陈建文,张异彪,陈华,等.南黄海盆地海相中-古生界地震探测技术攻关历程及效果[J].海洋地质前沿,2021,37(4):1-17.

# 南黄海盆地海相中-古生界地震探测 技术攻关历程及效果

陈建文<sup>1,2,3,4</sup>,张异彪<sup>5</sup>,陈华<sup>6</sup>,刘俊<sup>7</sup>,何玉华<sup>1,2</sup>,施剑<sup>1,2,8</sup>,李斌<sup>5</sup>,袁勇<sup>1,2</sup>,梁杰<sup>1,2</sup>,张银国<sup>1,2,9</sup>, 雷宝华<sup>1,2</sup>,王建强<sup>1,2</sup>,吴淑玉<sup>1,2,7</sup>,吴志强<sup>1,2</sup>,闫桂京<sup>1,2</sup>,陈春峰<sup>6</sup>,肖国林<sup>1,2</sup> (1中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071;2青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实 验室,青岛 266237;3山东科技大学,青岛 266590;4河海大学,南京 210098;5中石化海洋石油工程有限公司上海物探分公司,上海

201208;6 中海石油 (中国) 有限公司上海分公司,上海 200335;7 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心,烟台 264001; 8 中国地质大学 (武汉),武汉 430074;9 中国石油大学 (华东),青岛 266580)

摘 要:南黄海盆地是迄今为止中国近海唯一未发现油气田的大型沉积盆地,具有陆相中-新 生界和海相中-古生界 2 套油气勘探层系。海相中-古生界厚度大、分布广,地震资料成像品 质差一直是制约其油气勘探的关键问题。针对中-古生界的地震探测技术攻关经历了地震地 质研究、技术攻关和技术突破与应用 3 个阶段。在第 1 阶段工作的基础上,以区内地震地质 条件与岩石物性分析为先导,以物探船不断更新和地震仪器设备升级换代为手段,以大量理 论模拟、针对性室内物理模拟和持续海上试验为方法,通过采集参数不断优化,最终形成了以 "高覆盖次数、富低频信号、强震源能量"为特征的"高富强"地震探测技术,突破了技术瓶颈。 应用该技术,在原来为空白反射的崂山隆起发现了海相中-古生界 3 套可连续追踪对比的地 震反射标志层组,识别出 7 个反射界面,建立了地层层序,揭示了残留盆地构造特征,预测了 油气远景区,优选出高石稳定带为有利区带,圈定了重点构造,锁定了钻探目标,为南黄海盆 地新层系油气勘查突破创造了条件,为下一步勘探指明了方向。"高富强"地震探测技术对 拓展中国海域找油空间、加快海域深部油气资源勘探和开发利用具有重要意义,对全球具有 类似地震地质条件海域的油气勘探具有实际应用价值。

关键词:地震探测;技术攻关;中一古生界;勘探历程;南黄海盆地 中图分类号:P744.4;P618.13 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.053

# 0 引言

南黄海盆地是一个陆相中-新生代盆地和海相 中-古生代盆地相叠加的盆地<sup>[1-3]</sup>,也是中国近海唯 一未发现油气田的大型沉积盆地<sup>[4]</sup>。早期的调查与 勘探主要以陆相中-新生界为目的层<sup>[1]</sup>,随着勘探 的失利,以及处于同一大地构造单元的上扬子四川 盆地深部大型、特大型天然气田的发现,地质学家 和石油勘探家逐渐将注意力转移到海相中一古生界 勘探层系。然而,该层系位于盆地深部,存在地层 时代老、埋藏深、构造复杂、地震资料成像品质差 等问题,尤其是在崂山隆起地区,其为空白反射<sup>[5]</sup>, 该隆起上是否存在古老海相沉积层不得而知。为 了揭示盆地地质结构,分析其油气地质条件、成藏 条件和资源前景,针对南黄海海相中一古生界开展 了地震探测技术攻关,大体经历了3个阶段:地震 地质研究、技术攻关和技术突破与应用。自2005 年以来,通过大量的理论模拟、针对性的物理模拟 和持续的海上试验,基本形成了以"高覆盖次数、富 低频信号、强震源能量"为特征的"高富强"地震 探测技术,突破了浅部强反射界面能量屏蔽条件下 的地震成像技术瓶颈<sup>[6]</sup>,获得了一批有效的地震反

收稿日期: 2021-03-08

**资助项目:**国家专项项目(DD20190818; DD20160152; GZH200800503; XQ-2009-15)

作者简介: 陈建文(1965-), 男, 博士, 研究员, 主要从事海域油气资源调 查评价与研究工作. E-mail: jwchen2012@126.com

射资料。对这批资料的解释发现,南黄海海相中-古生界厚度大、分布广,并存在变形相对较弱的构 造稳定区<sup>[7]</sup>,与下扬子陆域具有相似的沉积充填特 征和沉积演化历史,具备大型油气田形成的物质基 础和基本石油地质条件<sup>[8]</sup>,油气资源潜力巨大。

### 1 地质背景

南黄海位于中国东部,北以山东半岛成山角与 朝鲜半岛白翎岛之间的连线为界与北黄海相连,南 以长江口启东嘴至济州岛西北角之连线与东海毗 邻,西至中国山东省和江苏省海岸线,东达朝鲜半 岛西海岸<sup>[1]</sup>,面积 30×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。中一新生代盆地位于 勿南沙隆起区以北,千里岩隆起区以南,面积约 12× 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,由南往北划分为青岛坳陷、崂山隆起和烟 台坳陷 3 个构造单元(图 1)。区域地质研究和海陆 对比表明:勿南沙隆起区连同南黄海中一新生代盆 地区是下扬子地块的组成部分,为中一古生代海相 地层分布区;千里岩隆起区为苏鲁造山带在南黄海 海域的延伸,是变质岩分布区。



图 1 南黄海中-新生代陆相盆地构造区划<sup>[1]</sup> Fig.1 Tectonic division of the terrestrial Mesozoic-Cenozoic basins of the South Yellow Sea<sup>[1]</sup>

2 地震地质条件

#### 2.1 自然地理与海况

地形地貌:南黄海海域地处温带,海底宽广平

坦,由东西两侧向中央倾斜,地势东陡西缓,东侧平 均坡度为1'40",西侧平均坡度50"<sup>[9]</sup>。水深30~80 m, 最深处110 m。海底地貌类型多样,以倾斜的浅海 平原为主,其他有水下台地、水下浅滩、水下丘陵。

气温:南黄海北部冬季盛行偏北风,夏季盛行 偏南风,平均风速 8~9 m/s<sup>[9]</sup>。春秋两季移动高压 活动频繁,冬季冷高压最强,冷高压的冷峰过后,海 面常有西北大风,风力 8 级左右,有时可达 10 级, 有时现温带气旋和台风。水温受季节、海流和地形 等影响,近岸处水温以 1-2 月最低,为 1~5 ℃;中 部海域 2-3 月份最低,为 4~11 ℃。夏季表层水温 度分布较均匀,8 月份最高,大部分海域在 26 ℃ 以 上,沿岸较高,为 28 ℃,海域中部最低,为 23 ℃。 冬季不出现冰情。

潮汐和潮流:大部分海域属正规半日潮,北部 成山角至朝鲜半岛大青岛一带为不正规半日潮,潮 差较小,一般<5m,平均约3m,由北往南潮差增大。

海流:区内海流较弱,表层流因受夏季风影响 流向不稳定,中深层流主要是黑潮分支。西侧沿岸 <10 m 海水等深线地区因河流入海的冲淡作用和 潮流作用,常形成流速较大、含砂量较高的沿岸流<sup>[9]</sup>。

海浪: 以风浪为主, 具有明显的季节性。冬季 在偏北风的作用下, 以北浪、西北浪为主, 总频率 为 39%~47%, 浪高一般 1.4~2 m; 夏季盛行西南 风, 海域内以偏南浪为主, 总频率达 50% 以上, 浪高 一般<0.5 m; 春秋季节海浪变化大, 浪向紊乱, 浪高 一般 0.6~0.9 m, 最高可达 5~6 m<sup>[9]</sup>。

#### 2.2 岩石物性

钻井揭示、地震资料解释与区域地层对比认为, 南黄海盆地地层齐全<sup>[10]</sup>,自下而上发育震旦系、寒 武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、 三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四 系<sup>[10]</sup>;岩石类型多样,包括碳酸盐岩、碎屑岩、火山 岩以及新近系和第四系的砂泥质沉积物。采用岩 心和露头样品测量、地球物理测井、地震速度分析 及经验公式换算等方法,获得了南黄海盆地主要层 序的岩石物性<sup>[11-14]</sup>,地震地质对比标定了地震反射 层位及其地质属性(表 1)。

总体上,南黄海盆地具有下列3类典型物性层:

(1)"低速低密"层

新近系和第四系一般厚 600~1 000 m, 为未固 结的松散沉积物, 具有"低速低密"特征, 地震速 度<2 300 m/s, 沉积物密度<2.30 g/cm<sup>3</sup>。

#### 表1 南黄海盆地地震反射界面以及地质属性

Table 1 Seismic reflection interfaces and geological attribute of the South Yellow Sea Basin

