

文章编号: 0253-2697(2024)01-0183-19 DOI:10. 7623/syxb202401011

# 珠江口盆地油气勘探新领域及资源潜力

高阳东<sup>1</sup> 刘军<sup>2,3</sup> 彭光荣<sup>2,3</sup> 陈林<sup>4</sup> 王梓颐<sup>2,3</sup> 史玉玲<sup>2,3</sup>

(1. 中国海洋石油有限公司勘探开发部 北京 100010; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518054;  
3. 中海石油深海开发有限公司 广东深圳 518054; 4. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057)

**摘要:**珠江口盆地油气勘探尚处于中、低勘探程度阶段,近年来,盆地加大了新领域的研究与评价力度,取得了一系列勘探成果。在富烃洼陷文昌 A 凹、陆丰凹陷、惠州凹陷、番禺 4 洼的古近系,富烃洼陷惠州凹陷的古潜山,新洼陷阳江东凹与开平凹陷等实现了多领域、多类型勘探新发现,落实了规模储量,为南海东、西部油田稳定发展夯实了储量基础。明确断陷盆地的大型增压型断裂转换斜坡带是大中型油气田勘探的主要方向,打破了文昌 A 凹多年未有规模发现的局面;创新提出“早断输导、小型源-汇体系及转换带控砂,洼间隆控藏”成藏认识,指导了陆丰南古近系高产能油田群的发现;建立扇三角洲—辫状河三角洲沉积体系勘探技术系列,推动了惠西南古近系陡坡带亿吨级油田群的发现;深化富砂层系储-盖组合及成藏研究,助力番禺 4 洼恩平组新层系取得大中型油气田勘探发现;创新建立中生代陆缘岩浆弧成岩-成山-成储-成藏模式,指导惠西南取得了古潜山规模商业突破;创新强伸展-弱走滑控盆控烃新机制,推动阳江东—恩平北油田群的重大发现;创新提出“拆离-变质核杂岩”型成盆机制,有望在开平南带形成亿吨级油田群。珠江口盆地逐渐形成古近系、古潜山、新洼陷等勘探新领域及多项技术系列,为南海东、西部油田持续增储上产提供了坚实的技术支撑,也打开了勘探新领域与新类型的勘探前景。资源评价结果显示,珠江口盆地富烃洼陷古近系及古潜山剩余资源量主要分布在惠州 26 洼、文昌 A 凹等,阳江—统暗沙断裂带周缘及惠陆地区周缘新洼陷的原油资源最为丰富。

**关键词:**富烃洼陷;古近系;古潜山;新洼陷;资源潜力;珠江口盆地

**中图分类号:**TE132.1

**文献标识码:**A

## New fields and resource potential of oil and gas exploration in Pearl River Mouth Basin

Gao Yangdong<sup>1</sup> Liu Jun<sup>2,3</sup> Peng Guangrong<sup>2,3</sup> Chen Lin<sup>4</sup> Wang Ziyi<sup>2,3</sup> Shi Yuling<sup>2,3</sup>

(1. Exploration and Development Department of CNOOC Limited, Beijing 100010, China; 2. Shenzhen Branch, CNOOC China Limited, Guangdong Shenzhen 518054, China; 3. CNOOC Deepwater Development Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518054, China; 4. Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Guangdong Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** Pearl River Mouth Basin has still been in the stage of medium- and low-degree oil and gas exploration. In recent years, more efforts have been put on the research and evaluation of new fields in the basin and achieved a series of exploration results. We have realized new discoveries from multiple fields and types of exploration in hydrocarbon-rich depressions, i. e., the Paleogene of Wenchang A depression, Lufeng depression, Huizhou depression and Panyu 4 depression, the paleo-buried hill in Huizhou depression, as well as new depressions including Yangjiang East depression, and Kaiping depression. This has achieved large-scale reserves, thus reinforcing the reserve base for the stable development of oil fields in the east and west of South China Sea. It is clarified that the large-scale pressurization fault transitional slope zone in a fault basin indicates the main direction of exploration for large- and medium-sized oil and gas fields, thus changing the fact that no large scale reserves had been discovered in Wenchang A depression for many years. We innovatively proposed an understanding of hydrocarbon accumulation, i. e., “early fault transportation, small-scale source sink system and transformation zone controlling sand, and accumulations controlled by uplifts between depressions”, guiding the discovery of the Paleogene high-yield oilfield group in the southern Lufeng sag. The establishment of exploration techniques for the fan delta-braided river delta sedimentary system has promoted the discovery of oilfield group on 10<sup>8</sup> t scale in the Palaeogene steep slope in the southwestern Huizhou depression. Deepening the research on reservoir-seal combination and petroleum entrapment in sand-rich series can contribute to the exploration and discovery of large- and medium-sized oil and gas fields in the new series of strata in Enping Formation of Panyu 4 depression. Innovatively establishing a model of diagenesis-mountain formation-reservoir formation-hydrocarbon accumulation for magmatic arcs in Mesozoic continental margins has guided the southwestern Huizhou depression to achieve a large-scale commercial breakthrough in the paleo-buried hills. The significant discovery of the oilfields group in East Yangjiang sag-North Enping sag is promoted by innovating the new mechanism of strong extension and weak strike slip controlling basin and hydrocarbons. Moreover, the innovative proposal of basin formation mechanism in the mode of “detachment-metamorphic core complex” is

**基金项目:**中国海洋石油集团有限公司“十四五”科技重大项目(KJGG2021-0400)和“十四五”全国油气资源评价项目(QGYQZYPJ2022-3)资助。

**第一作者:**高阳东,男,1975年10月生,1997年获同济大学海洋地质专业学士学位,现为中海石油(中国)有限公司勘探开发部副总经理、教授级高级工程师,主要从事中国海域油气勘探与开发研究工作。Email:gaoyd@cnooc.com.cn

**通信作者:**彭光荣,男,1978年8月生,2005年获中国石油大学(北京)硕士学位,现为中海石油(中国)有限公司深圳分公司高级工程师和南海东部石油研究院地质总师,主要从事油气地质研究工作。Email:penggr@cnooc.com.cn

expected to form an oilfield group on a billion ton scale in the southern Kaiping belt. We have gradually developed new exploration fields such as Paleogene strata, buried hills, and new depressions and multiple technology series in Pearl River Mouth Basin, providing a solid technical support for the continuous increase of reserves and production in the eastern and western oilfields of South China Sea and opening up new prospects for new fields and new types of exploration. The resource evaluation results show that the remaining resources of the Paleogene system in hydrocarbon-rich depressions and buried hills in Pearl River Mouth Basin are mainly distributed in Huizhou 26 depression, Wenchang A depression, and etc. The crude oil resources are most abundant in the periphery of the Yangjiang-Yitong'ansha fault zone and the new depressions around Huizhou-Lufeng area.

**Key words:** hydrocarbon-rich depression; Paleogene; paleo-buried hill; new depression; resource potential; Pearl River Mouth Basin

引用:高阳东,刘军,彭光荣,陈林,王梓颐,史玉玲.珠江口盆地油气勘探新领域及资源潜力[J].石油学报,2024,45(1):183-201.

Cite:GAO Yangdong,LIU Jun,PENG Guangrong,CHEN Lin,WANG Ziyi,SHI Yuling. New fields and resource potential of oil and gas exploration in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(1):183-201.

随着珠江口盆地在惠州、陆丰、恩平、文昌 A 等凹陷的中浅层珠江组、韩江组的勘探程度越来越高,新发现的规模构造圈闭越来越少<sup>[1-5]</sup>,以中浅层为主力油层的各油田的采出程度不断提高,老油田综合含水率普遍超过 95%,亟需新的规模储量发现。近年来,在围绕中浅层精细挖潜的同时,针对富烃凹陷资源探明程度相对较低的新领域不断加强地质研究和预探力度,并风险甩开勘探富有潜力的新洼陷,不断获得新储量。

目前,珠江口盆地勘探正处于战略转型期,勘探领域已发生转变,并逐渐形成南海东、西部油田资源的接替新阵地。勘探领域一方面由浅层向深层转变,通过解放思想、创新认识,在盆地西部文昌 A 凹、东部陆丰南、惠西南、番禺 4 洼等富烃洼陷的古近系取得规模发现,在惠西南等富烃洼陷的古潜山取得重大突破;另一方面由成熟区向新区转变,通过深化研究、积极拓展,在阳江东凹、开平凹陷等新洼陷接连取得勘探重要突破,一举打破该区不具备勘探价值的传统地质认识,证实了新洼陷的勘探潜力,有望形成亿吨级油田群。

地质认识创新和关键技术突破指导推动了珠江口盆地勘探新发现和突破,打开了勘探新领域与新类型的广阔前景,也为油气资源潜力的地质认识与评价及盆地下一步勘探靶区的优选提供了重要依据和指导。

## 1 盆地地质概况及油气勘探开发历程

珠江口盆地总体具有“北油南气”的资源禀赋格局,探区油气总资源量超  $110 \times 10^8$  t 油当量。自 20 世纪 70 年代始,珠江口盆地经历了 40 余年的勘探,其中,前 20 年以对外合作为主,重点探索大型构造圈闭,近 20 余年以自营勘探为主,勘探目标逐步从浅水中浅层转向深水深层、新区新领域等。整体上,珠江口盆地的勘探历程大致可以划分为 6 个阶段。

