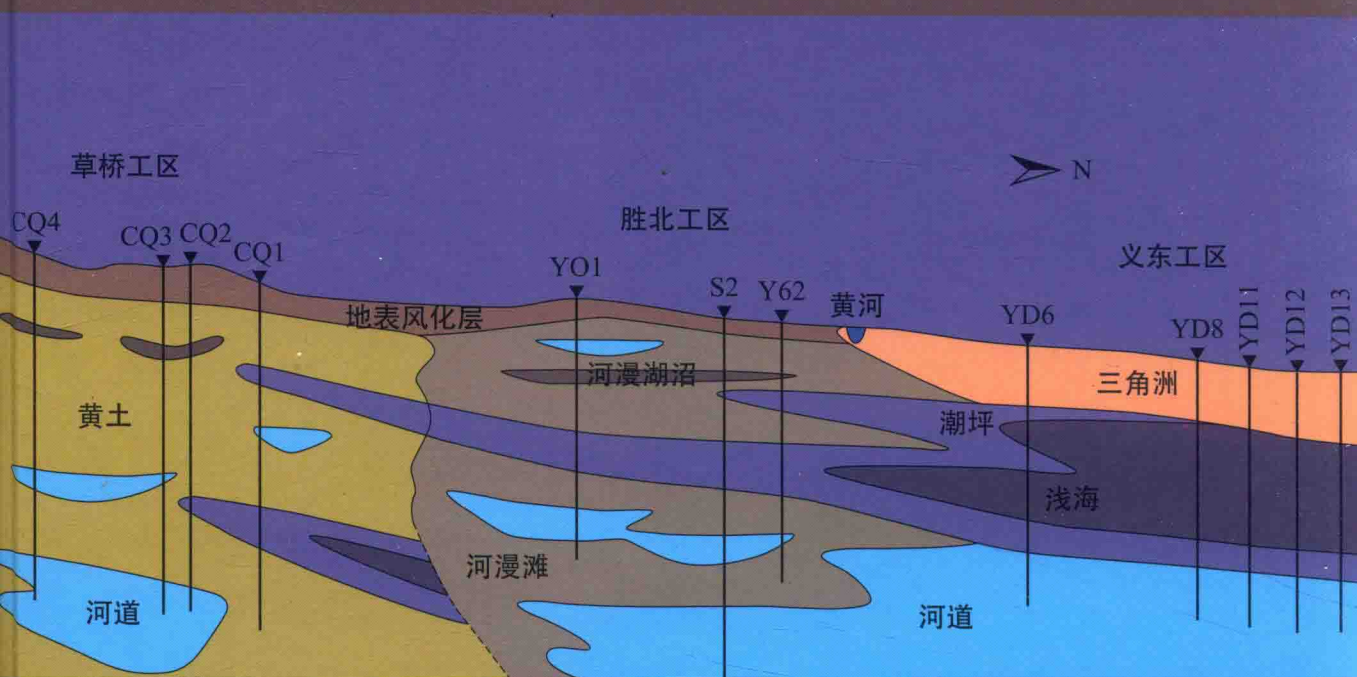


济阳拗陷近地表特征 与探测方法

韩文功 张光德 杨剑萍 著



科学出版社

济阳拗陷近地表特征与探测方法

韩文功 张光德 杨剑萍 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书汇集了济阳拗陷近地表岩性特征和精细探测方法等信息,重点研究了晚第四纪济阳拗陷浅层沉积物的岩性特征、沉积相特征、沉积物分布规律以及沉积演化和常用的探测技术等,有助于阐明该区沉积物的时空分布特征、沉积物与地震响应信号的关系,探寻最适合地震激发的岩性和深度,以指导地震勘探激发点位布设、激发深度选择和资料处理分析研究等工作。

本书适合从事第四纪研究及地震勘探的人员,尤其适合从事石油勘探的技术人员阅读,也可供广大石油勘探科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

济阳拗陷近地表特征与探测方法 / 韩文功, 张光德, 杨剑萍著. —北京: 科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-052503-1

I. ①济… II. ①韩… ②张… ③杨… III. ①拗陷-近地面层-地震地质学-济阳 IV. ①P315.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 078056 号

责任编辑: 焦 健 陈姣姣 韩 鹏 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张: 15

字数: 356 000

定价: 188.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

胜利油田勘探开发的主阵地济阳拗陷地质构造复杂,油气资源丰富,油气藏类型多样,被勘探学者誉为“石油地质的大观园”,至今已发现 70 多个油气田,成为中国重要的石油产区。地震勘探技术为胜利油田的发现和发展发挥了巨大作用。近年来随着勘探的深入,胜利油田进入隐蔽油气藏勘探阶段,常规三维地震资料不能满足复杂隐蔽油气藏勘探的需求。伴随着地震勘探理论、方法和装备技术的进步,对高精度地震勘探有重大影响的近地表认知、岩性探测技术、精细建模及应用方面也在经历一场深刻的变革。如何综合利用多种近地表探测设备,有效地提高地震资料的勘探精度,成为勘探工作者迫切需要解决的问题。

关于近地表问题的认识和研究也是个不断深化的过程。在济阳拗陷 40 多年的地震勘探工作中,针对采集、处理、解释进行了大量研究工作,但是对近地表的研究和认识非常少,长期以来没有得到充分重视,过去我们认为平原区近地表比较均匀,纵横向变化不大,测试方法非常有限,主要是采用小折射、微地震测井方法,测试参数极其简单,粗略测试近地表的速度、厚度参数,测试精度比较低,近地表资料应用非常简单,采集上根据低速带厚度确定激发井深,采用统一井深进行施工,处理上也只简单应用近地表资料进行静校正处理。