地震反射界面	接触关系	地层属性(志留系以下为推测)	地震层速度/(m/s)	密度/(g/cm3)	岩性组合特征	
		新近系	1 780~2 250 (1 890)	1.57~2.24 (2.05)	砂泥岩及砂泥沉积物	
	₩₩ 用皮小蛋白 ₩₩	古近系戴南组和三垛组	2 250~2 450 (2 350)	2.10~2.30 (2.20)	砂泥岩	
I <sub>4</sub>	₩ 用度小整合 ₩	古近系阜宁组	2 750~3 850 (3 500)	2.15~2.56 (2.46)	砂泥岩互层	
	千行不登合	上白垩统泰州组	2 900~3 300 (3 100)	2.28~2.45 (2.39)	泥岩夹粉砂岩	
1	平平平行不整合	中—下白垩统	3 300~4 800 (4 100)	2.30~2.60 (2.46)	砂岩夹泥岩	
T	···· 角皮小蛋白 ····	侏罗系	4 500~5 500 (4 900)	2.58~2.63 (2.60)	泥岩夹砂岩及粉砂岩	
18	₩ 用度小釜合 ₩	下三叠统青龙组	5 700~6 500 (6 100)	2.64~2.72 (2.68)	灰岩、白云岩及 白云质灰岩	
I <sub>9</sub>	平平平行个整合	上二叠统				
т	ボイブホム	下二叠统孤峰组	3 800~5 300 (4 300)	2.30~2.56 (2.42)	泥页岩及含 煤岩系夹砂岩	
I	十一一半行个整合	下二叠统栖霞组			灰岩,上部夹钙质泥岩	
		中一上石炭统	5 800~6 500 (6 300)	2.65~2.69 (2.67)	灰岩	
* 11	11 -11	下石炭统	4 300~5 000 (4 600)		泥岩夹砂岩	
	(44) 角度无敷合(44)	上泥盆统	4 550~5 260 (4 870)	2.50~2.68 (2.62)	砂岩、砂砾岩	
т	*** 用及小歪 I ***	中一上志留统	4 200~5 000 (4 500)		砂岩夹泥岩	
T 111-1	一 登台	下志留统高家边组	3 800~4 300 (4 100)	2.43~2.53 (2.48)	泥岩为主, 夹粉砂岩 及砂岩	
I 12	━ 釜行 ━	奥陶系	5 800~6 600 (6 200)	2 69~2 72 (2 71)	灰岩、白云岩及 灰质白云岩	
_ т _		中一上寒武统	5 600 10 600 (0 200)	2.09 2.72 (2.71)	白云岩、灰岩	
1 13	正日	下寒武统	5 300~5 600 (5 400)	2.55~2.62 (2.59)	泥岩为主,上部 白云岩夹泥质白云岩	
	***	震日系	5 800~6 600 (6 300)	2.65~2.75 (2.70)	白云岩	
<u>    т                                </u>	ww 角度不敕스 vvv				砂泥岩	
1 g	□□□ 用及小筐百 ♥♥	前震旦系	6 700~7 200 (6 900)	2.72~2.79 (2.75)	变质岩	

备注:(1)表中括号内为平均值;(2)资料来源:海陆域岩心实测、测井与地震解释以及参考文献[11-14]

#### (2)"中速中密"层

古近系、中生界和古生界砂泥岩层具有"中速 中密"特征,地震速度一般为2250~5600 m/s;平均 4156 m/s,密度2.10~2.68 g/cm<sup>3</sup>,平均2.47 g/cm<sup>3</sup>。 其中,古近系、白垩系和侏罗系碎屑岩的地震速 度随深度增加而明显增加,砂岩与泥岩存在300~ 1000 m/s的速度差;古生界内部发育上二叠统、志 留一泥盆系、下寒武统3套砂泥岩层,砂岩与泥岩 存在200~1500 m/s的速度差,大套砂岩与大套泥 岩直接接触时,这种速度差特征尤为突出。砂岩与 泥岩间的速度和密度差可形成地震反射波阻抗界面。

#### (3) "高速高密" 层

区内碳酸盐岩层具有"高速高密"特征, 地震速 度一般为 5 700~6 600 m/s, 平均 6 225 m/s; 密度 2.64~2.75 g/cm<sup>3</sup>, 平均 2.69 g/cm<sup>3</sup>。因其厚度较大、 内部非均质性弱、速度和密度变化小等特征, 使得 地震剖面上总体呈空白反射, 无清晰的反射同相轴, 内部反射能量偏弱。区内发育下三叠统、中上石炭 统一下二叠统、中上寒武统一奥陶系、震旦系灯影 组 4 套碳酸盐岩层, 由上往下分别是: 第1套:下三叠统青龙组,区内有多口钻井揭 示。下部为薄层灰岩及泥灰岩,中上部为中厚层状 灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩及泥灰岩<sup>[1,15-17]</sup>。地 震资料解释最大厚度超过2000m(位于勿南沙隆 起,可能包含周冲村组)<sup>[18]</sup>。

第2套:中上石炭统一下二叠统栖霞组。下部 为灰岩、生物灰岩和白云质灰岩,上部灰岩夹炭质 灰岩、泥灰岩及钙质泥岩。含髓石结核及团块,产 蜒、珊瑚、藻类化石,厚度>360m。

第3套:中上寒武统。灰-白色薄层状白云岩、 泥质白云岩夹灰岩、泥灰岩,厚度为400~900m。

第4套:上震旦统灯影组。灰白--白色白云岩、 藻白云岩、叠层石白云岩和泥质白云岩,厚度为600~ 1200 m。

在上述4套碳酸盐岩中,第1套岩层总厚度大, 内部速度和密度差异小,地震波阻抗差小,无清晰 的波阻抗界面,反射能量偏弱,地震剖面上总体呈 空白反射带;第2套总体厚度较薄,上部成层性较 好,速度和密度有一定变化,形成明显的地震波阻 抗差,地震剖面上主要呈较明显的平行、亚平行反 射波组特征,区域上稳定分布,可作为区域对比标 志层;第3、4套碳酸盐岩层,总体厚层状夹有泥灰 岩层,在地震剖面上局部可显示层状特征<sup>[1,15]</sup>。

#### 2.3 主要地震波阻抗界面

由于不同时代和不同岩性的地层在速度和密度上的差异, 地震剖面上存在 T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>7</sub>、T<sub>7-1</sub>、T<sub>7-2</sub>、T<sub>8</sub>、T<sub>9</sub>、T<sub>10</sub>、T<sub>11</sub>、T<sub>11-1</sub>、T<sub>12</sub>、T<sub>13</sub>和 T<sub>g</sub>等 13 个主要反射界面<sup>[15,18-19]</sup>。各界面上下地层的地质属性及其岩性组合特征如表 1 所示。

T<sub>2</sub>:相当于新近系底界反射,反射界面清晰,为 中强振幅、低频、较连续反射,与上覆地层呈平行反 射,与下伏地层接触关系多变,既有高角度不整合 接触,亦有假整合接触。该反射层能全区追踪对比。

T<sub>4</sub>:相当于古近系戴南组底界反射,中等振幅、 中低频、较连续,上下地层呈现平行不整合接触关 系,主要分布在中-新生代盆地坳陷区。

T<sub>7</sub>:相当于新生界底界反射,中强振幅、中低频、较连续,主要分布在中-新生代盆地坳陷区,在缺失中生界白垩-侏罗系的区域,其与T<sub>8</sub>反射界面重叠。

T<sub>7-1</sub>:相当于上白垩统泰州组的底界反射,中强振幅、中低频、连续--较连续,主要分布在烟台坳陷的深凹区,界面上部为一套低频弱反射波组,下部

为一套较强振幅、较连续反射波组,上下地层局部 可见不整合接触。

T<sub>7-2</sub>:相当于侏罗系和白垩系的分界面,即侏罗 系的顶面反射,弱一中等振幅、中低频、连续一较连 续,上下地层呈现角度不整合接触关系。T<sub>7-2</sub>主要 分布在烟台坳陷牟平凹陷。

T<sub>8</sub>:相当于陆相中-新生界底界反射,是区域性 角度不整合界面,多为强振幅、低频反射,大部分区 域内连续性较好,根据地层剥蚀程度不同,常与T<sub>2</sub>、 T<sub>7</sub>等反射界面重叠。

T<sub>9</sub>:相当于下三叠统青龙组底界反射,在崂山 隆起和勿南沙隆起区的局部区域特征较明显,反射 界面清晰,为较强振幅、中低频、较连续反射。

T<sub>10</sub>:相当于下二叠统栖霞组顶界反射,为古生 界第1套地震反射标志层组的顶面。该界面地震 反射特征清晰,强振幅、低频,在崂山隆起中南部和 勿南沙隆起区北部可连续追踪对比。T<sub>9</sub>到T<sub>10</sub>内 部整体为弱反射,内部存在1~2个较强振幅地震 轴,连续性相对好。

T<sub>11</sub>:相当于中一上石炭统底界反射,为古生界 第1套地震反射标志层组的底界面。在崂山隆起 中南部以及青岛坳陷等构造较简单地区反射特征 清晰,较强振幅,较连续反射。在西部构造较复杂 地区为高角度中强振幅反射,在东部火成岩区反射 特征模糊。T<sub>10</sub>与T<sub>11</sub>反射层内部为中低频、中等 强度反射,在地震剖面上约为 300 ms 时间厚度。

T<sub>11-1</sub>:相当于下志留统高家边组顶界反射,为古 生界第2套地震反射标志层组的顶界面。在崂山 隆起中南部反射特征清晰,较强振幅、较连续反射。 T<sub>11</sub>与T<sub>11-1</sub>反射层内部为中低频弱振幅反射,在地 震剖面上约为600~700 ms时间厚度。

T<sub>12</sub>: 推测相当于下志留统高家边组底界反射, 该界面为海相古生界第 2 套反射标志层组底界面。 T<sub>11-1</sub> 与 T<sub>12</sub> 之间, 为一套 300~400 ms 时间厚度的 中强振幅、中低频反射波组, 在崂山隆起中南部具 有较好的连续性, 其他地区反射品质普遍较差。

T<sub>13</sub>: 推测相当于下寒武统顶界反射, 该界面为 海相古生界第3 套反射标志层组顶界面。全区总体 来看, 该界面反射特征不清晰, 但在资料品质相对 较好、构造相对平稳的局部区域, 该界面上下地层 的反射特征存在差异, 上覆地层表现为空白杂乱反 射为主, 下伏地层为中弱振幅、中低频反射特征。

Tg: 推测基岩顶面反射,该界面为第3套反射标志层组底界面,部分地区表现为2~3个较强振

幅的反射, 崂山隆起中南部连续性相对较好, 全区 可对比性较差, 难以连续追踪, 主要根据推测的地 层厚度界定。

如表 1 所示, 区内有 T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>7-2</sub>、T<sub>8</sub>、T<sub>g</sub> 区域 不整合面, 波阻抗差大, 是强反射界面; T<sub>7-1</sub>、T<sub>10</sub>、 T<sub>12</sub> 是岩石物性界面, 波阻抗差较大, 是较强的反射 界面; T<sub>7</sub>、T<sub>9</sub>、T<sub>11</sub>、T<sub>11-1</sub>、T<sub>13</sub> 是岩石物性反转面, 有 一定的波阻抗差, 也可形成反射界面。

#### 2.4 地层结构与浅部地震能量屏蔽层

#### (1) 地层结构

盆地内存在坳陷型和隆起型 2 类地层结构<sup>[15]</sup>。 前者发育于青岛坳陷和烟台坳陷,由下往上由震旦 系一下古生界、上古生界一下三叠统、侏罗系、上白 垩统一古近系和新近系一第四系等 5 个构造层组成, 地层总厚度大者超过 15 km;后者发育于崂山隆起 和勿南沙隆起区,以缺失中一新生代陆相碎屑岩地 层为典型特征,由下往上由震旦系一下古生界、上 古生界一下三叠统和新近系一第四系 3 个构造层组 成,地层总厚度 5~8 km。