### (1) 盆地普查探索阶段(1973—1984 年)

该阶段,在“海相生油,以钻探盆地中央隆起带巨型构造为目标”思想的指导下对珠江口盆地进行了初

步探索与评价,组织钻探的珠 5 井首次的古近系获得工业油流,证实珠江口盆地具备油气成藏条件和良好勘探前景。该阶段早期认为盆地“海相生油”,后期逐步认识到盆地为“陆相生油”。

### (2) “定凹选带”阶段(1985—1991 年)

该阶段,勘探思想逐步转变为“以富烃凹陷为中心,凹陷内以逆牵引背斜和披覆背斜构造为目标,凹陷外沿构造脊长距离运移路径寻找碳酸盐台地生物礁滩”,在惠州、西江、流花、陆丰等地区发现了一批大中型油气田群,确立了珠江口盆地原油勘探开发的主体地位,但后期可供上钻的大目标逐步枯竭,对断层圈闭及其他类型目标的成藏研究尚不成熟。

### (3) 近洼勘探阶段(1992—2000 年)

该阶段,在“源控论”勘探思想的指导下,发现了番禺油田群等,同时在深水沉积研究领域获得进展,认识到珠二拗陷与珠一拗陷的地质条件和成藏规律不同。

### (4) 天然气勘探突破阶段(2001—2005 年)

该阶段,在“反向断裂控藏”思想指导下发现了番禺气田群。

### (5) 大步迈向深水勘探阶段(2006—2010 年)

该阶段,基于“深水陆坡重力流水道和朵叶体砂岩是主要优质储层”的地质认识,一举发现了众多白云凹陷深水气田群。

### (6) 多层系立体勘探阶段(2011 年至今)

该阶段,建立了新构造运动晚期成藏、复式成藏模式,创新提出深水内气外油、先存断裂控洼的地质认识,获得了文昌 9-7 油田、恩平阳江油田群、陆丰古近系油田群、深水轻质油田群、惠州 26-6 古潜山、开平 11-4 油田群等一系列重大发现。

截至 2022 年,珠江口盆地已探明油气地质储量近  $16 \times 10^8$  t,尚处于勘探早—中期,勘探程度整体较低,盆地油气剩余勘探潜力巨大。40 余年来,勘探发现储量支撑南海东、西部油田建立起了 9 大作业区,累计油气产量突破  $4 \times 10^8$  t 油当量(图 1、图 2)。

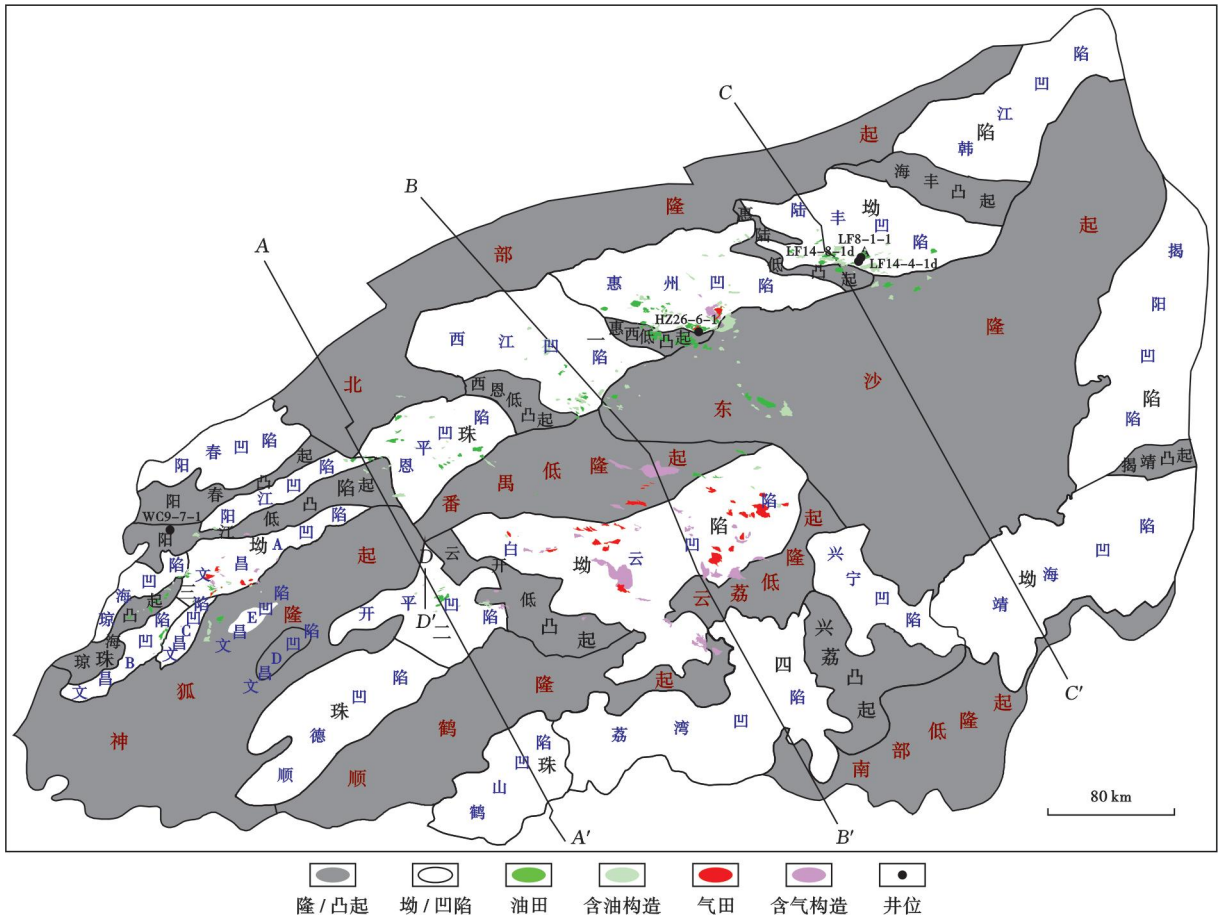


图 1 珠江口盆地构造纲要与油气勘探发现

Fig. 1 Tectonic outline and hydrocarbon discovery of Pearl River Mouth Basin

## 2 盆地油气地质条件

### 2.1 盆地构造特征

珠江口盆地位于南海北部陆缘地壳强烈薄化带之上,新生代以来经历了神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、东沙运动 5 期构造演化,具有复杂的动力学背景<sup>[6-10]</sup>。盆地主控断裂以 NE 向断裂体系为主,与 NWW 向断裂共同控制了盆地“南北分带、东西分块”的隆凹格局,形成恩平、西江、惠州、陆丰、白云、荔湾、阳江、文昌等多个凹陷。受基底先存构造、应力方向转变、地壳拆离薄化、岩浆侵位改造等因素的综合控制,珠江口盆地凹陷结构及构造样式多样(图 3)。

### 2.2 烃源岩

珠江口盆地发育文昌组、恩平组和珠海组 3 套烃源岩,其中,文昌组以滨—浅湖亚相、中—深湖亚相及三角洲相沉积为主,恩平组以河流—三角洲相、湖沼相和滨—浅湖亚相沉积为主,珠海组以河流—三角洲相和滨—浅海相沉积为主<sup>[11]</sup>。基于企业标准《海上凹陷生烃潜力评价规范》<sup>[12]</sup>,分析认为盆地珠一坳陷、珠三坳陷文昌组均为好—优质烃源岩,有机质丰度高。其

中,珠一坳陷文昌组烃源岩总有机碳(TOC)含量为 0.95%~11.43%(平均为 2.50%),热解生烃潜量( $S_1 + S_2$ )为 5.81~45.20 mg/g(平均为 18.90 mg/g),干酪根类型以 I 型、II<sub>1</sub> 型为主,氢指数(HI)较高,为 300~963 mg/g(平均为 540 mg/g)。珠二坳陷文昌组烃源岩品质相对较差,为中等—好烃源岩,TOC 含量为 0.87%~1.72%(平均为 1.16%),干酪根类型以 II<sub>1</sub> 型为主(表 1)。

文昌组半深湖亚相烃源岩主要分布在文昌组二段—五段,地层占比为 60%~80%,以深灰色、灰黑色泥岩为主,烃源岩单层厚度在 20~262 m;滨—浅湖亚相烃源岩主要分布在文昌组一段—四段,地层占比为 40%~60%,单层厚度在 21~160 m,以灰色及深灰色泥岩为主;三角洲相烃源岩在文昌组各段均有分布,以灰色泥岩为主,地层占比在 20%~50%,单层厚度在 3~275 m。盆地恩平组和珠海组烃源岩均为中等烃源岩,其中,恩平组烃源岩 TOC 含量为 0.18%~11.56%,平均为 1.69%;珠海组仅在珠二坳陷发育,TOC 含量为 0.26%~4.38%,平均为 0.99%,以 II<sub>2</sub> 型、III 型干酪根为主。3 套烃源岩的热演化成熟度差