近 10 年间,随着勘探精度不断提高,地震勘探工作者已深深地感受到济阳拗陷近地表的复杂多样对资料带来的影响。以东营凹陷南斜坡为例,在基底岩性、构造等特征相同,激发介质条件也相同的情况下,小清河南北两侧地震记录存在明显差异。在沾化凹陷和惠民凹陷都有类似的情况,这是困扰当前地震勘探的重大难题。而表层试验数据显示,近地表浅层沉积物特征与地震数据的采集、处理有着直接的关系,是影响高分辨率地震勘探的重要因素。

济阳拗陷由东营、惠民、沾化和车镇四个主要凹陷和若干分隔凹陷的凸起组成,浅层沉积物是河流及湖泊演化、古气候变化、海平面升降的天然记录。晚第四纪以来,由于黄河河道不断迁移、气候发生周期性变化,黄河下游地区的沉积环境发生了频繁的变迁,这包括河道迁移、古湖泊进退和海平面变迁等,沉积环境频繁变化使得表层沉积物的展布较为复杂。近年来的油气勘探实践表明,浅层沉积物的岩性、粒度及其空间分布规律会直接影响地震勘探的效果。因此,对这些沉积物综合开展沉积学、地层学研究将有助于剖析济阳拗陷的泥沙分布规律,恢复地质历史时期水系变迁、气候变化和海平面变化的过程。结合近年来的油气地震勘探工作,本书重点对东营凹陷、惠民凹陷和沾化凹陷进行研究总结。

本书利用近地表岩性、速度精细探测手段,重点研究晚第四纪济阳拗陷浅层沉积物的岩性特征、沉积相特征、沉积物分布规律及沉积演化等信息。这些研究工作的开展,有助于查明该区沉积物的时空分布特征,通过研究沉积物与地震响应信号的关系,找到最适合

地震激发的岩性和深度，可直接用以指导地震勘探激发点位布设和激发深度选择，因而具有重要的理论和实际意义，弥补该区第四纪研究的空白。

本书第1章概要介绍济阳拗陷的区域地质背景、研究现状、浅层沉积物特征以及采用的近地表探测方法概述。第2章介绍东营凹陷浅层沉积物的岩性特征、沉积相特征，以及典型地区的浅层沉积物分布规律。第3章介绍惠民凹陷浅层沉积物的岩性特征、沉积相特征，以及典型地区的浅层沉积物分布规律。第4章介绍沾化凹陷浅层沉积物的岩性特征、沉积相特征，以及典型地区的浅层沉积物分布规律。第5章介绍东营凹陷、惠民凹陷、沾化凹陷的浅层精细建模，并且对近地表吸收衰减规律进行分析。第6章介绍近地表岩性精细探测方法，重点介绍本书试验用到的动力岩性探测方法、静力岩性探测方法和近地表岩性测井探测方法，以及利用地震子波识别岩性的方法。第7章介绍近地表速度精细探测方法，重点介绍小折射方法、单井微地震测井方法、双井微地震测井方法、瑞利波方法、三分量多波方法、地质雷达方法。第8章介绍近地表岩土物性参数测试与分析方法，重点介绍描述岩土物理性质的特征参数、测试方法和分析应用。

本书是近10年来对地震勘探实地调查与室内分析的经验总结。突出特点是在叙述一般地质学理论的基础上，利用近年来发展迅速的一些新方法和新技术，对岩土数据进行野外的取样和室内的处理分析，还列举了一些生产中的应用实例。在编写过程中力求做到通俗易懂、深入浅出、概念明确。由于编者水平所限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者
2017年4月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 区域地质背景	1
1.2 区域第四纪沉积研究现状	3
1.3 济阳拗陷浅层沉积物特征及演化概述	9
1.4 近地表探测方法概述	12
第2章 东营凹陷浅层沉积物特征研究	13
2.1 东营凹陷浅层沉积物的岩性特征	13
2.2 东营凹陷浅层沉积物的沉积相特征	31
2.3 典型地区的浅层沉积物分布规律	39
第3章 惠民凹陷浅层沉积物特征研究	55
3.1 惠民凹陷浅层沉积物的岩性特征	55
3.2 惠民凹陷浅层沉积物的沉积相特征	65
3.3 典型地区的浅层沉积物分布规律	74
第4章 沾化凹陷浅层沉积物特征研究	91
4.1 沾化凹陷浅层沉积物的岩性特征	91
4.2 沾化凹陷浅层沉积物的沉积相特征	101
4.3 典型探区（义东地区）的浅层沉积物分布规律	109
第5章 济阳拗陷浅层精细建模及吸收衰减分析	119
5.1 济阳拗陷浅层精细建模	119
5.2 吸收衰减系数的求取方法	129
5.3 近地表吸收衰减对地震波的影响	144
第6章 近地表岩性精细探测方法	151
6.1 近地表岩土分类	151
6.2 动力岩性探测方法	152
6.3 静力岩性探测方法	156
6.4 近地表岩性测井探测方法	160
6.5 地震子波识别岩性	172
第7章 近地表速度精细探测方法	182
7.1 小折射方法	182
7.2 单井微地震测井方法	185
7.3 双井微地震测井方法	187
7.4 瑞利波方法	189

7.5 三分量多波方法	194
7.6 地质雷达方法	205
第8章 近地表岩土物性参数测试与分析方法	208
8.1 岩土物性参数及测定	208
8.2 岩土物性参数分析方法	210
参考文献	226

第1章 绪 论

济阳拗陷近地表沉积是指第四系以来受河流、风力、海潮的影响所形成的浅表地层，以往东部老区勘探对近地表资料重视不够，近地表结构参数不能精确描述沉积介质的特征，缺乏精确的探测方法来有效指导激发条件的优选和静校正参数的选择。近年来，东部老区近地表结构的复杂程度、表层结构精细调查和应用越来越受到重视。尤其是东部老区近地表结构受到黄河不断改道的影响，形成了地表平坦，而近地表横向和纵向上沉积岩性变化剧烈的特点。不同时期形成的沉积叶瓣在横向上互相错动、纵向上互相叠加，形成该地区近地表岩性横向和纵向变化复杂的特点，而这一特点，严重制约了地震资料品质的提高。本章主要概述了济阳拗陷的区域地质背景、区域第四纪沉积研究现状、济阳拗陷浅层沉积物特征及演化、近地表探测方法等内容。

