

渤海湾

油气勘探开发工程

技术论文集(第十一集)

上册

董法昌 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

渤海湾油气勘探开发 工程技术论文集

(第十一集)

上 册

董法昌 主编

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

渤海湾油气勘探开发工程技术论文集. 第11集/董法昌主编.
—北京:中国石化出版社,2006
ISBN 7-80229-171-2

I. 渤… II. 董… III. ①渤海湾-油气勘探-文集
②渤海湾-油田开发-文集 IV. P618.130.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 100489 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 30.5 印张 4 彩页 762 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

定价:86.00 元(上、下册)

山东海盛海洋工程集团有限公司简介



董事长：王乃山



总经理：许风雪



海盛集团公司办公楼

山东海盛海洋工程集团有限公司(简称海盛集团公司)是在原胜利油田浅海工程有限责任公司的基础上设立的一家综合企业集团。

海盛集团公司现拥有工程、船务、车队3个分公司，化工、畅海、航务、电气4个子公司，从业人员931人，高中级管理、技术人员100余人，其中高级管理、技术人员60余人。集团公司秉承“诚信、发展、超越”的企业宗旨，以构建海洋工程施工为主导、多元发展的一流企业集团为目标，全力实施“立足浅海、跻身海洋”的发展战略，依托胜利浅海大市场，企业实力不断壮大。2005年产值突破2.8亿元，现产业规模和生产经营能力达到3亿多元。公司与高校联合成立了电气、化工产品研发中心，目前，化工、电气产品、井下技术服务等项目已打入中石油、中海油、中石化等外部市场。集团公司生产经营范围由浅海工程施工、浅海石油开发与技术配套服务、海上运输为主，拓展到化工、电气产品制造等十几个门类和领域，现已发展成为拥有各类机动设备600余台套，固定资产原值11666万元的企业集团。

海盛集团公司现注册资本6198万元，具有三级施工资质和省级机电安装资质。所属子(分)公司主营业务都通过了ISO 9000国际质量体系认证，安全管理体系取得由省海事局颁发的《中华人民共和国船舶安全营运和防止污染管理规则》符合证明。集团公司及所属子(分)公司连续三年获得省级守合同重信用企业称号、中国农业银行省分行“AAA”级信用等级证书，市级安全评估A(优秀)级企业、先进航运公司等荣誉称号。

海盛集团公司董事长王乃山、总经理许风雪携全体员工向社会各界致意！

山东海盛海洋工程集团有限公司

船务分公司简介

山东海盛海洋工程集团有限公司船务分公司（简称船务公司）是隶属于山东海盛海洋工程集团有限公司的专业化船舶公司。

船务公司创建于2002年2月，是以海上石油生产为依托，从事沿海、浅海及潮间带海上原油、人员、物资运输，同时进行船舶租赁、维修等作业，是一家功能齐全、服务配套的综合性专业化公司。经过4年拼搏，公司现拥有各型船舶18艘，其中800吨级以上油轮5艘，交通艇17艘。公司还拥有污水水回收站和船修队及加工车间，承揽海港各类机械设备设施机电维修。公司尽心竭力辅助海上原油生产，担任着维护海洋安全环保的重任。

船务公司将船舶安全、人身安全放在首位，船舶运行严格依照海上安全作业标准，定期迎接海事部门审查。2004年，船务公司在山东省范围内率先通过了MSE（即安全管理体系）审核，见证了公司的管理与服务水平。目前，公司已迅速发展成为埕岛海域实力雄厚的集体所有制水上运输中型企业。



原油装载



海运12号



海运9号

前 言

根据 2005 年 9 月在辽宁省丹东市“第十届渤海湾浅(滩)海油气勘探开发工程技术研讨会”商定结果, 2006 年度“第十一届渤海湾浅(滩)海油气勘探开发工程技术研讨会”将由山东石油学会主办。为提高技术研讨会效果, 根据前十次研讨会取得的经验, 山东石油学会海洋勘探开发专业委员会在与各单位协商的基础上, 结合研讨会主题, 下发了技术研讨会征文通知。研讨会主要内容有:

