Alluvial Fan Deposits	(55)
Sequence of Primary Structures in Fluvial Deposits.....	(56)
Sequence of primary structures in meandering river deposits	(56)
Sequence of primary structures in braided river deposits	(58)
Sequence of Primary Structures in Deltaic Deposits	(60)
Sequence of Primary Structures in Coast-Shelf Deposits	(62)
Sequence of Primary Structures in Tidal Flat Deposits	(64)
Sequence of Primary Structures in Turbidite Deposits	(67)
Sequence of Primary Structures in Near-shore Subaqueous Fan Deposits	(68)
References.....	(70)
Subject Index	(73)

绪 言

沉积构造是沉积物和沉积岩中最常见而又最容易直接观察到的主要特征之一。无论是研究沉积物或沉积岩本身,还是解释沉积环境,都必然要涉及到沉积构造,尤其是原生沉积构造。沉积构造指的是沉积物在沉积时到石化之前由物理、化学、生物等作用在沉积物内部或者沿着沉积物与流体的界面所形成的构造,例如层理、波痕等。在沉积过程中产生的并受沉积条件所控制的沉积构造称为原生沉积构造 (primary sedimentary structures),例如各种表面痕迹、交错层理等。在沉积物沉积之后和固结之前由准同生变形作用所形成的沉积构造(如滑塌构造)也可看作为原生沉积构造。而在沉积期后由压实作用、成岩作用等所产生的沉积构造则称为次生沉积构造 (secondary sedimentary structures),如缝合线、成岩结核等。

研究沉积构造有助于: 1) 确定地层顶底,进而确定地层层序; 2) 确定沉积物搬运与沉积的方式、沉积介质的性质以及流体的动力状况; 3) 恢复沉积盆地中的古水流和古沉积环境; 4) 估计沉积后的物理与化学变化。因此,对沉积构造的研究历史悠久,已发表了大量的专题论文和专著(例如 Дитричевон, Либровином, 1969; Pettijohn, Potter, 1964; Conybear, Crook, 1968; Pettijohn, Potter, Siever, 1973; Reineck, Singh, 1973, 1980; Pettijohn, 1975; 刘宝珺, 1980)。近年来,随着对现代沉积物中沉积构造的研究、用水动力学观点解释沉积构造以及水槽实验的开展,使得对沉积构造的认识更加深入和更加理论化了。有关这方面的内容可参阅 Middleton (1965)、Allen (1970, 1982) 等的有关专著。

但是,关于沉积构造,不仅术语繁多,而且分类也很不一致。一个合理的分类既可以使看起来似乎零乱的各种事物条理化,而且也会给研究工作和实际应用带来不少方便。沉积构造既可以根据它们的形状或几何形态以及产出位置作出形态分类,也可以按照它们形成时所涉及的作用进行成因分类。我们在综合前人研究成果的基础上,采用成因和形态相结合的分类方法,首先按形成机理将沉积构造分为物理成因的、化学成因的和生物成因的沉积构造三大类,并分别在第一、二和三章中加以描述。前两大类属于无机沉积构造,第三大类为生物沉积构造。然后,根据成因和形态特征,并考虑到实际应用的方便,作进一步划分(表1)。

一定的水流作用于一定的沉积物,可以产生一定的原生沉积构造。也就是说,当水流条件相同时,必然形成基本特征相似的原生沉积构造。据此,可以将沉积构造与水动力条件有机地联系起来,并利用这种关系来解释形成该种沉积构造时环境中的水动力状况,进而作出环境解释。另一方面,也由于原生沉积构造在遭受成岩作用时很少改变其基本特征,而且研究和观察沉积构造不必依赖于复杂的仪器和花费很高的成本。因此,目前已广泛地利用原生沉积构造及其序列作为判别沉积环境的有用工具(例如, Reineck, Singh, 1973; Harms, Southard, Spearing, Walker, 1975)。当然,由于多数的沉积构造可出现于不止一种的沉积环境中,例如水流波浪在河流、海岸、甚至浊流环境中均可发育。因此,一般

