黄河三角洲
现代沉积作用及模式

地质矿产部海洋地质研究所

成国栋　主编

石油大学图书馆

地质出版社

P512.2
013
054724

黄河三角洲现代沉积作用及模式

成国栋　主编

P512.2/13

00469999

200395189

石油大学图书馆（东营）藏书

地质出版社

（京）新登字085号

内 容 介 绍

本书是中荷合作项目“黄河三角洲现代沉积作用、沉积模式及其在古相沉积物中的应用”的阶段研究成果。书中详细讨论了黄河三角洲的沉积动力学、沉积环境和沉积物、三角洲进积与蚀退、垂向序列和三维格架，探讨了黄河三角洲沉积模式以及黄河三角洲开发治理中应注意的地质问题。

本书可供从事沉积学、海洋地质学、地貌学及水沙运动学等专业人员参考。

黄河三角洲现代沉积作用及模式

成国栋 主编

*

责任编辑：杨珊珊

地质出版社出版发行

（北京和平里）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店总店科技发行所经销

*

开本：787×1092 1/16 印张：7.25 字数：167000

1991年9月北京第一版·1991年9月北京第一次印刷

印数：1—850 册 国内定价：5.10 元

ISBN 7-116 00887-X/P·757

序

Gilbert 对 Bonneville 湖三角洲的研究，奠定了现代三角洲沉积学研究的基础。所谓 Gilbert 三角洲模式，至今仍然是教科书中的重要内容。从本世纪20年代开始，陆续发现了一批与三角洲有关的油气藏，进一步推动了对三角洲的研究，于是有密西西比三角洲沉积模式的出现。几十年来，它一直作为经典模式被广为引用。应当说，这些具有里程碑性质的巨大研究工程，确实是对人类知识宝库的重大贡献。

但是，密西西比三角洲模式并不能囊括世界上所有的三角洲。黄河三角洲就是一个具有独特特征而需要深入研究的新类型。

黄河以其巨大的输沙量著称于世。其载荷主要是极细粒的粉砂物质。大量悬浮物使河水的密度增高，呈稀薄浊流倾泻入海。这种沉积作用既不同于正常河流，也不同于浊流，应当有自己独特的沉积机理和相模式。其向海加积的方式和因此而形成的粒序变化，也应有其特殊性。除此之外，多少世纪以来，黄河已由于下游河床不断淤高而成悬河。河道受到人工堤坝的限制。三角洲水上部分的沉积作用，不是受分支河道的控制，而是主要受以河流决口泛滥为主要特征的事件沉积作用的影响。因此，无论三角洲水上部分或水下部分的沉积作用，黄河在当今世界上都是独一无二的。从沉积学发展的角度而言，黄河三角洲的研究已经刻不容缓。

黄河这样的细物质高密度河流，在地质历史上未必是唯一的。用密西西比模式作为唯一模式去认识古相三角洲沉积，已不能满足更精细地解释地质历史的需要。借助黄河模式去识别难以认识的三角洲，是我们研究黄河的第二个目的。

黄河三角洲沃野千里，地下油气资源丰富，地处环渤海经济区的中心部位。开发黄河三角洲已成当务之急。黄河三角洲的开发治理，归根结蒂是治水治沙问题。当然就更需要了解其沉积作用规律。

鉴于以上考虑，地矿部海洋地质研究所与荷兰乌德勒支大学比较沉积学研究室合作开展了黄河三角洲沉积模式的研究，前后达四年之久。中荷双方的科学家作了很大的努力来揭示黄河三角洲沉积作用的特殊规律，成果是十分显著的。本书是第一阶段研究成果的总结。

黄河在中国大地上运行了多长时间，现在还没有定论。但它在塑造中国北方晚近时期地质历史中的作用，却是无论如何不能低估的。因此黄河三角洲沉积作用的研究，还应当向纵深发展。作为一个阶段总结，作者推出本书，旨在就教于国内同行，同时也为进一步的研究和开发提供一些素材，以便唤起更多同志的关注。我们相信，作为中华民族的象征，黄河必将在中华儿女的手中得到治理，并造福中国和世界人民。

何起祥于青岛

一九九一年二月

前　言

三角洲是河流动力和海洋动力相互作用下在河口形成的沉积物堆积体，历来是人类生活和农业生产的要地。近30年来发现大量煤田和油气的生成和储集与三角洲有关。因此，世界上对三角洲的研究方兴未艾，并力图通过对现代三角洲的研究、建立各种模式，以指导寻找古相三角洲的能源资源。

黄河以其极高的输沙量而著称于世。黄河的受水盆地（渤海）甚浅，河口水深仅几米到十几米。高含沙量水体在浅水河口塑造的黄河三角洲极不稳定，沉积环境多变，垂向序列复杂，三角洲进积、蚀退交替。因此，研究黄河三角洲现代沉积作用及其模式对丰富沉积学内容，开发治理黄河三角洲和提供与古相三角洲的对比模式都有重要意义。

本书是1986年到1989年中国地质矿产部海洋地质研究所和荷兰乌德勒支大学比较沉积学研究室合作项目（部控科技项目86110号）“黄河三角洲现代沉积作用、沉积模式及其在古相沉积物中的应用”的阶段研究成果。书中着重讨论了黄河三角洲的沉积动力学、沉积环境和沉积物，三角洲进积与蚀退，垂向序列和三维格架，探讨了黄河三角洲沉积模式，提出了黄河三角洲开发治理中应注意的地质问题。

参加本项目的中方科技人员有成国栋、薛春汀、李绍全、任于灿、丁东、周永青、潘为刚、李广雪、魏合龙、董万，荷方科技人员有梁瑞仁（S. D. Nio）、范海尔德（A. Van Gelder）、范登贝格（J. H. van den Berg）、贝茨（D. Beets）、皮斯曼（M. Peersmann）、斯多凡（T. Stavenga）、赫尔别格（K. Helbig）、坦帕尔（J. Temples）、尤格列（P. Jongerius）、爱斯曼（D. Eisma）、霍根图（R. Hoogendoorn）、博斯曼（D. Bosman）。项目负责人中方为成国栋、荷方为梁瑞仁。

本书由中方编写，全书共分七章。第一章和第七章由成国栋执笔，第二章由李绍全、魏合龙执笔，第三章由薛春汀、李广雪执笔，第四章由任于灿、丁东、董万执笔，第五章由成国栋、周永清、潘为刚执笔，第六章由成国栋、李绍全、薛春汀执笔。全书由成国栋统编。

本项目是在中国地质矿产部石油地质海洋地质局和外事局领导下，在海洋地质研究所业治铮、何起祥所长直接领导下完成的。海上地球物理调查由海洋地质研究所物探室担任，微体古生物及粒度分析由海洋地质研究所实验室完成。赵杰仁担任辅助工作。

由于水平有限，书中难免存在错误和缺点，敬请读者指正。

目　录

第一章　绪论 …… 1

第一节　黄河三角洲的自然条件 …… 4

一、黄河的特征 …… 4

二、渤海海底地形和水文概况 …… 5

第二节　黄河三角洲的地质背景 …… 7

一、渤海盆地地质概况 …… 8

二、黄河三角洲第四纪地质 …… 9

三、黄河三角洲全新世地层 …… 13

第二章　黄河三角洲的沉积动力学及泥沙运动 …… 15

第一节　三角洲平原的沉积动力学和泥沙运动 …… 15

一、黄河三角洲的径流量、流量、输沙量和含沙量 …… 16

二、黄河悬浮物质的粒度特征 …… 19

三、悬浮物质与河床表层物质的交换 …… 20

四、高沙水体的沉积作用 …… 21

第二节　黄河水下三角洲的沉积动力学和泥沙运动 …… 23

一、河口区的动力状况和泥沙运动 …… 25

二、三角洲侧缘（烂泥湾）的动力状况和泥沙运动 …… 34

三、黄河水下三角洲的沉积动力模式 …… 36

第三章　黄河三角洲沉积环境和沉积物 …… 38

第一节　黄河三角洲的沉积环境 …… 38

一、上三角洲平原亚环境 …… 38

二、下三角洲平原亚环境 …… 40

三、水下三角洲亚环境 …… 40

第二节　黄河三角洲沉积物 …… 40

一、三角洲平原沉积物 …… 40

二、水下三角洲沉积物 …… 49

三、水下三角洲微体化石的分布规律 …… 56

第四章　黄河三角洲的进积与蚀退 …… 61

第一节　黄河三角洲的进积 …… 61

一、现代流路（清水沟流路）的演化 …… 61

二、现代叶瓣的进积作用 …… 61

三、现代水下三角洲的形态特征 …… 67

第二节　黄河三角洲的蚀退 …… 70

一、蚀退的地质地貌特征 …… 70

二、蚀退速率 …… 71

三、蚀退因素与过程 …… 73

四、黄河三角洲的蚀退作用模式 ……75
第五章 黄河三角洲的三维格架 ……77
第一节 生长叶瓣（清水沟叶瓣）的沉积类型和沉积序列 ……77
一、清水沟叶瓣的沉积类型 ……77
二、清水沟叶瓣的垂向序列 ……78
三、清水沟叶瓣的泥沙分配 ……81
第二节 黄河三角洲的三维格架 ……82
一、黄河三角洲的基底 ……82
二、黄河三角洲复合体 ……84
三、黄河三角洲的垂向序列及模式 ……84
四、黄河三角洲的厚度 ……89
五、黄河三角洲的格架 ……92
第六章 黄河三角洲的沉积作用及模式 ……94
第一节 黄河上三角洲平原的沉积作用 ……94
第二节 黄河下三角洲平原的沉积作用 ……96
第三节 黄河水下三角洲的沉积作用 ……97
一、水下河道的沉积作用 ……97
二、三角洲前缘的沉积作用 ……98
三、三角洲侧缘（烂泥湾）的沉积作用 ……99
四、前三角洲的沉积作用 …… 101
五、废弃水下三角洲的沉积作用 …… 101
第四节 黄河三角洲的沉积模式 …… 101
第五节 黄河三角洲的发展过程 …… 102
第七章 黄河三角洲开发中的主要地质问题 …… 105
第一节 河道摆动问题 …… 105
第二节 海岸进退问题 …… 106
第三节 工程地质问题 …… 106
第四节 淡水资源问题 …… 107
主要参考文献 …… 109

第一章 绪 论

黄河是我国第二条大河，也是世界闻名的巨川。它发源于青海省巴颜喀拉山北麓，流经四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南等省区，于山东省东营市垦利县注入渤海，全长5464km，流域面积为752 443km²（图1—1）。

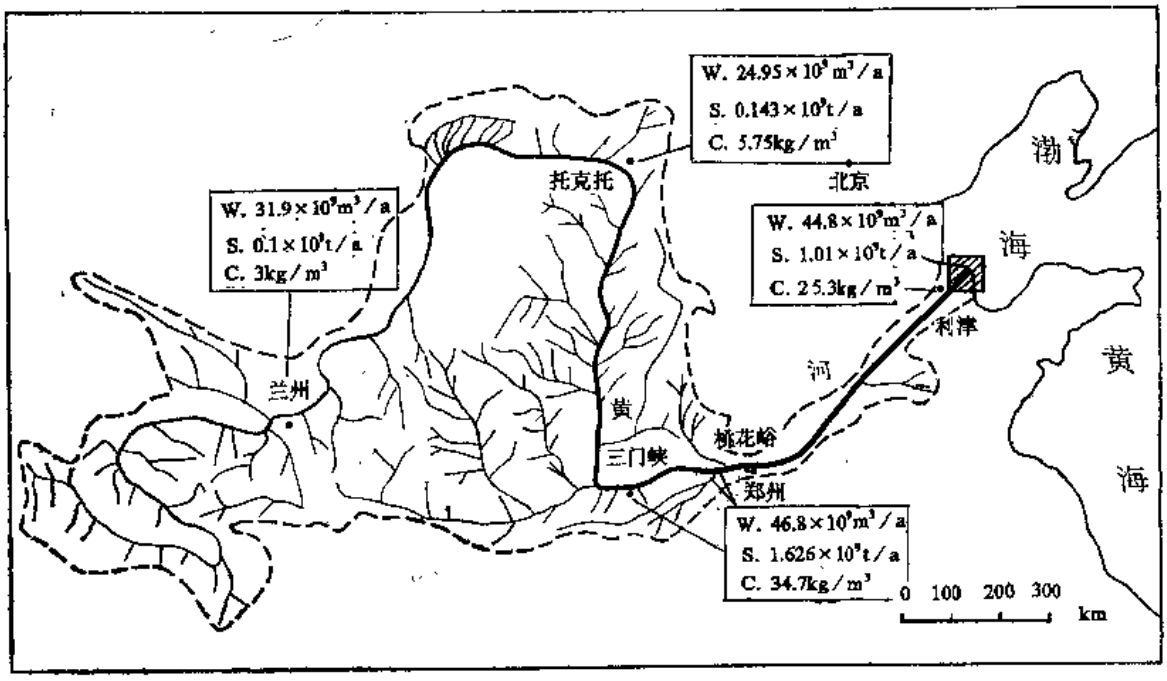


图 1—1 黄河流域及黄河上游、中游和下游的径流量、输沙量和含沙量

缩写符号：W—径流量；S—输沙量；C—含沙量；虚线为黄河流域界线；斜线方框为黄河三角洲位置（兰州、托克托、郑州水文资料按1917—1977年统计，利津水文资料按1949—1977年统计，水文资料来自黄河水利委员会历年测量资料）

黄河在河南省郑州附近进入华北平原后，河道变迁频繁。有史记载，3000多年以来黄河下游决口泛滥1 500多次，较大的改道26次（中国自然地理编辑委员会，1982）。变迁的范围北抵海河，南达淮河，顶点在郑州附近。入海口处摆动幅度达600多公里（图1—2）。

在两次改道期间，黄河相对稳定，大量泥沙在河口堆积，形成三角洲。在渤海西岸和南黄海西岸分布有一系列古黄河三角洲。古黄河三角洲经海洋动力作用改造，大多失去三角洲原有的地貌形态。在渤海西岸的古黄河三角洲改造后，在三角洲平原上形成数列平行海岸的贝壳堤。据贝壳堤的位置和形成年代，目前已划分出九个古黄河三角洲（薛春汀和成国栋，1989）。在南黄海西岸的射阳河口和灌河口之间有一个古黄河三角洲，现正处于改造之中。

最近一次大改道（即1855年黄河原经苏北入黄海后改道由山东入渤海）后堆积而成的三角洲是现代黄河三角洲。它保持了三角洲的地质地貌特征。本文中所述的黄河三角洲就

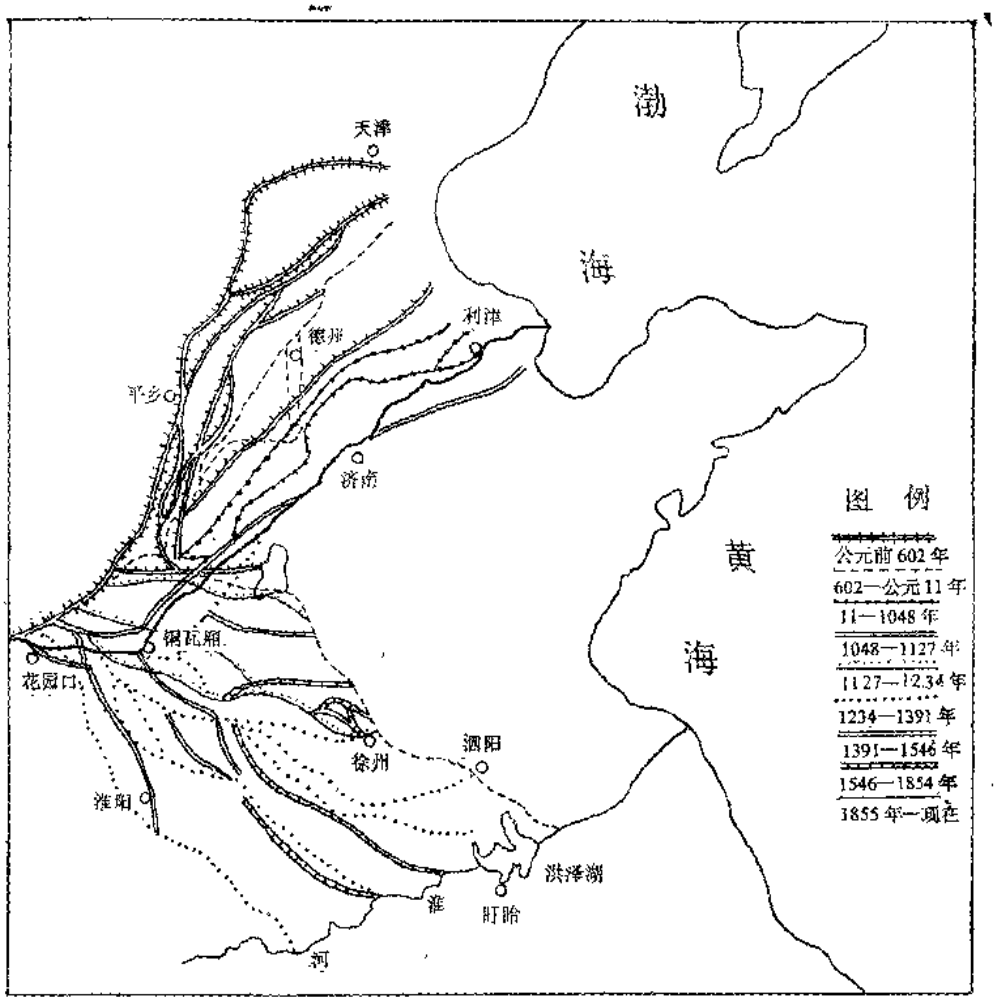


图 1—2 黄河近3000年来河道变迁示意图

（据中国自然地理编辑委员会，1982）

是指1855年至今在135年内形成的现代黄河三角洲，也就是目前我国规划开发的黄河三角洲。

黄河自1855年经华北平原注入渤海以后，发生大、小决口50多次。尾闾在山东省宁海以下摆动9次，先后形成10条河道。每次摆动后，黄河都在入海口处堆积起一个三角洲叶瓣，至今已形成10个叶瓣。其中第10个叶瓣是正在生长的叶瓣（图1—3）。由10个叶瓣组合成的黄河三角洲，分布在以宁海为顶点的扇形范围内，东南以支脉沟为界，西北以徒骇河为界，向海延伸到水深18m处，呈圆弧状向海凸出（图1—4）。陆上面积为5212km^2，水下面积约1500km^2。三角洲最大沉积厚度为18m。地表高程在三角洲顶点处为7m，缓缓向海方向倾斜，坡度为0.1—0.15‰，地面平坦。

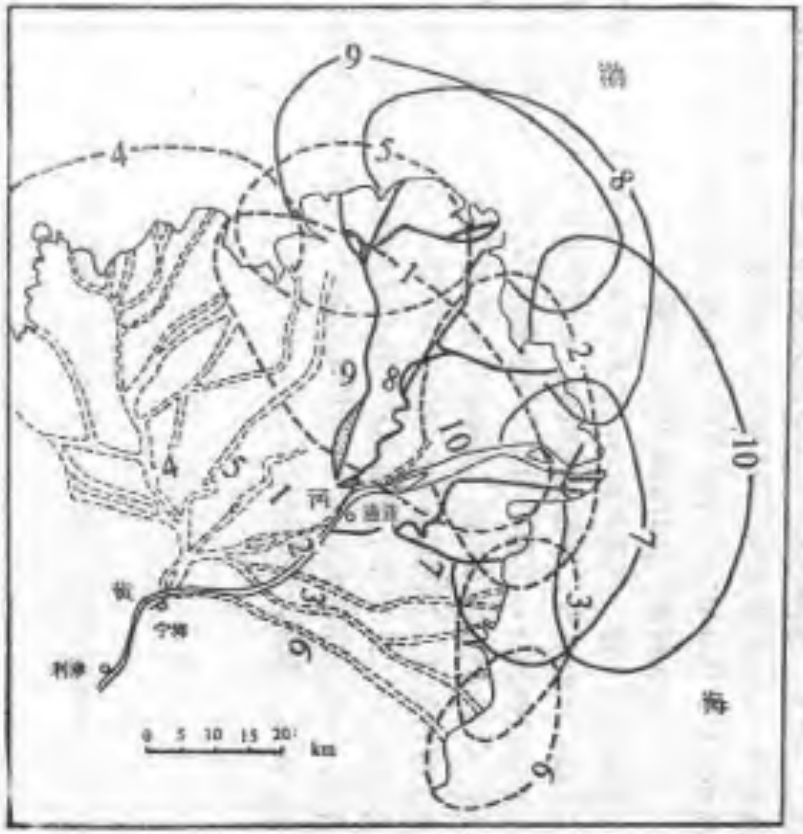


图 1—3　黄河三角洲各期叶瓣分布示意图

（据成国栋，1987）

数字代表各叶瓣形成的先后顺序：1—1855.6—1889.3；2—1889.3—1897.5；3—1897.5—1904.6；4—1904.6—1926.6；5—1926.6—1929.8；6—1929.8—1934.8；7—1934.8—1953.7；8—1953.7—1964.1；9—1964.1—1976.5；10—1976.5—现在

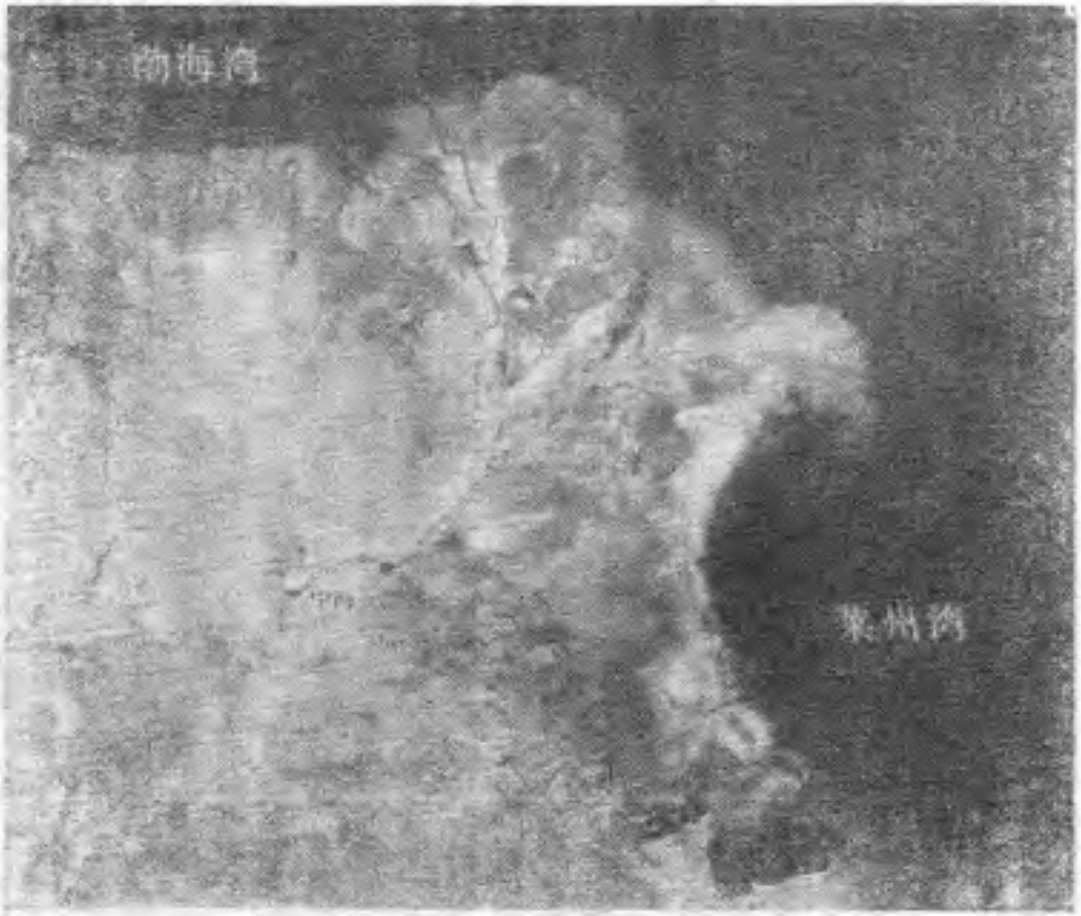


图 1—4　黄河三角洲卫星照片

（1983年10月27日拍摄，宁海为三角洲顶点）

第一节　黄河三角洲的自然条件

黄河三角洲地处北温带亚湿润气候区，四季差异分明，气温适中，年平均气温为12℃。雨量稀少，年降水量为530—630mm。降水日集中于7—9月，占全年降水量的50—70%。多偏北大风，常有风暴潮。近百年来发生六次高于黄海平均海平面3.5m的风暴潮，每次风暴潮海水入侵纵深达几十公里❶。

黄河三角洲的径流量和泥沙输入、输出量多变，它与黄河上、中、下游特点及渤海水文条件密切相关。下面分别介绍黄河河流及渤海特点与黄河三角洲自然条件的关系。

一、黄河的特征

按地理位置及河流特征，黄河分为上游、中游及下游三段。从河源到内蒙古自治区托克托县的河口镇是黄河上游。据黄河水利委员会山东河务局资料(1988)，这段河长3461km，落差3463m，平均比降为1‰。流域面积为37万km^2，占全河流域面积的49%。按1917—1977年黄河径流量及输沙量统计，上游年径流量为313亿m^3，占全河径流量的55%；年输沙量为1.4亿t，占全河输沙量的9%。这段河流的特点是径流量大，输沙量小，河水较清。以上游中段的兰州为例，年径流量为319亿m^3，年输沙量为1亿t，平均含沙量为3kg/m^3。上游各段的径流量和输沙量相差不大。例如，在上游末段托克托测得年径流量为249亿m^3，年输沙量为1.4亿t，平均含沙量为5.7kg/m^3，与兰州的径流量和输沙量相差不大。托克托径流量略有减少，是由于沿程蒸发、渗漏量大及灌区大量引水造成的。

从河口镇到河南郑州桃花峪为中游，河长1235km，落差896m，平均比降为1/1400。流域面积为36万km^2，占全河流域面积的48%。据黄河1917—1977年水沙量统计，中游的年径流量为247亿m^3，占全河径流量的44%，输沙量为15亿t，占全河总输沙量的90%。这段河流的特点是径流量增多，输沙量高。黄河中游流经黄土高原，沿程河网密集，黄土受到强烈侵蚀。泥沙通过各支流汇入黄河，沙量猛增。到中游末段的桃花峪，年径流量（包括从上游进入的径流量）达468亿m^3，年输沙量(包括从上游进入的输沙量)达16亿t，含沙量高达34.7kg/m^3（黄河水利委员会山东河务局，1988）。

从桃花峪到山东垦利县为下游，河长768km，落差89m，比降约1/8000。流域面积为2.27万km^2，占全河流域面积的3%。下游支流很少，径流量变化不大。据河口附近利津水文站1949—1977年水文资料统计，下游平均年径流量为448亿m^3，平均年输沙量为10.1亿t，平均含沙量为25.3kg/m^3。近10年来，黄河的径流量和输沙量有所减少。按利津水文站1950—1988年水文资料统计，黄河口平均年径流量为398.7亿m^3，平均年输沙量为9.97亿t，含沙量为25kg/m^3（表1—1）。下游河道的特点是蜿蜒曲折，河床平浅，泥沙大量淤积，床底逐年升高，一般高出地面3—5m，有的地段达10m，成为著名的地上河。在入海口处，泥沙淤积，形成三角洲，并迅速向海进积。

---

❶ 据山东省黄河口区海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室编“山东省黄河口区海岸带和三角洲资源综合调查报告”，1988。

表 1—1　利津站多年平均径流量、流量、输沙量及含沙量表

（1950—1988年）

径流量（亿m^3）			流量（m^3/s）			输沙量（亿t）			含沙量（kg/m^3）		
年均	汛期	非汛期	年均	汛期	非汛期	年均	汛期	非汛期	年均	汛期	非汛期
398.7	244.3	154.4	1263.7	2300	738	9.97	8.46	1.51	25.0	34.6	9.78

（据黄河水利委员会水文资料整理）

二、渤海海底地形和水文概况

黄河的受水盆地——渤海是一个平均水深为18m的半封闭浅海湾（图1—5）。它的东面经渤海海峡与黄海相通。其余三面为陆地围绕，构成三个海湾：北部是辽东湾，西部是渤海湾，南部是莱州湾。渤海海底地形是从三个海湾分别向渤海中央及渤海海峡方向倾斜，坡度缓。渤海有26%的海域水深小于10m，渤海中部水深也只有30m，唯有渤海海峡最深，可达86m（中国科学院海洋研究所海洋地质研究室，1985）。

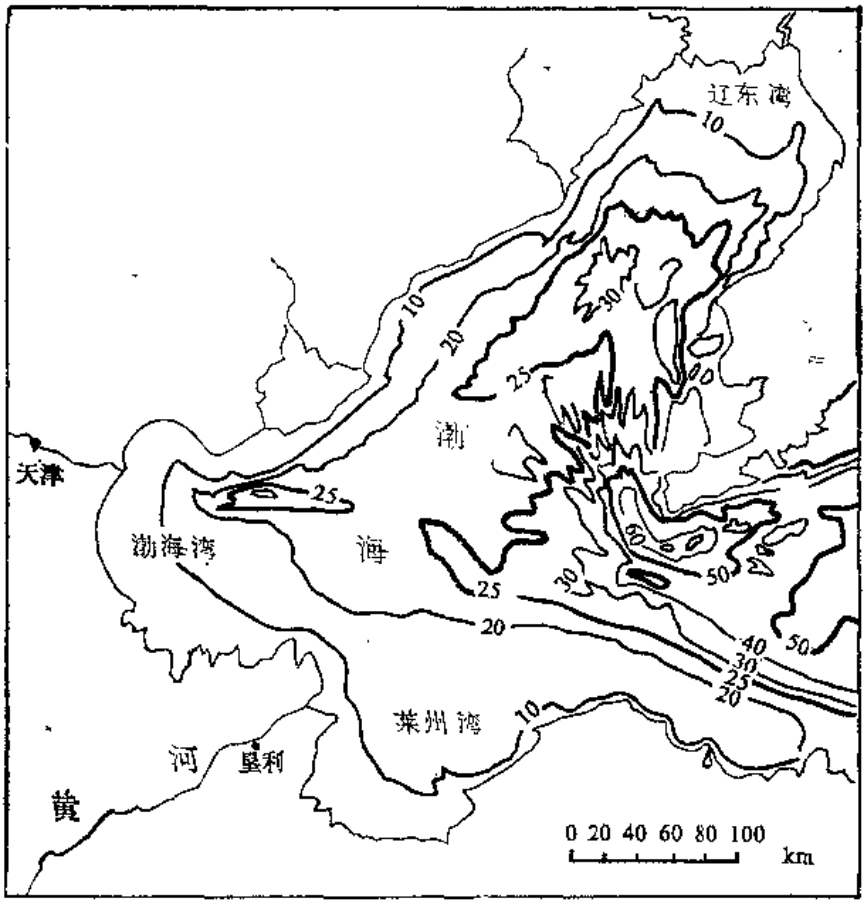


图 1—5　渤海水深图

数值表示水深（m）（引自渤海地质，1985）

黄河三角洲的水下部分位于渤海湾和莱州湾交界处。这里水深均小于20m，坡度为1/1000。黄河入海泥沙淤积在水深小于18m的范围内，相当于距海岸20km的范围内。

渤海潮波主要由半日潮波和全日潮波组成，其中以主太阴半日分潮（M_2分潮）对黄河口地区影响最大。它以渤海湾顶(塘沽附近)和莱州湾东侧（龙口附近）为“腹”,以黄河三角洲之北为“节”（无潮点），构成一横向驻波。同潮时线以反时针方向绕无潮点旋转（中国科学院海洋研究所，海洋地质研究室，1985）。黄河三角洲北部潮位变化为日潮型,黄河口附近为不规则半日潮型。但潮流在黄河口附近为规则半日潮。M_2分潮流椭圆长轴方向大都与海岸平行。潮差在无潮点附近为0.22m，向两侧递增到1—2m。潮流有两个最大流速区，一个在无潮点附近，最大流速可达160cm/s以上，向两侧递减为40—60cm/s。另一个在黄河口门处，最大流速可达140cm/s以上。高速潮流把黄河入海泥沙和冲刷再悬浮泥沙向两侧搬运。

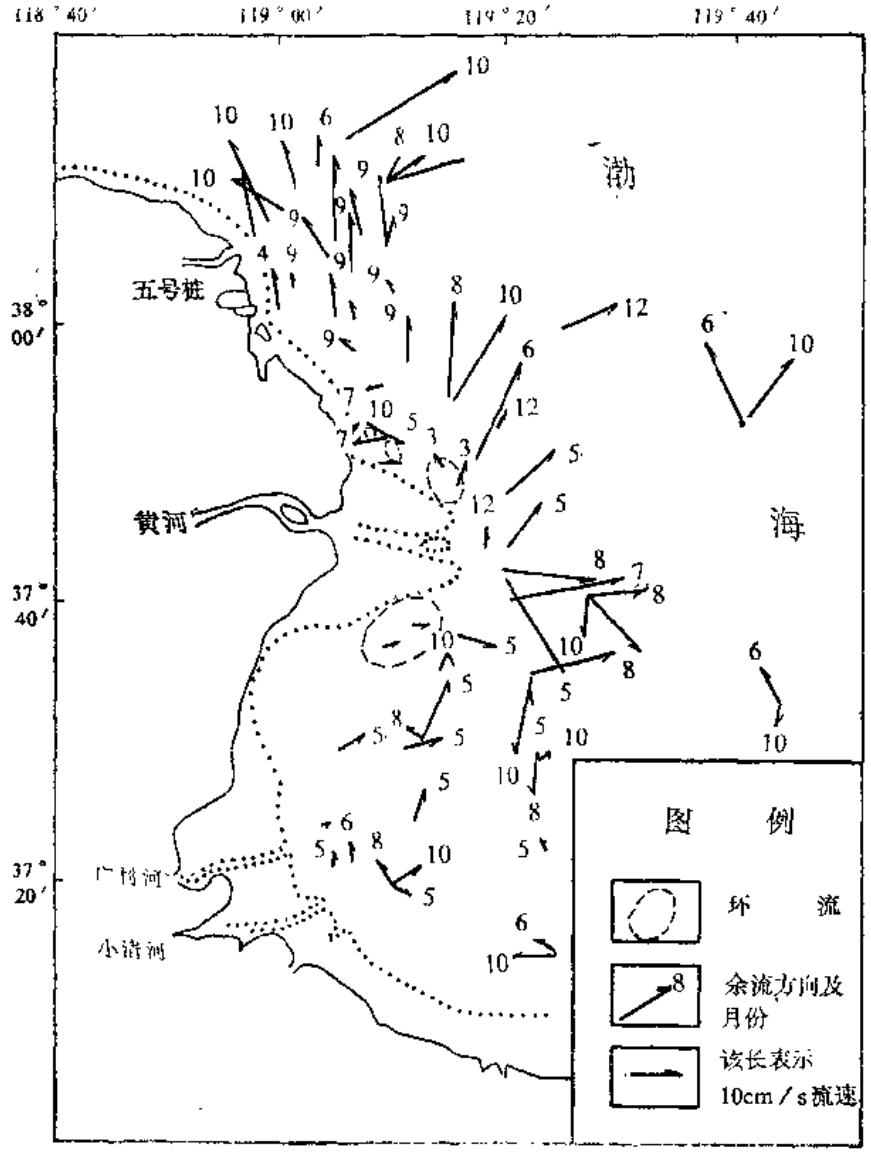


图 1—6 黄河口表层余流流速流向示意图

（据侍茂崇，1989）

黄河口南面有顺时针方向的环流；北面有逆时针方向的环流；五号桩处有一个不明显的顺时针方向环流

余流是从海流总体观察资料中除去同期性潮流后剩余的部分。它是泥沙远距离输送的重要动力因素。

黄河口的余流以具三个环流为特征。黄河口南侧的为顺时针方向环流，其范围自黄河口开始，南达小清河口，最大流速为25cm/s。黄河口北侧的为逆时针方向环流，自黄河口开始，北达北纬37°53′—38°00′，其范围较南侧小，最大流速也超过20cm/s。此外，在五号桩外侧还有一个顺时针方向环流，平均流速为10cm/s（图1—6）（侍茂崇，1989）。

第二节　黄河三角洲的地质背景

黄河三角洲位于渤海盆地东部的济阳断陷和程宁隆起之间（图1—7）。它的形成与发展与渤海盆地的演化密切相关。

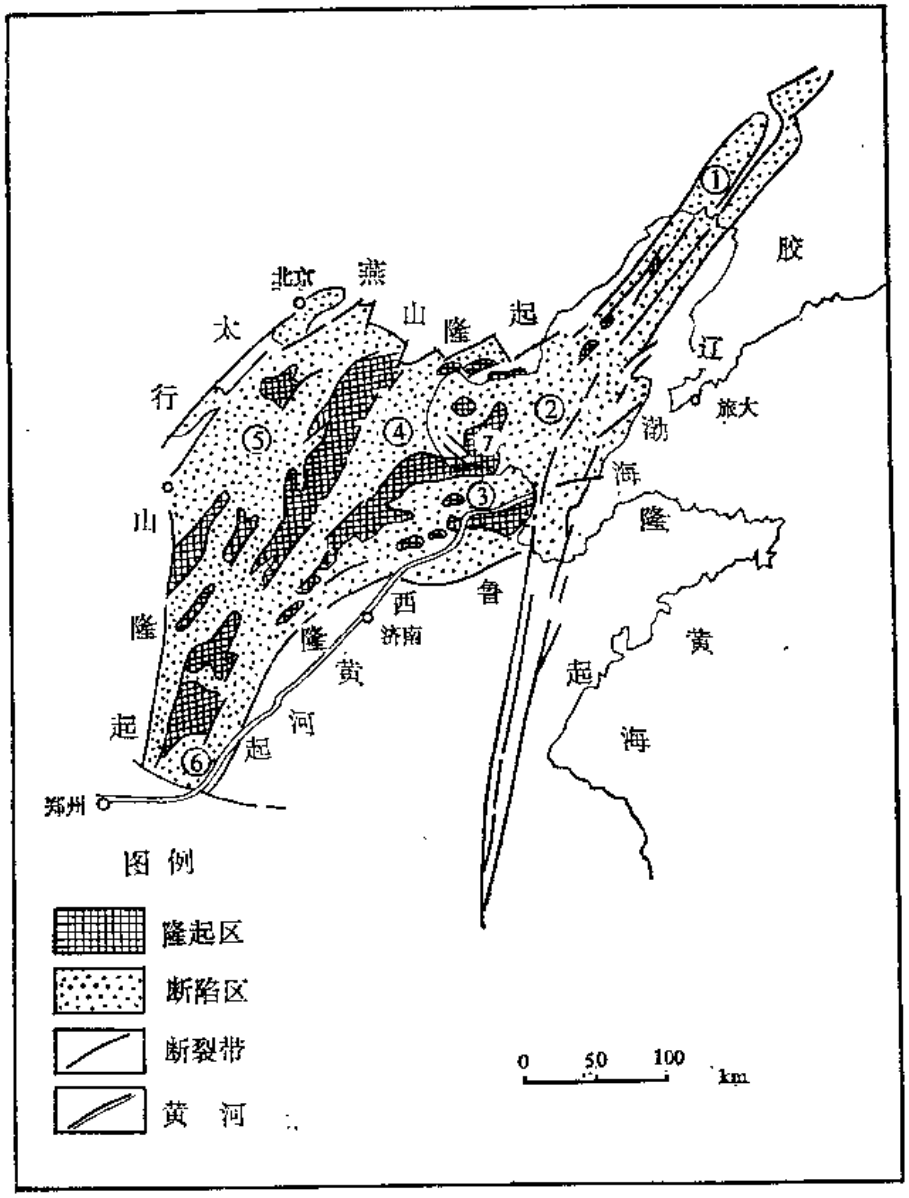


图 1—7　渤海盆地断陷和隆起分布图

（据李德生，1981；王善书等，1989）

① 辽河断陷；② 渤中断陷；③ 济阳断陷；④ 黄骅断陷；⑤ 冀中断陷；⑥ 临清断陷；⑦ 程宁隆起

一、渤海盆地地质概况

有关渤海盆地的构造、地层及发展过程，前人已有较多的论著（李德生，1981；刘杰，1981；徐怀大，1981），本文只作概括介绍。渤海盆地以渤海为中心向南北两个方向延伸到华北平原和下辽河平原。它是一个复式叠加型的沉积盆地，两侧以断裂带为界，东面是郯庐断裂，西面是太行山断裂。渤海盆地基底是古生界，由寒武系、中、下奥陶系、中、上石炭系以及二叠纪碳酸盐岩和含煤碎屑岩系组成。三叠纪太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲，在中国为印支运动时期，全区受到强烈挤压后，褶皱、隆起，并形成一系列北北东向和近东西向的断裂，构成了渤海盆地的基本格架。

晚侏罗世—白垩纪，太平洋板块进一步向欧亚大陆板块俯冲，在中国为燕山运动时期，渤海盆地发生继承性块断差异活动，形成一系列断陷盆地。早第三纪（始新世—渐新世）渤海盆地的块断差异活动加强，老的断陷继续扩大、加深和陷落，并产生新的断陷。在济阳断陷盆地内堆积了厚1300—4800m的河湖及滨海相砂岩、泥岩夹油页岩及生物碎屑岩，其中，沙三段和沙一段是主要生油段（表1—2）。

表 1—2　渤海盆地（济阳断陷）地层表*

地层系统					厚度	岩性简述
界	系	统	组	段	(m)	
新生界	第四系		平原组		250—350	浅黄、灰黄色粘土、粉砂、细砂及含砾砂层
	上第三系	上—中新统	明化镇组		650—900	棕黄—棕红色泥岩与棕黄色粉、细砂岩互层
			馆陶组		100—600	上部浅棕红色泥岩夹棕黄色粉、细砂岩；下部棕红色泥岩与灰白色砂岩、砂砾岩互层
	下第三系	渐新统	东营组		50—800	灰绿、棕红色泥岩与灰绿色砂岩互层，夹含砾砂岩
			沙河街组	1 段	50—400	以灰绿、灰色泥岩为主，上部夹砂岩；中部夹生物云岩和生物灰岩；下部夹白云岩和油页岩
				2 段	200—600	暗棕红、浅灰绿色泥岩与浅灰白色粉砂—中砂岩、含砾砂岩互层
		始新统		3 段	350—1500	深灰、褐灰色泥岩为主，上部夹灰白色粉、细砂岩，中部夹少量薄层砂岩，下部夹油页岩
				4 段	250—1500	上部灰、深灰色泥岩夹石膏、盐岩及薄层灰岩、白云岩、砂岩，顶部夹油页岩及生物碎屑灰岩，下部棕红色泥岩与浅紫红色粉、细砂岩互层
		始—古新统？	孔店组		大于650	上部深灰、灰色泥岩夹棕色砂岩及少量薄层煤，局部夹薄层油页岩及灰岩；下部棕红色砂岩、含砾砂岩与泥岩互层
中生界	白垩系	上统	王氏组			上部紫红、蓝灰色泥岩为主，夹薄层泥质粉砂岩；下部杂色砾岩、浅棕红含砾砂岩、细砂岩与紫红色泥岩互层

* 据三土锦，周兴太，济阳坳陷地质特征及含油气规律，1988。

中新世—上新世，渤海盆地进入拗陷发展阶段，由充填逐渐过渡为超覆沉积。在济阳拗陷内沉积了750—1700m的陆相河流砂岩和泥岩。下第三系被深埋，促使有机质演化，形成油气田。

早第三纪时期的古地貌是以一系列分隔的断陷盆地与各盆地之间的隆起交错分布为特征。在隆起上发育的水系汇入邻近的湖泊盆地中，形成各自以湖泊为中心的独立的水系。到晚第三纪，由于拗陷作用和沉积充填，渤海盆地地势向准平原方向发展。在此时期，黄河中、上游的地貌也具有相同的格局，即以各大中型湖盆为中心构成分散水系。此时，黄河及其主要支流尚不存在（朱照宇，1989）。黄河在第四纪才形成。

二、黄河三角洲第四纪地质

渤海盆地在第四纪沉降幅度很小，沉积了厚约350m的碎屑岩层。第四纪地质主要受冰期—间冰期所引起的海平面变化影响，在渤海周围已查明，自晚更新世以来已有三次海侵（图1—8）。

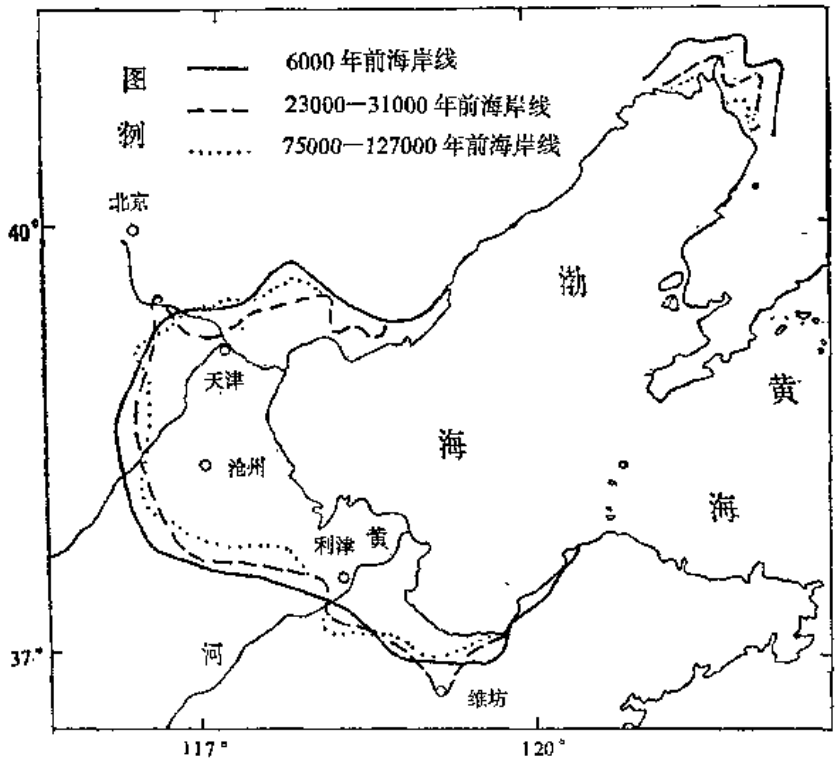


图 1—8 渤海周围晚更新世以来三次海侵的范围

（杨子庚，1990）

第一次海侵发生在7.5—12.7万年前，海侵范围，西达沧州以西，南抵利津以南，海侵历时较长，沉积了厚约20—30m的海相沉积物，称第三海相层。根据黄河三角洲D_{19}孔的资料（图1—9），该海相层顶界面位于地表以下55.4m处，沉积物为黄色、青灰色粉砂、砂质粉砂，含有孔虫、海相介形虫及软体动物化石，为潮坪及浅海环境沉积。

第二次海侵发生在23000—31000年前，海侵范围大致与第一次海侵相似。在黄河三角洲，该层厚6.19m，埋深 37—43m，由深灰—灰黑色粘土质粉砂及黄色粉砂质砂组成，含有孔虫、海相介形虫及软体动物化石，生物潜穴发育，为浅海及潮坪沉积，称第二海相层。

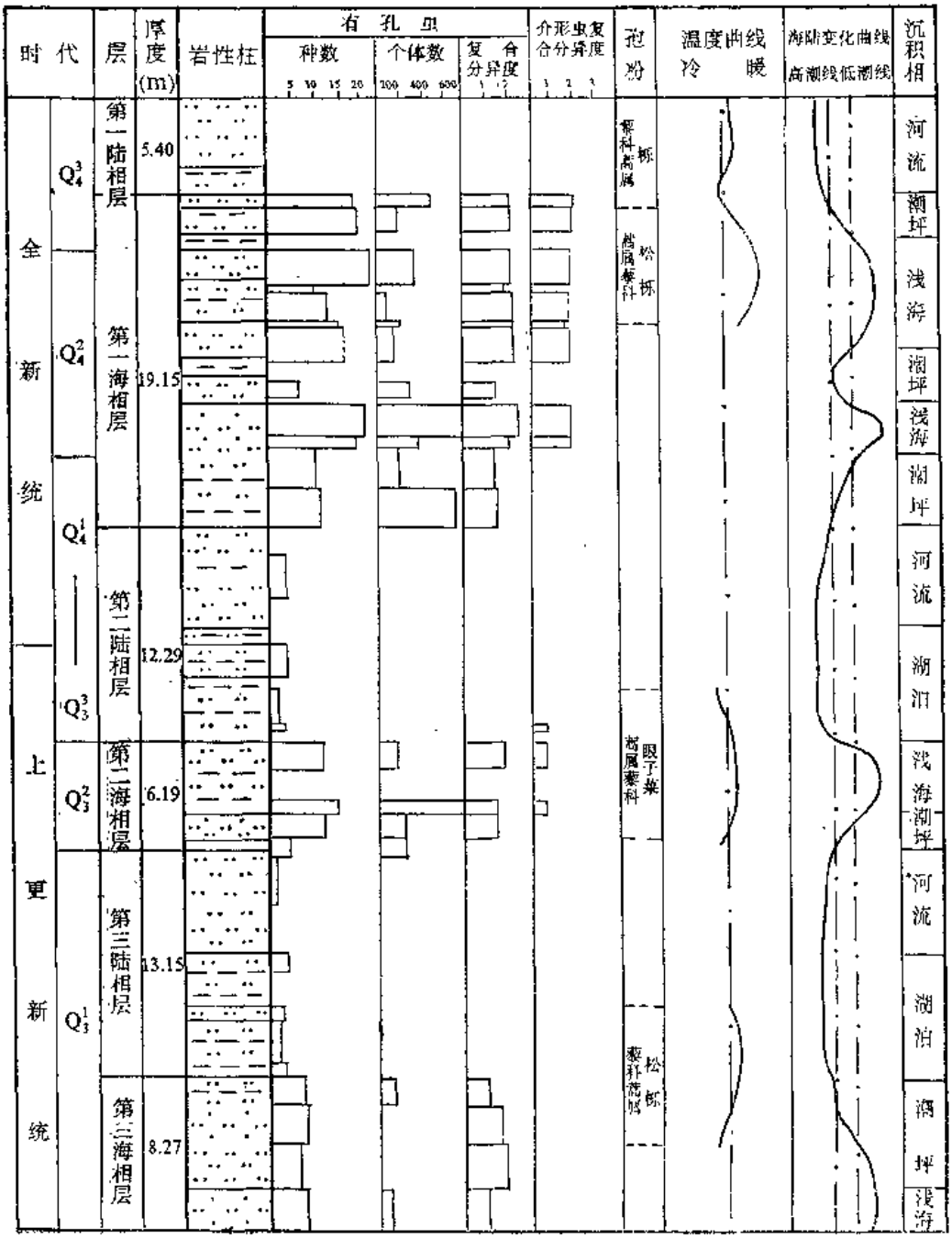


图 1—9　黄河三角洲晚更新世以来地层综合柱状图

（据成国栋等，1987）

第三次海侵到达黄河三角洲地区时间约在8800年前，本区最高海平面时间约在6000年前(王靖泰，汪品先，1980)。在黄河三角洲，该海相层底板埋深一般为 20m，为黄色、黄灰色、灰绿色粉砂及粘土质粉砂，夹灰色、棕黄色粘土，含有孔虫、海相介形虫及软体动物化石，为浅海及潮坪和三角洲沉积，称第一海相层（成国栋等，1987）。