- (1) 国内外浅(滩)海油气勘探开发技术现状及发展前景展望
- (2) 浅(滩)海地震勘探配套技术
- (3) 海上油气藏勘探开发新思路、新方法
- (4) 浅(滩)海钻采工艺配套技术
- (5) 浅(滩)海勘探开发一体化技术
- (6) 海上油藏生产测试技术
- (7) 海上油藏开发和调整的新技术新方法
- (8) 海上提高最终采收率技术
- (9) 与海洋石油开采相关的其他技术工艺
- (10) 浅(滩)海海工工程设计及施工技术
- (11) 浅(滩)海安全环保技术

山东石油学会海洋勘探开发专业委员会挂靠单位中国石化胜利油田分公司海洋采油厂, 山东石油学会挂靠单位领导对此十分重视, 积极组织有关人员专门负责论文征集、修改和汇编工作。为提高论文集的技术权威性、学术参考价值和技术研讨会知名度, 海洋勘探开发专业委员会通过多方协调, 由中国石化出版社正式出版发行该论文集。

《渤海湾油气勘探开发工程技术论文集》第十一集上册收录了来自山东石油学会 12 个单位的论文 38 篇, 论文学科专业涉及范围较广, 主要包括油气勘探、油藏描述、油田开发、采油工艺、机械采油、工程地质、地面工艺、海工工程、安全环保技术等。在编写过程中, 由于时间紧、工作量大、加之自身知识水平有限, 存在问题和不足之处在所难免, 敬请批评指正。

**《渤海湾油气勘探开发工程
技术论文集》(第十一集)
上册编委会**

主 编：董法昌

副 主 编：董贤勇

编委成员：刘效国 杨 柳

顾 问：周长江 刘鸿祥

目 录

油气勘探

- 桩海地区中生代—新生代构造演化——应用平衡剖面技术 邹东波 余朝华 吴时国(1)
新滩油田油气藏分布特征及控制因素分析 晁 静(9)

油藏描述

- 相干分析在埕岛地区曲流河砂体描述中的应用 刘 刚 邹东波 宋艳芳(16)
利用劳伦兹系数定量评价储层宏观非均质性 李 健(20)
三重压敏介质油藏不稳态产能变化特征研究 赵冬梅 王子胜 姚 军(25)

油气开发

- 海上埕岛油田开发政策探讨 刘效国 杨 柳(30)
胜利浅海埕岛油田难动用储量开发研究 杨小平(37)
EDC 公司在埕岛西开发中的新思路和新技术 董新昌(45)
埕岛油田馆陶组老区开发潜力及对策研究 张巧莹(52)
胜利海上垦东 34 块气顶油藏气井合理产能优化研究 于东海 王世艳(57)

钻井技术

- 地质导向技术在浅海油田钻井中的应用 赵学友 王安亮 邱文德等(62)
胜利浅海油田钻井液技术应用与探讨 鹿洪友 赵学友 胥洪彪(69)

防砂工艺

- 胜利海上埕岛油田馆陶组油层高压砾石充填防砂工艺技术的研究应用 任云利(77)
疏松砂岩油藏膨胀筛管裸眼防砂技术 周思宏 朱骏蒙 和忠华(86)
疏松砂岩油藏压裂防砂一体化技术 陈泽江 智勤功(91)

采油工艺

- 胜利海上稠油提高开发效果配套工艺技术 周思宏(97)
海上油田大斜度井分层注采井筒管柱技术 李常友 刘玉国 郑金中等(103)
水力喷射泵在海上油田的应用探讨 祝庆远 张福涛 顾国立(110)
潜油电泵机组离心旋流式高效油气分离技术 董贤勇 孙富旺 王芸华(114)
胜利滩浅海油藏勘探试油工艺技术 刘玉国 李常友 郑金中(123)
海上油田在线调剖工艺技术 田玉芹 张冬会 刘 军等(135)

海工设计

- 浅海单井早期生产试验平台的研究设计..... 李广军(145)
埕岛油田栈桥结构设计及分析..... 李文峰 胡洪勤(150)
礁石区海底管线的路由布置及石方计算..... 邵怀海 刘锦昆 李文峰等(154)

海洋工程

- 胜利浅海石油开发回顾与展望..... 胡洪勤(158)
浅海采油井口平台的发展与展望..... 李敬波 路国章(164)
新型水下基盘结构在埕岛油田井口平台中的应用..... 崔书杰 冯春健 路国章(167)
浅海采油平台的现状与展望..... 李广军(171)

