

文章编号: 0253-2697(2024)01-0202-24 DOI:10.7623/syxb202401012

# 北部湾盆地油气成藏规律与勘探新领域、新类型、资源潜力

邓勇<sup>1,2</sup> 胡德胜<sup>2</sup> 朱继田<sup>2</sup> 刘国昌<sup>1</sup> 陈奎<sup>2</sup> 童传新<sup>2</sup> 张道军<sup>2</sup> 徐新德<sup>2</sup>  
满勇<sup>2</sup> 游君君<sup>2</sup> 满晓<sup>2</sup> 吴云鹏<sup>2</sup> 周刚<sup>2</sup> 张建新<sup>2</sup>

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 北京 102249; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057)

**摘要:**北部湾盆地是南海西部海域重要的原油勘探区和产区,具备多凹陷含油、多层系成藏、多种油气成藏模式等优势成藏条件,近年来在页岩油、潜山、岩性、深层油气、后备凹陷/洼陷等新领域、新类型油气勘探中取得了突破。为了落实北部湾盆地重要生烃凹陷的区域成藏规律,指导后续常规油气精细勘探开发及新领域、新类型油气勘探,对区域石油地质条件开展了研究,总结了成藏规律。研究表明,多期构造运动控制了北部湾盆地的构造演化和物质充填;古近系始新统流沙港组二段油页岩和半深湖亚相泥岩为盆地最重要的烃源岩,此外,在流沙港组三段、流沙港组一段、涠洲组二段也发育多套烃源岩;发育潜山储层和碎屑岩储层,形成了多源、多储、多盖的格局;凹陷区原生近源成藏、凹中断裂带/断隆带/陡坡带垂向成藏、斜坡区过路成藏、凸起/隆起区汇流成藏等多种成藏模式控制了北部湾盆地的多凹陷成藏;油气在多凹多带有序分布,油气的差异聚集控制了内气外油、深气浅油的油气分布特征,不同区带内的油气藏类型差异显著。在区域石油地质条件与成藏规律的指导下,从资源潜力、成藏条件、勘探开发程度综合分析,页岩油、潜山、岩性圈闭、深层油气、后备凹陷/洼陷是北部湾盆地未来勘探开发的重要领域。

**关键词:**北部湾盆地;新领域;新类型;成藏条件;资源潜力

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

## Hydrocarbon accumulation regularities, new fields and new types of exploration, and resource potentials in Beibuwan Basin

Deng Yong<sup>1,2</sup> Hu Desheng<sup>2</sup> Zhu Jitian<sup>2</sup> Liu Guochang<sup>1</sup> Chen Kui<sup>2</sup> Tong Chuanxin<sup>2</sup>  
Zhang Daojun<sup>2</sup> Xu Xinde<sup>2</sup> Man Yong<sup>2</sup> You Junjun<sup>2</sup> Man Xiao<sup>2</sup>  
Wu Yunpeng<sup>2</sup> Zhou Gang<sup>2</sup> Zhang Jianxin<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Zhanjiang Guangdong 524057, China)

**Abstract:** As an important crude oil exploration and production area in the western South China Sea, Beibuwan Basin has the advantages of oil enrichment in multiple sags, hydrocarbon accumulation in multiple strata and multiple models. In recent years, breakthroughs have been made in new fields and new types of oil-gas exploration involving shale oil, buried hills, lithologic reservoir, deep hydrocarbon resources, and backup sags/subsags. The paper investigates the regional petroleum geological conditions, so as to make clear the regional hydrocarbon accumulation regularities of the important hydrocarbon-generating sags in Beibuwan Basin, and guide the subsequent fine exploration and development of conventional oil-gas and the new fields and new types of hydrocarbon exploration. The research shows that the multi-stage tectonic movement controlled the tectonic evolution and material filling in Beibuwan Basin. The oil shale and semi-deep lacustrine mudstone of Member 2 of the Paleogene Eocene Liushagang Formation are the most important source rocks in the basin, several sets of source rocks are developed in Member 1 and 3 of Liushagang Formation and Member 2 of Weizhou Formation, and buried-hill reservoir and clastic rock reservoir are also developed, thus forming a multi-source, multi-reservoir and multi-cap pattern. The hydrocarbon accumulation in multiple sags of Beibuwan Basin is controlled by multiple mechanisms, such as near-source primary hydrocarbon accumulation in sag, vertical accumulation in fault belt, fault-uplift belt and steep slope belt, bypass accumulation in slope area, as well as converged accumulation pattern in salient and uplift. Oil and gas are orderly

**基金项目:**中国海洋石油有限公司“十四五”科技重大专项“地层岩性油气藏高效识别与精细评价技术”(KJGG2022-0303)、中国海洋石油有限公司综合科研项目“北部湾盆地页岩油资源评价与有利区带预测”(KJZH-2023-2106)和中海石油(中国)有限公司科技项目“‘十四五’中海油矿业权区及周边空白区油气资源评价”(QGYQZYPI2022-3)资助。

**第一作者:**邓勇,男,1975年9月生,1999年获石油大学(华东)学士学位,现为中海石油(中国)有限公司湛江分公司副总经理、总地质师、教授级高级工程师、中国石油大学(北京)博士研究生,主要从事海洋油气勘探研究、管理工作。Email: dengy@cnooc.com.cn

**通信作者:**刘国昌,男,1982年2月生,2012年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事地球物理数据处理、参数反演与地震成像研究。Email: guochang.liu@cup.edu.cn

distributed in multi-sags and multi-zones. The oil-gas differential accumulation controls the distribution of internal gas and external oil, deep gas and shallow oil. Moreover, there is a significant difference in the types of oil-gas reservoirs in different zones. Under the guidance of regional petroleum geological conditions and accumulation regularities, the comprehensive analysis of resource potentials, accumulation conditions and exploration and development degree indicate that shale oil, buried-hill, lithologic trap, deep hydrocarbon resources and backup sags/subsags are important new types and new fields for future exploration and development in Beibuwan Basin.

**Key words:** Beibuwan Basin; new field; new type; accumulation condition; resource potential

引用:邓勇,胡德胜,朱继田,刘国昌,陈奎,童传新,张道军,徐新德,满勇,游君君,满晓,吴云鹏,周刚,张建新. 北部湾盆地油气成藏规律与勘探新领域、新类型、资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 202-225.

Cite: DENG Yong, HU Desheng, ZHU Jitian, LIU Guochang, CHEN Kui, TONG Chuanxin, ZHANG Daojun, XU Xinde, MAN Yong, YOU Junjun, MAN Xiao, WU Yunpeng, ZHOU Gang, ZHANG Jianxin. Hydrocarbon accumulation regularities, new fields and new types of exploration, and resource potentials in Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 202-225.

自 20 世纪 60 年代中国对南海开展油气勘探以来,北部湾盆地逐渐成为南海西部海域重要的原油勘探区和产区,具有多凹陷含油、多层系成藏、多种油气成藏模式等优势成藏条件<sup>[1-2]</sup>。北部湾盆地在涠西南凹陷<sup>[3]</sup>、乌石凹陷<sup>[4]</sup>、迈陈凹陷<sup>[5]</sup>、海中凹陷<sup>[6]</sup>、福山凹陷<sup>[7]</sup>和雷东凹陷<sup>[8]</sup>等多个凹陷均有油气发现,其中,涠西南凹陷已建设成为南海西部重要的原油产区<sup>[9-10]</sup>,乌石凹陷也即将投产;已发现的油气分布在前古近系潜山、古近系流沙港组和涠洲组,以及新近系角尾组等多个层系<sup>[11-12]</sup>;油藏类型包括背斜、断鼻、断块等构造油藏,以及构造-岩性油藏、岩性油藏、地层油藏等多种类型。近年来,北部湾盆地在页岩油<sup>[13-14]</sup>、潜山<sup>[15-16]</sup>、岩性<sup>[17-18]</sup>、深层油气<sup>[19]</sup>、后备凹陷/洼陷<sup>[20-21]</sup>等新领域和新类型油气勘探上取得了突破,对南海西部油田“上产一千万立方米”具有重

要意义。为落实北部湾盆地重要生烃凹陷的区域成藏规律,指导后续常规油气的精细勘探开发及新领域、新类型油气勘探,笔者对区域石油地质条件开展研究,总结成藏规律,并对新领域、新类型油气的勘探突破进行简要介绍。

## 1 油气勘探历程

北部湾盆地位于中国南海北部湾海域,是在南海北部大陆边缘发育起来的沉积盆地,总面积约为  $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地内部具有隆、坳相间的构造格局,包括北部坳陷、企西隆起、南部坳陷等一级构造单元,并被涠西南低凸起、流沙凸起、徐闻凸起等分割形成涠西南凹陷、海中凹陷、昌化凹陷、海头北凹陷、乌石凹陷、纪家凹陷、迈陈凹陷、福山凹陷、锦和凹陷、雷东凹陷和湛江凹陷等主要凹陷<sup>[22]</sup>(图 1)。

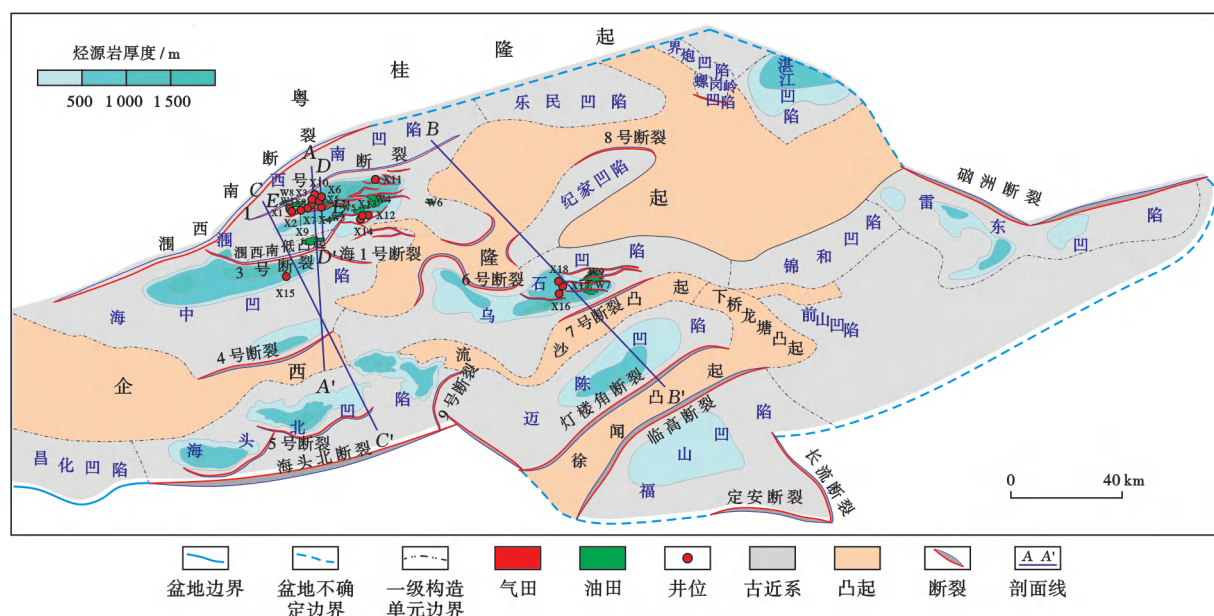


图 1 北部湾盆地构造纲要

Fig. 1 Tectonic outline of Beibuwan Basin

北部湾盆地的油气勘探历程可以分为4个阶段。

(1) 早期自营勘探阶段(1979年之前)。1965年,北部湾盆地周围陆地已开展石油勘探工作,但在海域范围投入的工作量较少。1976年5月,石油工业部南海石油勘探指挥部成立,正式拉开了北部湾盆地油气勘探的序幕,并于1977年8月钻探了第1口井,证实古近系流沙港组具备良好的烃源岩,首次在流沙港组三段(流三段)测试获得工业油流。该时期主要采集二维地震测线,初步认识了北部湾盆地的基本构造特征,划分了盆地的二级构造单元,发现了40余个构造;实施钻井近10口,发现3个含油气构造,其中6口井在测试中获得工业油气流,勘探成功率高达75%,发现了4套含油层系,并开展了地层命名、地层划分对比,以及岩性电性特征和地层时代确定等工作,取得了大量研究成果,为北部湾盆地的油气勘探奠定了良好的基础。

(2) 对外合作与自营勘探并举阶段(1979—1997年)。1979年7月,北部湾盆地进入对外合作勘探阶段。1982年2月,中国海洋石油总公司成立,并与多家石油公司合作,针对北部湾盆地开展全面对外合作勘探,共完成二维地震采集近 $3 \times 10^4$  km,钻井近30口,预探近20个构造,有13口井获油气流,发现和证实5个油气田,其中,2个油田投入开发。在对外合作的同时,中国海洋石油总公司坚持对全盆地进行持续研究,通过开展自营勘探,打出一批高产井,为后期全面自营勘探积累重要勘探经验。

(3) 自营引领合作勘探阶段(1998—2003年)。1997年以后,北部湾盆地勘探进入以自营为主、合作为辅的勘探阶段,该阶段北部湾盆地仍有3个合作区块。自营阶段初期以区域研究为主,虽然仅钻井5口,但获得了良好的勘探成果。

(4) 滚动与自营勘探阶段(2004年至今)。2004年3月以来,中国海洋石油总公司以北部湾盆地作为试点区,对主要富烃凹陷的成藏规律进行了分析,并采用海底电缆地震采集处理技术<sup>[23-24]</sup>、复杂断块精细解释技术、储层预测技术、钻井储层保护技术和测试工艺技术等进行了系统研究,围绕涠西南凹陷在生产平台周围10 km范围内开展滚动勘探。2005年至今,涠西南凹陷滚动勘探累计钻井近150口,落实近30个油田及含油构造。北部湾盆地其他凹陷在自营勘探中同样获得丰硕成果。乌石凹陷自营钻探探井、评价井100余口,累计发现超20个油田和含油构造;海中凹陷、迈陈凹陷、福山凹陷、雷东凹陷等后备凹陷钻井10余口,累计发现含油气构造近10个,证实这些后备凹陷具备成藏条件。以上钻探成果为北部湾盆地区域研究取得

了宝贵的地质资料,为后续勘探研究奠定了坚实基础。

经过40余年勘探,北部湾盆地共发现60余个油田和含油构造。目前,已开发油田均位于涠西南凹陷,针对中—小油田断层多、储层变化大、油气水分布复杂、处于台风区(海况恶劣)的特点,创立了油田群联合开发方案,尽可能减少海上开发工程设施,降低开发投资,提高生产时率,并综合利用资源,使一些边际石油资源得以利用。自1986年W1油田投产以来,陆续有10余个油田相继投入了开发。

## 2 油气地质条件与成藏规律

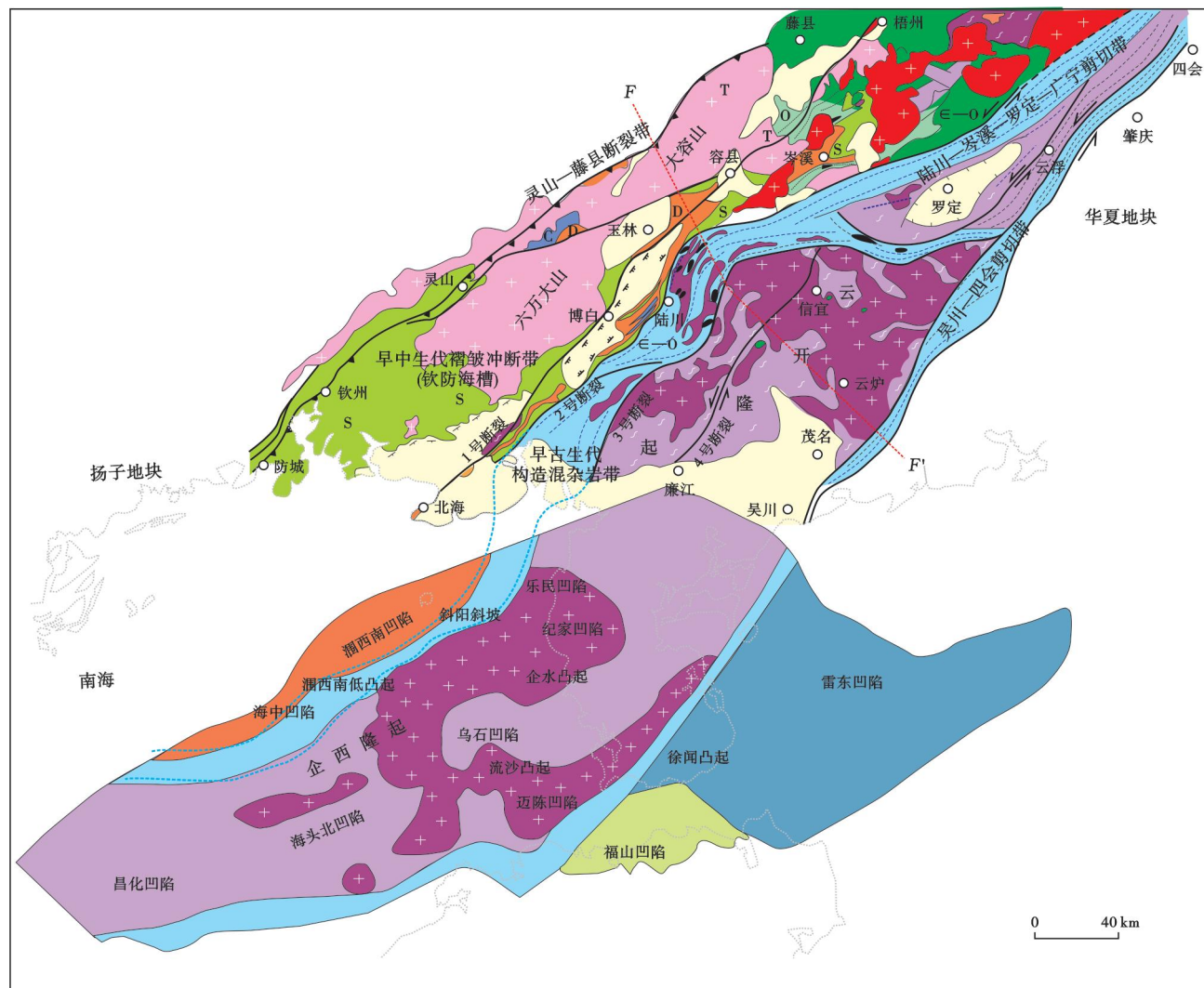
### 2.1 多期构造运动控制了北部湾盆地演化与沉积充填

北部湾盆地位于中南地块、马江蛇绿岩带及哀牢山—红河断裂带和海南岛夹持的三角形地带,由长轴方向为NE—SW向的系列半地堑、复杂半地堑组成,是华南地块在特提斯构造域、环太平洋构造域碰撞以及南海扩张演化影响下汇聚形成的叠合盆地。北部湾盆地的基底由晚古生代钦防海槽<sup>[25]</sup>及其上的印支期—燕山期褶皱冲断系<sup>[26]</sup>和前陆盆地、元古代云开古陆构成(图2),发育加里东期为主的岩浆侵入体。