1.1 区域地质背景

1.1.1 济阳拗陷构造位置

济阳拗陷构造上位于渤海湾盆地东南部，由东营、惠民、沾化及车镇四个主要凹陷和若干分隔凹陷的凸起组成（图 1.1）。济阳拗陷总体走向呈北东向，由南向北东撒开，总面积约 26200km²。

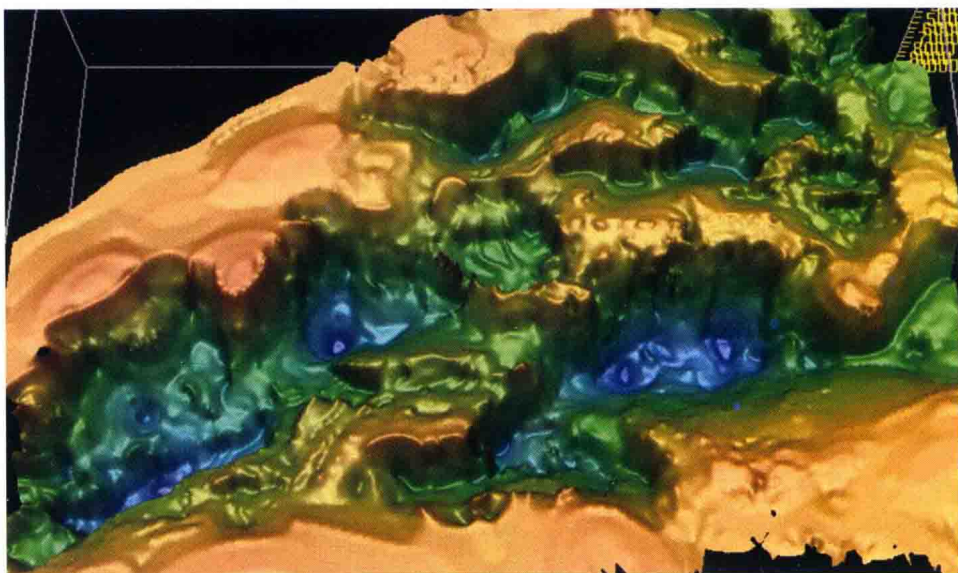


图 1.1 济阳拗陷基底构造形态（摘自胜利油田部署会材料）

1.1.2 济阳拗陷地理位置

济阳拗陷在地理位置上位于山东省北部，东临渤海，西至津浦铁路，北以四女寺河与河北省为界，南至胶济铁路，大体位于东经 $116^{\circ}40' \sim 119^{\circ}$ ，北纬 $37^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 的地理范围，主要分布于山东省东营市、滨州市和德州市境内（图 1.2）。区内有黄河、小清河、徒骇河和马颊河等河流，大部分地区地势平坦，主要分布在黄河下游的冲积平原和入海三角洲地区。济阳拗陷浅层沉积物是河流、风、海洋地质营力共同作用的产物，黄河将泥沙携带到三角洲地区，入海泥沙又会受到波浪、潮汐的改造而重新分配。

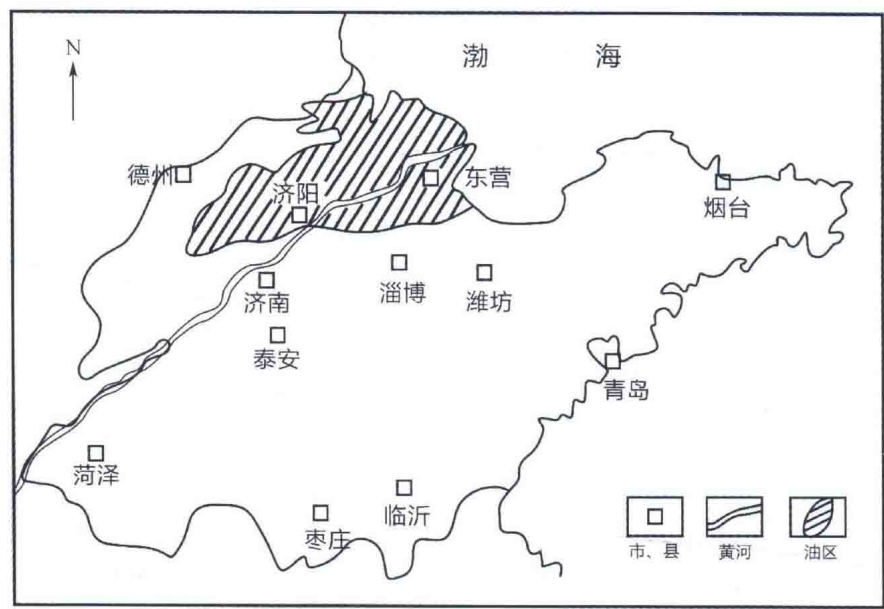


图 1.2 济阳拗陷地理位置示意图

1.1.3 重点代表区地理位置

根据济阳拗陷构造特征，本书重点针对东营凹陷、惠民凹陷和沾化凹陷进行研究，重点区块包括东营凹陷的胜北地区、高 94 地区、草桥地区；惠民凹陷的商河地区、临南地区；沾化凹陷的义东地区、五号桩地区；等等。

东营凹陷北坡和南坡地震资料品质明显不同，近地表特征存在明显差异，选择位于东营凹陷北坡的胜北地区、位于东营凹陷南斜坡高 94 地区和草桥地区（图 1.3）进行研究，解剖东营凹陷近地表结构特征。

惠民凹陷地震资料的主频较低，频宽较窄，呈现出与东营凹陷、沾化凹陷不一样的特征，但整个凹陷内特征基本一致。因此，选择惠民凹陷北部的商河地区、南部的临南地区（图 1.3）进行研究，揭示惠民凹陷的近地表特征。