地面工艺

- 埕岛油田海底输油管线流体摩阻规律初探..... 董贤勇 孙富旺 王绍忠(179)
火炬放空新型电子点火技术在海上埕岛油田的应用..... 孙富旺 冉绍春 徐希玉(184)
埕岛油田油井结垢分析及防垢技术研究..... 梁立民(189)
泄漏定位监测报警系统在海底输油管道的运用..... 梁立民(198)
集肤效应电伴热在集输管道上的应用研究..... 孙广领(207)

自动化控制

- 浅谈海上石油设施火灾自动报警系统的设计..... 纪现壮(211)
SIEMENS 自动化监控系统在埕岛东部 CB30 区块的应用 孙富旺 王绍忠 张泉城(216)

安全评估

- 海洋平台损伤检测的发展现状与展望..... 张兆德(222)
浅海水域座底式平台安全定位措施与监测技术..... 田海庆 李德堂(231)
海底管线附近沉积物迁移机理及危害防治..... 孟凡生 徐爱民 杨宝真等(234)

桩海地区中生代—新生代构造演化 ——应用平衡剖面技术

邹东波¹ 余朝华² 吴时国³

(1. 胜利油田分公司物探研究院; 2. 中国科学院海洋研究所,
中国科学院研究生院; 3. 中国科学院海洋研究所)

摘要 平衡剖面技术是一种重要的用来研究沉积盆地构造演化历史的有效方法。通过对沉积盆地构造演化历史的研究, 有利于研究区油气勘探和开发工作的开展。为了研究桩海地区的构造演化历史, 选取了横贯研究区的两条地震测线, 利用平衡剖面技术恢复出了这两条剖面在各个沉积历史时期的原始沉积剖面。基于对这两条测线平衡剖面的分析, 结合区域地质资料, 将桩海地区中生代以来的构造演化历史分为四个阶段: 三叠纪到侏罗纪中期的印支运动褶皱发育期、晚侏罗纪到白垩纪燕山运动断陷和挤压发育期、早第三纪断陷发育期、第四纪拗陷期。并分别讨论了各期的构造特征和原因。

关键词 平衡剖面 构造演化 构造复原 构造解释 济阳拗陷 渤海湾盆地

1 前言

平衡剖面技术起源于 20 世纪早期, 是一种用来分析沉积盆地构造演化过程行之有效的技术手段。Chamberlin (1919) 最早用平衡剖面技术计算了下伏同期褶皱的滑脱深度^[1]。Bucher (1933) 首先提出了建立平衡剖面的两条基本原则: 层长不变和构造特性原则^[2]。到了 20 世纪 60 年代以后, 随着计算机技术的飞速发展和石油地质勘探工作的深入, 平衡剖面技术在石油勘探和开发上的应用越来越广泛。Dahlstrom (1969) 给出了平衡剖面的明确定义: 从变形状态恢复过来的沉积时的剖面^[3]。Ramsay (1987) 在解释平衡剖面的概念时用天平图示形象地说明变形前后的物质是不变的, 在地质解释中就是保持两者相等^[4]。到了 20 世纪后期, 平衡剖面技术趋于完善和成熟。

由于平衡剖面将剖面变形前后的状态有机联系起来, 因此, 通过变形前后的应变分析, 可以定量得出地层的变形过程和变形量的大小, 并可以推测变形过程中应力场的变化情况。这些结论对于我们了解和掌握研究区的构造演化是非常有益的, 再结合其他的地球物理资料和地质资料, 就可以清楚地得出研究区的构造模型和演化历史。

桩海地区位于济阳凹陷的东北部(图 1), 是渤海湾盆地重要的含油气区域之一, 大量的油气富集在第三系和前第三系两套含油气储集层中。中生代以来, 该地区经历了多期次的构造运动——印支运动、燕山运动、喜山运动, 因此, 该地区形成了异常复杂的断裂体系。本文在对横贯本地区的两条地震测线进行精细处理和解释的基础上, 建立了这两条测线的平衡

邹东波, 工程师, 1993 年毕业于西北大学地质系, 现从事地震资料解释及综合研究工作。地址: 山东省东营市北一路 210 号物探研究院桩孤室, 邮编: 257022, 电话: 0546-8702761, 传真: 0546-8702751, E-mail: slzdb@mail.slof.com。