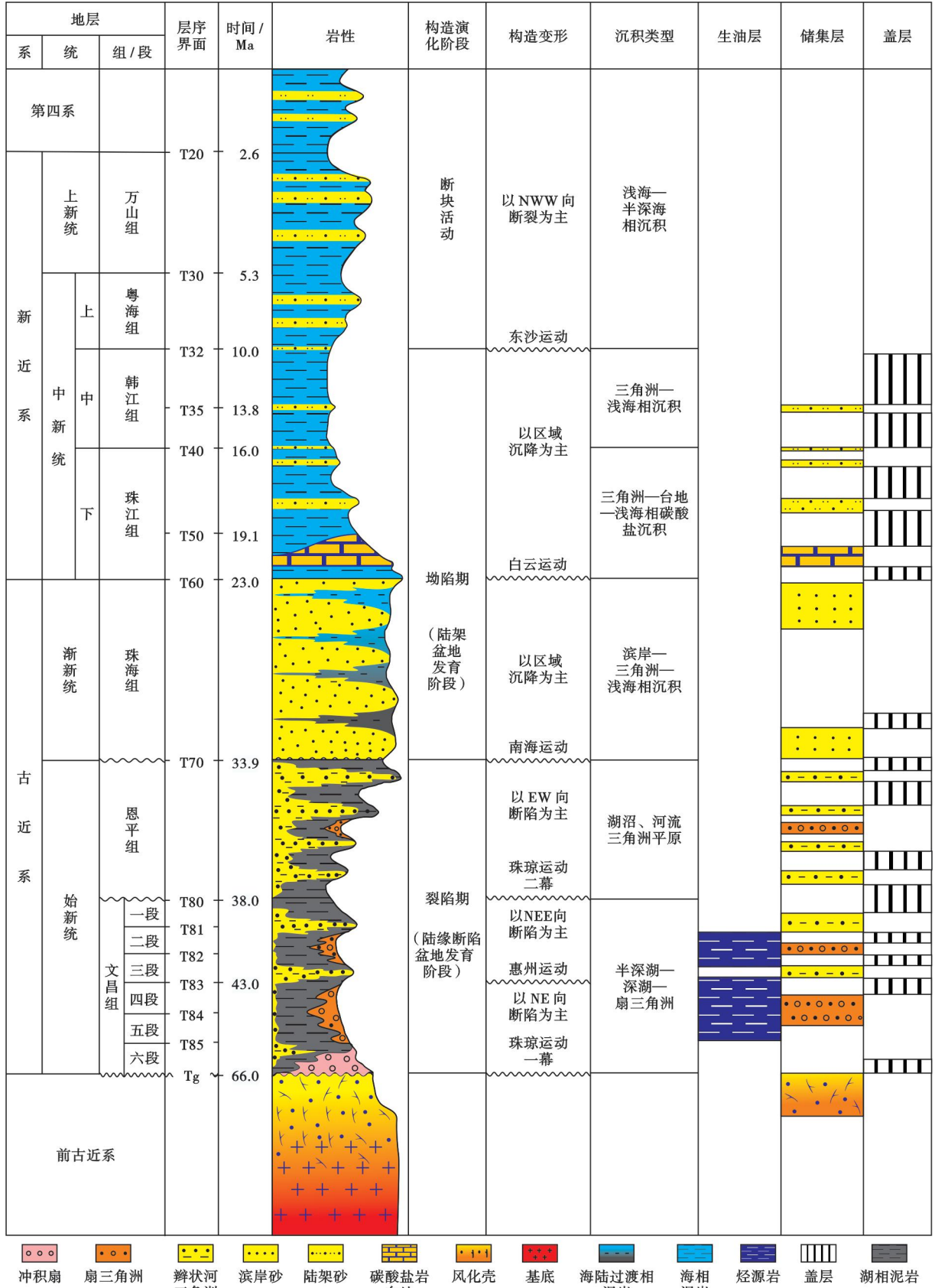
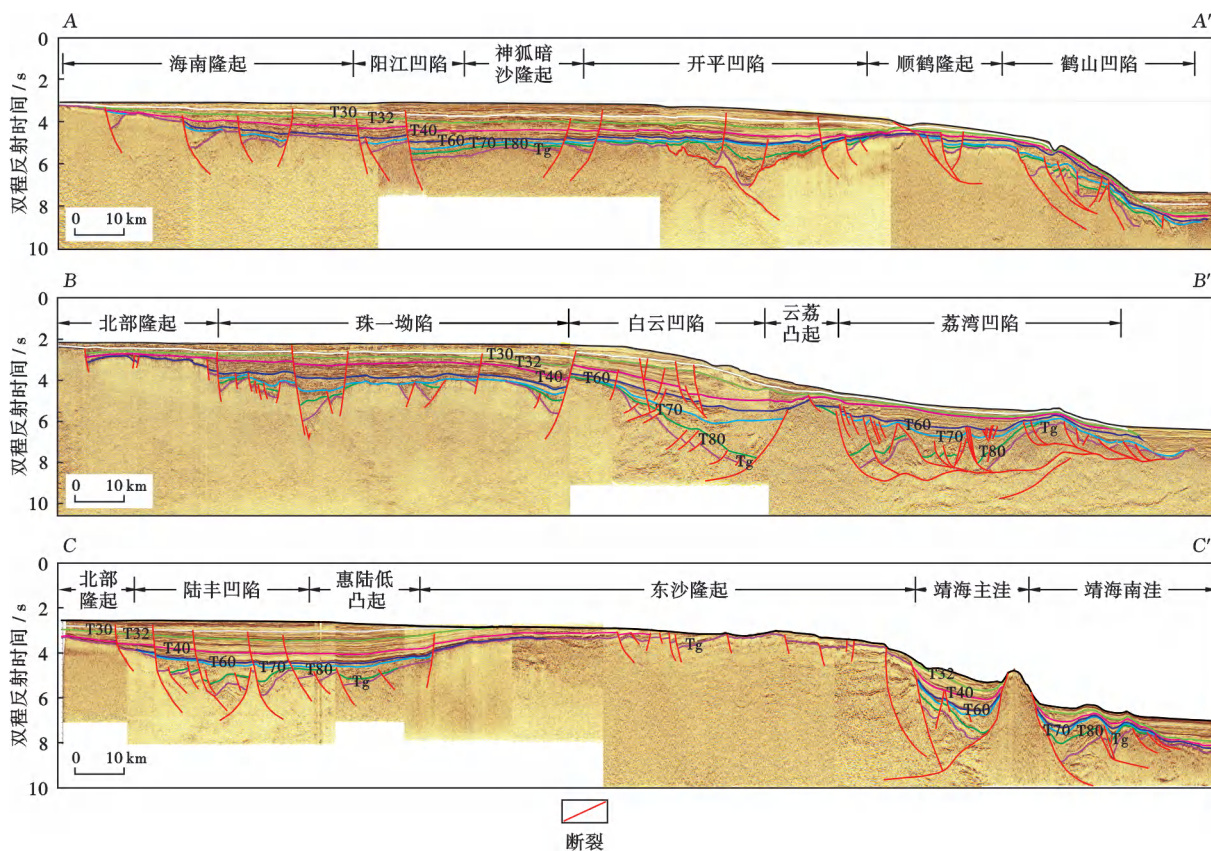


图 2 珠江口盆地地层特征

Fig. 2 Stratigraphic characteristics of Pearl River Mouth Basin



注: Tg—前古近系顶界面; T80—文昌组顶界面; T70—恩平组顶界面; T60—珠海组顶界面; T40—珠江组顶界面; T32—韩江组顶界面; T30—粤海组顶界面。

图 3 珠江口盆地典型地震-地质解释剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Typical seismic geological interpretation profile of Pearl River Mouth Basin

表 1 珠江口盆地烃源岩地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of the source rocks of Pearl River Mouth Basin

地层	坳陷	生烃潜量/(mg/g)	氢指数/(mg/g)	干酪根类型	镜质体反射率( $R_o$ )/%
珠海组	珠二坳陷	0.10~15.10/2.36	13.20~300.00/126.60	以 II <sub>2</sub> 型、III 型为主	0.43~0.85/0.61
	珠一坳陷				
恩平组	珠二坳陷	0.27~16.16/2.74	33.33~870.00/170.00	以 II <sub>1</sub> 型、III 型为主	0.47~1.50/0.73
	珠三坳陷				
文昌组	珠一坳陷	5.81~45.20/18.90	300.00~963.00/540.00	以 I 型、II <sub>1</sub> 型为主	0.39~1.44/0.72
	珠二坳陷	3.17~13.54/7.15	279.00~565.00/432.40	以 II <sub>1</sub> 型为主	0.87~1.72/1.16

注:“/”后为平均值。

异较大:文昌组烃源岩镜质体反射率( $R_o$ )普遍大于恩平组、珠海组烃源岩,珠二坳陷文昌组烃源岩  $R_o$  大于珠一坳陷、珠三坳陷。前人研究证实,从盆地浅水区到深水区,烃源岩成熟门限逐渐降低,生烃越来越早;珠二坳陷烃源岩成熟早于珠一坳陷;3 套烃源岩现今均已进入生、排烃门限<sup>[13]</sup>,为盆地大中型油气田的形成提供了良好的物质基础(图 4)。