各海相层的上下均为陆相沉积层，形成陆相层与海相层交替出现的特点，图1—10反映了这一特点。该图是根据高分辨率浅地震测量记录（图1—11），结合钻孔资料对比绘制

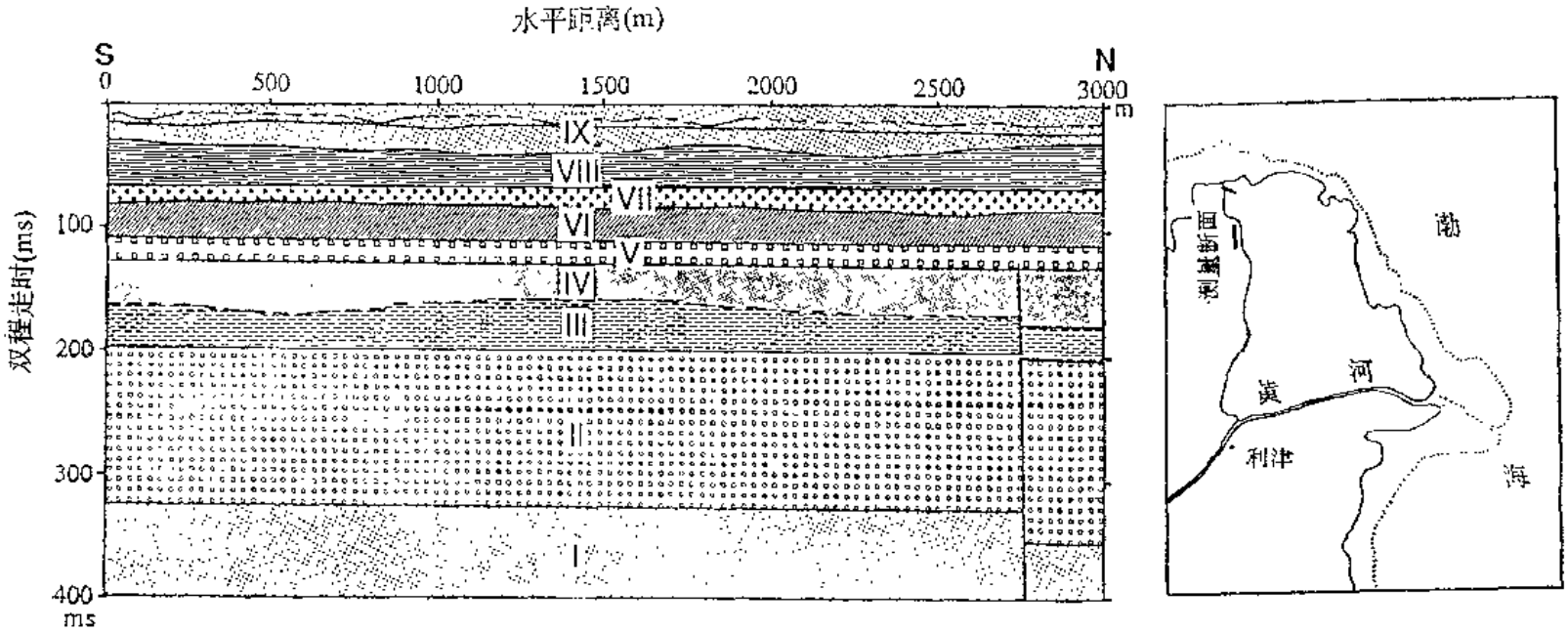


图 1—10　黄河三角洲地震相单元

（据P. Jongerius等，1989）

其中Ⅸ、Ⅶ、Ⅲ单元分别相当于黄河三角洲地区的第一、第二、第三海相层。Ⅷ和Ⅵ、Ⅴ、Ⅳ以及Ⅱ、Ⅰ为陆相层。右图为浅地震测量位置图

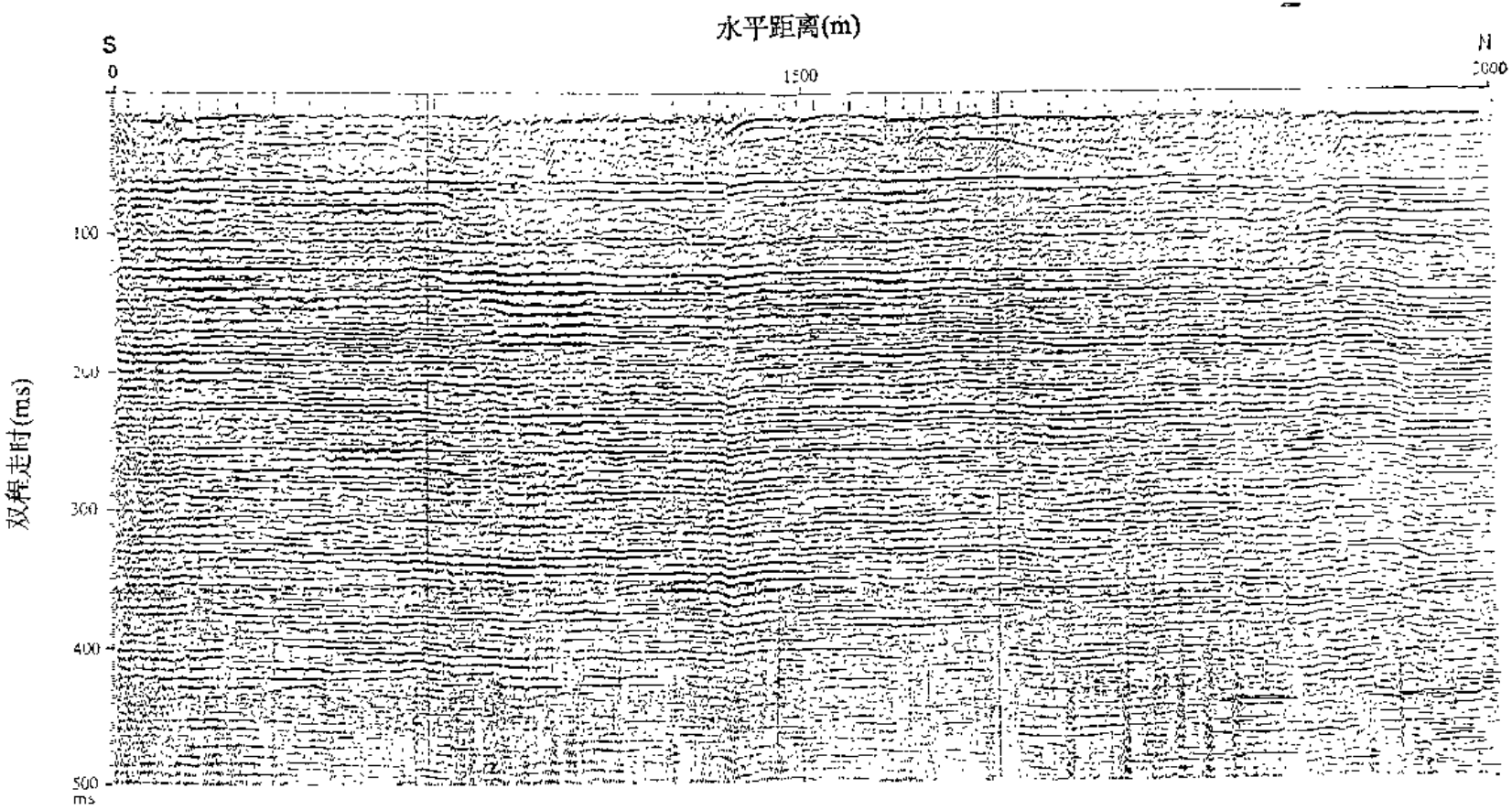


图 1—11　黄河三角洲浅地震测量记录

(据P. Jongerius等，1989)

而成（P. Jongerius等，1989）。记录深度为400ms，分辨出九个地震相单元，自上而下为：

Ⅸ单元：此单元受初至波干扰，顶部记录不清。反射层呈水平分布，微有倾斜，底界清晰，呈波状起伏。根据海相层连续性好、水平分布的特点，结合钻孔中海相层出现的深度资料，确定此地震相单元相当于第一海相层，其顶部为三角洲沉积。

Ⅷ单元：弯曲斜层理，连续性差，向海方向倾斜，振幅一般都低。

Ⅶ单元：平行反射层，连续性好，振幅高，相当于第二海相层。

Ⅵ单元：平行层理，连续性较差，振幅中等，其中夹有弯曲和交错层。

Ⅴ单元：只有极少的水平反射层，连续性中等，频率低。

Ⅳ单元：反射层连续性中等，频率低，振幅高。

Ⅲ单元：多层平行反射层，连续性好，振幅高，频率也相对较高。相当于第三海相层。

Ⅱ单元：平行反射层，部分连续性好，振幅中等，反射频率中等，部分为低振幅。

Ⅰ单元：中等连续的平行反射层组，大部分反射层的振幅较低。

从上述的钻孔资料和浅地震剖面记录上可以看到，黄河三角洲地区的第四纪地层呈水平分布，海相层薄但稳定，陆相层内层面多弯曲，有很多埋藏的古河道。第二海相层和第三海相层为滨海—浅海沉积。第一海相层顶部有黄河三角洲沉积。

第四纪是黄河的形成时期，据朱照宇（1989）资料，黄河中、上游地区的分散水系向统一现代水系方向的演化主要发生在中更新世时期。在167—145万年前，发生黄土高原主隆起运动。陇西山地、阴山、吕梁山、渭河北山强烈隆起，出入湖泊的河流朔源侵蚀切穿分水岭，连通了分散的湖盆，形成了沿断裂及断陷盆地分段同时连通的统一的黄河。由于外流河的生成，湖泊逐渐消失。晚更新世连通后的黄河进入华北平原后，黄河上、中、下游统一水系就此构成。其后黄河在华北平原上大幅度摆动，形成众多古黄河三角洲。但目前了解比较清楚的是全新世以来的古黄河三角洲。

三、黄河三角洲全新世地层

黄河三角洲全新世地层厚度一般在26m左右，主要是第三次海侵（全新世海侵）后形成的海相层和黄河三角洲沉积层，仅底部2m左右为海侵前的陆相河流和湖泊沉积。

黄河三角洲全新世地层可分为如下三组（成国栋等，1987）（图1—12）：

垦利组是晚更新世晚期至全新世早期的河流、湖泊沉积物，由细砂、极细砂、粉砂和粘土质粉砂组成。五号桩组为广义的海相沉积物，主要由粉砂和粘土质粉砂组成。第一段为海岸盐沼及潮间带沉积物，前者为含炭粉砂，后者为粉砂及粘土质粉砂互层，具透镜状层理、脉状层理。底部的^{14}C年龄为8835±100年及8870±105年。第二段包括全新世早期海侵至接受三角沉积物之前形成的浅海沉积物，为粉砂、粘土质粉砂。第三段为1855年以来形成的水下三角洲及潮坪沉积物，由粉砂、粘土质粉砂组成。钓口组为上三角洲平原沉积。厚度随高程而变化，由黄色粉砂和红褐色粘土质粉砂组成。

黄河三角洲全新世沉积序列自下而上为陆相层、潮坪沉积、浅海沉积、三角洲沉积。

黄河三角洲地区全新世以来的演化过程可归结如下：全新世初期，本区为陆地环境，地面平坦，微向东北方向倾斜。约在8800年前全新世海侵到达本区，6000年前海侵达最高峰，海侵边界在东营市斗柯以南。其后海平面相对稳定，黄河三角洲开始进积，先后形成

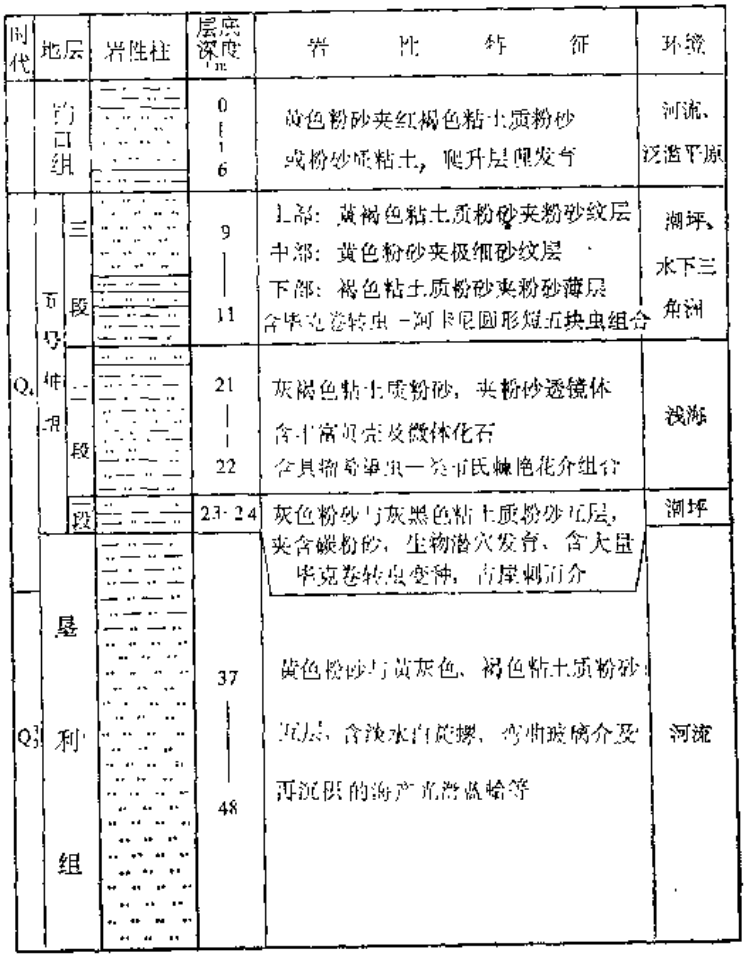


图 1—12 黄河三角洲全新世地层略图

（据成国栋等，1987，有修改）

11个三角洲，其中10个在渤海西岸，1个在江苏北部黄海西岸。1855年形成的最后一个三角洲便是现代黄河三角洲。

上述资料表明，黄河及黄河三角洲的形成和演化是板块活动所致。印度板块与欧亚板块碰撞使青藏高原隆起，太平洋板块向欧亚大陆俯冲使渤海盆地沉降。东亚大陆西部升高、东部降低的构造活动促使原先分散的水系逐渐连接成统一的黄河水系，并在受水盆地的入口处形成黄河三角洲。

黄河三角洲的分布位置受海平面变化的影响。海平面升降引起了岸线的移动，改变着黄河入海口的位置，也就改变了三角洲分布的位置。黄河形成以来，各期黄河三角洲的分布状况虽尚未查明，但全新世古黄河三角洲系列分布状况比较清楚，它们沿着末次海侵高海平面的古海岸分布，不断向海进积。

对于1855年开始生长的现代黄河三角洲来说，由于时间短，构造背景和海平面相对稳定，其发展过程主要受环境动力条件控制。以后几章将详细讨论黄河三角洲的动力环境、沉积作用和三角洲进积演化等特点。

第二章　黄河三角洲的沉积动力学及泥沙运动

黄河三角洲的沉积动力学在不同亚环境区各有特点。在三角洲陆上平原区，沉积动力以单向水流（河流）为主。水下三角洲的沉积动力包括双向、多向水流（潮汐、波浪、海流）及其与单向水流相互作用构成的动力体系。黄河高含沙量增加了沉积动力的复杂性，在河口区形成高密度流。泥沙以多种方式搬运、扩散、沉积。下面分陆上环境和水下环境两部分讨论。

第一节　三角洲平原的沉积动力学和泥沙运动

三角洲平原的沉积动力学和泥沙运动的特点是从两个方面进行研究的：一是在黄河三角洲顶点附近的利津水文站实测调查；二是在室内作水槽模拟试验。

在野外进行实测调查的利津水文站位于黄河三角洲顶点宁海西南7.5km处（图2—1）。该站有长期的水文测量资料，便于对比研究，因此选择它作为研究三角洲平原沉积动力学的代表站位。本次调查除在利津站作原有的常规测量外，还在丰水期（1987年9月4日、9月9日及9月22日）进行了专门测量，内容包括断面形态、流速、悬浮体含量测量和底床沉积物取样。悬浮体含量测量分别在离底床0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、3.0m及表层进行。另外，在测量断面及其下游1km处各设一水尺，测河流表面比降。

室内水槽模拟试验是在荷兰水槽实验室内进行。水槽长7.96m、宽0.45m、深0.6m，由一组传动浆翼带动槽水作循环流动。水槽四角装有控流叶片，以消除水槽拐角处宽度增

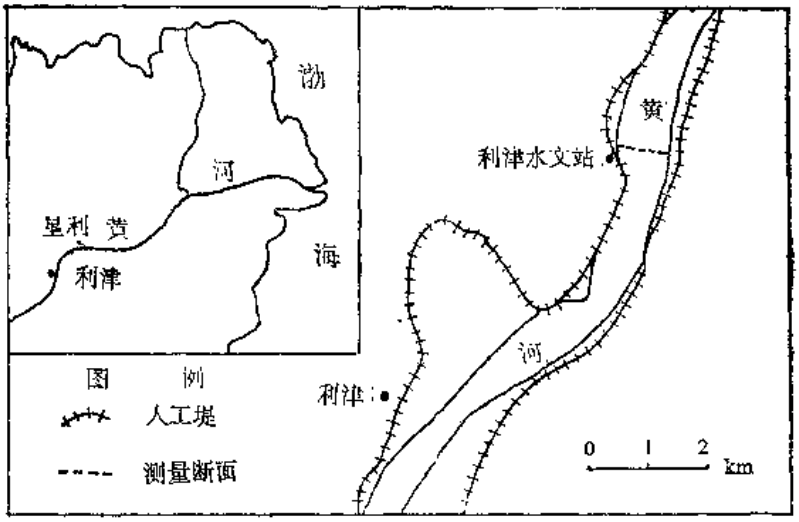


图 2—1　黄河三角洲利津水文站和测量断面位置

大和水流转弯时引起的离心力而造成的水位差异。水槽观察面由透明塑料板组成。

水槽试验的样品取自荷兰东南部风成黄土，中值粒径为33μm，与黄河泥沙组分相似。水槽测试内容包括水温、水深、流速、悬浮体含量、粒度、底形及沙波迁移速率。

下面首先介绍黄河三角洲平原的水文概况和沉积动力特征。

一、黄河三角洲的径流量、流量、输沙量和含沙量

黄河的年平均径流量为398.7亿m^3，平均流量为1263m^3/s，平均输沙量为9.97亿t，平均含沙量为25kg/m^3（按1950—1988年水沙量统计，表2—1）。与世界大河对比（表2—2），黄河的径流量仅相当于长江径流量的4%，珠江的13%，密西西比河的7%；而黄河的含沙量却为长江的47倍，珠江的84倍，密西西比河的42倍。大量泥沙的输入，为黄河三角洲提供了充足的物源，使黄河三角洲迅速进积。

黄河的水量、沙量，无论是年平均量或月平均量，其变化都很大。黄河三角洲最大年径流量（1964年）为973.1亿m^3，最小年径流量（1960年）仅为91.5亿m^3，相差近10倍。最大输沙量为20.3亿t（1964年），最小输沙量仅0.96亿t（1987年），相差21倍。

黄河三角洲的径流量和输沙量的季节性变化极为明显。黄河流经中纬度地带，受东亚季风区强烈影响。7—10月份，黄河中游阴雨连绵，常降暴雨，流量大增，形成汛期。以1950—1988年平均值计算，黄河三角洲地区汛期平均径流量为244.3亿m^3，占全年径流量的61%。流量为2300m^3/s，为年均流量的1.8倍，为非汛期的3.1倍。而在枯水期（3—7月份）水量极低，甚至出现断流。1960年3—7月份连续河干达141天。黄河三角洲汛期输沙量平均占全年输沙量的84%以上，含沙量高达34.6kg/m^3，极值可达222kg/m^3（1973年9月7日）。

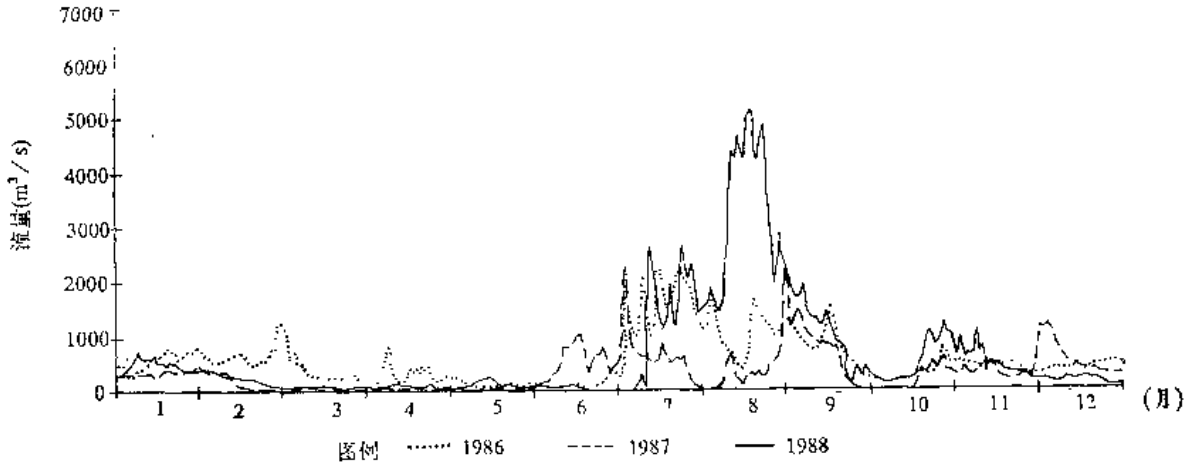


图 2—2 黄河三角洲逐日流量过程图

调查期间（1986—1988年），虽然黄河的年均径流量和输沙量都比正常年份低，但季节性差异仍如往常。汛期径流量占全年径流量的50—70%，汛期流量高达5000m^3/s以上（图2—2）；汛期输沙量占全年输沙量80—90%，汛期的含沙量高达80—90kg/m^3（图2—3）。在枯水期出现河干断流，1987年河干12天，1988年河干7天。黄河三角洲水量、沙量强烈的季节性差异，使黄河三角洲堆积主要发生在丰水期，具事件性特点。

表 2—1 黄河利津站逐年径流量、流量、输沙量、含沙量统计表

年份		1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958
径流量 ($亿m^3$)	年	513.8	499.3	458.3	439.6	580.7	561.6	486.2	370.8	596.7
	汛期	250.2	301.2	258.6	277.2	383.2	349.6	305.8	219.5	442.6
流量 (m^3/s)	年	1629	1583	1449	1394	1840	1780	1540	1180	1890
	汛期	2350	2840	2430	2600	3610	3300	2880	2060	4160
输沙量 ($亿t$)	年	12.9	9.59	7.79	11.7	19.8	14.4	14.0	6.43	21.0
	汛期	9.74	7.94	6.09	10.5	17.6	11.9	11.8	5.40	19.3
含沙量 (kg/m^3)	年	25.16	19.2	17.0	26.7	34.1	25.7	28.7	17.3	35.2
	汛期	38.9	26.4	23.5	37.8	46.0	34.2	38.5	24.6	43.5

年份		1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
径流量 ($亿m^3$)	年	297.8	91.5	519.9	494.1	611.5	973.1	381.2	410.4	684.0
	汛期	199.3	68.6	286.6	267.1	353.0	601.0	163.8	290.0	443.1
流量 (m^3/s)	年	944	289	1650	1570	1940	3080	1210	1300	2170
	汛期	1880	647	2690	2510	3320	5670	1540	2740	4180
输沙量 ($亿t$)	年	14.3	2.42	8.99	7.73	9.60	20.3	4.34	15.6	20.9
	汛期	13.5	2.31	6.63	5.51	7.02	15.9	2.68	14.8	17.5
含沙量 (kg/m^3)	年	48.0	26.5	17.3	15.6	15.7	20.8	11.3	38.0	30.5
	汛期	67.9	34.0	21.0	20.6	20.0	26.4	16.3	51.1	39.4

年份		1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
径流量 ($亿m^3$)	年	558.1	287.8	353.7	318.4	222.8	281.5	231.6	478.1	449.1	248.0
	汛期	314.8	126.5	188.5	146.4	103.7	184.5	117.9	304.0	322.6	145.7
流量 (m^3/s)	年	1770	913	1120	1010	704	893	734	1520	1420	785
	汛期	2980	1190	1780	1380	979	1740	1110	2860	3050	1370

续表 2—1

年份		1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
输沙量（亿t）	年	13.2	5.81	10.9	9.19	4.08	12.0	5.04	12.6	8.98	9.49
	汛期	10.7	4.37	9.20	5.74	2.69	10.7	3.96	10.0	8.13	9.02
含沙量（kg/m^3）	年	23.6	20.2	30.8	28.8	18.3	42.6	21.8	26.3	20.0	38.3
	汛期	33.9	34.4	49.1	39.1	26.0	58.2	33.5	32.9	25.2	61.7

年份		1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
径流量（亿m^3）	年	259.0	270.0	189.0	346.0	297.0	491.0	447.0	389.0	157.0	108.2	195.7
	汛期	192.5	167.8	102.1	287.4	207.5	317.1	326.4	221.9	86.9	50.9	152.9
流量（m^3/s）	年	822	856	597	1100	941	1560	1410	1230	498	343	619
	汛期	1820	1580	960	2710	1950	2980	3070	2100	818	479	1439
输沙量（亿t）	年	10.2	7.33	3.08	11.5	5.42	10.2	9.34	7.56	1.69	0.96	8.49
	汛期	9.78	6.35	2.61	11.2	4.80	8.20	8.77	6.52	1.53	0.77	8.39
含沙量（kg/m^3）	年	39.5	27.1	16.3	33.2	18.3	20.8	20.9	19.5	10.8	3.04	26.9
	汛期	50.9	39.0	25.6	39.1	23.1	25.9	26.9	29.5	17.6	7.26	79.0

（据利津水文站水文资料编制）

表 2—2 世界大河水量、沙量对比

河名	流域面积（km^2）	水量		沙量	
		年平均流量（m^3/s）	年径流量（10^8m^3）	年平均含沙量（kg/m^3）	年输沙量（10^6t）
长江	1,705,383	29,200	9,211	0.54	1.78
珠江	425,700		3,020	0.126—0.334	0.8336
黄河	752,443	1,263	398	25.0	9.97
尼罗河	2,980,000	2,830	895	1.4	1.22
亚马逊河	5,780,000	181,000	57,200	0.07	4.0
恒河	955,000	11,750	3,710	1.3	16.0
印度河	970,000	5,500	1,740	2.8	4.8
密西西比河	3,220,000	17,820	5,640	0.6	3.44
密苏里河	1,330,000	1,950	616	3.9	2.4

（据任于灿，1987）

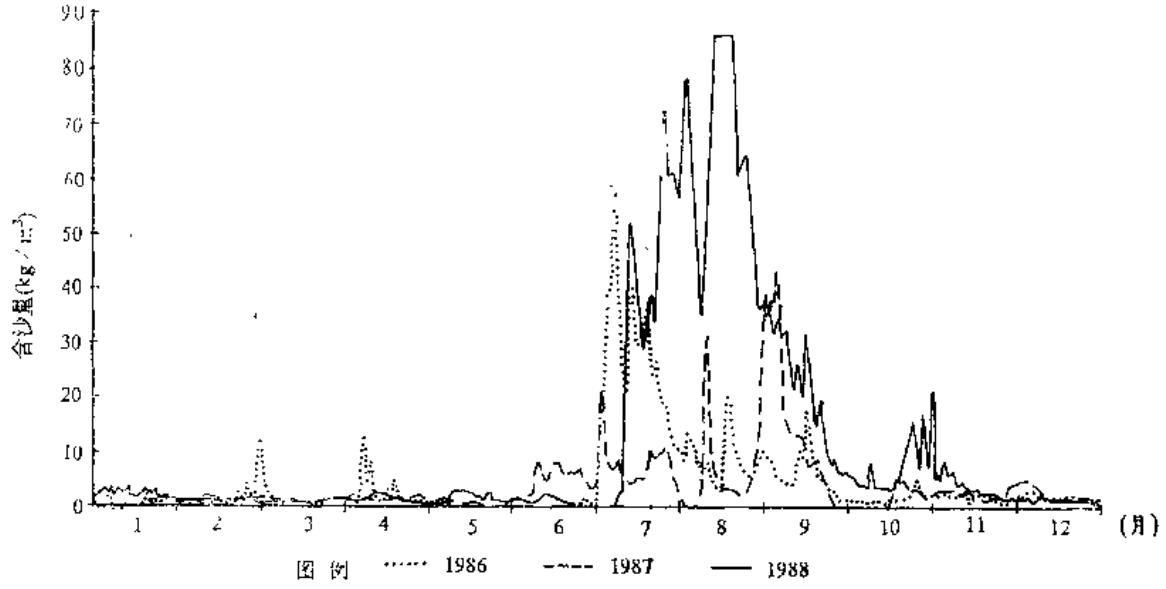


图 2—3 黄河三角洲逐日含沙量过程图

二、黄河悬浮物质的粒度特征

黄河中悬浮物质的粒度一般较细。据 1987 年 9 月 4 日、9 日、22 日利津站实测统计（表 2—3），其中极细砂含量约在 10%以下，粉砂含量约为 50—70%，泥质含量为 30—40%。其粒度直方图一般为双峰式，粗峰多位于 0.031mm—0.064mm 组分间，细峰多位于0.008—0.004mm组分间，粒度分布的鞍部位于0.016mm附近（图2—4—A)。这说明悬浮物质主要由两种组分组成，即大于 0.016mm 的粗粒组分及小于 0.016mm的细粒组分。

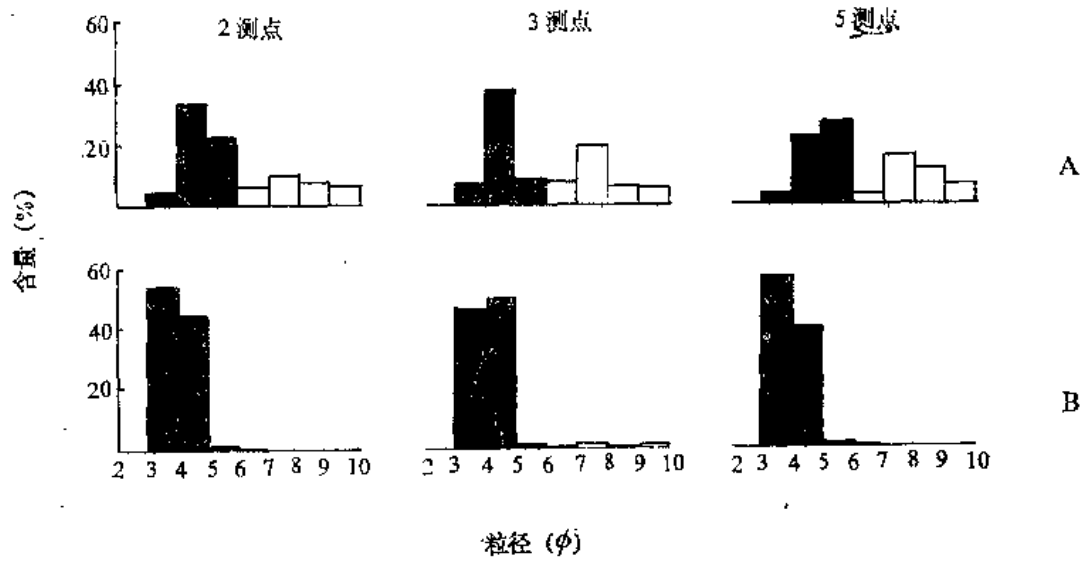


图 2—4 黄河（利津站）悬浮体（A）和底床物质（B）粒度对比，测点见图2—1，2—5

将悬移物质的粒度分布与河床表层物质的粒度加以对比（图 2—4），可以看出悬移物质中的粗粒部分与河床表层物质相当，悬移物质中的细粒部分，在河床表层中极少或没有。悬移物质中的粗粒部分称为床沙质，细粒部分称为冲泻质。计算表明，床沙质和冲泻质的临界粒径为 0.016mm，即 6ϕ。

三、悬浮物质与河床表层物质的交换

黄河悬浮物质中的粗、细颗粒含量变化表明，大于 0.016mm 组分，随水流强弱而变动。如 1987 年 9 月 4 日、9 日（表2—3），水流较强，此组分含量较高，分别为 14.4kg/m³和7.28kg/m³。22日水流强度减弱，此组分含量降至1.06kg/m³。同一天内，由于河流断面不同位置的水流强度不同，其含量也相差很大。河槽处，水流强，此组分含量高；漫滩处，水流弱，此组含量低。同一测点，自上而下含量明显增高。小于0.016mm的组分，受水流强度影响较小。同一日内，河床与漫滩、底层及表层的含量基本不变。而不同日内，由于流量和输沙量变化，其含量变化很大。因而冲泻质含量主要与上游来的水沙量有关。

表 2—3　黄河（利津站）断面流量含沙量分布表

日　期	流　量 (m³/s)	平均流速 (m/s)	平均含沙量 (kg/m³)	离河床底深 (m)	含沙量 (kg/m³)			
					>0.016mm		<0.016mm	
					河　槽	漫　滩	河　槽	漫　滩
九月四日	1237.50	1.72	42.60	表　层	7.50	13.20	28.50	25.30
				1.00	22.50		26.30	
				0.10	56.9	30.10	33.90	18.40
九月九日	972.40	1.62	17.80	表　层	1.70	3.00	11.00	9.70
				1.00	10.70		11.20	
				0.10	29.00	15.80	11.80	9.00
九月廿二日	227.10	0.61	6.61	表　层	0.50	1.60	5.60	5.00
				1.00	1.10		6.20	
				0.10	2.80	1.80	6.40	5.00

床沙质在水流携带过程中，若流速降低，便从悬浮物质中沉积下来，成为河床物质。若流速增高，便从河床物质中得到补给。床沙质与底床质物质随水流速度变化而处于不断交换的动态平衡过程中。

黄河三角洲河道内床沙质与底床物质的交换是在接近河床床底的床沙质含量高的悬浮层内进行。该层主要由粒径>0.016mm 为主的悬浮物质组成，分布在河床床底以上 0.5m 的范围内，含沙量超过 30—40kg/m³。为了与上部含沙量较低的悬浮体层区别，称该层为底悬浮层，其特性可以1987年 9 月 9 日利津站所测断面内悬浮物质的分布状况来说明。图2—5，A 是断面形态和测量站位。取得的悬浮体样品以 0.016mm 粒径为界分为两部分，<0.016mm的冲泻质部分及>0.016mm的床沙质部分。图2—5C是冲泻质含量在垂向上的变化。它基本上呈一直线，无大变动。在横向上，各站的含量近似，反映了冲泻质在河道

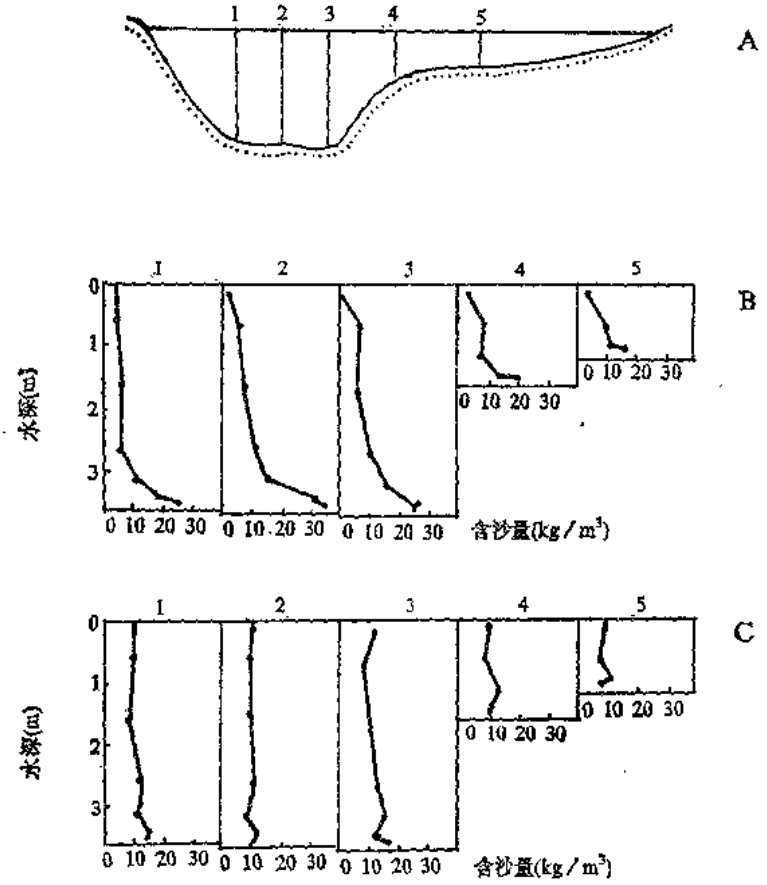


图 2—5 黄河（利津水文站）悬浮体内床沙质和冲泻质含量的垂向变化

A—黄河河道断面（利津站），数值表示测站号；B—床沙质（>0.016mm）含量的垂向变化；C—冲泻质（<0.016mm）含量的垂向变化

内的分布是均匀的。图2—5B是床沙质含量的垂向变化。离床底0.5m处有个跃层，跃层之下的床沙质含量比其上的高 5—17 倍。这种跃层无论在河道中心或河道边缘都存在，只是中心部位含量比边缘部位的高。结合速度分析（水流流速在河道中心高于边缘，表2—4），说明水流流速大时，底床物质受冲刷，泥沙再悬浮，底悬浮层中的床沙质含量增大。相反，流速小时泥沙从悬浮状态下沉，使底悬浮层床沙质含量减小。床沙质和底床物质就这样不断交换。

黄河泥沙无论是悬浮的泥沙或沉积的泥沙，都是细颗粒物质，绝大部分为粉砂，少量是极细砂。这些细颗粒泥沙在黄河水流速度下都能被悬浮。因而悬浮物质中的床沙质都可以转成河床表层物质，而河床表层物质也可以全部再悬浮，两者由于粒度一致而充分交换。这说明为什么黄河河道冲淤变化特别明显。

四、高沙水体的沉积作用

当含沙量高的黄河流速降低时，泥沙便大量淤落，形成一组由波状层理—爬升层理—交错层理组成的沉积构造序列。这类构造序列在黄河河道沉积物中普遍存在。

这一组沉积构造的形成过程，在水槽模拟试验中表现得很清楚。试验开始前，用水枪将槽内泥沙全部冲起，接着把水槽内水流流速恒定在 70cm/s 的速度上，持续一昼夜。此

时，槽底沉积物已处于不冲不淤的相对动态平衡之中，水体内悬浮体含量为160kg/m³。槽底沉积物之上有一层厚约3cm泥沙含量高的底悬浮层。当把流速下降到30cm/s时，底悬浮层内的泥沙在槽底稍作拖移后即停止运动。此时槽底迅速淤高，形成了同相位波痕层理，水体中悬浮物质含量减少。当悬浮体含量减少到65kg/m³时，垂向加积速率降低，发育爬升层理。当悬浮物质含量减少到55kg/m³时，悬浮物质的沉积和底床物质的再悬浮达到新的平衡，爬升层理不再发育，沙波开始向下游方向迁移。试验过程中槽底底形的变化及爬升层理形成阶段如图2—6所示。

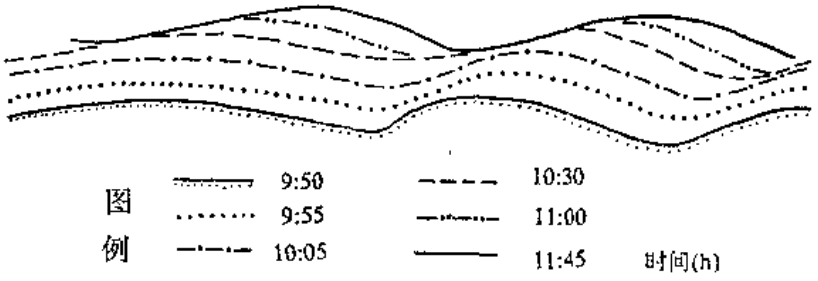


图 2—6—A 水槽试验

当流速由70cm/s 降低到30cm/s后，槽底底形发生变化，由波状层理向爬升层理发展

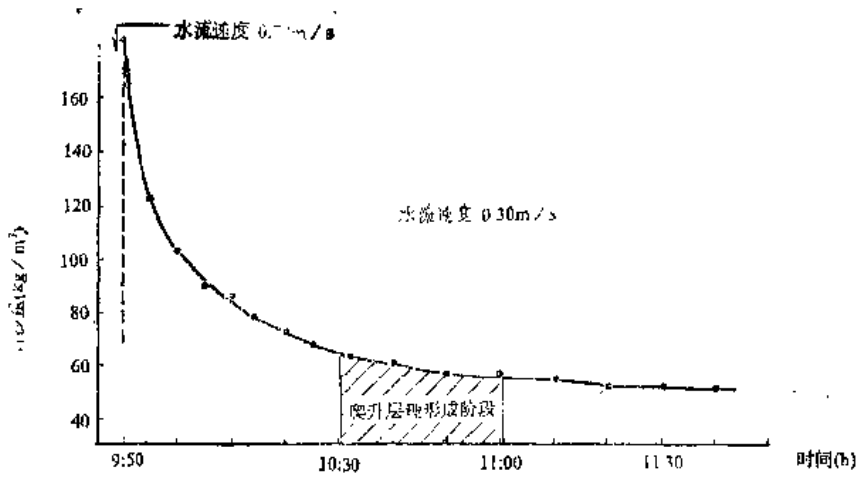


图 2—6—B 水槽试验

当流速降低后爬升层理的形成阶段

其余几次试验中，水槽的水流流速由70cm/s分别降低到60cm/s、50cm/s、40cm/s，其底形变化与此类似。爬升层理都形成于流速降低之后，悬浮体中床沙质和底床质泥沙交换达到新的平衡之前的这一阶段内。

底悬浮层另一特性是具有较强的冲蚀力，即使在流速不变的条件下也能对底形侵蚀冲刷。该项试验是在一定的流速条件下，水流经过一昼夜循环后，观察底形的变化过程完成的。观察表明，沙波在水流速度稳定时，迎水面受侵蚀，该处的泥沙经过波峰在背水面上淤落，沙坡向下游方向迁移。这是一般碎屑颗粒在流水作用下的正常迁移过程。在悬浮物质颗粒细、含量高的条件下，沙波迁移还伴随冲蚀现象。其过程是，随机因素使沙波某一点上水动力能量稍强，引起在该点上的冲刷，然后，在这点上的紊流扩大了冲刷面，直到整个沙波被夷平。与此同时，在该沙波下游不远的地方重新堆积形成新的沙坡。在水槽试

验中可看到上游侵蚀、下游堆积同时发生的现象（图 2—7），由此形成因沙波迁移而造成的不整合界面。因此，在野外观察到的层理间的界面，并不一定代表流速或流向的变化。

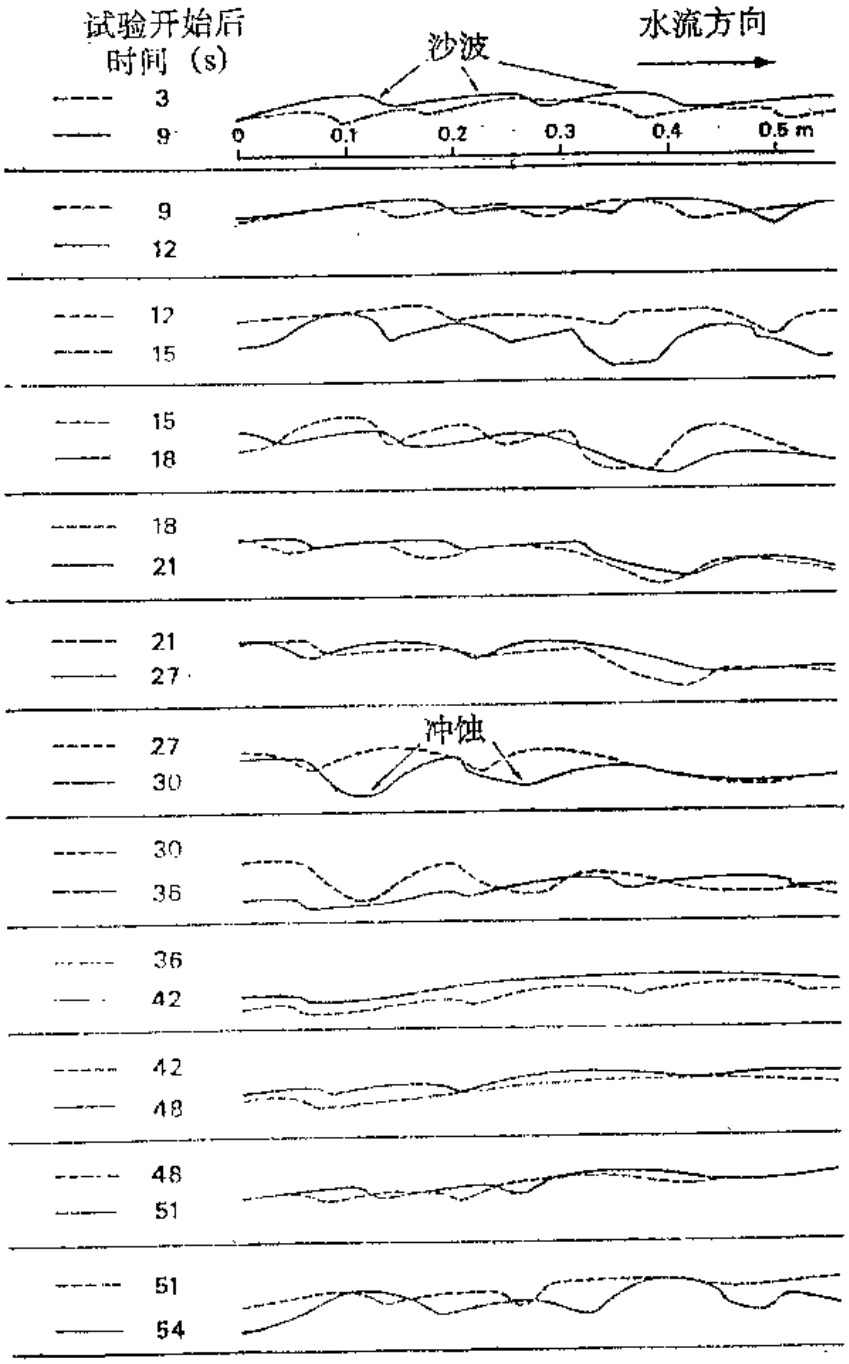


图 2—7　含细颗粒的高沙水体在稳定流速条件下对底形的侵蚀冲刷和再沉积过程

第二节　黄河水下三角洲的沉积动力学和泥沙运动

黄河三角洲的水下部分分布在低潮线以下至水深18m处，但东南部较浅，约在水深

13m处。它呈带状环绕陆上三角洲平原，一般宽15km。

水下三角洲的动力状况，在现代河口区径流起主要作用，海洋动力对径流有很大影响；在废弃河口区径流很小或者消失，海洋动力起主要作用。

本节讨论现代河口区的动力状况。废弃河口区的动力状况在下一章结合蚀退作用讨论。

由于黄河的径流量和输沙量在不同季节的变化很大，河口动力也随之改变，所以黄河三角洲水下部分的调查于丰水期（1988年8月）和枯水期（1988年5、6月）分别进行。调查站位见图2—8。调查内容有潮位、水深、流速、流向、盐度、悬浮体含量、底质取样。在有代表性的部位进行25小时的定点连续观测和分层取悬浮体样品，其站位有河口（A_3，

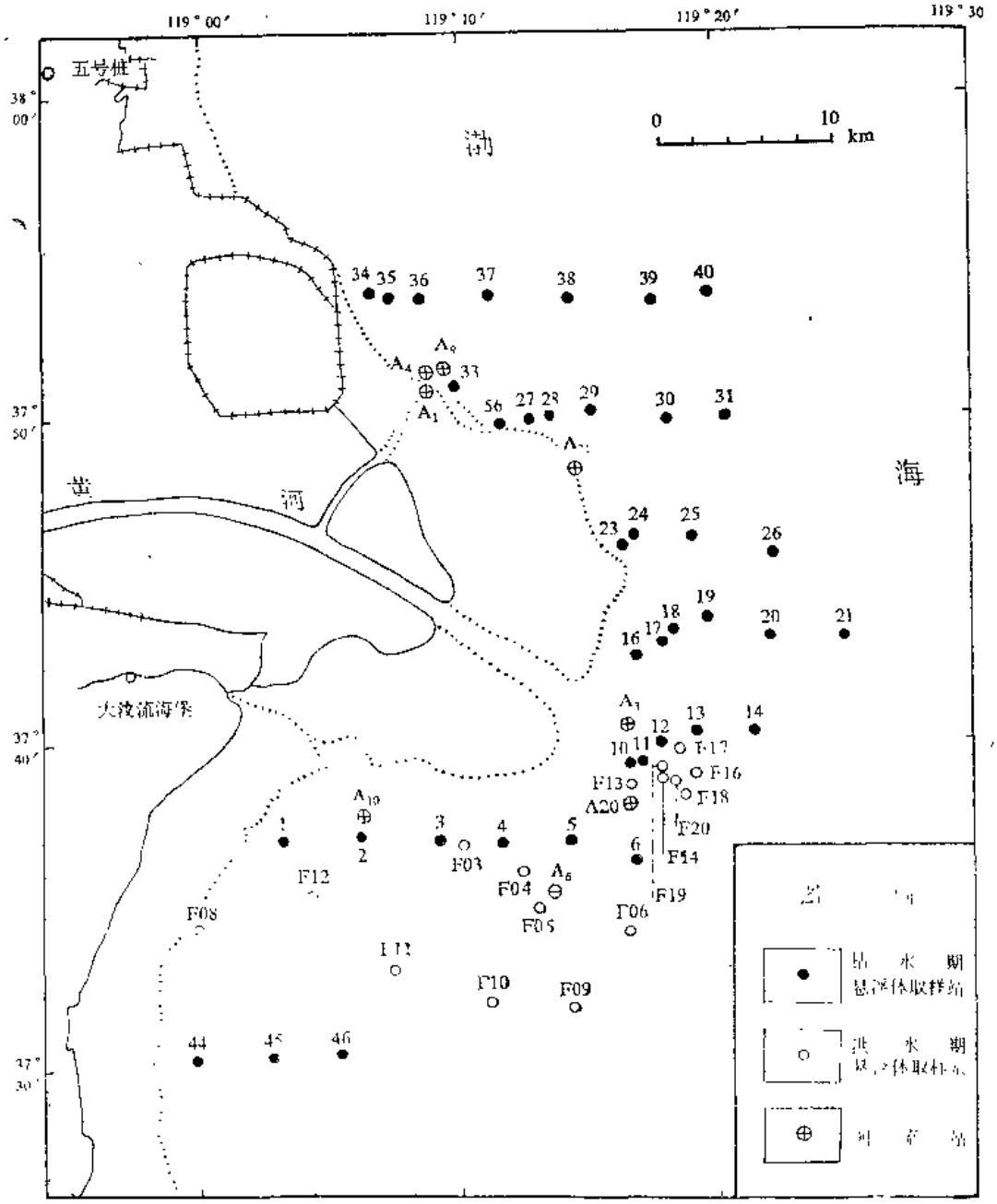


图 2—8 黄河三角洲水下部分调查站位图

表 2—4　黄河口野外调查期间利津水文站流量及含沙量统计表

日期	1987.11.		1988.5.		1988.6.		1988.8.		1988.9.	
	流量 (m^3/s)	含沙量 (kg/m^3)	流量 (m^3/s)	含沙量 (kg/m^3)	流量 (m^3/s)	含沙量 (kg/m^3)	流量 (m^3/s)	含沙量 (kg/m^3)	流量 (m^3/s)	含沙量 (kg/m^3)
1	313	2.3	26.3	0.8	37	0.42	1360	73	2090	34.7
2	232	2.09	25	0.49	73	1.06	1420	78.3	1870	35.5
3	229	2.35	27.5	0.6	100	1.11	1450	75.6	1730	31.2
4	385	3.45	29	0.53	89.2	1.58	1620	61.7	1710	33.6
5	419	3.39	25.5	0.6	82.5	1.19	1820	61.6	1650	34.9
6	330	3.18	26	0.49	60.5	0.93	1650	47.4	1660	30.7
7	277	3.3	35.3	0.75	50.5	0.67	1400	39.1	1900	31.9
8	278	3.37	35.3	0.62	40.3	0.46	1360	35.1	1770	32.1
9	347	3.52	38	0.5	38	0.44	1540	36.6	1480	24.2
10	402	3.51	138	1.82	38.3	0.7	2070	47.2	1370	22.8
11	500	3.46	124	2.34	42.8	0.86	2630	56.4	1300	21.2
12	416	2.55	161	2.67	57.7	1.41	4030	83	1290	25.9
13	306	2.59	208	2.43	99	2.63	4330	89.5	1180	21.5
14	460	3.63	214	2.66	92.5	2.19	4200	97.3	1120	20.1
15	507	3.2	238	2.7	83.8	1.99	4630	117	1360	31.4
16	390	2.47	233	2.52	63	1.68	4280	116	1400	27.6
17	255	2.39	221	2.35	43.5	1.11	4190	128	1140	22.2
18	238	2.22	201	2.27	24.5	0.66	4940	103	1020	18.6
19	189	2.24	125	1.64	21	0.62	5050	85.4	890	14.7
20	186	1.9	84.3	1.95	21.5	0.77	5100	72.9	825	16.7
21	170	1.45	70.5	1	22.2	0.37	4270	61.1	870	19.9
22	152	1.49	74.5	1.21	13.9	0.35	4140	60.7	720	14.1
23	155	1.63	125	2.17	11	0.32	4700	63.4	270	10.8
24	162	2.02	88.7	2.33	8.3	0.36	4850	63.9	205	9.72
25	270	2.35	55.9	0.92	7.45	0.15	3920	61.2	108	8.24
26	340	2.12	41.8	1.05	6.33	0.057	2920	51.1	265	9.17
27	283	1.75	34.5	0.6	0	0	2260	45.4	423	6.45
28	229	1.65	44.2	0.66	0	0	1880	39.4	363	6.35
29	208	2.75	49.6	0.71	0	0	1890	36.5	255	6.11
30	440	4.34	48.1	0.66	0	0	29.10	36.8	445	6.46
31	—	—	36.2	0.54	—	—	2280	35.8	—	—

A_{20}站），三角洲前缘（A_6站），三角洲北侧缘（北烂泥湾，A_4，A_9，A_{21}站），三角洲南侧缘（南烂泥湾，A_{10}站）。悬浮体取样，一般取三层：底层，离底0.3—0.5m；中层，大致相当于二分之一水深；表层，水面以下0.5m。

波浪和风的数据，参考了五号桩附近的波浪观察站和气象站的资料。调查期间黄河的流量和含沙量，参考利津水文站的资料（表2—4）。

一、河口区的动力状况和泥沙运动

河口动力作用主要表现为河水入海后的扩散及其与海水的混合作用。河口区的盐度是河口水体混合作用的直接指示参数。因此，我们用盐度在河口区的变化来说明黄河水入海后的扩散和混合过程。