剖面, 并对该地区的构造演化历史进行了深入探讨和分析。

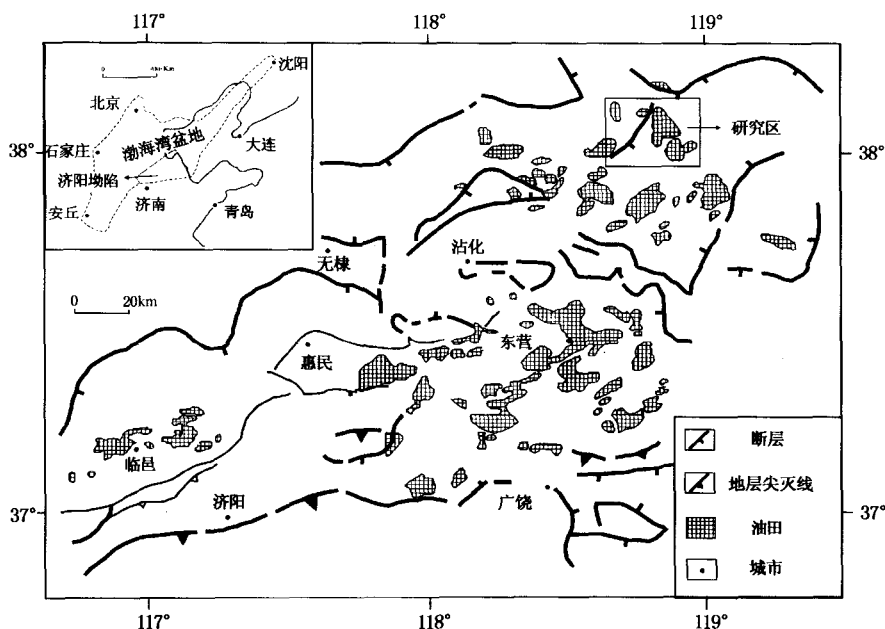


图1 桩海地区构造位置图

2 平衡剖面的建立

建立平衡剖面的最基本原理就是物质不灭原理, 无论如何在地层变形前后物质的总量是应该保持不变的。此后, 随着研究的深入和面临的问题越来越复杂, 人们又相继提出了三条具体的平衡原理: 层长不变、面积不变和体积不变。层长不变原理就是指变形前后地层线的长度保持不变。面积不变原理指的是在剖面上, 变形前后地层线之间或者是不整合面之间所包络的面积保持不变。体积不变原理指的是变形前后在三维空间内, 地质体的体积保持不变。它主要是针对在复杂构造区域进行三维平衡剖面或者当剖面走向与地质构造走向不相垂直时应用, 它除了考虑到地质体平面上的展布, 还要考虑其空间构形。在本文中, 剖面的平衡主要应用面积平衡原理。

建立平衡剖面的过程, 主要有两种方法: 正演法和反演法^[7](刘光炎等, 1995)。正演法是由原始未变形的剖面演化至构造变形后的剖面, 通过不断改变正演计算使用的主要变量, 如: 断面的几何形态、地层厚度、断层数目及位移量等, 直到我们最后得到的剖面与现今变形后的剖面基本一致^[6](肖安成等, 1994)。反演法正好相反, 它是从变形后的剖面出发, 最终得出剖面变形前的状态。本次研究过程中采用的是反演法^[7](刘光炎等, 1995)。

随着计算机科学技术的发展, 特别是超级计算机的出现, 人们建立平衡剖面由原始的手工处理逐渐转变为计算机程序处理。从 20 世纪 80 年代起, 国外相继有人开始研制用计算机进行剖面平衡的软件, 如 Cogneseis 公司的 GEOsec 软件, Midland Valley 公司的 2Dmove 和 3DMove 软件。本文中的平衡剖面都是通过 2Dmove 软件建立的。

为了分析桩海地区的构造演化历史, 选取了两条东西向、横贯研究区的地震测线(1783 和 1596 测线)来建立该研究区的平衡剖面(图 2 和图 3)。

由于桩海地区经历了多次构造运动的改造,研究区内不整合面广泛发育(表 1),在对两条地震剖面进行复原前,有必要将各地层的剥蚀厚度计算出来,然后经过压实校正,才能得到地层沉积时的厚度和正确的原始剖面。恢复地层剥蚀厚度的方法很多,如:裂变径迹法^[8](周礼成等, 1994)、波动分析法^{[9][10]}(王毅等, 1999; 张一伟等, 2000)、镜质体反射率法、天然气平衡浓度法^[11](李明诚等, 1996)、宇宙成因核素法^[5](Lasette G M 等, 1987)等,在本次研究过程中,通过钻井岩心资料建立起研究区岩石孔隙度(Φ)与深度(h)的函数关系,然后通过不整合面上、下孔隙度的大小和变化趋势,计算出剥蚀厚度。前人对该方法的研究已经相当成熟和完善,在此不再累述。