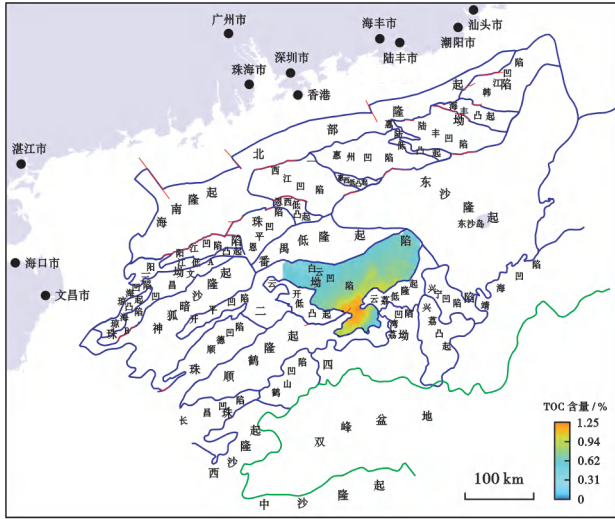
### 2.3 主要储层

珠江口盆地发育多类储层,主要包括中生代古潜山岩浆岩储层、古近系陆相碎屑岩储层、新近系大型海

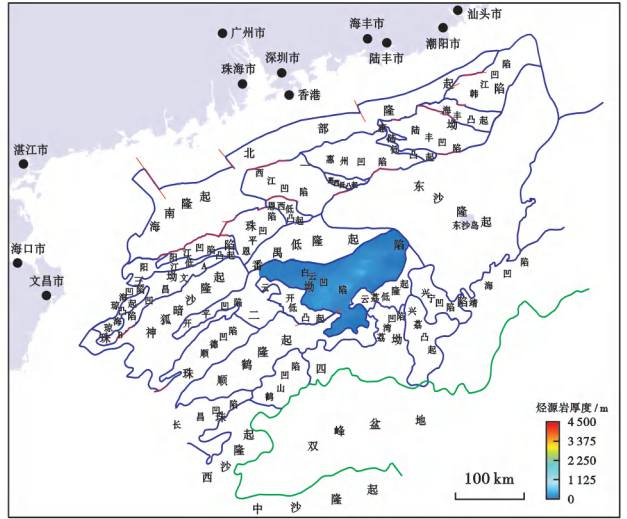
相三角洲碎屑岩储层等。

其中,中生代古潜山岩浆岩储层形成于中生代中期岩浆活动,岩性复杂,以复合火山岩-深成侵入岩组合为主,主要为裂缝-孔洞型及裂缝型储层[图 5(a)、图 5(b)]。

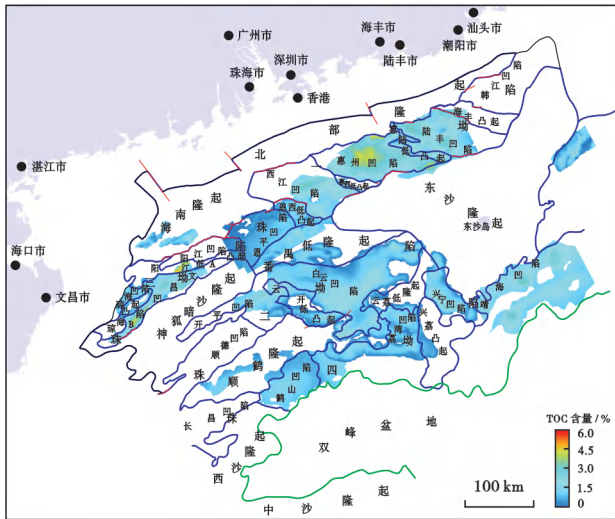
古近系陆相碎屑岩储层形成于裂陷期。文昌组沉积期,研究区主要发育缓坡带辫状河三角洲、转换带辫状河三角洲、陡坡带扇三角洲沉积体系,恩平组沉积期主要发育浅水辫状河三角洲沉积体系。古近系陆相碎屑岩储层主要表现为埋深大、成岩作用复杂、低渗特低



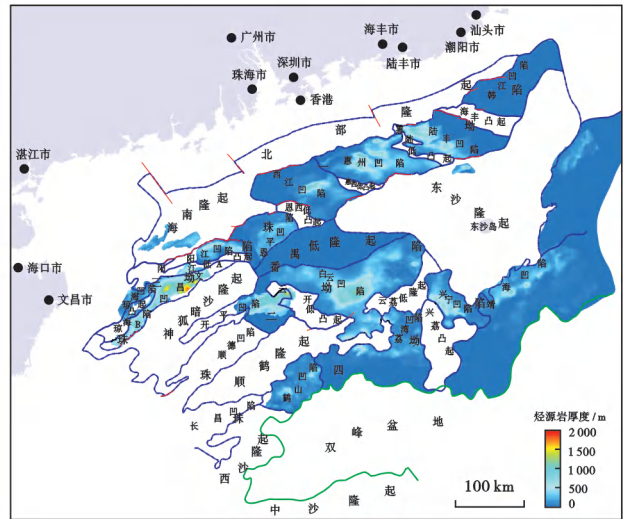
(a) 珠海组 TOC 含量



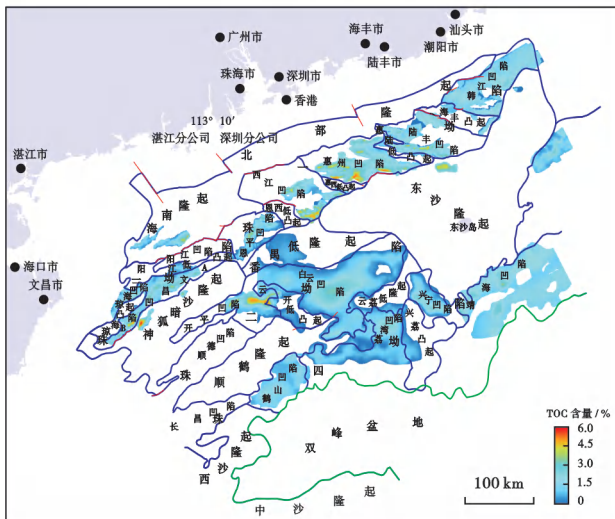
(b) 珠海组烃源岩厚度



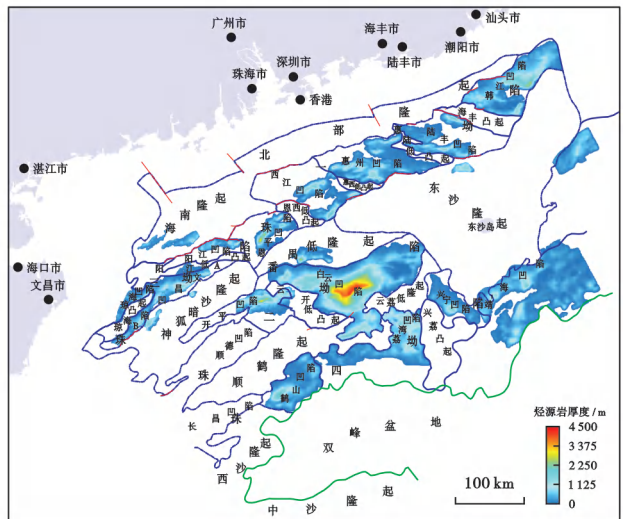
(c) 恩平组 TOC 含量



(d) 恩平组烃源岩厚度



(e) 文昌组 TOC 含量



(f) 文昌组烃源岩厚度



图4 珠江口盆地主力烃源岩 TOC 含量与厚度分布

Fig. 4 Distribution of TOC content and thickness of the main source rocks in Pearl River Mouth Basin