表 1 沉积构造分类表

物理作用	化学作用	生物作用
物理成因构造	化学成因构造	生物成因构造
无机沉积构造		生物沉积构造
流动构造 波痕 冲刷痕 压刻痕 其它表面痕迹 层理 叠瓦状构造 准同生变形构造 负载构造 球状与枕状构造 滑塌构造 喷出构造 碎屑脉 旋卷层理 碟状构造 坑丘构造 暴露构造 雨痕 冰雹痕 泡沫痕 干裂	结晶构造 晶体印痕与假晶 鸟眼构造 示顶底构造 压溶构造 缝合线 叠锥 增生与交代构造 结核 葡萄状构造	生物遗迹构造 足迹 爬迹 停息迹 潜穴 钻孔 生物扰动构造 生物生长构造 植物根痕

都不把单个沉积构造的存在与否作为环境解释的确实标志。但是,人们通过广泛的研究,发现保存于沉积序列中的沉积构造的垂向序列或组合对特定环境来说却是典型的。这对于比较准确地判别沉积环境无疑是十分重要的。因此,我们将在第四章概括地介绍地质记录中常见的几种陆源碎屑沉积环境所形成的沉积构造序列或组合。

第一章 物理成因的沉积构造

物理成因的原生沉积构造,是由于沉积物在搬运和沉积时以及沉积之后不久,在流体流动、重力等物理因素作用下而产生的。它们大致可分为三类:流动构造、变形构造及暴露构造。

一、流动构造

流动构造 (current structures) 系指沉积物在搬运和沉积时,在流体 (主要是水和空气) 的流动作用下形成的构造。其中有些是以沉积作用为主在沉积物表面或内部形成的构造,例如波痕、层理等。而且,多数内部构造与其表面特征有极为密切的成因关系,如某些交错层理就是由波痕的迁移和相互叠置所形成的。另一些则是在侵蚀作用下形成的表面构造,如冲刷痕和压刻痕。在古代沉积物中,可以发现它们在岩层底面上保存得更好些。

我们将流动作用形成的沉积构造归纳为六组,并在不同的标题下加以论述。

(一) 波 痕

波痕 (ripples or ripple marks) 是非粘结性物质 (主要是松散砂) 在水流、波浪或风的作用下形成的、具有波状起伏的表面痕迹,有人也称为波纹或沙纹。在现代和古代沉积物中,波痕是最常见的表面或层面特征之一。

一个波痕由一个脊和一个谷组成。因此,相邻的两个波脊共用一个波谷。在自然界中,单个波痕较少见,往往是成组出现。成组出现的、波脊近于彼此平行的波痕称为波痕列 (ripple train)。

波痕通常是用平行于流动方向即垂直于波脊延长方向的纵剖面来描述其大小和形态的。下面简要地介绍描述波痕时所用的一些重要术语 (图 1)。

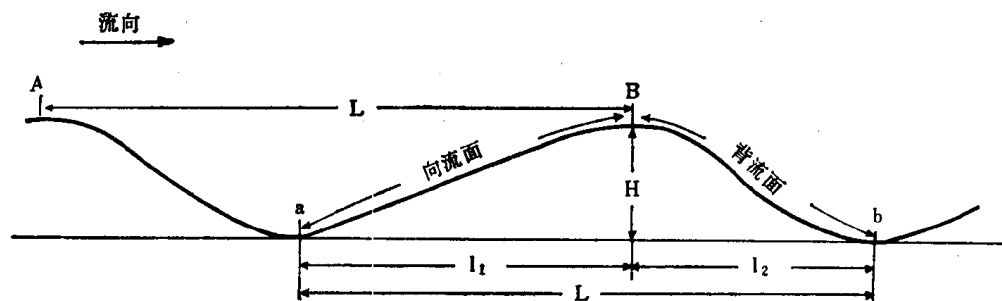


图 1 波痕要素图

A、B: 脊点 a、b: 谷点 L: 波长 H: 波高 l_1 : 向流面水平投影长度 l_2 : 背流面水平投影长度

脊点: 波痕纵剖面上的最高点;

谷点: 波痕纵剖面上的最低点;

向流面: 波痕中面向流动方向的缓倾斜面;

背流面: 波痕中背向流动方向的陡倾斜面;

波长(L): 在垂直于波脊的断面上,相邻的两个脊点或谷点之间的水平距离;

波高(H): 波痕的脊点与谷点之间的垂直距离;

波痕指数(RI): 波长与波高之比 (L/H);