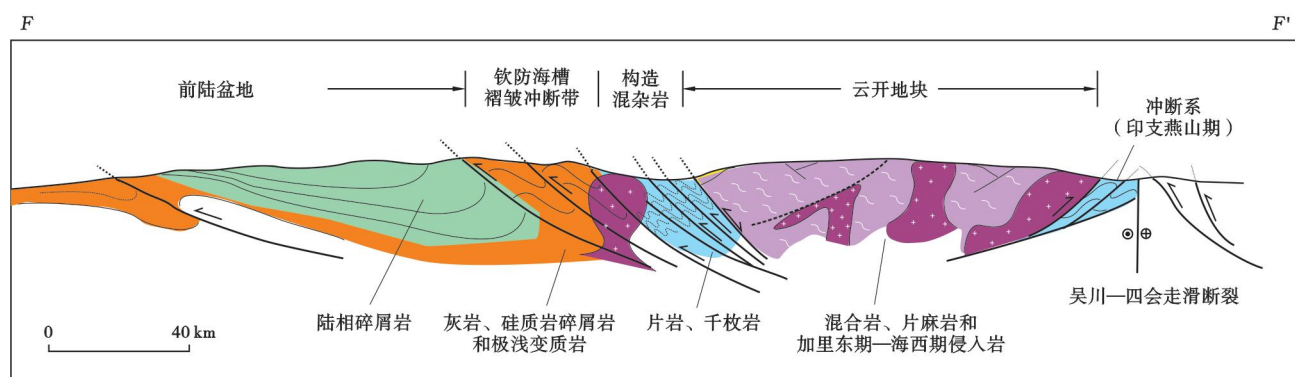
北部湾盆地的基底自下而上划分为4个构造层:前震旦系结晶基底、震旦系—下古生界浅变质基底、上古生界碳酸盐岩基底、中生界岩浆岩和碎屑岩基底<sup>[26]</sup>。受钦防海槽和云开古陆影响,盆地西部基底以上古生界陆表海沉积为主,多口井钻遇石炭系碳酸盐岩基底,且圈闭构造特征呈复向斜,向斜核部位于涠西南大断裂处。涠西南低凸起3号断裂西侧以下古生界变质岩基底为主,以东则以志留系S型花岗岩基底为主,为加里东期华夏地块和扬子地块碰撞造山产物,临高凸起以中生界浅变质砂岩基底为主(图3)。

北部湾盆地新生界呈明显的下断上拗双层构造<sup>[27]</sup>,经历了古新世的神狐运动(65.5~55.8 Ma)、始新世的珠琼运动I幕(55.8~33.9 Ma)和渐新世珠琼运动II幕(33.9~23.0 Ma)共3期张裂活动及新近纪拗陷作用,叠加了两期南海扩张事件,发育多条NE向控盆边界断裂和控凹边界断裂,形成了涠西南凹陷、乌石凹陷、海中凹陷、迈陈凹陷等多个箕状半地堑凹陷(图4—图6)。

在神狐运动期,北部湾盆地NW—SE向伸展作用明显,发育一系列NE向的控盆边界断裂和控凹边界断裂,如涠西南凹陷涠西南大断裂、乌石凹陷7号断裂、迈陈凹陷9号断裂、灯楼角断裂、福山凹陷临高断裂等。在这些NE走向控凹断裂影响下,北部湾盆地发育形成了一系列箕状半地堑凹陷,并发育一套干旱、半干旱条件下的棕红色粗碎屑沉积。



(a) 平面构造单元



(b) 陆上构造带典型剖面

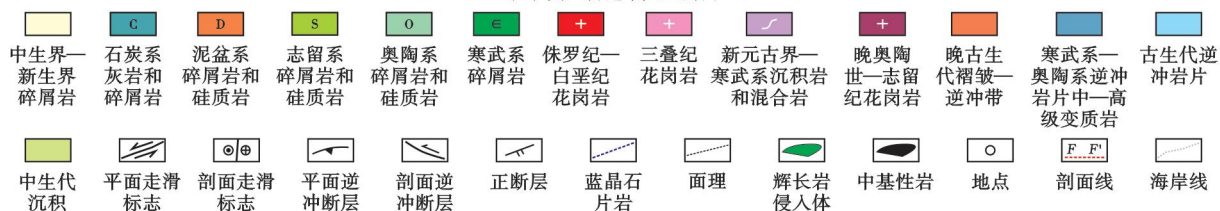


图 2 北部湾盆地与周边构造单元关系

Fig. 2 Relationship between Beibuwan Basin and its surrounding tectonic units

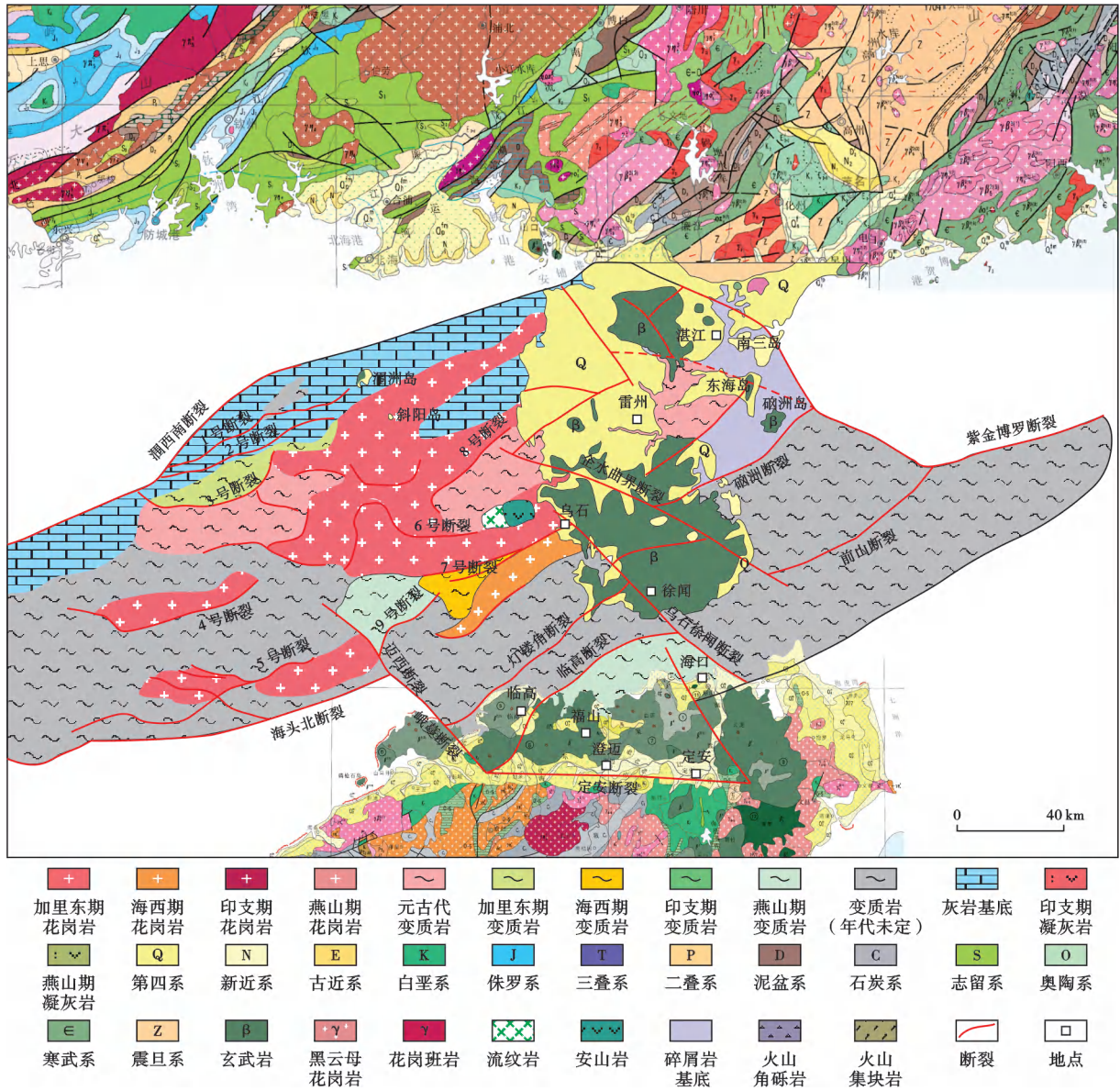


图3 北部湾盆地及周边基底断裂、岩性平面分布

Fig. 3 Basement fault and lithology distribution in Beibuwan Basin and its surrounding area

珠琼运动 I 幕,拉张应力变为 NNW—SSE 向,伸展作用进一步加强,发育了涠西南凹陷 1 号断裂、海中凹陷 3 号断裂等一系列 NEE 向断裂,同时乌石凹陷 7 号断裂活动加强,在 SE 向先存断裂与 NE—SW 向断裂转换位置隆升翘倾,造成流三段内部发育系列反向断层。随着 1 号断裂、3 号断裂、7 号断裂活动逐渐增强,北部湾盆地由浅湖向半深湖演变,并在流沙港组二段(流二段)发育区域分布的页岩。

从珠琼运动 II 幕到南海第 1 次扩张结束,南海形成了东部海盆和西北海盆,扩张方向为 NS 向,形成了近 EW 向和 NEE 向的地磁异常条带,并在西邻的红河断裂带左行走滑作用下产生构造反转。由于 NS 向伸展量大,在原 NEE 向断裂体系上,产生了近 EW 向

南掉的滑脱断层,这些断层中止于流二段底部油页岩内,由下至上向 NW 方向迁移,在平面上形成菱形断块系。受滑脱断层影响,产生洼中隆起带,局部区域因构造反转而隆升,造成地层剥蚀,导致新近系—古近系有角度不整合。

晚渐新世—中新世(23.0~10.5 Ma),南海第 2 次扩张,东部海盆进一步扩张,扩张方向为 NW—SE 向,形成西南海盆,并形成 NE 向地磁异常条带。该时期是北部湾盆地的重大变革期,盆地结构由断陷转为坳陷,并由陆相沉积环境变为海相沉积环境。

晚中新世开始,北部湾盆地经历东沙运动(10.5 Ma 至今),进入区域构造反转隆升阶段<sup>[28]</sup>,盆地大规模翘倾,在海中凹陷、涠西南凹陷、迈陈凹陷形成明显的下

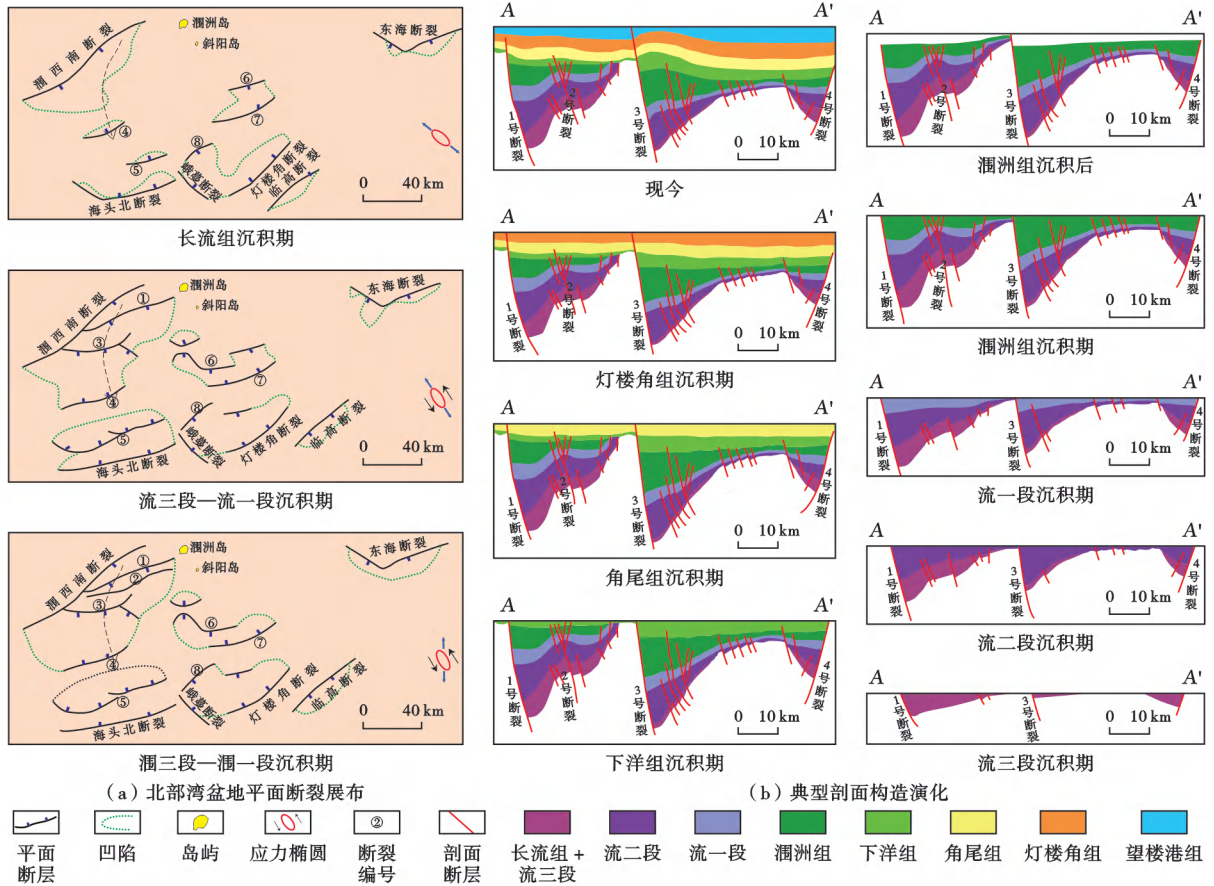


图 4 北部湾盆地构造演化模式(剖面位置见图 1)

Fig. 4 Tectonic evolution model of Beibuwan Basin

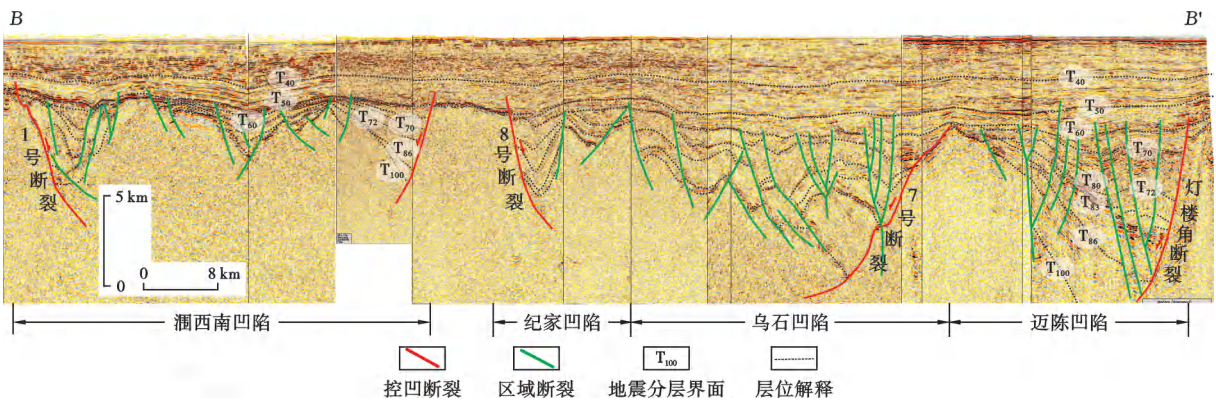


图 5 过涠西南凹陷—纪家凹陷—乌石凹陷—迈陈凹陷典型地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 5 Typical seismic profile across Weixinan-Jijia-Wushi-Maichen sags

凹上凸正反转褶皱。这一阶段的隆升与红河断裂右行走滑强度的加大有关,且表现出西强东弱的特点,在乌石凹陷东区、福山凹陷和涠西南低凸起,沿走滑断裂发育大规模的岩浆侵入体和火山岩。5.5 Ma 以来,受菲律宾海板块向西俯冲作用影响,海中凹陷形成了一系列反转背斜构造。