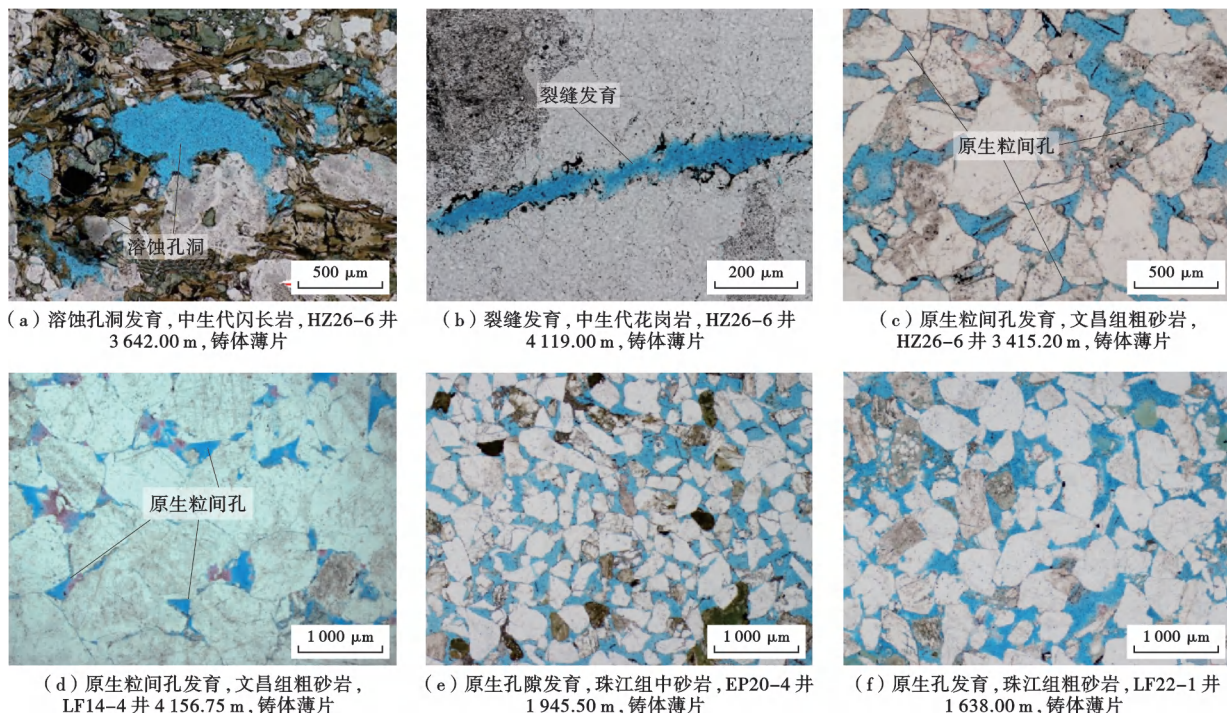


图 5 珠江口盆地典型储层类型

Fig. 5 Typical reservoir types in Pearl River Mouth Basin

渗、平面与纵向非均质性强,但强水动力条件下的粗粒净砂岩具有高成分成熟度、高结构成熟度和低充填物含量[图 5(c)、图 5(d)],原生孔隙发育、孔喉大,是油气勘探中的“甜点储层”发育带<sup>[14-18]</sup>。

新近系大型海相三角洲碎屑岩储层主要发育在三角洲前缘水下分流河道、河口坝,主要表现为埋深浅、成分成熟度高、结构成熟度高、成岩作用弱、原生孔隙发育、物性好、大孔大喉[图 5(e)、图 5(f)]。

## 2.4 盖层

珠江口盆地新生代总体经历了“先陆相后海相、先湖盆后海盆”的沉积演化,湖平面、海平面的变化控制了盆地的充填模式,进而控制了盖层的发育与分布。珠江口盆地盖层岩性多以泥岩为主,局部的灰岩、灰质泥岩、粉砂质泥岩、钙质砂岩(致密砂岩)也具有一定封闭性。不同演化阶段的盖层规模具有较大差异,根据盖层的发育层位、厚度和平面分布范围,可进一步分为区域盖层和局部盖层。

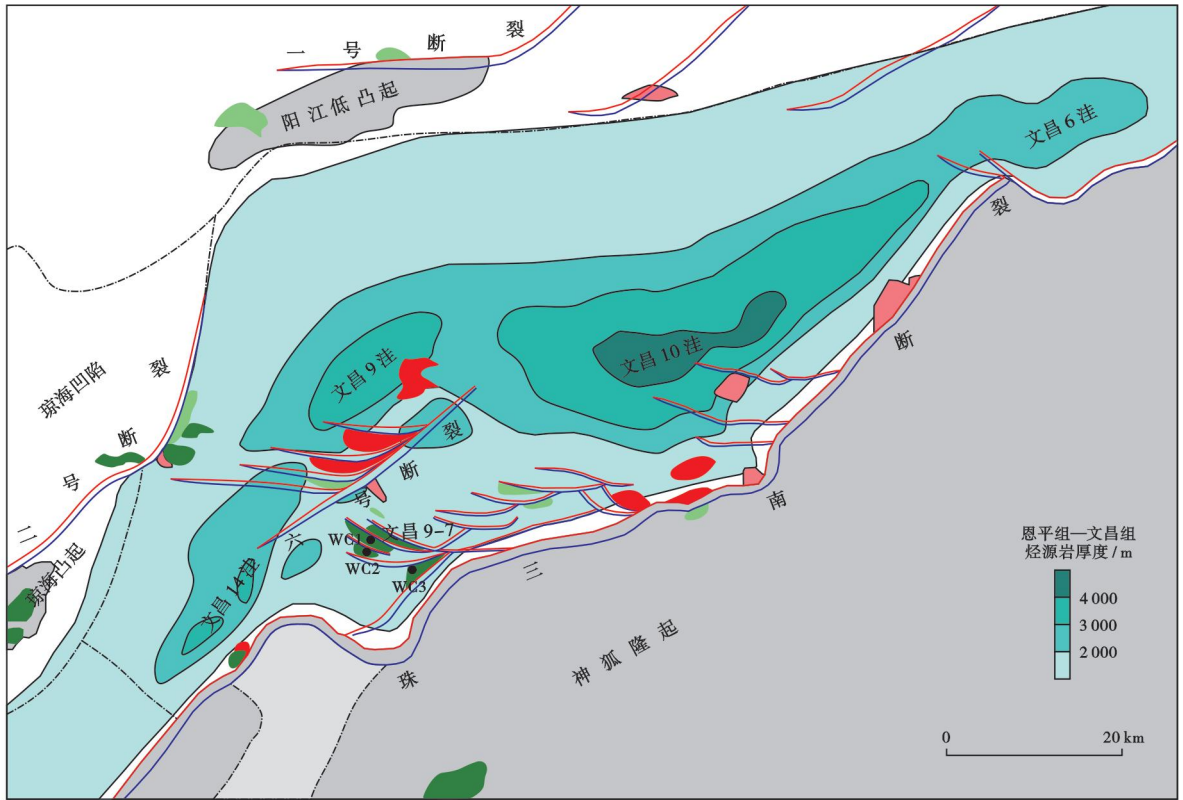
晚中新世以来,珠江口盆地沉积环境稳定,沉积了分布范围广、厚层状海泛泥岩,其具有较好的统一性和封闭性,构成盆地内最主要的一套区域盖层。珠江口盆地早期发现的大规模油气田,如陆丰 13-1、惠州 21-1、惠州 25-8 等油田均位于该套盖层之下。局部盖层主要为相对湖平面上升期形成的湖泛泥岩或三角洲内部间湾泥岩,在各洼陷的差异较大<sup>[19-23]</sup>。

## 3 近期油气勘探发现与突破

### 3.1 珠江口盆地富烃洼陷古近系勘探发现

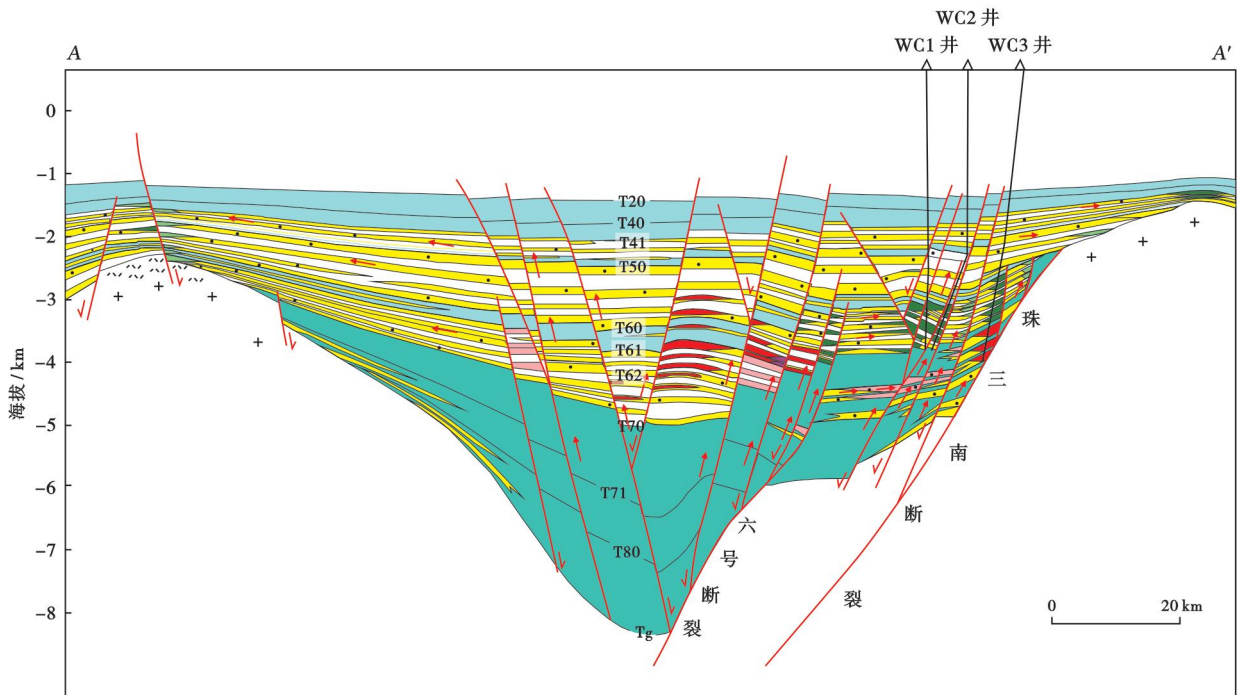
3.1.1 创新“大型增压型转换带控圈、控藏”认识,指导文昌 A 凹陷珠海组实现油气勘探规模突破  
文昌 A 凹陷位于珠江口盆地珠三拗陷,油气主要富集在珠江组和珠海组。勘探早期在凹陷六号断裂带发现两个气田,但构造复杂、圈闭破碎、成藏规律不明等原因限制了进一步勘探突破。此后在文昌 A 凹内钻探的多口评价井均未获得规模发现,且不同构造带的勘探成效差异大,整体勘探成效低。断裂转换带对油气的控制作用不明确及优势砂体展布规律不清楚,是阻碍文昌 A 凹油气勘探实现突破的主要原因。