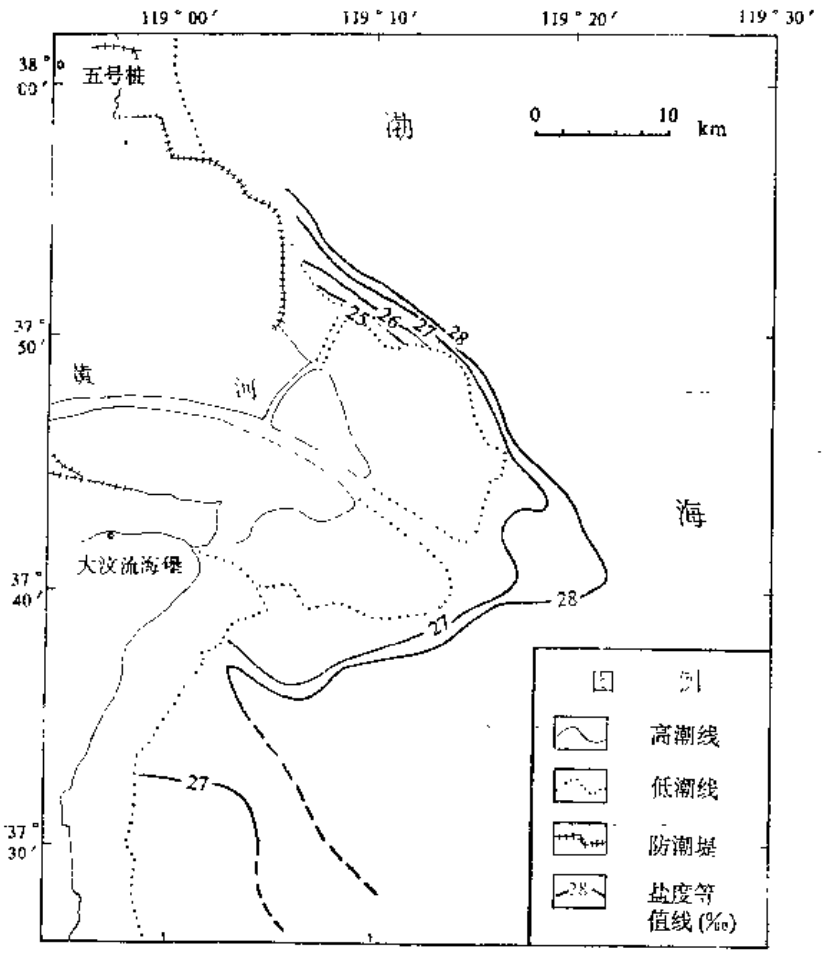


图 2—9 枯水期黄河口表层水盐度分布图

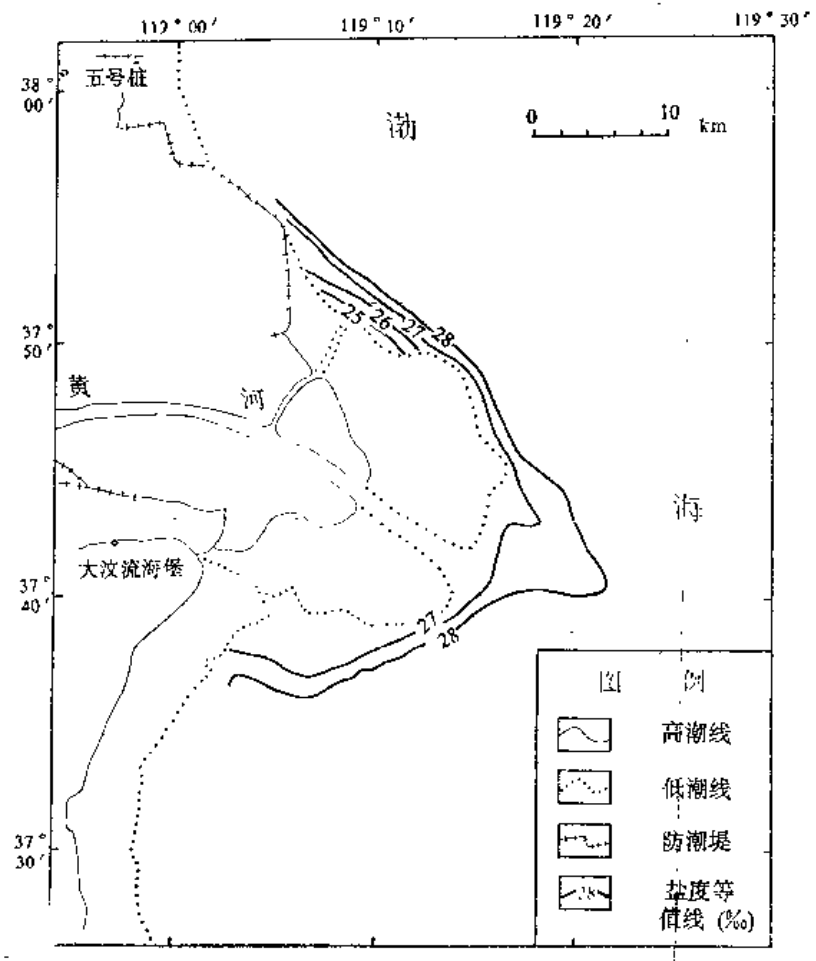


图 2—10 枯水期黄河口底层水盐度分布图

（一）枯水期黄河水及悬浮泥沙的扩散

枯水期黄河流量极小，仅几十到几百立方米每秒。河口水浅，仅 1 m左右。入海的黄河水与海水高度混合，在垂向上盐度无明显变化。

图2—9是根据1988年5月17日至6月6日在黄河口区测得的盐度值而编制的表层水盐度分布等值图。

由图2—9可以看出，黄河口区水体的盐度值为24.4‰—28.8‰，黄河径流入海的冲淡水分布在一个狭小的范围内。若以28‰作为河水扩散的边界，可看出黄河入海后向东南方向扩散。该水体沿岸方向长30km，顺河方向长6—9km，影响最远点为119°22′E，37°40′N，水深13.3m处（该数值未经潮汐校正）。

底层水（离底0.3—0.5m）的盐度分布如图2—10所示，冲淡水的形态与表层水几乎完全一致，只是前端部比表层稍小一点。

枯水季节的15个站位的盐度-深度剖面（图2—11）资料表明，在垂向上无明显的盐度变化，个别站位上下层的盐度略有差异，很可能是受涨落潮的影响。因此，枯水期黄河口是强混合型河口。

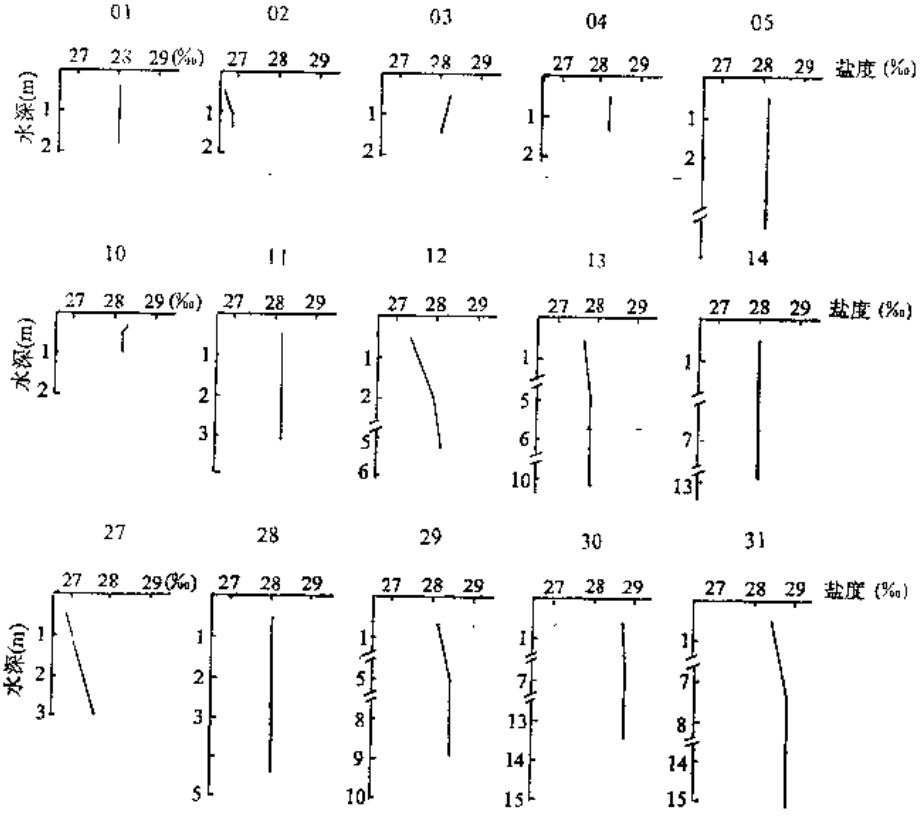


图 2—11　枯水期黄河口部分测点的盐度-深度剖面图

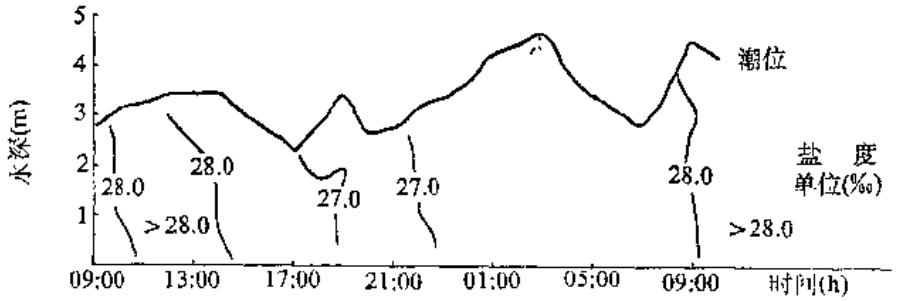
图顶数字为测站号（见图2—8），表明黄河口水体在垂向上无明显盐度变化，属强混合型河口

（二）枯水期黄河口门的动力环境和混合作用

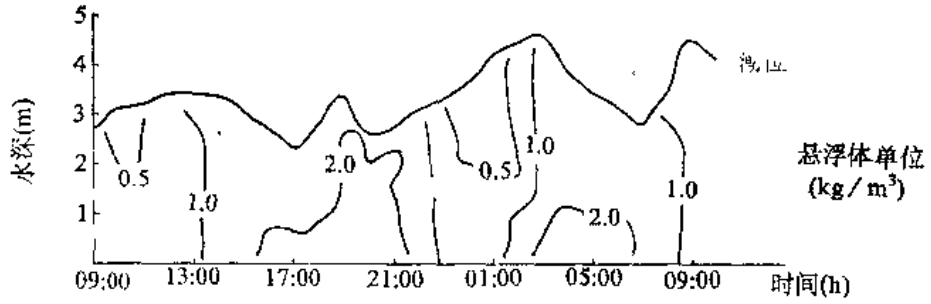
下面我们以实测资料为例，说明枯水期黄河口门处的动力环境和混合作用。

A_3站是设于黄河口门的一个观测点。观测时间起于1987年 11 月 8 日 9:00，止于 9 日 10:00，历时25小时（图2—12）。观测期间黄河的流量和含沙量见表2—4。

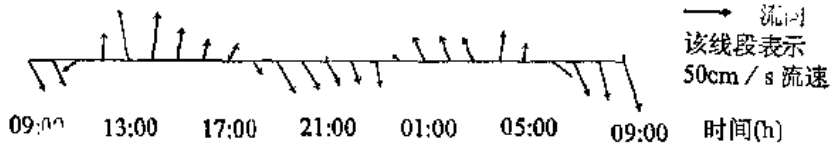
1．潮汐　从潮位过程曲线上看，本点的潮汐很不规则，一个潮汐周期内有两次高潮，潮位很不对称，夜间的潮差明显大于白天。由于受黄河径流的影响，在低潮位时也出现次一级高潮。结合水体盐度可以看出，这个次高潮是由于涨潮时被拥挤在河道内的黄河水下泄形成的。



A



B



C

图 2—12　枯水季节黄河口潮汐、盐度、及悬浮体含量在一个潮周期内的变化
（据1987年11月A_3站实测资料）
A——一个潮周期内不同深度的盐度变化；B——一个潮周期内不同深度的悬浮体含量变化；C——一个潮周期内潮流的流速流向

潮流速度为11—40cm/s，流向西北-东南，与黄河径流方向大致垂直。受径流影响，本点的潮流有以下两个特点：一是涨落潮流的方向多变，如图2—12—C所示。09:00—11:00涨潮流方向为东南-西南，而00:00—03:00涨潮流的方向却是西北，落潮流的方向变化也很大；二是最大潮流出现的时刻与正常潮汐不同，A_3点的最大潮流出现在高潮位和低潮位时，而不是出现在半潮位。

2．悬浮体含量　黄河口门附近水体中悬浮体含量的变化，明显受径流和潮汐控制。低潮位时含量高，可达2kg/m³以上，高潮位时含量低，一般为1—0.5kg/m³。从悬浮体含量剖面上看（图2—12—B），涨潮过程中悬浮体含量变化较小，退潮过程中变化大。

3．混合过程　水体的盐度随时间的变化直接反映了黄河水与周围海水的混合过程。由图2—12—A可以看出：09:00—10:00时，该点的盐度小于28‰；10:00—13:00时大于28‰；13:00—17:00时，盐度逐渐降低，其值介于28‰—27‰之间；17:00—21:00期间为本点盐度低值出现时刻，其范围为27‰—21.6‰；21:00至次日08:00，盐度逐渐升高达28‰；08:00—10:00盐度值大于28‰。A_3点的盐度-时间剖面在垂向上（沿深度方向）无明显变化。开始涨潮至半潮位期间往往是上部的盐度比下部稍高，存在一个弱负梯度。高平潮时盐度上高下低或上下均匀。而落潮和低潮时，往往是上部盐度稍低，下部盐度稍高，存在一个弱正梯度，有时正梯度较大。

上述事实说明，枯水期的黄河口是一个高度混合型河口。它与长江口和密西西比河口明显不同。密西西比河口是盐水楔河口的典型例子，当密西西比河流量比较小时，盐水楔可向内陆伸进100多英里❶，而流量大时盐水楔也能从河口向内伸进一英里多。长江口也存在盐水楔，尽管在潮汐过程中盐水楔上下移动，但盐水楔始终存在，其盐度几乎不变。

（三）洪水期黄河水及悬浮泥沙的扩散

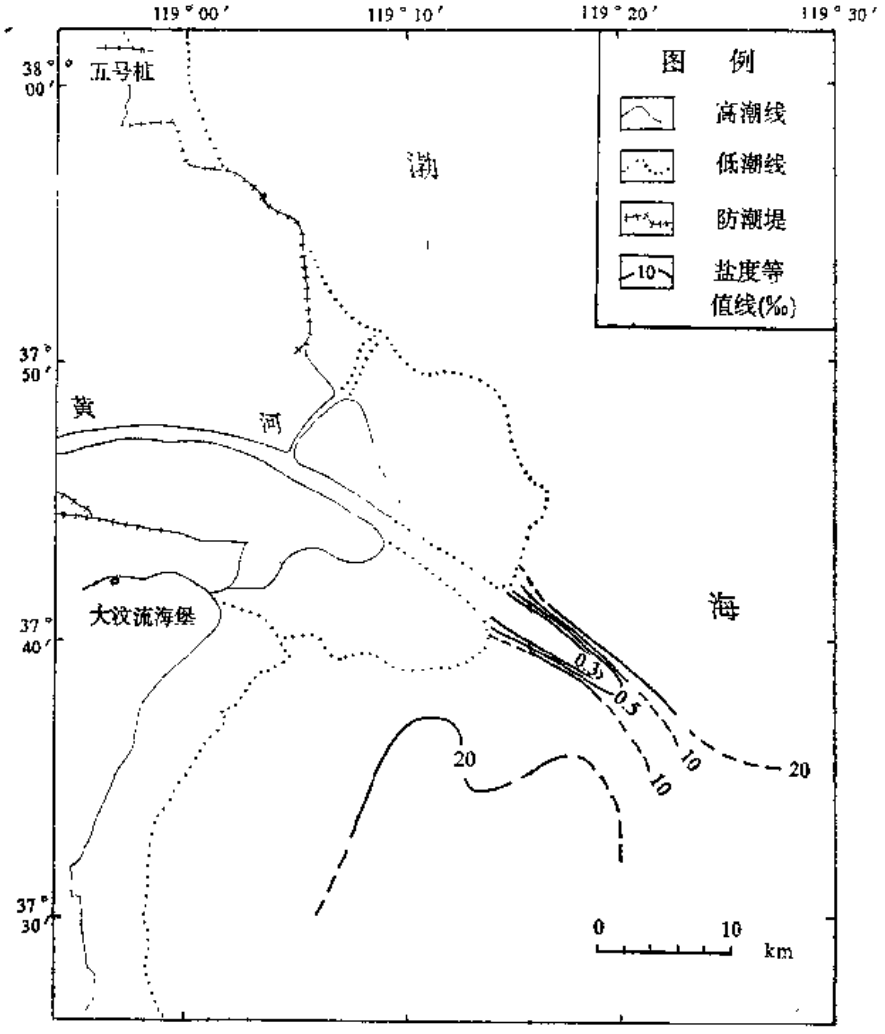


图 2—13　丰水期黄河口表层水盐度分布图

❶ 1英里 = 1609.344m。

黄河水的含沙量随季节不同而有显著的变化。丰水期（7—10月份）黄河流量大（可达3000—5000m³/s），含沙量高，底层可高达50—170kg/m³。含沙量高的黄河水体入海后，与周围海水混合作用很弱。河水在口门附近呈狭长水体沿着水下河道向海延伸，在水深2—5m处，下部高含沙量水体潜入海底形成高密度流，上部低含沙量水体在海水之上呈漂浮扩散。

图2—13为黄河丰水期（1988年8月1日—9月1日）流量为1880—5100m³/s时黄河口表层水（0.5m水深）的实测盐度分布图。与枯水期对比，黄河水入海后与周围海水的混合作用很弱。按0.3‰的盐度值来圈定淡河水的范围，可达口外7.5km；按0.5‰来圈定，可达10.5km，接近11m水深处。黄河入海干流与周围水体之间界线分明，在入海干流北侧尤其明显。

洪水期河口水体盐度分布的一个特点是，在黄河入海干流南侧的一片水域，普遍存在一个较大的盐度负梯度。图2—14所示为洪水期底层水（离底0.3—0.5m）的盐度分布。同表层水的盐度分布相比，黄河入海干流北侧没有差别，黄河入海干流本身也与表层大体相同。而在入海干流南侧的高盐水体之下存在一个大面积的低盐水体。图2—15为这些站位的盐度-深度剖面和悬浮体含量-深度剖面。这些站位盐度的突然降低与悬浮体含量的突

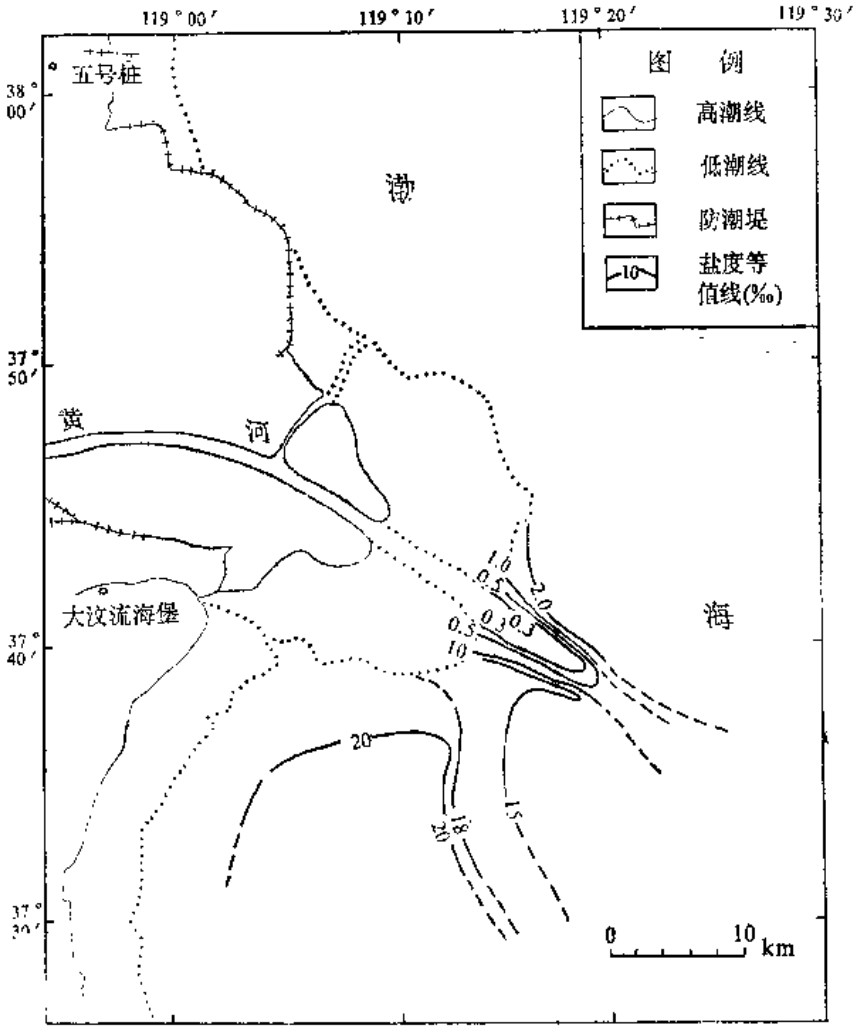


图 2—14 丰水期黄河口底层水盐度分布图

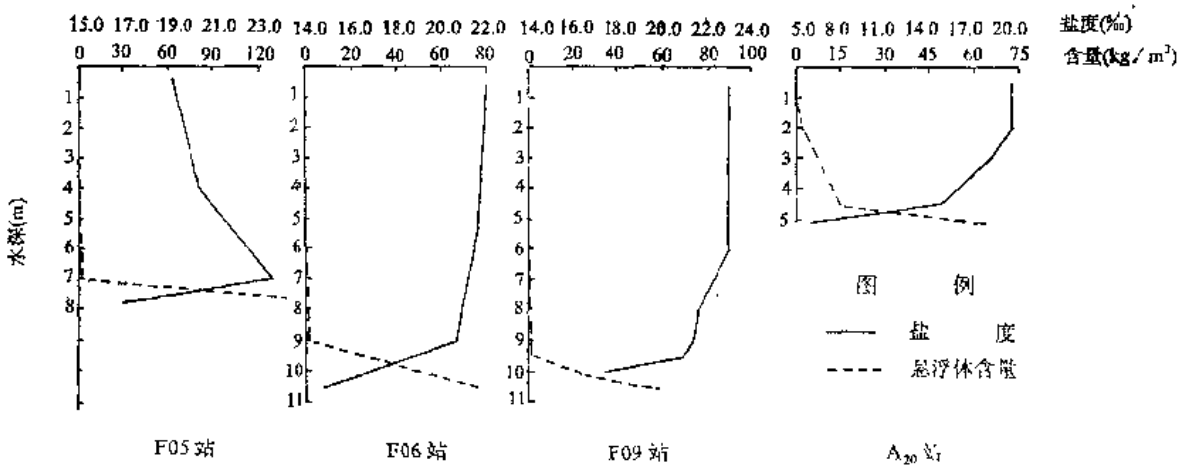


图 2—15 黄河口高密度流区的盐度-深度剖面和悬浮体含量-深度剖面

随深度加大出现的盐度突然降低与悬浮体含量突然增高，表明存在高密度流

然猛增是相对应的。这种对应关系表明，黄河水入海后除了由于强大的惯性向三角洲前缘和前三角洲扩散外，还由于密度差异，形成低盐度高悬浮物质的高密度流。

黄河口洪水期悬浮体含量变化也反映高密度流的存在。图2—16为洪水季节表层（水面以下0.5m）的悬浮体含量分布图。可以看出，黄河入海干流两侧水体中的悬浮体含量大都小于1kg/m³。而黄河水本身表层悬浮体的含量可达21.588—61.629kg/m³。若以20kg/m³的悬浮体含量来圈定黄河干流，则干流局限在一个狭窄的范围内，同样表现出黄河入海后扩散作用很弱的特点。

图2—17是洪水期底层水（海底以上0.3—0.5m）的悬浮体含量分布图。与表层水相比，入海干流北侧的水域无明显变化，一般小于1kg/m³。而黄河入海干流南侧，则与表层明显不同，底层水的悬浮体含量达59.25—177.67kg/m³，向西底层水的悬浮体含量迅速降至5kg/m³，再向西降为3—5kg/m³，继而1—3kg/m³，至岸边降为1kg/m³以下。

黄河入海干流本身底层水的悬浮体含量高达43.95—111.089kg/m³。以20kg/m³的悬浮体含量等值线圈定黄河入海干流，同样也表现出黄河入海后与周围水体混合作用很弱的特点。

目前，只是在入海干流南侧发现有大面积的高密度流，而在入海干流北侧的站位上却没有发现，其原因尚不清楚。就直观观察，黄河水以极大的势能流入海区之后，仍具有强大的惯性。远远望去犹如一堵黄色的土墙插进海区，伸向东南。这条入海干流挡住了由东北方向来的风浪，使入海干流南侧变成了一个相对平静的海域。这对于高密度流的形成是有利的。相比之下，入海干流北侧，由于风浪大，可能不利于高密度流形成。

（四）高密度流区的动力环境

A_{20}站在黄河入海干流南侧约1.5km处，位于高密度流区的北部边缘，水深5.5m。1988年8月19日12:30至8月20日13:00在此站进行了25小时的连续观察（图2—18）。

1．潮汐 如图2—18所示，潮位曲线表现出半日潮的特点，最大潮差为1.5m。潮流速度变化较大，最大流速达132cm/s（在水深3.5m处），最低流速为零。潮流速度的变化与潮位对应性差，其变化形式与半日潮的一般规律不符。潮流的流向更为特殊，在一个潮周期中，流向均为北东向和北西向，无向南的流向。这与枯水季节的流向变化显然不同。

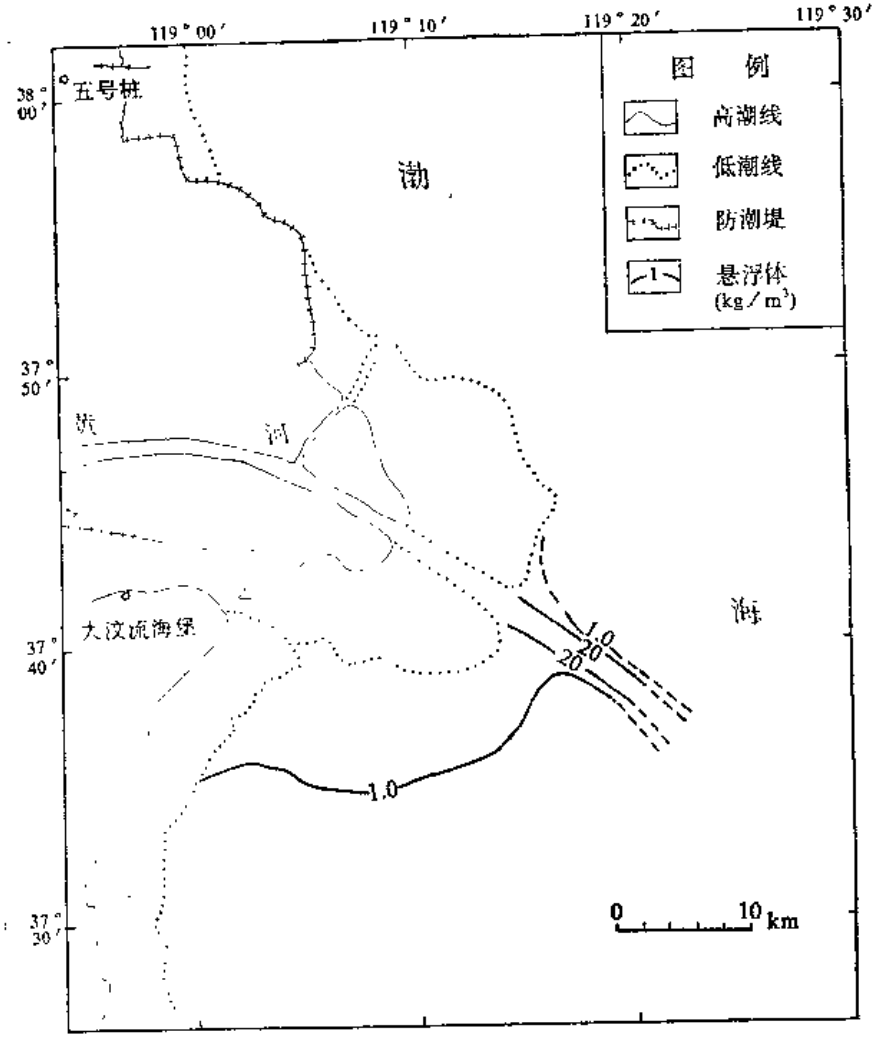


图 2—16 丰水期黄河口表层悬浮体含量分布图

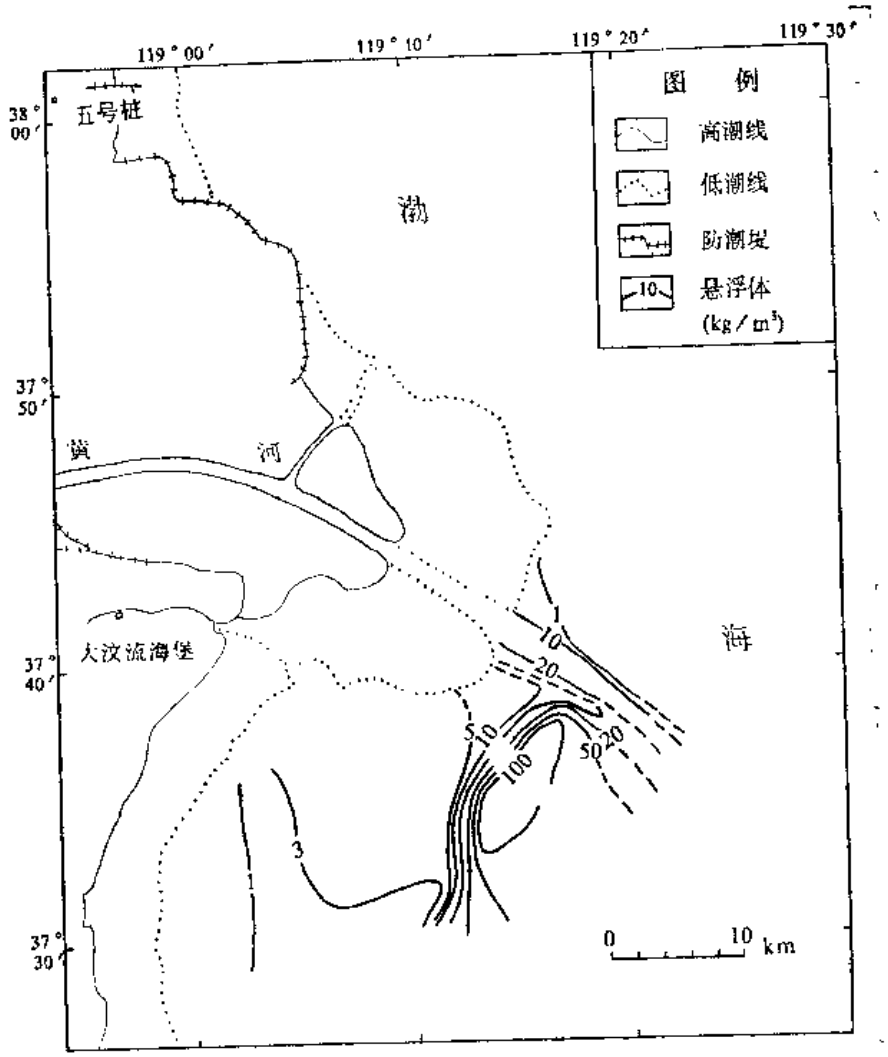


图 2—17 丰水期黄河口底层悬浮体含量分布图

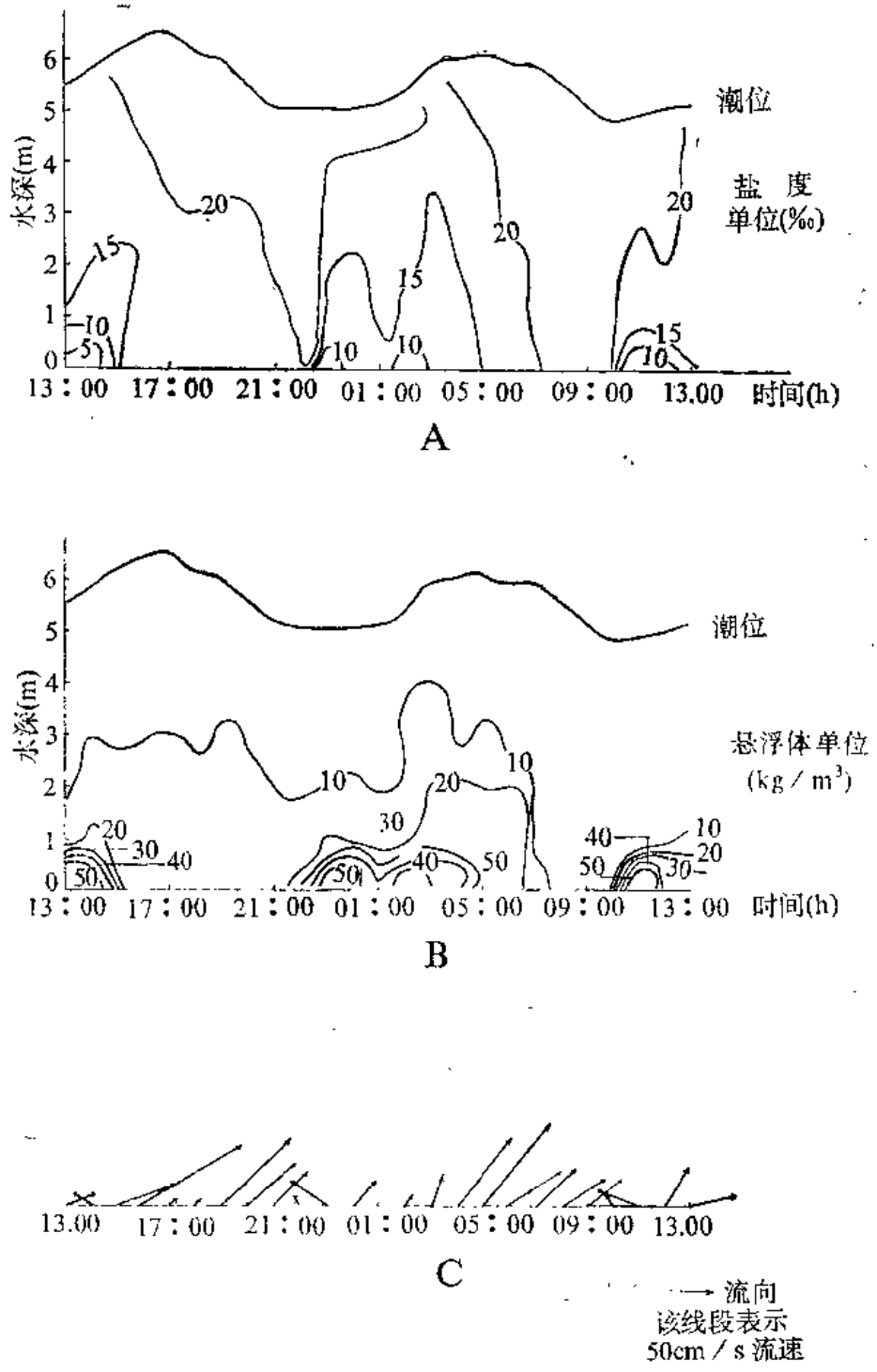


图 2—18 黄河口高密度流区潮汐、盐度及悬浮体含量在一个潮周期内的变化

（据1988年8月A_{20}站实测资料）

A——一个潮周期内不同深度的盐度变化；B——一个潮周期内不同深度的悬浮体含量变化；C——一个潮周期内潮流的流速流向

由该点的流速流向变化特征可以推测，由于黄河水在洪水季节以强大的惯性入海，因摩擦作用而带动入海干流南侧的水体运动，从而改变了河口附近潮流的分布，在入海干流的南侧形成一个顺时针方向旋转的环流。

2．盐度 A_{20}点的盐度-时间剖面（图2—18—A）表明，黄河口门的盐度变化是潮汐

和径流共同作用的反映。整个水体高潮时盐度高，低潮时盐度低，但洪水季节的黄河口具有与世界上已知大河口完全不同的盐度分布模型，那就是不论高潮还是低潮在水体的垂向剖面上，始终存在一个负梯度，而且有短暂的盐跃层。这表明黄河水由于含沙量高，其密度比周围海水密度大，黄河高含沙水体入海后潜入海水层之下，形成高密度流。

高密度流形成的另一个诱发因素是潮汐。从盐度-时间剖面上可以看出，在该点底层低盐水团的出现与潮汐过程有关。开始涨潮至半潮位时是高密度流发育的时刻，而高潮位至低潮位时是高密度流与周围海水混合消散的过程。所以黄河口区的高密度流具有周期性的特点。

3．悬浮体含量　由悬浮体含量-时间剖面（图2—18—B）可以看出，表层水悬浮体含量较低，高潮时一般小于1kg/m³，低潮时为1—5kg/m³，而底部悬浮体含量甚高，可达60kg/m³以上。高浊度水体的形成和存在与低盐度水体的形成和存在，在时间上是同步的。

综合洪水季节河口地区表层和底层水的盐度分布、悬浮体含量分布、盐度和悬浮体的时间剖面变化特点等资料，可以证明，洪水季节黄河口有高密度流。

通过这次调查了解到：从开始涨潮至半潮位时是黄河口区密度流的发育时刻，而由高潮位至低潮位是密度流消散时刻。这一结论与L.D.Wright等人在1985—1987年黄河口沉积动力调查的结果不同。Wright等人(1986，1988)认为，黄河口水深大于5m的海域（相当于水下三角洲前缘顶部以外的海域）内，存在一股密度流，沿前缘斜坡底部往下流动，直达前三角洲。底密度流层厚1m，最厚4m，落潮时形成，涨潮时消失。提出这两种不同结论的原因是因为二者设置的站位点不同。这次调查的站位点位于黄河水下干线外南侧，涨潮时冲淡水受海水顶托，密度流侧向溢出干线。Wright等于1986年调查的站位设于干线中间，落潮时，黄河水顺流而下，悬浮体含量增高。这两个结论实际上都说明了密度流形成的条件，除高含沙量外，还与潮汐周期有关，我们称之为“密度流的周期性”。在河口区的不同部位，它形成和消散的时刻不同，这也是黄河口密度流的一个特点。

二、三角洲侧缘（烂泥湾）的动力状况和泥沙运动

黄河入海口两侧动力环境与入海口处动力环境有很大差异。此处受河水的影响较小，而潮汐影响较大，属于低能环境。

黄河三角洲南侧缘因受高密度流影响，动力状况多变，北侧缘相对稳定。现根据调查期间的实测资料，探讨黄河三角洲北侧缘的动力环境。

（一）枯水期三角洲北侧缘（北烂泥湾）的动力环境和混合作用

A_4点位于三角洲北侧缘的西部，1987年11月6日14:00至7日15:00在该点进行了25小时的连续观测（图2—19）。

1．潮汐　不规则半日潮，潮差1.0m，潮流速度为7—25cm/s（图2—19—C）。流速变化大致符合于潮汐的一般规律，即高潮位和低潮位时流速较低，半潮位时流速高。潮流方向与涨落潮无明显关系，在25小时的观测中有20小时的流向为西南和东南，仅有5小时为西北或东北，符合在北侧缘反时针方向旋转的弱环流系统。这个弱环流为泥质沉积提供了良好的条件。

2．混合过程　相对于黄河口门区来说，北侧缘区是一个高盐水体，其盐度值为28.2‰—29.5‰，变化较小，这表明河水对其影响甚微。盐度变化的总趋势与口门处的正

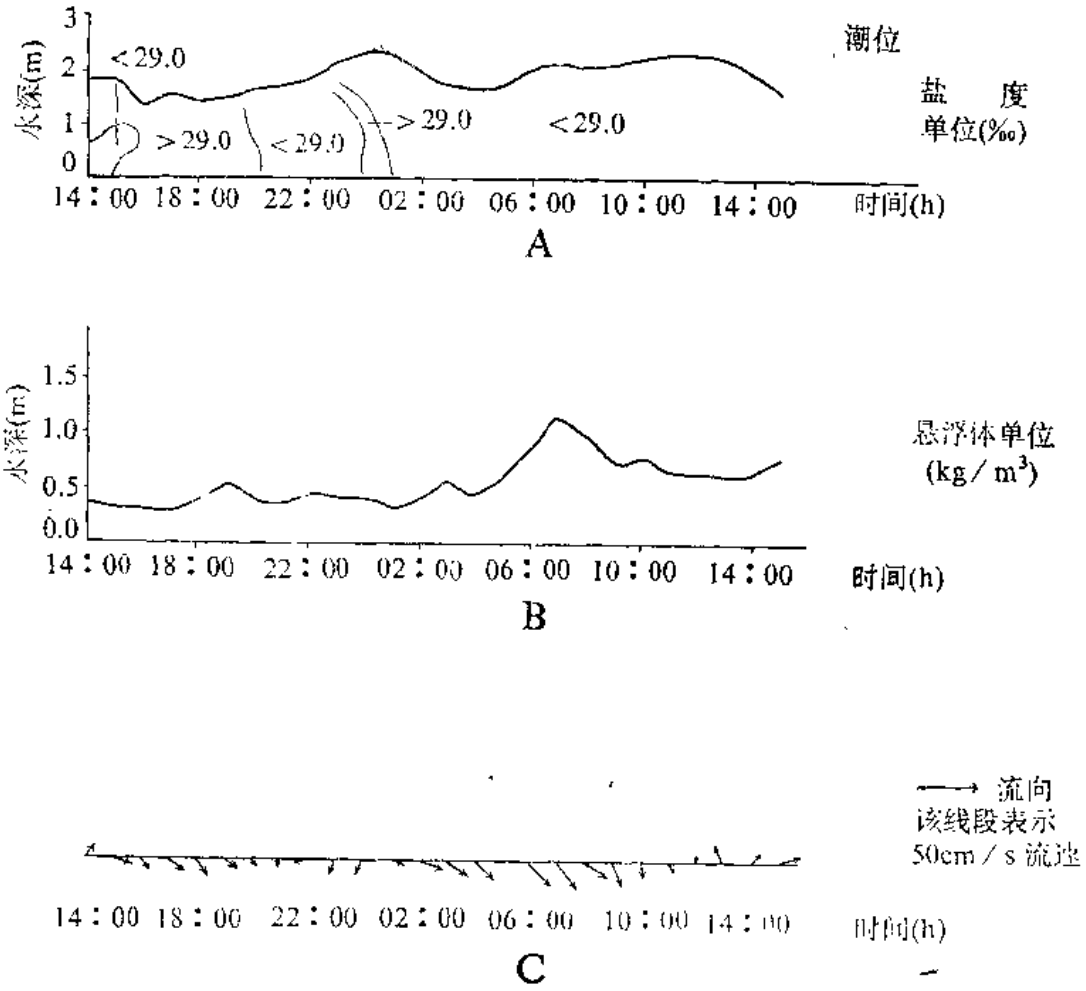


图 2—19 枯水季节黄河三角洲北侧缘（北烂泥湾）潮汐盐度悬浮体含量在一个潮周期内的变化

（据1987年11月A_4站实测资料）

A——一个潮周期内不同深度的盐度变化；B——一个潮周期内悬浮体含量变化；C——一个潮周期内潮流的流速流向

好相反，高潮位时出现盐度的低值，低潮位时出现盐度的高值。从盐度-深度剖面上（图2—19—A）也可以看出，在涨潮过程和高潮位时往往是上部盐度低，下部较高，存在一个不大的正梯度。

北侧缘水体的悬浮体含量很低，绝大多数小于0.5kg/m³。高潮时悬浮体含量比低潮时高，但其差值不如口门处的那样明显。

上述事实表明，由于涨潮波向陆逼近，有极少量的黄河水被涌进北侧缘。

（二）洪水季节北侧缘的动力环境和混合作用

1988年8月23—24日，在北侧缘A_{21}站进行了定点连续观察。该点水深高潮时为2m，低潮时为1.2m。

1．潮汐 本点的潮汐具有日潮特点（图2—20），一天之内只有一次高潮。潮位曲线上的次高潮可能受半日潮影响所致，因为该点位于半日潮和无潮区的过渡位置上。

潮流速度为10—56cm/s，潮流速度和流向的变化显示出半日潮的特征。

2．盐度 从该点不同深度的盐度-时间剖面上看（图2—20—A），本点的盐度值约为

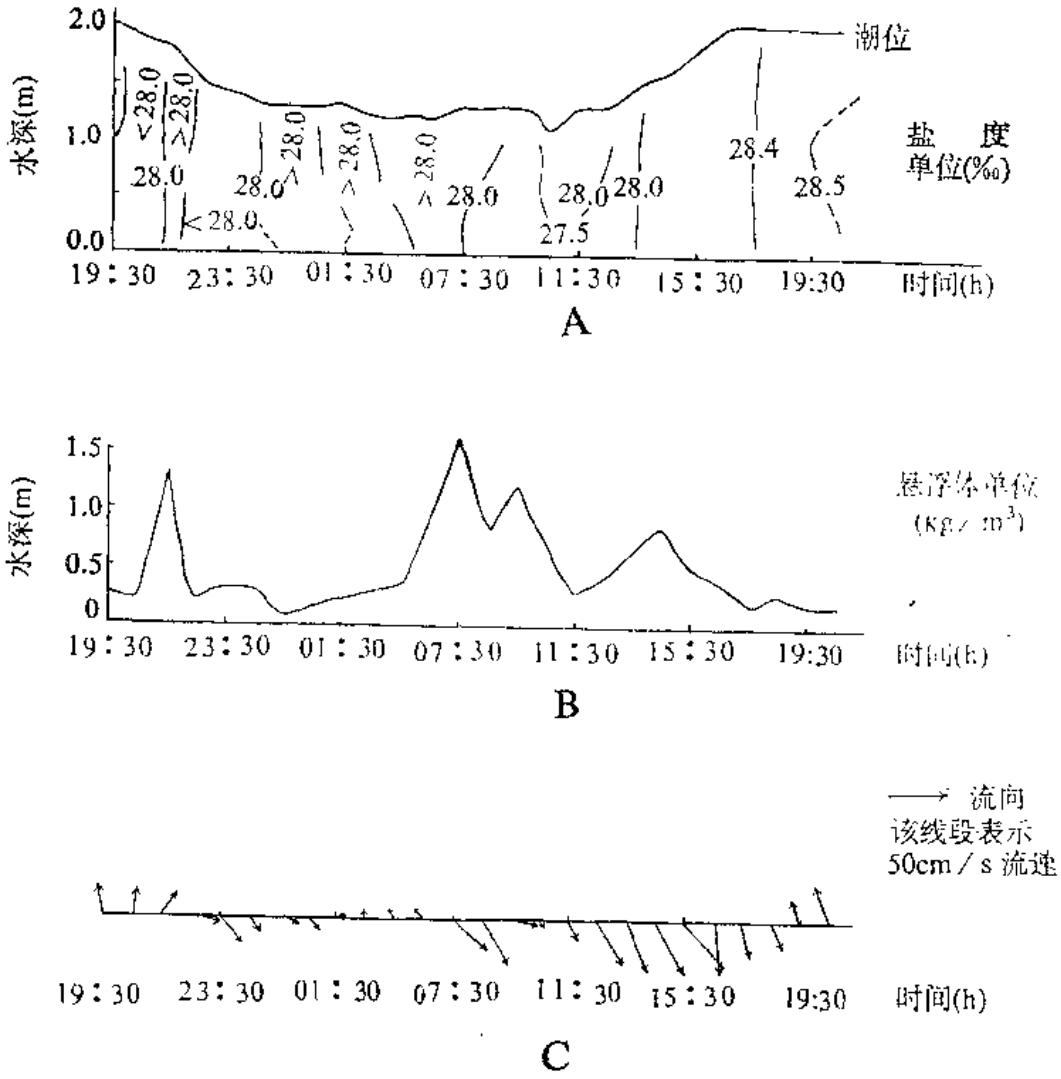


图 2—20 丰水季节黄河三角洲北侧缘（北烂泥湾）潮汐、盐度、悬浮体含量在一个潮周期内的变化

（据1988年8月A_{21}站实测资料）

A——一个潮周期内不同深度的盐度变化；B——一个潮周期内悬浮体含量的变化；C——一个潮周期内潮流的流速流向

27.36‰—28.64‰，变化范围较小，在垂向上无明显梯度。随时间变化的总趋势是高潮时盐度高，低潮时盐度稍有偏低。这可能是由于退潮流从岸边带来少量冲淡水的结果。

3．悬浮体含量　本点不同层位的悬浮体含量大都很低，一般小于1kg/m³。在一个潮周期内变化量在1—0.2kg/m³之间。悬浮体含量的变化似乎与潮流没有明确的对应关系，而与风浪的再悬浮作用有关。悬浮体含量的变化与盐度也无明显的对应关系。

上述现象说明，北侧缘在洪水季节基本上不受黄河入海物质的影响。由于A_{21}点正好位于北侧缘的南界处，说明洪水季节黄河入海物质对北侧缘的影响甚微。

三、黄河水下三角洲的沉积动力模式

综合上述表明，黄河三角洲是以河流作用为主的三角洲，水下三角洲的动力条件在不同季节各不相同。由于黄河丰水期输沙量占全年的84%，因此，丰水期的沉积动力状况（图2—21）对黄河三角洲的发育生长关系最大。

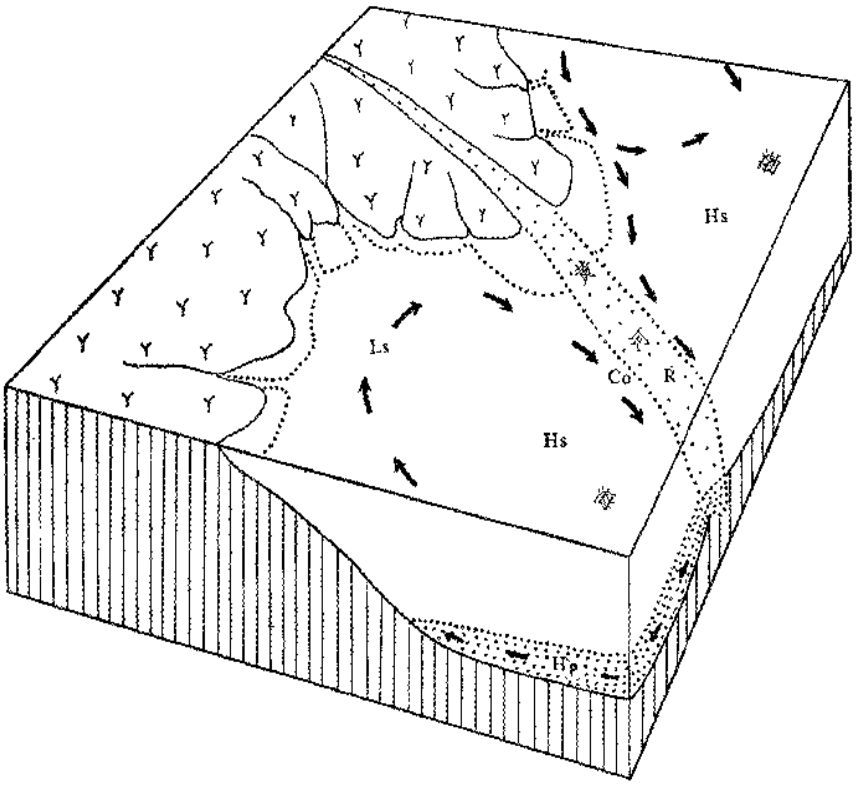


图 2—21　黄河口丰水期动力作用模式

R—丰水期黄河入海干流；H_P—高密度流；H_S—高盐水体；Ls—低盐水体；Co—入海干流两侧的辐聚带

丰水期黄河高含沙水体顺河道方向射入渤海海水盆地，形成一条低盐高浊度带，直达水深5m左右的海域。在此带内，盐度值仅为0.3‰—0.5‰，在垂向上盐度无明显变化，带宽约3—5km，与两侧海水界面清楚，形成一个非常明显的锋面。锋面宽 50—100m。锋面一侧是混浊奔腾咆哮的黄河水，另一侧则是黄绿至蓝绿色相对平静的海水。两者之间有大量漂浮的芦根和其他来自陆地动植物、泡沫、污染物等。在 5m 水深外侧，相当于水下三角洲前缘顶端，高浊度的黄河水顺前缘斜坡潜入海底，形成1—4m厚的高密度流，直达前三角洲区。一部分黄河水呈漂浮状态，在海水之上向周围扩散。随着远离河口，水色由黄色过渡到黄绿色再转为蓝绿色，反映出与海水逐渐混合的过程。

黄河口的高密度流具周期性，即在一个潮周期内有形成和消散两个过程，在形成阶段底层含沙量高达177kg/m³，在消散阶段底层含沙量降为2—17kg/m³。在高密度流区内，各点的形成和消散时刻随潮汐影响的不同而异。

除高密度流外，黄河口还存在两个环流：河口北侧为逆时针环流；南侧的为顺时针环流（图1—6）。黄河入海的混浊水，其表层部分随着环流扩散，将悬浮物质带入三角洲北侧缘（北烂泥湾）和南侧缘（南烂泥湾），少部分扩散到前三角洲区。

第三章　黄河三角洲沉积环境和沉积物

黄河含沙量高、输沙量大、沉积速率高、河道频繁变迁，因而沉积环境极不稳定，沉积相变化较大。

黄河河道经常决口，决口扇发育。在河口附近决口尤其频繁，并常常演化成新的入海分流。黄河三角洲上各分流河道同时行水的并不常见，大多是前期分流为后期的另一个分流所代，河水由单分流入海。因此，黄河分流河道沉积、决口扇沉积以及天然堤沉积常相互过渡、交错、重叠，组成一个复杂多变的沉积序列。

黄河携带的泥沙主要是粉砂和粘土。其中的最细部分在潮流作用下向河口两侧搬运很远，形成黄河三角洲独特的三角洲侧缘沉积，即烂泥湾沉积。

黄河各亚环境的沉积物粒度组分相近，环境特征更多地是反映在地形地貌、沉积物构造和微体生物化石种属和含量诸方面。

第一节　黄河三角洲的沉积环境

根据沉积动力作用特点，黄河三角洲沉积环境可分为三个大环境九个亚环境：

上三角洲平原

　河道（河床及边滩）

　天然堤

　决口扇

　泛滥平原

下三角洲平原

　潮滩（潮上带、潮间带）

水下三角洲

　前缘（河口沙坝及远端沙坝）

　前三角洲

　三角洲侧缘（烂泥湾）

　废弃水下三角洲

三角洲平原和水下三角洲之间是以低潮线为界，上三角洲平原和下三角洲平原之间则以特大高潮线为界。

图3—1是黄河三角洲现代沉积环境分区图。在上三角洲平原中的决口扇、分流河道和天然堤，其沉积物类同，结构构造相似，很多地方难于确定所属环境，因此在图上标为三者的组合环境。