对称指数(RSI): 向流面水平投影长度与背流面水平投影长度之比 (l_1/l_2)。

波痕也可以根据波脊形态和波痕对称性进一步描述。此外,有人还使用了另一些描述术语,例如,表示波脊间平行程度的**平行指数**、说明波脊弯曲程度的**直度指数**、指示波脊延伸长度的**连续指数**等 (Tanner,1967)。

关于波痕的分类,首先可以按形成动力分为水流波痕、浪成波痕、孤立波痕、干涉波痕、改造波痕及风成波痕,然后再根据其大小或形态进一步划分。

1. 水流波痕

单向水流在非粘结性物质的表面上所形成的波痕为水流波痕 (current ripples)。波痕垂直于水流方向延长,向流面平缓,背流面较陡。可以利用这些特征来恢复水流的大致方向。水流波痕的脊有不同的形状: 直线形、波曲形、链形、舌形、新月形、菱形等;可以是连续的,也可以是断续的。波脊形态的变化主要与水深和流速有关。一般来说,随着水深减小和流速增大,波脊形态由简单变复杂,由连续变断续 (图 2)。

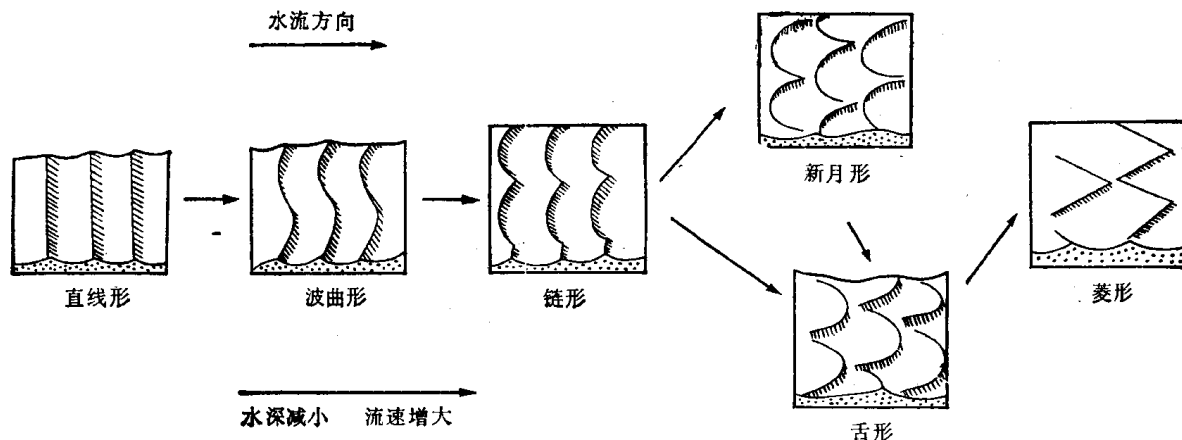


图 2 水流波痕的波脊形态 (顶视) 及其与水深和流速的一般关系的示意图

发育完善的水流波痕,由一个或几个向流面纹层、许多前积纹层以及一个或几个水平的底积纹层组成 (图 3)。前积纹层是波痕的主要组成部分,其倾角和形态变化较大。前积纹层的倾角最大可达 35° ,而形态可变化于直线形、切线形、凹形和 S 形之间。控制前积纹层倾角和形态变化的主要因素是: 1) 流速和底床切应力 (bed shear stress), 2) 深度比,即水流深度与沉积盆地深度之比, 3) 沉积物类型 (Joplin, 1963, 1965)。简单地说,随着流速的增大,前积纹层的形态从直线形——切线形——凹形——S 形 (图 4)。小的深度比 (较深的水) 有利于角度较陡的直线形前积纹层的沉积,而较大的深度比 (浅水) 则有利于