表 1 济阳凹陷中生代-新生代区域地层特征简表

界	系	统	组(阶)	段	厚度/m
新生界 Kz	第四系 Q	全新统更新统	平原组 Qp		210 ~ 430
	上第三系 N	上新统	明化镇组 Nm	明上段	100 ~ 1200
				明下段	
		中新统	馆陶组 Ng	馆上段	80 ~ 500
				馆下段	70 ~ 600
	下第三系 E	渐新统	东营组 Ed	东一段	140 ~ 300
				东二段	170 ~ 200
				东三段	160 ~ 300
			沙河街组 Es	沙一段	100 ~ 400
				沙二段	30 ~ 310
				沙三上	240 ~ 310
				沙三中	200 ~ 550
				沙三下	300 ~ 450
				沙四上	270 ~ 350
				沙四下	300 ~ 400
			孔店组 Ek	孔一段	100 ~ 800
				孔二段	100 ~ 600
				孔三段	100 ~ 200
		古新统			
中生界 Mz	白垩系 K	上统	王氏组		0 ~ 270
		下统	青山组		> 700
	侏罗系 J	上统	蒙阴组		0 ~ 200
		中统	三台组		350
		下统	坊子组		400

根据上述原则以及平衡剖面的原理和计算模型,在对两条地震剖面进行精细处理和解释后(图 3 和图 4),采取逐层回剥的方法获得了一系列的复原剖面(图 5 和图 6)。