(2) 浅部地震能量屏蔽层

理论模拟结果表明,地震波传播过程中震源子 波透射能量与反射界面上下地层的地震速度差有 关。界面上下的速度差越大,透射能量越少。当界 面以下与界面以上地层的地震速度比达到 2.0、2.5 和 3.0 时,分别只有 18.5%、9.2% 和 5.3% 的震源子 波能量能够穿透界面向下传播<sup>[13,18-19]</sup>。

崂山隆起和勿南沙隆起区经历了前震旦纪基 底形成、震旦纪一早古生代克拉通、晚古生代一中 三叠世稳定台地-陆内裂陷、晚三叠世一古近纪隆升 剥蚀以及新近纪一第四纪坳陷沉降等5个阶段<sup>[19-21]</sup>。 这一演化特征导致"低速低密"的新近纪松散砂泥 岩沉积物直接覆盖在"高速高密"的下三叠统青龙 组灰岩之上,形成强反射界面 T<sub>2</sub>。由于 T<sub>2</sub> 界面以 下与其界面以上的地层地震速度比为 2.5~3.0,只 有 10% 以下的震源子波能量能够穿透界面向下传 播,从而形成了浅部地震能量屏蔽层。

## 3 地震探测技术攻关历程

南黄海海相中一古生界地震探测技术攻关 经历了地震地质研究(1961-2004年)、技术攻关 (2005-2014年)、技术突破与应用(2015年--现在) 3个阶段。

#### 3.1 第1阶段: 地震地质研究(1961-2004年)

南黄海的油气调查与勘探始于 20 世纪 60 年 代初<sup>[22-24]</sup>, 2005 年以前, 油气勘探目的层聚焦新生 界, 石油公司采用各时期国内外流行的技术开展了 地震勘探。后因钻探发现中一古生代海相地层, 并 认识到地震资料成像品质差是制约其油气勘探的 关键问题, 在勘探新生界的同时, 开展了海相中一古 生界的地震地质研究, 大致分为 2 个时期。

3.1.1 海相地层发现时期(1961-1991年)

海相地层是在研究中-新生代盆地基底和探索 基岩油气藏的过程中发现的。南黄海陆相沉积盆 地的基底属性如何?基底岩性是什么?这是盆地油 气资源潜力评价需要解决的基础地质问题。范时 清等<sup>[25]</sup>在1962年就开展了对南黄海盆地基底大 地构造属性的研究,此后很多学者对南黄海及周边 地区的古生代大地构造性质及大地构造演化进行 了分析<sup>[26-30]</sup>,但在南黄海海域未获得钻井资料证实 之前,争论较大。

基岩油气藏是新生代盆地勘探的探索对象。 南黄海盆地早期地震调查始于 1968 年, 地质部上 海石油局使用"五一"型地震仪、炸药震源(药量 9~12 kg; 沉放深度 1~2 m)、 悬挂式 24 道电缆开 展单次连续观测(排列长度 800 m)的区域普查,确 定了南黄海盆地为"南北两坳夹中部一隆"的构造 轮廓<sup>[31]</sup>。1971年启用模拟磁带地震仪在北部开展 了3次覆盖(排列长度1380m)连片地震普查<sup>[22-24]</sup>。 部分地震资料隐约可见新生代盆地基底。据此,钻 探H2井,井底见变质岩(表 2),推测属于前震旦系, 这是最早获得的盆地基底岩性的信息。1974-1978 年启用气枪震源,采用漂浮式电缆开展南、北2个 坳陷的地震普查,先后获得了3、4、6次覆盖的模拟 地震资料(表 2)。1979年,钻探 H7井,钻遇泰州 组1065 m,首次揭示盆地北部存在白垩系陆相地 层<sup>[32]</sup>,开始认识到南黄海盆地为中-新生代陆相沉 积盆地<sup>[33]</sup>。

1979年,中国与英国石油公司合作开展了地震 普查工作,采用数字地震仪、气枪震源(震源容量 1685 CI)和模拟电缆,获得了18/24次覆盖的地震 资料,在坳陷区斜坡位置发现盆地基底有内幕反射。 英国石油公司于1981年钻探了WX5-ST1井,钻获 229 m上白垩统泰州组,在1141 m之下钻遇下三 叠统青龙组和二叠系大隆组和龙潭组<sup>[34]</sup>。该井首 次在盆地南部发现白垩系陆相地层,并证实在陆相 地层之下存在海相中一古生界(表3)。据此,初步

						1		0		
地震施工时间/年	作业者	道间距/m	炮间距/m	覆盖次数/次	电缆长度/m	震源/电缆沉放/	m 震源类型	震源容量	记录仪	钻遇古生界井/井底地层
1968-1971	SMPB	33	400	1	800	1~2/7	炸药	9∼12 kg	五一型	
1971-1975	SMPB	57.5	230	3	1 380	$1 \sim 2/7$	炸药	9~12 kg	模拟型	H2/变质岩
1976-1978	SMPB	57.5	172.5/115	4/6	1 380	1~2/12	炸药	9∼12 kg	模拟型	H7/赤山组
1979	BP	25	50	18/24	1 200/1 800	6/12	Sleeve	1 685 CI	数字型	WX5-st1/龙潭组
1984	C/T	12.5	25	48	2 400	6/12	Sleeve	1 685 CI	数字型	WX13-3-1/栖霞组 CZ12-1-1/黄龙组 CZ24-1-1/青龙组
1986	WGS	26.66	26.66	60	3 200	6/9	Sleeve	1 565 CI	数字型	Kachi-1/青龙组
1997	SMPB	25	50	30	3 000	7/10	Sleeve	2 682 CI	数字型	
1999	SMPB	26.66	26.66	30	1 600	7/10	Sleeve	2 682 CI	数字型	
1999	CNOOC	12.5	25	60	3 000	3/4	Sleeve	1 380 CI	数字型	CZ35-2-1/栖霞组
2000	CNOOC	12.5	25	81	4 050	5/6	G. I	4 050 CI	数字型	WX4-2-1/青龙组
2000	GSGM	12.5	25	60	3 000	8/12	Blot	3 000 CI	数字型	
2001	GMGS	12.5	50	30	3 000	8/12	Blot	3 000 CI	数字型	
2002	CNOOC	12.5	37.5	44	3 300	7/9	Sleeve	2 400 CI	数字型	
2003	GMGS	12.5	37.5	61	4 600	6/7	Blot	5 080 CI	数字型	

表 2	第1	阶段地震采集主要参数
-----	----	------------

Table 2 Main parameters of seismic acquisition in the first stage

BP:英国石油公司;C/T:美国雪佛龙/德士古公司;WGS:西方地球物理公司;CNOOC:中国海洋石油总公司;SMPB:上海海洋石油局;GMGS:广州海洋地质调查局

表 3	南黄海盆地海相中-古生界钻井情况-	-览表

Table 3 Drilling holes of the marine Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea Basin

序号	井号	类型	井深/m	作业者	完井时间/年	井底地层及测试情况
1	WX5-ST1	参数井	3 259	BP	1981	龙潭组,未见显示
2	WX13-3-1	预探井	2 228	C/T	1984	栖霞组,未见油气显示
3	CZ12-1-1A	预探井	3 511	C/T	1985	黄龙组, 气测异常
4	CZ24-1-1	预探井	3 546	C/T	1985	青龙组, 气测异常
5	WX4-2-1	预探井	2 733	CNOOC	2000	青龙组,未见显示
6	CZ35-2-1	预探井	2 726	CNOOC	2001	栖霞组,未见显示
7	CSDP-2	科探井	2 843	QIMG	2016	高家边组,古生界多层油气显示
8	Kachi-1	预探井	2 726	MPC	1991	青龙组,气显示

BP:英国石油开发有限公司;C/T:美国雪佛龙(CHEVRON)/德士古(TEXACO)石油公司;CNOOC:中国海洋石油总公司;QIMG:青岛海洋地质研究所;MPC:美国马拉松石油公司

认为南黄海盆地与苏北盆地类似,为中-新生代陆 相沉积盆地<sup>[35-36]</sup>,且盆地之下存在中-古生代海相 地层<sup>[35]</sup>。

1984年,雪佛龙海/德士古石油公司在其区块 内开展了48次覆盖的数字地震勘探,以新生界为 主要目的层,探索基岩油气藏,针对区块内的重点 构造钻探了3口井。其中,WX13-3-1井钻穿新生 代盆地底界,在2085m以下见到下二叠统栖霞组 灰岩,无油气显示;CZ24-1-1井于3100m以下见 241m厚的白垩系泰州组,3341m之下发现下三叠 统青龙组,有气测异常;CZ12-1-1A井在新生代盆地 底界面(2073m)之下钻遇1438m厚的石炭系和 二叠系,有地层重复现象<sup>[22-23]</sup>,在石炭系见气测异 常(表3)。这3口井证实盆地南部中一古生代海相 地层有一定的厚度。

1986年,韩国与西方地球物理公司合作在南黄海北部 124°E 以东开展了 60 次覆盖的数字地震勘探(震源容量 1 685 CI、电缆长度 3 200 m)(表 2), 美国马拉松石油公司根据这批资料的解释结果于 1991年钻探了 Kachi-1 井,该井钻遇 34 m 的下三 叠统青龙组灰岩(未穿)<sup>[36-37]</sup>。

该时期钻探揭示,南黄海新生代盆地南北2个 坳陷之下存在中一古生代海相地层,地层与下扬子 区具有可比性<sup>[38]</sup>,但地震反射资料品质差,难以解 释基岩内幕结构<sup>[39]</sup>。

3.1.2 地震地质研究时期(1992-2004年)

随着新生界油气勘探的失利,国外石油公司很快退出了合作区块,中国在开展陆相盆地石油地质

条件研究和油气资源评价的同时,逐渐将注意力转 向海相中一古生界研究<sup>[1,39-47]</sup>,受江苏石油勘探局在 盐城凹陷发现以古生界为气源的朱家墩气田的启 发,国内公益性调查和商业性勘探均加强了中一古 生界油气藏探索力度,进入中一古生界地震地质研 究时期。这一时期,按照以陆相中一新生代盆地为 主,兼顾基底的勘探思路,开始重视中一古生代地层 岩石物性的研究和地震地质研究<sup>[46-47]</sup>。在理论模 拟和海上试验的基础上,应用较为合理的采集参数 获取了一批重要的二维地震资料(表 2),陆相盆地 基底内幕反射逐渐显现,勿南沙隆起在 T<sub>2</sub> 以下局 部可见背斜构造形态,崂山隆起 T<sub>2</sub> 以下仍为空白 反射(图 2)。



图 2 崂山隆起 T<sub>2</sub> 以下的空白反射 Fig.2 Blank reflection below T<sub>2</sub> interface on the Laoshan Uplift