综合分析南海西部主要凹陷的勘探历程、油气资源潜力及其分布不均衡性,加强研究已发现油气田的分布与生烃强度、构造断裂带之间的关系,创新提出断陷盆地大型增压型断裂转换斜坡带和具有隆起背景的近源构造-岩性复合圈闭群是珠江口盆地西部原油勘探突破的关键。认为受六号断裂和珠三南断裂两条 NE 向右旋断裂张扭作用的影响,文昌 9-7 构造所处的转换斜坡带具有大型增压型转换带特征。该转换斜坡带为沉积物输入区,控制砂体发育,有利于储层形成,且多期、多级、多成因断层持续长时间活动,有利于构造圈闭群的形成(图 6);同时,该转换斜坡带被多注环抱,凹中隆构造脊背景有利于油气汇聚。基于该地质



● 井位    断裂    隆起/凸起    构造单元边界    气田    油田    含油构造    含气构造

(a) 构造纲要



气层    控制气层    预测气层    油层    预测油层    区域盖层    砂岩    烃源岩    断层    油气运移    基底    地层界面

(b) 油气成藏模式(剖面位置见图1)

图6 文昌A凹陷构造纲要与油气成藏模式(据文献[24]修改)  
 Fig.6 Structural framework and hydrocarbon accumulation model of Weichang A sag



认识,在文昌 9-7 转换斜坡带获得了原油勘探突破,开拓了新的勘探领域。

通过解放思想、转变思路,转向新领域勘探,在增压型转换带控制大型圈闭群形成、构造转换带源-汇体系控制大型优质储层形成的勘探思路指导下,解决了如何在—群勘探成效极低的小型油气田周缘寻找大中型油气田的难题。2020 年在文昌 9-7 构造珠海组钻遇厚逾 80 m 的油层,单井探明地质储量近  $1000 \times 10^4$  t 油当量,是 2008 年以来珠江口盆地西部单井油层最厚、单井探明地质储量最大、珠海组测试产能最高的探井<sup>[24-26]</sup>。

### 3.1.2 创新“早断输导、小型源-汇及转换带控砂,洼间隆控藏”认识,指导陆丰南古近系高产能油田群发现

陆丰凹陷位于珠江口盆地珠—坳陷东侧,早期主要勘探新近系圈闭,后来兼探古近系恩平组,并逐步转变为以古近系勘探为主,重点勘探恩平组和文昌组。目前陆丰凹陷古近系探明地质储量的占比已经超过 50%。陆丰凹陷各主要生烃洼陷经历了多期不同类型、不同强度的改造<sup>[27]</sup>,因此,原型盆地面貌恢复难度大,增加了预测砂体和甜点储层的难度,且古近系埋深相对较大,储层储集物性存在风险<sup>[28]</sup>。

通过加强油气运移成藏分析,开展物理模拟实验,创新提出“早期通源断裂垂向‘渗流’形式输导”的认识,突破了油气输导局限于断裂晚期活动的传统认识<sup>[29]</sup>,建立了早期断裂渗流输导评价模板,认为陆丰 8-1 构造的断裂活动性与成藏要素匹配,并指导获得规模商业发现,揭示陆丰南部早期断裂周缘成藏新类型。

早期通过开展大型源-汇分析,推动了陆丰东低凸起等辫状河三角洲沉积体系的规模商业突破,随着东凸起新发现的有利圈闭变少,2021 年起,通过转变思路,加强沉积储层源-汇分析,转向惠陆低凸起寻找突破。传统地质认识认为惠陆低凸起为“小源对小汇”,湖盆演化背景下物源不稳定,较难发育规模砂体。通过恢复原型盆地、重塑古地貌格局,揭示陆丰 13-8 井区为多物源联合供砂,指导文昌组获规模油气发现,展现出小型源-汇体系的规模勘探潜力。

通过创新“转换带源-汇控砂、洼间脊汇聚控藏”认识,打破了洼陷长轴油气运聚不利的思维束缚,成功指导陆丰 15-5 构造在文昌组取得规模性勘探突破。压裂后陆丰 15-5 构造主力油层的原油日产量提升了 12.8 倍,首次实现海上原油探井压裂商业产能突破,揭示转换带扇三角洲沉积体系的勘探前景广阔(图 7)。

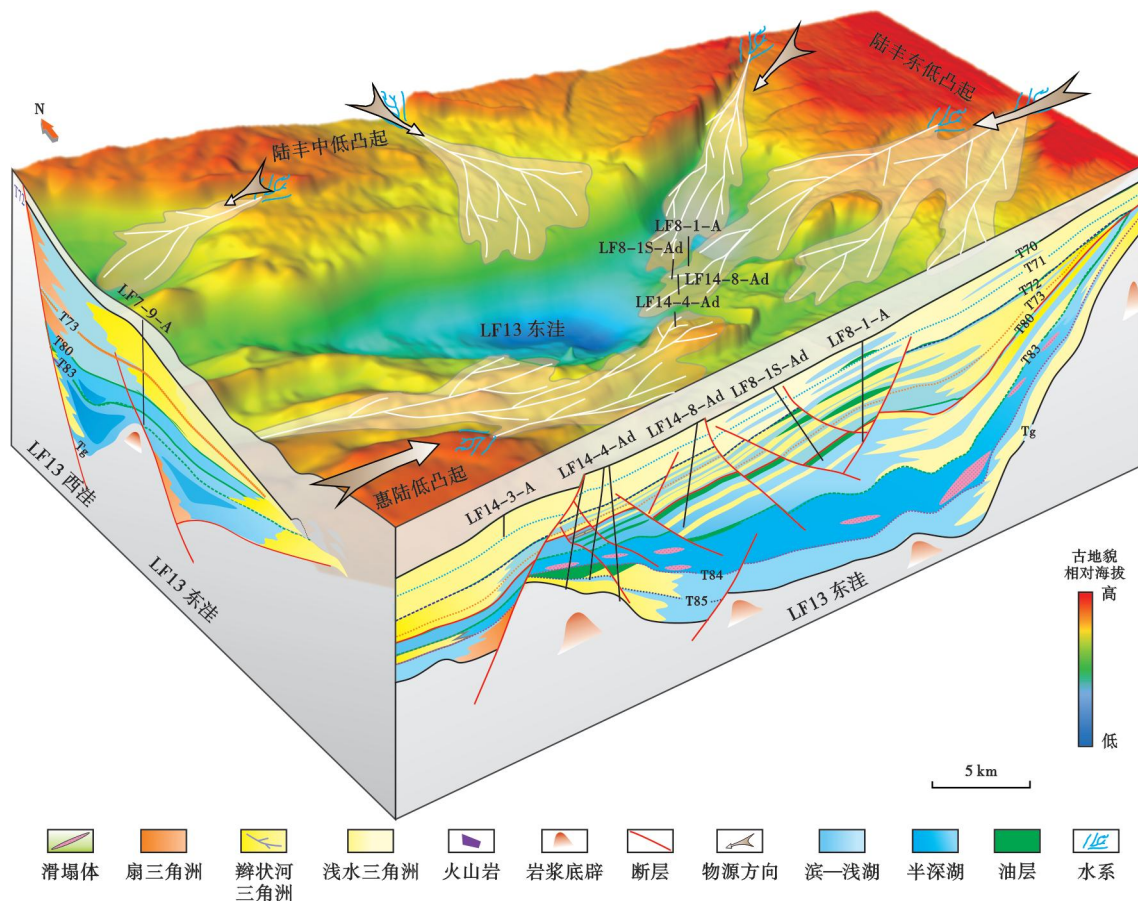


图 7 陆丰地区古近系成藏模式

Fig. 7 Palaeogene hydrocarbon accumulation model in Lufeng area

一系列古近系油气地质认识的创新,助力陆丰凹陷发现6个古近系油田(含潜在油田),包括2个中型油田,逐渐建成陆丰南古近系高产能油田群。

### 3.1.3 建立陡坡带扇三角洲—辫状河三角洲沉积体系勘探技术系列,获得惠西南古近系亿吨级油田群发现

惠州凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷东侧,多年来凹陷古近系勘探“见油不见产”。惠西南陡坡带文昌组埋深普遍较大,规模优质储集体的沉积类型、发育机理、主控因素不清,且恩平组含砂率高,断层圈闭有效性存疑。同时由于古近系勘探主要围绕扇三角洲—辫状河三角洲沉积体系,朵叶体的发育背景及叠置关系复杂,导致砂层组级别的沉积微相刻画难度大,且储层物性差异大。