3 构造演化分析

基于这两条平衡剖面给我们的信息和启示,结合本区地质资料、钻井资料、测井资料,我们将桩海地区中生代-新生代构造演化历史划分为四个阶段,分述如下。

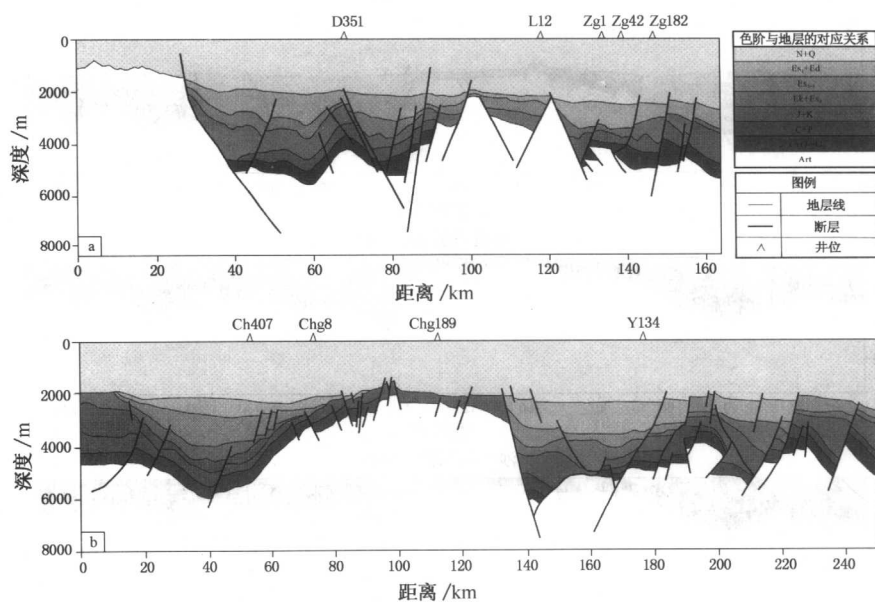


图4 1783(上幅)和1596(下幅)测线解释剖面

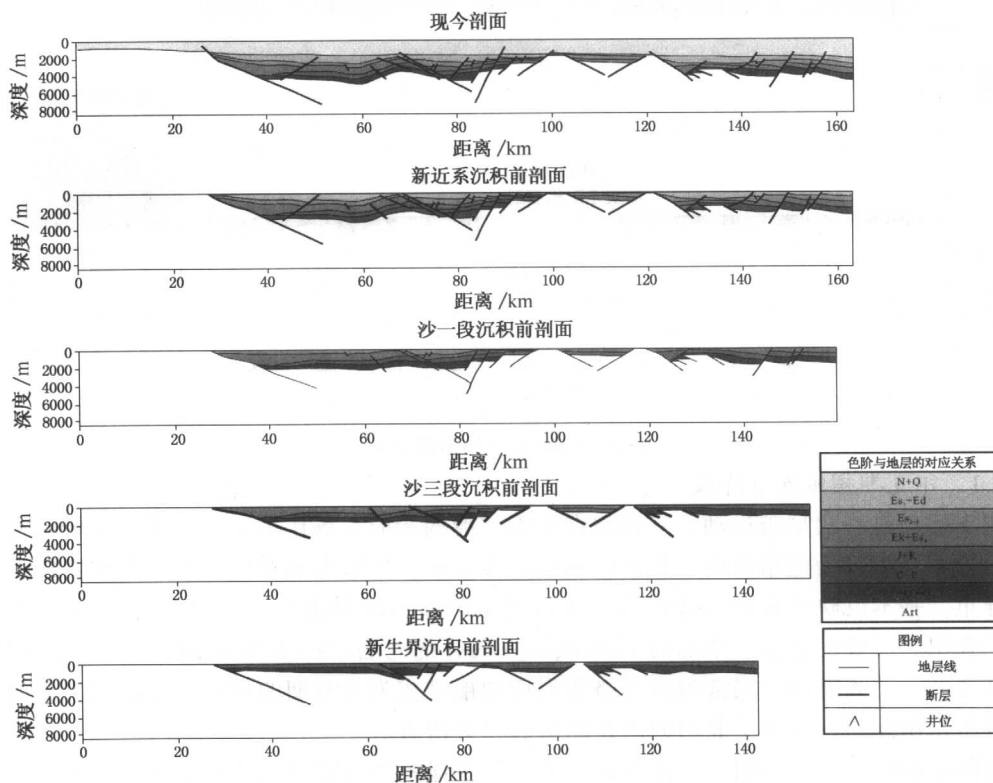


图5 1783 测线构造演化图

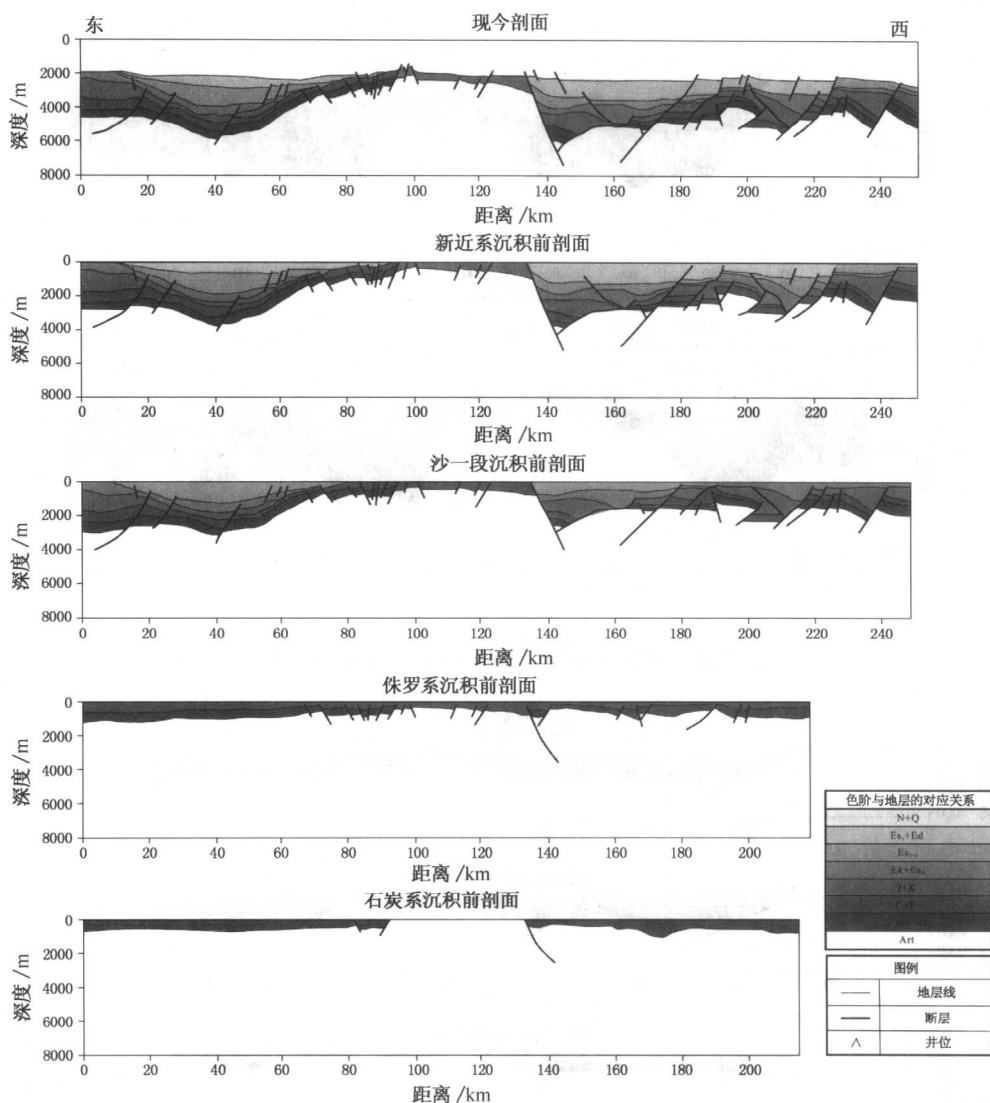


图 6 1596 测线构造演化图

3.1 印支期褶皱发育阶段

印支运动是一次褶皱运动。三叠纪在左旋走滑构造应力场作用下，形成了旋转构造——帚状褶皱系，表现为近东西向、北西向的构造线方向，构造形态宽缓，下—中侏罗统的残留地层分布，基本反映当时的构造走向。从这两条剖面可以看出，北部的 1783 线缺失了石炭纪、二叠纪、三叠纪地层，南部的 1596 线缺失三叠纪地层。J+K 沉积前，整个盆地的地势是东高西低、北高南低。局部地区受挤压形成的褶皱成为古时期的高地。三叠纪末期的印支运动挤压作用强烈，形成了北西向的逆断层和相关褶皱。

济阳坳陷钻井资料表明，大部分地区中下罗统煤系地层覆于二叠系上石盒子组之上，石炭二叠系统残留度 500m 至近千米，反映印支运动造成本区地势起伏不平，相对隆起区古生界遭受较强烈的剥蚀，而相对低洼区剥蚀较弱，上古生界保留较完整，这种相对隆起区与相对低洼区有相间排列之势。印支期本地区存在一系列北西走向的压性构造线，而且主要类型

是逆冲断层，伴之以褶皱构造(见表 1)。