1999年,中国海洋石油总公司针对勿南沙隆起 区开展了地震地质研究,在采集参数论证的基础上 采用"滨海 518"物探船、1 368 CI 震源(Sleeve 枪)、 3000 m 电缆(240 道)获得了 60 次覆盖 1071 km 地震资料,在中一古生界发现了常州 35-2 构造,钻 探证实新近系盐城组(底界 1 185.5 m)之下为下三 叠统灰岩。该井井深 2 726 m, 钻遇 891.5 m 厚的青 龙组灰岩、155 m厚的大隆组泥岩、270 m厚的龙 潭组含煤地层和 277 m 厚的栖霞组灰岩(未穿), 证 实勿南沙隆起区发育厚度较大的中-古牛代海相地 层<sup>[40,44]</sup>,这是探索海相中-古生界油气藏的首次钻 探,未见油气显示。2000年采用"滨海 511"物探船 在青岛坳陷开展了 2 905 CI 震源(G. I 枪)、4 050 m 缆长(324 道)、81 次覆盖的地震勘探,钻探 WX4-2-1 井(表 3), 井深 2 733 m, 钻遇 275 m 厚的泰州组 泥岩和 24 m 厚的青龙组灰岩(未穿)。为兼顾陆相 地层与海相地层的勘探, 2002年, 利用"滨海 518" 调查船,采用2400 CI 震源、3300 km 缆长、44 次 覆盖、264 接收道数采集了区域地震测线 3 063 km。 利用该批资料追踪对比, 推测海相地层有较大的分布 范围<sup>[40,43-47]</sup>。

1996年,国家126专项启动了南黄海海域地质地球物理补充调查和资源评价工作,青岛海洋地质

研究所(QIMG)于 1997 年和 1999 年采用地质矿产 部上海海洋石油局的"奋斗七号"调查船完成了 60 道 30 次覆盖的地震勘查<sup>[1,34,48-49]</sup>, 地震测线的某些 局部段可见中--古生界反射。

1998年,新一轮国土资源大调查的计划开始实施,广州海洋地质调查局(GMGS)采用"探宝号"于2000年、2001年、2003年开展了3个航次的南黄海战略性油气资源调查,震源容量分别为3000CI(2000年和2001年)和5080CI(2003年),排列长度分别为3000m(2000年和2001年)和4600m(2003年),覆盖次数分别为60次(2000年)、30次(2001年)和61次(2003年)。这批资料显示,局部地区隐约可见厚度较大的中一古生界<sup>[50-51]</sup>。

第1阶段取得的主要成果和认识如下:①获得 了一大批二维地震资料;②地震勘探仪器设备得到 不断改善:地震记录仪从"五一"光电记录仪、模拟 磁带仪到数字地震仪,震源从炸药到空气枪;③拖 缆地震采集参数不断更新: 气枪容量从 1685 CI 提 高到 5 080 CI, 电缆长度从 800 m 提高到 4 600 m, 覆盖次数从单次提高到 81 次;④认识到南黄海陆 相盆地为"南北两坳夹中部一隆"的构造格局; ⑤以 陆相层为目的层的地震勘探多处可见盆地基岩顶 面,局部地区发现基岩内幕反射;⑥区域地质对比 分析认为,南黄海在大地构造上是扬子地台在海域 的延伸;⑦钻井揭示盆地南北2个坳陷内古近系阜 宁组地震反射界面(T7)之下发育白垩系,证明新生 代地层之下还有陆相中生代地层,其特征与陆域苏 北盆地具有可比性,认为南黄海存在中-新生代陆 相沉积盆地;⑧海相中-古生界地震内幕成像品质 差,钻井揭示了三叠系青龙组,二叠系大隆组、龙潭 组和栖霞组,石炭系船山组、黄龙组、老虎洞组、和 州组和高骊山组,证明陆相沉积盆地之下存在具有 一定厚度的中-古生代海相地层,这套海相地层层 序及其沉积特征与下扬子陆域具有可比性,据此认 为南黄海盆地是一个中-新生代陆相沉积盆地与中-古生代海相沉积盆地相叠加的中国近海大型盆地; ⑨崂山隆起在新近系底界面 T<sub>2</sub>之下为空白反射, 其岩性是火山岩、变质岩还是中-古生代沉积层有 待于探索; ⑩勿南沙隆起区局部发现可追踪对比的 海相中-古生界上部 T<sub>9</sub>、T<sub>10</sub>反射界面和构造圈闭; ⑪青岛坳陷和烟台坳陷局部可见 T<sub>9</sub>、T<sub>10</sub> 反射界面, 并构成中--新生代盆地潜山地层; ⑫地震资料解释 结合重磁资料反演表明,海相中-古生界有较大的 厚度和分布范围,是油气勘探的新领域; 圆钻井揭 示古生界大隆组、龙潭组和栖霞组具有生烃潜力,

CZ24-1-1 井和 CZ12-1-1A 井中分别于下三叠统青 龙组灰岩和石炭系灰岩中见气测异常。

#### 3.2 第2阶段: 技术攻关(2005-2014年)

2005年,全国油气资源战略选区专项启动了 "南黄海前第三系油气前景研究"(XQ2005-01)项 目,标志着南黄海进入中一古生界地震探测技术攻 关阶段。该阶段可分为拖缆技术攻关(2005-2008 年)与多方法技术攻关(2009-2014年)2个时期。 3.2.1 拖缆技术攻关时期(2005-2008年)

这一时期主要开展拖缆技术攻关,主要任务是 获得可供解释的中一古生界地震反射资料,为地质 构造特征研究、油气地质条件分析、油气资源前景 评价提供技术支撑。

(1) 2005年:理论分析,确定重点攻关区

2005年,QIMG 依托"南通幅"调查项目,采用 "奋斗七号"调查船完成了南黄海1300 km 区域地 质调查,震源容量为2940 CI,排列长度3000 m,接 收道数为240 道,覆盖次数30次。GMGS 依托国 土资源大调查项目,采用"探宝号"调查船开展了区域 调查,震源容量5080 CI,气枪类型为Bolt枪,电缆长 度4600 m,46次覆盖,接收道数368 道。在此基础 上,QIMG 完成了"南黄海前第三系油气前景分析" 项目的总体设计和2005年工作方案,确定以崂山隆 起为重点区开展海相中一古生界地震探测技术攻关。

通过上述区域地震资料解释、区域地质分析和 海陆对比,陈建文等<sup>[34]</sup>认为:尽管南黄海盆地崂山 隆起 T<sub>2</sub> 以下为空白反射,该区应当存在具有油气 远景的海相中-古生界。依据如下:①推测该区的 大地构造单元归属于扬子地台,中国南方扬子区海 相中-古牛界广泛发育,油气资源丰富<sup>[52]</sup>;②海相 中--古生界构造变形具有"南黄海海域弱于下扬子 区陆域、南黄海中部崂山隆起弱于北部烟台坳陷和 南部青岛坳陷"的特点<sup>[53]</sup>;③第1阶段在南黄海已 钻遇石炭系及其以上地层,其层序与下扬子陆域具 有可比性<sup>[34]</sup>:④海域钻探已发现大隆组、龙潭组、 栖霞组烃源岩<sup>[34]</sup>;⑤下扬子陆域在海相层中已发现 黄桥气田、句容油田和朱家敦气田<sup>[54-55]</sup>;⑥崂山隆 起 T, 埋藏浅, 且地震能量屏蔽作用强, 一旦技术突 破,可应用到具有类似地震地质条件的其他海区, 推进海域新层系油气勘查进程<sup>[34]</sup>。

(2) 2006年: 攻关试验, 初现端倪

自 2006 年开始,海相中一古生界地震探测技术 攻关以崂山隆起为突破口。在理论模拟的基础上 选取 2 940 CI 的震源容量开展海上试验,震源系统由 2 串 SLEEVE 空气枪组成,单枪最大容量为 300 CI, 最小 40 CI,气枪间距 1.86~3.81 m,串间距 6 m。首 先开展气枪/电缆沉放深度组合试验,试验后选取 8/12 m 的枪/缆沉放组合、2 940 CI 震源容量、4 200 m 电缆长度、56 次覆盖,336 接收道数(表 4)开展生产 采集,在 XQ06-1 线西部 T<sub>2</sub> 之下发现可能为沉积岩 的内幕反射,并显示褶曲形态(图 3),在 XQ06-4 线 中部也发现了类似内幕反射,并显示褶皱构造形态。 推测为古生代地层反射<sup>[56]</sup>。

(3) 2007年:加长排列,增强信心

2007年,将排列长度增加至 5 700 m,覆盖次数 增加至 76次,在 XQ07-3线中部 T<sub>2</sub>之下发现有厚 度大、较为清晰的 3 套反射标志层组(图 4),推测 为古生代地层反射<sup>[57]</sup>,从而坚定了崂山隆起海相 中一古生界地震探测技术攻关的信心。

(4)2008年:理论分析,物理模拟、海上方向试验
 2008年,国家729工程启动了GZH200800503
 项目。为了获得崂山隆起海相中一古生界的有效反射,依托该项目开展了理论模拟、物理模拟、海上枪
 缆沉放深度组合试验、海上方向试验、生产采集<sup>[58]</sup>。

理论模拟表明:①中一古生代海相地层的反射 振幅随偏移距的增加呈缓慢下降趋势。②存在地 震反射盲区。当偏移距超过 6 000 m 时, 地震波入 射角超过了地震反射的临界角, 呈反射盲区。③低 频地震波在地层传播过程中, 能量的吸收衰减幅度 比高频地震波小得多。考虑到中一古生代海相地层 埋藏深、层间反射系数小, 为得到深部有效地震反 射, 在地震资料采集中, 应使用低频能量强的气枪 震源。④海底鸣震和强反射界面造成层间多次波 发育, 给地震有效波造成较大的干扰<sup>[58]</sup>。

物理模拟表明:复杂构造形成的绕射波、断面 波影响资料信噪比;碳酸盐岩地层、碎屑岩地层内 部非均质性对反射、透射波产生散射作用,这是降 低地震资料的信噪比和分辨率的重要因素;基于模 型震荡水面的室内地震数据采集更符合海上实际 情况;对深部地层的成像而言,排列长度越长,成像 效果越好<sup>[58]</sup>。

枪/缆沉放深度组合试验:在室内模拟的基础上, 综合考虑子波特征的各个因素,如峰峰值、波泡比、 子波能量、主频、频带宽度等,特别考虑低频子波的 能量衰减慢、穿透能力强的特点,设计枪/缆沉放深 度组合试验5组,分别为6/8、6/10、6/12、8/10和 8/12 m。试验后优选8/12 m组合。