通过加强构造、沉积的综合分析,认识到喜马拉雅期惠州凹陷西南部的先存构造体系差异活化,形成惠州26墙角式转换带背景下的大型源-沟-扇体系,沉积物历经长距离搬运、多级改造,控制古近系大型扇三角洲储集体发育,高能古隆区强水动力长期充分淘洗改造下伏沉积物形成储层甜点。2020年在惠州凹陷古

近系砂砾岩扇体获得中高产、规模商业发现——惠州26-6油田,首次实现南海东部古近系砂砾岩体勘探突破<sup>[30-31]</sup>。

钻井揭示惠州27地区古近系发育大型扇三角洲—辫状河三角洲沉积体系,针对恩平组富砂背景下的规模富集区块分布这一关键问题,创新提出惠州27-5岩浆改造型增压转换带控圈控藏模式和反向调节带源-断-脊控制油气差异富集规律,并形成高含砂率背景下恩平组油藏综合评价技术,打破了恩平组富砂背景下断层圈闭无法规模成藏的传统认识。2022年首次在惠州凹陷恩平组获得规模性商业突破,产油量近400 t/d,打破了凹陷恩平组此前的测试产能记录。

综合微古地貌、地震相、岩相和测井相,刻画了恩平组砂层组沉积微相,明确了扇三角洲—辫状河三角洲边界及优质相带发育区,认识到墙角式转换带控汇,低坡度区发育大型扇三角洲,断裂差异活动控砂,弱活动段砂体展布范围广,沉积微相差异控储,主分流河道储层物性较好,初步建立了针对扇三角洲沉积体系的勘探技术系列,进一步夯实了惠州26洼陡坡带亿吨级油田群的储量规模(图8)。

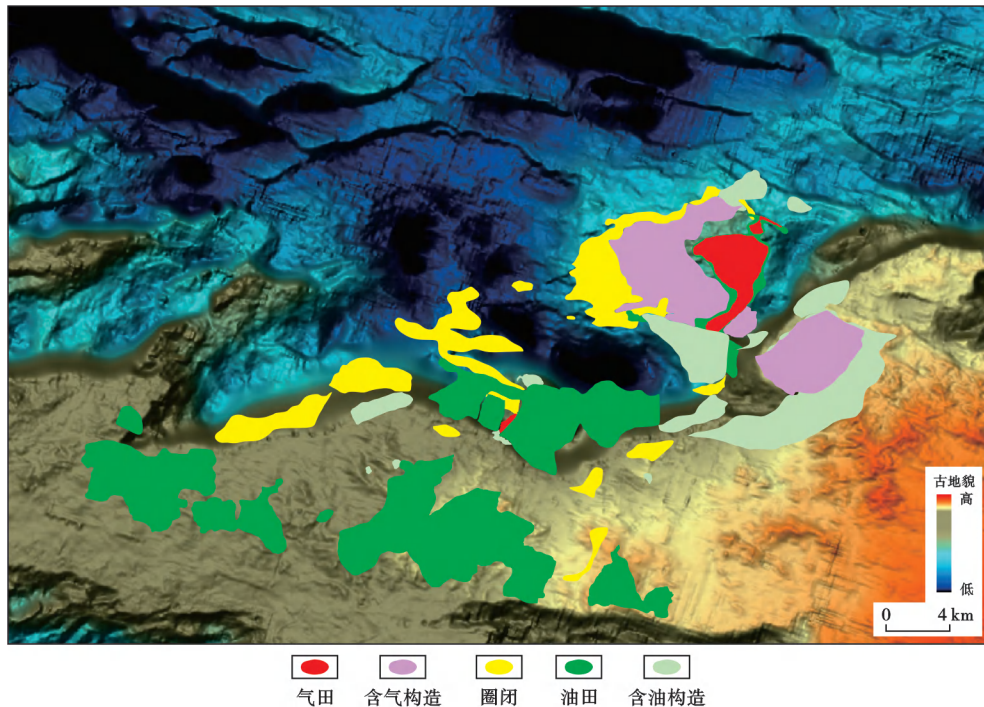


图8 惠州26-6陡坡带周围地貌叠合含油气面积

Fig. 8 Superimposed oil and gas-bearing area of the surrounding landform of Huizhou 26-6 steep slope belt

### 3.1.4 深化富砂层系储-盖组合及成藏研究,推动番禺4洼恩平组取得大中型油气田勘探发现

番禺4洼是位于珠江口盆地珠一坳陷西江凹陷南部的富烃洼陷,已探明地质储量近 $2 \times 10^8$  t。早期以勘探浅

层大型背斜圈闭为主,发现了番禺4-2、番禺5-1等油田<sup>[32]</sup>。随着浅层剩余圈闭规模逐渐变小,开始探索深层古近系,但难点在于珠海组、恩平组含砂率高,缺乏区域盖层,有利储层、盖层的空间展布预测难度大,断层圈闭有效性评

价难度大,且埋深较大的文昌组储层物性较差<sup>[33]</sup>。

2021 年以来,针对恩平组高含砂率的特点,加强区域基础规律研究,创新动态源-汇分析认识,寻找优势储-盖组合,攻关断裂控藏,优选富集区块,基于“源-断-盖”联合控藏认识,建立了基于古地貌恢复源-汇系统的定量分析技术,创立了基于多相耦合的优质储-盖组合精细预测技术,创新建立了恩平组富砂层系“古构造-沉积-气候三要素耦合联控、早泥(岩)晚钙(质砂岩)双盖层接续发育”的地质模式,提出层序格架控制下的湖泛泥岩和钙质砂岩具有良好封盖能力。基于古地貌恢复源-汇系统分析技术,精细解剖番禺 4 注古近系沉积相,明确西南次洼发育较大规模的辫状河三角洲前缘沉积(图 9),其含砂率适中,发育有利的储-盖

组合,打破了珠海组、恩平组含砂率高,储、盖条件差,油气不能大规模成藏的传统地质认识。基于番禺 4 注结构演化对半深湖—深湖亚相烃源岩控制作用的再认识,改变了西南部各次洼相互独立的传统认识,明确了半深湖亚相的展布范围,优选优质烃源岩展布面积增大近 30 km<sup>2</sup>。研究认为张扭性断裂体系增压区有利于断层封堵,富砂层系的断层圈闭也可封堵成藏,打破了富砂背景下断层圈闭断裂封堵性差、只能自圈成藏的认识局限。

2023 年首次在番禺 4 注恩平组获得规模性商业突破,创新地质认识推动番禺 10-6 构造甩开勘探,恩平组主力油层的测试产油量超 500 t/d,打破了此前南海东部古近系的测试纪录。

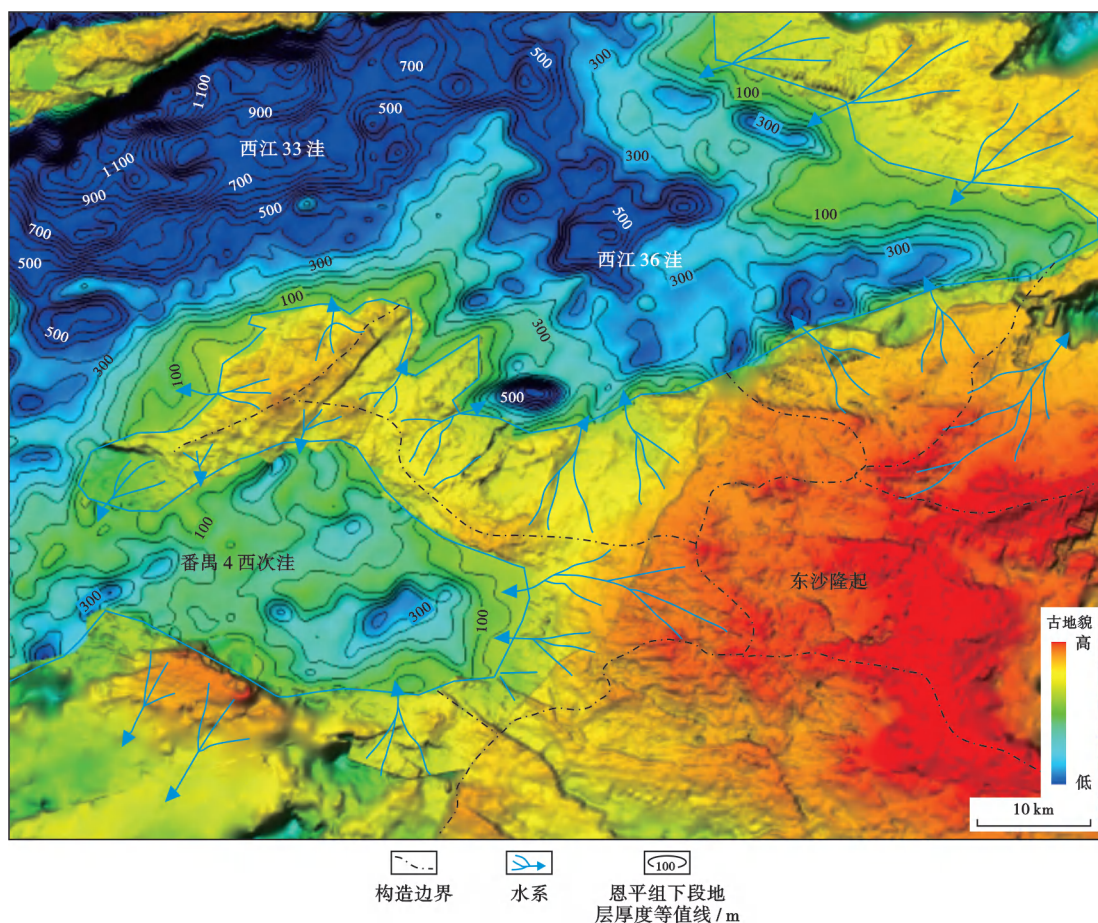


图 9 番禺 4 注恩平组沉积早期源-汇体系及古地貌

Fig. 9 Source-sink system and paleogeomorphology of early depositional period of Enping Formation in Panyu 4 sag