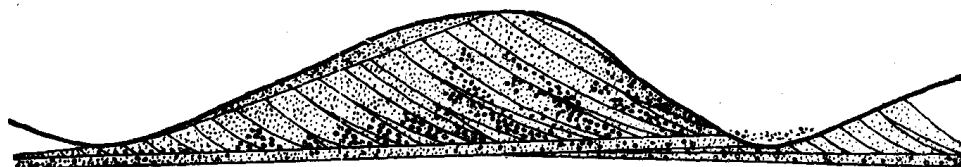


图3 发育完善的水流波痕的内部构造和分选效应

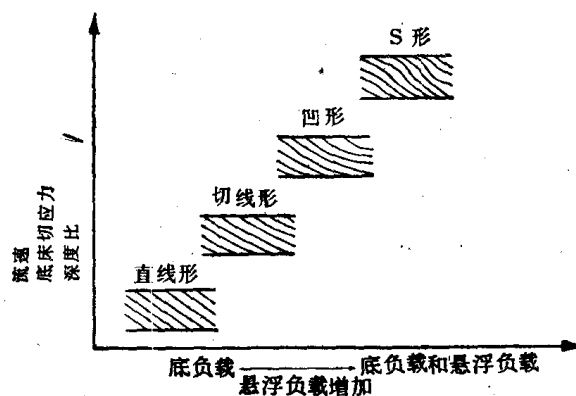


图4 前积纹层的形态及其控制因素

(根据 Joplin, 1965, 略加修改)

发育缓倾斜的切线形前积纹层。当其它条件都相同时,沉积物变细或者粘土含量增多时,前积纹层的倾角减小。

在水流波痕中,粗颗粒往往集中在前积纹层的外侧和底部。也就是说,波谷中的沉积物比波脊上的粗(参见图3)。这是因为颗粒在顺波痕背流面塌落时垂直于滑动面进行分选,因此粗颗粒往往堆积在外侧。另一方面,在重力影响下,较大的颗粒由于下降速度较快,趋于富集在背流面底部。但是,这种分选效应由于明显地受背流面长度的控制,因此在大波痕中比小波痕中表现得更清楚些。

(1) 小水流波痕

波长在4—60厘米、波高在0.3—6厘米范围内的水流波痕称为小水流波痕 (small-current ripples)。在描述中,为了简单起见,将“水流”两字省略,简称为小波痕。它的波痕指数总是大于5,多数在8—15之间。小波痕不可能在粒径大于0.6毫米的砂中生成。因此,它们总是产于粒径小于0.6毫米的砂质表面上。能在细砂中产生小波痕的最低水流速度是20厘米/秒左右,粉砂中的则为8—15厘米/秒 (Rees, 1966)。

这种波痕在河流、海岸、潮坪等浅水环境中十分普遍,在湖泊、三角洲、陆架、甚至浊流环境中也是常见的。

小波痕按照波脊形态可以分为下列几种:

1) 直线形小波痕(图版1-1、2) 它们的波脊基本上成直线形延伸,且大致相互平行。它们与不对称浪成波痕的区别在于波痕形态较扁平,波痕指数有时特别大,波脊很少有分叉现象。这种波痕通常是在水流速度较低的情况下形成的。

2) 波曲形小波痕(图版1-3、4) 其波脊呈波曲形或弯曲形,延伸较长。相邻的波曲脊一般是不同相位的,即波脊的向前突出部分不在同一直线上。

3) 链形小波痕(图版 2-1) 波脊的弯曲程度比波曲形的大,形似链子。但波脊基本上是连续的,实际上可看作为波曲形与舌形之间的过渡类型。

4) 舌形小波痕(图版 2-2) 波脊不连续,呈舌形,向前(下游方向)伸出。舌形体的排列一般是不同相位的。

5) 菱形小波痕(图版 2-4) 波脊不连续,单个波痕体大致为菱形,其下游侧有两个陡的背流面,它们相交成一个指向下游的锐角。它的另一个特征是波脊特别低,因此它们可能只以菱形或鱼鳞形图案出现在近于平滑的沉积物表面上。这种波痕一般是在高流速和极浅水(1—2 厘米深)的条件下形成的,有时甚至在几毫米厚的水膜下也可发育。它们往往由海滩上的回流所产生,故有人(例如 McKee, 1953)称之为回流痕(backwash marks)。还有一种波痕,其成因也与海滩上的回流有关,我们暂称之为低脊小波痕。它的特点是波脊呈连续的弯曲形,但特别低;向流面缓而长,背流面陡而短(图版 4-1、3)。形成这种波痕的水流速度可能要比产生菱形小波痕的小些。

显然,小波痕的波脊由直线形向菱形的变化,反映了水流能量的逐渐增大。因此,从直线形小波痕到菱形小波痕是一个连续变化的系列,其间存在着各种过渡类型。在自然界中,上述的这几种波痕可以单独出现,但实际上更多的则是以它们之间的过渡形态产出(图版 2-3,图版 3-1、2)。