北部湾盆地古近纪整体发育了 NE、NEE、近 EW 和 NW 走向 4 组主干断裂体系<sup>[29]</sup>。由早至晚,主干断裂

体系的发育演化经历了 NE 向控盆期(65.5~55.8 Ma)、NEE 向控盆期(55.8~33.9 Ma)和近 EW 向控盆期(33.9~23.0 Ma)3 个时期,各时期控盆断裂的平均活动速率分别为 130 m/Ma、155 m/Ma 和 175 m/Ma,区域伸展应力场呈顺时针转变,同时伴随着走滑效应的增强,NE 向、NEE 向和近 EW 向控盆断裂体系以帚状斜交或平行斜列的组合方式控制了盆地裂陷结构的发育。由早至晚,盆地裂陷期的构造演化经历

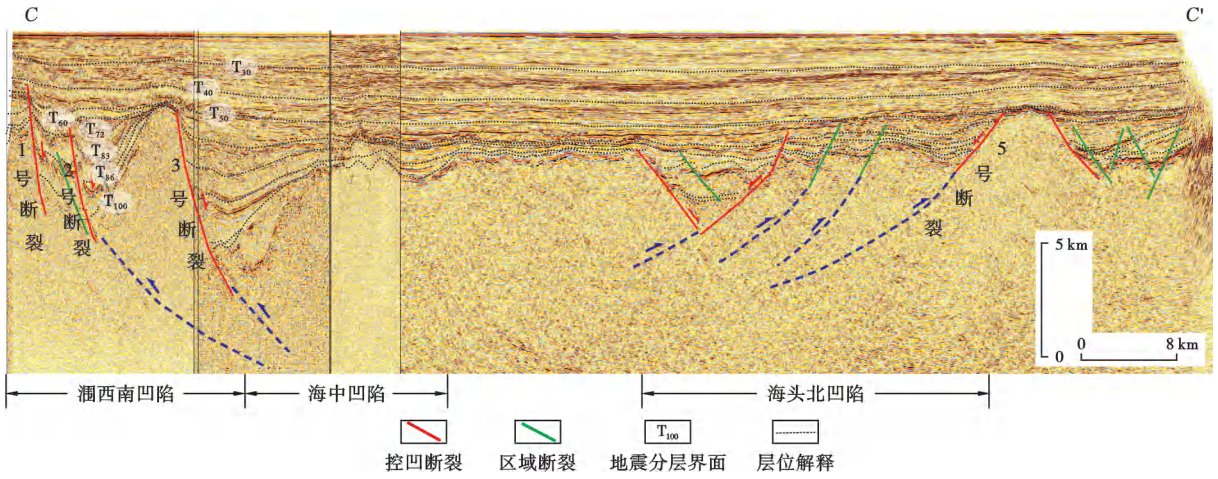


图 6 过涪西南凹陷—海中凹陷—海头北凹陷典型地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Typical seismic profile across Weixinan-Haizhong-Haitoubei sags

了简单伸展半地堑、复杂伸展半地堑和走滑改造半地堑 3 个阶段,同时沉降中心的展布受控于断裂活动,同样经历了 NE 向→NEE 向→近 EW 向的顺时针转变。

### 2.2 多源多储多盖,形成北部湾盆地多种成藏组合

#### 2.2.1 盆地发育多套有利烃源岩

北部湾盆地发育多套烃源岩,其中,古近系中始新统流二段半深湖亚相泥页岩、油页岩是钻探证实的优质烃源岩,目前已发现的油气主要来自这套烃源岩。钻井揭示该套暗色泥页岩主要呈深灰色、褐灰色,质纯、性硬、页理发育;厚度较大,约可达 400 m;总有机碳(TOC)含量为 1%~4%,热解生烃潜量( $S_1 + S_2$ )平

均为 10 mg/g,氢指数(HI)平均约为 350 mg/g,有机质类型以 I—II<sub>1</sub> 型为主,属中等—好烃源岩(图 7、图 8)。油页岩的颜色较深,多呈灰褐色、灰黑色或棕色—褐黑色,质纯、性硬、页理发育,岩屑具淡油味,且多数点火可燃;主要分布在流二段顶部和底部,其中,顶部厚度为 10~30 m,底部厚度为 20~100 m;生烃品质较佳,TOC 含量普遍大于 3%、可达 11%, $S_1 + S_2$  平均大于 25 mg/g,HI 集中在 300~600 mg/g,有机质类型以 I 型为主,综合评价为优质烃源岩<sup>[30-31]</sup>(图 7、图 8)。此外,北部湾盆地流三段半深湖亚相泥页岩、流沙港组一段(流一段)浅湖亚相泥岩以及渐新统涪洲

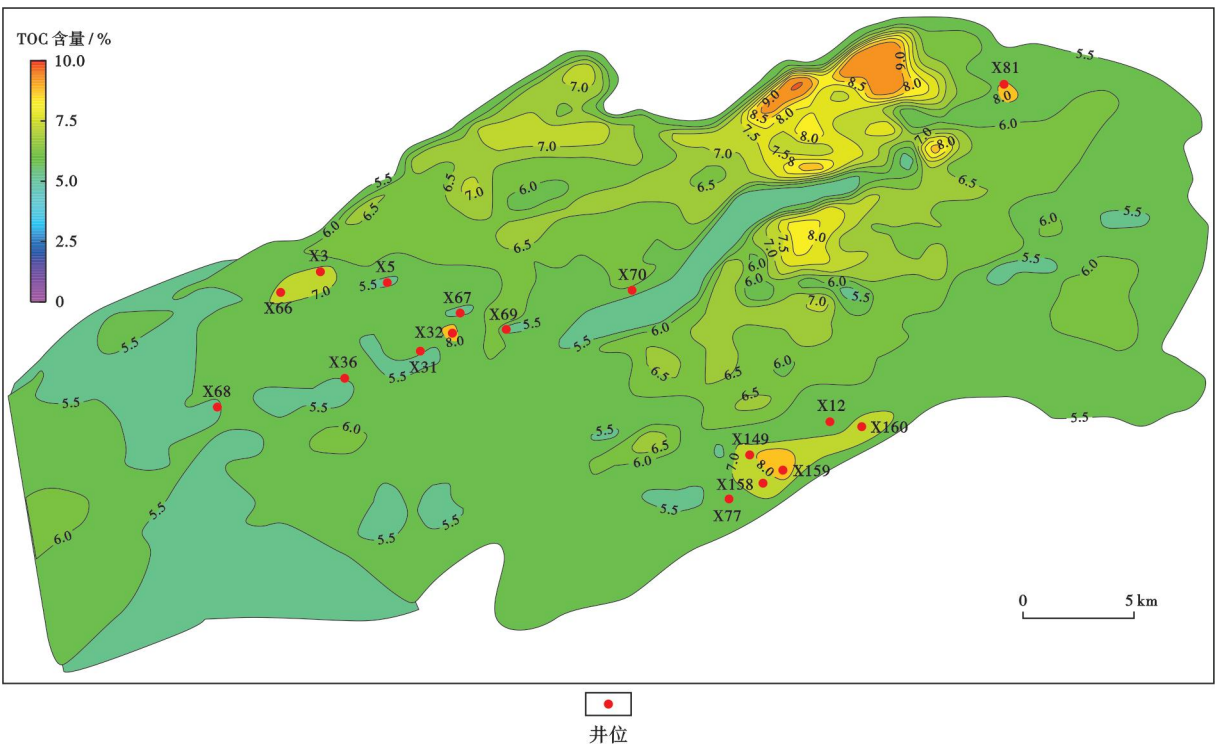


图 7 涪西南凹陷流二段下层序油页岩 TOC 含量平面分布

Fig. 7 TOC content distribution of oil shale in the lower sequence of Member 2 of Liushagang Formation, Weixinan sag

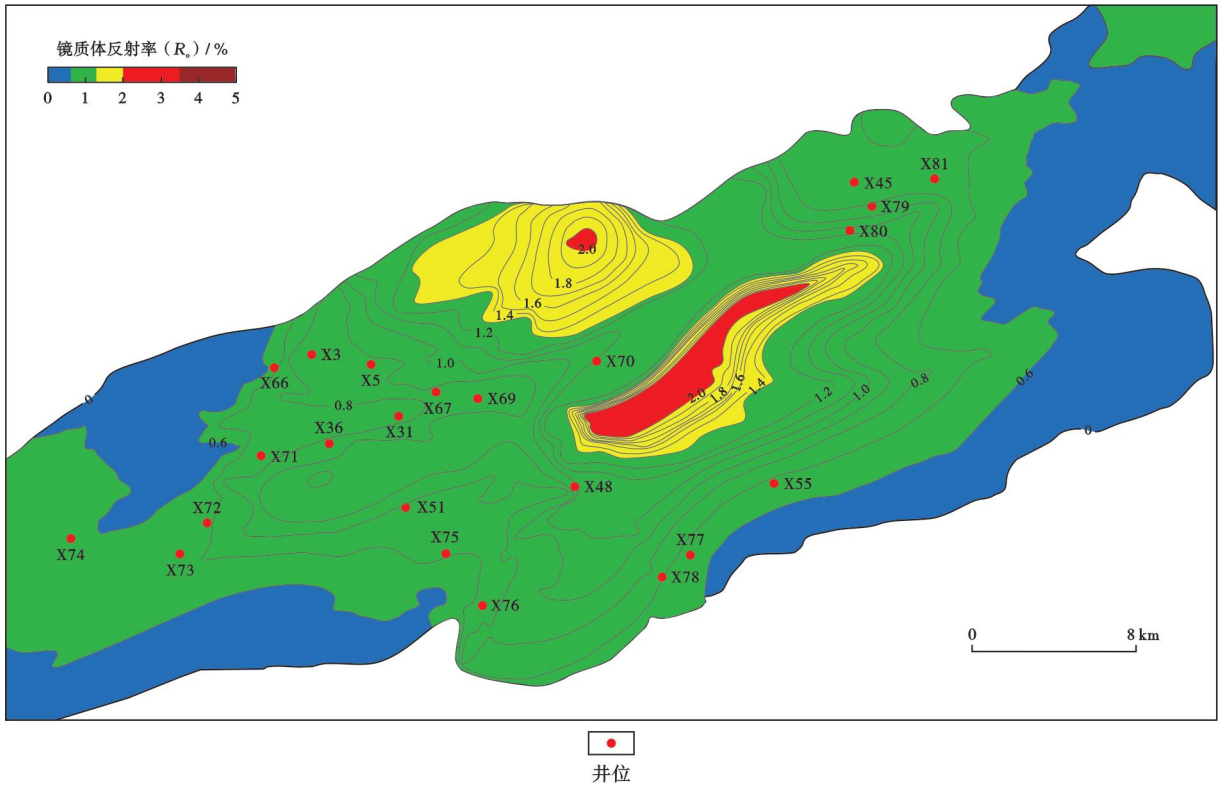


图 8 涠西南凹陷流二段下层序油页岩成熟度平面分布

Fig. 8 Maturity distribution of oil shale in the lower sequence of Member 2 of Liushagang Formation, Weixinan sag

组湖相或含煤地层也具有生烃潜力<sup>[32]</sup>。目前,在涠西南凹陷 2 号断裂新发现一套下石炭系测水组厚层深灰色泥岩、黑灰色碳质泥岩夹薄煤地层,厚度约为 194 m,实测 TOC 含量为 1%~10%,平均约为 3%,为潜在的烃源岩。

#### 2.2.2 潜山储层、碎屑岩储层是盆地的主要储层类型

北部湾盆地储层主要包括潜山储层、碎屑岩储层 2 类。

潜山类型主要包括加里东期志留纪花岗岩潜山、海西期石炭纪灰岩潜山和燕山期白垩纪火山岩潜山<sup>[26,33]</sup>。花岗岩潜山主要分布在各凹陷内部或周边隆起/凸起上,如企西隆起、流沙凸起;灰岩潜山储层主要分布在涠西南凹陷 1 号断裂带和 2 号断裂带;火山岩储层主要分布在乌石凹陷和福山凹陷,分布较为局限。

碎屑岩储层主要分布在新生界,且在各层系均有发育,分别为古新统长流组洪积扇砂岩、始新统流沙港组三角洲砂岩—湖底扇—滩坝砂岩、渐新统涠洲组三角洲砂岩、中新统下洋组滨海潮坪和角尾组滨海—潮坪—潮道砂岩等。受构造事件或其引发的湖退/海退控制,在长流组顶界不整合面( $T_{90}$ 地震反射界面)之上的流三段下层序、流一段顶界不整合面( $T_{80}$ 地震反射界面)之上的涠洲组三段(涠三段)、涠洲组一段(涠一段)顶界不整合面( $T_{60}$ 地震反射界面)之上的下洋组中,分布区域性的厚层砂岩。

#### 2.2.3 盆地发育多套有效盖岩

北部湾盆地发育多套多类型厚层盖层。古近纪存在 3 大湖盆扩张期,形成了流二段下层序( $T_{85}$ 地震反射界面)、流二段顶面( $T_{83}$ 地震反射界面)、涠洲组二段(涠二段)顶面( $T_{70}$ 地震反射界面) 3 个湖扩面,下部皆发育厚层的半深湖亚相油页岩/泥岩和浅湖亚相泥岩沉积,是良好的区域盖层<sup>[34]</sup>。新近纪存在多期海平面变化,发育多套浅海相泥岩沉积,其中,角尾组一段(角一段)上部发育一套区域性厚层海相泥岩。钻井已证实,北部湾盆地潜山内部的泥岩及致密层段、长流组致密层、流沙港组油页岩及湖相泥岩、涠洲组湖相泥岩、新近系海相泥岩均具有很好的封盖能力。

综上所述,北部湾盆地以流沙港组湖相油页岩、泥岩为主要烃源岩,以前古近系潜山、古近系流沙港组和涠洲组以及新近系角尾组碎屑岩为储层,以各层段储层邻近的致密层及上覆泥、页岩为盖层,形成多个成藏组合(图 9)。

### 2.3 多成藏模式控制北部湾盆地油气成藏

北部湾盆地不同区域因其烃源岩位置、输导体系和动力机制不同,导致油气成藏模式不同。北部湾盆地具有凹陷区原生近源成藏、凹中断裂带/断隆带/陡坡带垂向成藏、斜坡区过路成藏、凸起/隆起区汇流成藏等多种成藏模式(图 10、图 11)。