Table 4 Main parameters of seismic acquisition in the second and third stages

施工时间/年	作业者	作业船舶	道间距/m	n 炮间距/m	覆盖次数/次	电缆长度/m	h 接收道数/道	枪/缆沉放/m	枪类型	震源容量/CI
2005	QIMG	FD7	12.5	50	30	3 000	240	6/9	SLEEVE	2 940
2005	GMGS	TB	12.5	50	46	4 600	368	8/10	BLOT	5 080
2006	QIMG	FD7	12.5	37.5	56	4 200	336	8/12	SLEEVE	2 940
2007	QIMG	FD7	12.5	37.5	56	5 700	456	8/12	SLEEVE	2 940
2008	QIMG	FD7	12.5	37.5	76	6 000	480	8/12	SLEEVE	2 940
2009	QIMG	FD7	12.5	37.5	80	6 000	480	8/12	SLEEVE	3 580
2009	CNOOC-S	BE	12.5	25	162	8 100	648	7/25	G. I	6 180
2010	QIMG	FX	12.5	37.5	96	7 200	576	10/14	SLEEVE + BLOT	6 420
2010	CNOOC-S	BH517	12.5	50	81	8 100	648	10/16	BLOT	6 316
2011	CNOOC-S	BH511	12.5	37.5	80	6 000×2	480×2	(6/9)/15	SLEEVE	7 340
2012	CNOOC-S	BH518	25	25	480	24 000	960	(OBC)	SLEEVE	5 460
2012	CNPC-L		50	50	160	16 000	320	(OBC)		3 900
2012-2013	SINOPEC-H	SL703	25	50	120	12 000	480	(OBC)	BLOT	2 070
2013	CNOOC-S	BH512	12.5	37.5	94	7 050	564	7/10	SLEEVE	5 040
2014	CNOOC-S	BH511	3.125	37.5	87	6 500	2 080	7/10	SLEEVE	5 040
2015	QIMG	FX6	12.5	37.5	96	7 200	576	(10/10/10)/16	G. II	6 390
2016	QIMG	FX6	12.5	37.5	96	7 200	576	(10/10/10/10)/16	G. II	6 390
2018	QIMG	HYDZ9	12.5	25	150	7 500	600	(10/10/10)/14	G. II	5 110

QIMG:青岛海洋地质研究所;GMGS:广州海洋地质调查局;CNOOC-S:中海石油(中国)有限公司上海分公司;SINOPEC-H:中国石油化工股份 有限公司华东分公司;CNPC-L:中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司;FD7:奋斗七号;FX:发现号;FX2:发现2号;FX6:发现6号; HYDZ9:海洋地质九号;BH511:滨海511;BH512:滨海512;BH517:滨海517;BH518:滨海518;NH502:南海502;BE:比福特勘探号(Beaufort Explorer)



west section of the line XQ06-1

测线方向试验:理论上,当测线方向与构造走 向平行或近似平行时,地下反射点位于测线的垂直 面上,地震波侧面散射少,反射能量集中,有利于获 取深部反射的有效信号。试验表明,地震资料品质 与测线方向有一定关系,90°方向试验效果最好, 45°、68°、158°方向的效果次之,0°、180°、315°方向 效果相对较差。考虑到南黄海海相中一古生界的整 体构造走向为近 EW 向,生产测线选取 SN 向为主



图 4 2007 年 XQ07-3 线地震反射剖面 Fig.4 Seismic reflection profile of line XQ07-3 acquired in 2007

测线方向, EW 向为联络测线方向<sup>[58-60]</sup>。

海上资料采集:在上述工作基础上采用"奋斗七号"物探船按 8/12 m 枪/缆沉放深度组合、2 940 CI 震源、6 000 m 缆长、76 次覆盖、480 接收道数,以 SN 向为主测线方向, EW 向为联络测线方向开展调查,获得了南黄海 1 741 km 的区域地震测线,为盆 地结构分析和早期潜力评价提供了资料依据<sup>[58]</sup>。

上述分析及海上试验表明,大震源、长排列、高 覆盖次数有利于提高中一古生界的拖缆地震成像质 量;低频震源是提高质量的关键因素之一。

3.2.2 多方法技术攻关时期(2009-2014年)

一方面,因 2005-2008 年在崂山隆起拖缆地震

技术攻关初有成效;另一方面,中国石油化工股份 有限公司于 2003 年和 2007 年在上扬子区四川盆 地海相中一古生界先后发现了普光<sup>[61]</sup>、元坝<sup>[62]</sup> 和 龙岗 3 个大型气田<sup>[63]</sup>,大大提高了南黄海海相中一 古生界的勘探价值。2009 年,全国油气资源战略选 区专项启动了"南黄海崂山隆起及滩海区海相地层 油气资源战略选区调查评价"项目(XQ2009-01)。 同时,受 2005-2008 年 QIMG 在崂山隆起地震调 查发现的鼓舞,中海石油(中国)有限公司上海分公 司(以下简称"CNOOC-S")也将注意力转移到崂山 隆起。自 2009 年进入多方法技术攻关时期,主要 任务是加大攻关力度,为崂山隆起油气资源勘查评价提供技术支撑。

(1) 2009年:增强震源、双检采集试验

依托 GZH200800503 项目和 XQ2009-01 项目, 2009 年开展了 3 360 CI 和 3 580 CI 震源容量的海 上试验。为了分析南黄海中一古生代海相沉积盆地 的地质结构、提高地震资料品质,在南黄海新生代 盆地的隆起区和坳陷区布设长度为 20 km 的 3 条 试验测线(崂山隆起、青岛坳陷和勿南沙隆起各 1 条),分别用 3 360 CI 和 3 580 CI 震源及不同的沉 放深度组合进行试验(表 5)。

表 5 2009 年试验测线采集参数组合

acquisition peremeter combination of test line in 2000

Table 5 Seisme acquisition parameter combination of test line in 2009										
参数组合	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
震源容量/CI	3 580	3 580	3 580	3 580	3 580	3 360	3 360	3 360	3 360	3 360
震源沉放深度/m	6	6	8	8	8	6	6	8	8	8
电缆沉放深度/m	8	10	10	12	14	8	10	10	12	14

通过3条试验测线10种不同参数所采集的 30条线进行了攻关处理,比较后认为,3580 CI震 源、8/12 m的枪/缆沉放深度组合效果最优。据此 采集获得了较好品质的深部反射资料<sup>[64]</sup>。

Table 5 Saismia

2009年, CNOOC-S采用"比福特勘探号"物探船、6180 CI震源、8100m缆长、162次覆盖、648 道(表 5)、GS 双检采集了1232 km测线,资料品质有所提高<sup>[4]</sup>,但未能取得期望的双检采集效果。

(2) 2010年: 富低频攻关、OBS (海底地震) 试验

为提高深部低频能量和信噪比,获得富低频资料,2010年配备"发现号"物探船,从进一步加大震源容量、提高大枪容量、改善枪/缆沉放深度组合、提高覆盖次数几个方面入手开展攻关。首先,将震源容量增大至 6 420 CI(沉放深度 10 m),采用 4 串 SLEEVE 和 BOLT 枪组合,每串 1 605 CI,单枪最大容量为 380 CI,最小 40 CI,串间距 10 m。其次,加大电缆沉放深度,在崂山隆起开展电缆沉放 12、14、16、20 m 的同方向试验(震源沉放 10-10-10-10 m,测线方位 270°),发现电缆沉放深度 14 m 效果相对较好;最终,采用 6 420 CI 震源、10/14 m 枪/缆沉放、7 200 m 缆长、96 次覆盖、576 接收道数采集<sup>[59]</sup>,获得了较好成像剖面(图 5)。

采用 OBS 技术可以获得调查区深部地层,尤 其是海相中一古生界内部各层序的速度结构,建立 深部地层反射速度结构,为资料处理的精细速度分 析提供依据。优选具有高分辨率、高采样率、大动态 范围、强抗干扰能力信号采集特点的德国 Geopro 公司的海洋地震仪 SEDIS VI进行海试,工作区水深为10~30 m。试验中采用 2 种气枪震源参数:气枪容量 9 300 CI、压力 2 000 PSI、放炮间距 187.5 m;气枪容量 3 300 CI、压力 2 000 PSI、放炮间距 46.875 m。测线长度为 290 km。试验表明: 9 300 CI的大容量气枪数据能量强,但噪声很大; 3 300 CI 的小容量气枪数据信噪比高,但深部的能量较弱<sup>[18]</sup>。

2010年, CNOOC-S 用滨海 517 物探船按 6 316 CI 震源(4 串 BOLT 枪)、10/16 m 枪/缆沉放、8 100 m 缆长、81 次覆盖、648 道的参数在崂山隆起采集 1 490 km 二维地震, 深部成像品质略有改善。

(3) 2011年:上下源双缆宽线试验



Fig.5 Seismic profile of line XQ10-6

511 物探船按 7 340 CI 震源(4 串 SLEEVE 枪)、6/9 m 震源沉放、15 m 电缆沉放、6 000 m×2 缆长、80 次 覆盖、480×2 接收道数在崂山隆起开展上下源双缆 宽线试验,中一古生界的地震信噪比有所提高,成像 品质有所改善<sup>[65]</sup>,取得了一定的效果。

(4) 2012-2013年:OBC(海底电缆)试验、OBS 海陆联测

为了开展南黄海极浅水区和滩海区地震勘探, 2012-2013年,中国3大油公司在各自探矿权区块 内开展了 OBC 地震勘探。

2012年, CNOOC-S采用"滨海 518"物探船按 5 460 CI 震源, 24 km 缆长, 25 m 道距、25 m 炮距、 480 次覆盖、960 接收道数获得了 168 km 的 OBC 资料(表 4), 因受极浅水区潮流、海流、海浪、沿岸 流等复杂水动力条件影响, 深部资料品质不理想。

2012年,中国石油天然气股份公司辽河油田分 公司在盐城东区块开展了滩海地震,采用"长排列、 大容量、高覆盖次数、水陆双检"的 OBC 地震采集 方案,按中间激发、16 km 缆长、50 m 道距、50 m 炮距、160 次覆盖、320 接收道数采集 672 km 的 OBC 资料(表 4),同样,受复杂水动力条件、复杂地质构 造和多变潮流沙脊的影响,深部资料品质不理想。

2012-2013年,中国石油化工股份有限公司华 东油气分公司在海安东区块开展了滩海地震,按12km 缆长、25m道距、50m炮距、120次覆盖、480接收 道数的参数获得了1112km的OBC资料(表4), 海相中一古生界的地震反射资料品质也不理想。