(2) 大水流波痕

波长在 0.6—30 米、波高在 0.06—1.5 米范围内的水流波痕可称为大水流波痕(mega-current ripples),简称为大波痕。这种波痕与水动力工作者所称的沙丘或沙垅(dunes)基本相当。它的波痕指数一般在 15 以上。

通过大量的研究,发现大波痕和小波痕与水流的一般关系是相似的。但是,大、小波痕之间却没有确定的中间形态。而且,在大波痕的向流面上可以同时产生活动的小波痕。所以,一般认为这两种波痕的成因模式是完全不同的。

大波痕主要产于粒径大于 0.6 毫米的砂中,多数发育于河流和潮道环境中,在海滩和潮坪上也常见到。但是,在古代沉积物中,保存完整的大波痕并不象小波痕那样常见。这大概是由于其个体较大,在露头上或岩心中一般难以鉴别;另一方面,也因其大而更易受到改造和侵蚀,通常只留下它的内部构造,即大波痕层理。

大波痕也可以按波脊形态分为:1) 直线形大波痕(图版 4-4);2) 波曲形大波痕(图版 4-2);3) 新月形大波痕,波脊不连续,呈向后(上游方向)弯曲的新月形,即波脊两端相对于中部向前延伸(参见图2);4) 舌形大波痕和 5) 菱形大波痕。最后两种比较少见。这些波痕的形态和内部构造与相对应的小波痕基本相似,所不同的只是规模和大小而已。

(3) 巨水流波痕

波长在 30 米以上的水流波痕便称为巨水流波痕(giant-current ripples),简称巨波痕。它们的波长一般为 30—1000 米,波高 1.5—15 米,波痕指数通常大于 30,有时可达 100。巨波痕的波脊一般呈直线形或波曲形(图版 5-1),向流面上常常上叠有大波痕。内部构造比较复杂,主要由大波痕层理组成,表现出内部构造与外部形态不协调。巨波痕与大波痕之间存在着过渡形态。因此,不少人并不区分这两种波痕,而将巨波痕与大波痕归为一

类。

巨波痕至少要在几米深的水中才能形成。所以，一般认为它们大多分布在水深较大的环境中，如浅海和大河中。但我们曾在北戴河鸽子窝的前滨下部见到过巨波痕（图版5-1）。

（4）逆行沙丘

逆行沙丘（antidunes）是指在弗劳德数（ F ）¹⁾ 大于1的急流条件下，在松散砂质表面上形成的一种与水面波同相位的沙丘状构造，有人也称为反丘或者逆行沙波（regressive sand wave）。它们通常具有较长的脊，形态大致对称，波长一般为几厘米到六米，起伏较小，向流面和背流面均较平缓，波高一毫米到45厘米不等。

逆行沙丘可以向下游方向迁移，也可以保持原地不动，通常是向上游方向移动。相应地，逆行沙丘具有三种不同的内部构造。在第一种情况下，不明显的低角度纹层沉积在背流面上（图5-A）；第二种情况则是纹层覆盖在整个逆行沙丘上（图5-B）；在第三种情况下，水流从沙丘背流面上侵蚀出来的砂粒顺流运动，沉积在下一个逆行沙丘的向流面上。因此沙丘显示出向上游方向移动（图5-C），故称为逆行沙丘。