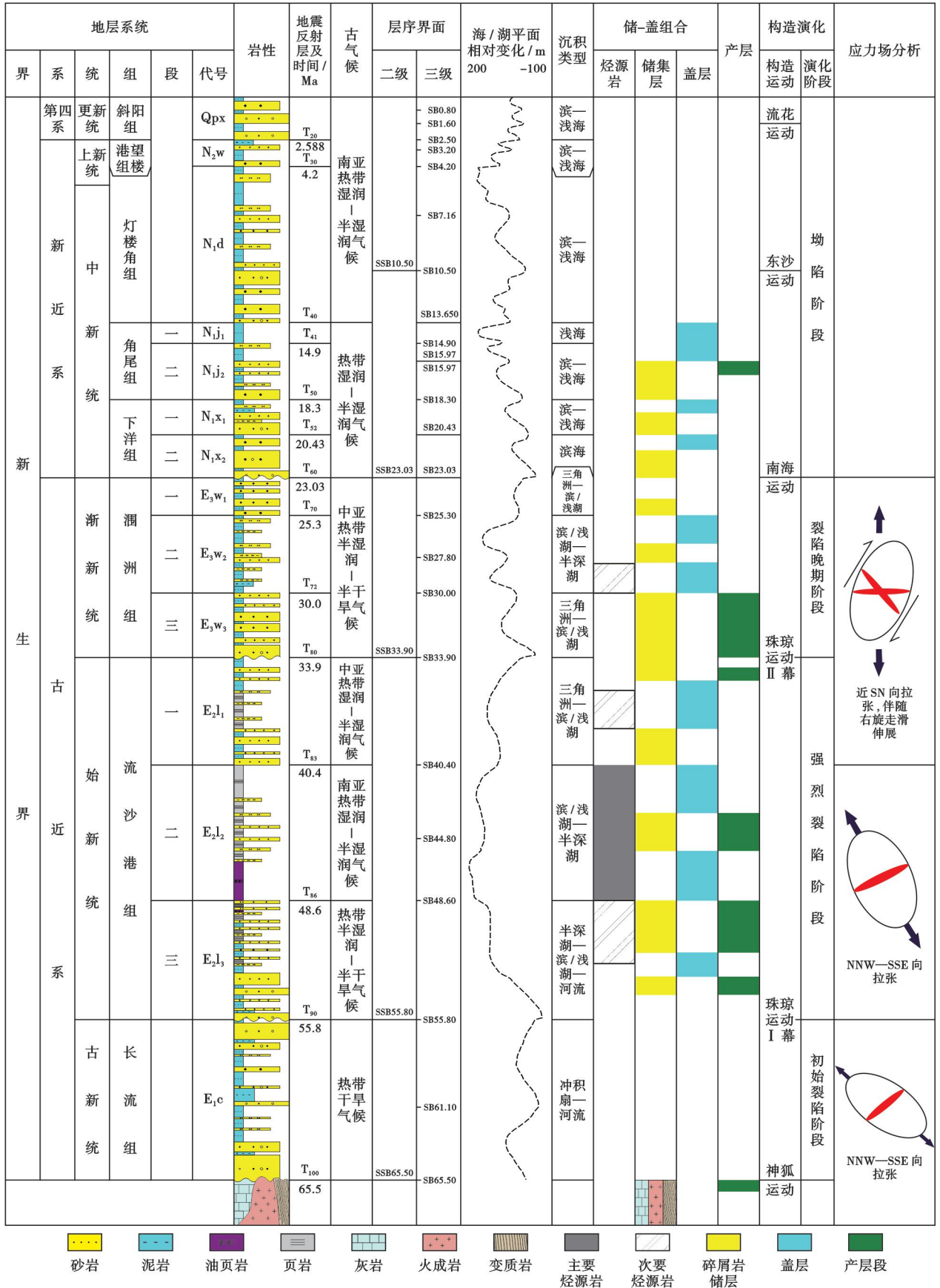
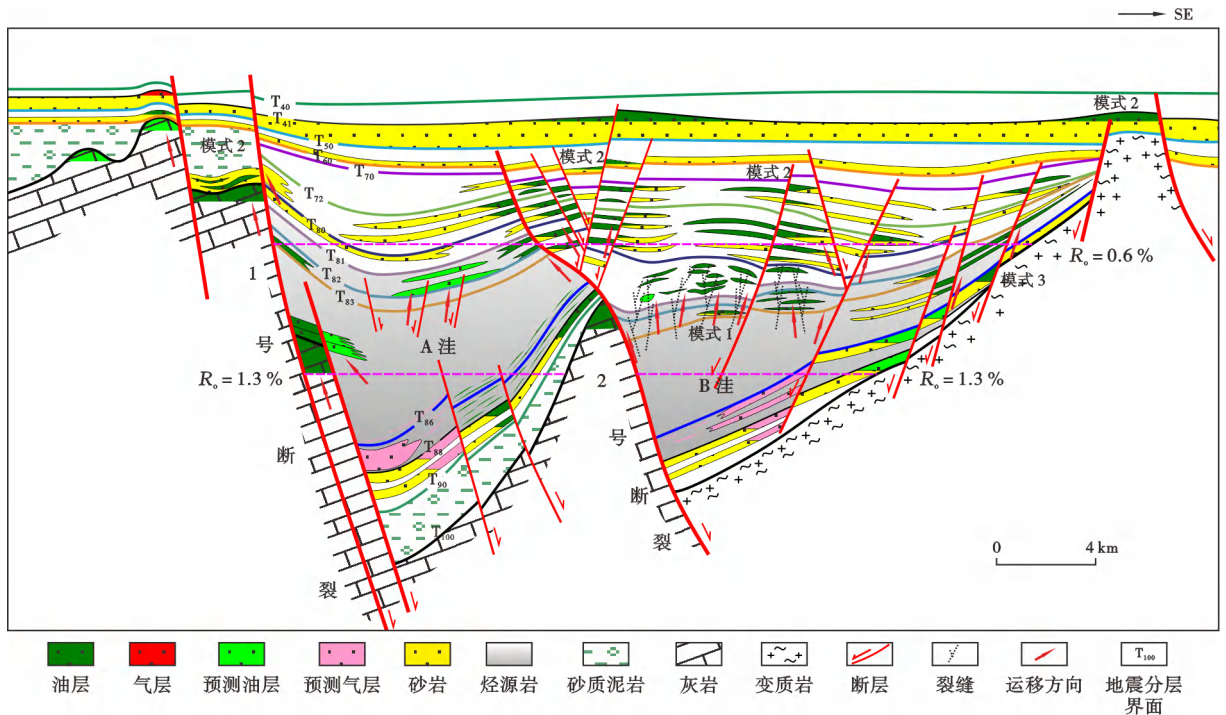


图9 北部湾盆地综合地层特征

Fig. 9 Comprehensive stratigraphic characteristics of Beibuwan Basin



注:模式 1—凹陷区原生近源成藏模式;模式 2—凹中断裂带/断隆带/陡坡带垂向成藏模式;模式 3—斜坡区过路成藏模式。

图 10 北部湾盆地凹陷/洼陷油气输导体系及成藏模式

Fig. 10 Hydrocarbon transport system and accumulation pattern of sag or subsag in Beibuwan Basin

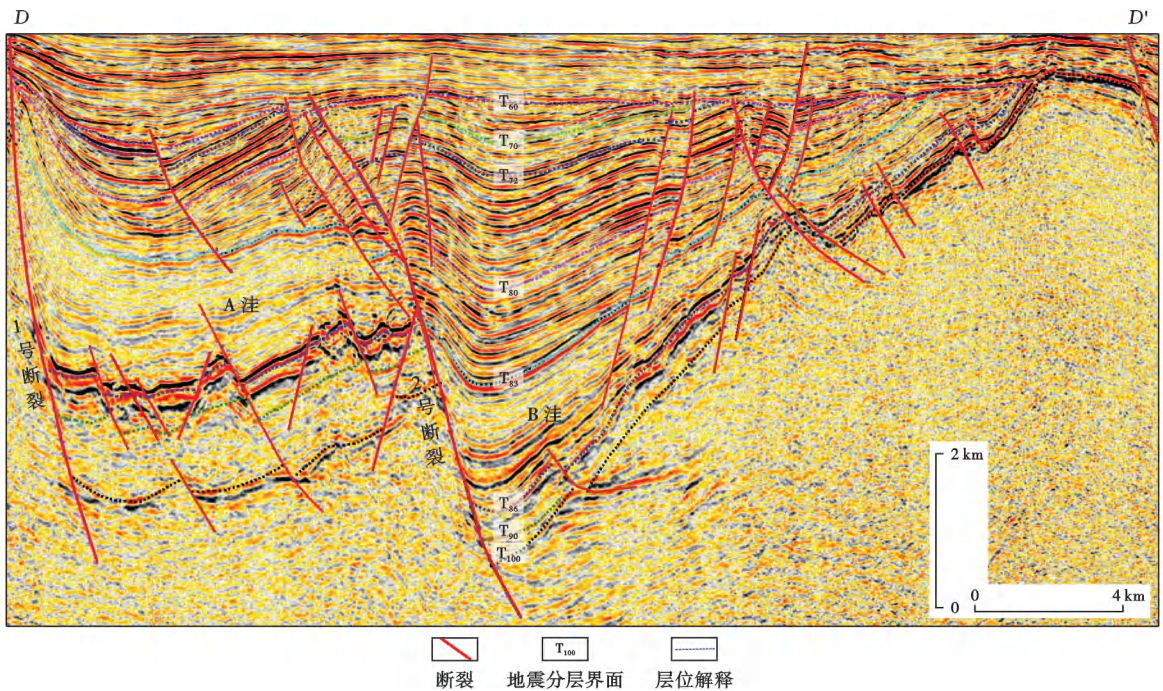


图 11 北部湾盆地过凹陷/洼陷典型地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 11 Typical seismic profile of sag or subsag in Beibuwan Basin

2.3.1 凹陷区原生近源成藏模式

生烃洼陷内部生成的油气在生烃膨胀力等动力作用下,克服烃源岩的范德华力、黏滞力和储层的毛细管阻力,被排出烃源岩,直接进入其紧邻的页岩储层

或致密岩性圈闭储层中,主要依靠岩性圈闭与成熟烃源岩之间的砂泥岩接触面或裂隙发生油气初次运移<sup>[35]</sup>。油气进入岩性圈闭后,在岩性体内的砂岩中发生侧向运移并调整,形成岩性上倾尖灭油藏和岩性透

镜体油藏。在这种成藏模式中,储层距离有效烃源岩较近,输导体系简单,油气富集效率高,已发现多个油田,是油气重要的富集区。涪西南凹陷B洼、乌石凹陷东区主洼具有该成藏模式。

### 2.3.2 凹中断裂带/断隆带/陡坡带垂向成藏模式

该模式分布于凹中或邻近的深洼,在平面上离烃源区近;其输导体系主要由沟通源岩的断裂及其派生的次一级网状断裂(或负花状断裂)组成,断裂在纵向上切穿烃源层。由于纵向压降快,油气运移的阻力小,在高压驱使和垂向输导系统引导下,油气优先垂向运移,在浅部盖层发育区高效聚集成藏。在断裂持续活动区或断裂多期活动区,经油气成藏层系不断调整,油气在纵向上最终可形成多层系成藏格局<sup>[36]</sup>,这些层系同样是盆地重要的油气集中分布区。涪西南凹陷2号断裂带和B洼中隆、乌石凹陷南部陡坡带等为此类成藏模式。

### 2.3.3 斜坡区过路成藏模式

斜坡带位于凹陷(或洼陷)中心与凸起带之间,虽然距离有效烃源岩较远,但是油气从凹陷(洼陷)向凸起区运移的必经之路,其输导体系以断层、骨架砂体构成的阶梯状输导系统为主,油气在浮力作用下向低势区运移的过程中,在斜坡区的合适部位遇到圈闭后聚集成藏<sup>[37]</sup>,是油气的有利指向区,已发现大—中型油气田。涪西南凹陷斜阳斜坡带、南部斜坡带,乌石凹陷东区构造反转带等均为此类成藏模式。

### 2.3.4 凸起/隆起区汇流成藏模式

凸起带边缘距离有效烃源岩远,油气生成以后,沿着由砂岩—断裂—不整合面组成的阶梯状复合输导体系,经长距离运移至凸起边缘的圈闭中聚集成藏。此类模式的油气运聚距离虽远,油气富集效率相对较低,但其圈闭是油气运移的最终指向,且这种复杂的阶梯状输导体系往往依附在持续性发育的构造脊上,可通过长时间运移和多通道汇流最终形成大油气藏<sup>[38]</sup>。涪西南低凸起为此类成藏模式,已发现W2油田、W3油田等两个在开发油田。

## 2.4 油气多凹多带有序分布、差异富集

北部湾盆地在涪西南凹陷、乌石凹陷、迈陈凹陷、海中凹陷、福山凹陷、雷东凹陷等凹陷均有油气发现。已发现的潜山油气藏主要分布在涪西南凹陷A洼周缘。流二段、流三段的油气藏呈近洼分布或沿鼻状构造带富集;涪洲组、流一段的油气藏富集于洼内断裂带;新近系油气藏主要分布在环凹凸起区或凹中断裂带浅层。盆地内的不同凹陷、不同区带由于构造背景、沉积条件、压力结构以及输导条件不同,油气藏类型及分布规律存在较大差异。

### 2.4.1 富烃洼陷满洼富油,后备凹陷/洼陷近源富集

优质烃源岩的全洼分布使得油气可在平面上形成满洼富集,在输导网络发育区形成多层系分布<sup>[32,39]</sup>。北部湾盆地涪西南凹陷的A洼和B洼、乌石凹陷东区的主洼是已证实的富烃洼陷,油气在凸起区、陡坡带、凹陷带、断裂带、洼中隆、斜坡带等多个区带分布,具有横向连片成藏的特征,其中,在断裂带、洼中隆和斜坡带最为富集,在陡坡带和凸起区次之。在纵向运移条件好、储-盖组合发育的涪西南凹陷2号断裂,油气在新近系(角尾组、下洋组)和古近系(涪一段、涪二段、涪三段、流一段、流二段、流三段、长流组),以及前古近系潜山基底都有分布,具有多层系含油、复式聚集成藏的特征。对于浅层运移断裂不发育的涪西南凹陷A洼,由于下部源岩中生成的油气难以向上运移,油气一般分布在洼内,或在流二段高压层的约束下沿流三段砂体侧向运移并分布在斜坡区或凸起区。乌石凹陷东区的油气主要富集在东部反转构造带的流沙港组内;在涪洲组、下洋组、角尾组内虽然也有油气发现,但由于盖层在涪洲组以浅不发育,其储量规模较小。在北部湾盆地后备凹(洼)陷中,优质烃源分布局限,油气在这些地区呈近源富集,一般在洼陷东部分布且埋深较浅,生烃规模相对有限,推测油气在近烃源区富集,具有东富西贫、深富浅贫的特征。

### 2.4.2 油气差异聚集控制的内气外油、深气浅油分布特征

烃源岩在生、排烃过程中先生成的原油会聚集在早期的有效圈闭中。随着埋深加大、热演化程度变高,源岩逐渐进入生气门限,天然气开始生成并从源岩中排出,并在油气差异聚集作用下驱替早期聚集的原油。这种驱替作用在纵向上从深层往浅层,在横向上从凹陷的成熟洼陷中心向边缘,从而形成内气外油、深气浅油的油气分布特征<sup>[40]</sup>。涪西南凹陷、海中凹陷、福山凹陷已证实其中一深层以聚气为主,在洼陷浅层及边缘地区以聚油为主。

### 2.4.3 不同区带油气藏类型不同

北部湾盆地不同区带的油气藏类型差异非常明显,表现为以下特点:断隆带控制大型复式油气藏分布,例如,涪西南凹陷W4油田位于B洼的洼中隆地区,纵向上在流沙港组、涪洲组等多层系形成复式成藏;缓坡区控制大型地层岩性油气藏分布,如涪西南凹陷从南部斜坡带向B洼发育多期大型三角洲,三角洲前缘及侧缘是岩性圈闭的优势发育区<sup>[40]</sup>;洼中成熟源岩区控制近源/源内油页岩油气藏分布,例如,涪西南凹陷A洼发育厚层的富有机质泥页岩及油页岩层系,在近两年针对该层系部署的多口探井和评价井中,已

有多口井钻遇页岩油,其中 X5 井压裂测试成功并获得商业油流,标志着中国海上页岩油勘探取得重大突破<sup>[14]</sup>;大型鼻状构造控制复杂断块油气藏分布,例如,在乌石凹陷东区构造反转带、涠西南低凸起等大型鼻状构造区带发育多个大—中型油气田;区域性盖层和隆起控制大型披覆背斜油气藏分布,该类油气藏主要分布在新近系角尾组中,背斜圈闭为在滨/浅海相沉积环境下形成的局部隆升构造,如涠西南凹陷的 W2 油田、W5 油田和 W6 油田,以及乌石凹陷的 W7 油田均发育角尾组油藏。

### 3 新领域、新类型的成藏条件

经过 40 余年的勘探、开发,北部湾盆地常规油气的勘探难度越来越大。分析盆地的石油地质条件,寻找未来新的勘探方向,落实页岩油、潜山、岩性圈闭、深层油气、后备凹陷/洼陷等多个新领域、新类型油气藏,这对于推动北部湾盆地可持续增储上产具有重要意义。

#### 3.1 新领域、新类型油气藏的基本概况

从资源潜力、成藏条件、勘探程度综合分析,涠西南凹陷、乌石凹陷的油气发现率高,勘探潜力仍然较

大,页岩油、潜山、岩性圈闭、深层油气、后备凹陷/洼陷等新领域、新类型油气藏是北部湾盆地未来的重要勘探领域(图 12)。页岩油新领域主要分布在涠西南凹陷的 A 洼和 B 洼,以及乌石凹陷东区的流二段和流三段,资源潜力及已发现可动地质储量规模可观,继续拓展的空间大。潜山领域,涠西南凹陷 1 号断裂、2 号断裂的灰岩潜山持续获得油气发现,且仍具有较大规模的剩余原油资源潜力,有望实现新的突破;乌石凹陷的花岗岩、火山岩潜山成带分布,可在源-储对接区先行探索。岩性圈闭领域,油气主要分布在涠西南凹陷的 A 洼和 B 洼,以及乌石凹陷东区主洼等富烃洼陷内的流一段和流二段,具有源内成藏和近源成藏的特点,是重要的接替领域。近年来,北部湾盆地在深层油气勘探中逐渐取得进展,已在涠西南低凸起的倾末端、涠西南凹陷涠 6 区和海中凹陷东洼逐渐实现油气发现,待产能释放工艺取得突破后,涠西南凹陷、海中凹陷、乌石凹陷的油气勘探空间将得到进一步拓展。另外,北部湾盆地的后备凹陷/洼陷多,海中凹陷、迈陈凹陷、雷东凹陷、福山凹陷已证实为生烃凹陷,但其勘探程度低,储量规模有待进一步探明,尽管这些凹陷/洼陷埋深浅、体积小,“下洼近源”勘探仍有望实现突破。

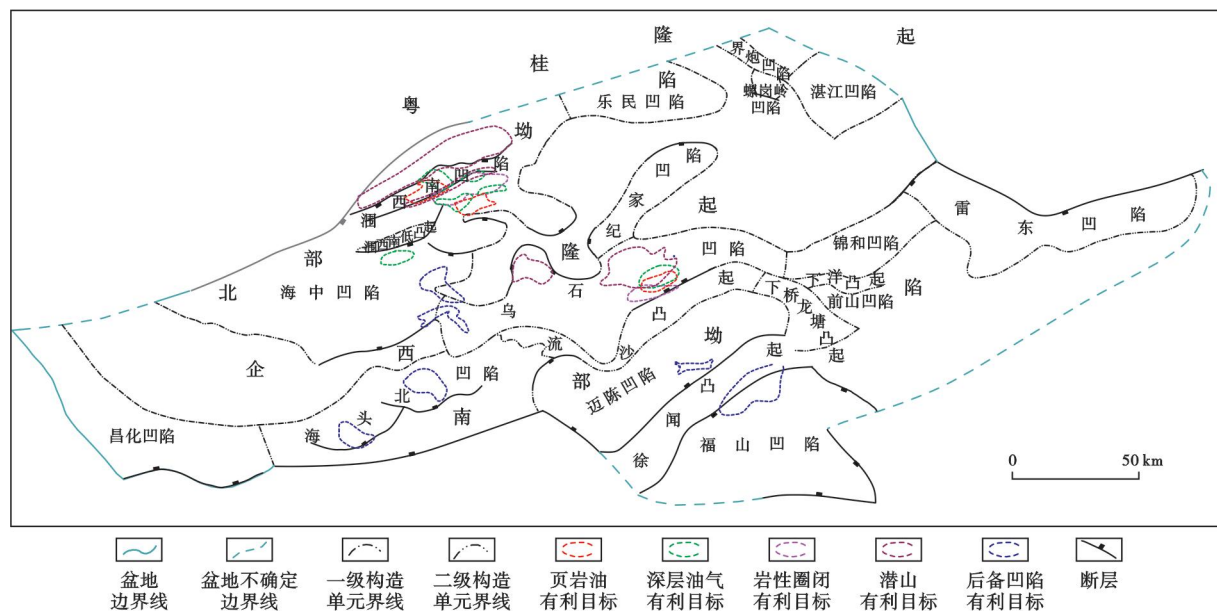


图 12 北部湾盆地未来重要勘探开发领域

Fig. 12 Important future exploration and development areas in Beibuwan Basin

#### 3.2 页岩油层系的源-储一体或近源成藏特征和有机质丰度和成熟度的控富集作用

##### 3.2.1 涠西南凹陷页岩油的成藏条件

勘探实践表明,涠西南凹陷在区域上沉积了一套流沙港组富有机质泥页岩及油页岩层系<sup>[30]</sup>,面积约为 1 000 km<sup>2</sup>,平均厚度为 109 m;其有机质丰度高,