各环境的特征如下：

一、上三角洲平原亚环境

黄河上三角洲平原中，决口扇及河道特别发育，约占上三角洲沉积的3/4；泛滥平原

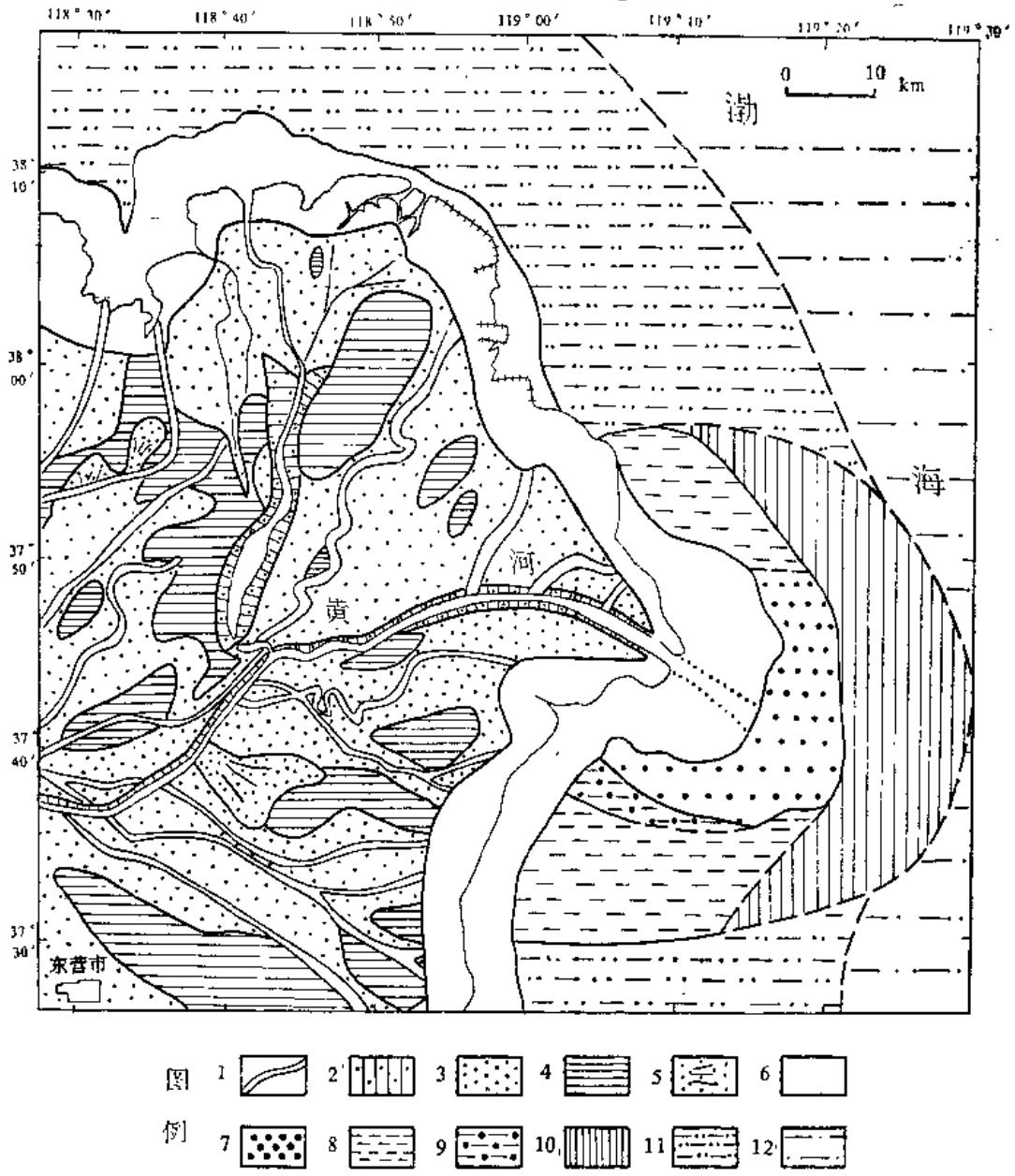


图 3—1 现代黄河三角洲沉积环境图

1—河道；2—天然堤；3—决口扇-河道-天然堤；4—泛滥平原；5—决口扇；6—下三角洲平原(潮滩)；7—前缘（河口沙坝及远端沙坝）；8—三角洲侧缘（烂泥湾）；9—河口沙坝-侧缘过渡带；10—前三角洲；11—废弃水下三角洲；12—浅海

却不甚发育。

黄河三角洲上既有现代河道又存在古河道。现代河道是1976年开始行水的清水沟河道，宽约600—1000m，从天然堤顶部到床底深4—6m。防洪堤内黄河河道的滩面高出堤外地面约1m，呈悬河。古河道呈放射状从三角洲顶点向海岸方向伸展。在调查区内有三条完整的古河道：1934—1953年的第7流路，该流路有三股分流分别向东南、正东和东北方向入海；1953—1964年的第8流路，即神仙沟流路；1964—1976年第9流路，即刁口河流路。古河道的河口段受海洋动力作用改造，已演变成潮沟。河口段以上因不均匀地充填沉积而形成很多小湖泊。

黄河三角洲的天然堤大都保存不完整。分流改道后初期，河水漫流、河床多变，天然堤不发育，并且大部分被后期流水冲蚀改造，在地貌上形成一些低起伏的堆积体。当分流河道发展到单一顺直时，天然堤保持较好，平行河道分布。调查区内保存较完整的天然堤有两处，即现代河道和钓口河古河道两侧（图 3—1）。天然堤，尤其是早期天然堤，与河道的界线很不明显。

黄河三角洲上的河道两侧都筑有防洪堤，两堤之间宽度为几公里到二十多公里。黄河三角洲的决口扇绝大多数是在防洪堤之内。决口扇也同上述天然堤类似，改道后初期形成的决口扇与河道界线难分，后期决口扇形态较完整。因此两者也经常组合在一起，形成复杂的沉积序列。

黄河三角洲泛滥平原因受防洪堤所限及古河道的阻挡或疏导作用，因而呈小块状散布，这与其他三角洲有很大差别。

二、下三角洲平原亚环境

黄河三角洲的下三角洲平原是由河口沙体经海洋动力改造发展而成，现在成为潮滩环境。在进积型潮滩（现代河口）区，滩面坡度平缓，呈鸭嘴状突入海中；在蚀退型潮滩区，宽度较窄，坡度较陡，呈带状围绕上三角洲平原分布。

三、水下三角洲亚环境

黄河水下三角洲环境可分为三角洲前缘、前三角洲和三角洲侧缘三个亚环境。三角洲前缘位于河口前方 0—12m 水深处，是一个坡度较大的区域。它由两部分组成，水深0—7m处是河口沙坝沉积区，水深7—12m处是远端沙坝沉积区。前三角洲位于12—18m水深处，该处地形平坦。三角洲侧缘是黄河三角洲极为发育和特殊的一个单元，故把它作为一个亚环境列出。它是河口两侧的泥质沉积区，但又不同于一般三角洲的分流间湾，它是入海细颗粒泥沙在潮流作用下形成的。废弃的水下三角洲，受海洋动力改造，使原来的三角洲前缘和侧缘向海岸平衡剖面方向发展，形成海岸斜坡，因此古水下三角洲的亚环境不予细分。

第二节　黄河三角洲沉积物

黄河三角洲沉积物总的特点是颗粒细、生物遗骸少。生物遗骸仅在前三角洲和三角洲侧缘有一定数量。因此，黄河三角洲各亚环境的沉积物结构构造有类似性。下面以现代正在生长的叶瓣——清水沟叶瓣为例，介绍各亚环境的沉积物特征。

一、三角洲平原沉积物

三角洲平原中，上三角洲平原面积约占3/4，下三角洲平原面积约占1/4。对于清水沟叶瓣来说，大致也呈此比例。

（一）上三角洲平原沉积物

黄河三角洲是一个分流河道改道十分频繁的三角洲。自 1855 年至今，大的改道有 9 次。这是指自三角洲顶点附近的改道。在河口附近发生的小范围改道就更多。因而决口扇和短期河道（1—3年）的充填沉积物广泛分布。由于防洪堤的阻挡和废弃河道对洪水的疏导作用，使得河水泛滥的面积不大。每次形成的泛滥平原沉积物厚度约 10cm 左右。有些地方因耕耘土地，将泛滥平原沉积物（粘土质粉砂）与其下的粉砂混合。因而，整个上三

角洲平原粉砂分布广泛，而粘土质粉砂分布面积不大。

1．河道沉积物　三角洲平原上的分流河道绝大多数属于低曲度的单一分流河道。河道宽而浅，通常深4—6m，宽500—1000m。河道内存在着狭长的边滩。

现以现代河道的两条剖面（A—A′和B—B′）来说明河床、边滩沉积物特征及其变化（图3—2，3—3和3—4）。

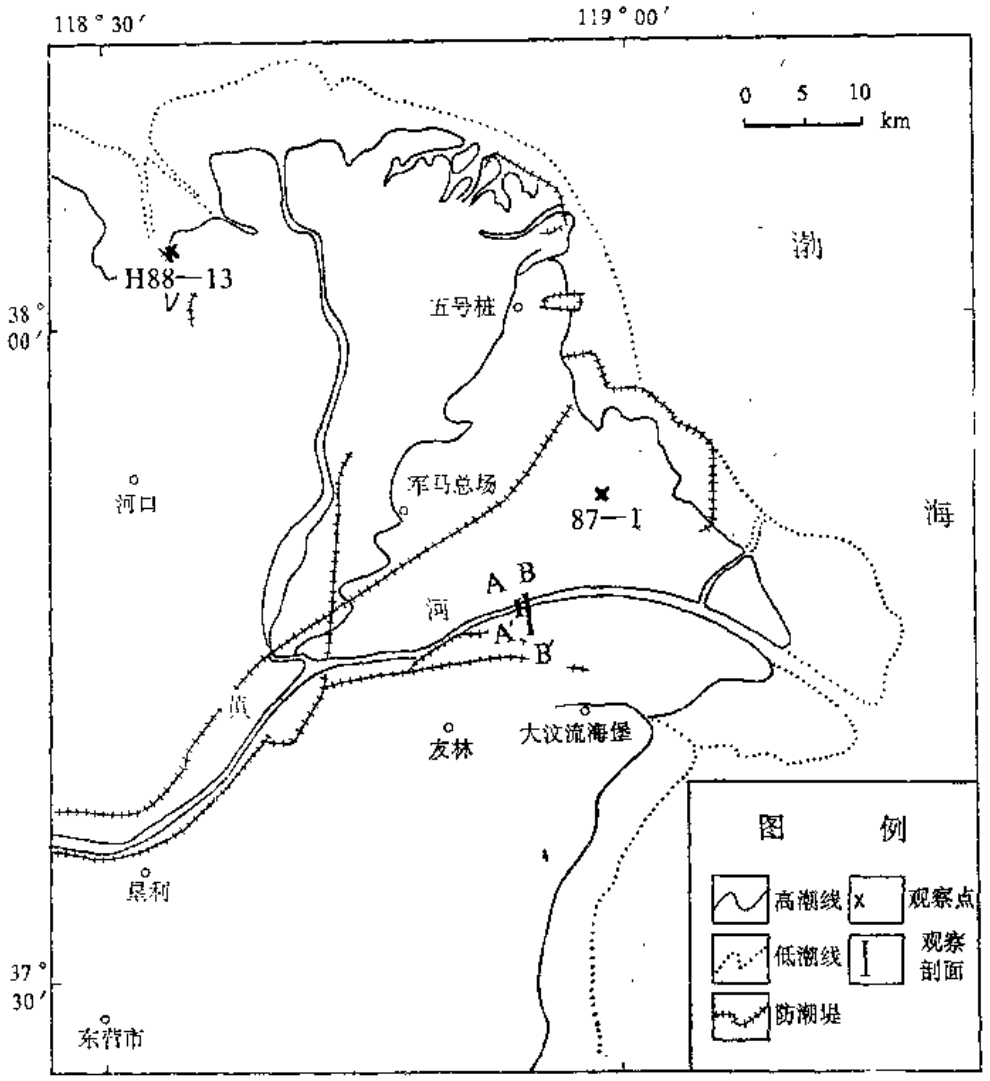


图 3—2　黄河三角洲平原沉积物实测剖面及主要观察点位置图

（1）河床沉积物　河床沉积物较粗，以极细砂为主，含量达68%以上；细砂含量<3%；粉砂含量约占22—30%；粘土含量<1%（图3—3A—A′剖面86—301，303）；见有小型槽状交错层理。在河床的边缘（图3—3A—A′剖面86—304），以粉砂为主，砂的含量降至46.2%，粘土含量增至1.8%，粉砂的含量为52%（表3—1）。粗粉砂中见少量粘土质粉砂夹层，单层厚1—5mm。表层半米内见有板状交错层理和爬升层理。

（2）边滩沉积物　边滩沉积物由粗粉砂夹粘土质粉砂组成，层薄、具爬升层理，爬升角7°—8°。该层系厚度为1—4cm。粗粉砂沉积物中，砂的含量为18.7%，粘土含量为2.6%，大部分由粉砂组成。边滩上见有稀疏的植被。A—A′剖面上的边滩宽约250m，长约5km，被

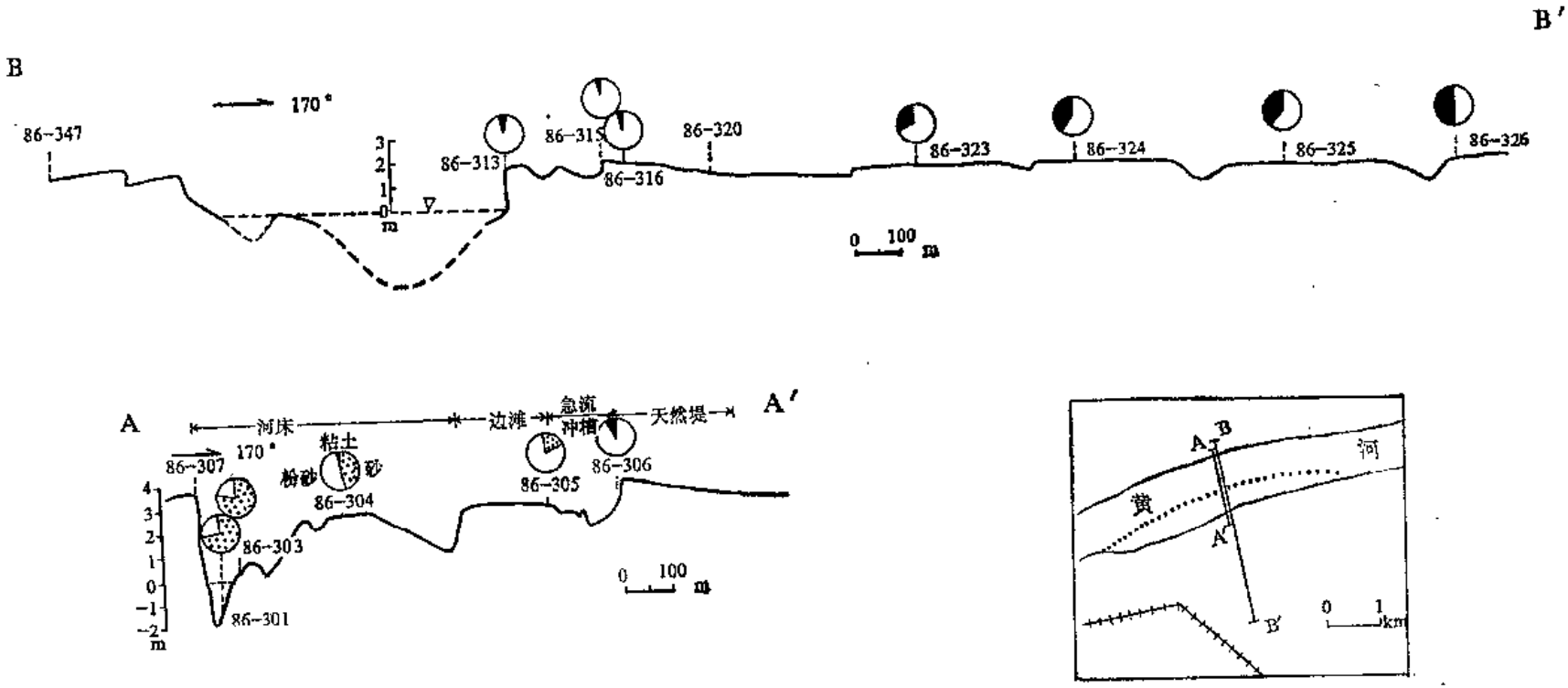


图 3—3　垂直河道的剖面图

两剖面相距250m（位置见图3—2）A—A′剖面于1988年6月观察；B—B′剖面于1988年10月观察。观察点沉积物组分的百分含量以黑点（砂）、空白（粉砂）、黑色（粘土）在圆圈内所占面积表示

表 3—1　现在活动叶瓣三角洲平原的河床、边滩、天然堤及泛滥平原沉积物的粒度特征

86—301至86—306①是1988年洪水期前形成的沉积物；86—313①至86—326是1988年洪水期形成的沉积物

观察点	样品号	名称	粒度组分			平均粒径 (ϕ)	中值粒径 (ϕ)	标准偏差	偏度	峰态	环境
			砂	粉砂	粘土						
86—301	G86—301	极细砂	69.17	30.00	0.82	3.838	3.688	0.582	0.351	1.002	河床
86—302	G86—302	极细砂	75.56	23.95	0.49	3.712	3.587	0.574	0.351	1.087	
86—303	G86—303	极细砂	77.85	21.74	0.41	3.695	3.594	0.547	0.326	1.209	
86—304	G86—304	粗粉砂	46.17	52.00	1.84	4.15	4.079	0.588	0.226	0.87	
86—305	G86—305	粗粉砂	18.74	78.61	2.64	4.462	4.471	0.68	0.177	1.497	边滩
86—306	G86—306①*	粗粉砂	0.69	93.25	6.06	5.822	5.667	1.078	0.307	1.479	天然堤
86—313	G86—313①	粗粉砂	3.69	91.99	4.31	4.935	4.743	0.981	0.479	1.402	边滩
86—313	G86—313②	粗粉砂	2.08	92.03	5.90	5.01	4.8	1.111	0.509	1.5	
86—332	G86—332①	粗粉砂	1.33	93.72	4.74	5.114	5.009	1.015	0.349	1.258	天然堤
86—332	G86—332②	粗粉砂	1.63	93.36	5.01	5.142	5.002	1.053	0.378	1.264	
86—332	G86—332③	粗粉砂	2.84	92.84	4.32	5.052	4.927	0.957	0.356	1.15	
86—332	G86—332④	粗粉砂	1.74	90.12	8.15	5.864	5.755	1.263	0.252	1.355	
86—315	G86—315①	粗粉砂	1.24	92.45	6.31	5.391	5.215	1.253	0.371	1.356	
86—315	G86—315—1	粗粉砂	1.46	93.45	5.10	5.241	5.091	1.1	0.358	1.233	
86—316	G86—316①	粗粉砂	0.74	92.90	6.37	5.476	5.34	1.252	0.32	1.317	
86—342	G86—342	粘土质粉砂	0.02	64.60	35.39	7.733	7.452	1.651	0.226	0.931	泛滥平原
86—323	G86—323	粘土质粉砂	0.02	65.31	34.68	7.771	7.417	1.633	0.284	0.943	
86—324	G86—324	粘土质粉砂	0.02	60.50	39.48	7.954	7.64	1.662	0.228	0.928	
86—325	G86—325①	粘土质粉砂	0.02	62.50	37.47	7.923	7.619	1.56	0.26	0.958	
86—326	G86—326	粘土质粉砂	0.03	49.09	50.87	8.419	8.049	1.5	0.257	0.812	

* 样品号后的数字分别表示不同的深度。

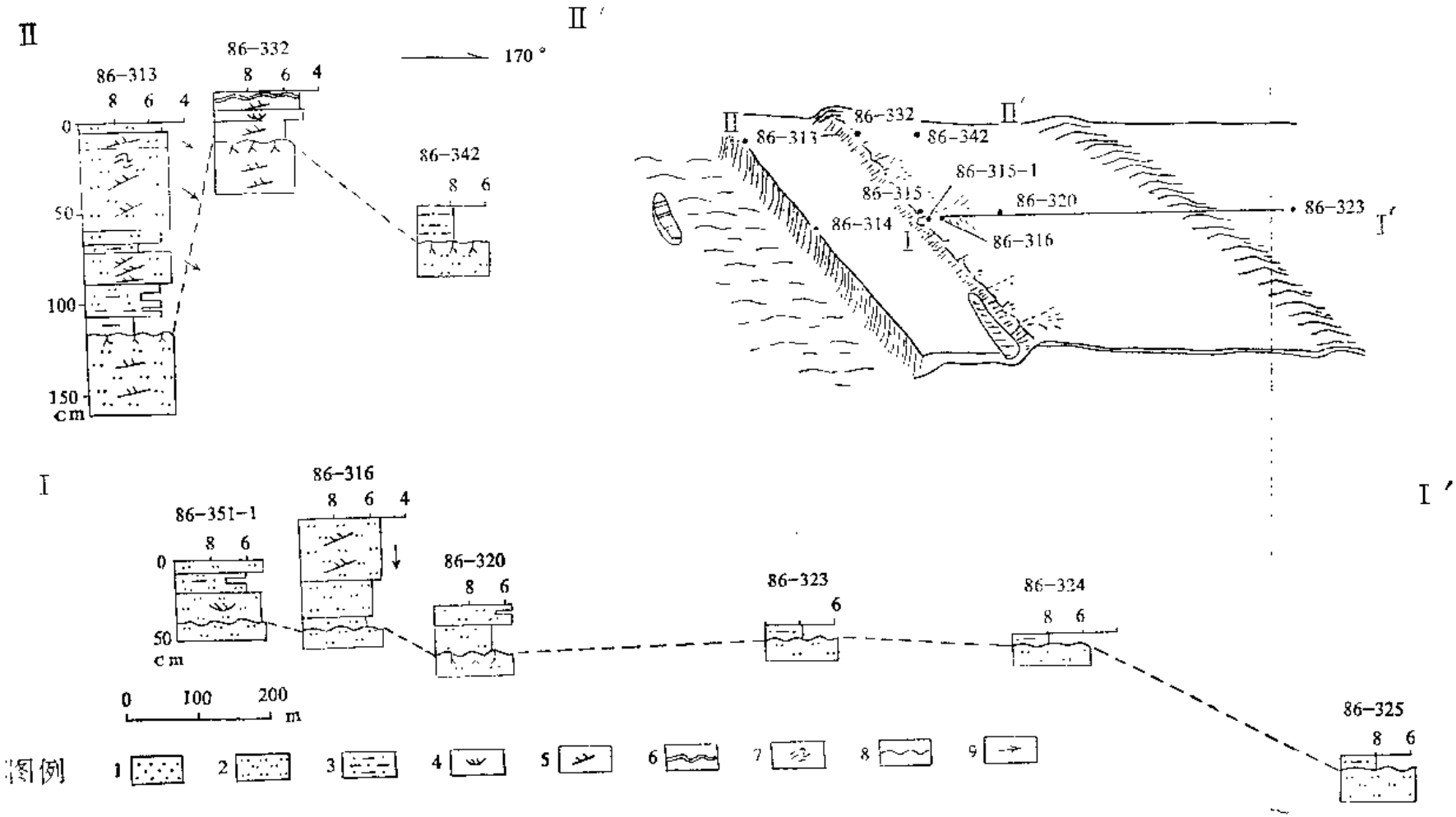


图 3—4　垂直河道剖面上的沉积层序

Ⅰ—Ⅰ′ 剖面是图3—3中B—B′ 剖面的一部分，Ⅱ—Ⅱ′剖面在其东125m处（1988年10月观察）；1—极细砂；2—粉砂；3—粘土质粉砂；4—槽状交错层理；5—爬升层理；6—波状层理；7—变形层理；8—冲刷面；9—水流方向

一急流冲槽将其与天然堤隔开。

边滩沉积极不稳定，受黄河径流量变化而不断改变。在边滩沉积剖面中常见有多个冲刷面。例如上述A—A′剖面是1988年6月测制的，其后经历了一个洪水过程，河道刷深，边滩淤高。洪水过后，1988年10月在离该剖面250m的地方测制了剖面B—B′。B—B′剖面上的边滩沉积物中可以看到明显的冲刷面。边滩沉积剖面的层序（86—313观察点）如图3—4：

0—5cm　黄色粗粉砂，具水平层理。

5—15cm　黄色粗粉砂，爬升层理发育。层系厚度2.5cm。爬升角10°。

15—20cm　黄色粗粉砂，卷曲层理，由爬升层理变形而来。

20—60cm　黄色粗粉砂，具非常发育的爬升层理。

60—69cm　暗黄色粗粉砂，含有少量粘土，底部有一层4mm厚的粘土质粉砂。

69—89cm　黄色粗粉砂，具非常发育的爬升层理，下部层系厚2cm，爬升角7°±，中、上部层系厚5cm，爬升角高达30°。

89—107cm　暗黄色粗粉砂含少量粘土，夹两层厚度分别为2和4mm的褐色粘土质粉砂。

107—117cm　黄褐色粘土质粉砂，底部为一冲刷面。

117—160cm　暗黄色粉砂，上部26cm中层理不清晰，下部则为爬升层理，爬升角10°。

上述剖面中0—117cm是1988年6月—10月洪水期形成的边滩沉积物；117cm以下是1988年6月前的老边滩沉积物。新的边滩沉积物堆积之前，老边滩沉积物曾受到轻微的冲刷。在2—3km范围内都可以追索到这一冲刷面。冲刷面之下的粗粉砂中含有一些植物根，面且常发育有气泡构造。这是由于洪水时河水漫过沉积物捕获空气形成的。1988年洪水期形成的边滩沉积物以粗粉砂为主，具有发育的爬升层理，层系厚2—5cm，爬升角7—30°。部分粉砂层含有少量粘土，也夹有少量的粘土质粉砂夹层。与河床沉积物相比，边滩沉积物略细，粘土含量增多，爬升层理特别发育，层系的厚度较大。

2．天然堤沉积物　分流河道旁的天然堤或在两侧都发育，或仅在凸岸一侧发育（如(3—3A—A′剖面），它比边滩高，面向河道一侧有一陡坡，背侧呈缓坡状倾斜，坡度约为千分之三。天然堤的沉积层序（图3—3A—A′剖面中的86—306观察点）如下：

0—30cm　黄色粗粉砂，有很多植物根，顶部4—5cm处有一黄褐色粘土质粉砂层。本层局部见有爬升层理，但不清晰。

30—50cm　黄色粗粉砂，具小型卷曲层理。

50—70cm　黄色粗粉砂，具爬升层理，该层系厚3cm，爬升角21°。根据沉积构造测定的水流方向为120°，现代河岸方向为75°，二者交角为55°。

70—73cm　黄褐色粘土质粉砂。

73—78cm　黄色粉砂。

78—93cm　褐黄色粉砂，含植物碎屑。

上述剖面中0—70cm为天然堤沉积物，以黄色粗粉砂为主，爬升层理发育，所揭示的水流方向与河道方向有较大交角。植物根很多，破坏了层理。70—93cm为边滩沉积物，其特点是黄色粗粉砂夹粘土质粉砂，含有一些植物碎屑。这个剖面揭示出这是河道向北迁移

过程中形成的边滩-天然堤序列。

由于洪水多次泛滥，新、老天然堤沉积物常有叠覆。1988年6月到10月间的洪水过程，使新的天然堤沉积物加积在原有的天然堤沉积物之上，在86—332观察点（见图3—4）可见天然堤增高20cm。但要说明这次洪水虽然使天然堤增高20cm，但由于边滩增高的幅度更大，致使天然堤与边滩的高差减小。前者比后者只高出0.5m左右（6月份时，天然堤比边滩高0.8m）。根据坡度、沉积物结构、构造的变化，可看出天然堤的宽度大约是250m，局部可宽到350m。天然堤上没有明显的、大的决口。小决口只有几十厘米至十米宽，深度一般10—20cm。

新、老天然堤的沉积层序（图3—4Ⅱ—Ⅱ′剖面上的86—332观察点）如下：

0—5cm　黄色粗粉砂，具水平-近波状层理。

5—10cm　黄色粗粉砂，具发育的爬升层理，该层系厚2cm，爬升角15°，显示的水流方向与天然堤的延伸方向呈93°交角。

10—16cm　黄色粗粉砂，具小型槽状交错层理，层系厚2cm。水流方向与天然堤延伸方向的交角为93°。

16—28cm　灰黄色、黄色粗粉砂。具爬升层理，该层系厚4cm，爬升角15°。底界面为一冲刷面。

28—55cm　黄色粗粉砂，上部10cm含有很多植物根，中、下部显示有爬升层理，但不清晰。

0—28cm为1988年洪水期形成的天然堤沉积物。28—55cm为1988年以前形成的天然堤沉积物。天然堤沉积物以粗粉砂为特征，爬升层理发育，爬升角多为15°—20°。由于天然堤上植被发育，早期的天然堤沉积物顶部含植物根，新沉积的天然堤沉积物底部含有机质。沉积过程中，由于植物对水流的干扰而常发育不规则层理；沉积物形成后又受到正在生长的植物根的扰动而使层理不清晰。

3．决口扇沉积物　在上三角洲平原上，决口扇分布较广。现代活动叶瓣东北部87—1观察点（图3—5）的决口扇剖面较为典型，剖面层序如下：

0—30cm　黄色粗粉砂。

30—35cm　褐色粘土质粉砂夹黄色粉砂薄层。

35—60cm　黄色粗粉砂，上部具板状交错层理。

60—65cm　黄褐色粘土质粉砂与灰色、黄色粉砂互层。

65—165cm　黄色粗粉砂，底部具槽状交错层理，其余部分爬升层理发育。爬升角可由20°增至55°。

165—169cm　黄色粉砂夹褐色粘土质粉砂纹层。

169—190cm　黄色粗粉砂，爬升层理发育，爬升角达60°。

190—210cm　黄色粉砂，具板状交错层理。底部有一侵蚀面，其上含泥砾与再沉积的海产双壳类碎片。

210—215cm　黄色粉砂夹多层褐色粘土质粉砂纹层，具脉状层理。

215—235cm　黄色粉砂。

235—260cm　黄色粉砂，具板状交错层理。

该剖面的235—260cm段为早期的决口扇沉积，0—210cm为新的决口扇沉积，两者之

间（210—235cm）为潮滩沉积。新决口扇底部有一个冲刷面，冲刷面之上有泥砾和再沉积的海产瓣鳃类壳体碎片。从剖面上可以看到，决口扇沉积物以粗粉砂为主，含数层粒度较细的层（粉砂与粘土质粉砂互层）。爬升层理特别发育，也有槽状和板状交错层理。

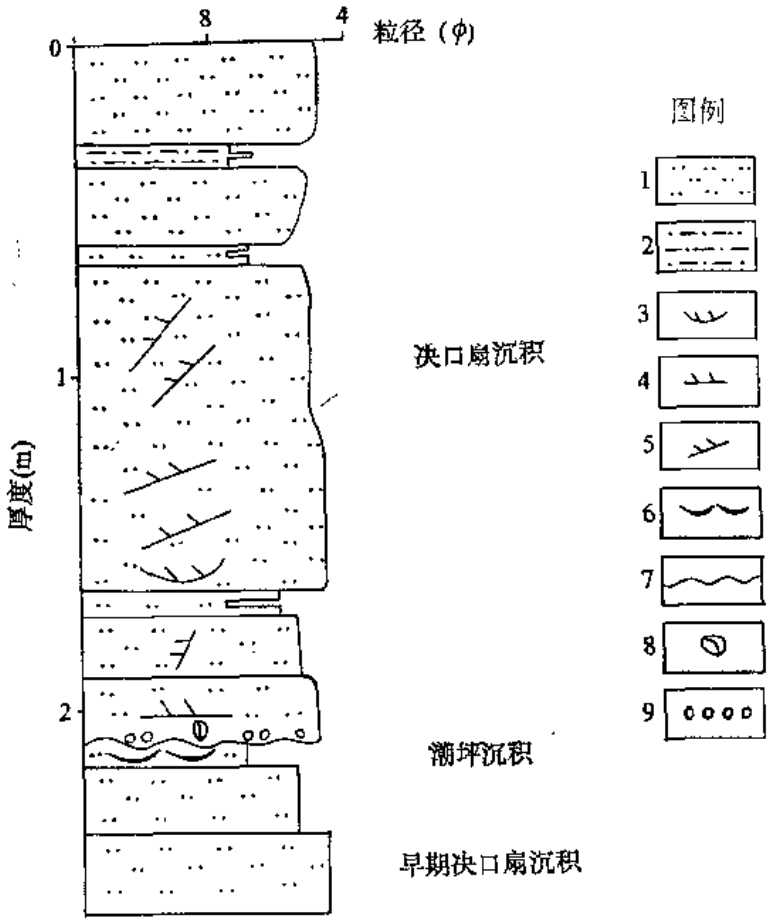


图 3—5　黄河三角洲决口扇沉积剖面

（87—1观察点，位置见图3—2）1—粉砂；2—粘土质粉砂；3—槽状交错层理；4—板状交错层理；5—爬升层理；6—脉状层理；7—冲刷面；8—海产软体动物壳；9—泥砾

4．泛滥平原沉积物　泛滥平原沉积物薄，常受后期决口流水冲蚀，或被后期决口扇和天然堤覆盖，因而泛滥平原沉积物在陆上三角洲平原上呈斑状分布。近期的泛滥沉积物则保存较好。

1988年，洪水形成的泛滥沉积物主要分布在黄河南岸，黄河北岸则分布局限，因有一条大致平行黄河的简易公路阻挡了洪水的北流（图3—3）。泛滥沉积物厚10cm左右，由天然堤向外逐渐变薄，最厚的地方靠近天然堤，厚度为20cm。泛滥沉积物为黄褐色粘土质粉砂，夹有微细的粉砂层。

黄河三角洲地区的蒸发量大于降水量，不利于沼泽发育，仅在排水不畅的地方有少量沼泽，生长着芦苇。但因年代短，只是在泛滥平原沉积的粘土质粉砂之上，发育有2cm厚左右的腐烂和未腐烂的植物茎、叶和根。

综合上述，黄河上三角洲平原各亚环境的沉积物的结构构造特征可归纳如表3—2所示。决口扇沉积，因其结构构造多变，未列入表内。

表 3—2　黄河三角洲上三角洲平原亚环境沉积物结构构造特征

沉积环境	河　床	边　滩	天然堤	泛滥平原
砂含量%	46—69	2—18	1—2	<1
粉砂含量%	21—52	78—92	>90	49—65
粘土含量%	0.4—2	3—6	5—8	35—50
平均粒径 ϕ	3.7—4.2	4.5—5	5.1—5.9	7.7—8.4
中值粒径 ϕ	3.6—4.1	4.5—4.8	4.9—5.8	7.4—8.0
标准偏差	较　好	中　等	中　等	差
偏　度	极　正	极　正	极正偏	正　偏
峰　态	中　等	窄	窄	宽—中等
沉积构造	小型槽状交错层理 板状层理 爬升层理 块状层理 平行层理	爬升层理 爬升角度大 卷曲层理	爬升层理 角度小 卷曲层理	水平层理

由于河道的侧向迁移，各亚环境形成的沉积物相互叠置，形成河床-边滩-天然堤沉积序列。并可被后期的泛滥平原沉积覆盖（图3—6）。

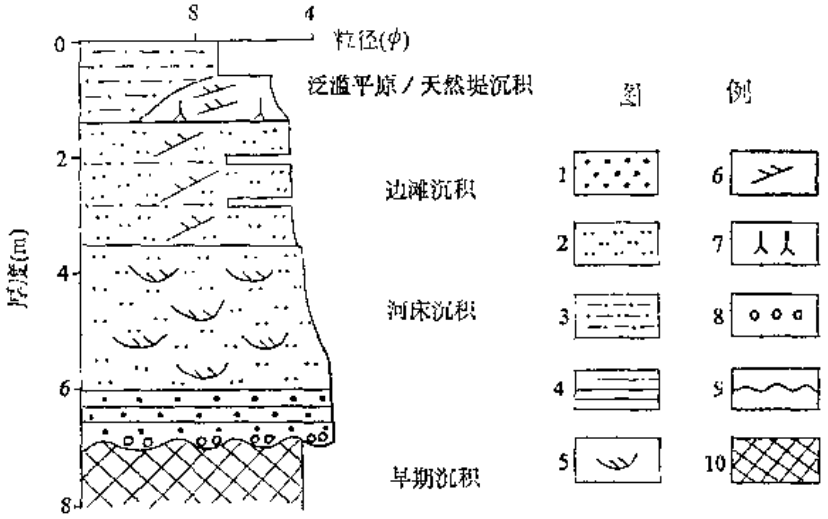


图 3—6　黄河三角洲上三角洲平原沉积序列模式

1—极细砂；2—粉砂；3—粘土质粉砂；4—平行层理；5—槽状层理；6—爬升层理；7—植物板；8—泥砾；9—冲刷面；10—早期沉积（基底）

（二）下三角洲平原沉积物

黄河下三角洲平原包括潮上带和潮间带。

1．潮上带　潮上带宽2—6km，其上大部分不长植物，靠近上三角洲平原处有斑状分布的沼泽。潮上带沉积物为互层的黄色粉砂与褐色粘土质粉砂，在有沼泽的地方见有炭化的芦苇根埋藏其中。

2．潮间带　现代河口附近的潮间带宽10km左右。该处原来是河口沙坝堆积区，其顶部受潮汐作用改造，成为潮间带，沉积物为粗粉砂。现代河口两侧的潮间带，则堆积着细粒沉积物，主要为黄褐色粘土质粉砂夹黄色粉砂透镜体及黄色粉砂夹粘土质粉砂纹层。沉积物明显地受到生物的（主要是蟹的）扰动。

废弃河口的潮间带坡度较陡，宽度较窄，其上多侵蚀陡坎。沉积物以黄色粉砂为主，夹褐色粘土质粉砂。废弃河口侧部的潮滩平缓，无侵蚀陡坎。以黄河三角洲北部桃河口海湾的潮滩剖面较为典型（H88—13观察点，站位见图2—3），该剖面位于高潮线附近，剖面层序如下（图3—7）：

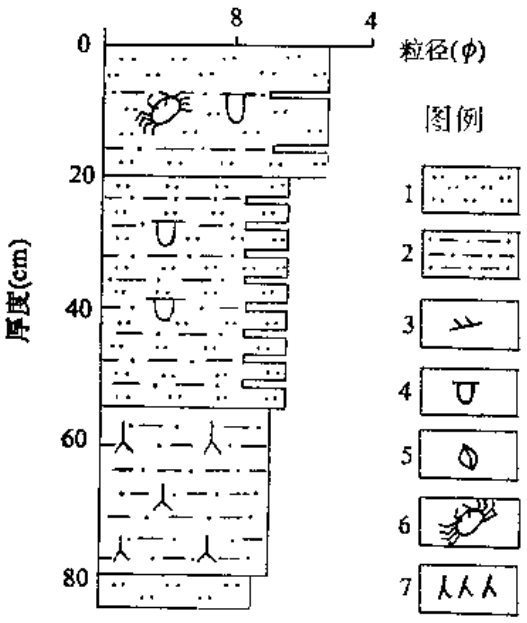


图 3—7　黄河三角洲潮滩沉积物剖面

（H88—13站，位置见图3—2）

1—粉砂；2—粘土质粉砂；3—爬升层理；4—生物潜穴；5—海产软体动物壳；6—蟹壳；7—植物根

0—20cm　黄色粉砂，含多层褐黄色粘土质粉砂纹层，含有蟹壳，明显地受到生物扰动。该处地表植物极少，有很多蟹洞，1m² 内近十余个。

20—55cm　黄色粉砂夹多层粘土质粉砂纹层。受到生物扰动。

55—80cm　褐黄色粘土质粉砂，含有很多垂直生长的芦苇根，并见有锈斑。

80—85cm　黄色粉砂。

二、水下三角洲沉积物

黄河水下三角洲分为现代水下三角洲和废弃水下三角洲两部分。现代水下三角洲自1976年开始生长。1976—1979年期间，黄河河口在清水沟南北约30km的区间内摆动；1979年汛期以来，河道基本稳定于现在位置（详见第四章）。因此，现代水下三角洲主要反映河道顺直稳定后的沉积作用。水下三角洲调查站位见图3—8。

现代水下三角洲分布在现代河口外侧由低潮线至水深18m的范围内，呈椭圆形，南北长约40km，东西宽约20km。它可分为三部分：三角洲前缘、前三角洲和三角洲侧缘。三角洲前缘位于河口前方水深0—12m处，其中水深0—7m处为河口沙坝，水深7—12m处为远端沙坝。前缘的坡度在0—2m水深范围内，非常平缓，2—12m水深间，坡度变陡，为0.2°—0.3°（图3—8）。前三角洲位于12—18m的水深范围内，坡度＜0.1°（图3—8）。河口侧部水深0—12m处为三角洲侧缘（烂泥湾），坡度平缓，＜0.1°，无明显坡度变化点。水下三角洲沉积特征（见表3—3，图3—9）分述如下。

（一）三角洲前缘沉积物

三角洲前缘的沉积物都是砂质沉积物，仅个别点（A_{10}）粘土含量大于20%。其中河

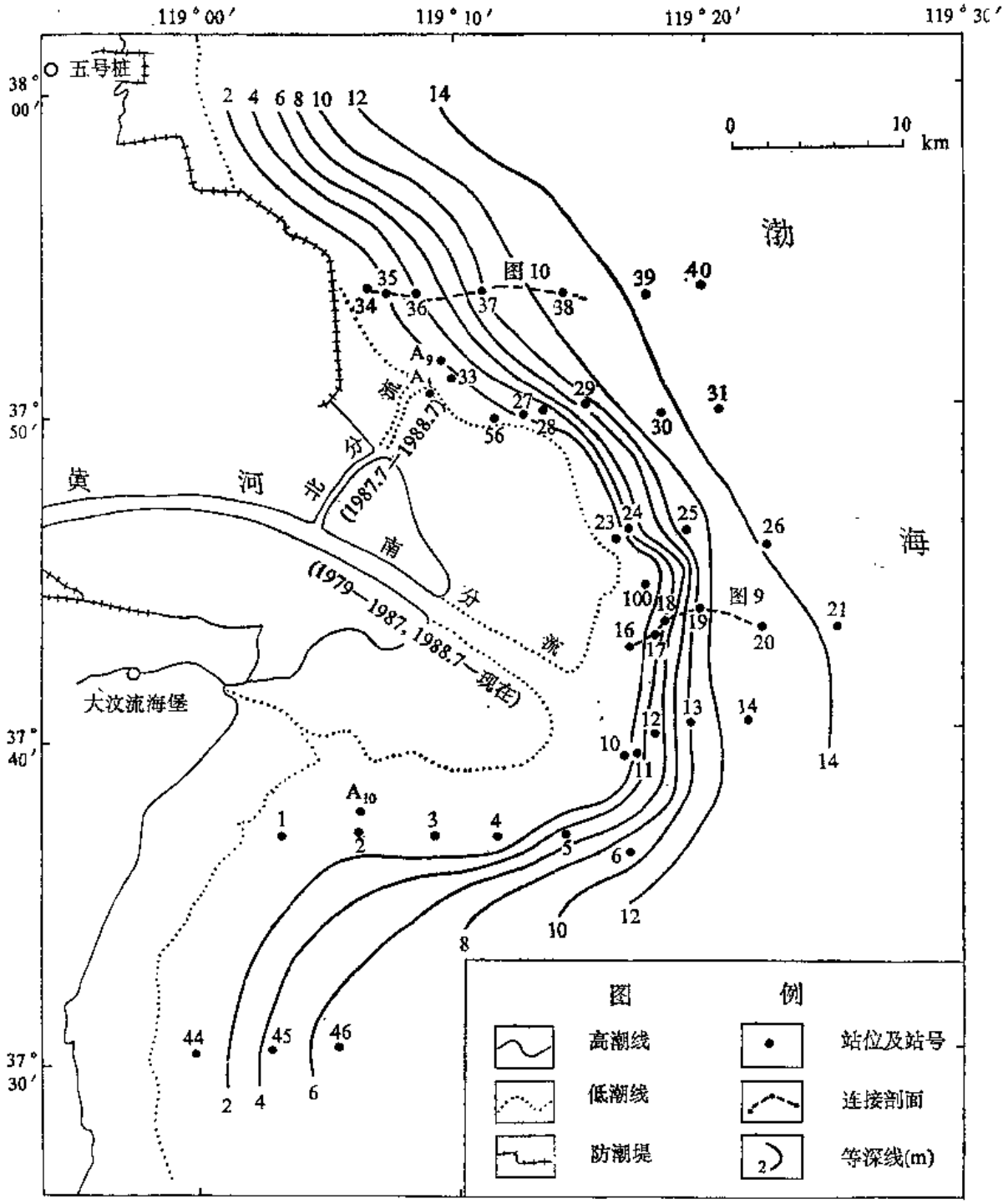


图 3—8　黄河水下三角洲调查站位图

口沙坝绝大部分为粗粉砂，粘土含量小于8%，平均粒径多为 4.1—5.1ϕ，中值粒径多在4.0—4.8ϕ之间。水深0—2m处的沉积物略粗，沙的含量高，个别可达 49%，超过粉砂的含量，平均粒径为4.1—4.7ϕ，中值粒径为4.0—4.6ϕ。远端沙坝表层沉积物的粘土含量多在16%左右，平均粒径为5.7—5.9ϕ，中值粒径为4.9—5.4ϕ。从获得的短岩芯来看，沉积物为夹粘土质粉砂薄层的粉砂（图3—10中的17站位）。

（二）三角洲侧缘沉积物

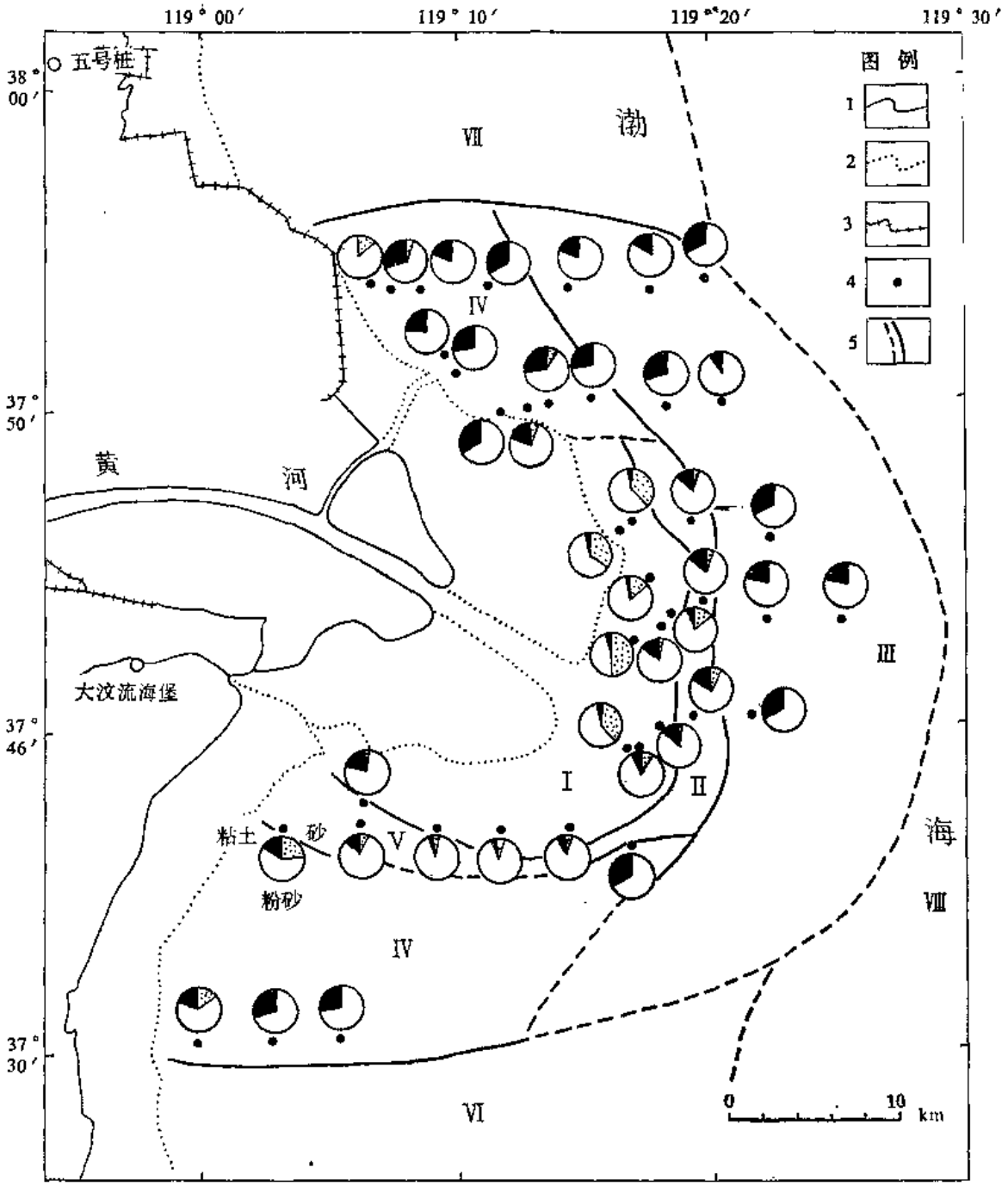


图 3—9 黄河水下三角洲沉积环境及沉积物粒度分布特征

环境分区：Ⅰ—三角洲前缘（河口沙坝区）；Ⅱ—三角洲前缘（远端沙坝区）；Ⅲ—前三角洲；Ⅳ—三角洲侧缘；Ⅴ—河口沙坝和侧缘过渡区；Ⅵ—废弃水下三角洲（南）；Ⅶ—废弃水下三角洲（北）；Ⅷ—浅海

图例：1—高潮线；2—低潮线；3—防潮堤；4—环境分区界线（虚线为推测）

三角洲侧缘沉积物明显地比三角洲前缘的细，为粘土质粉砂。

1．南侧缘沉积物　这是一个不受次要分流影响的沉积环境。沉积物中粘土含量为20—35%，砂的含量随水深而变：在近岸水深小于2m处，砂的含量达14%；而在水深5—7m处，砂的含量不足1%。据短岩芯（33—57cm长）分析结果（图3—11，44站），岩性为粘土质粉砂，其中粘土含量为24—42%，粉砂呈透镜体（厚1—5mm，长0.5—4cm）、纹层

表 3—3 黄河水下三角洲沉积物粒度特征

站位	样品号	样品名称	水深 (m)	粒度成分			平均粒径 (φ)	中值粒径 (φ)	沉积环境
				砂	粉砂	粘土			
1	GSD88001	砂质粗粉砂	1.20	21.97	57.67	17.37	5.748	5.366	河口沙坝——三角洲侧缘过渡带
2	GSD88002	粉砂	1.20	7.34	77.12	15.56	6.187	6.138	河口沙坝——三角洲侧缘过渡带
3	GSD88003	粗粉砂	1.40	3.07	92.36	4.57	4.727	4.6009	河口沙坝
4	GSD88004	粗粉砂	1.20	4.99	91.34	3.67	4.557	0.697	河口沙坝
5	GSD88005	粗粉砂	4.4	5.06	87.86	7.08	5.027	4.71	河口沙坝
6	GSD88006	粘土质细粉砂	9.20	0.06	66.19	33.75	7.548	7.424	南三角洲侧缘
10	GSD88010	砂质粗粉砂	0.60	38.41	58.63	2.97	4.425	4.239	河口沙坝
11	GSD88011	粗粉砂	3.00	7.72	35.07	7.22	5.100	4.753	河口沙坝
12	GSD88012	粗粉砂	5.10	2.67	82.58	14.75	5.830	5.293	河口沙坝
13	GSD88013	粗粉砂	10.40	7.76	75.06	17.18	5.915	5.353	远端沙坝
14	GSD88014	粘土质细粉砂	12.80	1.09	65.98	32.94	7.420	7.299	前三角洲
16	GSD88016	极细砂	0.40	49.16	48.87	1.97	4.135	4.019	河口沙坝
17	GSD88017	粗粉砂	3.30	1.51	83.70	14.80	6.054	5.749	河口沙坝
18	GSD88018	粗粉砂	4.70	14.88	78.61	6.48	4.933	4.650	河口沙坝
19	GSD88019	粗粉砂	11.00	6.05	78.34	15.60	5.703	4.931	远端沙坝
20	GSD88020	粘土质细粉砂	13.20	0.39	78.77	20.84	6.803	6.472	前三角洲
21	GSD88021	粘土质粉砂夹粗粉砂透镜体	11.20	0.91	78.46	20.62	6.481	5.936	前三角洲
23	GSD88023	粗粉砂	1.90	31.31	61.20	4.48	4.539	4.380	河口沙坝
24	GSD88024	粗粉砂	4.00	38.03	58.91	3.07	4.252	4.212	河口沙坝
25	GSD88025	粗粉砂	11.40	4.59	80.97	14.42	5.703	4.995	远端沙坝
26	GSD88026	粘土质细粉砂	14.20	0.26	67.85	31.90	7.419	7.276	前三角洲