沾化凹陷位于河海交汇处，因此，选择凹陷东部的五号桩地区和西部的义东地区

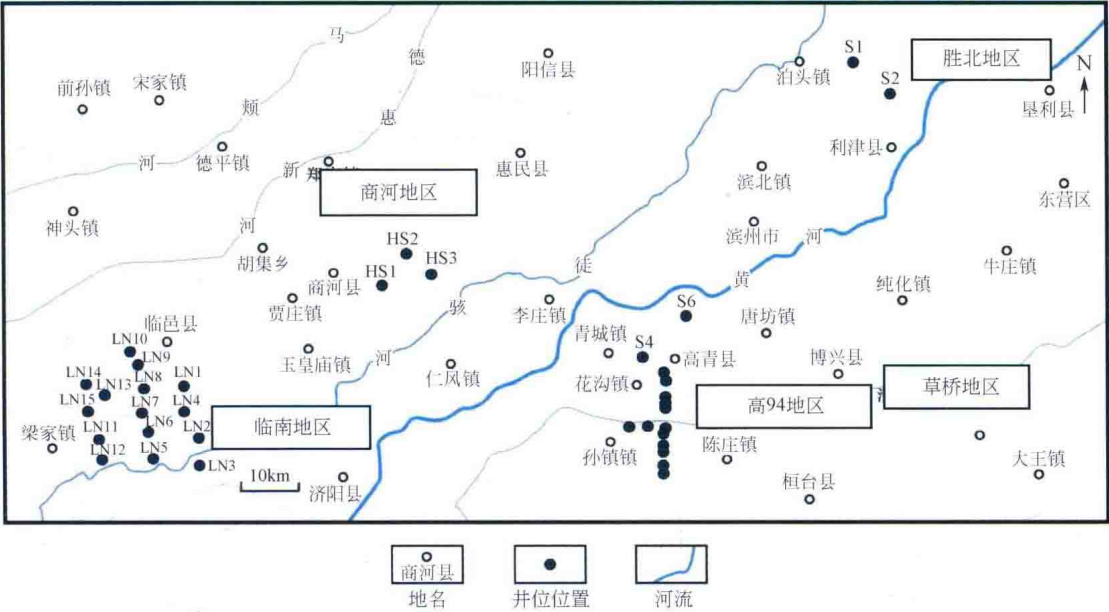


图 1.3 东营凹陷、惠民凹陷重点探区位置图

(图 1.4) 进行研究，解剖沾化凹陷的近地表特征。



图 1.4 沾化凹陷义东地区、五号桩地区位置图

1.2 区域第四纪沉积研究现状

1.2.1 济阳拗陷浅层沉积研究现状

济阳拗陷的地质调查研究始于 1958 年，当时北京地质学院（今中国地质大学）在该

区进行了 1:20 万区域地质调查工作。1960~1964 年,原地质部海洋地质研究所编制了黄河三角洲分流河道图和沉积物分布图。1968 年,水利部黄河水利委员会及河口水文实验队又对该图作了补充,并标出了 1855 年的古海岸线位置。1974~1982 年,中国科学院地球化学研究所对黄河三角洲全新世地层进行了划分,中国冶金地质勘查工程总局山东局水文队对本区地下水进行了调查,水利部黄河水利委员会水利科学研究所对黄河水沙特征进行了研究。总之,1958~1982 年,对黄河三角洲的调查研究主要集中在地形、地貌、沉积物与水沙基本特征的描绘上。从 20 世纪 80 年代中期开始,黄河三角洲的研究进入一个全新的时期。1984 年,在山东省海岸带调查办公室的统一领导下,有关部门联合参加开展了综合性的调查研究,包括气象、水文、地质、地貌及人文经济等方面,其研究成果《黄河口调查区综合调查报告》于 1991 年出版。此后,大量的研究人员对黄河三角洲开展了较深入的专项调查研究,其中较大型的科研项目包括:1985~1987 年,青岛海洋大学与美国合作开展了“渤海中南部及黄河日沉积动力学研究”,对黄河水下三角洲地貌形态及底坡不稳定性作了调查研究;1986~1994 年,中国地质矿产部海洋地质研究所与荷兰合作,先后开展了“黄河三角洲现代沉积作用及其模式”和“黄河三角洲全新世演化及环境地质”的调查研究,在现代黄河三角洲施工了数十个钻孔,对黄河三角洲的沉积动力学、现今陆上三角洲平原部分的三维格架以及全新世以来三角洲的演化进行了详细研究。此外,从 20 世纪 80 年代后期以来,胜利油田邀请有关单位开展了黄河三角洲建港区海洋动力调查、三角洲北岸海域海洋环境地质调查和海上石油平台周围条件的调查等,提供了小范围内详细的海洋动力和底质资料。

近年来,在济阳拗陷开展的第四纪地质研究主要集中在海岸线变迁、三角洲地区海陆相互作用、三角洲沉积特征与模式、三角洲沉积物年代、河道迁移及其环境影响和黄河水系贯通等问题。关于海岸线变迁的研究主要集中在利用史料记载(高善明等,1989;杨玉珍,2008)、古贝壳堤的发育(李绍全等,1987;王强等,2007;杜廷芹等,2008)和海相沉积层的发现等方面(杨怀仁、王建,1990;成国栋等,1991,1997)。三角洲地区海陆相互作用方面的研究主要讨论黄河泥沙向海输送和沉积过程,以及河流、波浪、潮汐共同作用下三角洲沉积的改造作用(叶青超,1982;成国栋,1991;成国栋等,1997;)。三角洲沉积特征与模式的讨论主要集中在三角洲沉积构造(鲜本忠等,2003a;姜在兴等,2004)、三角洲沉积模式和三角洲形成过程(成国栋,1991;成国栋等,1997;林承焰等,1993;姜在兴、王留奇,1994)。三角洲沉积物年代的确定主要用到了 ^{14}C 定年(成国栋,1991;成国栋等,1997;王永吉等,2003)、古地磁定年(杨怀仁、王建,1990;辛春英、何良彪,1991)和 ^{210}Pb 定年的研究(李凤业、袁巍,1992;薛春汀,2009)。河道迁移的影响主要讨论黄河改道对华北平原塑造(张祖陆,1990)和对下游湖泊演化的作用(张维英等,2003;张祖陆等,2004a;袁祖贵等,2005)。杨守业等(2001)结合胜利油田石化总厂附近石化 2 井第四系沉积物元素地球化学特征的变化讨论了黄河贯通的时限。于洪军(1999a)结合渤海-冲绳海槽浅地层剖面记录,讨论了冰期时期黄河流路问题。