TOC 含量普遍大于 3%、可达 11%;有机质类型好,主要为 I—II<sub>1</sub> 型;成熟度适中,镜质体反射率( $R_o$ )为 0.6%~1.3%,大部分处于生油窗范围内,具备页岩油规模发育的基础。富有机质泥页岩及油页岩层系中的滞留烃( $S_1$ )含量较高,实测  $S_1$  超过 5 mg/g、可达近 26 mg/g;石油主要以吸附油和游离油两种状态

赋存,其中,吸附油组分较重、可动性差,游离油组分较轻、可动性好,占比普遍大于50%,最高可达89%。页岩储层在扫描电镜下可见粒内孔、粒间孔、微裂缝和片状矿物层间缝发育[图13(a)~图13(f)],也发育有机质粒缘收缩缝以及黏土矿物、黄铁矿集合体等晶间孔隙[图13(g)~图13(i)];储层的孔隙度为

1.4%~22.4%、平均约为10.0%,渗透率为0.01~51.8 mD。储集岩的矿物成分复杂,主要由石英、长石、碳酸盐、黏土矿物及其他矿物(黄铁矿、菱铁矿等)组成,其中,石英、长石、碳酸盐等脆性矿物含量为50%~80%,黏土矿物含量一般小于30%,具备较好的可压性。

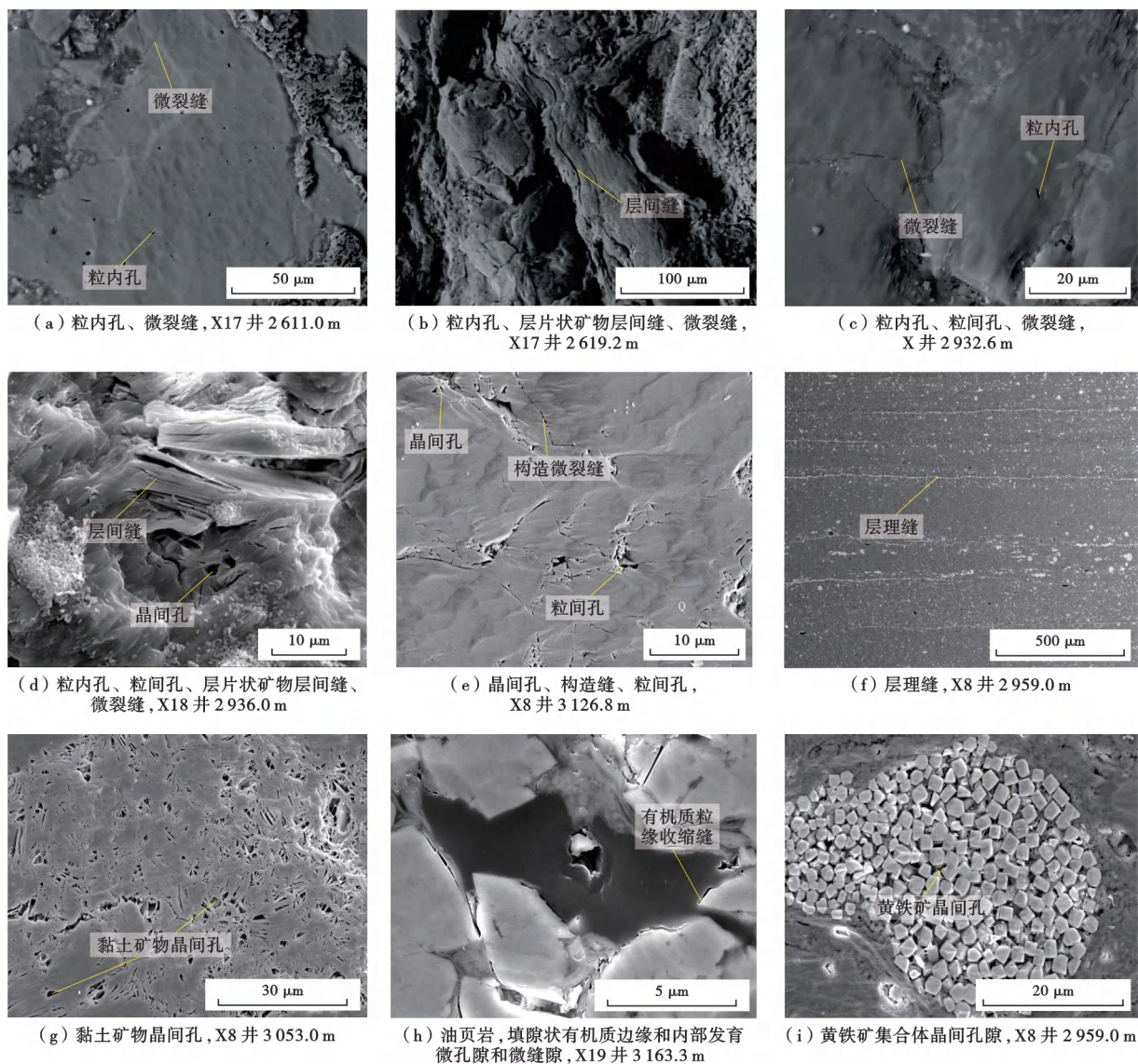


图13 涪西南凹陷页岩油储层扫描电镜照片

Fig. 13 Scanning electron microscope images of shale oil reservoir in Weixinan sag

根据源-储组合、砂地比、单层砂岩厚度等特征,将涪西南凹陷划分为基质型、纹层型、夹层型3种类型页岩油<sup>[14]</sup>,油藏整体上具有源-储一体或近源成藏、连片含油的特征(图14)。页岩油的富集程度与有机质丰度、成熟度等密切相关,中-高有机质丰度和中-高成熟度的控富集作用明显。这种控富集作用表现为随着TOC含量增加,可动油量逐渐增大,当TOC含量大于4%时,可动油量趋于稳定的高值;另一方面,在生油窗

范围内,随着成熟度增加,可动油量也逐渐增大。采用成因法预测,涪西南凹陷的页岩油可动资源量超过 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,该领域具有广阔的勘探前景。

### 3.2.2 乌石凹陷页岩油成藏条件

乌石凹陷是北部湾盆地除涪西南凹陷外又一个富烃凹陷,具有与涪西南凹陷相似的构造-沉积演化背景,在流沙港组也沉积了一套富有机质泥页岩及油页岩层系<sup>[31]</sup>,面积约为 $600 \text{ km}^2$ ,平均厚度为170 m。与

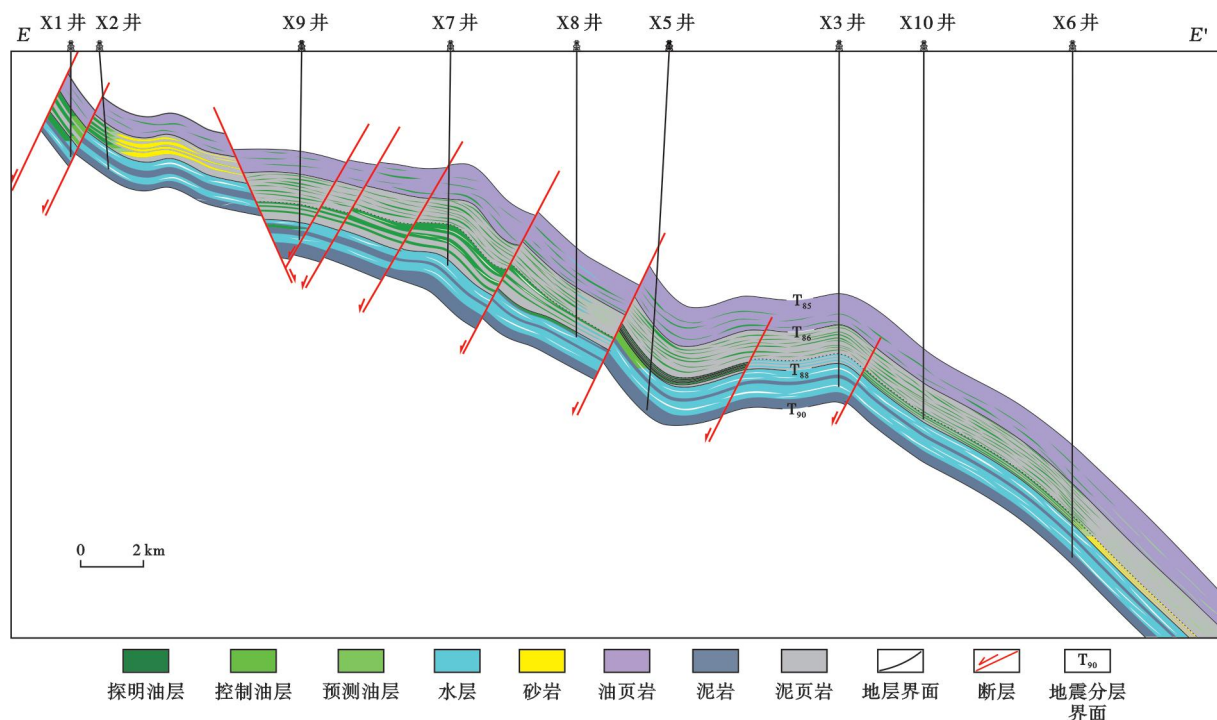


图 14 涪西南凹陷流沙港组页岩油成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 14 Accumulation pattern of shale oil of Liushagang Formation in Weixinan sag

涪西南凹陷相比较,乌石凹陷的富有机质泥页岩及油页岩层系中 TOC 含量较高,普遍大于 3.0%、可达 14.8%;有机质类型好,主要为 I—II<sub>1</sub> 型;成熟度适中, $R_o$  为 0.6%~1.3%,以生油为主;但滞留烃含量较低,实测  $S_1$  为 0.1~7.2 mg/g,平均约为 2 mg/g。乌石凹陷页岩油储层的储集空间以纳米级—微米级微孔隙/裂缝为主,在扫描电镜下可见粒间孔和微裂缝[图 15(a)—图 15(e)]、晶间孔[图 15(f)]、层间缝[图 15(g)],以及溶蚀孔等[图 15(h)、图 15(i)];脆性矿物含量一般大于 50%,黏土矿物含量一般小于 30%。综合分析认为,该套层系具备较好的页岩油形成条件,主要发育基质型、纹层型、夹层型 3 种类型页岩油。采用成因法预测,其页岩油可动资源量约为  $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,勘探潜力较大。

### 3.3 潜山领域“源”“运”控充注、“储”“盖”控富集的特征

北部湾盆地的基底是华南板块的云开古陆与钦防海槽等构造单元向海域的延伸。陆上陆川—岑溪—罗定—广宁断裂带大体上可以与海上涪西南凹陷 2 号断裂相连接,该断裂北西侧主要为碳酸盐岩分布区<sup>[33]</sup>,南东侧为变质岩—花岗岩分布区。

#### 3.3.1 涪西南凹陷潜山的成储、成藏机理

涪西南凹陷灰岩潜山的形成受多期构造运动控制。潜山内的上古生界泥盆系—石炭系海相地层经历了海西期褶皱作用与印支期构造抬升作用,形成了背

斜、向斜相间构造,而涪西南凹陷 1 号断裂、2 号断裂的逆冲作用导致石炭系上部地层被剥蚀,从而形成灰岩潜山雏形;喜马拉雅运动期,受涪西南凹陷 1 号断裂、2 号断裂伸展活动影响,区域持续沉降、整体埋藏形成潜山<sup>[41-46]</sup>。涪西南凹陷潜山储层受古地貌、岩性、构造活动三元控制,相对高缓地貌区因长期遭受风化淋滤作用,岩溶孔洞发育,易形成岩溶储层;此外,亮晶颗粒灰岩、白云岩、白云质灰岩中还发育晶间孔,而晚期断裂活动则在潜山内幕产生大量裂缝。涪西南凹陷潜山具有多期成山、“源”“运”控充注、“储”“盖”控富集的特点。根据已落实的 10 余个潜力目标分析(图 16),涪西南凹陷潜山整体的原油资源潜力约为  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,勘探前景广阔。根据源-储关系,主要有源-储侧向对接型和厚砂输导型两类潜山油藏。

(1) 源储侧向对接型:该类潜山油藏主要分布在涪西南凹陷 2 号断裂和 1 号断裂中段,邻近富生烃凹陷的 A 洼、B 洼和 C 洼,潜山与成熟烃源岩直接接触,具有油气运移距离近、油源充足、直接供烃的特点;同时,烃源岩层段发育异常超压,油气从源岩高势区向潜山低势区运移成藏。储层品质决定了该类潜山圈闭的成藏规模。

(2) 厚砂输导型:该类潜山油藏分布在涪西南凹陷 1 号断裂带 W8 油田及围区,潜山未与成熟烃源岩直接接触,具有油气运移距离远、间接供烃的特点。油气通过断层、砂体及不整合面组成的立体输导网络进

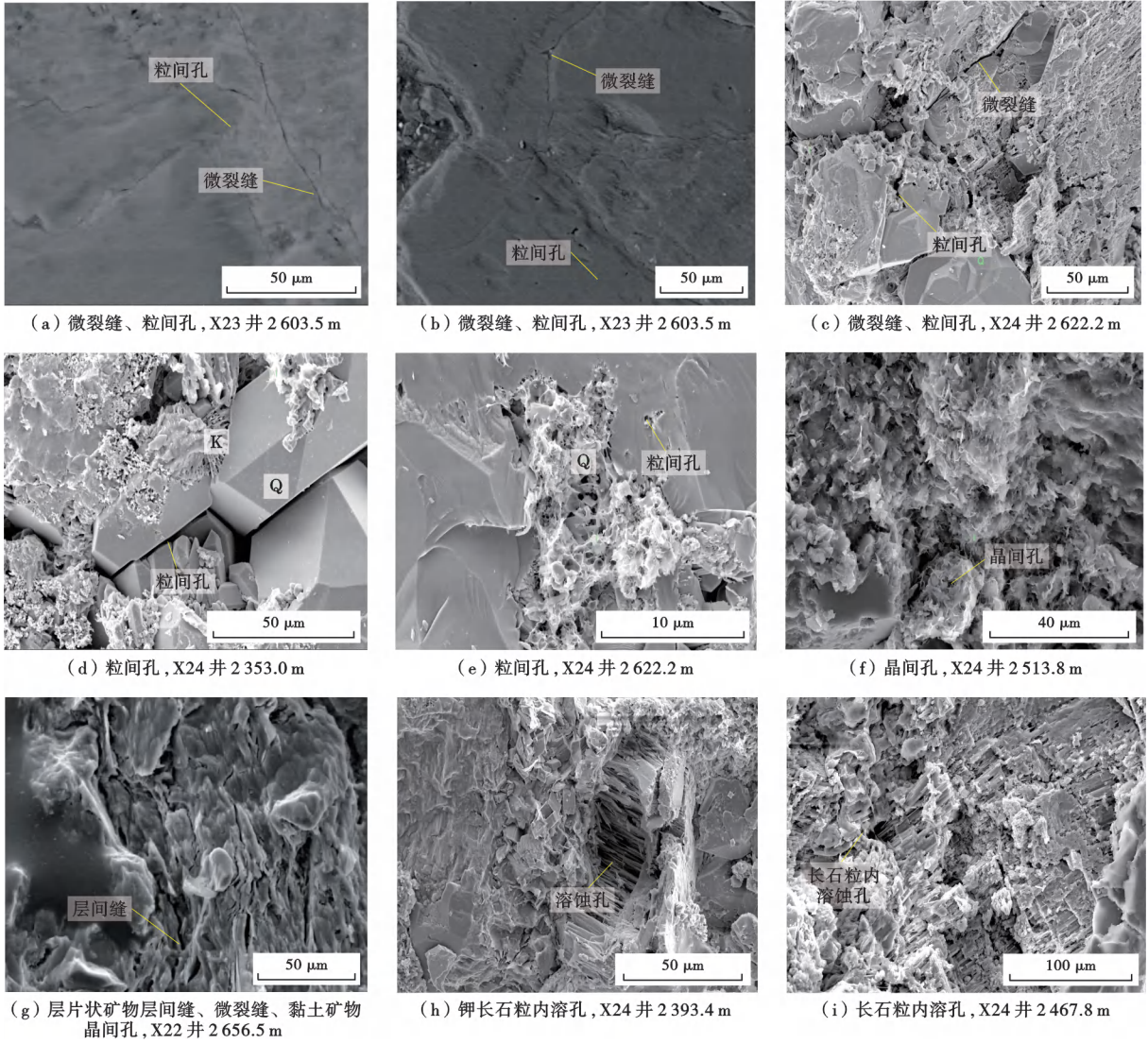


图 15 乌石凹陷油页岩扫描电镜照片

Fig. 15 Scanning electron microscope images of oil shale in Wushi sag

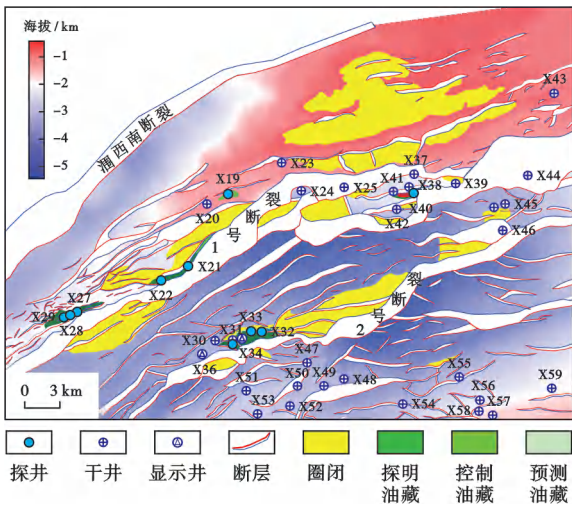


图 16 涪西南凹陷潜山潜力目标

Fig. 16 Potential targets of buried-hill in Weixinan sag

行长距离运移,在潜山圈闭中成藏。油源与运移条件决定了该类潜山圈闭能否成藏以及成藏规模。

### 3.3.2 乌石凹陷潜山的成储、成藏机理

乌石凹陷位于变质岩—花岗岩分布区,早古生代变质岩是其基底变质岩的主体,岩浆活动以前寒武纪、加里东期和印支期中酸性侵入岩浆活动为主。乌石凹陷基底的构造演化主要经历了四堡运动、加里东运动、印支运动和燕山运动,在燕山运动末期和喜马拉雅运动期,基底开始伸展断陷。乌石凹陷潜山根据其演化过程可划分为高位潜山和低位潜山,从成因角度可划分为侵蚀残丘、断块山、背斜山和复合山等类型。