晚侏罗世 - 早白垩世，华北板块东部受滨太平洋构造域，形成了众多的断陷盆地。这时郯庐断裂表现为走滑拉张作用，在走滑活动的控制下，分支断层间块体逃逸产生北东向走滑拉分盆地群。在燕山运动的中期，发生了强烈伸展作用，这一点可以从这 1596 和 1783 两条测线在 J + K 时期和 Ek + Es₄ 的伸展量及伸展率可以看出(表 2 和表 3)，这一伸展致使早期逆断层负反转形成北西向断陷盆地。

表 2 1783 测线 I、e、β 统计表^①

时 期	I/km	e/%	β
N + Q	0.467	0.29	1.0029
Es ₁ + Ed	4.099	2.58	1.0258
Es ₂₊₃	10.038	6.58	1.0658
Ek + Es ₄	21.159	14.95	1.1495

① I，剖面伸展量；e，剖面伸展率；β，现今剖面与各时期剖面程度比值。

表 3 1596 测线 I、e、β 统计表

时 期	I/km	e/%	β
N + Q	0.582	0.22	1.0022
Es ₁ + Ed	3.196	1.20	1.0120
J + K	35.947	15.26	1.1526
C + P	39.783	17.16	1.1716

I，剖面伸展量；e，剖面伸展率；β，现今剖面与各时期剖面程度比值。

3.2 燕山期断陷和挤压发育阶段

燕山运动在渤海湾地区表现强烈，济阳坳陷侏罗白垩系的分布受断裂的控制，存在于断层的下降盘，加之沉积建造特征，均说明它们是裂陷作用的结果。与此同时侏罗白垩系中还存在着逆冲断层和褶皱构造，它们是挤压作用的产物。上述现象说明燕山运动表现为伸展断陷和挤压褶皱交替发生，由于桩海地区处于济阳旋扭构造的外旋构造，形成较为宽阔的背向斜，所以中、下侏罗统总体地层分布广泛，厚度大。