1.2.2 东营凹陷浅层沉积研究现状

前人对东营凹陷南斜坡第四纪的研究主要集中在对黄河三角洲的浅层研究,而对南斜

坡的第四纪浅层研究文献几乎没有,在此重点叙述前人研究黄河三角洲的第四纪浅层成果。

近年来,在黄河三角洲地区开展的第四纪地质研究主要集中在海岸线变迁、三角洲地区海陆相互作用、三角洲沉积特征与模式、三角洲沉积物年代、河道迁移及其环境影响和黄河水系贯通等问题。前人关于海岸线变迁的研究主要集中在利用史料记载、古贝壳堤的发育和海相沉积层的发现(薛春汀等,1988;王强等,2007;杨玉珍,2008)。成国栋(1991)对三角洲地区海陆相互作用方面的研究主要讨论黄河泥沙向海输送和沉积过程及河流、波浪、潮汐共同作用下三角洲沉积的改造作用。三角洲沉积特征与模式的讨论主要集中在三角洲沉积构造、三角洲沉积模式和三角洲形成过程(姜在兴等,2003,2004)。

小清河是东营凹陷的主要河流,小清河流域为西起济南,东至渤海湾,南缘泰鲁沂山地北麓,北界黄河之间的区域。在史前及历史时期,小清河流域湖泊广布,在地层沉积记录和古文献记载中均得以证明。这些湖泊形成于早全新世,在中全新世达到鼎盛,晚全新世以来湖泊逐渐衰退与消亡,如原来存在的鹊山湖、浒山湖、清水泊等湖泊,这在古文献中也多有记载,现已在平原上消失。张祖陆等(2004a)通过查阅历史文献、地层剖面分析、地名考证等多种途径和方法对小清河流域湖泊消失的原因进行了研究和分析。认为在气候变干的大背景下,湖泊消失的原因主要有两个:一是黄河泛滥所造成的小清河流域的泥沙淤积;二是疏浚河道、围湖造田、过度利用水资源等人类活动的影响。

陈斌等(2009)对小清河河口附近海域泥沙特征进行了探讨;杜廷芹等(2008)讨论了小清河河口海域冬季悬浮体特征;李福生等(2001)对小清河底部沉积物的放射性水平及其变化规律进行了研究。前人对小清河流域东营凹陷南斜坡第四纪浅层沉积特征的研究却是一片空白。

一直以来,对黄土的研究都是第四纪浅层研究的重点,对第四纪风成黄土的研究,有助于分析第四纪古地理环境和古气候。国内研究得比较多的是西北黄土高原;山东省内的风成黄土报道近几年也逐渐增多,其中山东青州的风成黄土和蓬莱庙岛群岛的风成黄土是前人研究较多的沉积类型。

张祖陆等(2004)利用古生物对比、粒度分析和光释光测年等手段,对山东地区的黄土进行分析得出:山东地区的黄土在不同的地区有差异,说明山东地区黄土物质来源的多样性,胶东半岛渤海沿岸地区与庙岛群岛黄土物源主要来自晚更新世末次冰期出露的渤海陆架风化沉积物,是典型的陆架黄土;而青州以西的黄土堆积则主要是由于西北强气流带来的粉尘,也有少部分陆架黄土。刘乐军等(2000)对鲁中黄土进行粒度分析和野外地质剖面调查得出:鲁中黄土为风成的,主要由低空带来的近源粗粒物质和高空带来的远源细粒物质组成,且主要物源为冰期裸露的莱州湾海底和黄泛平原,同时通过黄土的研究对古气候进行了恢复。彭淑贞等(2007)针对山东青州地区傅家庄黄土剖面进行了粒度分析,并与黄土高原的第四系黄土、北京现代降尘和剖面附近的河流相沉积物进行对比,从沉积学角度得出青州黄土的主要物质来源为沉积区以北的黄泛平原和莱州湾等地出露的海相地层,其次是高空气流携带的西北内陆远源粉尘。张祖陆(1995)对渤海莱州湾南岸平原的黄土阜进行研究,通过黄土沉积特征、粒度结构特征、黏土矿物分析、微体古生物化石分

析和 ^{14}C 测年等手段对黄土阜进行讨论, 研究结果说明莱州湾黄土阜的形成原因和时期为晚更新世, 同样认为黄土的物质来源为裸露的渤海陆架, 并对黄土沉积所代表的古气候进行了总结。郑红汉等(1994)针对山东半岛的大量黄土样品进行热释光(TL)和 ^{14}C 测年得出: 山东半岛最老的黄土层位为 L_q , 年龄为0.8Ma B. P.。曹家欣等(1987)单独对山东庙岛群岛的黄土剖面进行研究, 并通过古生物对比、粒度分析、野外剖面调查和矿物测试等手段说明庙岛群岛黄土的物质来源, 认为黄土来源于近源的海底沉积物和内陆远源粉尘。徐建树(2008)对山东庙岛群岛黄土的粒度特征进行分析, 并讨论了其古环境意义, 通过研究得出庙岛群岛黄土的物源与前人研究的成果相同, 且对黄土所代表的古气候意义作出了分析, 认为在庙岛群岛黄土沉积期经历了6次气候变冷、渤海湾海平面下降和6次气候变暖、渤海湾海平面上升的事件。彭淑贞等(2010)对山东青州地区黄土的地层年代进行了研究, 并对傅家庄黄土剖面进行了系统的磁性地层学分析, 利用光释光测年和黏土矿物分析手段, 结果表明: 青州地区黄土发育的年代未达到布容/松山界限, 且底界年龄在500ka左右, 并通过黏土矿物的对比证明青州黄土的物质来源主要是冰期裸露的渤海湾陆架和黄泛平原的松散物质, 而没有西北内陆粉尘。于洪军(1999b)通过对中国东部黄土成因特征的分析, 总结了我国东部黄土在物源上的多源性类型。孙东化等(2000)利用黄土的粒度参数和粒度频率曲线形态, 分析了黄土所代表的古气候意义。