裂缝是乌石凹陷基岩潜山储层重要的储集空间类型。以古应力和现今全球定位系统(GPS)观测结果为边界条件构建高分辨率二维、三维地质力学模型,并采用岩石格里菲斯断裂准则和摩尔-库伦断裂准则确定

乌石凹陷在印支期、燕山期和喜马拉雅期张裂缝和剪裂缝的发育程度,根据岩心统计获得的裂缝种类的相对含量计算裂缝的综合发育程度,结果表明,乌石凹陷东部地区的裂缝发育程度较高,构造改造总体表现出东强西弱的特点。

勘探实践证明,潜山油气藏是乌石凹陷重要的油气藏类型。乌石凹陷在新生代早期经历了快速沉降、断陷,形成了较厚的烃源岩层段<sup>[47]</sup>,在渐新世末期强烈构造反转作用下形成了向洼陷中心倾伏的鼻状构造带,而鼻状构造带也成为最有利的背斜型变质岩—花岗岩潜山油气勘探区带。综合考虑构造作用、储层特征、主力烃源岩、输导体系和成藏模式,初步落实了近 20 个潜山潜力目标,预测乌石凹陷潜山的潜在资源量约为  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。乌石凹陷东部地区的钻井揭示基岩潜山油气显示活跃(图 17),证实该领域成藏条件优越,展示了乌石凹陷潜山油气领域具有广阔的勘探前景。

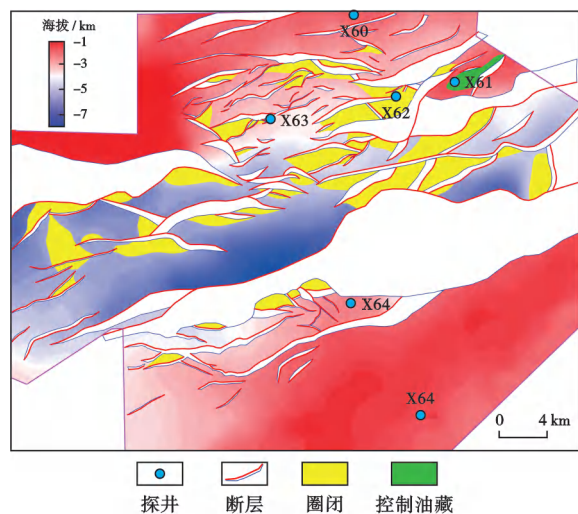


图 17 乌石凹陷潜山的潜力目标

Fig. 17 Potential targets of buried-hill in Wushi sag

### 3.4 富烃凹陷岩性圈闭领域的“储”“运”控藏特征

#### 3.4.1 涠西南凹陷 A 洼、B 洼流沙港组地层岩性圈闭领域

涠西南凹陷 A 洼、B 洼在流一段、流二段沉积期总体为湖侵环境,以沉积厚层湖相泥岩为主<sup>[48]</sup>,期间发生多次短暂性湖退,有利于在洼陷边缘斜坡的进积型三角洲中形成地层圈闭、在洼中重力流储集体中形成岩性圈闭<sup>[49]</sup>,两类圈闭资源潜力超过  $7000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,勘探前景广阔,但成藏主控因素存在较大差异。

洼中岩性圈闭主要发育在流一段沉积期,受控于不同物源体系和古沉积中心的迁移特征,流一段下层序在 B 洼主要发育混源湖底扇,表现为多期迁移叠置连片沉积[图 18(a)];流一段中层序沉积期,沉积中心迁

移至 A 洼,发育来自西北物源的湖底扇[图 18(b)];流一段上层序沉积期,沉积中心再次迁移至 B 洼,早期沉积的来自西物源、南物源的湖底扇,在晚期受 2 号断裂的雁列断层控制,发育了来自西北物源的砂质碎屑流<sup>[50]</sup>[图 18(c)]。流一段在浅湖相泥岩背景下发育的洼中多期多物源重力流储集体易形成众多岩性圈闭群,其圈闭的有效性较好,同时,由于被成熟烃源岩包裹,具有源内成藏的优势,但洼中地区远离物源区,搬运距离远,寻找规模储层是洼中岩性圈闭规模成藏的关键。

洼陷斜坡带地层圈闭主要发育在涠西南凹陷 B 洼的东南缓坡带(图 19),该缓坡带的流二段受短暂湖退影响,沉积了大规模进积型三角洲<sup>[51-52]</sup>,其物源受企西隆起控制,而上覆的流二段上层序厚层泥岩盖层则在高部位断超于基底之上或超覆尖灭于流二段底部泥岩上,从而形成地层超覆圈闭。斜坡带的地层圈闭因远离生烃中心,本地烃源岩处于未成熟阶段,因此油气能否长距离侧向运移决定了斜坡带地层圈闭能否高效成藏,运移条件是成藏的主控因素。

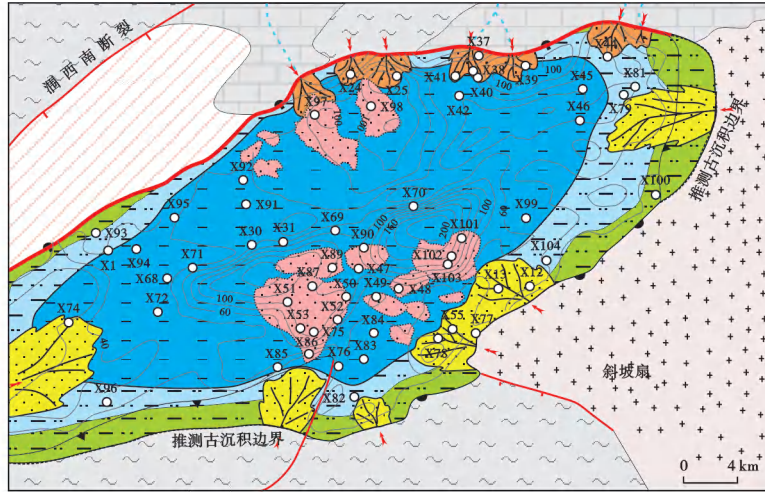
#### 3.4.2 乌石凹陷反转构造带流沙港组地层岩性圈闭领域

乌石凹陷东部地区反转构造带及其周缘的油气运聚条件优越,是乌石凹陷油气最富集、勘探成功率最高的区域。随着勘探程度不断加深,在反转构造带富油区流沙港组主力含油层系中寻找构造圈闭的难度越来越大,亟需寻找新的勘探领域支撑该地区的可持续勘探开发。综合区域构造特征、沉积特征等因素认为,在反转构造带周缘向东部地区主洼方向具备发育岩性或构造-岩性圈闭的条件,主要发育源内断控坡折湖底扇型和源内/近源砂体翘倾尖灭型 2 类岩性圈闭<sup>[53]</sup>,其资源量超过  $6000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

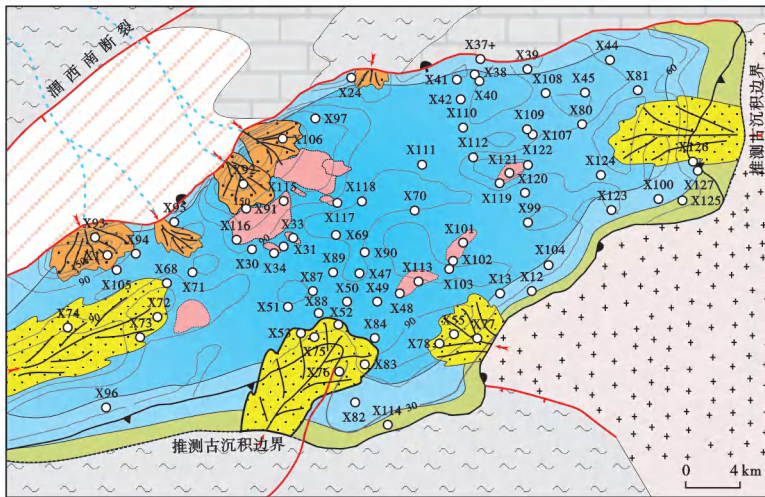
在源内断控坡折湖底扇型岩性圈闭中,湖底扇的物源主要来自北部,而流二段大型三角洲在向凹陷南部洼中地区推进的过程中,受断裂坡折控制,形成了湖底扇岩性圈闭群(图 20)。乌石凹陷东部地区的流二段发育多期来自北物源的大型三角洲沉积体,沉积体从三角洲向东部地区的主洼带推进,由于主流线方向受控于 NE 向断裂转换带,其前端在沉积坡折处产生二次搬运,形成湖底扇沉积[图 20(a)]。三角洲—湖底扇沉积体系与周围的半深湖泥岩构成了良好的岩性圈闭,具备自生自储自盖的优越条件。

源内/近源砂体翘倾尖灭型岩性圈闭的物源主要来自凹陷南部,流二段、流一段的扇三角洲在向北推进至北部隆起区的翘倾尖灭处形成岩性圈闭。流二段沉积晚期一流一段沉积早期[图 20(b)、图 21(a)],凹陷的水体较深,7 号断裂的活动能够控制凹陷沉积,而在近物源处发育的扇三角洲沉积则为岩性圈闭的形成提

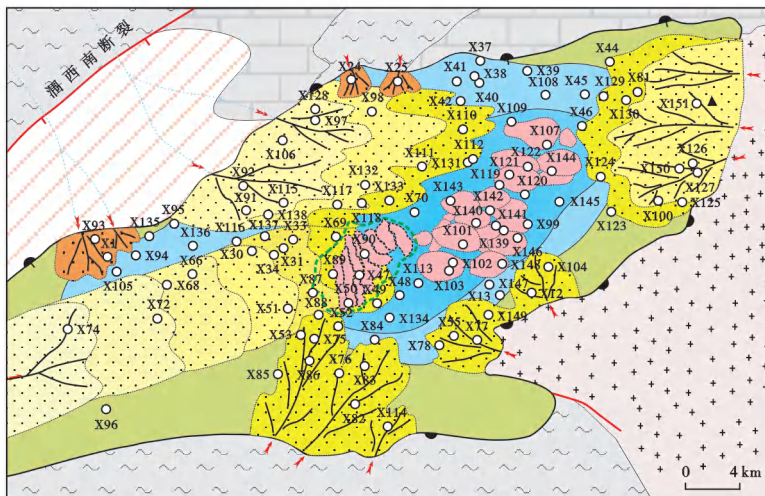




(a) 流一段下层序沉积相



(b) 流一段中层序沉积相



(c) 流一段上层序沉积相

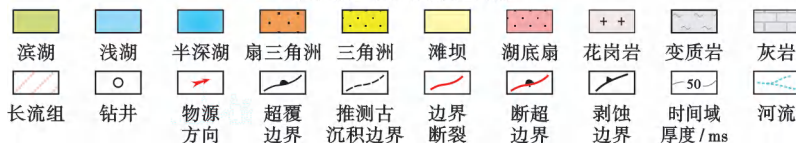
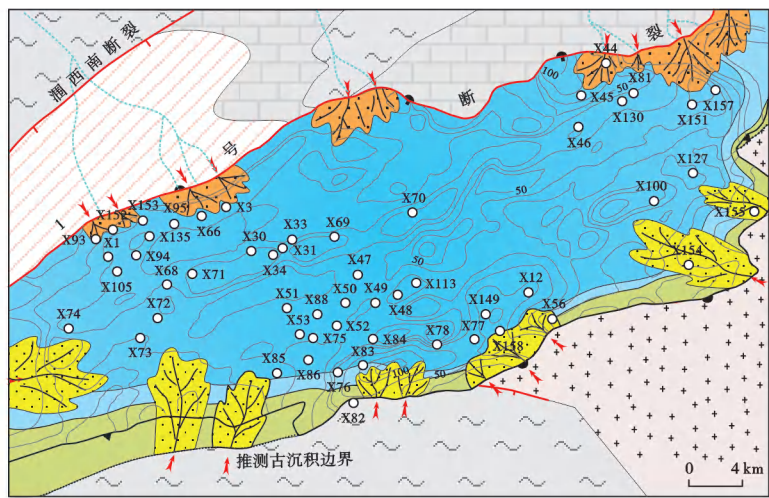
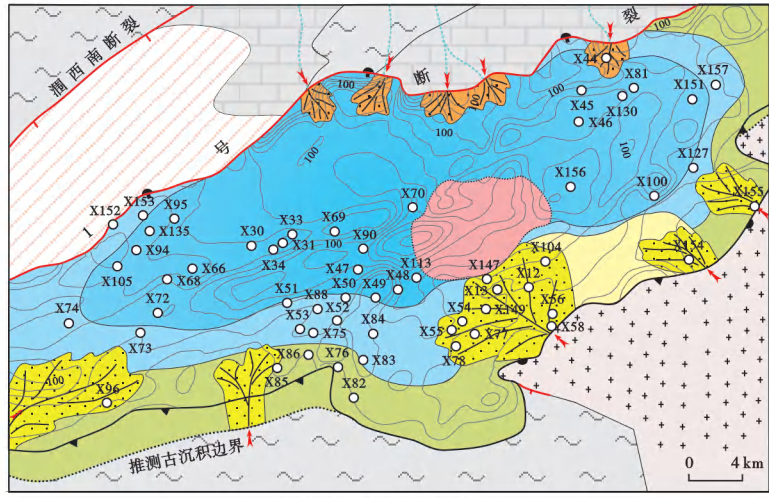


图 18 涪西南凹陷流一段平面沉积相

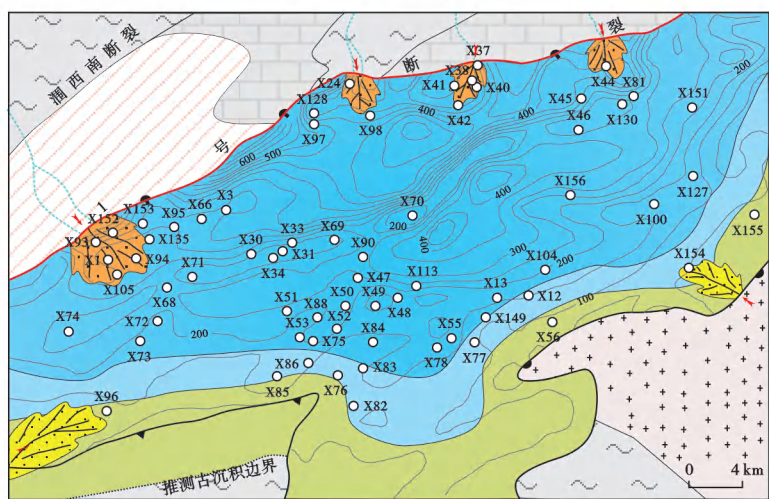
Fig. 18 Sedimentary facies of Member 1 of Liushagang Formation in Weixinan sag