由于逆行沙丘是在水浅流急的条件下产生的，所以它们一般发育于海滩环境中。但

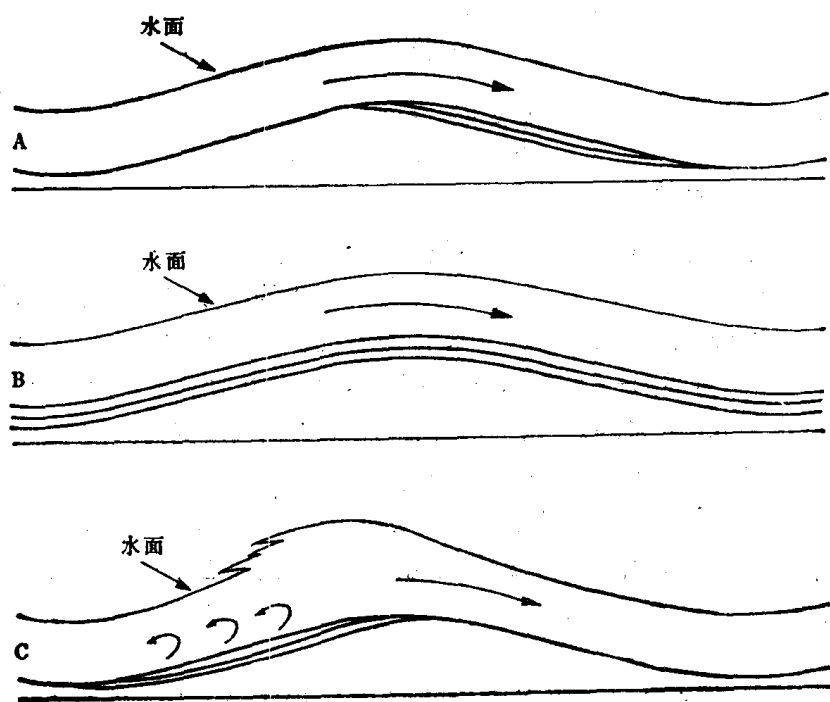


图5 逆行沙丘中三种沉积方式的示意图

解释见正文（据 Reineck, Singh, 1973）

在潮坪、河流及浊流等环境中也可见到。在古代沉积物中，保存完好的逆行沙丘很少见到。而且，由于逆行沙丘中的沉积作用是连续的，因而内部构造不甚明显，所以通常较难识别。它们一般以与平行层理伴生的逆行沙丘交错层理的形式保存在地质记录中。

1) $F = V/\sqrt{gh}$ ，其中 V 是流速， g 为重力加速度， h 是水流深度。

从以上对水流波痕的描述可以看出,它们的形成和变化,与水流速度、水流深度、沉积物粒度等参数有密切的关系。我们引用赖内克和辛格 (Reineck, Singh, 1973) 根据水槽实

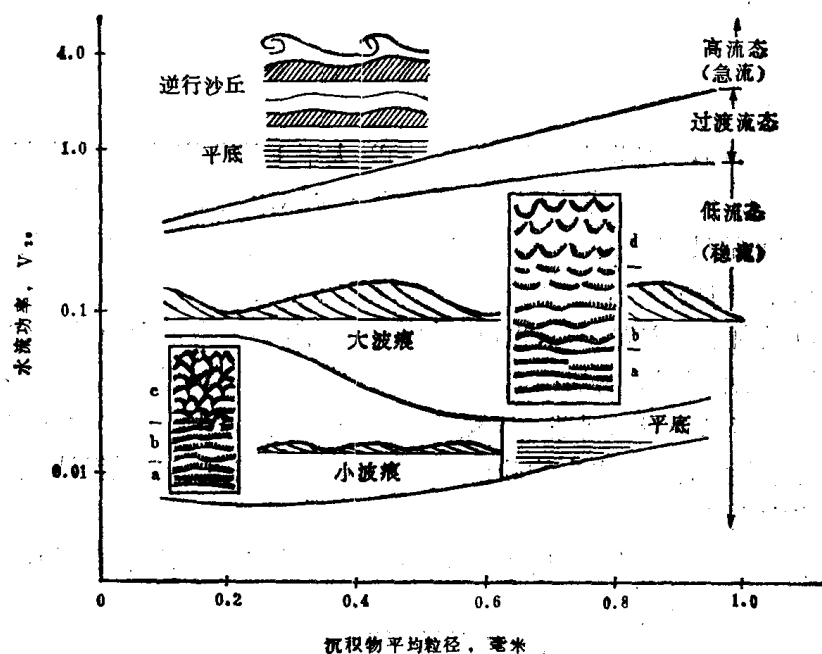


图6 各种底形及其与沉积物粒度和水流功率的关系
(引自 Reineck, Singh, 1973)

a: 直线形波痕 b: 波曲形波痕 c: 舌形波痕 d: 新月形波痕

验资料所作的一张图(图6)来说明这种关系。简单地说,在弗劳德数(F)小于1的低流态条件下,随着水流功率($V\tau_0 = \text{流速} \times \text{流体和沉积物的比重} \times \text{水流深度} \times \text{能量梯度的斜率}$)的增大,在粒度小于0.6毫米的砂中,由没有沉积物运动的平底变为具有小波痕的底形,而且波脊形态由直线形→波曲形→舌形。当水流功率再增大时,小波痕变为大波痕。而在粒度大于0.6毫米的砂中,则是由低流态平底直接变为大波痕。其波脊形态也随着水流功率的增大由直线形→波曲形→新月形。水流功率再增大,也就是在 F 大于1的高流态条件下,首先出现有沉积物运动的高流态平底,接着产生逆行沙丘。在 F 近于1的过渡流态条件下,大波痕不稳定,出现大波痕到高流态平底之间的过渡底形。