1.2.3 惠民凹陷浅层沉积研究现状

惠民凹陷浅层沉积特征的研究主要集中于鲁北及华北古河道的研究。

古河道是水系变迁、河流改道、河床演变以后, 遗留在地面或埋藏在地下的地貌类型和地质体, 包括古河床上的河漫滩和河道两部分(袁文英、吴忱, 1991)。

古河道的研究是一门新崛起的科学, 它是介于河流地貌与河床演变学之间的边缘学科。目前, 古河道的研究已得到国内外广大地质学、水资源、农业和建筑等各行业工作者的关注。古河道的研究具有重要意义, 尤其在水利和农业方面, 因其具有砂层厚、颗粒粗、孔隙大的特征, 有利于地下水资源的开采和储存; 在地质方面, 根据古河道的几何形态及其沉积物特征可以分析古河道形成时的水动力条件和气候特征, 恢复古地理环境(孙仲明, 1984)。

华北地区古河道研究始于1959年, 波兰专家安克列兹柯夫斯基为寻找地下水, 对埋深350m以上的古河道进行了研究, 将古河道的概念引入该地区。在国内, 从1961年至今, 河北省地理科学研究所吴忱等一直致力于华北平原古河道的研究, 取得了丰硕的成果; 具体到鲁北地区, 从1984年开始, 山东师范大学张祖陆等结合山东省地貌区划, 对鲁北平原古河道做了精细的文字描述, 并绘制了相关图件(吴忱, 1991)。

华北平原埋深0~50m内, 发育数条南北—北东方向呈条带状分布的砂带, 长100~400km, 宽2~20km, 由各种粒级的砾石、砂、粉砂组成, 吴忱等(2000)从横纵剖面形态、滞留沉积、推移质和悬移质相对含量、沉积旋回、粒度以及沉积构造等方面, 系统总结了其河流相标志, 并证明华北平原中部及南部古河道均由黄河形成。鲁北平原的古河道尤其发育, 大致占全平原区的65%, 张祖陆(1990)将其在纵向上分为地面古河道(埋

深0~8m)和浅埋古河道(埋深8~40m),在空间上分为北部、中部和南部三条主体古河道带,其中中部的一支沿莘县-聊城-茌平-禹城-临邑-商河-惠民-无棣-沾化一带展布,经过商河和临南地区。

华北平原从地表至埋深50~60m的地貌体内,发育多期古河道。吴忱(1991)依据侵蚀面与河床滞留沉积、河流的二元结构、生物化石、地下水类型、重矿物组合、沉积构造等资料从上往下将其划分为六期,并通过 ^{14}C 测年等资料判断第四期古河道时间下界为晚更新世晚期,形成时间为25~11ka前。张祖陆利用粒度、重矿物、孢粉和 ^{14}C 测年等资料将鲁北平原埋深50m以内的古河道从下往上划分为三期,每一期对应一个沉积旋回,从下往上沉积物粒度总体变细。

古河道的发育受多种因素影响,其中气候因素影响最大,它不仅决定温度、降水量的变化,还影响植被、河流水动力条件等因素。张祖陆(1990)等利用孢粉和 ^{14}C 测年资料推测出鲁北平原30~40m深度处古河道开始沉积时间约为25ka前,即晚更新世晚期玉木晚冰期(即末次冰期)开始的时间。许清海和王子惠(1991)研究指出末次冰期以来华北平原的气候发生了较大变化,盛冰期时(距今18ka)气温比现在低 8°C 左右,降水少,气候寒冷干燥;随冰期结束,气温迅速回升,全新世早期(10~7.5ka B. P.)气温与现在相似;全新世中期(7.5~2.5ka B. P.)气候温暖湿润,植被发育,气温较现在高 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,降水量较现在多200mm左右;全新世晚期(2.5ka B. P.至今)气候开始变凉偏干,降至现在的状况。随气候的变化,古河道发育了不同的期次。此外,地貌、生物、新构造运动等也不同程度影响了古河道的发育。

夏东兴等(1993)从沉积物、古气候等角度系统总结了末次冰期以来黄河的变迁,指出晚更新世晚期,即末次冰期时现今的黄河未贯通三门峡,而是以内陆封闭式的水力系统存在,所以华北平原沉积物形成于较小的山前河流和风成沉积,而非黄河,此观点与上述观点相悖。

华北平原古河道,特别是鲁北平原古河道形成机理研究较为成熟。晚更新世晚期至全新世早期,全球气候由末次冰期向温暖的冰后期演变,气候寒冷干燥,此时黄渤海干涸为陆,侵蚀基准面降低,河流下切侵蚀强烈,在间冰期形成的棕红色黏土上形成显著的侵蚀面,随气候转暖,海平面上升,河流发生堆积,但水动力条件较强,沉积以中细砂为主,且厚度较大。全新世早期到中期,全球进入温暖的冰后期,我国东部出现最高海平面,河流侧向侵蚀作用加强,曲流河段发育,沉积以细粉砂为主。全新世中期到晚期,气候又转向温凉偏干,海平面有所下降,沉积物以粉砂、黏土为主,类似于现代黄河沉积(张祖陆,1990)。吴忱等(1992)由此指出世界所有受冰期低海平面控制的外流性大河,普遍发育一期古河流相沉积,并将华北平原的古河道与中国东部,以及全球滨海冲积平原和浅海陆架地区的埋藏古河道进行了对比,得到了良好的验证。