(a) 流二段下层序沉积相



(b) 流二段中层序沉积相



(c) 流二段上层序沉积相

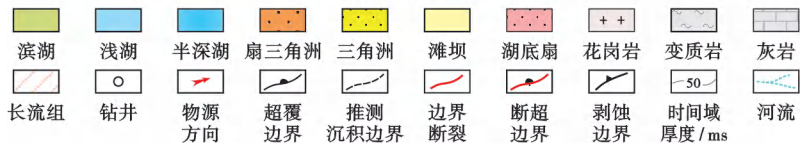


图 19 涠西南凹陷流二段平面沉积相

Fig. 19 Sedimentary facies of Member 2 of Liushagang Formation in Weixinan sag

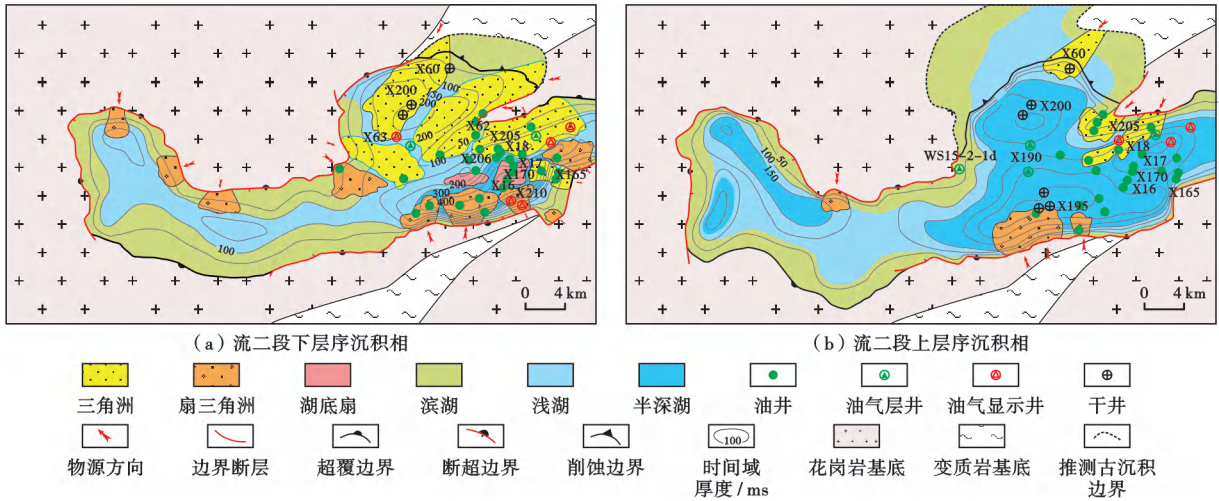


图 20 乌石凹陷流二段平面沉积相

Fig. 20 Sedimentary facies of Member 2 of Liushagang Formation in Wushi sag

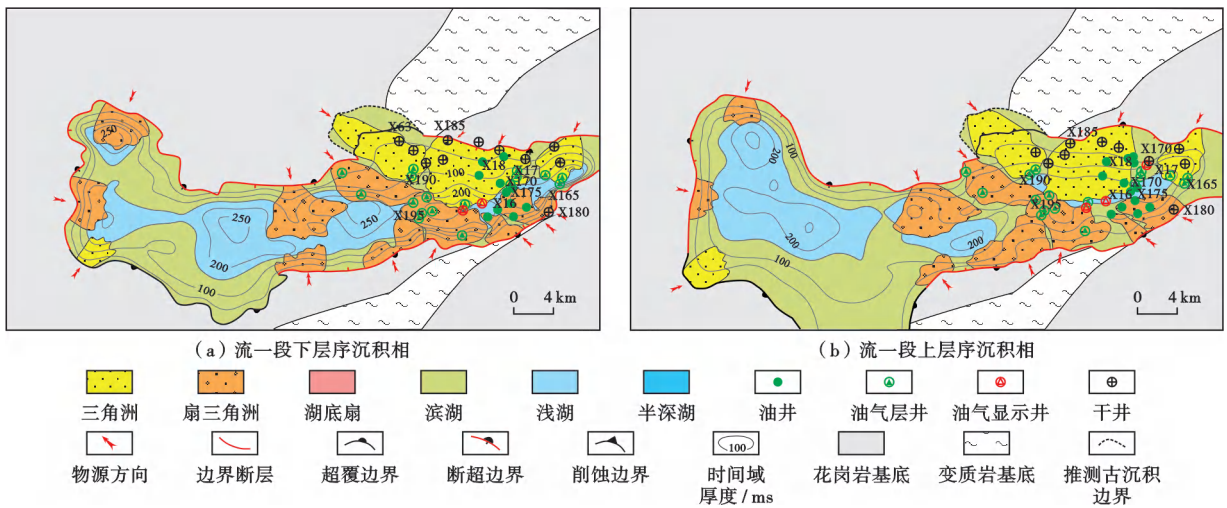


图 21 乌石凹陷流一段平面沉积相

Fig. 21 Sedimentary facies of Member 1 of Liushagang Formation in Wushi sag

供了优势条件。扇体受北高南低的古地貌地势限制发育于洼槽中,并向北部地势较高处尖灭,与周围半深湖泥岩、滨—浅湖泥岩形成良好的岩性圈闭[图 21(b)]。

### 3.5 凹陷区“甜点”控藏,深层油气勘探展现良好势头

#### 3.5.1 涪西南凹陷深层油气

涪西南凹陷发育广覆式有效成熟烃源岩,其有机质类型以 I—II 型为主。在凹陷斜坡带,烃源岩达到成熟演化阶段,所生成的产物以原油为主,同时含有少量伴生气。在凹陷近洼带,烃源岩的热演化程度较高,有利于天然气生成与聚集。流三段沉积期处于湖盆裂陷早期,该时期水体较浅,周缘物源充足,凹陷内砂体发育,具有“平盆浅水、隆起环绕、满盆富砂”的特点。在近凸起或转换斜坡带,流三段发育大型三角洲储集体并向湖盆中央推进,其与上覆流二段湖侵泥岩可形成良好的储-盖组合。

低凸起周缘的勘探证实,在涪西南凹陷洼中地区,流三一段—流二段烃源岩在早期生成的原油可沿构造脊运移至三角洲砂体中,形成早期油藏,而晚期生成的高成熟气则在深部超压驱动下,优先充注到受早期有机酸溶蚀改造的储层中,在近洼一侧形成“甜点型”凝析气藏,并将早期的油藏驱替至近凸起区,从而整体表现出“内气外油”的分布特征。近涪西南凹陷 A 洼、B 洼中心的大型构造脊紧邻或处在生气灶内,发育与烃源岩直接对接或自生自储的大型三角洲,且处于强溶蚀带范围,由于其上覆流二段的压力系数高达 2.1,超过石英、长石自然破裂的压力系数(1.96),推测其内部裂缝也较为发育,是寻找深层天然气的有利勘探方向。根据生烃数值模拟结果,涪西南凹陷的天然气总资源量达  $1400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中, A 洼洼中地区的涪洲 X 目标具有较好的成藏条件和勘探前景(图 22)。

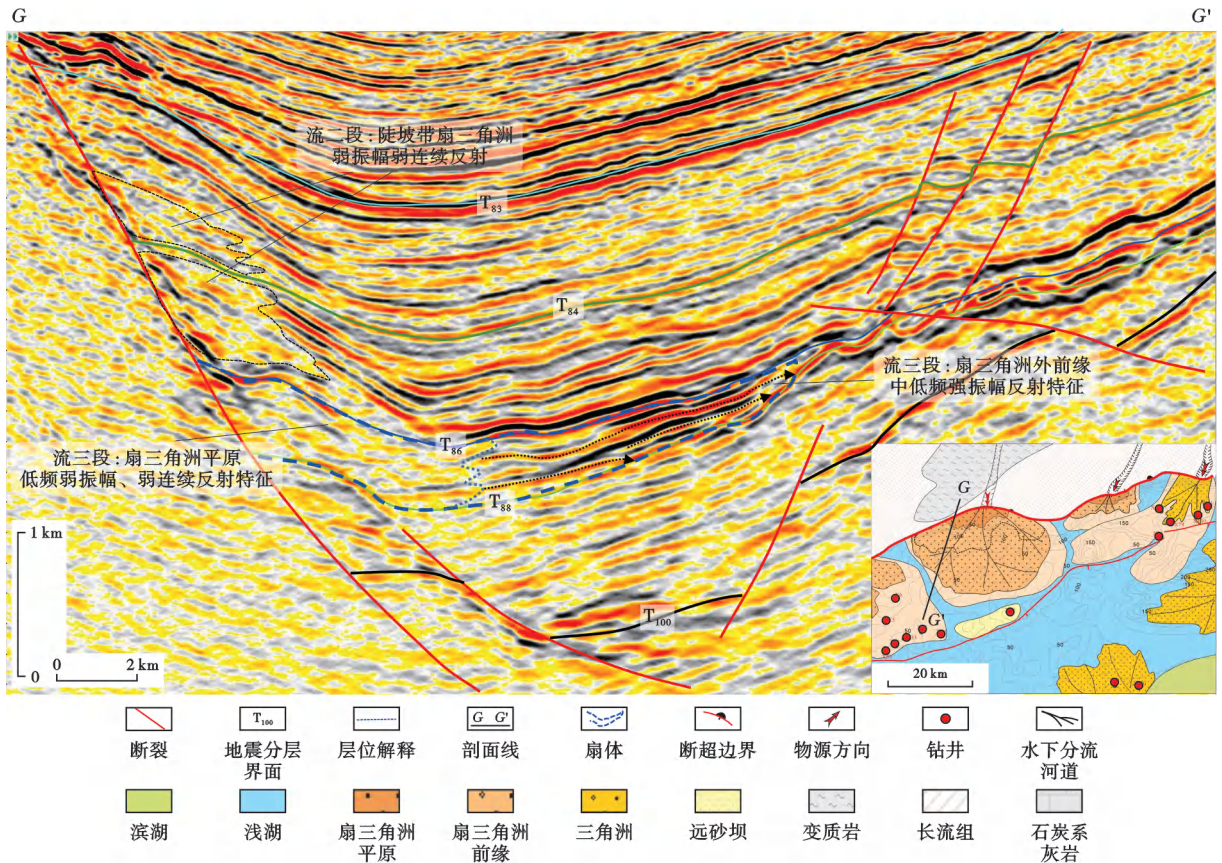


图 22 过涠西南凹陷 A 洼涠洲 X 目标的地震剖面

Fig. 22 Seismic profile of Weizhou X target in A subsag of Weixinan sag

### 3.5.2 海中凹陷深层气

海中凹陷深层发育古近系流沙港组,其埋深普遍大于 3200 m、可达近 8000 m。深埋条件导致流沙港组的压实作用和成岩作用较强,成岩阶段主要位于中成岩 B1—B2 期,导致其储层致密、物性较差,其中,流二段的平均孔隙度约为 10%、平均渗透率约为 0.5 mD,流一段的平均孔隙度约为 9%、平均渗透率约为 0.3 mD,主要为低孔—特低孔、中渗—特低渗储层,强压实作用和强成岩作用是物性整体变差的主要原因。在海中凹陷不同区域,流沙港组目的层的物性存在差异,主要与泥质含量、溶蚀作用有关。钻井揭示,在储层整体致密的情况下,海中凹陷在深层流沙港组中依然发育储层“甜点”,溶蚀作用和储层相带是储层“甜点”的两大控制因素,例如,岩石薄片分析显示,溶蚀孔发育的储层在相似埋深条件下,其孔隙度能够增大至 14%~17%,渗透率提高至 47~182 mD。海中凹陷的主力烃源岩层为流二段,2022 年钻探的 X15 井在流二段上层序钻遇了半深湖亚相烃源岩。对其开展的地球化学指标分析显示,TOC 含量为 1%~2%, $S_1 + S_2$  为 7~17 mg/g,烃源岩的地球化学指标好,证实海中凹陷烃源条件好<sup>[32]</sup>。总体上,海中凹陷流二段烃源岩厚度大、面积

广,排油高峰期主要在流一段沉积期和角尾组沉积期,排气高峰期在灯楼角组沉积期至今。根据生/排烃史、圈闭形成史推测,海中凹陷具有“外环油、内环气”的油气分布模式,深层为满凹天然气富集。生烃模拟表明,海中凹陷的最大生烃强度可达  $9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,南、北次洼的合计原油资源量约为  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、天然气近  $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,原油与天然气资源量均十分可观,勘探潜力大。

### 3.5.3 乌石凹陷深层油气

乌石凹陷的流三段和流二段均发育优质烃源岩。钻井揭示,在流三段上亚段底部发育一套在区域上稳定分布的页岩段,其厚度为 60~140 m,干酪根类型以  $\text{II}_2 - \text{II}_1$  型为主,有机质类型较好,TOC 含量平均约为 2%, $S_1 + S_2$  平均约为 10 mg/g,为中等—好烃源岩<sup>[46]</sup>。在乌石凹陷东部地区,流三段下部的烃源岩已全面进入生油阶段,而在中部和南部埋深大的地区,烃源岩已达到高成熟阶段,其总资源量约为  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这提升了流三段的勘探潜力。流三段具有源内成藏和优质储层控制油气富集程度的规律。

在流三段沉积早期,乌石凹陷东部地区发育多个局部的沉积中心,且受企西隆起、流沙凸起物源影响,

发育南物源扇三角洲、北物源辫状河三角洲。南物源扇三角洲进一步分为东、西两个朵叶向洼中地区推进。西侧朵叶钻遇厚层水道砂岩,在地震成像资料上表现为局部加厚的特征,油层厚度大、储层物性好,且经2023年钻探的两口井落实,其探明地质储量约为 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,是油气勘探的重要领域;东侧朵叶的钻探结果显示多含灰,储层物性差,测井解释多为干层,勘探潜力较小。北物源辫状河三角洲中水下分流河道发育,砂体规模较大,已发现W9油田,其在平面上具有连片含油的特征。

在乌石凹陷东部地区,已有多口井在流三段上亚段钻遇油层,以薄油层为主,单层厚度可达近6 m,与油页岩、页岩呈互层,具有“源内连片含油”的特征,是流三段油气勘探的重要层系。

### 3.6 后备凹陷/洼陷埋深浅、面积小,油气优先近源富集

北部湾盆地发育多个后备凹陷/洼陷,钻井揭示有不同程度的油气发现,总体勘探潜力大。由于凹陷埋深浅、面积小,勘探的主要问题是凹陷烃源岩的落实。

乌石凹陷发育东、西两个次洼,其中,乌石凹陷东洼已证实为富生烃洼陷,取得了良好的勘探成效,而西洼的勘探程度低,尚无钻井,为后备洼陷。对洼陷构造、沉积充填演化、地球物理特征及烃源岩开展的综合评价认为,乌石凹陷西洼发育流沙港组和涠洲组烃源岩,具备较好的烃源条件,洼内发育伸入成熟烃源的大型构造脊,为油气的规模汇聚提供了有利条件。目前已在近洼处落实多个重点目标,潜在资源量超过 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,勘探潜力较大。

迈陈凹陷位于北部湾盆地南部坳陷带,其主控边界断裂(灯楼角断裂)在流二段沉积期的平均活动速率在200 m/Ma以上。钻井揭示,迈陈凹陷流二段上部稳定发育厚层半深湖亚相泥页岩,其质地纯且厚度较大,有机质类型主要为 $\text{II}_1$ — $\text{II}_2$ 型,有机质丰度较高,为好—优质烃源岩,具有良好的生油条件。迈陈凹陷东部地区已落实的半深湖亚相源岩面积超过 $500 \text{ km}^2$ ,地层最厚超过2000 m;此外,以主力烃源为中心,围绕东部地区落实了多个有利目标,总资源潜力为 $8000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

福山凹陷位于北部湾盆地南部坳陷带,具有北断南超的地质结构特征,其流沙港组烃源岩主要受临高断裂和长流断裂形成的断槽控制,形成了两个烃源岩沉积次洼。以两个次洼为中心,可以划分为东区白莲含油气子系统和西区皇桐含油气子系统。钻探表明,东区白莲含油气子系统内油气兼生,而西区皇桐含油气子系统内则以生油为主。钻井揭示福山凹陷北部具备较好的油气成藏条件,主要发育构造-岩性油气藏,呈现涠洲组、流

一段、流二段复式立体成藏的特征。围绕生烃主注落实了多个有利目标,总资源潜力近 $7000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

海头北凹陷位于北部湾盆地西南端,发育东、西两个主要洼陷,均为南断北超的半地堑。海头北凹陷与海中凹陷南洼具有相似的沉积充填特征,从构造活动性和物源供给综合判断,海头北凹陷的控洼断裂活动强烈,物源供应能力较弱,具备形成优质烃源岩的条件,在地震相特征上显示流二段存在两套烃源岩,即上部以中—高频、弱振幅、平行反射为特征的厚层湖相泥岩和下部以低频、连续强反射为特征的油页岩。通过地震相类比研究,落实东洼流二段烃源岩面积超过 $400 \text{ km}^2$ ,西洼流二段烃源岩面积超过 $150 \text{ km}^2$ 。地球化学模拟分析认为,海头北凹陷的流二段烃源岩均已进入成熟门限。海头北凹陷在近洼处落实了多个古近系圈闭,总资源量超过 $5000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,具有较大的资源潜力。

## 4 结 论

(1) 北部湾盆地多期构造运动控制了盆地的构造演化和物质充填,多源、多储、多盖构成了盆地的多层系成藏组合,凹陷区留滞成藏、凹中断裂带/断隆带/陡坡带垂向成藏、斜坡区过路成藏、凸起/隆起区汇流成藏等多种成藏模式控制了盆地的多凹陷成藏。

(2) 北部湾盆地多个富烃洼陷内的优质烃源呈全洼分布,油气在平面上满洼富集,在输导体系发育区油气呈多层系分布;受油气差异聚集控制的富烃洼陷具有内气外油、深气浅油的油气分布特征;不同区带内的油气藏类型不同,断隆带控制大型复式油气藏分布,缓坡区控制大型地层岩性油气藏分布,洼中成熟源岩区控制近源/源内油页岩油气藏展布,大型鼻状构造控制复杂断块油气藏分布,区域性盖层和隆起控制大型披覆背斜油气藏分布。