2013年,为了进一步有效获取南黄海中一古生 界反射波和折射波数据,QIMG联合中国科学院 地质与地球物理研究所和国家海洋局第一海洋 研究所,依托海洋地质调查 GZH200800503项目、 国家自然科学基金 41210005项目和国家 863 计划 2009AA093401项目开展了南黄海一山东半岛一渤 海海陆联合深部地震探测<sup>[66]</sup>,获取了难得的深部地 层速度数据。

(5) 2013-2014年: 崂山隆起中部试验与勘探
2013年, CNOOC-S采用"滨海 512"物探船按
5040 CI 震源, 7 050m 缆长, 7/10m枪/缆沉放、12.5m
道距、37.5m炮距、94次覆盖、560接收道数的参数, 在崂山隆起中部采集二维地震资料 2 168 km。
2014年, 改用"滨海 511"物探船 5 040 CI 震源,
6 500m缆长, 7/10m枪/缆沉放、3.125m道距、
37.5m炮距、87次覆盖、2 080接收道数的参数在
崂山隆起中部采集二维地震资料 2 007 km(表 4)。

上述所获得的海相中-古生界资料品质较前有所改善,但在不同的构造部位差别较大。

通过10年的技术攻关,本阶段取得主要成果 如下:①区内海相中-古生界勘探的地震地质条件 为:水浅,地层古老、构造相对复杂、顶面为强波阻 抗界面、内部波阻抗界面多,巨厚的碳酸盐岩层内 部非均质性弱,巨厚的碎屑岩层内部物性差异小<sup>[14]</sup>; ②不同的构造单元地震地质条件差别大,同一构造 单元内不同区域地震地质条件有所不同[14];③浅层 强反射界面能量屏蔽、目的层内部界面波阻抗差别 小、地质构造相对复杂是海相中一古生界地震信噪 比低、成像品质差的主要问题,其中浅层强界面能 量屏蔽是关键[4-5];④地震采集方向影响地震资料品 质,因受构造方向的控制,区内 EW 向测线比 SN 向 地震测线资料品质好;⑤震源容量增大,目的层反 射能量增强[58];⑥同一震源总容量、不同的枪串组 合,目的层成像品质不同<sup>[18]</sup>;⑦震源枪串组合中,大 枪容量越大、低频能量越强,目的层成像品质越 好[18,67];⑧震源系统中不同的气枪类型所激发的低 频成分不同,富低频气枪获得的资料品质更好<sup>[67]</sup>; ⑨理论上立体震源(上下源和立体源)有利于能量 的加强[65,68-69],试验资料所取得的效果不明显; ⑩排 列长度越长、覆盖次数越多,目的层资料信噪比越 高[4]; ⑪物探船吨位越大、设备性能越强, 越便于海 相中-古生界的采集参数优化<sup>[18]</sup>; @理论上, 震源 沉放深度和电缆沉放深度越大,越有利于激发和接 收低频信号,根据物探船设备能力和作业区地震地 质条件选取更深的枪/缆沉放深度组合有利于改善 目的层资料品质<sup>[5,18]</sup>; ⑬理论上双缆宽线采集有利 于提高目的层信噪比[65,68],海上试验未能获得期待 的效果: @OBS 采集比拖缆采集更能准确获得海相 中-古生界主要层序的速度资料,有利于室内速度 建模和成像处理<sup>[66]</sup>; ⑮理论上 OBC 有利于提高目 的层的信噪比<sup>[70]</sup>,在极浅水区采集过程中,由于复 杂的水动力条件、多变的地形地貌和深部复杂的构 造条件未能取得期望的结果。

#### 3.3 第3阶段: 技术突破与应用(2015年--现在)

#### 3.3.1 技术突破(2015年)

第2阶段技术攻关表明,针对南黄海海相中--古生界目的层的拖缆采集,震源容量越大、低频能 量越强、覆盖次数越高,资料的信噪比越高、成像品 质越好。

2015年,采集参数设计从"高覆盖次数、富低

频信号、强震源能量"3个方面进行重点攻关。首 次使用国内外先进的中国石油化工股份公司海洋 石油工程有限公司"发现6号"物探船和具有高能 量强度、高能量转换率的 Sercel G Gun Ⅱ型气枪。 针对目的层的地层结构和物性特征,依据地质建模、 各向异性波动方程模拟及照明分析论证采集参数。 设计出 63 种震源和电缆参数组合,采用远场子波 模拟及频谱分析方法,综合考虑主峰值、峰-峰值、 初泡比、低频性能、优势频宽及主频等评价指标开 展室内模拟<sup>[67]</sup>,在此基础上在崂山隆起 HB15-31 线 南端开展了长度 30 km 的海上试验,进行了立体震 源、平面震源以及电缆沉放深度组合等共4组参数 试验(表 6),获得 120 km 试验数据。海上试验严格 保持采集环境的一致性,根据试验结果最后确定合 适的采集参数(表4)。震源系统采用4串枪阵,每 串布设 16 支枪, 总容量 6 390 CI, 串间距 10 m; 枪 阵中配置了 380 CI 和 220 CI 的单枪,用以增强震 源的低频能量;震源沉放深度 10-10-10-10 m;使用 了更加精准的数字枪控系统,使得气枪激发时具有 更好的同步性:接收系统采用 7 200 m 缆长、96 次 覆盖、576 接收道数<sup>[67]</sup>。资料处理结果表明, 地震 资料能清晰地揭示崂山隆起海相中-古生代地层的 内部反射界面。如图6所示,剖面中可清晰识别3 套可追踪对比的地震反射标志层组(B1、B2和B3)、 8个反射界面(T<sub>2</sub>、T<sub>8</sub>、T<sub>10</sub>、T<sub>11</sub>、T<sub>11-1</sub>、T<sub>12</sub>、T<sub>13</sub>和T<sub>2</sub>)、 7个地震层序(S1、S2、S3、S4、S5、S6和S7),从而 建立区内的地层层序。至此,浅部强反射界面能量 屏蔽作用条件下的崂山隆起地震技术攻关取得了突 破性进展,形成了以"高覆盖次数、富低频信号、强 震源能量"为特征的"高富强"地震探测技术<sup>[5-6,71-73]</sup>。 此后,区内进入技术应用阶段。

表 6 2015年试验采集参数

Table	b The	test par	ameters	s of seismic acquisi	tion in 2015
气枪	:各子阵;	冗放深度	./ m	电缆沉放深度/m	排列长度/m
7	10	10	7	16	7 200
7	10	10	7	20	7 200
10	10	10	10	16	7 200
10	10	10	10	20	7 200

同年,利用新采集资料和老资料开展了南黄海 全盆地地震资料连片解释,将中一古生代残留盆地 由南往北划分为青岛断褶带、崂山断隆带和烟台冲 断带3个构造单元<sup>[1,74]</sup>。解释和综合研究认为:南 黄海叠合盆地基底由元古界深、浅2套变质岩组 成<sup>[75-77]</sup>,海相中一古生界厚度大、分布广<sup>[1,72,78]</sup>,具有 3套区域烃源岩、2类储层、3套完整的生储盖组 合<sup>[79-84]</sup>;崂山断隆带构造相对稳定<sup>[7-8,77]</sup>,发育大型 圈闭<sup>[85-86]</sup>,钻井证实发生过大规模的油气运聚过 程<sup>[87-88]</sup>,是海相下构造层的油气远景区<sup>[89-92]</sup>;青岛 断褶带是海相上构造层的油气远景区<sup>[91-92]</sup>。



图 6 2015 年采集的"高富强"地震资料及其地层属性<sup>[1]</sup>

Fig.6 The "HRS" seismic reflection profile acquired in 2015 and its stratigraphic attribute interpretation<sup>[1]</sup>

#### 3.3.2 技术应用(2016年-至今)

(1) 崂山隆起中部目标评价和井位论证(2016-2018年)

通过对 2015 年采集资料的解释,在崂山隆起 中部发现了 26 个面积>10 km<sup>2</sup> 的构造圈闭,优选 出 3 个重点圈闭,其中高石 3 号圈闭面积大、继承 性发育。2016 年,采用"发现 6 号"物探船针对高 石 3 号构造开展了三维地震调查,采集参数与 2015 年完全相同(表 4),获得了高石 3 号构造"高富强" 地震资料(图 7),中一古生代地层内部反射特征更 为清晰。根据上述资料,2016—2018 年开展了调查 参数井井位论证,提出了 4 个建议井位<sup>[21]</sup>,分别为 高石 3 号构造的北高点(高参 1A 井)和南高点(高 参 1B)、高石 2 号构造高点(高参 1C)(图 8)和高 石 1 号构造高点(高参 1D)。



图 7 2016 年采集的 XL1596 测线高石 3 号构造三维资料 Fig.7 3D seismic data of Gaoshi 3 structure cross line 1596 acquired in 2016



图 8 过高参 1C 井 HB15-35 二维地震剖面 Fig.8 Seismic profile of Line HB15-35 cross the well Gaocan 1C

(2) 崂山隆起西部发现 2 个有利构造带(2019年--现在)

崂山隆起西部海水相对较浅、地震采集施工难 度大,勘探程度低、资料少,地震测网密度为 32 km× 64 km,有1口科探井,钻遇下志留统高家边组(未 穿)。为了落实高石稳定带的西延范围、开展崂山 隆起西部区带评价和目标评价,自 2019 年开始, QIMG 依托国家海洋地质调查专项项目在崂山隆起 继续开展地震探测技术攻关和补充调查。目前已 在崂山隆起西部极低调查程度区初步圈出了 2 个 NW 向的构造带,即五龙和驮背构造带(图 9),面积 分别为 2 700 和 2 300 km<sup>2</sup>,其形成主要受晚印支一 早燕山期的挤压变形作用控制,在早燕山期基本定 型,变形较弱,继承性好,构造带内发育多个大型圈





belts in the west of the Laoshan Uplift

闭,构造高点总体上呈 NW 向展布<sup>[93]</sup>。下一步将针 对这 2 个 NW 向的构造带开展调查和评价,落实重 点构造,开展井位论证,实施钻探。

到目前为止,应用"高富强"地震探测技术在 南黄海海相中-古生界首次发现了3 套可连续追踪 对比的地震反射标志层组。通过资料解释和综合 研究,建立了区内晚元古代以来的地层层序,初步 掌握了海相中-古生代残留盆地的地质结构,预测 了累计达 10×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> 的古生界油气远景区,优选出 面积超过 1×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> 的古生界有利区带,圈定了古 生界的重点目标,锁定了可望获得油气战略调查突 破的钻探井位。