早白垩世晚期 - 晚白垩世，郯庐断裂的表现为左行平移活动，燕山运动末期在济阳坳陷表现出强烈的挤压特征。本区钻井揭示的压性构造有桩西地区桩古 29 井逆断层。从以上资料，并结合邻区地质资料认为济阳坳陷中、古生界的压性构造是普遍存在的。这些北北西 - 近南北向压性构造的产生与郯庐断裂的左行平移活动有关。在 1596 线的东侧发育有逆断层，这是受郯庐断裂的影响所致。

3.3 早第三纪断陷发育阶段

早第三纪是渤海湾盆地的主要伸展裂陷期，众多的伸展断层活动强烈。济阳坳陷主要断裂均切割基底，属于基底断裂，它们大多继承了早期的断裂构造，或形成于古近纪，多以正断层性质为主。桩海地区处于郯庐断裂和北京 - 蓬莱断裂的交汇处，是重要的走滑伸展构造区，其伸展量较大。

3.4 第四纪断陷作用阶段

第四纪属于渤海湾盆地的后裂陷期，断裂活动减弱。在桩海地区，新的地层沉积在不整合面之上，沉积中心向北迁移，沉积盆地主要受控于郯庐断裂的右行走滑，沿着郯庐断裂带发生挤压，形成反转构造，此后，盆地趋于稳定的成盆期，直至形成现今的状态。

4 结论

综上所述,通过对横贯研究区的两条平衡剖面的分析,可以得出以下结论:(1)在三叠纪到侏罗纪中期,桩海地区的东部和北部的地势要比南部和西部的高,这是由于印支运动造成的强烈挤压和地层上隆造成的。这一时期形成了盆地的原始框架,以及北西向展布的断层体系。(2)在晚侏罗到早白垩纪时期,整个研究区处于一种断陷和沉降的状态中。早白垩世晚期-晚白垩世,燕山运动末期在研究区表现出强烈的挤压特征,这一时期的构造应力场主要由郯庐断裂的北北西向的走滑所控制。(3)早第三纪裂陷时期,研究区发生伸展,在不整合面之上,新的地层不断沉积下来,此时的构造应力场是受控于郯庐断裂带活动的。(4)到了第四纪时期,研究区断裂活动减弱,沉积盆地主要受控于郯庐断裂的右行走滑,沿着郯庐断裂带发生挤压,形成反转构造。

对于研究区的进一步深入研究,有待于我们能够更精确地建立该地区的构造演化模型,特别是开展古应力场的研究和恢复工作。通过研究该地区的构造演化历史,有利于开展研究区油气藏,特别是潜山油气藏的勘探和开发工作,从而更好地服务于生产实际。

参 考 文 献

- 1 Chamberlin R T. The building of the Colorado Rockies Journal of Geology. 1919. 27
- 2 Bucher W H. The Deformation of the Earth's Crust. 1933
- 3 Dahlstrom C D A. Balanced Cross Section Canadian Journal of Geosciences. 1969. 6: 743 ~ 759
- 4 Ramsay J G and Huber M I. The techniques of modern structural Geology. 1987. V. 2. Folds and Fractures (London: Academic Press)
- 5 Lasette G M, Green P F and Duddy I R et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2a quantitative analysis Chemical Geology 1987. 65: 11 ~ 13
- 6 肖安成. 平衡剖面的正演模拟方法. 江汉石油学院学报, 1994, 16: 1 ~ 7
- 7 刘光炎, 蒋录全. 平衡剖面技术与地震资料解释. 石油地球物理勘探, 1995, 30: 833 ~ 844
- 8 周礼成, 冯石等. 用裂变径迹长度分布模拟地层剥蚀量和热史. 石油学报, 1994, 15: 26 ~ 34
- 9 王毅, 金之钧. 沉积盆地中恢复地层剥蚀量的新方法. 地球科学进展, 1999, 14: 482 ~ 486
- 10 张一伟, 李京昌等. 原型盆地剥蚀量计算的新方法-波动分析法. 石油与天然气地质, 2000, 21: 88 ~ 91
- 11 李明诚, 李伟. 利用平衡浓度研究天然气的扩散. 天然气工业, 1996, 16: 1 ~ 5