(3) 北部湾盆地常规油气的勘探难度越来越大,存在页岩油、潜山、岩性圈闭、深层气、后备凹陷/洼陷多个油气勘探开发新领域,其原油的总资源潜力近 $24 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,天然气资源量近 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,勘探潜力巨大,是北部湾盆地未来勘探开发的重要领域和类型。

## 参 考 文 献

- [1] 李绪深,甘军,张迎朝,等. 南海西部海域断陷湖盆油气聚集规律及勘探前景[J]. 中国海上油气,2015,27(4):22-29.  
LI Xushen,GAN Jun,ZHANG Yingzhao,et al. Hydrocarbon accumulation regularity and exploration prospects of fault lacustrine basins in western South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas,2015,27(4):22-29.
- [2] 李友川,王柯,兰蕾. 北部湾盆地主要凹陷油气差异性及其控制

- 因素[J]. 中国海上油气, 2020, 32(5): 1-8.
- LI Youchuan, WANG Ke, LAN Lei. Oil and gas differences and their controlling factors of the main sags in the Beibuwan Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(5): 1-8.
- [3] 朱伟林, 江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 6-10.
- ZHU Weilin, JIANG Wenrong. Relations between fractures and hydrocarbon reservoirs in Weixinan sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(3): 6-10.
- [4] 胡林, 金秋月, 杨希冰, 等. 乌石凹陷东区构造演化特征及中浅层油气富集规律研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(5): 68-73.
- HU Lin, JIN Qiuyue, YANG Xibing, et al. Structure evolution and middle-shallow hydrocarbon enrichment patterns in the eastern Wushi sag[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(5): 68-73.
- [5] 胡斌, 张靓, 季汉成, 等. 北部湾盆地迈陈凹陷东部物源方向及沉积体系时空演化[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(4): 22-27.
- HU Bin, ZHANG Liang, JI Hancheng, et al. Depositional system evolution and provenance orientation in the eastern Maichen sag, Beibu Gulf Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(4): 22-27.
- [6] 颜世永, 李月, 吴智平, 等. 北部湾盆地海中凹陷与涠西南凹陷构造特征及成因机制[J]. 石油学报, 2020, 41(6): 711-722.
- YAN Shiyong, LI Yue, WU Zhiping, et al. Structure characteristics and genetic mechanism of Haizhong sag and Weixinan sag in Beibu Gulf Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(6): 711-722.
- [7] 傅宁, 王柯, 贾庆军. “源热共控”北部湾盆地福山凹陷油气的形成[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊2): 38-45.
- FU Ning, WANG Ke, JIA Qingjun. Formation of oil and gas in the Fushan sag of Beibuwan Basin under the co-control of source and heat[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S2): 38-45.
- [8] 刘平, 李文龙, 唐圣明, 等. 北部湾盆地雷东凹陷主控断层发育特征及其形成机制[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(2): 48-55.
- LIU Ping, LI Wenlong, TANG Shengming, et al. Development and forming mechanism of major faults in Leidong sag, Beibuwan Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(2): 48-55.
- [9] 何家雄, 姚永坚, 于俊峰, 等. 中国近海盆地油气地质特征及勘探开发进展[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 1-17.
- HE Jiaxiong, YAO Yongjian, YU Junfeng, et al. Petroleum geological characteristics and progress of exploration and development in offshore basins of China[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(11): 1-17.
- [10] 陈奎. 海上勘探开发一体化技术研究及应用——以北部湾盆地涠西南凹陷为例[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 68-79.
- CHEN Kui. Research and application of integrated technology for offshore exploration and development: a case study of Weixinan sag in the Beibuwan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 68-79.
- [11] 杨希冰, 金秋月, 胡林, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷原油成因类型及分布特征[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2019, 41(3): 51-60.
- YANG Xibing, JIN Qiuyue, HU Lin, et al. Genetic types and distribution of crude oil in Weixi'nan depression, Beibuwan Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2019, 41(3): 51-60.
- [12] 陈奎, 李茂, 邹明生, 等. 涠西南凹陷涠洲组构造圈闭有效性定量评价技术及应用[J]. 石油学报, 2018, 39(12): 1370-1378.
- CHEN Kui, LI Mao, ZOU Mingsheng, et al. The validity quantitative evaluation technology and its application to structural trap in Weizhou Formation, Weixinan sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(12): 1370-1378.
- [13] 邓勇, 范彩伟, 胡德胜, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组二段下亚段页岩油储层非均质性特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 923-936.
- DENG Yong, FAN Caiwei, HU Desheng, et al. Heterogeneity of shale oil reservoirs in the E2l2(1) in Weixinan sag, Beibu Gulf Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 923-936.
- [14] 徐长贵, 邓勇, 范彩伟, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷页岩油地质特征与资源潜力[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 1-12.
- XU Changgui, DENG Yong, FAN Caiwei, et al. Geological characteristics and resource potential of shale oil in Weixinan sag of Beibu Gulf Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(5): 1-12.
- [15] 赵顺兰, 赵亚卓, 杨希冰, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷碳酸盐岩潜山储层特征与主控因素分析[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 43-53.
- ZHAO Shunlan, ZHAO Yazhuo, YANG Xibing, et al. An analysis on the characteristics and main controlling factors of reservoir in carbonate buried hill in the Weixi'nan sag, Beibuwan Basin [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(9): 43-53.
- [16] 郑和荣, 罗军, 张英, 等. 北部湾盆地乌石凹陷发现晚二叠世花岗岩: 来自乌石1井岩心锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1350-1352.
- ZHENG Herong, LUO Jun, ZHANG Ying, et al. Discovery of Late Permian granites in Wushi sag, Beibuwan Basin: evidence for zircon U-Pb age from cores of Well Wushi 1[J]. *Geology in China*, 2022, 49(4): 1350-1352.
- [17] 孙文钊, 王传雷, 杨希滨. 北部湾盆地涠西南凹陷始新统隐蔽油气藏类型及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 84-88.
- SUN Wenzhao, WANG Chuanlei, YANG Xibin. Types and favorable exploration areas of Eocene subtle traps in Weixinan sag, BBW Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(1): 84-88.
- [18] 李茂, 朱绍鹏, 邹明生, 等. 涠西南凹陷复杂断块和隐蔽油气藏滚动勘探开发实践[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 73-79.
- LI Mao, ZHU Shaopeng, ZOU Mingsheng, et al. Progressive exploration and development of complex fault-block and subtle reservoirs in Weixinan sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(4): 73-79.
- [19] 姚光庆, 张建光, 姜平, 等. 涠西南凹陷 11-7 构造区流沙港组中深层有效储层下限厘定[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 102-109.
- YAO Guangqing, ZHANG Jianguang, JIANG Ping, et al. The physical property lower limit of medium-deep effective clastic reservoirs in Liushagang Formation, 11-7 district of Weixinan depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 102-109.
- [20] 徐万兴, 何卫军, 刘芳, 等. 北部湾盆地海中凹陷古近系流沙港组沉积演化及储盖组合特征[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(4): 11-18.
- XU Wanxing, HE Weijun, LIU Fang, et al. Sedimentary evolution and reservoir-seal assemblage characteristics of Paleogene Liushagang Formation in Haizhong sag, Beibuwan Basin[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2023, 37(4): 11-18.

- [21] 徐雪丰,罗碧华,林水城,等. 迈陈凹陷油气成藏要素分析与勘探方向研究[J]. 天然气技术与经济, 2017, 11(6): 14-18.  
XU Xuefeng, LUO Bihua, LIN Shuicheng, et al. Reservoir-forming factors and exploration direction of Maichen sag[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2017, 11(6): 14-18.
- [22] 李春荣,张功成,梁建设,等. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 195-203.  
LI Chunrong, ZHANG Gongcheng, LIANG Jianshe, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 195-203.
- [23] 邓勇,李芳,彭海龙,等. 断控层析速度建模方法研究与应用[J]. 地球物理学报, 2022, 65(11): 4404-4417.  
DENG Yong, LI Fang, PENG Hailong, et al. Research and application of fault constrained tomography velocity modeling method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(11): 4404-4417.
- [24] 邓勇,彭海龙,裴健翔,等. 海上地震资料子波提取鬼波压制技术[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 281-286.  
DENG Yong, PENG Hailong, PEI Jianxiang, et al. De-ghosting method based on seismic wavelet derived from water-bottom in marine seismic data[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 281-286.
- [25] 许效松,尹福光,万方,等. 广西钦防海槽迁移与沉积-构造转换面[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(4): 1-10.  
XU Xiaosong, YIN Fuguang, WAN Fang, et al. The migration of the Qinzhou-Fangcheng trough in Guangxi and associated sedimentary-tectonic transform surfaces [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2001, 21(4): 1-10.
- [26] 孙晓猛,张旭庆,张功成,等. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(6): 1312-1323.  
SUN Xiaomeng, ZHANG Xiuqing, ZHANG Gongcheng, et al. Texture and tectonic attribute of Cenozoic basin basement in the northern South China Sea [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(6): 1199-1211.
- [27] 刘雨晴,吴智平,王毅,等. 北部湾盆地古近纪断裂体系发育及其控盆作用[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 341-351.  
LIU Yuqing, WU Zhiping, WANG Yi, et al. Development of Paleogene fault systems and its control on the basin structures in the Beibuwan Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 341-351.
- [28] 张强,吴智平,颜世永,等. 北部湾盆地北部坳陷古近系构造发育特征及其对沉积的控制作用[J]. 高校地质学报, 2018, 24(6): 787-799.  
ZHANG Qiang, WU Zhiping, YAN Shiyong, et al. Structural characteristics of the Paleogene in the northern depression, Beibuwan Basin and their control on the sedimentary fill[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(6): 787-799.
- [29] 陈奎,周家雄,张辉,等. 湘西南凹陷二号断裂带断裂控藏研究及应用[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 92-102.  
CHEN Kui, ZHOU Jiexiong, ZHANG Hui, et al. The research and application of the reservoir controlling mechanism for the No. 2 fracture zone, Weixi'nan sag[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 92-102.
- [30] 黄保家,黄合庭,吴国璋,等. 北部湾盆地始新统湖相富有机质页岩特征及成因机制[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 25-31.  
HUANG Baojia, HUANG Heting, WU Guoxuan, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in the Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 25-31.
- [31] 徐新德,张迎朝,黄义文,等. 北部湾盆地乌石凹陷流沙港组油页岩发育的主控因素[J]. 石油学报, 2013, 34(S2): 66-73.  
XU Xinde, ZHANG Yingzhao, HUANG Yiwen, et al. Major controlling factors for development of oil shale in Liushagang Formation of Wushi sag, Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S2): 66-73.
- [32] 李友川,兰蕾,王柯,等. 北部湾盆地流沙港组湖相烃源岩的差异[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1451-1459.  
LI Youchuan, LAN Lei, WANG Ke, et al. Differences in lacustrine source rocks of Liushagang Formation in the Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1451-1459.
- [33] 岳军培,张艳,沈怀磊,等. 华南陆缘地质特征对南海北部盆地基底的约束[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊2): 120-128.  
YUE Junpei, ZHANG Yan, SHEN Huailei, et al. Constraints of geological characteristics of the South China continental margin on the basement of basins in northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S2): 120-128.
- [34] 于水,邓运华,李宏义,等. 北部湾盆地流二段油页岩形成条件与分布控制因素[J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 24-33.  
YU Shui, DENG Yunhua, LI Hongyi, et al. Forming conditions and distribution controlling factors of oil shale in Liu 2 Member of Beibuwan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 24-33.
- [35] 赵贤正,金凤鸣,蒲秀刚,等. 负向构造区油气成藏理论认识与勘探实践[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 11-23.  
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, PU Xiugang, et al. Theoretical understanding of oil and gas accumulation in negative tectonic area and exploration practice[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 11-23.
- [36] 满晓,胡德胜,范彩伟,等. 乌石凹陷“背形负花构造”成因及油气富集规律差异性研究[J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 32-39.  
MAN Xiao, HU Desheng, FAN Caiwei, et al. Study on the origin of “antiform negative flower structure” and the difference of oil and gas enrichment law in Wushi sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 32-39.
- [37] 金秋月. 北部湾盆地涠西南凹陷东南斜坡原油成因类型及成藏特征[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(1): 11-18.  
JIN Qiuyue. Genesis types and accumulation characteristics of crude oil in southeast slope of Weixinan depression, Beibuwan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(1): 11-18.
- [38] 李才,范彩伟,胡林,等. 北部湾盆地涠西南低凸起构造演化特征及其成因[J]. 海相油气地质, 2021, 26(4): 319-325.  
LI Cai, FAN Caiwei, HU Lin, et al. Tectonic evolution characteristics and genesis of Weixi'nan low uplift in Beibu Gulf Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(4): 319-325.
- [39] 李宏义,徐建永,李友川,等. 北部湾盆地流二段不同类型烃源岩生排烃效率与成藏贡献对比[J]. 中国海上油气, 2020, 32(6): 22-30.  
LI Hongyi, XU Jianyong, LI Youchuan, et al. Comparison on the

- efficiency of hydrocarbon generation & expulsion and the contribution to hydrocarbon accumulation of different source rocks in Liu 2 Member, Beibuwan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(6): 22-30.
- [40] 杨希冰. 南海北部北部湾盆地油气藏形成条件[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 85-92.  
YANG Xibing. Hydrocarbon accumulation conditions in Beibu Gulf Basin, northern South China Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4): 85-92.
- [41] 马云, 李三忠, 刘鑫, 等. 华南北部湾盆地的形成机制[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(6): 1727-1736.  
MA Yun, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Formation mechanism of the Beibuwan Basin, South China[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(6): 1727-1736.
- [42] 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 79-93.  
CHENG Shixiu, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Cenozoic tectonics and dynamics of Basin groups of the northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 79-93.
- [43] 梁新权, 李献华, 丘元禧, 等. 华南印支期碰撞造山——十万大山盆地构造和沉积学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(1): 99-112.  
LIANG Xinquan, LI Xianhua, QIU Yuanxi, et al. Indosinian collisional orogeny: evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan Basin, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2005, 29(1): 99-112.
- [44] 周蒂, 孙珍, 陈汉宗, 等. 南海及其围区中生代岩相古地理和构造演化[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 204-218.  
ZHOU Di, SUN Zhen, CHEN Hangzong, et al. Mesozoic lithofacies, paleo-geography, and tectonic evolution of the South China Sea and surrounding areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 204-218.
- [45] 徐守立, 尤丽, 代龙, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷灰岩潜山储层特征及分布规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(1): 94-103.  
XU Shouli, YOU Li, DAI Long, et al. Characteristics of limestone buried-hills and their distribution in the Weixinan depression of the Beibu Gulf Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(1): 94-103.
- [46] 赵顺兰, 杨希冰, 陈林, 等. 南海西部涠西南凹陷碳酸盐岩潜山油气成藏条件及勘探潜力[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(2): 51-61.  
ZHAO Shunlan, YANG Xibing, CHEN Lin, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of carbonate buried hills in Weixinan sag in western South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(2): 51-61.
- [47] 李福来, 吕琳, 马文宽, 等. 乌石凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(1): 31-40.  
LI Fulai, LÜ Lin, MA Wenkuan, et al. Geochemical characteristics of source rocks in Liushagang Formation of Wushi sag[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2021, 45(1): 31-40.
- [48] 董贵能, 邓勇, 盖永浩, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷湖底扇的沉积特征[J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 218-227.  
DONG Guineng, DENG Yong, GAI Yonghao, et al. Sedimentary characteristics of sublacustrine fan in Weixi'nan sag of Beibuwan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 218-227.
- [49] 满晓, 胡德胜, 吴洁, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷始新统一段湖底扇发育特征及成藏模式[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(4): 137-144.  
MAN Xiao, HU Desheng, WU Jie, et al. Development characteristics and accumulation model of sublacustrine fans of the first Member of Eocene Liushagang Formation in Weixinan sag, Beibuwan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(4): 137-144.
- [50] 胡德胜, 宫立园, 满晓, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷雁列断层变换带发育特征及其控储作用——以古近系流沙港组一段重力流沉积为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1359-1369.  
HU Desheng, GONG Liyuan, MAN Xiao, et al. Development pattern of an echelon fault transition zone in Weixi'nan sag, Beibuwan Basin and its control on hydrocarbon accumulation——a case study of gravity flow deposits in the Palaeogene Liu 1 Member[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1359-1369.
- [51] 彭松, 李珊珊, 胡德胜, 等. 北部湾涠西南凹陷斜阳斜坡早渐新世低位三角洲沉积及油气地质意义[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(10): 32-39.  
PENG Song, LI Shanshan, HU Desheng, et al. Depositional characteristics of the early Oligocene lowstand delta in Xieyang slope zone of Weixinan depression, Beibuwan Basin and their petroleum geological significance[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(10): 32-39.
- [52] 胡德胜, 邓勇, 李安琪, 等. 涠西南凹陷南斜坡流二段成藏条件新认识及勘探实践[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(5): 30-38.  
HU Desheng, DENG Yong, LI Anqi, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration practice in Member 2 of Liushagang Formation in the south slope of Weixinan sag, Beibuwan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(5): 30-38.
- [53] 罗威, 张道军, 刘新宇, 等. 乌石凹陷南部陡坡带流二段大型储集体发育条件及特征[J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 154-165.  
LUO Wei, ZHANG Daojun, LIU Xinyu, et al. Large reservoirs development condition and characteristics of the second member of Liushagang Formation in the southern steep slope zone, Wushi depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 154-165.

(收稿日期 2023-08-14 改回日期 2023-10-31 编辑 雷永良)