# 4 结论与展望

#### 4.1 结论

(1)南黄海中-古生代海相沉积盆地的地震地 质条件具有"浅部波阻抗界面地震能量屏蔽作用强、 平面上呈2类地层结构、纵向上大套碳酸盐岩与碎 屑岩互层形成多反射界面、厚层碳酸盐岩层内部非 均质性弱、地质构造相对复杂"等特点。不同构造 单元的地震地质条件也不尽相同。浅层强反射界面 能量屏蔽、内部界面波阻抗差别小、地质构造相对 复杂是影响中-古生界地震成像质量的主要原因, 其中浅部强波阻抗界面能量屏蔽是关键因素。

(2)南黄海海相中一古生界地震探测技术攻关 经历了地震地质研究、技术攻关、技术突破与应用 3个阶段。随着物探船不断更新、地震仪器设备不 断升级、采集参数不断优化,经历了地震记录仪从 "五一"光电记录仪、模拟磁带仪到数字地震仪;震 源从炸药到空气枪;气枪容量不断增大、确保低频 能量的大枪不断增多、排列不断加长、覆盖次数不 断提高的过程。最终形成了以"高覆盖次数、富低 频信号、强震源能量"为特征的"高富强"地震探测 技术,突破了技术瓶颈,获得了区内海相中一古生界 有效反射资料。

(3)应用"高富强"地震探测技术在原来为空白 反射的崂山隆起发现了海相中一古生界3套可连续 追踪对比的地震反射标志层组,识别出7个反射界 面;通过资料解释、海陆对比和综合研究,建立了地 层层序,将海相中一古生代残留盆地由南往北划分 为青岛断褶带、崂山断隆带和烟台冲断带3个构造 单元,预测崂山断隆带为海相下构造层的油气远景 区,优选高石稳定带为有利区带,圈定了古生界钻 探目标。

#### 4.2 展望

(1)"高富强"地震探测技术在崂山隆起中南部获得了海相中一古生界的有效反射,在崂山隆起西部极浅水区和东部含火山岩区还未开展应用工作,勿南沙隆起区海相下古生界的地震资料仍然存在"信噪比低、反射能量弱、波组连续性差"的问题。因此,下一步还要针对这些地区的地震地质条件开展进一步的研究与攻关,发展该项技术。

(2)理论上,上下源/立体源技术、双缆宽线技术、OBC 应当获得更好的效果,目前在南黄海的试验效果并不理想,有待于进一步查明原因。下一步将尝试斜缆技术、节点 OBS 技术在区内的试验与应用,最终完善与集成海相中一古生界地震探测技术。

(3)南黄海盆地发育全球最为典型的浅部地震 波能量屏蔽层,如崂山隆起地区浅部新生界上新统 "低速低密"砂泥岩与深部下三叠统"高速高密"灰 岩直接接触,形成强阻抗界面,地震波到达此界面 后,子波透射能量弱,导致深层的地震资料信噪比 低、成像品质差。"高富强"地震探测技术突破了 "浅部强反射界面能量屏蔽作用"条件下的地震成 像技术瓶颈,在中国海域及全球海域具有重要的应 用价值。

#### 参考文献:

- [1] 陈建文, 雷宝华, 梁杰, 等. 南黄海盆地油气资源调查新进展[J].
   海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 1-23.
- [2] 张敏强,漆滨汶,高顺莉,等.南黄海中古生界勘探进展及油气 潜力[J].海洋地质前沿,2016,32(3):7-15.
- [3] 吴淑玉,陈建文,梁杰,等.南黄海海相中一古生界碳酸盐岩储 层特征及成藏模式:对比四川盆地和苏北盆地[J].海洋地质前 沿,2016,32(1):13-21.
- [4] 高顺莉,张敏强,陈华.大震源长缆深沉放地震采集技术在南黄海中古生代盆地的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2014, 34(1):95-101.
- [5] 陈建文,张异彪,刘俊,等.南黄海"高富强"地震勘查技术及其应用[J].海洋地质前沿,2016,32(10):9-17.
- [6] 陈建文, 施剑, 张异彪, 等. 地震调查技术突破南黄海海相中-古生界成像技术瓶颈[J]. 地球学报, 2017, 38(6): 847-858.
- [7] 陈建文. 南黄海海相中生界一古生界具有形成大型油气田的物 质基础[J]. 中国地质调查成果快讯, 2016, 2(12): 6-10.
- [8] 陈建文. 下扬子地块南黄海海相层系具备良好的油气形成条件[J]. 中国地质调查成果快讯, 2016, 2(12): 1-5.
- [9] 张训华,张志询,蓝先红,等,南黄海区域地质[M].北京:海洋出版社,2013:8-38.

- [10] 第三海洋地质调查大队地质研究院项目组.南黄海盆地新生 代地层初步划分与对比研究报告[R].上海:第三海洋地质调 查大队地质研究院,1978.
- [11] 姚长利. 黄海及周边地区重磁震综合反演技术研究及重磁资 料处理解释[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.
- [12] 杨金玉.南黄海盆地与周边构造关系及海相中、古生界分布 特征与构造演化研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- [13] 雷宝华,陈建文,吴志强,等.苏北-南黄海盆地海相中-古生 界密度和速度分析及其地震反射模型构建[J].石油地球物理 勘探,2018,40(3):558-567.
- [14] 陈建文, 施剑, 刘俊, 等. 南黄海海相中-古生界地震地质条件[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(10): 1-9.
- [15] 江苏省地质矿产局.全国地层多重划分对比研究32:江苏省 岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997:1-288.
- [16] 江苏省地质矿产局.中华人民共和国地质矿产部地质专报(一、 区域地质,第1号):江苏省及上海市区域地质志[M].北京:地 质出版社,1984:1-857.
- [17] 杨艳秋,李刚,易春燕.南黄海盆地海相地层地震反射特征及 地震层序地质时代[J].东北石油大学学报,2015,20(3):50-60.
- [18] 陈建文,张银国,刘俊,等.南黄海油气资源普查成果报告[R]. 青岛:青岛海洋地质研究所,2017.
- [19] 陈建文,李慧君,吴志强,等.南黄海前第三系油气前景研究 成果报告[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2010.
- [20] 杨长清, 董贺平, 李刚. 南黄海盆地中部隆起的形成与演 化[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(7): 17-21.
- [21] 陈建文,梁杰,张银国,等.南黄海油气资源调查项目成果报告[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2019.
- [22] 龚再升,王善书.中国石油地质志(卷十六):海洋石油地质志[M].北京:石油工业出版社,1990:270-288.
- [23] 龚再升,王善书,邱中建,等.中国石油地质志(卷十六):沿海 大陆架及毗邻海域油气区(上册)[M].北京:石油工业出版社, 1990:299-388.
- [24] 邱中建, 龚再升. 中国油气勘探(第四卷): 近海油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 981-984.
- [25] 范时清,金翔龙.黄海南部大地构造性质初步探索[J].海洋与 湖沼,1962,4(1/2):110-111.
- [26] 金翔龙,喻普之.黄海、东海的地质构造[M]// 中国科学院海 洋研究所海洋地质研究室.黄东海地质.北京:科学出版社, 1982:1-22.
- [27] 杨志坚,陈玉华.中国东部(包括海域)以朝鲜半岛西南日本古 构造关系的探讨[J].海洋地质与第四纪地质,1983,3(1):87-98.
- [28] 任纪舜.中国东部及邻区大地构造演化的新见解[J].中国区 域地质,1989(4):289-300.
- [29] 蔡乾忠.中国东部与朝鲜大地构造单元对应划分[J].海洋地 质与第四纪地质, 1995, 15(1): 7-24.
- [30] 任纪舜.从全球看中国大地构造:中国及邻区大地构造图简 要说明[M].北京:地质出版社,2000.
- [31] 第一海洋地质调查大队项目组.南黄海构造体系与含油气远 景评价报告[R].上海:地质部第一海洋地质调查大队,1979.
- [32] 石油工业部南黄海北部资源评价组. 中国南黄海北部坳陷石

油地质评价报告[R]. 北京:石油工业部, 1981.

- [33] 李培廉.南黄海的白垩系:一个值得重视的找油领域[J].海洋 地质与第四纪地质,1986,6(4):49-53.
- [34] 陈建文.南黄海前第三系油气前景研究项目2005年工作方案[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2005.
- [35] 石油工业部南黄海南部资源评价组.中国南黄海南部坳陷石 油地质评价报告[R].北京:石油工业部,1981.
- [36] 陈建文. 南黄海盆地群油气资源评价[R]. 青岛: 青岛海洋地质 研究所, 2003.
- [37] 陈建文. 南黄海北部油气资源评价研究[R]. 青岛: 青岛海洋地 质研究所, 2004.
- [38] 地矿部海洋地质综合研究大队项目组. 苏北南黄海石油地质特征及含油气性研究报告[R]. 上海: 地矿部海洋地质综合研究大队, 1982.
- [39] 陶瑞明. 黄海南部勿南沙隆起上古生界和中下三叠统油气远 景探讨[J]. 天然气工业, 1992, 12(2): 1-7.
- [40] 朱伟林. 中国近海前新生代油气勘探新领域探索[J]. 地学前 缘, 2000, 7(3): 215-226.
- [41] 刘守全,蔡乾忠,莫杰.中国海域油气勘探新领域:应当重视 海域中生界油气资源[J].中国地质,2001,28(11):4-9.
- [42] 陈建文. 南黄海盆地油气战略选区 [J]. 海洋地质动态, 2002, 18(11): 28-29.
- [43] 蔡东升,冯晓杰,张川燕,等.黄海海域盆地构造演化特征与中、古生界油气勘探前景探讨[J].海洋地质动态,2002, 18(11):23-24.
- [44] 张家强. 南黄海中、古生界油气前景[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(11): 25-27.
- [45] 陈建文,肖国林,刘守全,等.中国海域油气资源勘查战略研 究[J].海洋地质与第四纪地质,2003,23(4):77-82.
- [46] 戴春山,李刚,蔡峰,等.黄海前第三系及油气勘探方向[J].中 国海上油气(地质),2003,17(4):225-231.
- [47] 戴春山,李刚.黄海海域前第三系及油气勘探[J].海洋地质动态,2002,18(11):21-22.
- [48] 吴志强. 黄海地层岩石地球物理特征及其对地震勘探技术的 挑战[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(6): 407-411.
- [49] 戴明刚. 黄海地质与地球物理特征研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 583-591.
- [50] 姚永坚,夏斌,冯志强,等.南黄海古生代以来构造演化[J].石 油实验地质,2005,27(2):124-128.
- [51] 姚永坚, 冯志强, 郝天珧. 对南黄海盆地构造层特征及含油气 性的新认识[J]. 地质前缘, 2008, 15(6): 232-240.
- [52] 赵宗举,俞广,朱琰,等.中国南方大地构造演化及其对油气的控制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2003,30(2):155-168.
- [53] 陈建文.南黄海前第三系油气前景研究2005年工作总结和 2006年工作方案[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2005.
- [54] 杨方之, 闫吉柱, 苏树桉, 等. 下扬子地区海相盆地演化及油 气勘探选区评价[J]. 江苏地质, 2001, 25(3): 134-141.
- [55] 葛海霞, 张枝焕. 下扬子黄桥-句容地区二叠系一下三叠统油 源分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(26): 140-151.
- [56] 陈建文,吴志强,李慧君,等.南黄海前第三系油气资源前景 研究2006年工作总结和2007年工作方案[R].青岛:青岛海洋

地质研究所,2006.