续表

站位	样品号	样品名称	水深 (m)	粒度成分			平均粒径 (ϕ)	中值粒径 (ϕ)	沉积环境
				砂	粉砂	粘土			
27	GSD88027	粗粉砂及粘土质粉砂	2.80	6.33	73.58	20.09	6.060	5.547	北三角洲侧缘
28	GSD88028	粘土质细粉砂夹粉砂透镜体	3.30	7.05	66.12	26.81	6.719	6.627	北三角洲侧缘
29	GSD88029	粘土质粗粉砂	9.30	0.71	74.00	25.30	6.739	6.468	北三角洲侧缘
30	GSD88030	粘土质细粉砂	13.60	0.10	71.22	28.67	7.178	6.901	前三角洲
31	GSD88031	粗粉砂	14.90	0.22	90.38	9.39	5.785	5.633	滑塌沉积
33	GSD88033	粘土质细粉砂	0.50	0.50	72.41	27.08	6.987	6.814	北三角洲侧缘
34	GSD88034	粗粉砂	0.30	13.22	84.21	2.57	4.459	4.459	北三角洲侧缘
35	GSD88035	粘土质粉砂	2.00	3.62	65.74	30.64	6.976	7.057	北三角洲侧缘
36	GSD88036	粘土质粗粉砂	4.00	1.05	78.86	20.09	6.252	5.796	北三角洲侧缘
37	GSD88037	粘土质细粉砂	10.40	0.41	66.28	33.31	7.407	7.224	北三角洲侧缘
38	GSD88038A	粘土质细粉砂	12.60	0.31	77.70	21.99	6.848	6.552	前三角洲
39	GSD88039	粘土质粗粉砂	14.50	0.64	79.33	20.02	6.603	6.369	前三角洲
40	GSD88040	粘土质细粉砂夹粉砂透镜体	15.50	0.53	68.72	30.75	7.206	6.853	前三角洲
44	GSD88044	粘土质粗粉砂	1.30	14.39	65.34	20.26	6.181	6.010	南三角洲侧缘
45	GSD88045	粘土质细粉砂	4.90	0.51	64.04	35.45	7.522	7.388	南三角洲侧缘
38	GSD88038B	粗粉砂夹层	12.60	0.23	83.87	15.89	6.270	5.888	前三角洲
46	GSD88046	粘土质细粉砂	6.70	0.73	71.70	27.56	7.225	7.105	南三角洲侧缘
56	GSD88056	粘土质细粉砂	0.50	1.00	66.73	32.26	7.417	7.340	北三角洲侧缘
100	GSD88100	粗粉砂	0.60	14.56	82.56	2.87	4.481	4.481	河口沙坝
A_9	GSD A_9	粘土质粗粉砂	2.00	0.25	75.61	24.13	6.704	6.455	北三角洲侧缘
A_{10}	GSD A_{10}	粘土质粗粉砂	0.80	2.44	75.92	21.64	6.410	6.076	河口沙坝——三角洲侧缘过渡带

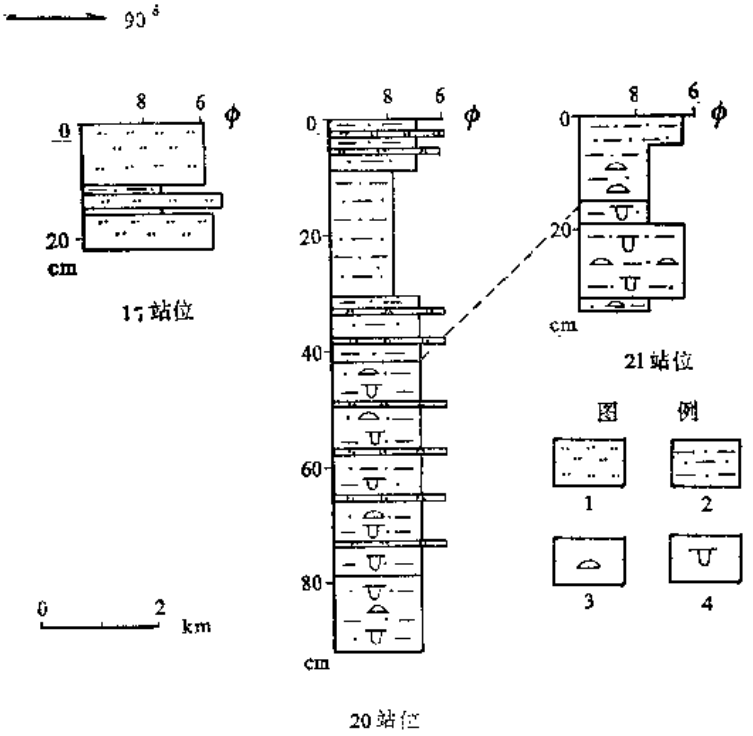


图 3—10 黄河三角洲前缘（17站位）和前三角洲（20站位、21站位）沉积物短岩芯柱剖面图

图例：1—粉砂；2—粘土质粉砂；3—粉砂透镜体；4—生物潜穴（站位位置见图3—8）

及薄层（从小于1mm到2mm）出现。在南侧缘与河口沙坝之间有一个过渡带。过渡带的沉积物比侧缘沉积物粗，比河口沙坝沉积物细，粘土含量在10—20%之间。短岩芯(25cm)，为褐色粘土质粉砂与黄色粉砂的互层（图3—11,2站位）。

2．北侧缘沉积物 北侧缘地形平缓，没有明显的坡度变化和切割沟谷。沉积物以粘土质粉砂为主，粘土含量超过20%，平均粒径为6.1—7.4ϕ，中值粒径为5.5—7.3ϕ。靠近北分流河口处的侧缘沉积物，因受分流带入的泥沙影响，粘土含量降低。如A_1站(图3—8）的粘土含量为13.8%，34站位（图3—8）的粘土含量为2.6%。

北侧缘沉积物层序如下：（图3—12，33站位）

0—47cm 褐色粘土质粉砂，夹少量黄色粉砂薄层、纹层及透镜体。粘土含量约27%，砂含量小于1%。

47—131cm 褐色粘土质粉砂，粘土含量达45%。

131—160cm 黄色粉砂夹黄褐色粘土质粉砂薄层。

综合南、北侧缘沉积物的情况，其岩性为褐色粘土质粉砂夹粉砂薄层、纹层及透镜体。粘土含量多在20—35%，砂的含量大多小于1%，平均粒径6.1—7.5ϕ，中值粒径5.5—7.3ϕ。在接近低潮线的部分，粘土含量减少，可降至20%以下，为粉砂沉积。

（三）前三角洲沉积物

前三角洲位于三角洲前缘和侧缘之外。表层沉积物均为粘土质粉砂，粘土含量占20—32%，砂的含量小于1%，平均粒径为6.5—7.2ϕ，中值粒径为5.9—6.9ϕ。短岩芯的分析结果表明，沉积物为褐色粘土质粉砂夹黄色粉砂纹层、薄层（1—6mm厚）及透镜体(1—3mm厚，数厘米长)。某些部位生物潜穴发育。前三角洲沉积层序如下(图3—10,20站位)：

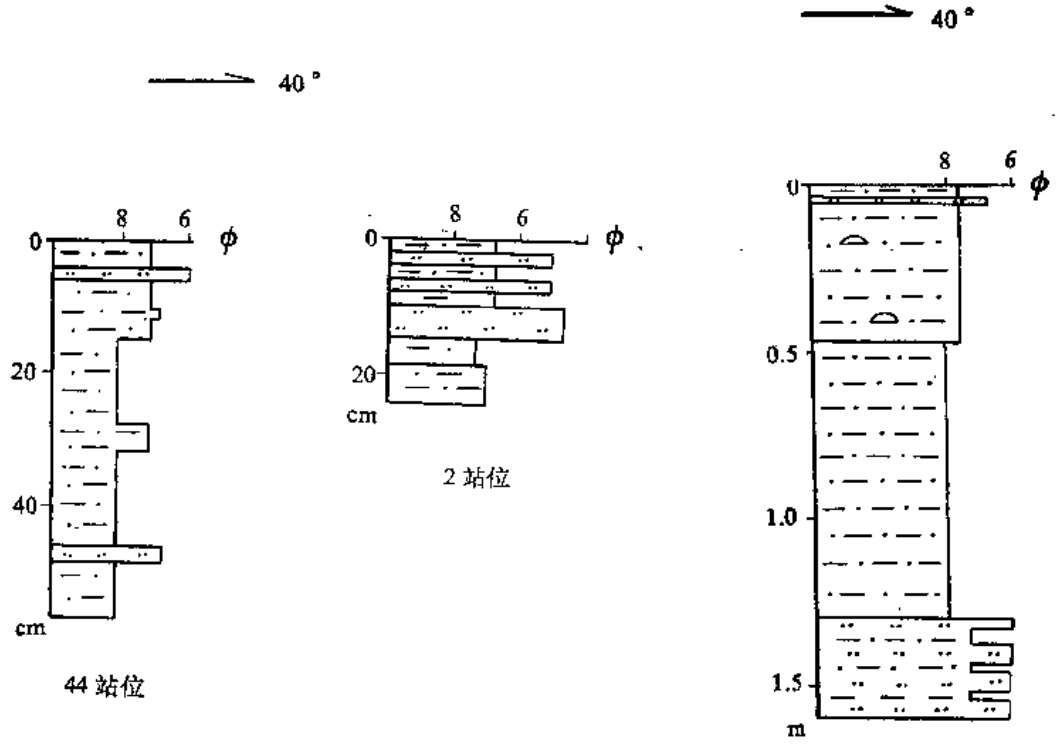


图 3—11 黄河三角洲南侧缘（44站位）和河口沙坝—侧缘过渡带（2站位）沉积物短芯岩柱剖面图
（站位位置见图3—8，图例见图3—10）

图 3—12 黄河三角洲北侧缘（33站位）短岩芯柱剖面图
（站位位置见图3—8，图例见3—10）

5．0—9cm褐黄色粘土质粉砂夹黄色粉砂纹层、薄层，单层厚1—3mm。

4．9—31cm褐色粘土质粉砂，比较均一，粘土含量达38%。

3．31—42cm褐色粘土质粉砂夹黄色粉砂纹层、薄层，单层厚1—6mm。

2．42—79cm灰褐色粘土质粉砂夹黄色粉砂透镜体、纹层。生物潜穴常见。

1．79—92cm灰色粘土质粉砂，含大量的粉砂团块、透镜体及生物潜穴。生物搅动较强烈。

根据沉积构造的特征可以将上述剖面划分为两部分。第1、2层（42—92cm）以生物潜穴发育为特征。3—5层（0—42cm）不具生物潜穴，其中第4层无粉砂透镜体和夹层。根据有孔虫的分布，也可将剖面分为两部分（表3—4），在0—42cm所取的两个样品中，有孔

表 3—4 前三角洲（20站位）表层及岩芯中的有孔虫分布

样品号	深度 (cm)	个体数	种数	多变度	优势度 (%)	优势种
FSD88020	表层	232	8	4	51.3	*Cribrononion incertum*
ZSD88020F	15—25	15	1	1	100	*Quinqueloculina akneriana rotunda*
ZSD88020F	50—58	3883	14	10	23.8	*Protelphidium tuberculatum*
ZSD88020F	85—92	1537	18	10	30.3	*Elphidium magellanicum*

虫数量较少，50g的样品中仅含232个体，以 *Cribrononion incertum*（易变筛九字虫）和 *Quinqueloculina akneriana rotunda*（圆形短五块虫）为优势种。而在42—92cm 段内两

个样品中，尤其是在50—58cm处取的样品，50g样品中竟含3883个体，简单分异度14，多变度10，优势种为*Protelphidium tuberculatum*（具瘤先希望虫），优势度23.8%。这个种是现在渤海陆架区的优势种（Wang和Bian, 1985）。而且只有在陆架区沉积物中有孔虫的个体数量才能那样高。因而42—79cm，这一层应该是1976年以前废弃三角洲叶瓣的改造沉积物。79—92cm的沉积物是浅海沉积物。0—42cm的沉积物是1976年以来形成的。现代水下三角洲的前三角洲沉积如此之薄，是由于曾经堆积在那里的泥质沉积物受波浪作用又被海流悬移至他处的结果。

前三角洲沉积物以褐色粘土质粉砂夹黄色粉砂纹层和透镜体为主，薄层少见，可见生物搅动构造。和侧缘相比，其粘土含量高，含砂量低，粉砂夹层少而薄。

前三角洲沉积物中，常有粗粉砂层出现。例如，31站位（图3—8）位于水深14.9m处，应属于前三角洲的范围，然而，沉积物却是粗粉砂，粘土含量只有9.4%，而且，在其北、西及东南各站位的沉积物均为粘土质粉砂。因此，31站位附近可能是滑塌堆积的沉积物。

（四）废弃水下三角洲沉积物

水下三角洲废弃后受到海洋作用的改造，三角洲前缘常受到侵蚀，尤以河口沙坝为最。侵蚀下来的物质被运向两侧和外侧。部分三角洲侧缘区的泥质沉积物，在大风浪作用下可再悬浮、随流搬运。

在海洋作用下，三角洲前缘的表层沉积物可粗化，主要为粗粉砂和粉砂。

废弃水下三角洲的地形分区不如三角洲进积时那样明显。其表层沉积物分布更多地反映了沿岸的海洋动力特点。在潮流流速较高的地区，如五号桩外无潮点附近，由于潮流对底部的冲刷，虽然在水深12m以下的海底，也有粗粉砂分布。

综合上述特点可见，由于黄河泥沙颗粒细、含量高，河口动力条件特殊，其所形成的黄河水下三角洲形态，不同于其他河流三角洲，不是舌状或鸡爪状，而是呈肾状，长轴平行海岸。这是因为黄河口潮流流向大致平行海岸流速较大，使泥沙平行海岸扩散，造成三角洲侧缘的发育。水下三角洲平行海岸方向延伸可达40至60km，因而整个水下三角洲近似肾形。

三、水下三角洲微体化石的分布规律

由于黄河带来了丰富的营养物质，生物相当繁盛。但由于沉积速率高，沉积物内生物遗体的个体数量并不那么丰富。

据水下三角洲41个站位的表层沉积物样品的统计资料可知，每50g样品中有孔虫壳体最高数量为1314个，最低仅4个，相差十分悬殊（图3—13）。高丰度区（>400个）主要集中于三角洲南侧缘及与河口沙坝的过渡带（401—1314个）。河口外及前三角洲的个别站位中数量也多。低值区（≤100）位于分流河口附近及前三角洲北部（39、40站位），有孔虫共有26个种。多变度自河口向外增加，由1增加到5。主要属种为*Ammonia beccarii* var.（毕克卷转虫）、*Quinqueloculina akneriana rotunda*（圆形短五块虫）、*Elphidium magellanicum*（缝裂希望虫）、*Cribrononion incertum*（易变筛九字虫）。其中*Ammonia beccarii* var.占绝对优势，占全调查区范围内总个体的53.9%。将有孔虫分为两个组合。1. *Ammonia beccarii* var.-*Quinqueloculina akneriana rotunda*组合；2. *Elphidium magellanicum*组合（图3—14、表3—5）。第一组合内*Ammonia beccarii* var.和*Quinque-*

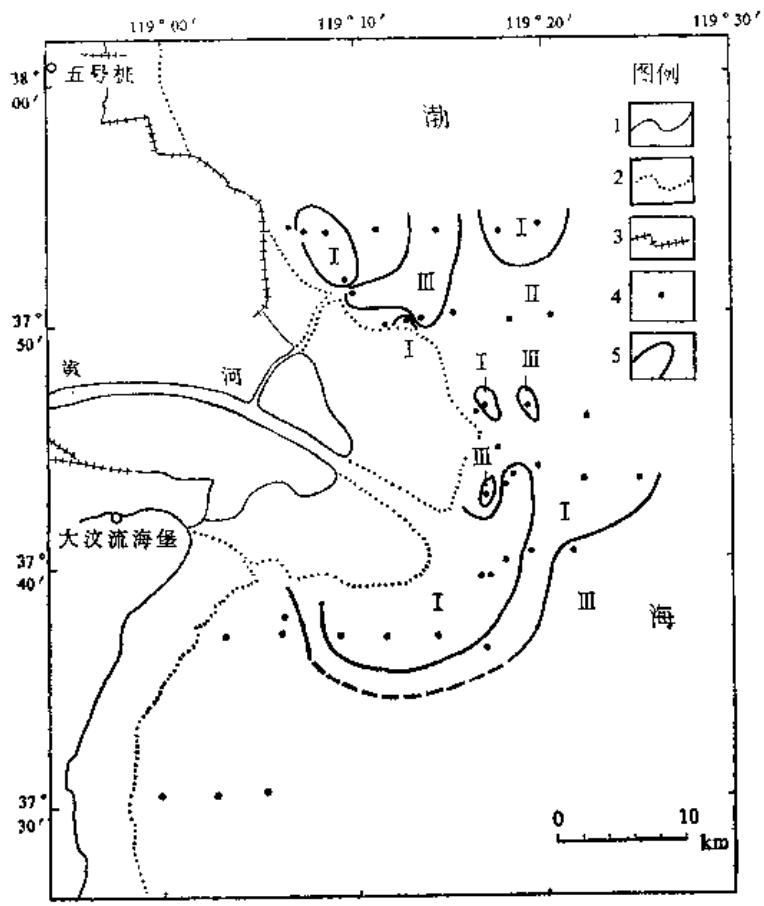


图 3—13 黄河水下三角洲沉积环境中有孔虫个体数量分布图

每50g样品中个体数：I—≤100；II—100—400；III—>400；

1—高潮线；2—低潮线；3—防潮堤；4—取样站位；5—有孔虫个体含量分级界线

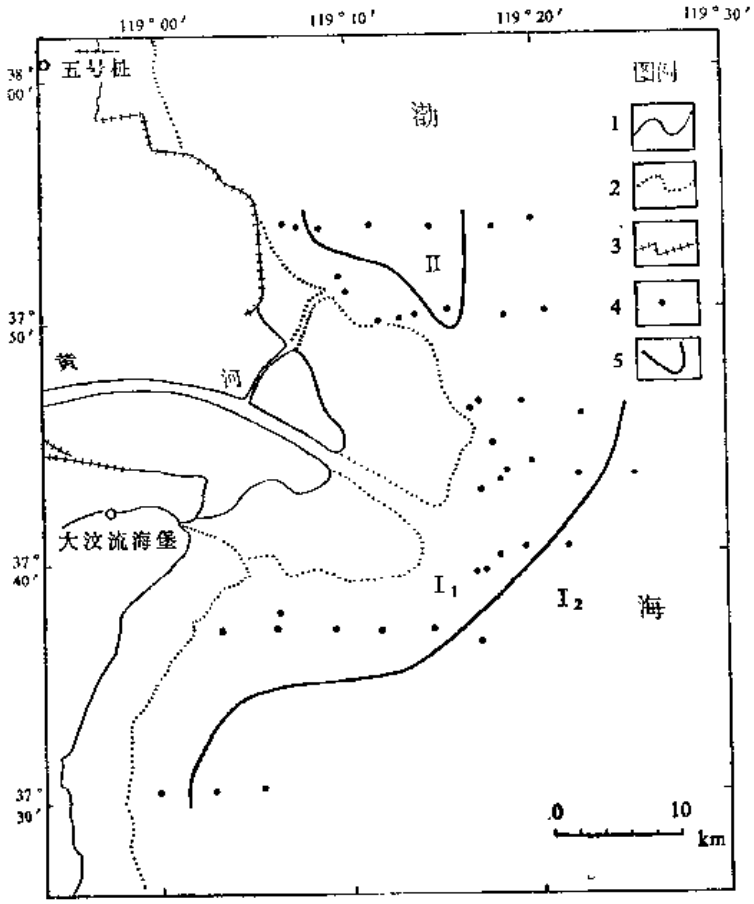


图 3—14 黄河水下三角洲沉积环境中的有孔虫组合

I₁—*Ammonia beccarii* var. 组合；I₂—*Quinqueloculina akneriana rotunda*组合；

II—*Elphidium mage-llanicum*组合

1—高潮线；2—低潮线；3—防潮堤；4—取样点；5—分区界线

表 3—5 黄河水下三角洲沉积环境中有孔虫组合内优势种及常见种平均含量及百分比

种	*Ammonia beccarii* var.-*Quinqueloculina akneriana rotunda* 组合		*Elphidium magellanicum* 组合	
	平均个体数	百分含量	平均个体数	百分含量
Ammonia beccarii var.	193	57.9	20	7.1
Quinqueloculina akneriana rotunda	91	27.4		
Cribrononion incertum	21	6.3	29	10.9
Elphidium magellanicum	10	2.9	202	75.6

表 3—6 黄河水下三角洲各沉积环境有孔虫特征

沉积环境		河口沙坝	远端沙坝	前三角洲	三角洲侧缘
样品数		12	3	8	14
主要属种		*Ammonia beccarii* var.	*Ammonia beccarii* var. *Cribrononion incertum* *Elphidium magellanicum* *Protelphidium tuberculatum* *Quinqueloculina akneriana rotunda*	*Quinqueloculina akneriana rotunda* *Ammonia beccarii* var. *Cribrononion incertum*	*Ammonia beccarii* var. *Quinqueloculina akneriana rotunda* *Elphidium magellanicum*
个体数	变化区间	4—733	187—922	12—922	16—1314
	平均	116	468	330	461
种数	变化区间	1—6	10—11	5—10	2—14
	平均	3.6	10.7	6.6	5.4
多变度	变化区间	1—3	4—7	3—5	1—5
	平均	1.8	5.3	4.2	2.6
优势度	变化区间	45.2—100	26.2—67.5	39.8—86.5	57.1—99.6
	平均	85.6	40.3	54.6	77.2
Ammonia beccarii var. 百分含量	变化区间	45.2—100	14.3—67.5	6.3—75.6	6.8—99.6
	平均	85.6	36.0	34.6	48.2

*loculina akneriana rotunda*个体就占全部的84.2%，而*Protelphidium tuberculatum* 只占1.7%。*Ammonia beccarii* var. 和*Quinqueloculina akneriana rotunda*组合又可再分为两个亚组合，各以自己的优势种命名：即*Ammonia beccarii* var. 亚组合和*Quinqueloculina akneriana rotunda* 亚组合。前一亚组合分布广泛，大部分地区属于这一亚组合；后一亚组合分布于前三角洲和南侧缘。在这一区域内*Quinqueloculina akneriana rotunda* 含量百分比为39.8—87.4%，远远地超过 *Ammonia beccarii* var. 的含量百分比（10.8—27.6%）。

第二组合，*Elphidium magellanicum*组合，仅分布于三角洲北侧缘（29、36、37和38站位）。主要属种只有三个：*Elphidium magellanicum*、*Cribrononion incertum* 和 *Ammonia beccarii* var.，其中*Elphidium magellanicum*为优势种，占总个体数的59.6—86.5%。

*Ammonia beccarii*广泛分布于中国北方潮滩和近岸浅海，特别是受淡水影响的地方；而*Quinqueloculina akneriana rotunda*在胶州湾东北角是一个在数量上仅次于 *Ammonia beccarii* var. 的种；*Elphidium magellanicum*是滦河口外水深5—10m处的一个优势种。（Wang和Bian, 1985；林和茂，朱雄华，1986）。

黄河口外有孔虫壳体在表层沉积物中的分布，受盐度和沉积速率控制。通常，沉积物中有孔虫的数量在前三角洲和三角洲侧缘较多，而在三角洲前缘较少。南侧缘个体数量比北侧缘的多，反映南侧缘沉积速率比北侧缘低。

Ammonia beccarii var. 的分布明显地与盐度有密切关系。在近河口处水体中的营养丰富，但由于盐度偏低，当其它属种不易大量繁殖的时候，*Ammonia beccarii* var. 则迅速繁殖，可以达到高的百分比（图3—15）。如果该处的沉积速率低，可以达到很高的个体数量。如河口处（16站位点）*Ammonia beccarii* var. 的个体数为723个，其优势度为98.6%，自河口向外*Ammonia beccarii* var. 的百分含量明显减少（图3—15）。

在本区所见海产介形虫主要属种有 *Sinocytheridea impressa*（典型中华美花介）、*Bicornucythere bisanensis*（美山双角花介）、*Neomonoceralina chenae*（陈氏单角介）、*Loxoconcha ocellata*（眼点弯贝介）、*Loxoconcha tarda*（板痴弯贝介）、*Echinocythereis bradyformis*（类布氏棘艳花介）。这个组合可以称之为 *Sinocytheridea impressa* 组合。小部分地区有搬运来的陆相介形虫。每50g表层沉积样品平均含海产介形虫壳瓣31个，最高含量282个。有9个站位未见介形虫。含介形虫比较多（>30个）的地区主要是在南侧缘及河口沙坝—侧缘过渡带地区，前三角洲及北分流河口外部分地区的含量也高。

在北分流河口外无论是有孔虫还是介形虫，它们的分布都是一个复杂的问题。一是相邻地区数量相差很大；二是个别站位(33站)有孔虫个体数相当多，但介形虫却未发现。除了在讨论有孔虫时谈到的两个原因，即沉积速率和 *Ammonia beccarii* var. 的适应性强外，也和再沉积有关。即北分流活动时，特别是在活动初期，它侵蚀部分潮间带表层沉积物，将沉积物连同其中的生物介壳沉积在河口，而使某些站位上的含量增加。

对黄河水下三角洲表层沉积物的调查是在1988年5月至6月进行的。由于这是在洪水即将到来之前，已经历了半年多的枯水期，加之1986年和1987年输沙量低，而使得表层沉积物中微体化石的含量较高，特别是比现代黄河三角洲钻孔岩芯中微体化石的含量明显地增高。黄河水下三角洲各种亚环境的表层沉积物中，有孔虫的分布如表3—6所示：河口沙坝

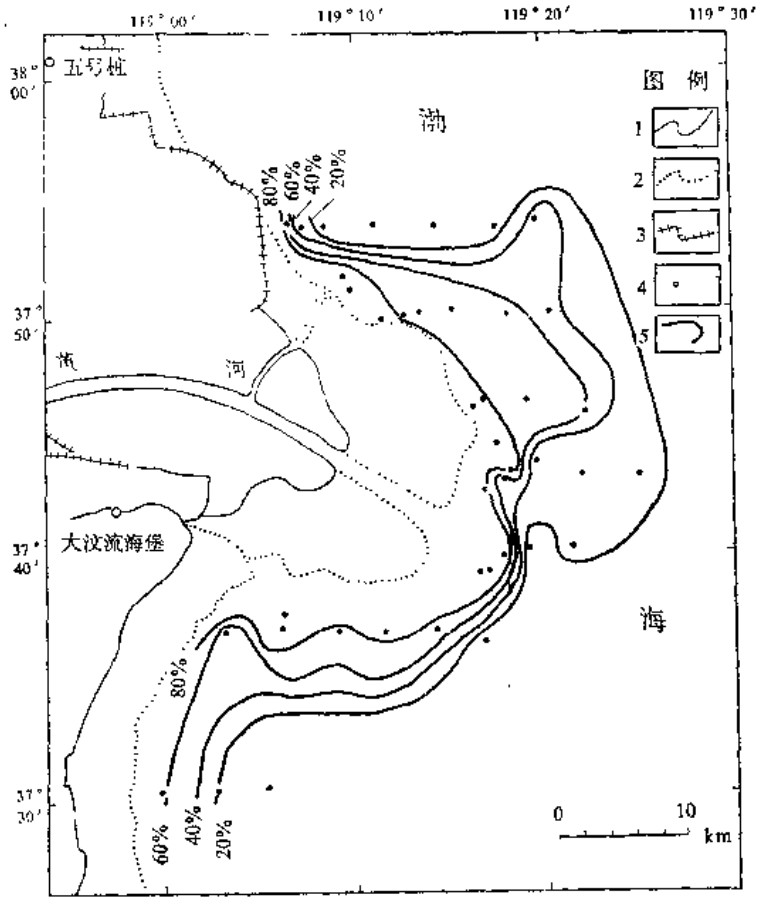


图 3—15 黄河水下三角洲表层沉积物中毕克卷转虫 *Ammonia beccarii* var. 在有孔虫中的百分含量

1—高潮线；2—低潮线；3—防潮堤；4—取样站位；5—百分含量等值线

有孔虫数量少，远端沙坝、三角洲前缘及侧缘个体数量高。*Ammonia beccarii* var. 在河口沙坝百分含量高，其他依次为侧缘、远端沙坝、前三角洲。

黄河水下三角洲堆积物主要是形成于汛期据1950—1988年统计，汛期（7—10月）占全年输沙量的85%。在这样短的时间内形成的堆积物中不可能有较多的底栖有孔虫和介形虫埋藏其中，微体化石保存较多的部位主要在非汛期堆积物中。因而在垂向上有孔虫和介形虫的数量随环境改变而有很大差别。

第四章　黄河三角洲的进积与蚀退

黄河三角洲是在不断地进积和蚀退交替过程中生长发展。在活动河口段，泥沙大量堆积，三角洲快速进积，平均进积速率为2km/a。河流改道后，河口废弃，在废弃河口海岸段，明显蚀退，平均蚀退速率开始时为0.9km/a，逐渐降低到0.2km/a。因此，进积和蚀退是三角洲发展的两个基本过程，它对人类生产活动有很大的影响。

第一节　黄河三角洲的进积

黄河三角洲的进积作用主要发生在流路的河口处。三角洲进积与河道演化密切相关。下面首先介绍现代流路的演化过程，随后讨论三角洲的进积作用。

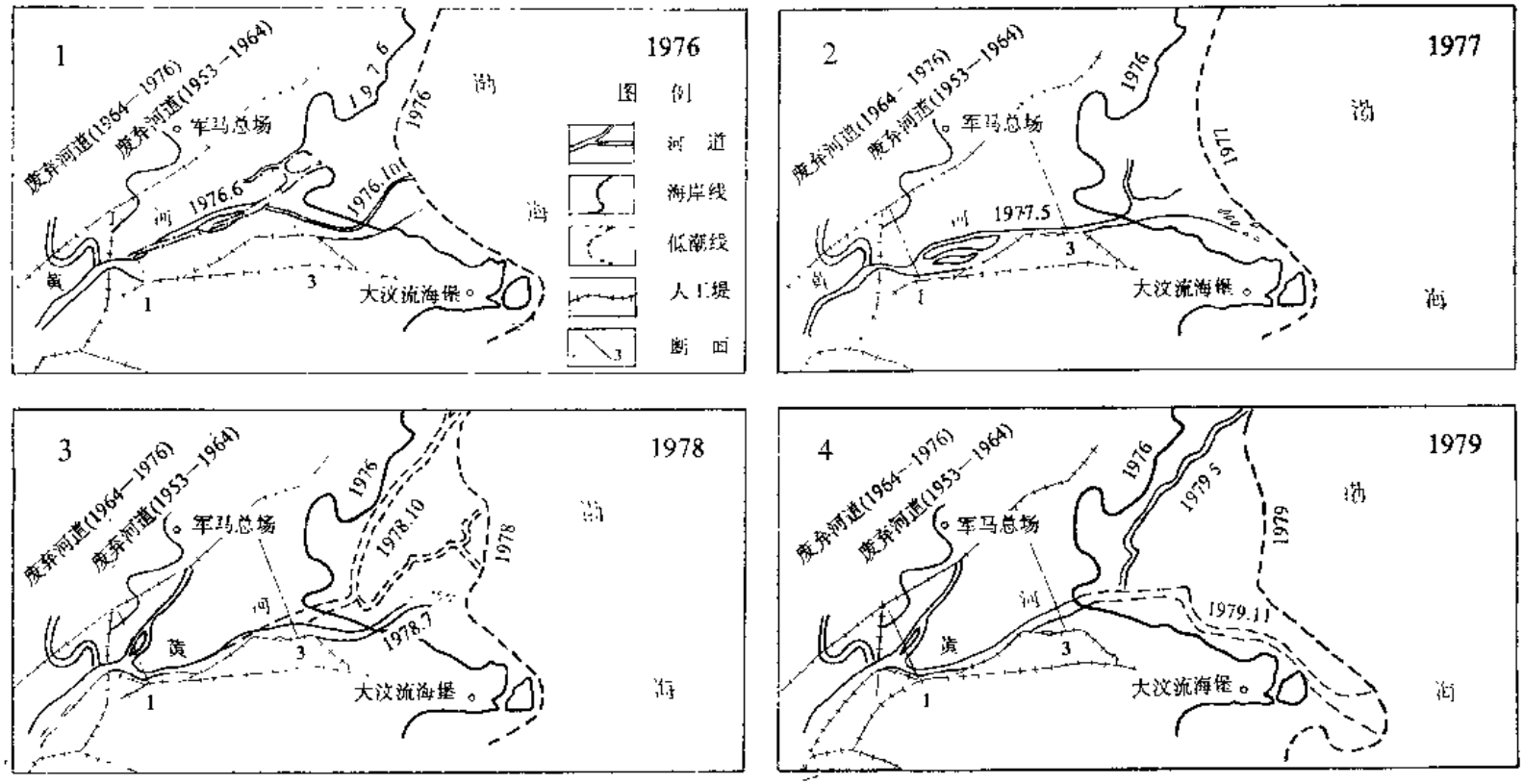
一、现代流路（清水沟流路）的演化

1976年，黄河改道流入清水沟河道后，在清1至清3断面以上河宽3—3.5km，向下游分为两股：北股沿原清水沟向东北方向入海；南股向东南又转向东北于清4断面以下向北流去。河口由原海岸向东前进了6km（图4—1—(1)）。1977年大体也是如此，只有南股向东延伸3km（图4—1—(2)）。1978年，主分流向东北延伸18km，次分流位于清4断面附近（图4—1—(3)）。1979年，河成单股向东南方向摆动，延伸了12km（图4—1—(4)）。1980—1983年，河口在南北13km宽的范围内摆动（图4—1—(5)、4—1—(6)、4—1—(7)、4—1—(8)）。1984年，径流量达到447亿m^3，输沙量为9.34亿t，且出现了6470m^3/s的洪峰（10月1日），导致河口迅速向东淤进（图4—1—(9)）。1985—1987年7月，河口基本上在此位置上保持南北向的轻微摆动（图4—1—(10)、4—1—(11)）；1987年7月，人工改道向东北由孤东入海；1988年汛期前，又由原河道入海；1988年8月下旬出现了5900m^3/s的洪峰，河口又向东推进。

现代流路的河道演化情况（图4—1），主要依据黄河水利委员会河口水文实验站测制的河道形势图分析所得。由于测量河道时没有验潮资料，只根据测量时的水边线确定河口位置，将测得的河口位置近似地做为低潮线，因此，河口低潮线位置是估算的，与实际情况略有出入，但总体上反映了现代流路的演化过程。它可归为两个阶段：第一阶段从1976年到1979年，为河道频繁摆动阶段；第二阶段从1979年汛期到现代，河槽趋向单一顺直。

二、现代叶瓣的进积作用

与河道演化相对应，三角洲叶瓣的进积作用也分为两个阶段：第一阶段为河口沙席形成阶段；第二阶段为河口沙坝形成阶段。清水沟叶瓣进积之初，从改道点到河口18km内（直线距）为河道区，受两侧人工堤约束，河道宽6—13km。清水沟河口外为极浅水域，深1—5m左右。黄河带来的泥沙，少量沉积在河道区，大量沉积在河口区，在河口形成小沙体。河口淤高成陆，导致河道侧向摆动由新河口入海，并在新河口形成新的小沙体。各小沙体逐渐连结成一个宽而浅的席状沙体，其平面形态受原先的清水沟浅湾形态控制，呈喇叭型。沙席厚度由陆向海逐渐增厚，平均厚度为3.5m。沙席之上覆盖有河道延伸形成


1
1976
图 例
河 道
海岸线
低潮线
人工堤
断 面
废弃河道(1964—1976)
废弃河道(1953—1964)
军马总场
1976.6
1976
1976.10
河
黄
海
1
3
大汶流海堤
2
1977
1977
1977.5
3
4
1979
1979.5
1979
1979.11
3
1978
1978.10
1978
1978.7

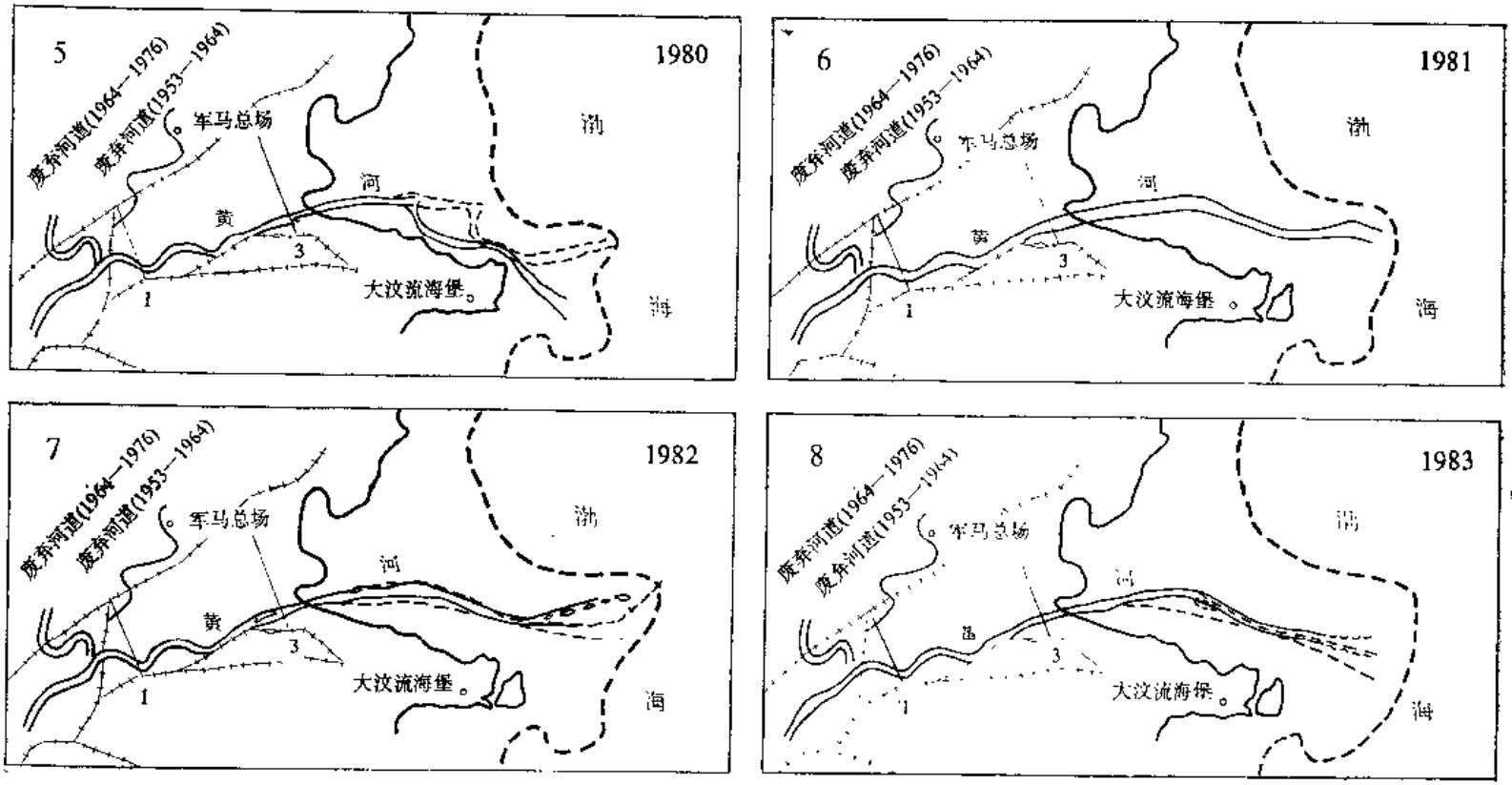


图 4—1—(1—8) 黄河三角洲现代流路（清水沟流路）演变图（1976—1983年）

（据黄河水利委员会资料编制）

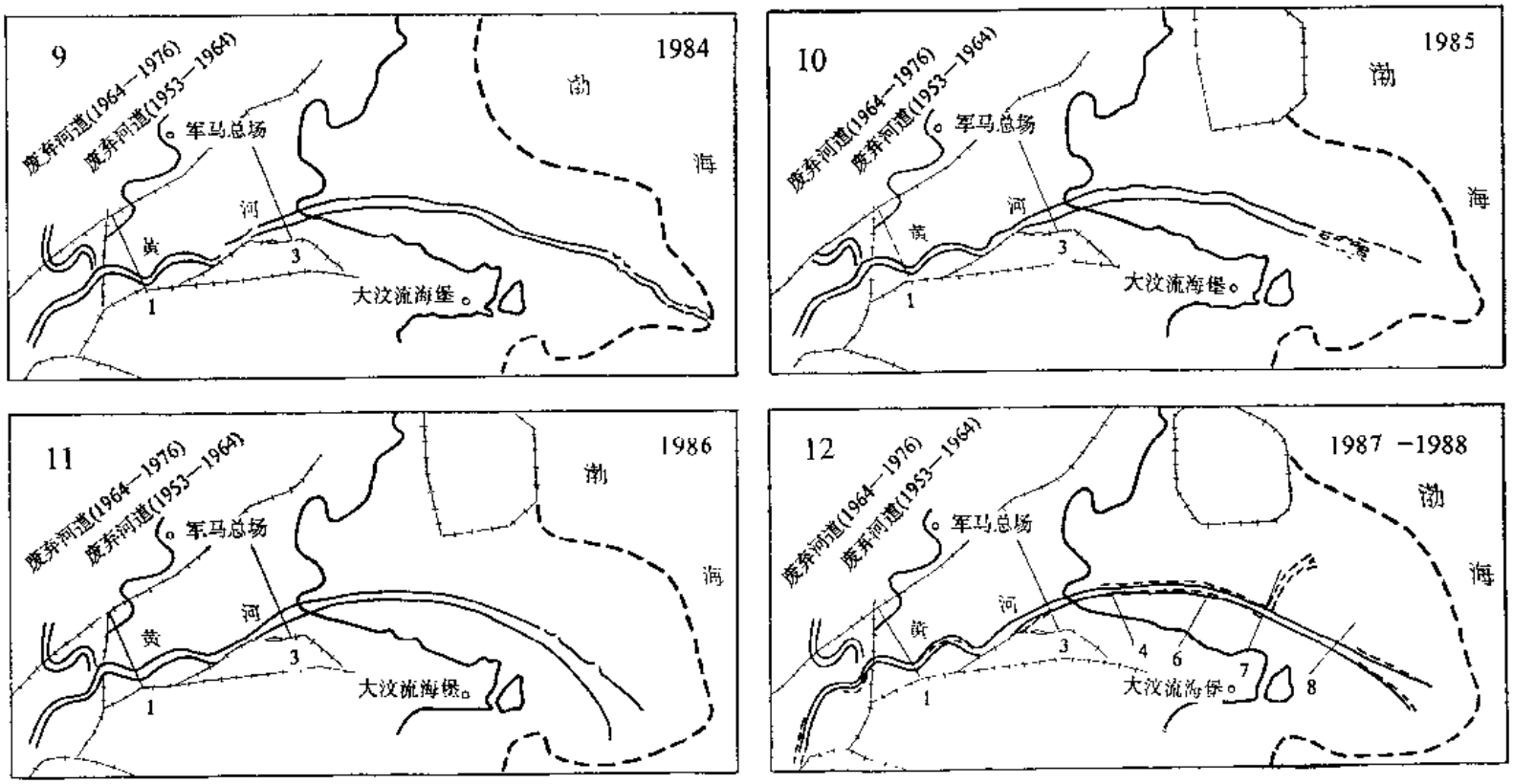


图 4—1—(9—12)　黄河三角洲现代流路（清水沟流路）演变图（1984—1988年）

（据黄河水利委员会资料编制）

的新沉积物，平均厚约1m。自1976年到1979年共进积18km。

沙席填满浅海湾后，河道向海伸展，河口进入较深水区。河口区有较大的空间容纳泥沙的堆积，因而使河道相对稳定，此时进积进入第二发育阶段，河口沙坝开始发展。清水沟叶瓣自1980年到1988年堆积的河口沙坝呈鸭咀状，微向东南突出，长10km，宽18km，沙体最大厚度为12.4m。与此同时，没有在河口沉积的极细颗粒则随潮流搬运到河口两侧的环流区，形成河口沙坝两侧的三角洲侧缘（烂泥湾）堆积。

根据1976—1987年河口区剖面重复测量对比的结果可以看出，在进积过程中，河口沙坝、远端沙坝的坡度逐渐变陡。在1976年之前，该剖面地形平缓，自1—15.9m水深坡度为0.64×10^{-3}。自1976年5月黄河由此入海后，大量泥沙在河口堆积，水下三角洲地形坡度变陡，其中河口沙席、河口沙坝的地形变化尤其明显：1978年河口沙坝坡度为1.8×10^{-3}；1980年为2.5×10^{-3}；1985年为4.4×10^{-3}。远端沙坝的地形也同样逐渐变陡：1977年为0.48×10^{-3}；1983年为0.8×10^{-3}；而1985年增至1.6×10^{-3}（见表4—1、图4—2）。水下三角洲每年堆积大量沉积物，据历史资料分析，清水沟叶瓣年堆积的最大厚度为14.8m（包括河口沙坝、远端沙坝和前三角洲沉积）。随着三角洲的向海进积，三角洲前缘的堆积厚度越来越大。

表 4—1　黄河口水下三角洲地形坡度及堆积厚度的变化

（1976—1987）

时间	河口沙席和河口沙坝			远端沙坝			前三角洲	垂向堆积最大厚度(m)	备注
	距基点距离(km)	水深(m)	坡度	距基点距离(km)	水深(m)	坡度	坡度		
1977年6月	4—8	2—9.5	1.8×10^{-3}	8—20.5	9.5—15.5	0.48×10^{-3}	$<1\times10^{-4}$	8	
1978年6月	5.5—9.5	2—9.5	1.8×10^{-3}	9.5—19.5	9.5—15.5	0.6×10^{-3}	$<1\times10^{-4}$	5	
1980年9月							$<1\times10^{-4}$	0	1978.10，河口北迁
1981年7月	8—11.5	2—10.6	2.5×10^{-3}	11.5—21	10.6—15.5	0.5×10^{-3}	$<1\times10^{-4}$	8.5	
1982年7月	13.5—15.8	2—12.2	4.4×10^{-3}	15.8—20.9	12.2—15.3	0.6×10^{-3}	$<1\times10^{-4}$	14	
1983年8月	13.5—17.1	2—12.9	0.3×10^{-3}	17.1—20.9	12.9—15.3	0.8×10^{-3}	$<1\times10^{-4}$	0	1982.10，河口偏离
1985年9月	16.8—18.6	2—10	4.4×10^{-3}	18.6—21.1	10—14	1.6×10^{-3}	$<1\times10^{-4}$	14.8	
1987年10月	15.5—18.9	2—12	3×10^{-3}	18.9—23.5	12—15.3	0.7×10^{-3}	$<1\times10^{-4}$	0	1986.10，河口南偏 1987.7 开挖北分流

本表以1976年改道时河口2m水深处为基点，“距基点距离”的第一个数值相当于2m水深处的进积距离，第二个数值为由河口沙席、沙坝底脚到基点的距离。

活动水下三角洲的进积速度非常快，以现代河口东西向的剖面为例：把改道时（1976年）的2m水深为起点，对比其进积速度，1976年5月至1977年6月进积了4km；1977年6月至1978年6月进积了1.5km；1978年至1980年曾因河口暂时迁离而沉积间断，至1981

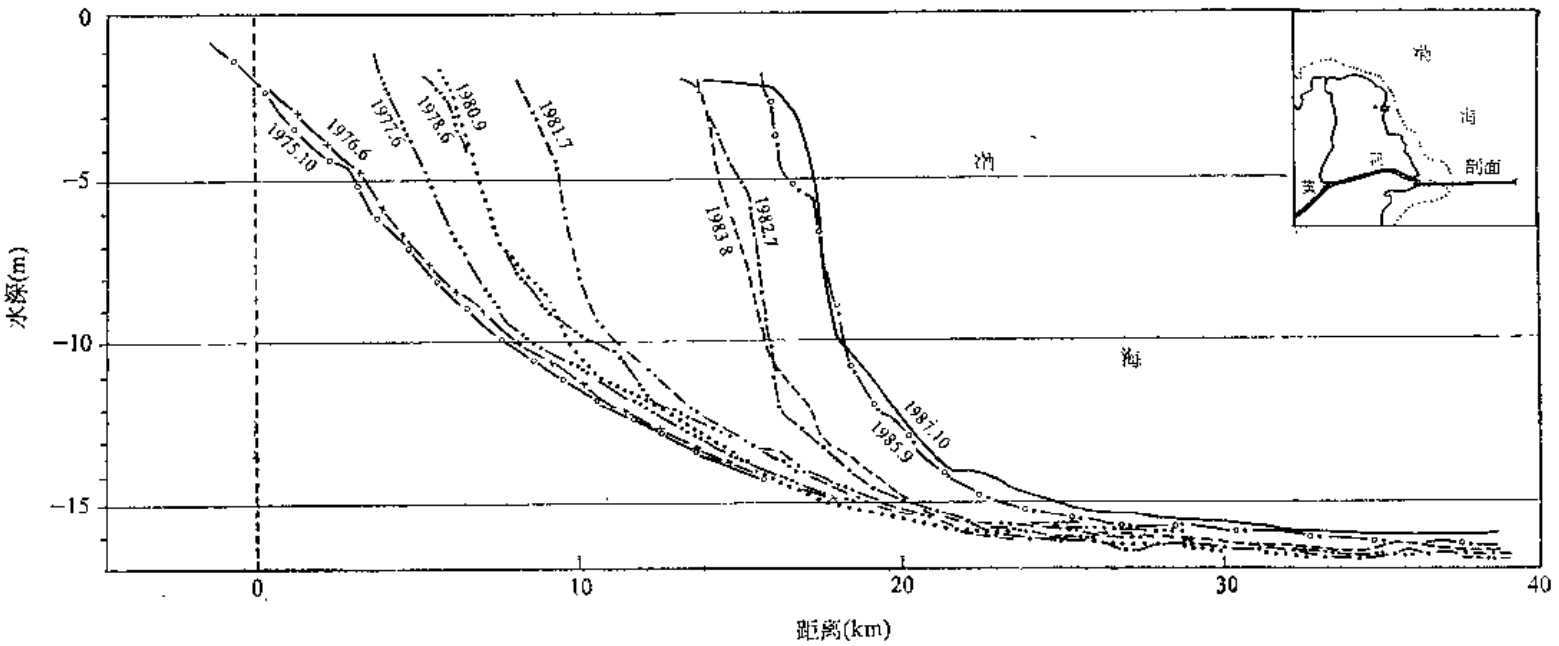


图 4—2　黄河水下三角洲进积过程
(1976—1987)

年又进积了2.5km；1981年7月至1982年7月进积了5.5km；1982年7月至1983年8月沉积间断，1983年8月至1985年9月进积了3.3km；1976至1985年共进积16.8km。1987年，人工将河口北迁至孤东，由于受到侵蚀，故仅保留了15.5km(图4—2)。

因此，黄河三角洲进积作用主要表现在三角洲前缘迅速地向海推进。这与上述的高密度流动力条件有关，因为高密度流在这一地带形成和消散。

三、现代水下三角洲的形态特征

为了了解现代水下三角洲形态特征，于1988年5月和8月用200Hz测深仪对其形态进行了测量。测线位置见图4—3。测深表明，水下三角洲地形有两个折点，分别位于水深2m和水深12—14m处。2m折点以下是三角洲前缘，12—14m折点以下是前三角洲；16—18m水深以下过渡为平缓的浅海。

三角洲前缘有大量的凹凸微地形的斜坡，总体坡降为1×10^{-3}至3×10^{-3}。冲沟、冲槽、滑坡相当发育。例如，在4号剖面水深8—10.55m处所见的冲槽宽200cm、深50cm（图4—4,A)；在10号剖面上不仅有冲沟、冲槽、滑坡，且地形呈阶梯状，地形坡降为3×10^{-3}（图4—4,B)。