古河道学是河流学、地貌学和地质学的交叉综合学科,所以其研究方法也继承和综合了这三门学科的方法,较为成熟的方法包括:钻探法;电法勘探,包括电测深和电测井;航空电磁法;野外地貌考察法;地质剖面测量与描述法。室内样品分析和测试的方法主要包括:粒度分析;矿物分析;古生物及微体古生物分析;各种微量元素分析;石英表面微结构分析;各种方法的测年(吴忱,2002)。

1.2.4 沾化凹陷浅层沉积研究现状

对沾化凹陷第四纪浅层沉积特征的研究多以黄河三角洲为研究对象,内容涉及古气候演化、海平面升降、黄河河道迁移、地层划分对比、微体古生物、孢粉、测年和矿物组合等方面。

第四纪有 20 多个气候冷暖旋回 (Hays and Shackleton et al, 1976), 末次冰期是距离现在最近的冰期, 时代为晚更新世晚期, 全球海平面比现在低约 130m; 早全新世, 气候转暖, 海平面上升, 并在中全新世 (5 ~ 6ka B. P.) 形成最大海侵界限, 海岸线到达黄骅-垦利等地; 晚全新世以来, 海平面和温度降为现今的水平 (吴忱, 1991; 张祖陆, 1995; 陈清华等, 2002; 鲜本忠、姜在兴, 2005; 成海燕等, 2010)。由于海侵, 晚更新世以来, 黄河三角洲等渤海沿岸的地层可以划分为三个海相层和三个陆相层 (成国栋等, 1986; 王强、田国强, 1999; 刘升发等, 2006; 徐家声等, 2006)。此外, 黄河三角洲等地还形成了数条贝壳线 (孙志国, 2003; 薛春汀, 2009)。

晚更新世 (200 ~ 150ka B. P.) 黄河贯通三门峡进入平原地区, 东流入海 (季军良, 2004; 蒋复初等, 2005)。全新世, 黄河在北到天津南到苏北的地区内多次迁移, 形成多个三角洲, 对华北平原的晚第四纪沉积贡献巨大。黄河高输沙量和下游坡降比小导致了河道频繁迁移。黄河三角洲存在河道双重摆动和沉积体双重迁移: 下游河道摆动, 造成活动超级叶瓣迁移; 分流河道摆动, 造成活动叶瓣迁移 (薛春汀, 2009; 乔淑卿, 2010)。现代黄河三角洲发育存在“大循环”和“小循环”的模式, 即将三角洲岸线在同一水平下的沙嘴延伸、河流改道称为小循环; 将整个三角洲岸线从一个水平推进到另一个水平的过程称为大循环 (叶青超, 1982)。

黄河三角洲晚更新世以来地层划分为三个海相层和三个陆相层 (成国栋, 1986), 以埕岛海域的 DB9 孔为例: 第一海相层为冰后期 (8.5ka B. P.) 的黄骅海侵层 (也称垦利海侵), 埋深 0 ~ 11.0m; 第二海相层为献县海侵层, 形成于晚更新世晚期, 埋深 24.6 ~ 36.0m; 第三海相层为渤海海侵层, 形成于 65 ~ 53.5ka B. P., 埋深 43.8 ~ 52.8m (该海侵只到达渤海中部, 所以有些学者将 127 ~ 75ka B. P. 的沧州海侵作为第三海侵层)。全新世以来, 黄河三角洲经历了一次海侵, 陈清华等 (2002) 建立了黄河三角洲的全新世地层对比, 鲜本忠和姜在兴 (2005) 又做了改进。成国栋等 (1986) 将黄河三角洲全新世地层自下而上划分为三组: 垦利组、五号桩组、钓口组。

王绍鸿 (1988) 在黄河三角洲 650m 深度内划分出 12 个有孔虫层, 并将其作为海相层的识别依据。李建芬 (2010)、成鑫荣 (1987)、朱晓东 (1998)、华棣 (1986) 分别在渤海湾西部、长江口、江苏辐射沙洲潮滩、杭州湾北岸潮滩识别出了不同沉积相带的有孔虫组合。在古气候的恢复研究中, 孢粉是重要的标记物之一, 宋键等 (2009) 通过对青岛地区的钻孔孢粉样品分析, 将山东沿海地区晚更新世以来的气候变化划分为五个时期; 高善明等 (1989) 通过黄河三角洲刁口西部的 G96 孔孢粉分析, 恢复了黄河三角洲的发育历史、古地理环境演变。

黄河沉积物的特征矿物是方解石, 含量为 2.19%, 轻矿物中石英含量一般小于长石

(孙白云, 1990)。重矿物含量平均为 1.51%, 重矿物组合以云母-普通角闪石-绿帘石为特征, 次要矿物为磁铁矿、钛铁矿、褐铁矿、石榴子石和白云母(林晓彤等, 2003; 王昆山等, 2010)。

从不同区域的研究现状来看, 很多工作需要加强:

(1) 济阳拗陷整体上浅层钻孔的取样较少, 不能从整体上了解全区浅层沉积物的岩性特征, 因此要重新钻孔取心, 对第四纪浅层沉积物岩性做一个直观的了解; 济阳拗陷浅层沉积微相研究相对薄弱, 因此需要加强沉积微相的研究。

(2) 济阳拗陷第四纪浅层沉积物时空展布特征不清, 因此要通过钻孔取心、静力触探等手段对该区第四纪浅层沉积物的时空展布规律进行分析; 济阳拗陷第四纪浅层地层没有一个系统的沉积结构模型, 因此有必要建立第四纪浅层地层的沉积结构模型, 从空间上分析地层的沉积形态和特征。