- [57] 陈建文, 吴志强, 李慧君, 等. 南黄海前第三系油气资源前景 研究2007年工作总结和2008年工作方案[R]. 青岛: 青岛海洋 地质研究所, 2007.
- [58] 陈建文,吴志强,李双林,等.南黄海海域油气资源普查2008 年成果报告[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2008.
- [59] 吴志强,肖国林,张训华,等.南黄海区域地质构造背景与地 震勘探部署及试验成果[J].海洋地质前沿,2014,30(10):63-69.
- [60] 张海啟,陈建文,李刚,等. 地震调查在南黄海崂山隆起的发现及其石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 9(3): 107-113.
- [61] 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现 与勘探启示[J]. 地质评论, 2005, 51(4): 477-480.
- [62] 胡东风. 川东北元坝地区隐蔽气藏的勘探突破及其意义[J]. 天然气工业, 2010, 30(8): 9-12.
- [63] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.四川盆地大中型天然气田分布 特征与勘探方向[J].石油学报,2010,31(3):347-354.
- [64] 吴志强,高江涛,陈茂根,等.南黄海盆地地震试验数据处理 分析方法与成果[J].海洋地质前沿,2014,30(7):51-59.
- [65] 熊忠,高顺莉,张敏强,等.上下源宽线地震采集技术在南黄 海中部隆起的应用[J].石油地球物理勘探,2016,51(4):653.
- [66] 孟祥君, 张训华, 吴志强, 等. OBS调查技术方法及其在南黄海 的应用[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(7): 61-65.
- [67] 陈建文,梁杰,施剑,等.南黄海海相中一古生界"高富强"地 震探测技术[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2017.
- [68] 吴志强,肖国林,董贺平.基于南黄海盆地海相油气的海洋立体宽线地震勘探技术设想[J].海洋地质前沿,2012,28(8):61-65.
- [69] 唐松华,李斌,张异彪,等. 立体阵列组合技术在南黄海盆地 的应用[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(5): 64-69.
- [70] 高顺莉,徐发. 浅海区古生界海底电缆拟宽线地震采集方法[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2382-2387.
- [71] CHEN J W, SHI J, ZHANG Y B, et al. The "HRS" seismic exploration technology of deep strata in China Sea Areas: a case of the South Yellow Sea Basin[C]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2019, 93(supp. 2): 388-389.
- [72] 陈建文, 袁勇, 施剑, 等. 中国海域深部"高富强"地震探测技术与南黄海盆地海相地层的发现[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(3): 53-64.
- [73] 陈建文,梁杰,施剑,等.南黄海海相中一古生界地震探测技术 突破技术瓶颈[J].中国地质调查成果快讯,2017,3(4):18-21.
- [74] 雷宝华,陈建文,梁杰,等.印支运动以来南黄海盆地的构造 变形与演化[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):45-54.
- [75] 许明,陈建文, 雷宝华, 等. 南黄海海域中生代前陆盆地形成 的构造背景[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 13-24.
- [76] 陈建文,许明,雷宝华,等.华北-扬子板块碰撞结构的识别:来 自南黄海海域的证据[J].海洋地质与第四纪地质,2020, 40(3):1-12.
- [77] XU M, CHEN J W, LIANG J, et al. Basement structures under-

neath the northern South Yellow Sea Basin (East China): implications for the collision between the North China and South China blocks[J]. Journal of Asian Earth Sciences, Available online 14 October 2019.

- [78] ZHANG Y X, CHEN J W, ZHOU J Y, et al. Sedimen-tological sequence and depositional evolutionary model of Lower Triassic carbonate rocks in the South Yellow Sea Basin[J]. China Geology, 2019, 2(3): 301-314.
- [79] YUAN Y, CHEN J W, LIANG J, et al. Hydrocarbon geological conditions and exploration potential of Mesozoic –Paleozoic Marine Strata in the South Yellow Sea Basin[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(6): 1-15.
- [80] YUAN Y, CHEN J W, ZHANG Y X, et al. Tectonic evolution and geological characteristics of hydrocarbon reservoirs in marine Mesozoic-Paleozoic strata in the South Yellow Sea Basin[J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(5): 1075-1090.
- [81] YUAN Y, CHEN J W, ZHANG Y G, et al. Sedimentary system characteristics and depositional filling model of the Upper Permian-Lower Triassic in the South Yellow Sea Basin[J]. Journal of Central South University, 2018, 25: 2910-2928.
- [82] 梁杰,张银国,董刚,等.南黄海海相中一古生界储集条件分析 与预测[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(5):101-108.
- [83] 袁勇,陈建文,梁杰,等.海陆对比看南黄海海相中-古生界的 生储盖组合特征[J].石油实验地质,2017,39(2):196-203.
- [84] LIANG J, CHEN J W, WANG J Q, et al. Hydrocarbon geological conditions and exploration prospects of marine strata in the Laoshan Uplift, South Yellow Sea Basin[C]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2019, 93(supp. 3): 303-304.
- [85] 陈建文.南黄海崂山隆起海相中-古生界发现多个大型圈闭 构造[J].海洋地质前沿,2016,32(4):69-70.
- [86] 袁勇,陈建文,张银国,等.南黄海盆地崂山隆起海相中-古生 界构造地质特征[J].海洋地质前沿,2016,32(1):49-53.
- [87] 陈建文,张银国,欧光习.南黄海崂山隆起志留系古油藏的深部烃源证据[J].海洋地质前沿,2019,35(1):74-76.
- [88] 陈建文, 张银国, 欧光习, 等. 南黄海古生界油气多期成藏的 包体证据[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(2): 69-70.
- [89] CHEN J W, XU M, LEI B H, et al. Prospective prediction and exploration situation of marine Mesozoic-Paleozoic oil and gas in the South Yellow Sea[J]. China Geology, 2019, 2(1): 67-84.
- [90] 吴淑玉,刘俊,陈建文,等.南黄海崂山隆起石炭系-下二叠统 孔隙型碳酸盐岩储层预测[J].海洋地质与第四纪地质,2020, 40(5):136-148.
- [91] 陈建文. 南黄海海相中生界-古生界具有重要的油气资源前 景[J]. 中国地质调查成果快讯, 2018(86/87): 16-21.
- [92] 陈建文,梁杰,张银国,等.中国海域油气资源潜力分析与黄 东海海域油气资源调查进展[J].海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(6): 1-29.
- [93] 陈建文,梁杰,张银国,等.崂山隆起构造沉积条件地质调查 2020年进展报告[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2020.

# RESEARCH EXPERIENCES AND APPLICATION OF SEISMIC EXPLORA-TION TECHNOLOGY TO THE MESOZOIC– PALEOZOIC MARINE STRATA IN THE SOUTH YELLOW SEA BASIN

CHEN Jianwen<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Yibiao<sup>5</sup>, CHEN Hua<sup>6</sup>, LIU Jun<sup>7</sup>, HE Yuhua<sup>1,2</sup>, SHI Jian<sup>1,2,8</sup>, LI Bin<sup>5</sup>, YUAN Yong<sup>1,2</sup>, LIANG Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Yinguo<sup>1,2,9</sup>, LEI Baohua<sup>1,2</sup>, WANG Jianqiang<sup>1,2</sup>, WU Shuyu<sup>1,2,7</sup>,

WU Zhiqiang<sup>1,2</sup>, YAN Guijing<sup>1,2</sup>, CHEN Chunfeng<sup>6</sup>, XIAO Guolin<sup>1,2</sup>

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3 Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 4 Hohai University, Nanjing 210098, China; 5 Shanghai Geophysical Branch of Sinopec Offshore Oilfield Services Company, Shanghai 201208, China; 6 CNOOC China Limited-Shanghai, Shanghai 200335, China; 7 Yantai Coastal Zone Geological Survey Center, China Geological Survey, Yantai 264001, China; 8 China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

9 China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The South Yellow Sea Basin is the only large sedimentary basin without oil and gas fields discovered so far in the offshore area of China. There occur two sets of strata, the continental Mesozoic-Cenozoic and the marine Mesozoic-Paleozoic, for hydrocarbon exploration. The marine Mesozoic-Paleozoic strata are thick and widely distributed. However, the quality of seismic data is always a problem which restricts effective oil and gas exploration. The marine Meso-Paleozoic basin is characterized by deep burial, complex basin-forming background, and strong tectonic deformation in the later stage. The research of seismic exploration technology for the Meso-Paleozoic has experienced three stages of progress: seismic geological research, tackling key technical problems, and technical breakthrough and application. In the first stage, seismic geological conditions and rock physical properties were analyzed. Then, with the help of continuous updating of geophysical prospecting vessels, in addition to seismic instruments and equipment, the seismic acquisition parameters are continuously improved through large number of theoretical simulations, targeted physical simulations and continuous offshore trials. As the results, the seismic exploration technology called "HRS" took place, which broke the "bottleneck" of the seismic data interpretation for the marine Mesozoic-Paleozoic strata in the South Yellow Sea Basin. This technology is characterized by high coverage, low-frequency and strong source energy. By using this technology, three sets of seismic reflection markers which can be continuously traced and seven reflection surfaces were identified on the Laoshan Uplift where the original reflection of the marine Mesozoic-Paleozoic strata are blank. Upon the basis, stratigraphic sequences were established, residual basin tectonic units revealed, and the oil and gas prospect areas predicted. The Gaoshi stability zone of the Laoshan Uplift was selected as a favorable exploration target. Key structures were delineated, and drilling targets locked. The works mentioned above made clear the direction and conditions for further exploration and the breakthrough of oil and gas exploration in the new strata of the South Yellow Sea Basin. The "HRS" seismic exploration technology has great significance for expanding the spatial areas of hydrocarbon exploration in offshore China, and push forward the exploration and development of oil and gas resources in deep offshore areas. The technology may be used for oil and gas exploration in the sea areas with similar seismic and geological conditions in the other part of the world.

**Key words:** seismic exploration; technology tackling; marine Mesozoic–Paleozoic; exploration history; South Yellow Sea Basin