远端沙坝位于水深12.5m至14.98m处，坡降为4.9×10^{-4}。

前三角洲位于三角洲前缘的近海一侧，水深13m以下。地形平缓、开阔，其坡降在1×10^{-4}以下。

三角洲侧缘（烂泥湾）分布在河口沙坝两侧的0—10m水深处，地形平坦。由于河口经常迁移，三角洲侧缘的位置也随之变化。

黄河三角洲进积过程中分流河口迁移频繁，几乎每年汛期移动一次，甚至二次。因此，三角洲叶瓣相当宽广，可达40—60km。三角洲进积速率高，平均每年进积2km，最

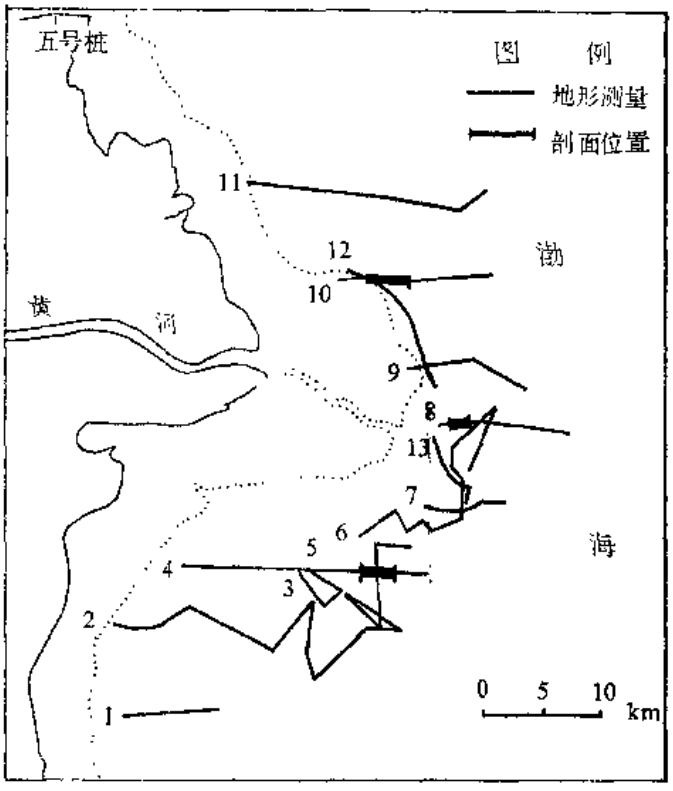


图 4—3 黄河水下三角洲地形测线

深度(m)
0
3
6
9
12
A
0
1
km

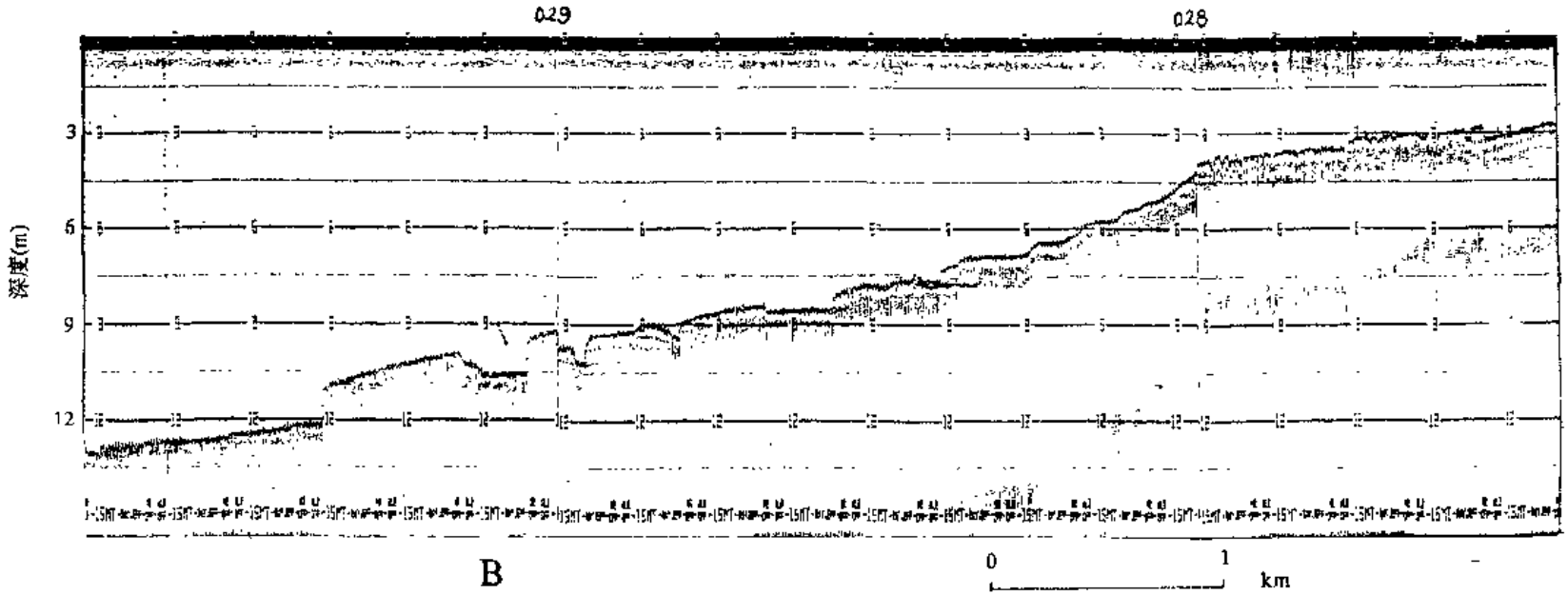


图 4—4　黄河水下三角洲地形剖面

A—4号剖面；B—10号剖面

位置见图4—3

高可达5.5km。垂向加积速率每年为4—14m。所形成的砂体薄，厚度在6—12m之间。

第二节　黄河三角洲的蚀退

黄河三角洲的形成是河流与海洋相互作用的结果。在研究三角洲演化时，可以划分出不同的两个期：即建设期和破坏期。黄河携带巨量的泥沙入海，河口迅速淤积，建造了宏大的河口三角洲。流路改道后，原河口三角洲泥沙来源减少或中止，使原来以河流作用为主的堆积作用，改变为以海洋动力作用为主的侵蚀作用。

蚀退作用冲刷三角洲，使三角洲海岸后退，并严重地危及人民的生产和生活的安全。

一、蚀退的地质地貌特征

蚀退作用最显著的部位是潮滩和水下三角洲前缘区，即从岸线到水深12m的范围，其中尤以5m深处为最。这一部位是进积过程中堆积速率最高的部位。当流路改道，这部位处于最不稳定状态，蚀退作用也最强烈。

蚀退作用在空间上以低潮线为界表现各异：低潮线以上潮滩区的蚀退作用主要表现为岸线后退，潮间带由宽变窄再变宽，潮滩坡度相应也由缓变陡再变缓；低潮线以下三角洲前缘区的蚀退作用主要表现为前缘普遍侵蚀，上部大于下部，使坡度变缓。侵蚀下来的物质，大部分堆积在前三角洲区。

（一）潮滩区的蚀退特征

黄河三角洲潮滩蚀退的重要特征是侵蚀陡坎发育，它既是侵蚀地貌形态，又反映出侵蚀作用的方式。在一个蚀退潮滩上，往往有几个逐级分布的陡坎。陡坎之间的潮滩，局部受到侵蚀，局部接受堆积。黄河三角洲西北部湾湾沟潮滩保留着强蚀退地貌特征，而在三角洲南部的小岛河潮滩是一种弱蚀退类型。

下面分别予以介绍：

1．强蚀退潮滩特征　湾湾沟潮滩宽640m，坡降3.2×10^{-3}。根据作用特点，可将高潮线以下划分出上部侵蚀区、侵蚀-堆积区、下部侵蚀区、沉积区四个区段(图4—5Ⅰ)。

（1）上部侵蚀区：位于潮间带最上部。靠近高潮线处有侵蚀陡坎。陡坎高20—30cm。陡坎以下有大量泥砾，系波浪侵蚀海岸的产物。向下是侵蚀平面，有较多残留树根。树根露出高度一般40—50cm，最大高度80cm。此系一年侵蚀造成的，可粗略代表一年的侵蚀深度。

（2）侵蚀-沉积区：位于上部侵蚀区之下。在这里接受了由退潮流带来的上部侵蚀区的泥沙沉积，原来的侵蚀凹坑被沉积物填平。

（3）下部侵蚀区：下部侵蚀区的滩面上有大量的侵蚀凹坑，凹坑长轴方向垂直海岸，坑深30—50cm。凹坑中基本没有沉积物，凹坑间有侵蚀残留的凸地。

（4）沉积区：沉积区位于低潮线附近，地形平缓、表面平坦。潮坪沉积物松软，厚约20cm。

2．弱蚀退潮滩特征　弱蚀退潮滩以小岛河南面的潮滩较典型（图4—5Ⅱ）。该潮滩位于现代黄河口南，黄河三次在此附近入海（1897—1904年、1929—1934年、1934—1953年），由于实际行水时间短，岸线向海推进不远。流路改道后，蚀退作用也不明显，至今已达弱蚀退后期，基本上进入相对稳定状态。据1988年10月26日水准测量，滩面坡降小于

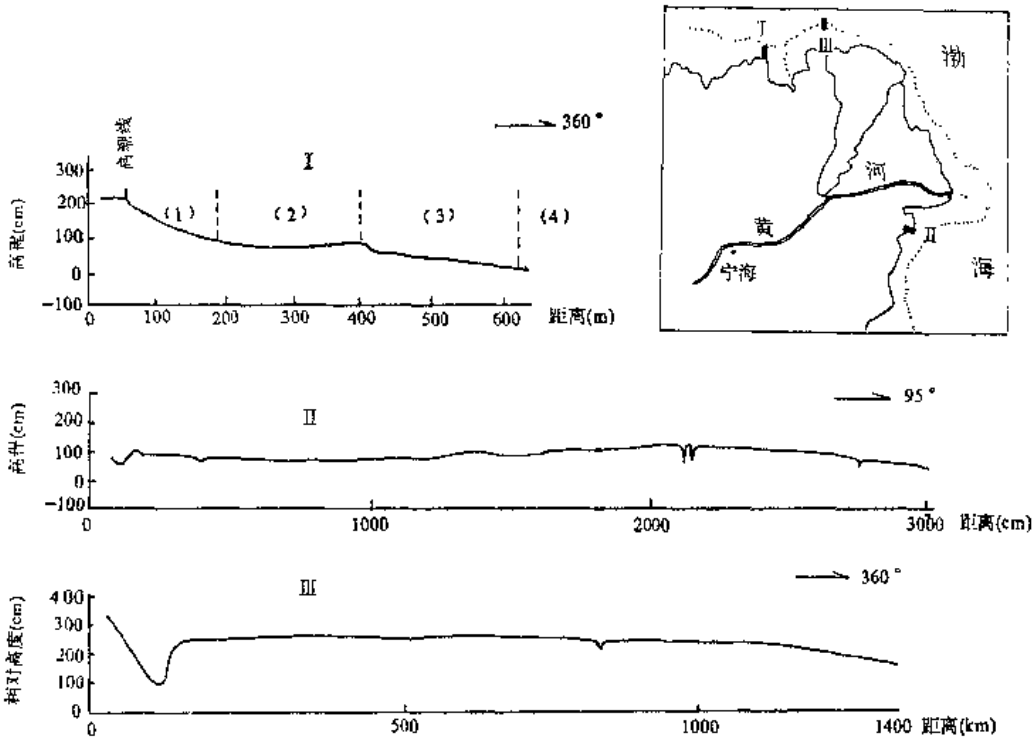


图 4—5　黄河三角洲蚀退型潮滩剖面及剖面位置

Ⅰ—强蚀退型地形剖面；Ⅱ—弱蚀退型地形剖面；Ⅲ—受人为地质影响的蚀退型地形剖面

万分之一。滩面上有少数宽度小于 0.5m 的小潮沟，局部略有隆起，陡坎不明显。在潮间带的上部，当退潮裸露后，受阳光暴晒，形成大量泥裂。滩面隆起部位有芦苇生长。潮间带宽2—3km，最窄处1km。在这类海岸上，潮沟呈树枝状向陆地分叉。

3．受人类地质活动影响的蚀退型潮滩的特征　黄河三角洲潮滩演化受到人类地质作用的影响，养殖池、盐田、防潮堤都在改变潮滩的形态和动力条件。现代黄河三角洲有一半以上的海岸筑有堤坝，它对潮滩产生的各种影响，由于时间尚短尚未充分体现出来，但对潮滩地貌和沉积作用的影响已可察觉。例如，在黄河三角洲北部钓口河废弃河口潮滩上正在修筑一条防潮大堤，筑堤后滩面形态发生很大变化（图4—5Ⅲ）：（1）在堤脚处形成一条平行堤坝的潮水沟，该潮沟的原始蛇曲特征已经消失，这是因人工拦截和挖取土方所造成。今后该潮沟或被淤塞，或向蛇曲方向发展，对堤脚都有影响；（2）原来受侵蚀的潮滩，筑堤后，潮滩靠陆部分成为堆积区；靠海部分成为强侵蚀区，在侵蚀区可见冲蚀坑和侵蚀劣滩；（3）堤坝挡住了潮滩的自然高潮线，因此，原高潮线处的侵蚀陡坎停止发育，仅在低潮线处有少量陡坎。人为地改变沉积环境使海动力作用发生相应的变化，这是今后要深入研究的课题。

滩面研究表明，蚀退作用首先使潮间带变窄，低潮线蚀退速率大于高潮线，并使滩面粗糙化，出现多种蚀退微地貌，如侵蚀陡坎、侵蚀劣地、冲蚀坑和泥砾等（图 4—6）。然后，蚀退作用减弱，潮滩坡度又趋于平缓，潮滩宽度相应增大，滩面比较平坦。而人类影响可改变蚀退作用的自然过程。

（二）水下三角洲的蚀退特征

水下三角洲蚀退作用表现为三角洲前缘普遍受到侵蚀，以5m等深线处侵蚀作用最强，

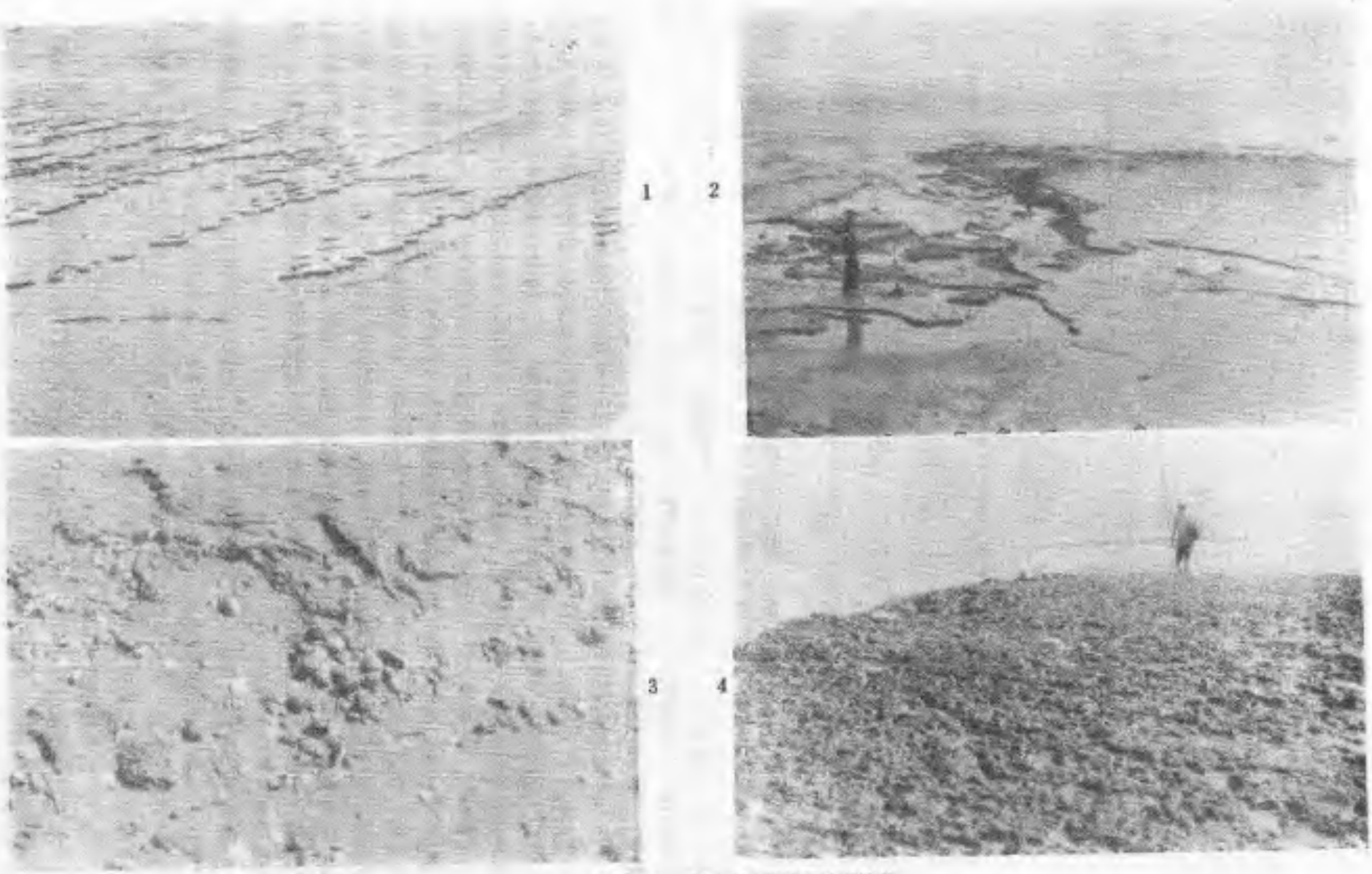


图 4—6　黄河三角洲潮滩蚀退地貌

1—侵蚀陡坎；2—冲刷坑；3—侵蚀形成的贝壳片和泥砾；4—沙滩

往深处逐渐减弱。在蚀退初期，5m等深线以下地区偶有堆积，以后，仅在前三角洲地区有堆积。

最近废弃的钓口河叶瓣的蚀退作用最为明显。钓口河于1964年开始成为黄河河道，1976年因黄河改道而废弃。1976年以后，钓口河叶瓣开始蚀退。据黄河水利委员会自1975年至1985年对钓口河水下三角洲地形剖面多次测量资料的对比(图4—7)可以看出：1976年

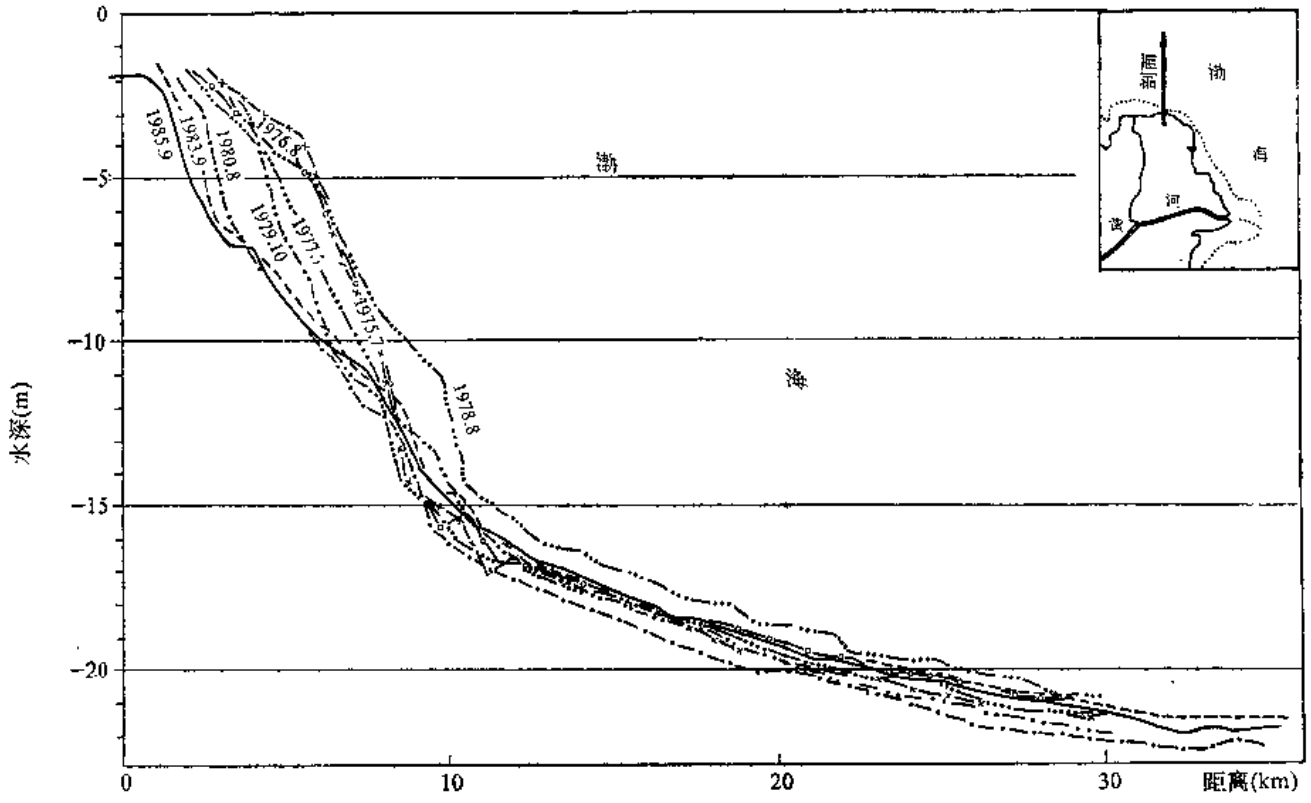


图 4—7　黄河水下三角洲蚀退地形变化

(据黄河水利委员会1975—1985年测量资料编绘)

以后，水下三角洲开始蚀退；1977年7月至1978年8月，水深小于5m处明显地受到侵蚀，而在水深超过5m处则有堆积。这是因为河口改道以后，深度小于5m处的向海凸出的沙体，在新的海洋动力条件下，处于最不均衡状态。其侵蚀产物大部分被搬运到水深5m以下的地带。

1978年以后，该剖面上整个三角洲前缘呈现出侵蚀状态（水深0—12m），以5m等深线的位置为例，1979年10月较1978年8月后退了1.4km；1980年8月较1979年10月后退了1.5km；1983年9月较1980年8月又后退了1.5km；1985年9月较1983年9月则后退了0.4km。从1978年8月至1985年9月6年总共蚀退4.8km，平均每年后退0.8km。随着时间的推移，蚀退速度递减。

前三角洲与三角洲前缘不同，1975年至1977年有冲有淤，冲淤量均很小；1978年堆积了约0.5m；1979年侵蚀掉约0.5m；1980—1985年有较明显的堆积。

上述变化说明，水下三角洲的侵蚀作用主要发生在水深0—12m之间，也就是三角洲前缘地带，其下前三角洲区则有冲有淤，以淤为主。三角洲前缘坡度变缓，最后趋于稳

定，海岸呈均衡剖面状态。

二、蚀退速率

蚀退速率随蚀退时间的长短、海洋动力条件和原始地形等不同而异。开始蚀退时速率高，岸线蚀退速率达0.9km/a，水下三角洲前缘顶部蚀退速率可达1.5km/a，随后渐次降低。风浪作用较强和潮流速度较大的地区，侵蚀作用强，反之则弱。凸岸侵蚀作用强，凹岸侵蚀作用弱。

根据卫星照片对比，黄河三角洲北部海岸（五号桩—桃河口）从1976至1985年蚀退了3.5km，平均每年蚀退0.39km。桃河口以西岸线蚀退约1km，平均每年蚀退 0.11km。钓口河口岸线蚀退3.7km，平均每年蚀退0.36km（图4—8）。

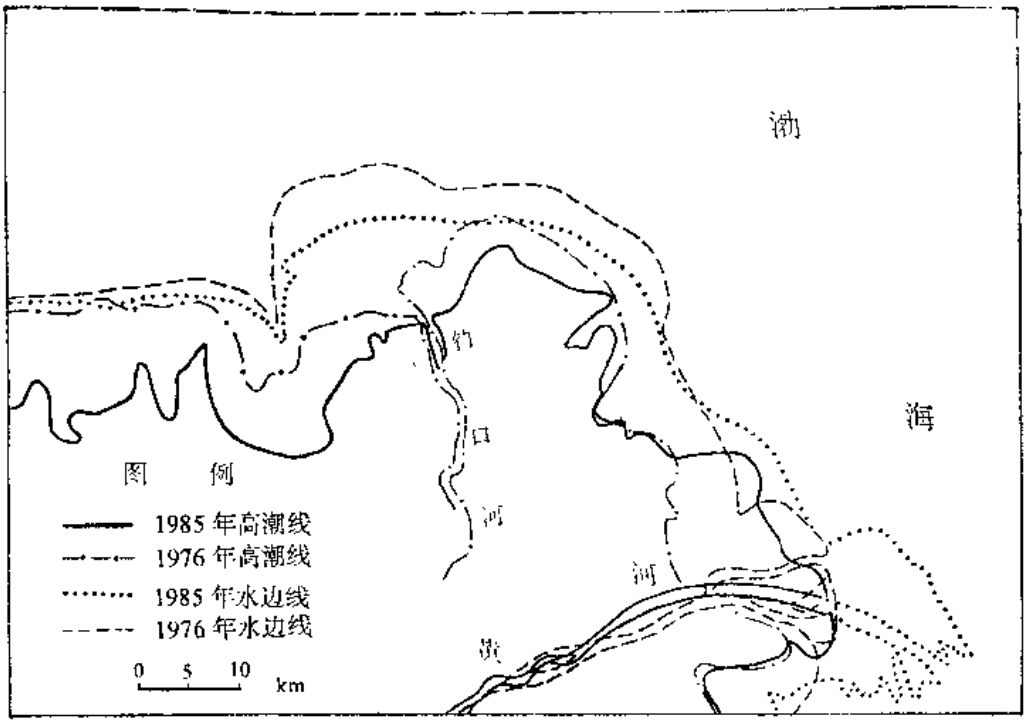


图 4—8 黄河三角洲钓口河口海岸蚀退变化
（据卫片资料绘制，1976，1985）

该蚀退速率与利用历史地形图对比所求得的速率基本相同。图4—9是根据1974年和1985测绘的地形图绘制的。据分析岸线蚀退共3.7km，平均每年蚀退0.36km，与卫片分析得出的速率一致。

蚀退速率在河流刚废弃时最大。据黄河委员会勘测规划设计院的资料，神仙沟流路在1961年出叉改道后，河口沙坝平均蚀退速率达2.5km/a；附近高潮线平均蚀退速率达0.93km/a。据该报告估计，黄河三角洲的蚀退量约占造陆量的1/3—1/4。

三、蚀退因素与过程

蚀退作用过程不能保存在地质记录中，现代技术装备尚不能直接测量风暴潮时的侵蚀能量，因此蚀退因素主要靠动力环境特点、地形变化、沉积物结构变化等作间接分析。

（一）蚀退因素

水文气象因素是蚀退作用发生的重要环境因素，其变化直接影响蚀退作用的强弱及速率。其中波浪、风暴潮、潮流对蚀退作用起重大作用。

1．波浪波　浪尤其是大波浪，对蚀退起很大作用。它可搅起已沉积的泥沙，并为潮流运走。黄河三角洲秋冬季节的大浪波高比夏季的高1.5m左右，因此，黄河三角洲的蚀退作用主要是在冬季大风浪的作用下发生。

2．风暴潮　黄河三角洲是风暴潮多发区，根据史料统计（黄河口海岸带调查报告，1987），平均6年一次。风暴潮的高潮位比一般高潮位高2—3m。风暴潮是滨岸和浅海区一次高能量突发事件，使沉积物再悬浮并随之运移。

由于风暴潮主要由寒流和台风引起，因此蚀退作用也具事件性特点。潮滩上侵蚀陡坎、贝壳滩的形成均与此有关。

3．潮流　潮流在搬运沉积物中起主要作用。黄河三角洲北部海域无潮区附近，潮流速度最大，可达150cm/s以上，因此那里侵蚀最强。

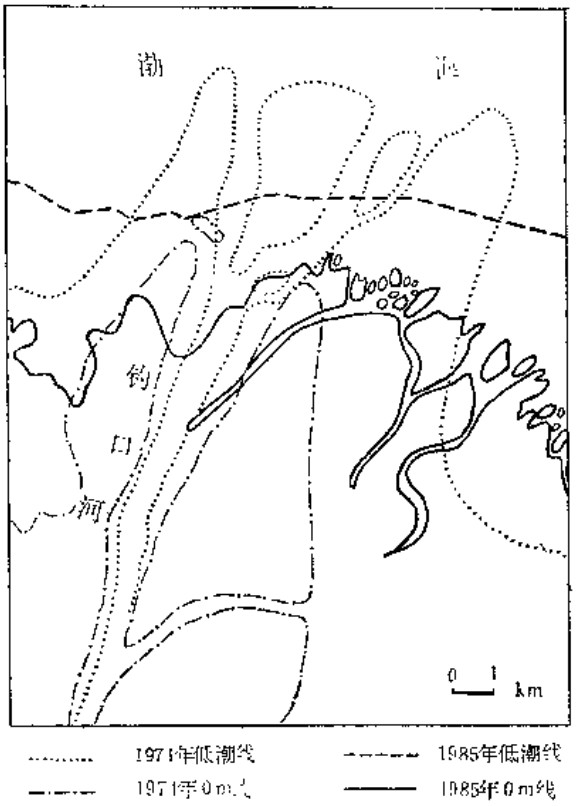


图 4—9　黄河三角洲钓口河口海岸和潮滩蚀退变化图
（据黄河水利委员会不同年份地形图编绘）

（二）蚀退过程

黄河各期流路在河口及其附近塑造了与河流动力作用相应的堆积地形。流路改道后，这种堆积地形与海洋动力塑造的均衡剖面地形相差极大，因此发生强蚀退，在逐步调整过程中，蚀退作用也逐渐变弱。

强蚀退作用使潮间带坡度变陡，三角洲前缘坡度变缓；弱蚀退使潮间带坡度变缓，与水下三角洲平缓相连。现代河口的地形是堆积型地形形态，潮滩坡度极缓，为0.08—0.17‰。在强蚀退的湾湾沟潮滩坡度为2.4—3.2‰；在微侵蚀的宋春荣沟以南的潮滩，坡度接近0.1‰。现代河口三角洲前缘斜坡坡度为4.3‰（1985年）；湾湾沟为0.45‰；宋春荣沟以南很难区分潮滩与前缘界面，两者坡度近似。由此可以看出，蚀退作用使潮滩及水下三角洲地形向海岸均衡剖面方向演化，这是波浪和潮汐作用的结果。

蚀退作用使沉积物粗化，因为风暴潮和强潮流把再悬浮的细粒部分带离三角洲区。

四、黄河三角洲的蚀退作用模式

黄河三角洲岸线长约250km，大约3/4的岸段皆存在不同程度的蚀退作用。在平行海岸线和垂直海岸线方向上都表现出蚀退作用的影响。

黄河三角洲蚀退过程可概括为如下模式（图4—10）。蚀退初期，低潮线迅速后退，潮滩宽度变小，岸线由光滑变为曲折，形成切割的小岛。到蚀退中期，蚀退作用逐渐减弱，

低潮线后退速度降低，高潮线缓慢后退，使潮滩略变宽。切割的小岛被侵蚀，河口两侧凹处被充填，岸线又趋平直。在风暴潮作用下，在高潮线附近堆积了由粗粉砂-极细砂-贝壳片组成的海滩脊。

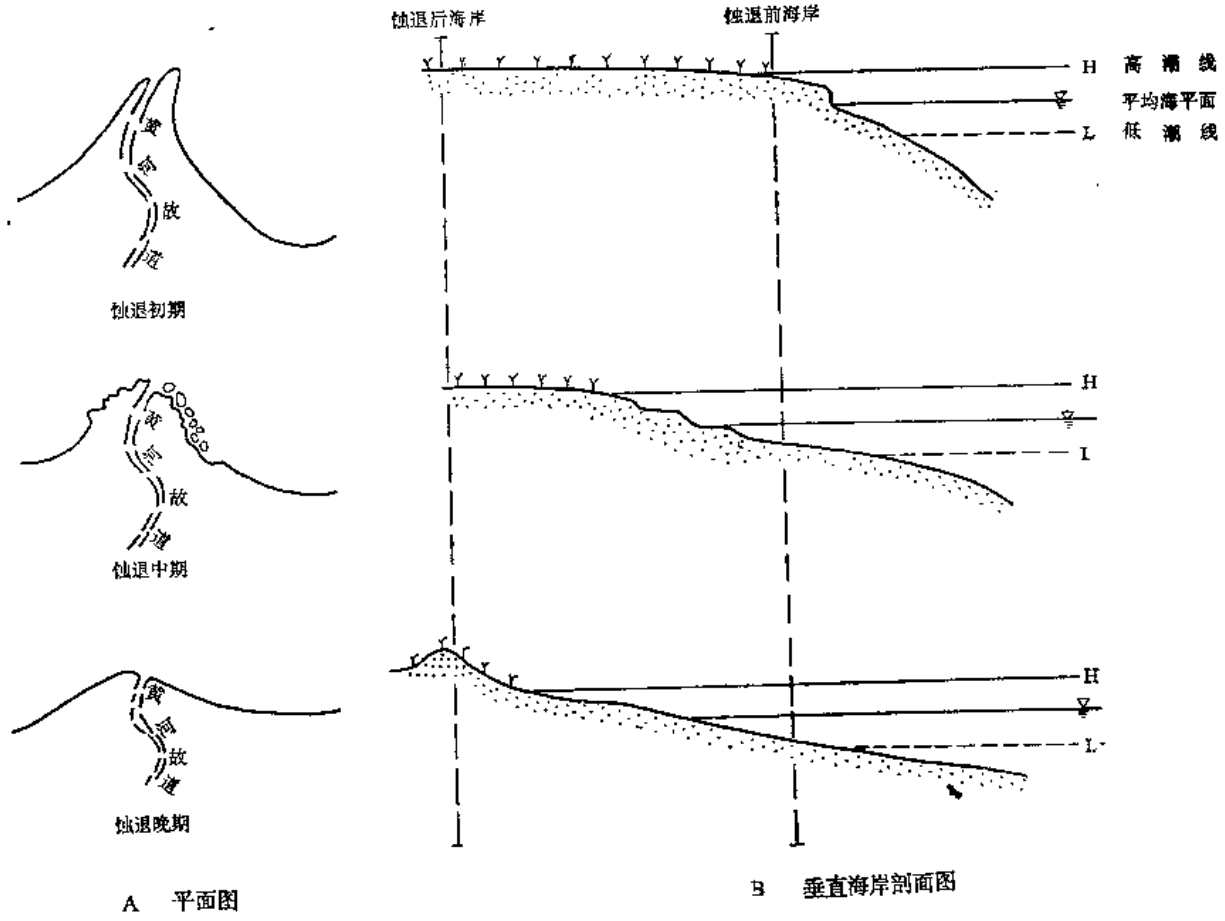


图 4—10 黄河三角洲蚀退模式

第五章　黄河三角洲的三维格架

黄河三角洲由10个叶瓣组合而成。叶瓣的生长经历了两个阶段，即河口沙席沉积阶段和河口沙坝沉积阶段。本章通过对叶瓣沉积类型和沉积序列的研究，阐明黄河三角洲的三维格架特征。

第一节　生长叶瓣（清水沟叶瓣）的沉积类型和沉积序列

黄河现在河道（清水沟河道）是1976年开始行水的。河道经历了频繁摆动和顺直单一两个阶段。与此相应，清水沟叶瓣经历了河口沙席与河口沙坝两个发展阶段。自1976年到1988年的12年期间，清水沟叶瓣已发展成为一个南北宽54km，东西长20km的肾形叶瓣。

一、清水沟叶瓣的沉积类型

清水沟叶瓣的沉积可分六类：河流沉积、河口沙席沉积、河口沙坝沉积、远端沙坝沉积、前三角洲沉积和三角洲侧缘（烂泥湾）沉积（图5—1）。

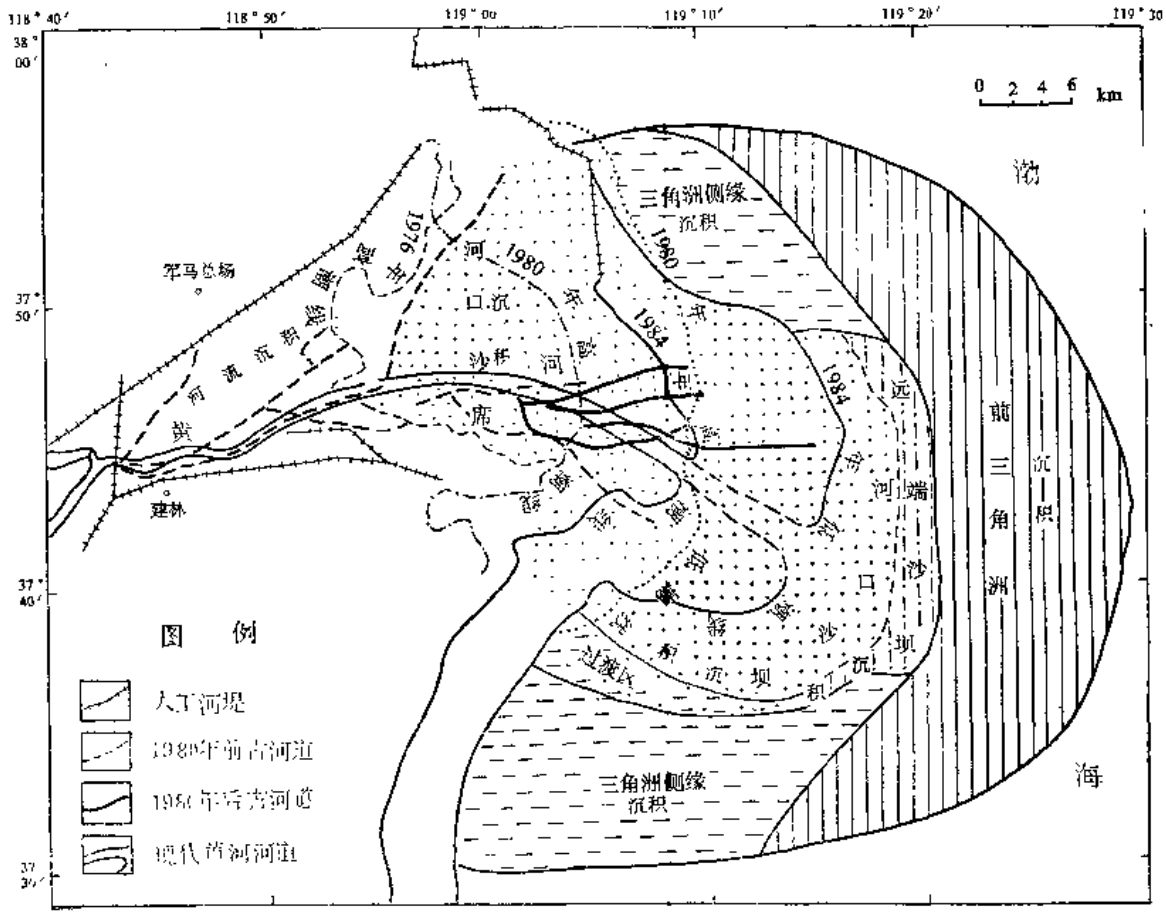


图 5—1　黄河三角洲生长叶瓣（清水沟叶瓣）的沉积类型图

河流沉积西狭东宽，山西部6km向东增到13km，沉积厚度由几十厘米到4m，由黄色粉砂夹红色粘土质粉砂组成。河口沙席沉积分布在1976年古海岸线与1979年低潮线之间，呈扇形，厚2—6m。河口沙坝沉积分布在1979年低潮线外侧河口周围，厚11.10m，呈鸭嘴状伸出。它的根部叠置在沙席上，由粉砂和极细砂组成。远端沙坝位于河口沙坝外侧，呈窄带状，厚1.7m，由黄色粉砂夹粘土质粉砂组成。三角洲侧缘（烂泥湾）沉积，分布在河口南北两侧、不对称。它主要是在叶瓣发展的第二阶段形成的，是河口沙坝的孪生产物。它的位置随着河口的延伸而向海扩展。较早的侧缘可以被进积的沙层覆盖。前三角洲沉积分布在水深12m以外，并逐渐向浅海沉积过渡，厚1—3m。图5—2为清水沟叶瓣的纵剖面图。图中河口沙席、河口沙坝与远端沙坝因沉积物相似，都以粉砂为主，用同一图例表示，三角洲侧缘（烂泥湾）沉积因其位置在河口沙坝两侧，该剖面上反映不出。

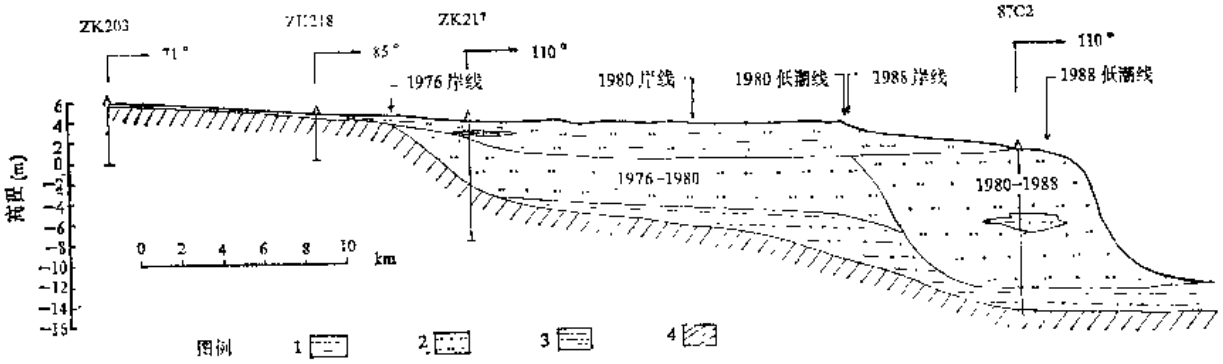


图 5—2　黄河三角洲生长叶瓣（清水沟叶瓣）纵剖面图

图例：1—三角洲河流粉砂夹粘土质粉砂沉积；2—河口沙席（1976—1979）及河口沙坝—远端沙坝（1979—1988）粉砂沉积；3—前三角洲粘土质粉砂沉积；4—浅海粘土质粉砂沉积

二、清水沟叶瓣的垂向序列

三角洲的垂向序列比较复杂，对于河道频繁变迁、堆积速率高的黄河三角洲尤其如此。其复杂之处在于在任何一个剖面中所观察到的垂向层序，并不能代表三角洲横向上发育的所有的相。这是因为三角洲在平面上相邻的亚环境，由于堆积速率高，可各自被充填成陆。因而三角洲虽然在进积，但相邻两环境在垂向上不一定叠置。因此黄河三角洲的垂向序列可有不同类型。

根据清水沟叶瓣内沉积物的垂向特征，可分出两种类型的垂向序列：一类是河口沙席型垂向序列，砂层厚度2—6m，其下为褐红色粘土质粉砂；另一类是河口沙坝型垂向序列，砂层厚度达10m以上，其下有薄层褐红色粘土质粉砂。这是清水沟叶瓣比较普遍的垂向序列。

（一）河口沙席型垂向序列

可以86C14孔为代表。该孔位于清水沟叶瓣东部，处于河口沙席区中心。岩性自上而下分5层（图5—3）：

1．0—1.00m　黄色粗粉砂，夹有薄层（5mm）的褐红色粘土质粉砂。有脉状层理。

2．1.00—3.20m　黄色粗粉砂，偶见薄层有机质呈纹层状夹于粉砂层中。

3．3.20—6.00m　黄色粗粉砂，夹有极细砂，块状构造。

4．6.00—6.40m　褐红色粘土质粉砂，顶部有一层有机质层，厚1cm。

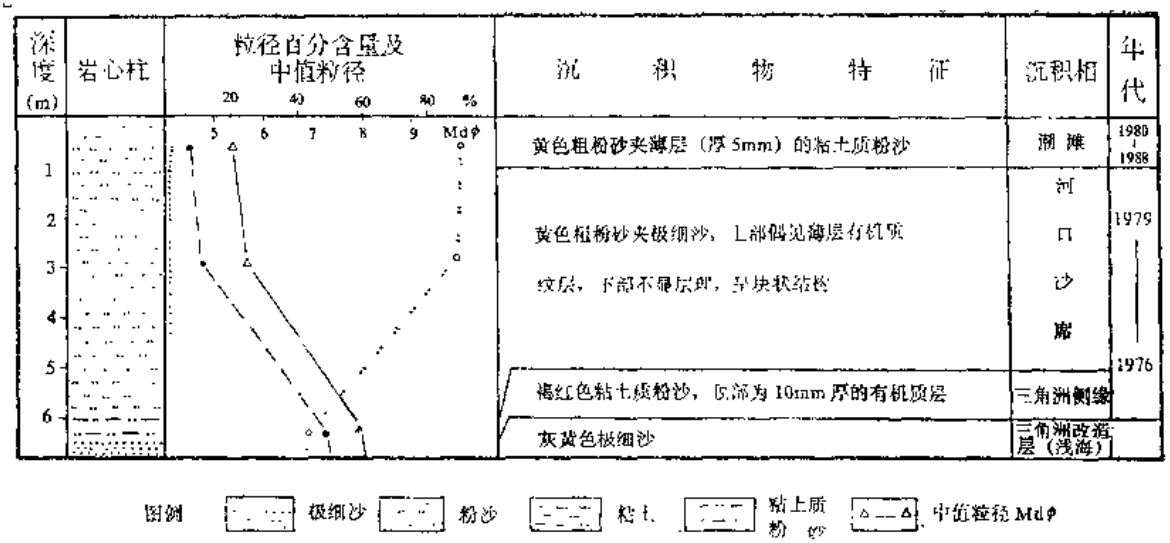


图 5—3 黄河三角洲河口沙席型沉积综合柱状图

（据86C—14孔，孔位见图5—8）（图中"沙"即"砂"，下同）

5．6.40—6.80m 灰黄色极细砂。

其中0—6.40m为河口沙席，6.40—6.80m为浅海沉积。

在0—6.40m的沉积物中，第一层是受潮滩影响的河口沙席沉积。第二层及第三层是河口沙席。它可能是一次洪水过程形成，沉积物粒度自下而上变细，表示水动力能量逐渐减弱；它也可能是两次洪水过程形成：第一次水动力能量较强，沉积物较粗，且快速堆积呈块状构造；第二次水动力能量较弱，夹有较多的粘土。第四层是沙席前面的粘土质粉砂，类似于前三角洲，被进积的沙席沙体叠覆。

（二）河口沙坝型垂向序列

河口沙坝型垂向序列由河口沙坝及其下的远端沙坝组成，一般厚12—15m，可以87C2孔为代表。该孔位于黄河口低潮线附近，正处于生长叶瓣（清水沟叶瓣）的河口沙坝位置上。该孔岩性，自上而下可分为七层（图5—4）：

第一层0—6.9m 黄色粉砂，质纯，顶部含大量云母，偶见活体蓝蛤和植物碎片。沉积物中粉砂占70—90%，粘土约5—10%，极细砂为5—10%。

第二层6.90—7.80m 黄色粘土质粉砂，中夹10cm厚的一层粉砂，顶底界面清晰。沉积物中粉砂占70%，粘土25%，极细砂占5%。

第三层7.80—11.10m 黄色粉砂夹粗粉砂纹层，上部纹层发育，1.5m厚的粉砂内夹20层粗粉沙纹层，每纹层厚仅几毫米。沉积物的粒度组分与第一层类似。

第四层11.10—12.00m 黄色粉砂夹粘土质粉砂，向上变粗，卷曲层理发育。

第五层12.00—12.80m 黄色粉砂夹粗粉砂纹层。

上述五层中，大部分样品中缺失生物，仅个别样品中见零星毕克卷转虫（*Ammonia beccarii* var.），缝裂希望虫（*Elphidium magellanicum*），未见介形虫。

第六层12.80—15.50m 棕褐色粘土质粉砂与粉砂质粘土互层，夹很多粗粉砂纹层。并含厚几毫米的黑色有机质层。下部岩性颜色渐深，呈灰褐色，含大量海相生物化石。每个样品中见有孔虫数十至数百枚，主要属种为阿卡尼圆形短五块虫（*Quinqueloculina*

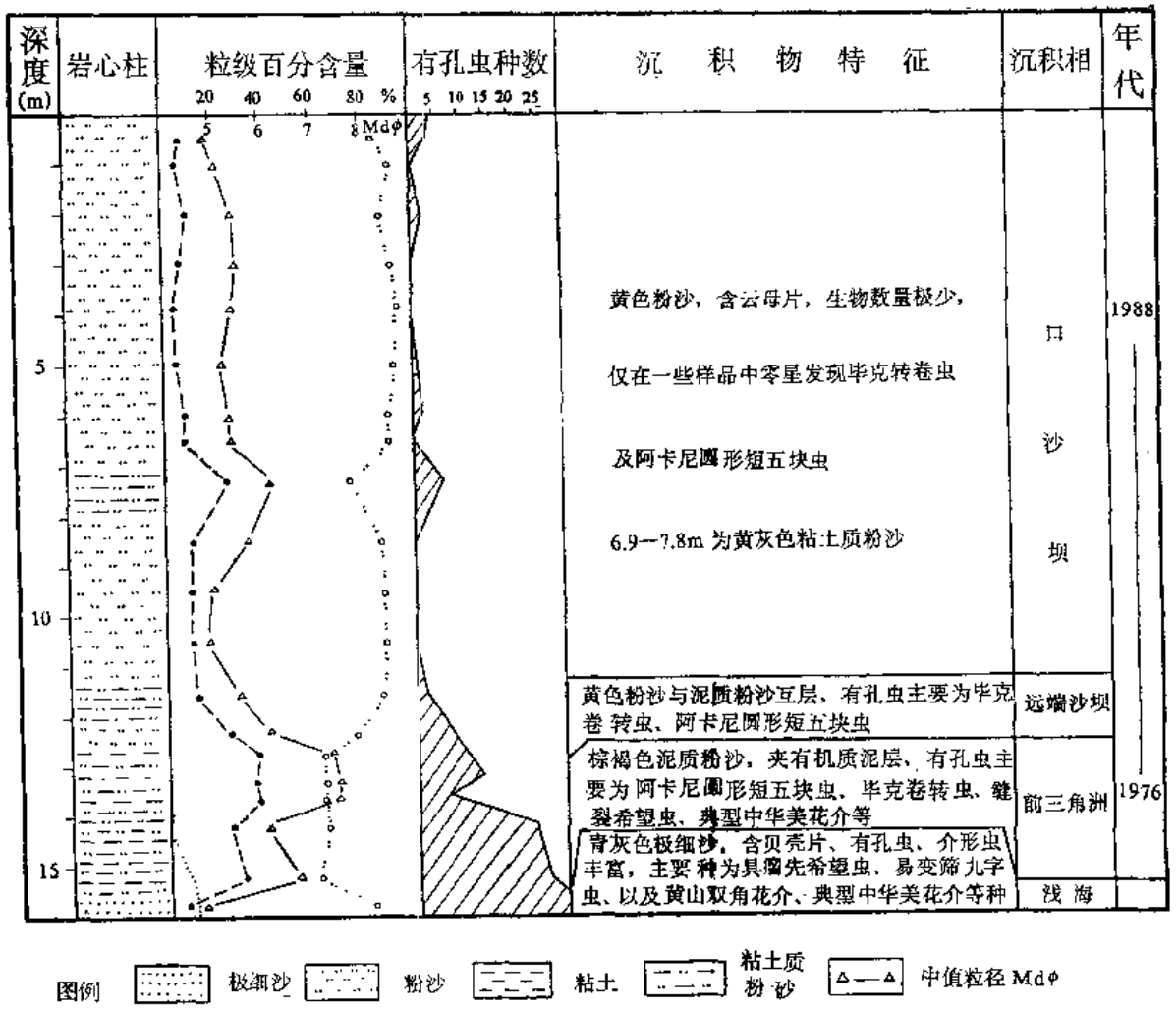


图 5—4 黄河三角洲河口沙坝型沉积综合柱状图

（据87C—2孔，孔位见图5—8）

akneriana rotunda），毕克卷转虫（*Ammonia beccarii* var.），缝裂希望虫（*Elphidium magellanicum*）等广盐种，并夹有具瘤先希望虫（*Protelphidium tuberculatum*）等浅海种。介形虫以典型中华美花介（*Sinocytheridea impressa*）、陈氏新单角介（*Neomonoceratina chenae*）等广盐浅水种为主，亦含有美山双角花介（*Bicornucythere bisanensis*）等浅海种。沉积物粒度组分中粉砂占45—65%，粘土占25—50%，极细砂<2%。

第七层15.50m以下，灰色粗粉砂-极细砂层，含贝壳碎片。钻孔未穿透该层。本层中见有大量有孔虫、介形虫，50g样品中有孔虫共29种2578枚，介形虫16属，577瓣。有孔虫组合为具瘤先希望虫（*Protelphidium tuberculatum*）组合。以正常浅海相的（*Protelphidium tuberculatum*）大量出现为特征，优势度高达31.5%，其他主要属种为异地希望虫（*Elphidium advenum*），易变筛九字虫（*Cribrononion incertum*），阿卡尼圆形短五块虫（*Quinqueloculina akneriana rotunda*），缝裂希望虫（*Elphidium magellanicum*），冷水面颊虫（*Buccella frigida*），毕克卷转虫（*Ammonia beccarii* var.）等广盐种。介形虫由美山双角花介（*Bicornucythere bisanensis*），陈氏新单角介（*Neomonoceratina chenae*），滨海湾贝介（*Loxoconcha ocellata*）等浅水属种构成。沉积物组分中粉

砂占65%，粘土占5%，极细砂占30%。

根据以上特征，第一层到第三层（0—11.10m）为河口沙坝，第四、五层为远端沙坝（11.10—12.80m），第六层为前三角洲沉积（12.80—15.50m），第七层为渤海浅海沉积（15.50m以下）。

河口沙坝层中夹有一层粘土质粉砂（第二层），厚90cm，反映清水沟河道曾小规模的横向迁移。

清水沟叶瓣是正在生长的叶瓣，河口沙席及河口沙坝尚未被河流沉积物覆盖，因此这两个垂向序列尚缺乏顶部的河道—泛滥平原沉积相。

清水沟叶瓣的水下侧缘（烂泥湾）沉积，分布在河口沙坝南北两侧，因此上述两类垂向序列也不包括同期侧缘沉积相。

三、清水沟叶瓣的泥沙分配

按上述沉积单元，我们分别计算了河道、河口沙席、沙坝（包括远端沙坝）以及外侧的沉积量。河道沉积包括原始河道和进积延伸河道的沉积。河口外侧沉积指前三角洲、三角洲侧缘及扩散到三角洲以外的沉积。沉积物比重按2t/m³计算。

叶瓣发展第一阶段(1976—1979年)，即沙席发展阶段，黄河总输沙量为36亿t，其中河道沉积7.2亿t，占20%，河口沙席中的粉砂体15.7亿t，占43%，河口沙席中的粉砂质粘土占9亿t，占25%。外侧沉积4.1亿t，占11%。河道、河口(即河口沙席)、外侧沉积量之比约为2:7:1。以造陆为主（表5—1）。

表 5—1 清水沟叶瓣发育第一阶段（1976—1979）黄河泥沙分配

（总输沙量36亿t）

沉积区 / 沉积量 / 单位	河道	河口		河口外侧（包括远海）
		沙席的粉砂层	沙席的粘土粉砂层	
长(km)	36	18	18	
宽(km)	10	12.5	12.5	
平均厚(m)	1	3.5	2	
沉积总量($\times 10^8$t)	7.2	15.7	9.0	4.1
分配比%	20	43	25	11.9

表 5—2 清水沟叶瓣发育第二阶段（1980—1988）黄河泥沙分配

（总输沙量55.7亿t）

沉积区 / 沉积量 / 单位	河道	河口		河口外侧（前三角洲、侧三角洲和远海）
		粉砂层	粘土质粉砂层	
长(km)	50	14	14	
宽(km)	5	16	18	
厚(m)	0.5	8	1	
沉积总量($\times 10^8$t)	2.5	36	5	12
分配比%	4	64	9	21