(3) 地质沉积特征与地球物理响应综合研究空白, 全部集中在第四系沉积的地质现象、特征的分析, 对于这些特征对地震弹性波的影响基本没有研究, 需要利用这些地质特征进行地震响应模拟、测试, 总结地震响应的规律与近地表结构特征的关系。

(4) 针对冲积平原岩土探测方法阐述比较少, 没有形成系统的探测方法。

由于以上问题的存在, 不能很好地研究济阳拗陷浅层沉积特征的变化, 更不能通过对沉积物特征的精细刻画, 构建精细的地质模型, 并指导地震勘探激发点位的布设及选取最佳激发层位。

1.3 济阳拗陷浅层沉积物特征及演化概述

浅层沉积物特征可以通过钻井取心、室内测试、剖面露头和静力触探等力学方法进行研究, 为此, 在济阳拗陷浅层共布置钻孔取心 52 个, 其中东营凹陷高青地区 15 个、胜北地区 2 个、草桥地区 3 个、惠民凹陷商河地区 3 个、临南地区 15 个、沾化凹陷义东地区 14 个; 布置静力触探 610 口, 其中东营凹陷高青地区 78 口、胜北地区 176 口、草桥地区 100 口、惠民凹陷商河地区 86 口、临南地区 81 口、沾化凹陷义东地区 89 口; 布置多条野外露头剖面, 通过大量沉积物样品的取样分析, 确定了沉积物类型包括中砂、细砂、粉砂、泥等, 以及泥质粉砂、粉砂质泥等中间类型。

1.3.1 东营凹陷浅层沉积物特征

东营凹陷高 94 探区浅层岩性较细, 主要为泥质粉砂、含泥粉砂及粉砂质泥。自南到北第四纪浅层沉积相从小清河以南为风成沉积, 小清河以北 12km 左右为风成沉积与河流沉积混合相带, 再向北为黄河及其分支的河流相沉积。高 94 探区从南到北第四纪浅层沉积相为风成沉积-风成沉积与河流沉积的混合相带-河流相, 沉积物的搬运介质由空气逐渐变为水, 岩性逐渐由疏松变致密, 渗透性由好变差, 因此自南向北潜水面逐渐变浅, 所以在探区沉积物的成因机制及搬运介质决定了潜水面的深度, 这一成果从沉积学的角度解释了小清河南北潜水面深度的差异, 地震炮井布置应该小清河南北有别。草桥探区沉积特征

与高 94 探区类似，都是风、河流、湖泊、海洋共同作用的结果。

1.3.2 惠民凹陷浅层沉积物特征

惠民凹陷商河地区和临南地区岩性较粗，包括中砂、细砂、粉砂和泥，以粉砂和泥等为主，各钻孔中岩性下粗上细，韵律性明显，自下而上发育三个沉积旋回。惠民凹陷浅层主要发育河流相沉积，即第四纪古河道。古河道依据粒度、孢粉、 ^{14}C 测年可以自上而下划分为三期。下部第三期古河道形成于晚更新世晚期到早全新世，该时期气候寒冷干燥，沉积物粒度较粗；第二期古河道形成于早全新世到中全新世，该时期气候温暖湿润，沉积物粒度较细；第一期古河道形成于中全新世到晚全新世，由于黄河频繁决口改道，该期古河道沉积物粒度最细。惠民凹陷浅层古河道分布较稳定，离地表 12m 以下，徒骇河和土马河之间宽度约 4.5km 主要为粉-细砂及少量中砂，不适合激发，土马河以北适合激发。东营凹陷胜北地区除发育三期古河道之外，还受海侵影响，两套海侵层深度分别为 7~8m 和 12~15.5m，沉积物多含贝壳碎屑，质地疏松，不适合激发；18m 以下发育第三期古河道，沉积物以砂质为主，也不适合激发。而 16~18m 大致为第二期和第三期古河道交界处，沉积时气候转暖，海平面上升，河流水动力条件较弱，沉积物以泥质为主，较致密，因此胜北地区合适激发的层位建议在埋深 16~18m 处。

1.3.3 沾化凹陷浅层沉积物特征

沾化凹陷义东地区浅层沉积物类型丰富，岩性相对较细，主要为粉砂、泥质粉砂和粉砂质泥。细砂和泥分布较少，其中细砂主要分布在 19m 以下深度内，泥主要分布在该区的东北部。该区普遍发育两套贝壳层，深度分别为 5~7m 和 18~20m。海平面的升降和黄河河道的迁移是影响义东地区沉积相的主要因素。晚更新世晚期到早全新世，气候寒冷干燥，海平面降低，主要发育河流相；早全新世晚期到中全新世，气候转暖，海平面升高，该区形成一次大规模的海侵，发育潮坪相和浅海相；晚全新世，气候演化为现今的水平，黄河流经义东地区，形成三角洲沉积。自下而上沉积演化依次为：河流相-潮坪相-浅海相-潮坪相-三角洲相，沉积相带的边界与地层边界基本一致。义东地区第一、二单元为三角洲和潮坪沉积，沉积物以粉砂和泥质粉砂为主，岩性较粗，且深度较浅，不适合作为激发层；第五单元为古河道沉积，形成于寒冷偏干的气候条件下，粒度最粗，以细砂和粉砂为主，也不适合作为激发层；第三单元的 12~14m 为浅海相沉积，岩性以泥和粉砂质泥为主，厚度大、分布稳定，适合作为激发层；第四单元的 16~18m 为潮坪沉积，岩性以粉砂质泥为主，同样厚度大、分布稳定，也适合作为激发层。

1.3.4 济阳拗陷浅层沉积演化

济阳拗陷浅层是河流、海洋、湖泊、风等多种地质营力共同作用的场所，发育了河流相、湖泊相、风成相、三角洲相、潮坪相和滨浅海相等多种沉积相类型。

晚更新世晚期至早全新世早期，正值末次冰期盛冰期（即玉木冰期第三冰期），全球