2. 浪成波痕

浪成波痕 (wave ripples), 也称为摆动波痕 (oscillation ripples), 是波浪作用于非粘结性沉积物表面所产生的波浪形痕迹。它们的波脊一般较直, 垂直于波浪传播方向延伸, 而且往往表现出分而复合的现象。

控制浪成波痕形成和大小的因素主要有两个。第一, 波浪的传播速度与波长。当波速为9—90厘米/秒时, 波浪就会在砂质表面上造成波痕; 当波速超过90厘米/秒时, 波痕消失, 变成有沉积物运动的平底 (Inman, 1957)。波痕的规模趋向于随波长的增长而变大。第二个因素是沉积物的粒度。一般来说, 粗砂中的浪成波痕要比细砂中的大, 而波痕指数则比细砂中的小得多。

浪成波痕主要发育于浅水环境中,如湖滨、潮坪、海滩等环境。一般认为,水深超过200米便不能生成浪成波痕。

浪成波痕可以根据波脊的对称性分为对称的和不对称的浪成波痕。

(1) 对称浪成波痕

对称浪成波痕 (symmetrical wave ripples) 的突出特征是波脊尖而对称 (图版 5-2),一般呈直线形,可以出现分叉 (图版 5-4)。波谷圆滑,沿轴部有时可出现平行的次级小脊 (图版 6-1)。这种波痕的波长一般为 0.9—200 厘米,波高 0.3—23 厘米,波痕指数 4—13,大多数为 6—7。

典型的对称浪成波痕的内部构造非常特征。波脊中的纹层表现出中心部分交叉叠覆的人字形构造,而波谷中的纹层则具有倒人字形构造。根据这种特征和波脊的对称形态,不难与直线形小水流波痕和不对称浪成波痕相区别。

(2) 不对称浪成波痕

不对称浪成波痕 (asymmetrical wave ripples) 的特征是波脊具有不对称的形态,一般呈直线形,而且往往表现出分而复合的现象 (图版 5-3)。其波长一般为 1.5—105 厘米,波高 0.3—20 厘米,波痕指数 5—16,大多数是 6—8,对称指数为 1.1—3.8。

这种波痕与直线形水流波痕很相似,也具有陡的背流面和缓的向流面 (图版 6-2、3)。其内部也由一个底积纹层和主体部分的许多单斜前积纹层所组成。一般可以根据下列特征区别这两种波痕: 1) 浪成波痕的波脊往往出现分而复合的分叉形式,而水流波痕的波脊则多中断并被别的脊所替代; 2) 波长小于 4.5 厘米的不对称波痕一般属于不对称浪成波痕,波痕指数大于 15 或对称指数大于 3.8 的不对称波痕则只能是水流波痕; 3) 浪成波痕的前积纹层往往表现出成束的分枝状,并且通过波谷延伸到相邻波痕的翼部上。

3. 孤立波痕

当水流或波浪作用于砂供应不足的非砂质表面上时所形成的不连续波痕就是孤立波痕 (isolated ripples),在有的文献中也称为不完整波痕 (incomplete or starved ripples)。它们往往呈孤立的、底平上凸的砂质透镜体出现在泥质表面上 (图版 6-4)。当孤立波痕嵌在泥质沉积物中时就组成了透镜状层理。这种波痕与正常波痕很相似,只是发育不完整而已。因此,其波高往往较低,波痕指数较大。

水流波痕和浪成波痕在条件合适时均可发育为孤立波痕。因此,孤立波痕可以按形成动力分为孤立水流波痕和孤立浪成波痕,然后分别按大小和对称性进一步划分。

孤立波痕的环境分布与水流波痕或浪成波痕相似,所不同的是它们大多出现在砂供应不足的环境中,如砂泥质海滩或潮坪上。

4. 干涉波痕

在浅水地区,由不同方向的波浪或者不同方向的水流与波浪同时或基本同时地联合作用于砂质沉积物表面所形成的波痕称之为干涉波痕 (interfering ripples)。它们一般由不同方向的两组或两组以上的波痕组合而成;既可以是浪成波痕 (对称或不对称的) 与水