清水沟叶瓣发展的第二阶段（按1980—1988年计），河口移到水深较大的海域，形成河口沙坝和远端沙坝。在这阶段内黄河总输沙量为55.7亿t，其中河道沉积约2.5亿t，占4%，河口沙坝及远端沙坝中粉砂体36亿t，占64%，粘土质粉砂体占5亿t，占9%，前三角洲、三角洲侧缘以及扩散到外海的共12亿t，占21%。河道、河口、外侧之比为0.5:7.5:2（表5—2）。

由此可见，黄河泥沙主要堆积在河口，集中于河口沙坝，因此黄河三角洲的治理，主要是对河口沙坝的治理。

第二节　黄河三角洲的三维格架

黄河三角洲以宁海为顶点，南起支脉沟，北抵徒骇河，向东伸展到水下18m等深线附近。三角洲陆上面积约5212km²，其中2530km²是1855年以来增生的陆地；水下面积约1500km²。

黄河三角洲由两个亚三角洲组成，即以宁海为顶点的早期亚三角洲（1855—1934年）和以渔洼为顶点的晚期亚三角洲（1934—现在）。前者由6个叶瓣复合而成，后者由4个叶瓣复合而成。调查区范围内主要是晚期亚三角洲。

在三角洲平原上，10条河道体系分别以宁海和渔洼为基点呈束状向外幅射。古河道一般长50km左右，宽300—800m，河道高于两侧低地3m左右。整个三角洲平原西南高、东北低，缓缓向海倾斜，平均坡度为0.1—0.15‰。宁海处的地表高程为7m左右。

水下三角洲除现代正在生长的叶瓣外，其余的大都被改造。生长叶瓣的水下三角洲的地形特征是，有一个较陡的三角洲前缘斜坡，坡度0.2°—0.3°。早期的古水下三角洲，由于经受了海洋动力改造，前缘斜坡的坡度减小，向平滑缓坡方向演化，失去了三角洲原有的形态特征。

一、黄河三角洲的基底

黄河三角洲是一个非常年轻的三角洲，迄今仅有134年的历史。它的基底是现代沉积层：大致以1855年古海岸线为界，北部为渤海浅海沉积层，南部为大清河等短源河流沉积层。黄河三角洲就叠覆在这两个基底层之上。

（一）基底层性质

1．渤海浅海沉积层　这是一层分布广泛而又稳定的浅海沉积层，层厚4—8m，由灰黑色粘土质粉砂组成，平均粒径为7φ左右，含有大量浅海有孔虫及介形虫。有些地方，在该层的顶部可见一层厚10—20cm的粗粉砂—极细砂层，含有大量贝壳碎片，是浅海沉积物经多次风暴潮改造形成的滞留沉积。它是三角洲底界的一个很好标志。

2．短源河流沉积层　这是一套比较复杂的沉积层。在1128—1855年期间，黄河经苏北入黄海。在渤海南岸没有大河，只有一些短源河流流入渤海，其中以发源于鲁西南山地、流经丘陵、平原入渤海的大清河为代表。这些短源河流在渤海西岸堆积起复杂的河道沉积、河口沉积，三角洲沉积和滨海沉积。沉积层厚4—8m。短源河流沉积物与黄河三角洲沉积物有明显区别，前者大都为灰黄色极细砂，后者为黄色粉砂。在大部分地区两者的界面根据肉眼观察即可确定。两者的重矿物种类和含量也不同：短源河流沉积物中重矿物的含量高、种类多，晶形保存良好，其中石榴子石、绿帘石、榍石含量显著较黄河沉积物

为高；而黄河三角洲沉积物中的碳酸盐矿物数量较多。两类沉积物中的矿物特征，反映它们的来源不同：黄河三角洲沉积物来自黄土高原；短源河流沉积物来自附近山区，搬运距离较短，故矿物晶体保存良好，矿物种类多，含量高。

（二）基底形态

黄河三角洲基底总的形态呈北西走向，向海方向倾斜，与现代三角洲顶面形态类似(图5—5)。

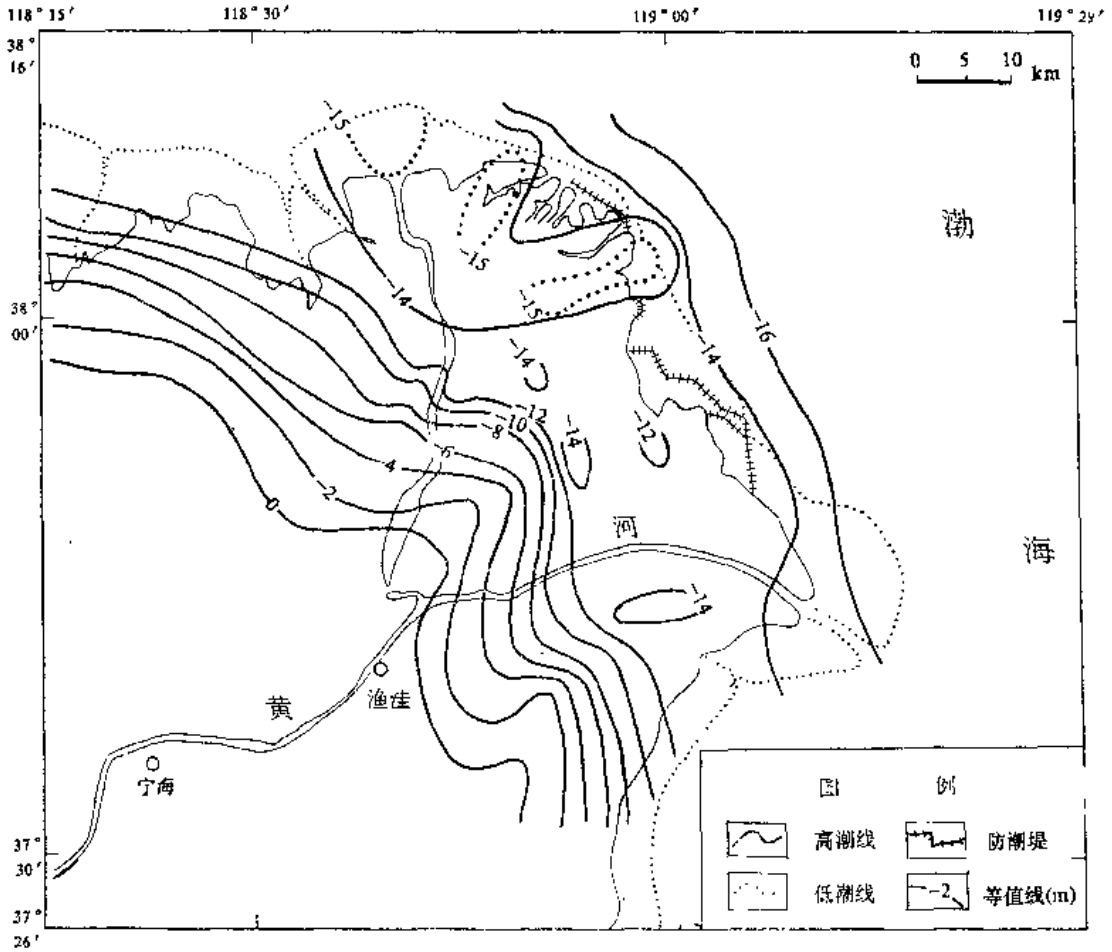


图 5—5 黄河三角洲基底埋深等值图

基底的0m高程线（即平均海平面），基本上与1855年古海岸线吻合。向陆一侧基底面逐渐升高，到宁海处为+3m；向海一侧基底面逐渐降低，至距古海岸25km处，降低到最大深度，达−15m。然后抬升1m左右，再度以极缓的坡度逐渐过渡到浅海底。从古海岸到−12m处的基底坡度为万分之六。−12m到−14m之间为基底起伏多变的地带，其中有局部小凸起和小洼地，相对高差为1—2m。该带宽度达20km。−14m以下，坡度为万分之一，是当时的浅海底。

黄河三角洲基底上有两个向海凸出的堆积体，一个在中部（ZK228到87C8），另一个在东南部(87C1)。对照1855年的地形图，可见在该两处附近有两个河流入海口。沉积物的特征反映出该两堆积体为古短源河流形成的水下三角洲沉积体。在三角洲基底−12m到−14m处特别宽阔且不平整。这一地段与各期叶瓣的河口沙坝位置基本一致。造成这类地

形的原因是：河口沙坝部位高密度流产生的机遇多，高密度流对海底有较强的冲蚀力，形成冲蚀洼地；另一原因是黄河三角洲进积时，相邻的浅海区也因物源丰富而加速淤积，使海底淤高。内冲外淤的结果使原来微倾斜的底面变得平齐，使－12m到－14m的区域面积扩大。因此，根据钻孔绘制的三角洲基底高程图，是经过黄河三角洲沉积作用改造后的地形，与当时的原始地形略有出入。原始的基底应该更平整，坡度更均一。

二、黄河三角洲复合体

黄河三角洲是由依次生长的叶瓣交错叠置组合而成。每个叶瓣有六个沉积类型，它们以不同方式彼此叠覆，形成一个复杂、但有规律的复合体。它有以下特点：

1．各叶瓣的河口沙坝沉积独自展布，主体不相重叠，仅端部稍有重叠。黄河输沙量大，河口附近水浅，堆积速率高，沙坝迅速淤高成陆。因此黄河三角洲各叶瓣的河口沙坝沉积不相重叠。

2．三角洲侧缘（烂泥湾）沉积和前三角洲沉积往往有二三个叶瓣彼此重叠。三角洲侧缘分布在0—10m水深范围内；前三角洲在12—18m水深范围内。两者的堆积量比河口沙坝小得多，因此不能在一个叶瓣生长期内堆积成陆。它常被后期叶瓣的三角洲侧缘沉积或河口沙席沉积覆盖。

3．河口沙席沉积常常叠置在早期叶瓣的沉积物上，原因是河口沙席是在极浅水域内堆积形成，这种环境往往是早期叶瓣的三角洲侧缘环境。

4．陆上河道、天然堤、决口扇、泛滥平原沉积彼此重叠，尤其在三角洲顶点附近，各期叶瓣的河道相互交错，各沉积叠置重复，变化很大。

黄河三角洲各叶瓣的展布次序没有明显的规律性。新叶瓣以地势低洼，坡度较大的地区作为生长之地。因此，时间上相邻的叶瓣，在空间不一定紧邻，也没有固定格式。当三角洲淤高后，三角洲顶点就要移动。黄河三角洲自1855—1934年经过六个叶瓣堆积，洲面普遍淤高后，顶点下移到渔洼。从1934—1988年已堆积了四个叶瓣。顶点愈往下移，河流长度愈大，三角洲河道行水周期也将愈短。

黄河三角洲叶瓣的建设期平均为13a，然后转入侵蚀期，侵蚀期一直到该叶瓣被后期纵向进积的叶瓣覆盖才停止，其间历时约80a。因此，叶瓣和叶瓣之间常夹有改造沉积。改造沉积主要表现为原来的三角洲沉积相转变为滨海沉积相，但沉积物源仍是原三角洲沉积物。

黄河三角洲叶瓣的这种组合关系，使黄河三角洲垂向序列多样化。

三、黄河三角洲的垂向序列及模式

黄河三角洲10个叶瓣的主体，各自坐落在基底之上，因此，黄河三角洲的垂向序列，基本上就是单个叶瓣的垂向序列。不同之处是在三角洲内，各叶瓣的边缘部分叠覆，形成复合序列。黄河三角洲的垂向序列可归纳为两大类四亚类：

1．河口沙坝型垂向序列　各期叶瓣的河口沙坝中心，是河口沙坝厚度最大的部位，具有相同的垂向序列。基底为浅海沉积；其上为1—3m的前三角洲的红褐色粘土质粉砂沉积；然后是2—3m的远端沙坝的红褐色粘土质粉砂与黄色粉砂互层沉积；接着是河口沙坝主体，厚12—15m的黄色粉砂—极细砂；顶部是0—5m各期叶瓣的河道沉积，由黄色粉砂夹褐红色粘土质粉砂组成。它的模式可以前述的87C2孔为代表(图5—4,5—7,A)。

2．河口沙席-三角洲侧缘型垂向序列　早期叶瓣的三角洲侧缘沉积往往与后期叶瓣的

河口沙席沉积组成一个复合序列。其原因前文已有说明。

河口沙席-三角洲侧缘型垂向序列的基底大都是浅海沉积部分为早期短源河流沉积；其上为早期三角洲侧缘和前三角洲的红褐色粘土质粉砂，厚度5—10m不等；随后是沉积间断面；沉积间断面上，常有一层几十厘米（很少超过1m）的灰色浅海粘土质粉砂沉积，富含海相微体生物壳的，有时为一薄层极细砂—粗粉砂，相当于改造沉积；在这层之上，是新叶瓣的前三角洲沉积，粘土质粉砂，厚度1—2m；其上是河口沙席，以粗粉为主，厚4—6m；顶部为河道沉积。

这种类型的垂向序列模式可以黄河三角洲北部的86C5孔为代表。该孔下部是第5叶瓣（1926—1929年）和第8叶瓣（1953—1960年）的三角洲侧缘沉积；上部是第9叶瓣（1964—1971年）的河口沙席沉积（图5—6，5—7B）。

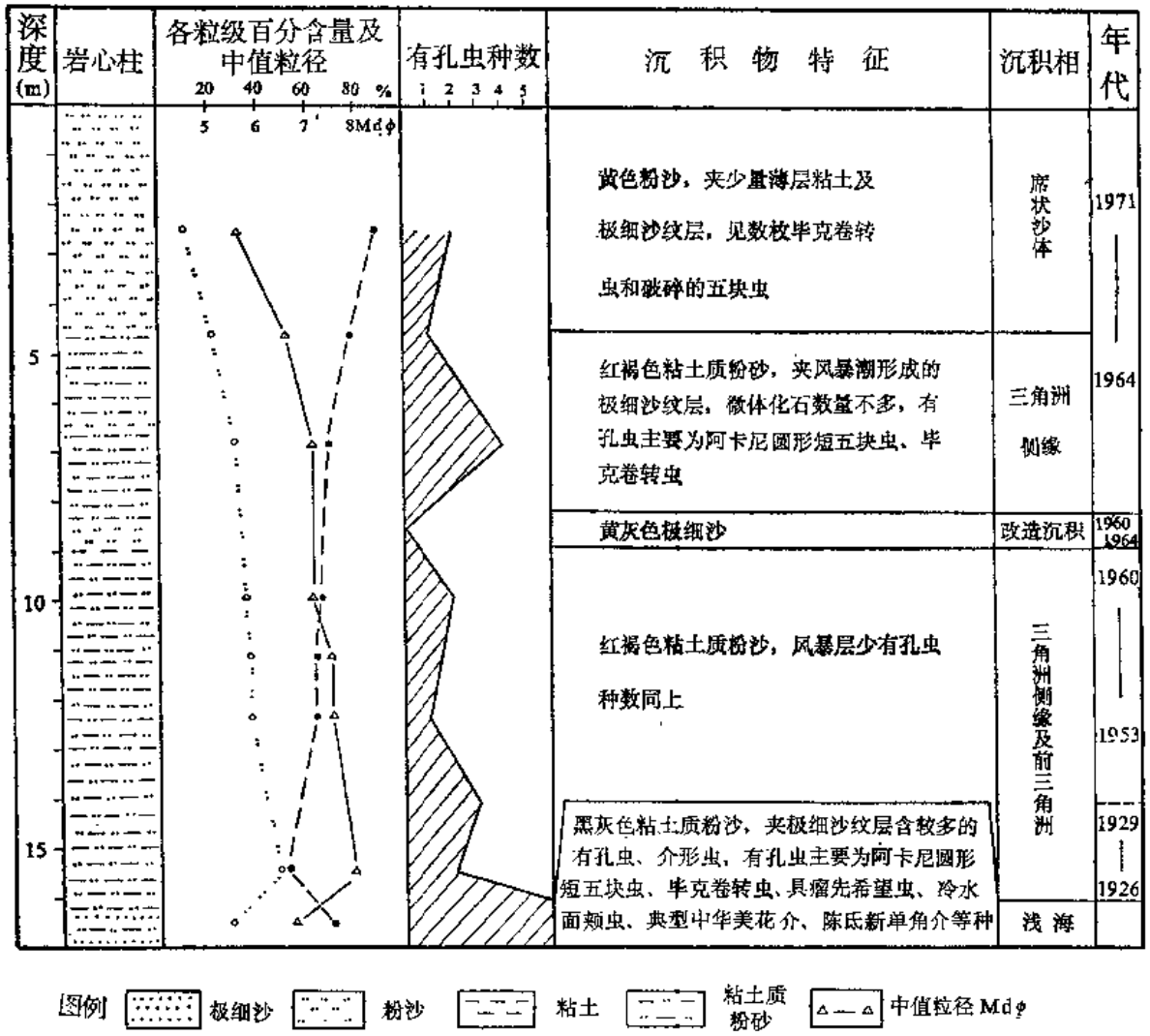


图 5—6 黄河三角洲河口沙席-三角洲侧缘型垂向序列

（据86C5孔，孔位见图5—8）

在这两类基本模式基础上，在叶瓣边缘部位，还有四类稍有变化的垂向序列，它是由上述两类模式的不同叠置组合而成。

1．河口沙坝型垂向序列之下，有早期叶瓣的远端沙坝和前三角洲沉积。早期远端沙坝沉积厚度不一，有时缺失。早期叶瓣的沉积物一般埋深在－10m以下。这种叠置出现在早期叶瓣的末端，因而常常是两个亚三角洲的叶瓣的相互叠加，其代表模式为ZK227孔（图5—7A_1）。

2．河口沙坝型垂向序列的上部有改造沉积。改造沉积常常表现为韵律层发育的滨海相沉积，一般在0到－4 m标高之间。它是受蚀退作用改造的河口沙坝型序列，其代表模式为ZK211孔（图5—7A_2）。

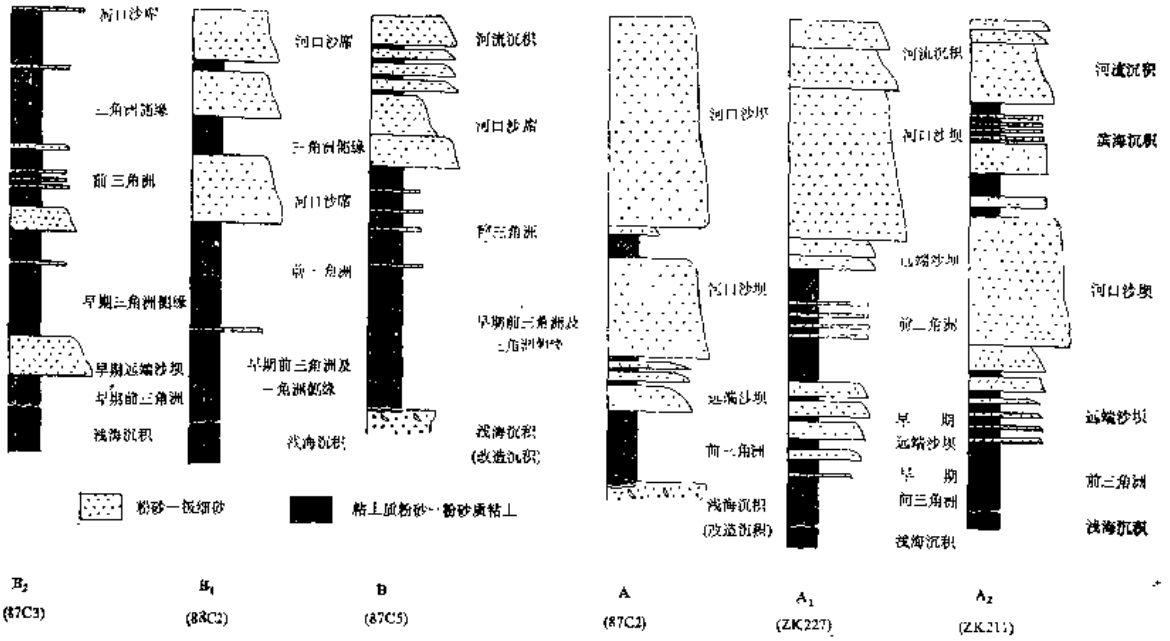


图 5—7　黄河三角洲垂向序列模式

A—河口沙坝型；A_1—河口沙坝-早期远端沙坝型；A_2—受改造的河口沙坝型；B—河口沙席-三角洲侧缘型；B_1—河口沙席-三角洲侧缘-沙席型；B_2—三角洲侧缘-前缘型

3．河口沙席-三角洲侧缘垂向序列中的沙席，夹有厚度超过0.5m的粘土质粉砂层，反映了河口的侧向迁移。其代表模式为88C2孔（图5—7B_1）。

4．三角洲侧缘-前缘垂向序列中沙席极不发育，因而自基底到地表整个岩芯柱基本上都为粘土质粉砂，中间夹极薄层粉砂层。这种垂向序列出现在两个相邻叶瓣之间，动力环境非常弱的条件下。其代表模式为87C3孔（图5—7B_2）。

上述各种序列表明，在基本模式基础上，在三角洲的不同部位可衍生出多种模式。这在识别古相三角洲序列时可资借鉴。

三角洲垂向序列的空间变化，在纵、横剖面上可明显看到（图5—8，5—9，5—10）。

Ⅰ—Ⅰ′剖面为东西向、自三角洲顶点附近直达岸边潮滩的剖面。该剖面切过第2叶瓣（1889—1897年）、第7叶瓣（1934—1953年）和第10叶瓣（1980—1988年）。剖面西端的基底为大清河等短源河流沉积，其余都为渤海浅海沉积。基底之上为该三叶瓣的前三角洲和三角洲侧缘沉积，其中夹有远端沙坝和改造沉积沙层。前三角洲之上为第2、7、10叶瓣的河口沙席沉积，东部为第10叶瓣的河口沙坝沉积。反映三角洲进积过程中叶瓣的退覆序列。

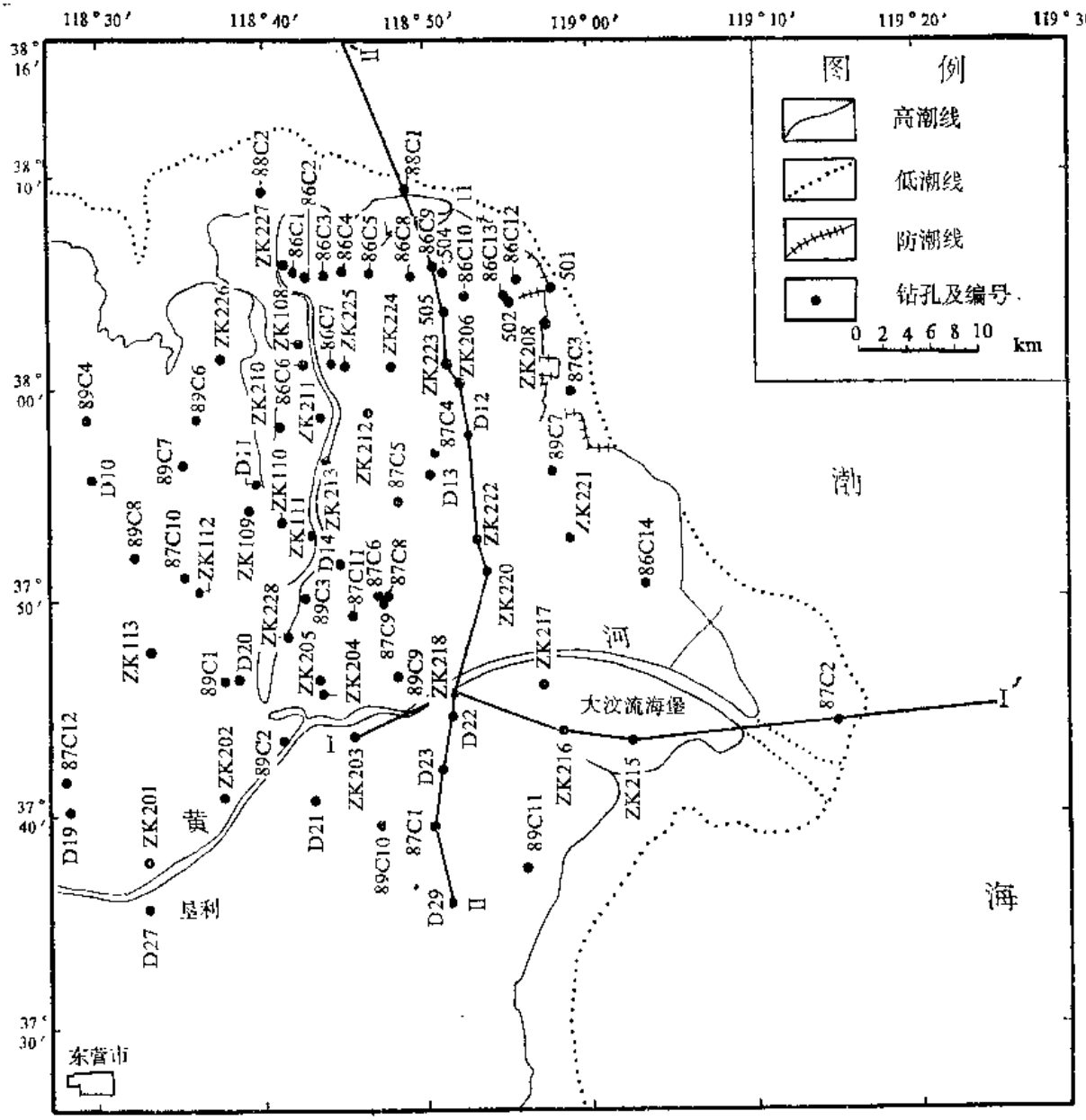


图 5—8 黄河三角洲调查钻孔位置及剖面位置图

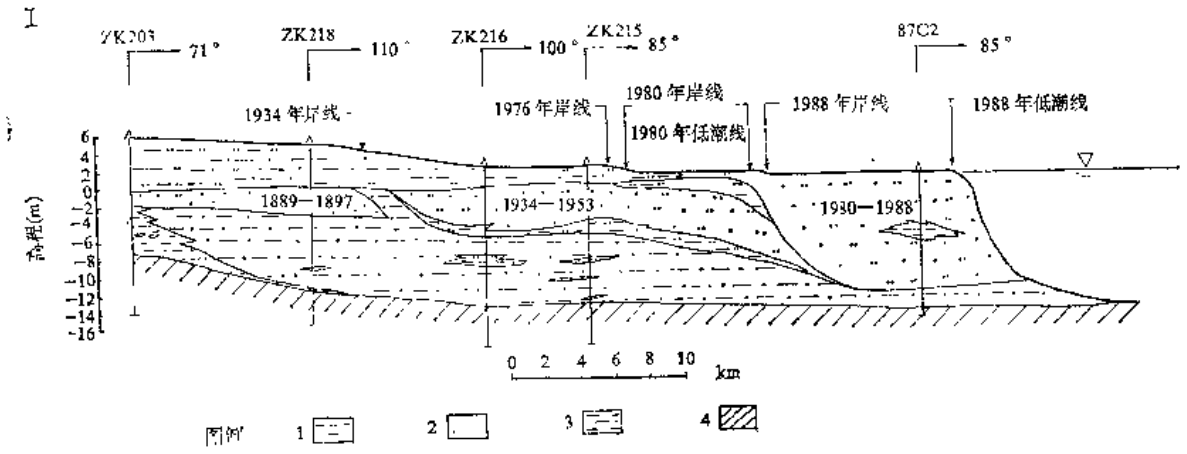


图 5—9 黄河三角洲纵剖面图

1—河流沉积(粘土质粉砂)；2—河口沙体（包括沙席、沙坝和远端沙坝）沉积(粉砂)；3—三角洲侧缘-前三角洲沉积(粉砂质粘土及粘土质粉砂)；4—浅海沉积（粉砂质粘土）

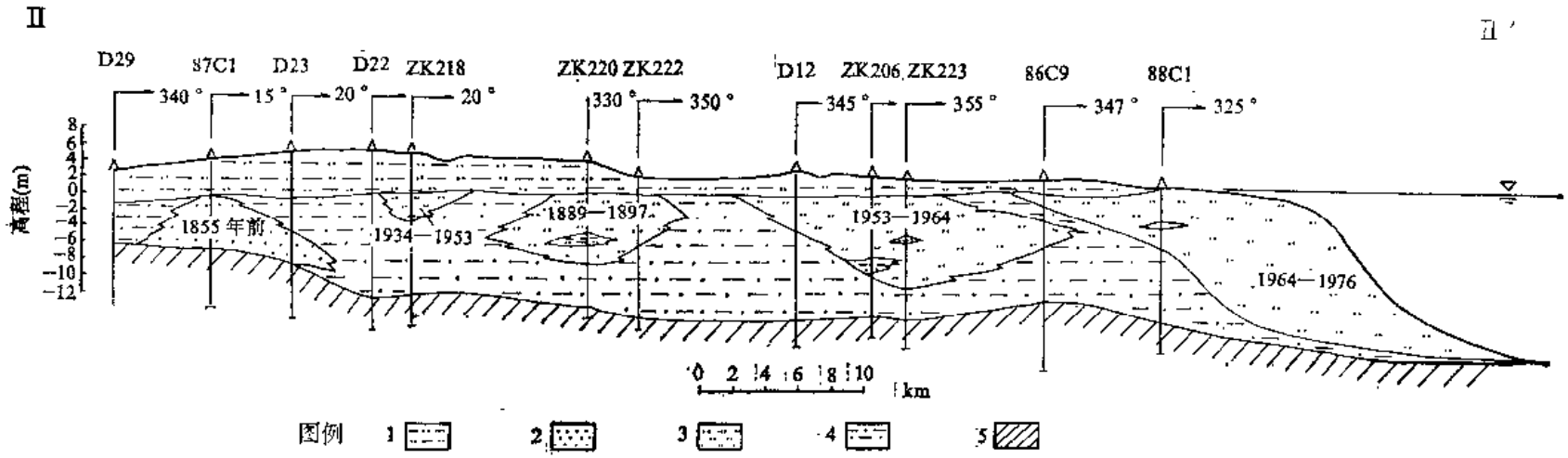


图 5—10　黄河三角洲横剖面图

1—河流沉积(粘土质粉砂)；2—短源河流沉积(粗粉砂-极细砂)；3—河口沙体(沙席、沙坝、远端沙坝)；沉积(粉砂)；4—三角洲侧缘-前三角洲沉积(粉砂质粘土及粘土质粉砂)；5—浅海沉积（粉砂质粘土）

Ⅱ—Ⅱ′剖面为南北向剖面，它横穿第7叶瓣(1934—1953年)、第2叶瓣(1889—1897年)、第8叶瓣(1953—1964年)、并纵向切过第9叶瓣(1964—1976年)。该剖面清楚地反映了各期叶瓣的河口沙坝主体均独立存在，仅边部稍有叠置的特征。而三角洲侧缘沉积则相互重叠。各叶瓣的沉积厚度基本一致。

四、黄河三角洲的厚度

黄河三角洲的厚度主要受基底起伏控制，因此，其等厚图与基底等深图基本一致。6m等深线大致与1855年古海岸线平行，其向陆一侧厚3—5m，向海厚7—16m，顶点处厚度为0 m，在海域水深16m处厚度也接近0 m，中部厚达16m左右（图5—11）。

等值线的疏密反映了古地形的陡缓。0—6m等厚线所圈出的范围是原陆地范围，只有薄层河道沉积。6—14m等厚线分布范围，是古滨海区，基本呈一斜坡。其中东南部有两个

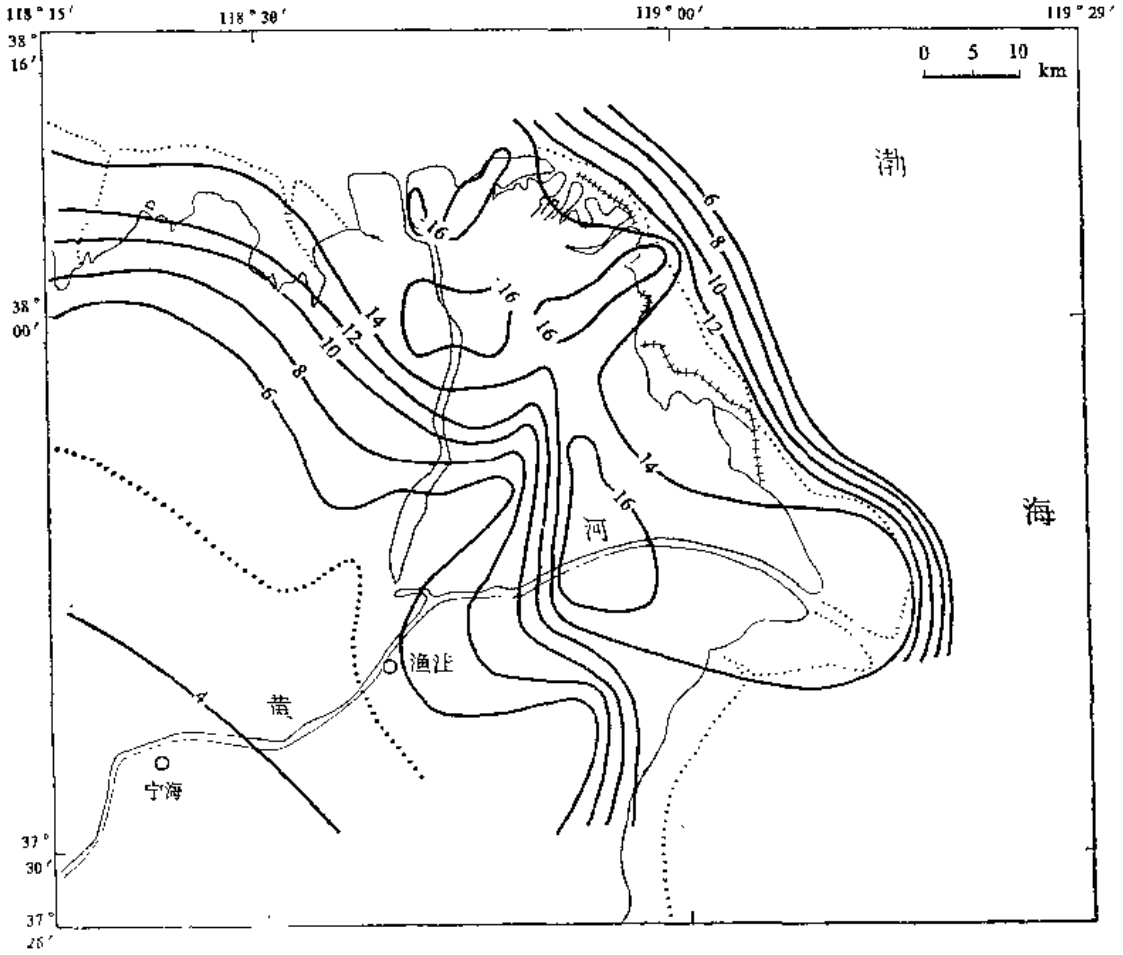


图 5—11 黄河三角洲等厚图

图例见图5—12

向海突出区，是大清河等古河口堆积区，因而该两处黄河三角洲厚度较薄。14m等厚线圈出的区域，是因高密度流对基底冲刷以及浅海沉积使外侧淤高，从而使其区域拓宽，地形起伏多变，因而三角洲厚度变化也大。14m等厚线外侧是黄河三角洲的河口沙坝前缘斜坡地带，以较陡的坡度尖灭。

黄河三角洲沉积按其沉积物类型可分为两大层：下部的粘土质粉砂层和上部的粉砂-

极细砂层。它们的厚度变化各有特点。

下部粘土质粉砂层是由各叶瓣的前三角洲和三角洲侧缘沉积物组成，厚薄不一。厚度在7m以上的有三个区，一是以86C4—ZK225孔为中心的北区，最大厚度达10m；二是以87C3—ZK221孔为中心的东区，最大厚度7m；三是以ZK217—ZK218孔为中心的南区，最大厚度达8m。其他地方，厚度在0—5m之间(图5—12)。

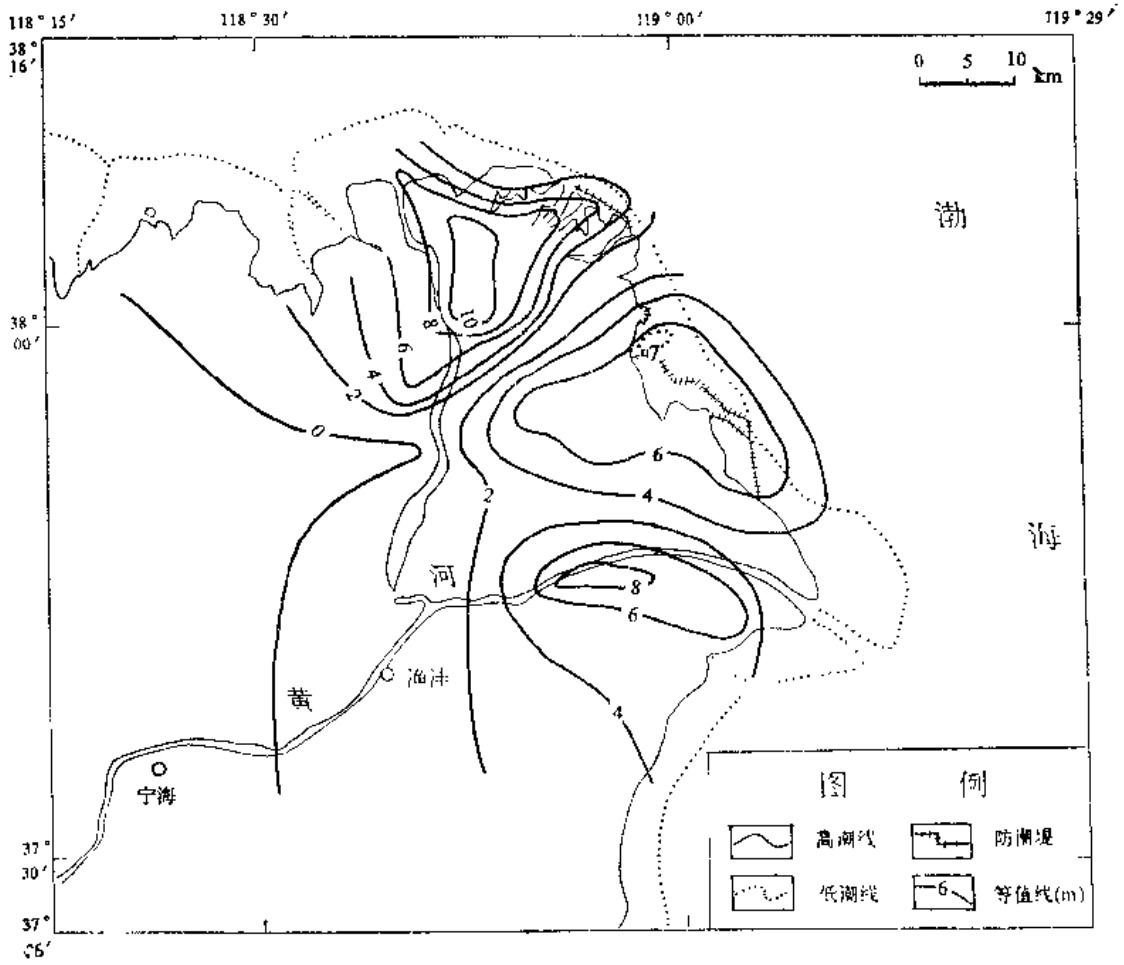


图 5—12 黄河三角洲粘土质粉砂层的等厚图

这三个区大部分坐落在第二亚三角洲内。北区位于第8古河道和第5古河道之间；东区位于第8古河道和第10古河道之间；南区位于第10古河道与第7古河道之间，均为有关叶瓣的三角洲侧缘堆积区。

垂向序列研究表明，不同期叶瓣的三角洲侧缘沉积常相互叠置，使该地的粘土质粉砂层增厚。

上部粉砂层，覆盖在下部粘土质粉砂层之上，两者界面清楚。它可分为两个亚层：平均海平面以下是由沙席及河口沙坝沉积组成；平均海平面以上是由河道沉积组成。前者基本上全是粉砂，夹少量极细砂，厚度变化大。沙席沉积一般厚4—6m，河口沙坝沉积厚6—12m，后者由海向陆，厚度自0m增至5m，由粉砂与粘土质粉砂互层组成。

在1855年古海岸线向陆的一侧，只有河道沉积亚层。

图5—13是现代黄河三角洲砂体厚度图。该图是把钻孔内的粉砂层加在一起，作为该

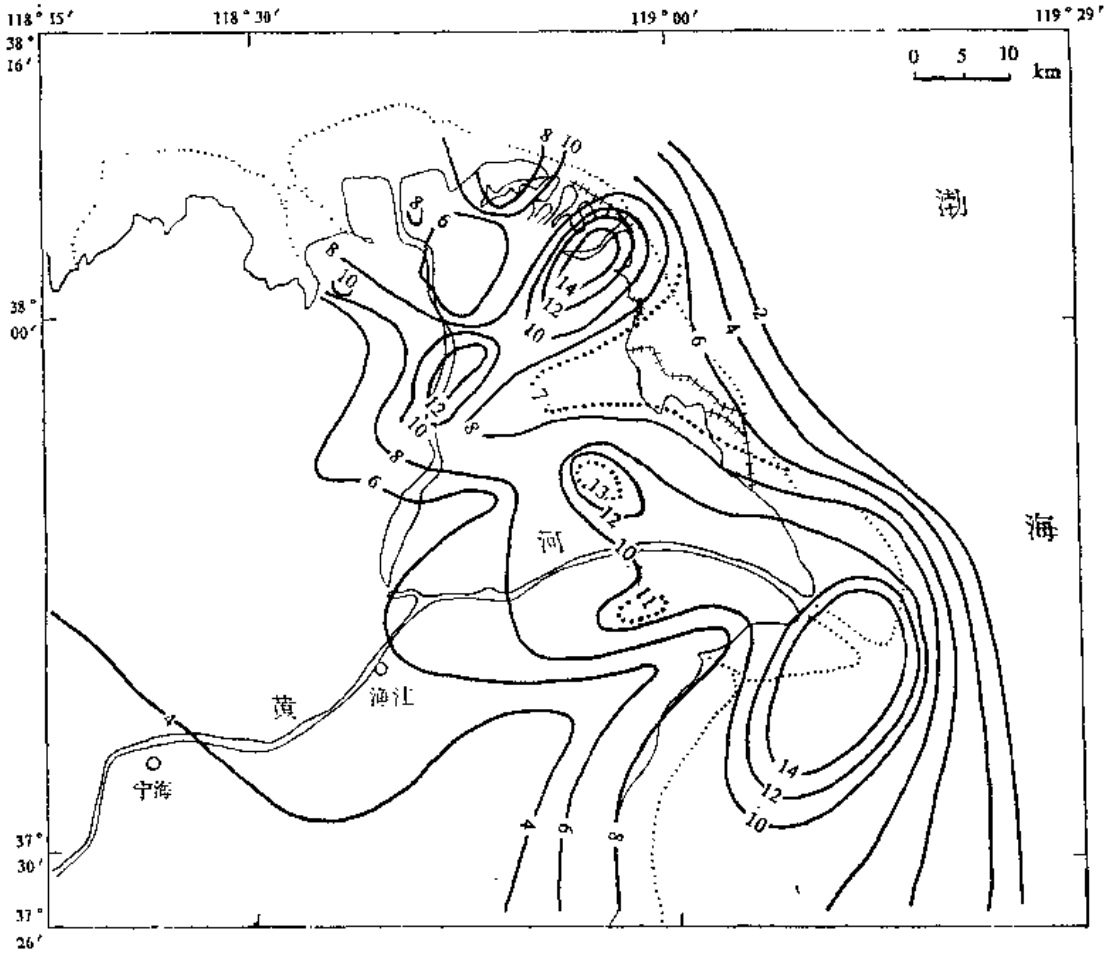


图 5—13 黄河三角洲粉砂层的等厚图

(图例同图5—12)

点的沙体厚度。沙体厚度的变化与三角洲叶瓣的分布密切相关。从图上可以看到，4—8m厚的等值线构成了该图的背景值，在其上有五处由10m等值线圈定的大厚度区，其厚度一般在10—14m之间，最大揭露厚度达14.9m。其中三处在现代海岸处，二处在内侧。这五处分别相当第1、2、8、9、10叶瓣的河口沙坝位置。沙体顶板较平坦，呈一斜坡倾向海洋，相邻间高差2—3m。沙体底板起伏不平，高差达5m以上。

利用现代黄河三角洲等厚图，可以估算泥沙在三角洲各部位的分配量。计算面积按整个黄河三角洲计算，因此它的范围超出调查区。其中1855年前陆上面积为2682km²；1855年到1988年间的造陆面积为2530km²。水下三角洲面积估算约1500km²。各部分厚度取其平均数，即原陆上平原的河道沉积厚度以3m计，造陆厚度以14m计，水下三角洲厚度以7m计，黄河泥沙块体密度以2.0t/m³计。黄河自1855年到1988年间实际行水共124a。多年来平均黄河年输沙量为10亿t，总输沙量为1240亿t。由此求出黄河三角洲各部位泥沙分配为1855年前陆上河道堆积量占总输沙量的13%，1855年后造陆区（即1855年古海岸线以北的陆上三角洲部分）堆积量占57%，水下三角洲堆积量占17%，剩下的13%为搬运出三角洲进入远海的泥沙量(表5—3)。

另外，按1855年后黄河三角洲沉积作用分类计算其河流堆积量、河口堆积量和输入远海泥沙量的分配比例，其中河流堆积量包括沉积在1855年前陆上部分和三角洲进积成陆后

表 5—3 黄河三角洲各部位泥沙分配比

单元	1855年陆地区的沉积量	1855年后造陆区沉积量	水下三角洲沉积量	输出三角洲的泥沙量
面积(km^2)	2682	2530	1500	
厚度(m)	3	14	7	
体积($\times 10^8 m^3$)	80.46	354.20	105.00	
泥沙量($\times 10^8 t$)	160.92	708.40	210.00	160.68
占总量(%)	13	57	17	13

注：泥沙密度按2.0t/m^3计；总泥沙量按1240×10^8t计。

的河流沉积部分；水下堆积包括沙席、沙坝、远端沙坝、烂泥湾和前三角洲沉积。其分配比为：河流沉积占25%，水下三角洲沉积占62%，输入远海为13%(表5—4)。

表 5—4 按沉积作用区计算黄河泥沙分配比

单元	河道沉积量	水下三角洲堆积量		输出三角洲泥沙量
		早期	现代	
面积(km^2)	5212	2530	1500	
厚度(m)	3	11	7	
体积($\times 10^8 m^3$)	156.36	278.30	105.00	
泥沙量($\times 10^8 t$)	312.72	556.60	210.00	160.68
占总量(%)	25	45	17	13

五、黄河三角洲的格架

综合以上所述，黄河三角洲具有下列特点：

1．黄河三角洲有两类不同的基底，渤海浅海沉积基底和短源河流沉积基底其界线大致沿1855年古海岸线。

2．黄河三角洲叶瓣顺基底低洼方向进积，一般长达50km(直线距离)，最大厚度为16—18m。

3．黄河三角洲各叶瓣依次生长，叶瓣主沙体仅在端部稍有叠置，叶瓣侧部泥质体彼此叠合。

4．黄河三角洲是由以宁海及渔洼为顶点的两个亚三角洲组成，除端部外，两个亚三角洲的主体各自独立生长。

5．黄河三角洲沉积物在垂向上可分两层：下部为粘土质粉砂层；上部为粉砂—极细砂层。其中上部层又以平均海平面为界，分沙席-沙坝层和河道沉积层：前者由纯粉砂夹少量极细砂组成；后者由粉砂与粘土质粉砂互层组成。

上述特征，清楚地反映在黄河三角洲沉积类型栅状图中(图5—14)。该图表明，黄河三角洲是一个以河流作用为主而形成的进积三角洲，具有下细上粗的逆粒序结构。三角洲面积大、厚度薄。这种面广而薄的三角洲是黄河在高输沙量、浅的受水盆地的特殊条件下的产物。

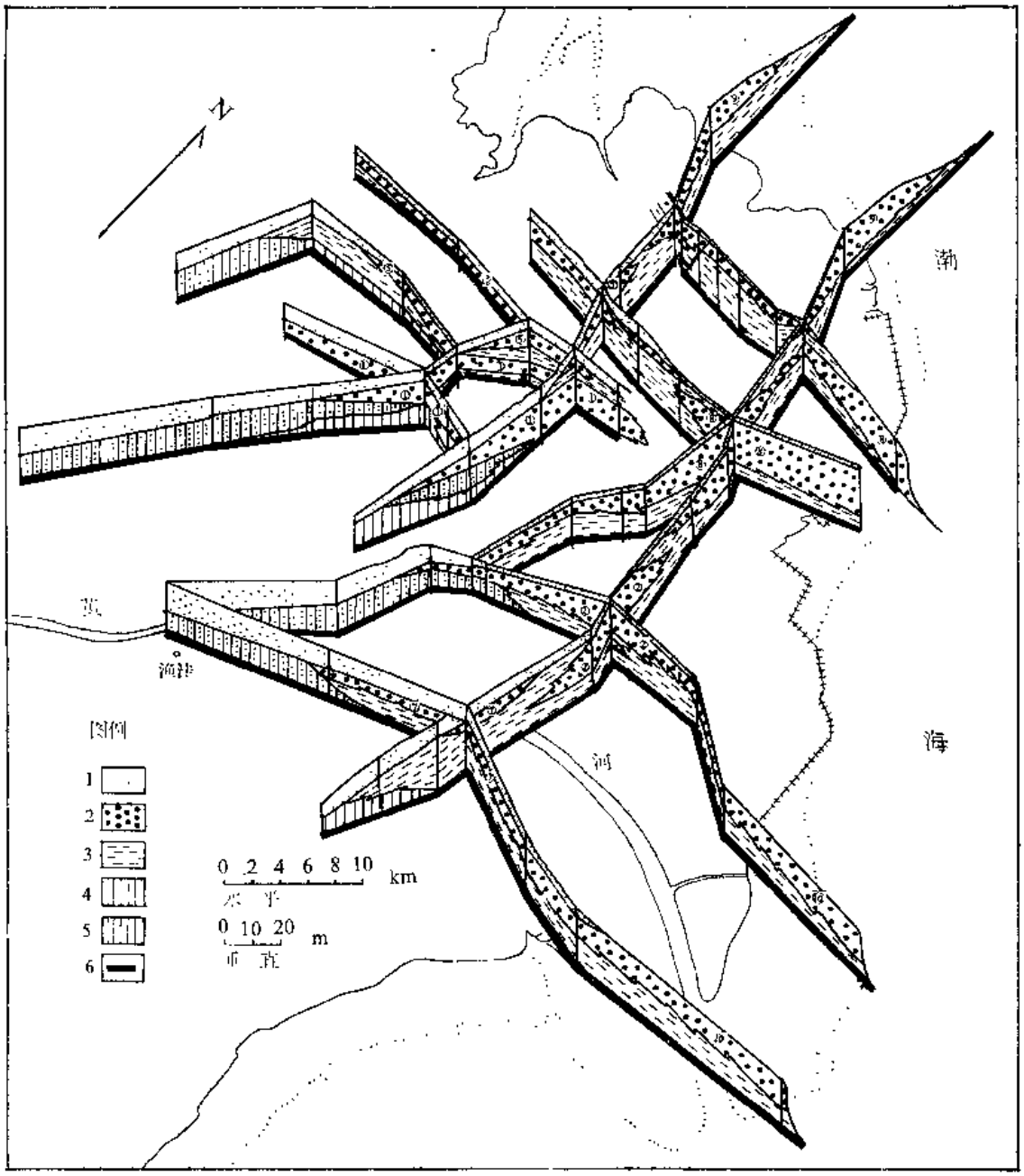


图 5—14　黄河三角洲沉积类型栅状图

1—河流沉积；2—河口沙体（沙席、沙坝、远端沙坝）沉积；3—三角洲侧缘和前三角洲沉积；4—短源河流沙体（基底）；5—短源河流泥质体（基底）；6—浅海沉积（基底）。数字表示叶瓣的形成顺序

第六章　黄河三角洲的沉积作用及模式

黄河三角洲是一个河控三角洲，它以某些特殊的沉积作用，如高密度流沉积作用、烂泥湾沉积作用等而有别于其它河控三角洲。这些特殊沉积作用是由于黄河的输沙量大，携带的泥沙颗粒极细，河口的水深很浅等动力、环境因素所造成。

下面分上三角洲平原沉积作用，下三角洲平原沉积作用和水下三角洲沉积作用三部分进行讨论。

第一节　黄河上三角洲平原的沉积作用

黄河上三角洲平原沉积动力以单向水流为主。黄河径流在洪水期和枯水期相差极大，达几十倍。以1976—1981年为例（表6—1），径流量最大月份与最小月份相差50倍，洪水期一天的径流量相当于枯水期两个月的径流量。流量的骤大骤小，河水水位的大起大落，导致河道多变，经常决口。黄河三角洲地势平坦，略向海倾斜，决口后常常发展成新的河道。由于河道两侧都筑有人工堤，河道摆动被限制于宽约10—20km的人工堤范围内，因此黄河上三角洲平原沉积物往往是河床、边滩、天然堤、决口扇的叠覆沉积，泛滥平原不发育。

表 6—1　1976—1981黄河径流量和输沙量统计表（利津站）

项目 / 年份	年径流量（亿m^3）	最大月径流量		最小月径流量		最大日径流量		年输沙量（亿t）	最大月输沙量		最小月输沙量		最大日输沙量	
		月份	径流量（亿m^3）	月份	径流量（亿m^3）	时间	径流量（亿m^3）		月份	输沙量（亿t）	月份	输沙量（亿t）	时间	输沙量（亿t）
1976	449.1	9	142.8192	5	3.2676	9月30日	6.929	8.98	8	6.45	12	0.023	8月26日	0.241
1977	248	8	53.7	6	6.93	7月13日	4.56	9.49	8	4.26	2	0.003	7月13日	0.775
1978	259	9	73.6128	6	1.5638	9月24日	3.93	10.2	9	4.50	5	0.00027	8月2日	0.29
1979	270	9	51.0624	6	1.0731	8月19日	3.53	7.33	8	3.40	6	0.00052	8月19日	0.32
1980	189	10	37.8432	5	2.4534	7月9日	2.85	3.08	10	0.94	5	0.0050	7月9日	0.155
1981	346	10	111.132	5	2.3007	10月11日	4.81	11.5	9	3.59	4	0.0023	8月29日	0.225

注于据黄河水利委员会利津站资料计算编制，1987。

黄河携带的物质都是细粒泥沙，粒径在3.8—8.4ϕ（0.075—0.003mm）之间。这类细粒泥沙都呈悬浮状态搬运。在上三角洲平原悬浮物的沉积有两个过程。首先悬浮泥沙中较粗粒部分在床底之上形成一层厚50cm、含沙量高的底悬浮层，悬沙含量大于30kg/m^3。这种高沙量底悬浮层虽然仍由流水支撑运动，但其粘度增大，因而与底部沉积物磨擦力增大，其对底床的冲刷作用和堆积作用比一般低沙水体强。其次，底悬浮层内的泥沙随水流

强度变化而与床底物质充分交换。洪水期河水的输沙量大，流量大，流速高，底悬浮层的剪切能量强，河床受冲刷；枯水期则相反。据实际观察，当黄河流量大于3000m³/s时，则有冲刷，小于3000m³/s时则淤积，形成黄河河道枯淤洪冲的特点。河道冲淤变化对河口治理有很大意义，可利用大流量冲刷河口拦门沙的作用，以延长河道的行水时间。

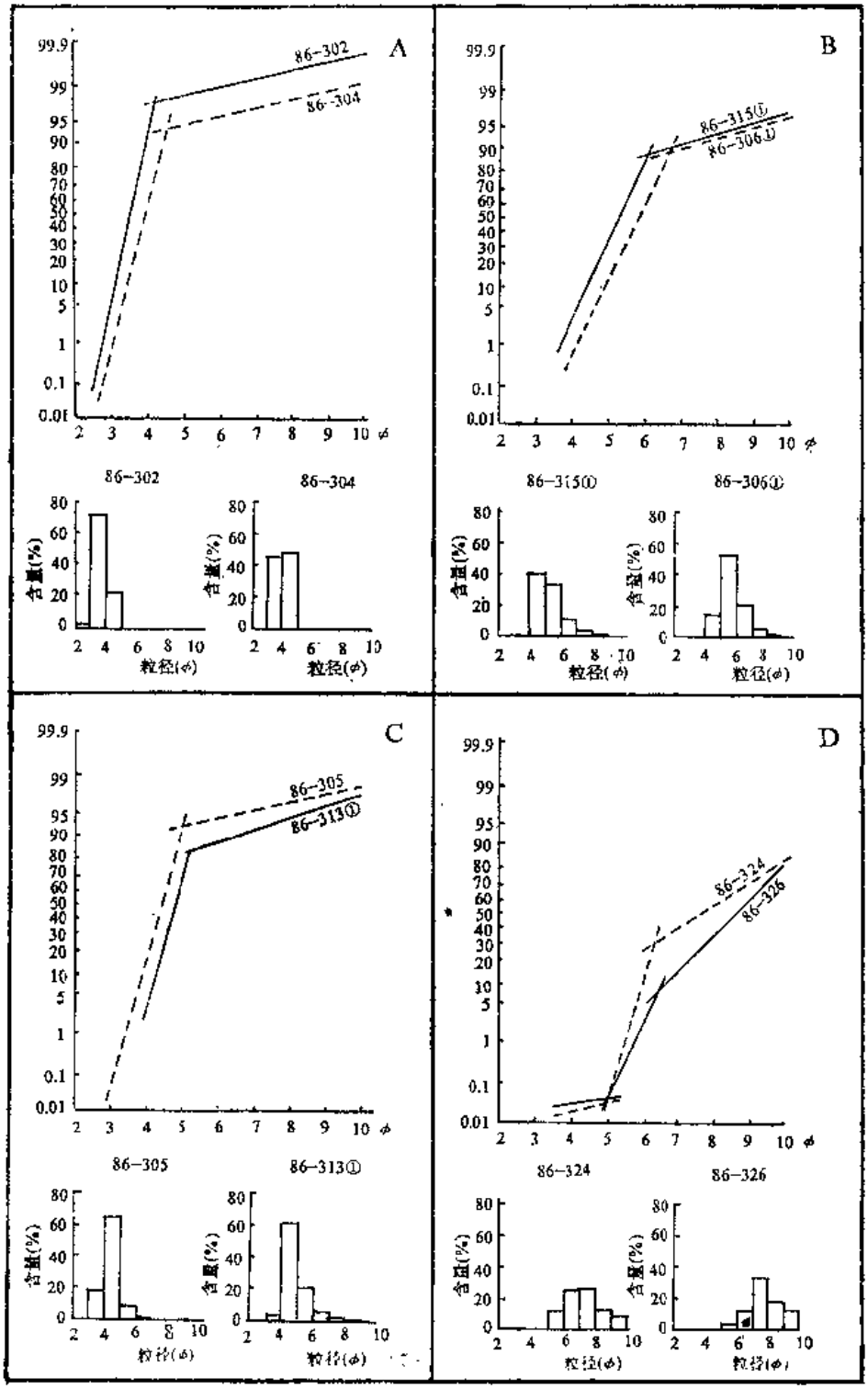


图 6—1　黄河上三角洲平原沉积物的粒度分布概率累积曲线与直方图

A—河床；B—边滩；C—天然堤；D—泛滥平原（站位见图3—3）

黄河上三角洲平原的其他环境，如边滩、天然堤，其沉积作用与河道有相同之处，都是悬浮沉积。因此，河道、边滩、天然堤的沉积物结构特征类似。在概率累积曲线上都表现为二段式（图6—1），分别相当于悬浮体中床沙质和冲泻质两部分，无底拖沉积物。其中冲泻质仅占10%。它们之间的差别是，不同环境中冲泻质和床沙质的临界粒度稍有不同，拐点在4—6ϕ之间移动。

高沙底悬浮层对水流条件的改变有明显的反应。流速降低时，泥沙大量快速堆积，形成爬升层理。当第二次洪峰到来时，已沉积的泥沙可全部再悬浮，然后随着流速变小而再沉积。这种现象也可由于空间上水流边界条件变化而在横向上相互转化所造成。这就形成了黄河上三角洲沉积构造以爬升层理为主，且多次交替出现的特点。

上三角洲平原环境经常变化，沉积层内冲刷面较多。由于床沙质与底床质交换充分，在冲刷面上少见滞留沉积，一般有几毫米厚的黑色重矿物滞留层，仅个别地方因冲刷泥质沉积物而滞留少量泥砾。

细粒泥沙的快速堆积使沉积物中饱含水份，在沉积物负载压力下，沉积物液化形成卷曲层理。因而黄河三角洲沉积物爬升层理之上常常出现卷曲层理。

泛滥平原沉积与上述的沉积作用过程不同。从河床溢至泛滥平原的黄河水，大部分是河道中的上层水。上层水含细粒悬浮泥沙多，因此泛滥平原沉积物以细粉砂和粘土为主。沉积过程以垂向淤落为主，发育水平层理。

泛滥平原沉积物的概率累积曲线上有三个折段（图6—1），第一折段由3—5ϕ的粗颗粒物质组成，这些粗颗粒物质是泛滥时流水局部冲刷早期泥质沉积物形成的泥质团粒，它的含量不到1%。其余的沉积物是细粉砂和粘土，其中5—6ϕ含量为30%，6—10ϕ含量占60%以上，其余的为10ϕ以上细粒物质。这表明泛滥平原沉积物主要来自均匀悬浮的冲泻质。

第二节　黄河下三角洲平原的沉积作用

黄河下三角洲平原由潮滩组成。黄河三角洲的潮滩与一般潮滩不同：一般潮滩由潮汐作用形成，沉积物由潮流带入；黄河三角洲潮滩是由三角洲经潮汐作用改造而成，沉积物是原地的三角洲沉积物。潮滩的宽度也是原三角洲水下浅滩的宽度，且随三角洲的演化而变。

黄河三角洲潮滩按动力条件分为两类：现在行水河口潮滩和废弃河口潮滩。

现代河口潮滩呈鸭咀状，实质上这是河口径流在口门外堆积的河口沙顶面的形态。由于黄河三角洲进积速率高，河口沙坝很宽，因此，现代河口潮滩宽度可达10多公里。河口沙坝在堆积过程中，受潮汐作用影响，愈接近海面，影响愈大。当径流与潮流方向一致时，流速增大，沉积的泥沙较粗；当径流受潮水顶托时，流速降低，沉积的泥沙较细。如此反复就形成了潮滩沉积物中的韵律层。有时在河口沉积的爬升层理中也能见到爬升韵律层，其中泥质层的厚度不到1mm，反映潮汐周期的影响。

潮滩沉积常受后期河道水流冲刷，因而在河口沙坝的垂向序列中，潮汐沉积保存都不完整。

废弃河口潮滩是由原河口沙坝经潮汐和波浪作用改造而成。河流改道后，原河口沙坝

受海洋动力作用的侵蚀而后退，滩面宽度相应减小，一般为6—8km，呈环状围绕上三角洲平原。在蚀退过程中，一部分被侵蚀再悬浮的泥沙在滩面上再沉积，尤其在低凹处沉积了厚度不超过50cm的潮滩沉积层。这就是黄河废弃三角洲潮滩沉积物的来源。显然，这类潮滩也不是典型潮滩，而是废弃河口沙坝的改造沉积。在这类潮滩上，生物扰动作用强烈，把沉积物中的原始层理扰动为均匀的块状构造。

波浪作用在这类潮滩上起很大作用，尤其是大风浪，把海底沉积物掀起，搬运到高潮线附近沉积，形成潮滩砂脊和贝壳堤。

由此可见，黄河三角洲的潮滩沉积，实质是三角洲沉积的变种，只是由于黄河携带的泥沙特别多，颗粒又细，进积快而形成一种宽广平坦的河口滨岸堆积，其地貌酷似潮滩。在其表面，由于潮汐作用形成了薄层潮滩沉积，实质上这并非正常发育生长的潮滩。这也是细颗粒高沙河流形成的三角洲的一个特点。

由于黄河三角洲潮滩的特殊性，在开发时不能按正常滩涂来对待，要充分估计到它的不稳定性以及潮滩沉积层极薄的特点。

第三节　黄河水下三角洲的沉积作用

黄河水下三角洲区的动力状况很复杂，它是含沙量高的单向淡水流同潮汐、波浪、环流多向咸水流相互作用组成的一个复杂动力系统。它包括以径流惯性动力为主的水下河道沉积区，以高密度流为主的三角洲前缘沉积区、以潮流和环流为主的三角洲侧缘和前三角洲区，和以潮汐及波浪作用为主的废弃水下三角洲区。

一、水下河道的沉积作用

水下河道是指河口外由径流惯性力冲刷出来的水道，它顺黄河入海方向延伸到水深2—5m处。黄河河道是经常迁移的，水下河道也随之迁移，在黄河口门附近可以看到各种冲刷槽（图6—2）。在水下河道内，黄河水以惯性冲力形成一股射流，具有单向流特征。

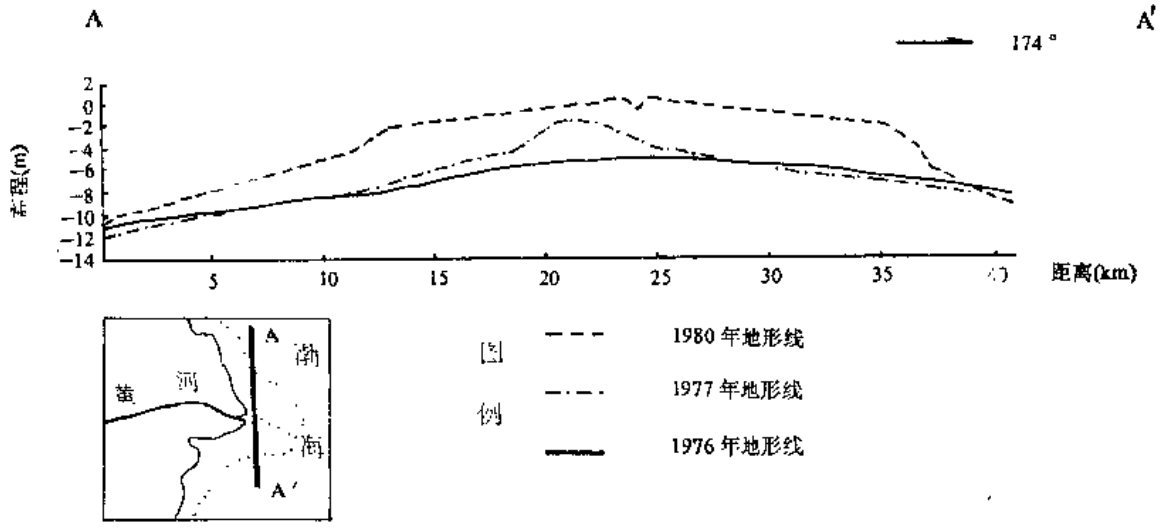


图 6—2　现代黄河河口地形剖面

（据任于灿，1987）

在这股射流内，盐度低于0.3‰，因此相当于黄河在海中的延伸。其沉积作用也与陆上河道相似，形成水下河道、水下天然堤，水下决口扇沉积。

水下河道沉积物较粗，其粒度在3—5ϕ范围内的约占85%左右，其中大于5ϕ的占15%（图6—3）。沉积物粒级分配为极细砂占14—25%，粉砂占71—82%，粘土占2—4%。沉积物粒度直方图呈单峰正态分布，峰值在4—5ϕ之间。4—5ϕ粒级的含量占沉积物总量的59—68%，在其概率累积曲线中，3—5ϕ段的倾角70—72°，分选性良好。3—5ϕ线段与5—10ϕ线段的夹角为128°，表现其动力条件变化很大。

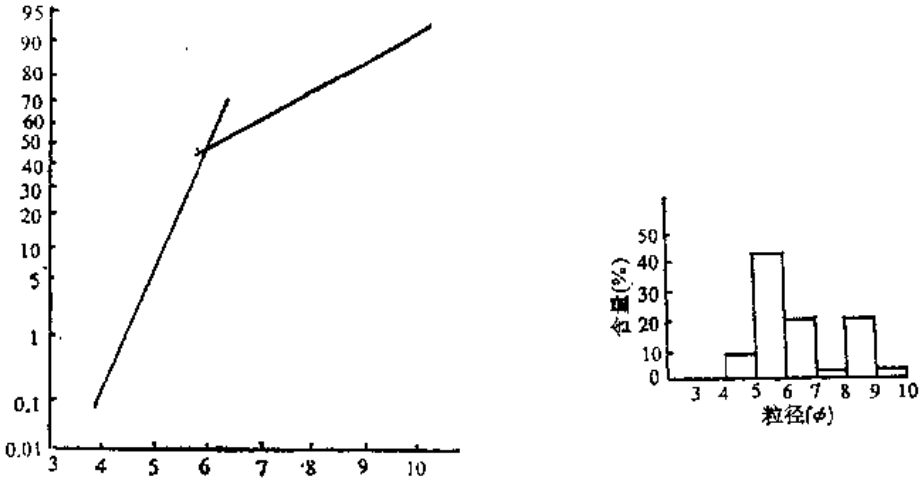


图 6—3 水下河道区（F_{19}站）沉积物的粒度分布概率累积曲线与直方图
（站位见图2—8）

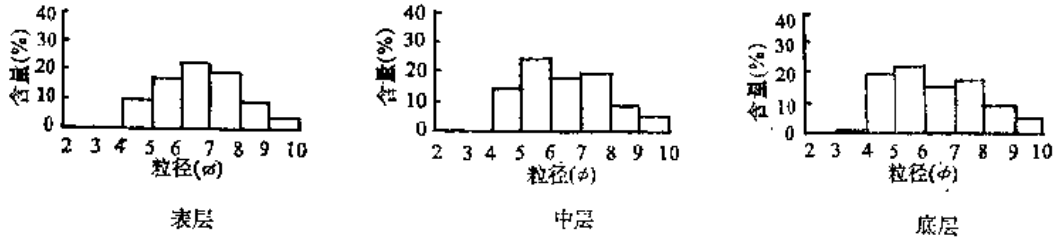


图 6—4 水下河道区（F_{14}站）表层、中层、底层悬浮体的粒度直方图
（站位见图2—8）

水下河道水体内悬浮体粒度大于4ϕ的占98%以上，其中5—8ϕ为主体粒级（图6—4）。在中层和底层的悬浮体粒度直方图上呈双峰分布，6—7ϕ之间为一低谷。在垂向上，粒径比6ϕ粗的部分由底层向表层逐渐减少。粒径比6ϕ细的部分变化不明显。这些特征与河道内床沙质与冲泻质分布特征相似。

将悬浮体粒度组分与底质粒度组分（图6—3，6—4）相比较，可以看到在底质中，3—5ϕ粒级含量占总量的85%以上，而该粒级在悬浮体中一般小于20%。这表明水下河道是一个高能环境，在这种环境下粗颗粒沉积，细颗粒运走。

二、三角洲前缘的沉积作用

黄河水下三角洲前缘的沉积作用主要是高密度流的沉积作用。据A_{20}站1988年8月19日

21:00到8月20日05:00涨潮时段内不同水深处测得的悬浮体含量表明，在水深4m处悬浮体含量有一个跃层。4m以浅水体内悬浮体含量为10kg/m³，4m以深水体内剧增到60kg/m³以上。因此4m以下为高密度流分布区（图6—5）。

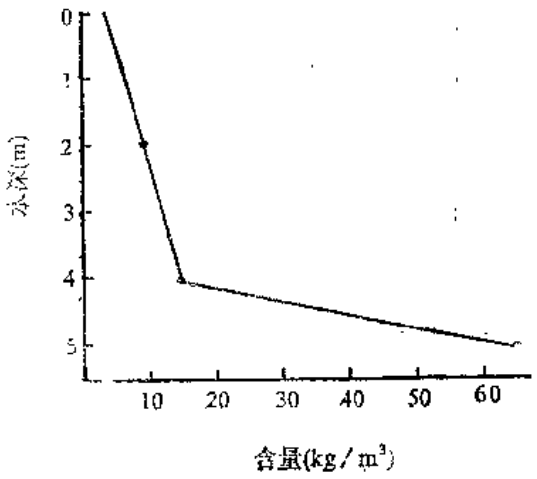


图 6—5 黄河口高密度区（A_{26}站）水深-悬浮体含量图
4m以下为高密度流层
（据1988年8月20日02：00时实测资料，站位见图2—8）

短周期的高密度流，使黄河泥沙搬运距离受限，使黄河三角洲前缘陡窄。在特大洪水期，高密度流影响范围略有扩大，可进入前三角洲区，在那里形成薄层高密度流沉积，使三角洲前缘的粘土质粉砂层中出现粉砂夹层。

高密流的形成或消失取决于三个因素，即流体密度、底部磨擦强度和悬浮物质沉积速度。当悬浮物质含量高，流体密度大时，增加了流体同底面的磨擦强度，造成对海底的侵蚀，使已沉积的泥沙再悬浮，这进一步又增大了流体密度；而密度增大会使悬浮体沉积速率降低，侵蚀能力更加增强，这样就形成一个正反馈。相反，当密度降低时，底部磨擦强度降低，对海底的侵蚀削弱，再悬浮物质加入少；而密度降低使悬浮体沉降速率增高，侵蚀能力更弱，这样就形成一个负反馈。正反馈增强密度流，造成强烈侵蚀；负反馈削弱密度流，造成迅速堆积。

引起黄河口区正负反馈的条件是潮汐。顺水下河道方向，当潮流与径流方向一致时，含沙量高的黄河水体顺流而下，形成高密度流；当潮流顶托径流时，黄河水体受阻，高密度流消散。在水下河道旁侧，情况相反，当潮流与径流顶托时，水下河道内的高密度流向旁侧溢散，形成侧向高密度流。前一种情况是Wright等(1988)在水下河道方向测得的高密度流，是在退潮时形成的；后一种情况是这次在水下河道旁侧测得的高密度流，是在涨潮时形成。两者测量的部位不同，形成和消散的时间也不同。

周期性高密度形成一正一负两个反馈，这说明黄河三角洲前缘区为什么既有强烈冲刷，又有高速堆积。

黄河口高密度流的强度随着远离河口而减弱，反映在沉积物上是近河口处沉积物粗，向外逐渐变细（表6—2）。

黄河三角洲前缘的动力作用除高密度流外，还存在漂浮扩散作用。漂浮扩散对三角洲前缘沉积很少有直接影响，它只是起着分选的作用，把悬浮泥沙中较细粒部分搬离前缘。

三、三角洲侧缘（烂泥湾）的沉积作用

黄河三角洲的侧缘沉积远较其它三角洲发育，这与黄河输沙量大、泥沙颗粒细以及河口动力特点有关。

黄河口存在一个潮流高速区，潮流方向与径流方向垂直。黄河携带入海的细粒泥沙被潮流带向两侧，并随黄河口两侧的环流（图1—3）运动，以环流的旋涡为中心沉积下来，形成三角洲侧缘沉积。由于大量泥沙集中在侧缘，该处海水中泥沙含量高，尤其在大风浪

表 6—2 高密度流沉积区底质样品的粒度特征

样品号	粒度成分（%）			峰值/粒度区间	4—6ϕ 线段的倾角	4—6ϕ与6—10ϕ 线段间夹角	动力环境
	细砂	粉砂	泥				
A_{20}	0.16	91.04	8.8	57/5—6ϕ	66	134	强
F_{05}	0.28	86.84	12.98	43.5/5—6ϕ	66	148	次强
F_{06}	0.08	69.08	30.90	29/7—8ϕ	67	159	弱
F_{09}	0.18	58.24	41.58	30.5/7—8ϕ	60	159	弱

期间，海底泥沙再悬浮，使侧缘水中泥沙含量更高，似烂泥塘，被当地渔民称其为“烂泥湾”。烂泥湾由于粘度大，可削弱海浪的作用，而成为良好的避浪区。风浪过后，细粒泥沙再度淤积，因此烂泥湾沉积中夹有很多风暴沉积。

黄河口潮汐为半日潮，平均流速约为 120cm/s。半个潮周期内潮流流经的范围约25km，因而潮流携带的泥沙在河口两侧50km的范围内往返搬运沉积。这距离就是黄河三角洲侧缘的沉积范围。

黄河三角洲侧缘沉积南、北稍有不同：南侧受高密度流影响，沉积物中常夹有粗粉砂层；北侧缘的情况较为特殊。在1987年汛期，人工开辟一条分流将黄河引入北侧缘，使其环境变为分流河口。1988年该分流被淤塞，北侧缘恢复原来环境。因此1987年11月测的沉积物粒度具有河口与侧缘双重特征。该区底质样品的粒度成分具双众数分布特征(图6—6)，主峰在5—7ϕ之间，次峰在8—9ϕ之间。反映物质来源的双重性，既有潮流作用带来的细粒部分，也有河水直接带来的粗粒部分。底质的粒度概率累积曲线4—6ϕ段斜率为66°，表明其分选性较主河口差。

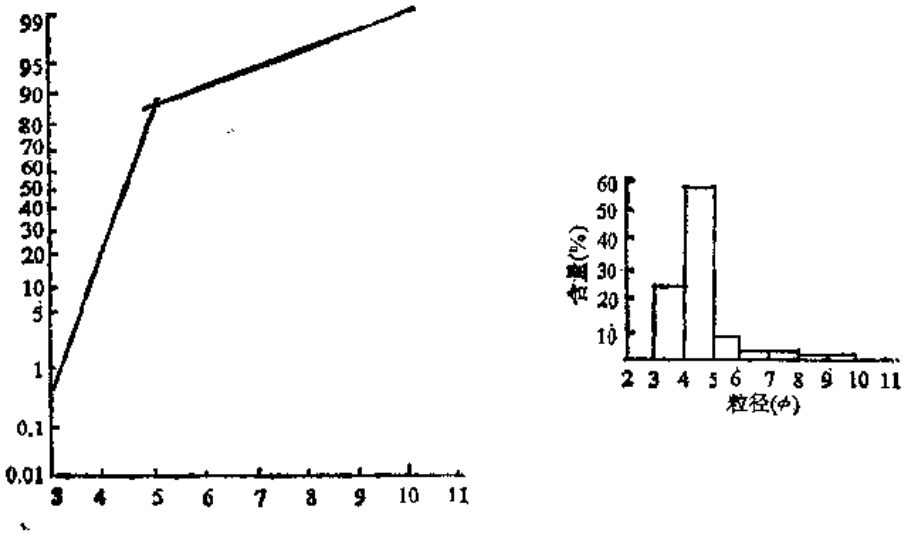


图 6—6 黄河三角洲北侧缘底质的粒度组分
（A_{20}站，站位见图2—8）

四、前三角洲的沉积作用

前三角洲是以黄河漂浮扩散动力为主，在洪水期受高密度流影响。由于黄河口潮流方向平行海岸，漂浮扩散的泥沙大部分被潮流带入烂泥湾，因而前三角洲沉积层很薄，一般不超过1—3m，且与浅海相沉积逐渐过渡。生物在这里起一定作用，主要是扰动作用，形成扰动构造。

五、废弃水下三角洲的沉积作用

废弃水下三角洲的沉积作用主要表现为改造沉积作用。在波浪和潮汐作用下，原水下三角洲沉积物被侵蚀再悬浮并在附近沉积下来，形成薄层潮流沉积层和高潮线附近的粗粒沉积。

第四节　黄河三角洲的沉积模式

黄河三角洲沉积作用显然不同于其他河控三角洲，其主要原因是黄河径流量小，输沙量大，泥沙颗粒细，渤海水浅潮弱，河口两侧有环流。诸方面因素相结合，在河口形成一个独特的沉积动力体系，形成独特的沉积模式。

黄河口的动力因素，主要有：

1．黄河水体入海后的射流；

2．黄河高沙水体入海后的高密度流；

3．垂直或斜交径流方向的潮流；

4．河口两侧余流形成的环海流；

5．由大风浪引起的事件性不规则流

这些动力因素相互作用，控制入海泥沙的分选、搬运和沉积。

黄河水体的射流是长年存在的一种动力流。射流入海后，流速度迅速降低，泥沙大量淤落，尤其是粗颗粒泥沙。河口沙席和浅水区的河口沙坝便是在这样的情况下堆积，从而使三角洲迅速进积成陆。

黄河射流中的细粒泥沙，受潮流影响向河口两侧搬运，形成三角洲侧缘（烂泥湾）沉积。河口两侧的环流，加速了侧缘沉积。

黄河口高密度流只有在高沙水体注入时才能形成，因此高密度流只发生在洪水期，并受潮汐影响，具周期性，并在河口不同地点出现一系列形成和消散时间不同的高密度流序列。这一特点使黄河口的河口沙坝呈鸭咀状而不是直线型，宽度大。

由大风浪引起的事件性不规则流，其作用是使已沉积的泥沙再悬浮，形成风暴层沉积。这在前三角洲或三角洲侧缘区最明显。这种作用对废弃三角洲的影响更大，它造成岸线后退，三角洲前缘上蚀下淤，水下三角洲坡度变缓。

图6—7表示黄河三角洲的沉积模式。事件性流的作用未包括在内。

需要说明，以上讨论的现代河口沉积环境是三角洲叶瓣发展到第二阶段的环境。在三角洲叶瓣发展的第一阶段，河口区为一个极浅的海湾，水深仅2m，最深5m，在极浅水条件下，黄河水与海水强烈混合，泥沙迅速堆积，形成河口沙席。因此在第一阶段不存在高密度流，也不发育三角洲侧缘，但有前三角洲沉积。

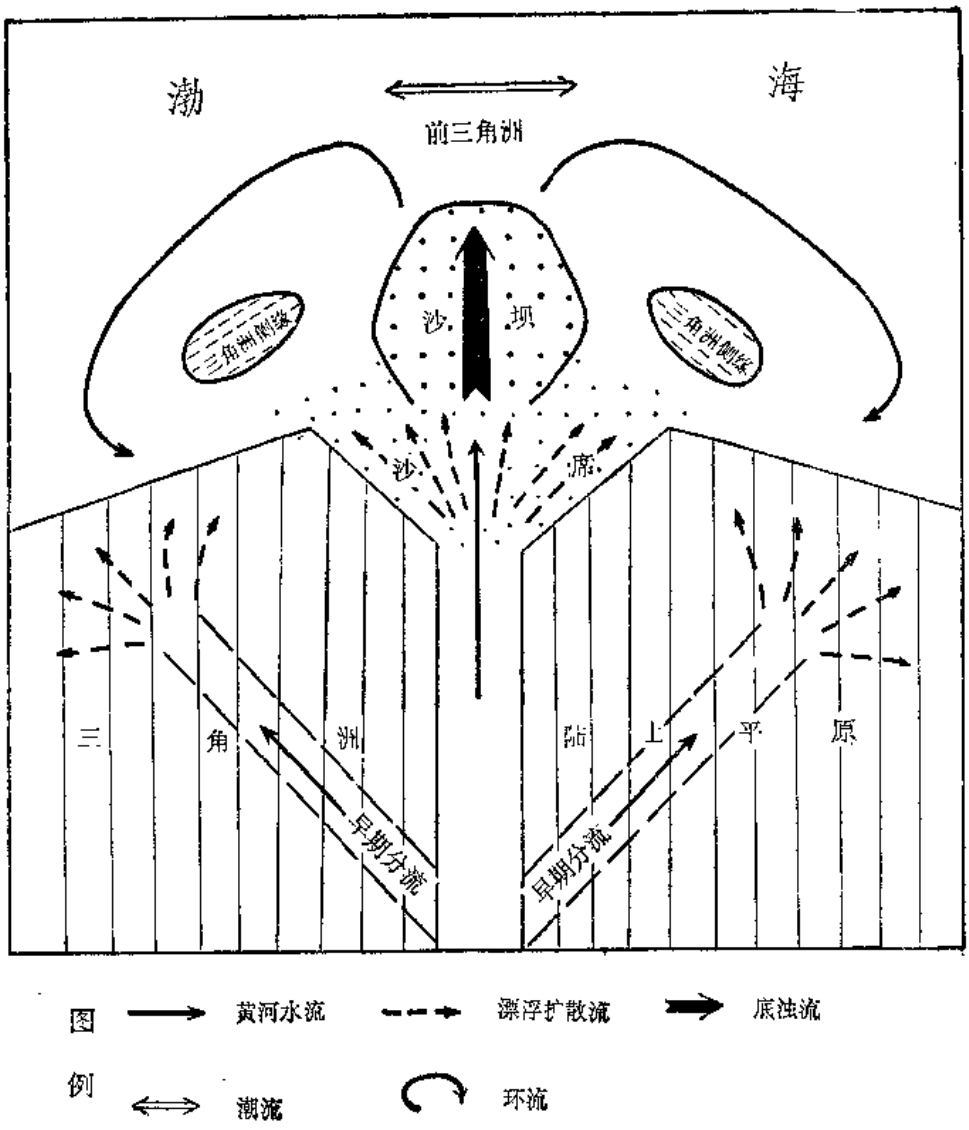


图 6—7　黄河三角洲的沉积模式

第五节　黄河三角洲的发展过程

黄河三角洲由10个叶瓣组成，黄河三角洲的发展过程便是10个叶瓣的组合过程。

按照叶瓣的生长组合关系，黄河三角洲分为两个亚三角洲。第一亚三角洲由第 1 叶瓣到第 6 叶瓣组成，顶点在宁海。叶瓣依次形成，呈扇形展布，历时79年（1855—1934年）。第二亚三角洲位于第一亚三角洲外侧，由 4 个叶瓣组成，顶点在渔洼，也呈扇状展布（图6—8），历时56年（1934年—现在）。第二亚三角洲的上三角洲平原部分叠置于第一亚三角洲上，水下三角洲覆盖在渤海滨海沉积之上。

三角洲叶瓣生长有两个阶段：第一阶段是在极浅水（约5m）海域堆积成席状砂体；

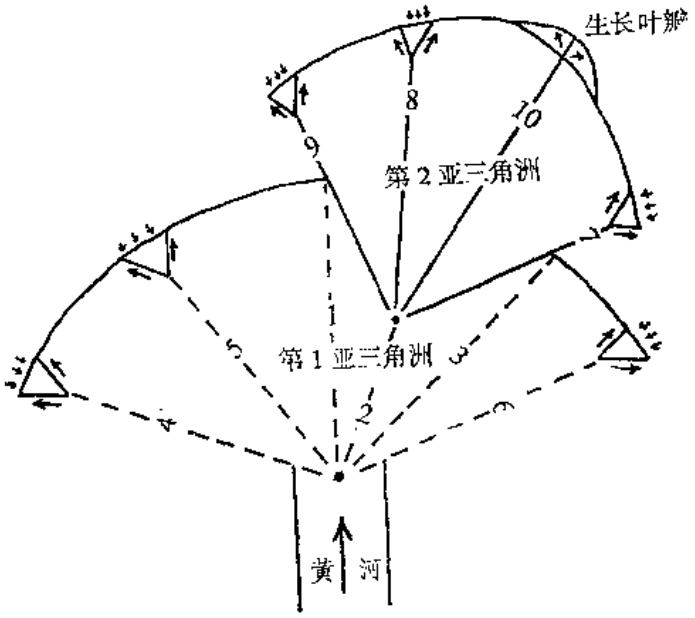


图 6—8　黄河三角洲叶瓣组合示意图

第二阶段是在较深水区（约16—18m）堆积起河口砂坝及其两侧的烂泥湾沉积。

因此，黄河三角洲的发展演化可以下列模式表示（图6—9）。

现代黄河三角洲开始生长之前，渤海古海岸比现今的平直。有两条短源河流注入渤海，一条是大清河，另一条在其右侧。在古河口口门外堆积有河口沙体（图6—9—A）。1855年黄河注入渤海后，大量泥沙在滨海浅水区形成厚约6m的河口沙席，其基底为短源河口沙体和渤海浅海沉积（图6—9—B）。随着三角洲进积，河口进入较深水区，形成厚约12m的河口沙坝（图6—9—C）。三角洲进积到一定程度，河流丧失挟沙能力时，河流改道，在其旁侧发育另一个叶瓣。废弃叶瓣受到侵蚀，形成改造沉积（图6—9—D）。新叶瓣按此顺序逐个发育，这是第一亚三角洲。随后，三角洲顶点下移，第二亚三角洲开始生长。第二亚三角洲叶瓣是在第一亚三角洲的改造沉积基础上向海进积，同样，首先形成河口沙席（图6—9—E），然后形成河口沙坝（图6—9—F），最后叶瓣废弃，在其旁侧发育另一个新叶瓣。目前第二亚三角洲已有四个叶瓣，仍在继续发展之中。

叶瓣形成的历时长短不一，平均为13年。其中河口沙席发育期2—4年，河口沙坝发育期约八年。

黄河三角洲的演化过程清楚表明，黄河是一个河控的进积型三角洲。在活动叶瓣及其附近，蚀退是暂时的，进积是主导的。在黄河三角洲海岸布设工程必须考虑到这一基本性质，以免被暂时的蚀退现象所迷惑。

根据黄河三角洲第一亚三角洲和第二亚三角洲发育演化的相似性，可以得出，今后的黄河第11期河道，由于向南已到三角洲边缘，向西迁移已成自然趋势。

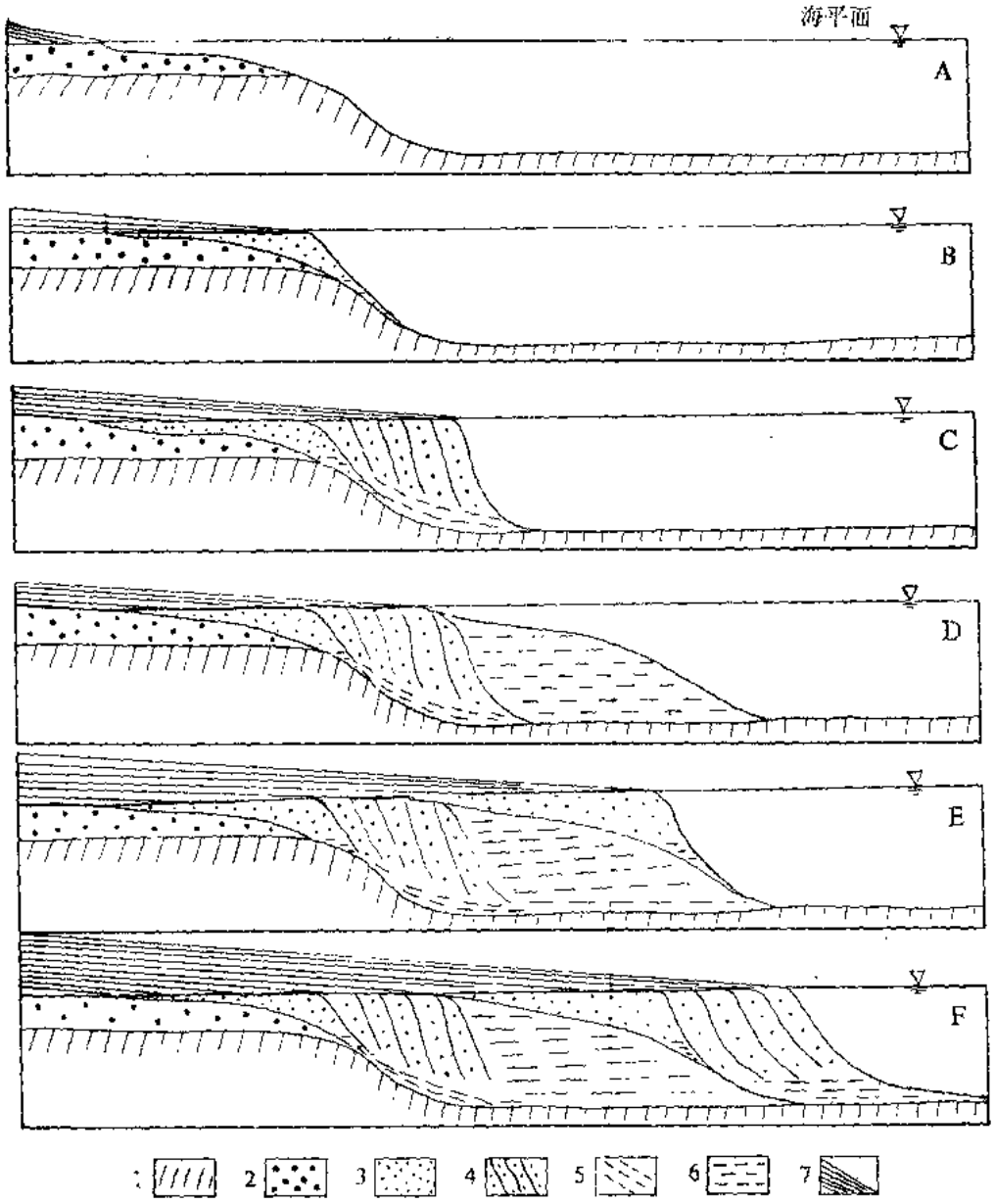


图 6—9　黄河三角洲的进积演化模式

A—古渤海海岸剖面；B—第一亚三角洲河口沙席沉积；C—第一亚三角洲河口沙坝沉积；D—第一和第二亚三角洲之间改造沉积和浅海沉积；E—第二亚三角洲河口沙席沉积；F—第二亚三角洲河口沙坝沉积。1—三角洲基底，渤海浅海沉积；2—三角洲基底短源河流河口沉积；3—黄河三角洲河口沙席；4—黄河三角洲河口沙坝；5—黄河三角洲前三角洲沉积；6—黄河三角洲改造沉积和浅海沉积；7—黄河河道沉积

第七章　黄河三角洲开发中的主要地质问题

黄河是中华民族的摇篮，是我国文化的发源地。黄河中下游历来是我国政治、经济和文化的中心，我国最早的封建统一帝国——秦、汉的都城就建立在黄河流域。中华民族的兴起与黄河紧密相连。今日的黄河三角洲更是面貌一新。1961年4月在东营附近首钻见油，1962年9月23日又获第二口日产原油555t的高产油流。此后经过20多年勘探开发，到1988年原油年产约3000多万t，成为我国第二大油田——胜利油田（焦益龄，1990）。黄河三角洲土地辽阔，并以每年25km^{2}的速度向海造陆。黄河口素有“百渔之乡”美称，千余平方公里的沿海滩涂给海洋生物的捕捞，养殖提供了广阔前景。1983年，国务院批准建立东营市，山东省政府也将开发黄河三角洲作为战略重点，要把黄河三角洲开发建成为大型现代化石油工业基地、农业基地、科学实验和人才培养基地，建设成一个新经济区。

黄河是三角洲的塑造者。由于黄河善淤、善决、善徙，是世界上变迁最大的河流，故黄河三角洲也极不稳定，这给黄河三角洲的开发带来困难，其中影响较大的主要有河道频繁摆动、海岸进退多变、以及由此造成的地层软弱性和淡水资源短缺等。下面分别讨论。

第一节　河道摆动问题

现代黄河三角洲自1855年开始生长，至今已发生决口50余次，改道九次，平均约13a改道一次。1976年改道后的河道已行水13a。改道严重威胁油田开发，每次改道，新河道都要占据长20多公里，宽约10多公里的面积，作为河流摆动领域。为了防止泛滥在两旁筑堤，两堤之间只有一些临时性小屋和季节性耕田。黄河三角洲河道改道是以三角洲顶点为轴心，呈扇骨状在三角洲上迁移，范围涉及整个三角洲，给工农业布局带来困难。

黄河三角洲的演化表明，河流改道是三角洲生长发展的过程和途径。黄河在行水期在河口堆积起一个三角洲叶瓣，然后河流改道在新河口再形成一个叶瓣，叶瓣一个接一个生长，组合成现今的黄河三角洲。因此河道摆动是三角洲阶段性生长的方式。世界上以河流作用为主的三角洲，其河道都摆动或存在多分流。黄河由于含沙量极高，为密西西比河的42倍，三角洲的河道摆动远较其他三角洲频繁。

鉴于黄河尾闾频繁摆动，应全面规划开发黄河三角洲。首先要考虑尾闾摆动的规律性，在一定阶段内留出一定空间作为黄河河道活动场地，安排造陆次序，划分长期经济建设区及短期暂时利用区，采用与黄河三角洲河道摆动相应的有序开发方式。

从生产角度，尤其从工业生产角度要求，尽可能延长河道行水时间是有利的。

对于现行河道来说任何减少输入河口的沙量的措施，任何能排除河口堆积的方法，都对延长河道行水时间有利。如已提出的绿化黄土高原；利用水库“蓄清排浑”及分洪放淤

是属于减少泥沙输入河口的方案。蓄水刷槽，束水攻沙，震动输沙等是属于排除河口已堆积的泥沙的方案。

由于黄河输沙量特别高，减少沙源的措施，短期内不能大幅度降低进入河口的沙量，1988年输入河口的泥沙量仍高达8.49亿t。因此需要采用综合治理方法，既要减少泥沙的输入，又要排除河口已堆积的泥沙。

第二节　海岸进退问题

黄河三角洲海岸极不稳定，在现代行水河口，叶瓣正在生长，海岸平均以每年2km速率向海推进。最大生长速度达每年11km（1976年）。河流改道后叶瓣废弃，其海岸蚀退。蚀退的平均速率开始为每年1km，逐渐下降到每年200m，在未达稳定状态时，又被后期叶瓣覆盖，再度成为进积海岸。黄河三角洲各早期叶瓣处于不同的蚀退阶段，因此，三角洲海岸后退的强度在空间位置上各不相同。在开发三角洲海岸带时，下列几方面值得考虑：

1．不宜在河口附近的海岸线上建设长期永久性设施

在黄河沙量未减少之前，黄河河口海岸属于进积海岸。蚀退是短期、暂时的。河口海岸上的建设，短则几年，长则几十年即将被淤塞废弃。考虑到经济的效益以建设简便型建筑物为好。

2．分期分批开发海岸区

海岸进蚀在时间上有一定规律，它与叶瓣建设期和改造期一致。在空间上有淤进区和蚀退区，蚀退区又有强弱之分，它与叶瓣的生长和废弃以及废弃历时长短相关。

依据海岸演变规律，在制定开发方案时，首先要确定现代海岸所处的发展阶段，其次要估计海岸稳定时的岸线位置，第三要预测今后河道安排对该区的影响，进而划分稳定区和非稳定区。稳定区位于海岸蚀退极线陆侧以及河道改道不受影响的地区，非稳定区位于稳定海岸海侧到低潮线地区。后者只适于安排短期性生产项目。建设在非稳定区的防潮坝，要加固海侧坝身，以防冲毁。

第三节　工程地质问题

黄河形成独特的高密度流极易引起灾害地质事件；黄河中的细颗粒泥沙承压力差，这是黄河三角洲工程地质中的两个不利条件。

1．灾害性地质

黄河三角洲泥沙堆积量大，速率高，沉积物饱含水份，容易使沉积物液化，引起沉积物块体滑动据密西西比三角洲水下块体运动研究表明，当前缘坡度大于0.2°时就出现滑动构造。黄河三角洲前缘斜坡的角度为0.3°，滑坡极易发生。

黄河三角洲沉积层另一特点是上部粉砂层覆盖在松软的下部粘土质粉砂层之上。上覆层密度大于下伏层的密度。由于密度差异而引起沉积物自身调整，造成各种塌陷和重力断层。

鉴于上述原因，黄河三角洲的水下沉积物在重力作用下将发生滑塌下陷和水下块体运动，在三角洲前缘形成一系列的深1—2m、宽数十米至数百米的沟谷。由于沉积物的块体

运动造成大量沉积物再悬浮和重新分布。这种海底沉积物大规模的块体运动是海底不稳定性的主要因素之一。早在50年代墨西哥湾的石油勘探中，曾有两次钻探平台翻倒的灾难性事故，其原因就是三角洲前缘的滑坡所致。

2．基底承压性问题

黄河三角洲由细粒泥砂组成，三角洲格架特点是上部为粉砂层，一般厚4—6m，局部厚达10m以上。下部是粘土质粉砂，一般厚5m，最大厚度8m。上部粉砂层具有一定持力性，可作一般建筑物基础，下部粘土质粉砂层软弱易变，具很大压缩性，不能作为建设的基底。

海上平台施工时，必须首先查明上部粉砂层在钻进点的厚度。一般平台插桩深度为5—7m，如上层粉砂层薄于此厚度，桩脚必然伸入下部软弱层中并导致平台倾斜。作为高层建筑的基础，上部粉砂层的承压力显然不足，此时必须以三角洲以下的全新世底界作为持力层。

全新世底界虽是一个强持力层，但由于地质构造等特点，也潜伏着灾害性地质因素。根据地球物理调查，黄河口区内全新世底界以下存在着断层、古河道以及浅层气等，这些都是不稳定的地质因素。

因此，在黄河三角洲布置工程设施，要充分考虑这些不利因素。

第四节　淡水资源问题

黄河进入三角洲平原的径流量年平均为331.5亿m^3，水量是丰富的。但黄河径流年内各月份分配不匀，汛期7—10月径流量占全部的60%以上，枯期4—6月常出现河干。大量黄河水在汛期流失于大海之中。

黄河三角洲仅上层粉砂层内含有淡水，由于层薄，淡水量少，仅供乡村居民饮用。地下水在地表60—100m以下，有的在200m以下，且矿化度高，不适于饮用。因此充分利用黄河水是解决淡水资源的根本途径：建立平原水库；利用古河道人工储水。平原水库最好建设在粘土层厚的三个区内，其中尤以神仙沟与钓口河之间，神仙沟与清水沟之间两区最为合适。古河道储水可从1855年古海岸线以南，大清河等短源沉积区作试点。这里为极细沙和细沙沉积物，层厚4—8m，距地表约5m，面积大，仅测区内达数百平方公里。其南界在调查区之外，是一个良好的储水层。

古河道储水，特别是储存含大量细粒泥沙的黄河水，还存在许多问题待研究解决。

上述各方面的实际应用，尚需作进一步开发性试验，作为基础工作，下列几方面工作需要逐步开展。

1．填制黄河三角洲的系列图件

荷兰国土开发整治经历了曲折道路：开始由于对国土地质特点了解不细，有些建筑物坐落在压缩性质不同的两类沉积物上，造成楼房倾斜，公路变形；由于没有充分认识海岸的侵蚀作用，1953年一次风暴潮使1800人丧生。这一切促使荷兰地质当局加强对荷兰地质进行系统调查，重要措施之一是填制系列图件，除填制第四纪地质图和地貌图外，还编制各分层厚度图、砂体分布图、淤泥层厚度图、沉积相图、淡水分布图、工程力学图、基建分区图、重大工程最佳路线图、建筑材料分布图、土壤特性图，这些图件成为国家建设规

划的依据和基础图件。黄河三角洲在治海治洲方面与荷兰低地国家有一定的相似性。填制系列图件将为开发黄河三角洲提供基础资料。

2．建立长期水文观察站和地面沉降水准测量站

黄河三角洲区地势平坦，地面坡度为万分之一。海面水位升高1m，就会使沿岸约10km的陆地淹没。潮位变化，风暴潮，地面下沉速率都需通过长期观察才能总结其规律，应尽快开展这方面的工作。

主要参考文献

水利部黄河水利委员会一《黄河水利史述要》编写组 1984。黄河水利史述要。水利电力出版社，397。

王志豪 1984。黄河三角洲的变迁与黄河口油港港址的选择。海岸工程，第3卷，第2期，7—14。

王志豪 黄世光 1988。利用近年施测海图及古海图研究黄河三角洲变迁。海岸工程，第7卷，第2期，47—58。

王善书 杨作彬 刘里斌 1989。中国沿海大陆架油气藏的形成和分布规律。海洋地质与第四纪地质，第9卷，第3期，95—110。

王靖泰 汪品先 1980。中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系，地理学报，第35卷，第4期，300—310。

中国自然地理编辑委员会 1982。中国自然地理 科学出版社，413。

中国科学院海洋研究所海洋地质研究室 1985。渤海地质。科学出版社，232。

司书亨 张广泉 1985。黄河三角洲海区的水深变化及深水港址选位的设想。海岸工程第4卷，第1期，18—24。

叶青超 1982。黄河三角洲的地貌结构及发育模式。地理学报，第37卷，第4期。349—362。

业渝光 薛春汀 刁少波 1987。现代黄河三角洲叶瓣模式的^{210}Pb证据。海洋地质与第四纪地质，增刊，75—80。

刘 杰 1981。渤海含油气盆地的地质构造特征与油气田分布规律。海洋地质研究，第1卷，第1期，3—20。

任于灿 董 万 1987。现代黄河三角洲地貌特征。海洋地质与第四纪地质，第7卷，增刊19—28。

刘风岳 1985。黄河入海干流随潮流变化的特征及泥沙运动方向。海洋湖沼通报，第2期，20—24。

刘风岳 1988。加强黄河口整治延长流路使用年限。海岸工程，第7卷，第4期，63—67。

成国栋 任于灿 李绍全 李广雪 董 万 1986。现代黄河三角洲河道演化及垂向序列。海洋地质与第四纪地质，第6卷，第2期，1—15。

成国栋 薛春汀 周永青 1987。黄河三角洲地区晚更新世晚期及全新世地层。海洋地质与第四纪地质，第7卷，增刊，63—74。

成国栋 1987。现代黄河三角洲的演化与结构。海洋地质与第四纪地质，第7卷，增刊，7—18。

朱照宇 1989 黄河中游河流阶地的形成与水系演化。地理学报，第44卷，第4期，429—440。

阎新兴 1985。黄河口淤泥区的初步探讨。海洋通报，第14卷，第2期。

李泽刚 1988。黄河近代三角海岸的动态变化。泥沙研究，第4期，36—44。

李德生 1981。渤海湾含油气盆地的地质构造特征与油气田分布规律。海洋地质研究，第1卷，第1期，3—20。

张 经 黄微文 刘敏光 黄河口及邻近海域中悬浮体的分布特征和季节变化。山东海洋学院学报，第15卷，第7期，96—104。

林和茂 朱雄华 1986。胶州湾东北角小海湾底质有孔虫和介形虫的研究。海洋地质与第四纪地质。第6卷，第3期，67—81。

侍茂崇 赵进平 王喜瑞 李显烈 1985。五号桩海区悬移质输运量的计算。山东海洋学院院报，第15卷，第1期，113—126。

徐怀大 1981。渤海湾盆地下第三纪地层和沉积特征。海洋地质研究，第1卷，第2期，10—27。

焦益黔 1990。黄河三角洲的经济开发及河口治理。人民黄河，第2期，3—5。

Coleman L. M. 1982, Deltas processes of deposition and models for exploration. International Human Resources Development Corporation. Boston. 124.

Jongerius, P., Tempels, J., Li Guangxue, Helbig, K., and Brower, J. H., 1989, High resolution seismic profiling in the Huanghe (Yellow River) Delta, China Earth Sciences, Vol. 1, No. 1, 75—86.

Prior, D. B., Yang Z. S., Bornhold, B. D., Keller, G. H., Lin Z. H., Wiseman, W. J. Jr., Wright, L. D. and Lin, T. C., 1986, The subaqueous Delta of the modern Huanghe (Yellow River). Geo-marine Letters,

6:67—73.

Wang Pinxian and Bian Yunhua, 1985, Foraminifera and Ostracoda in bottom sediments of the Bohai Gulf and their bearing on Quaternary paleoenvironments. In Wang Pinxian et al., Marine Micorpaleontology of China, China Ocean Press, Beijing, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 133—150.

Wright, L. D., Yang, Z. S., Bornhold, B. D., Keller, G. H., Prior, D. B. and Wiseman, W. J. Jr., 1986, Hyperpycnal plumes and plume fronts over the Huanghe (Yellow River) Delta front. Geo-marine Letters, 6:97—105.

Wright, L. D., Wiseman, W. J., Bornhold, B. D., Prior, D. B., Suhayda J. N., Kellers G. H., Yang Z. S. and Fan Y. B., 1988, Marine dispersal and deposition of Yellow River silts by gravity-driven underflow. Nature, Vol. 332, No. 6165, 629—632.