### 3.2 珠江口盆地富烃洼陷古潜山勘探发现

1980—2018 年,南海东部古潜山始终未取得勘探突破,仅获得零星发现,“年轻潜山”的成储、成藏条件屡遭质疑,普遍认为珠江口盆地古潜山暴露与风化的时间短,难以形成优质储层,不具备较大的勘探潜力,且缺乏针对古潜山有效储层的地球物理识别预测技术。

2019 年以来,针对中生代—新生代多期构造作用控制下古潜山成储条件不清的问题,加强区域基底构造演化背景研究,认为惠西南地区位于古太平洋板片俯冲控制的陆缘岩浆弧位置,多期岩浆活动在空间上交织,表现为复合火山岩-深成侵入岩的岩性组合,且经历了强烈的剥蚀作用,深成岩与变质岩出露地表,建

立了惠州 26-6 古潜山中生代陆缘岩浆弧成岩-成山-成储模式(图 10)。通过梳理已钻井的基底特征,厘清潜山成山控储条件,评价古潜山有利储层发育区,建立了“断-岩-溶”联控古潜山优质储层发育机制。

针对古潜山成藏主控因素及成藏规律不明的问题,加强烃源岩及成藏条件综合分析,建立了惠州 26 洼“湖相优质烃源岩油气兼生、晚期高效生气、宽窗强供、复合封盖”的成藏模式<sup>[34]</sup>。优选具有富洼近源、油气共存、浅埋优相、断溶联控成藏优势的惠州 26-6 古潜山为潜力勘探目标。惠州 26 洼高成熟烃源岩与长达 3 km 的供烃窗持续对接,油气可以沿着惠州 26-6 古潜山的裂缝体系和油源断裂呈立体网状复式输导,进一步建立了惠州 26-6 古潜山中生代陆缘岩浆弧成

岩-成山-成储-成藏模式。

针对古潜山有效储层地球物理识别预测难度大的技术挑战,创新双方位地震资料多维度小微断裂预测技术,基于岩石物理模型构建风化裂缝带“甜点因子”,形成一套潜山双重介质储层定量表征技术系列。首次基于数字岩心不同尺度扫描和元素测井建立了孔隙度计算模型,探索形成一套多尺度联合火成岩孔隙度评价技术系列。

在古潜山新地质认识和地球物理技术系列的指导下,推动发现了惠州 26-6 大中型凝析油气田,油气层厚度超 600 m,测试产油量近 300 t/d<sup>[35]</sup>,首次在南海东部实现了古潜山规模商业发现,开辟了古潜山勘探新阵地。

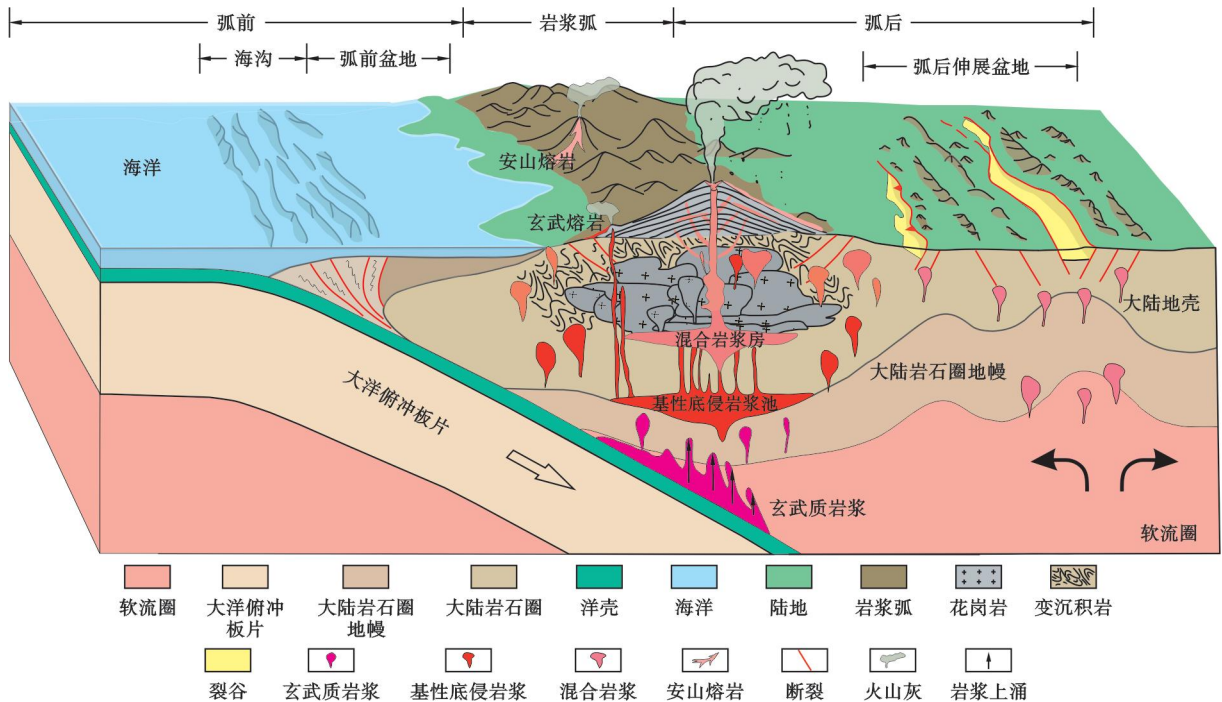


图 10 中生代陆缘岩浆弧成岩-成山-成储模式(据文献[36])

Fig. 10 Model of Mesozoic continental margin magmatic arc rock forming, mountain forming and reservoir forming

### 3.3 珠江口盆地小型浅洼陷勘探发现

前人研究揭示珠江口盆地发育多组 NE 向、NW 向、和近 EW 向的继承性深大断裂,其中,NW 向阳江—统暗沙隐伏走滑断裂带是南海北部珠江口盆地极其重要的中生代—新生代构造带和转换带<sup>[37]</sup>,断裂带上部发育一系列埋深浅的小型洼陷,包括恩平 20 洼、番禺 25 洼、开平东洼、白云南洼等,按照典型伸展型断陷的油气成藏标准,这些小型洼陷的资源潜力非常有限。

勘探实践表明,阳江—统暗沙隐伏走滑断裂对洼陷的成盆成烃具有控制作用,主要体现在以下 4 个方面:①在主成洼期多期伸展-走滑作用联合控洼、叠合控源,洼陷内部易沉积厚层状优质烃源岩;②走滑断裂强化裂陷

作用,使裂陷中心、沉降中心、沉积中心在限定范围内叠合,形成稳定的半深湖沉积环境;③深大隐伏走滑断裂使基底破碎,形成洼隆相间的格局,多个沉砂池阻隔物源,洼陷内易形成欠补偿环境;④深大断裂是沟通深部岩浆向浅部侵入或喷发的重要通道,岩浆活化一方面使沉积水体富营养化,促进藻类勃发,另一方面可降低生、排烃门限,促进洼陷烃源岩生、排烃。基于该认识,有必要关注珠江口盆地隐伏走滑断裂带的相关洼陷,重新分析其成盆成烃机制,重新判断其生烃能力与勘探潜力。

3.3.1 创新提出阳江东凹强伸展-弱走滑控盆控烃新机制,推动阳江东—恩平北油田群的重大发现  
阳江东凹位于珠江口盆地珠一坳陷西侧、阳江—

一统走滑断裂带北部,水深为 80~100 m。2018 年以前,勘探仅获得油气显示和少量油气层。凹陷文昌组厚度小、埋深浅,普遍认为其生烃能力有限,因此,凹陷不具备勘探价值。同时阳江东凹发育多组断裂体系,断裂活动期次及强度各异,断裂控圈、控运与控藏的机理不清,制约了有利区带和有利目标的分布预测。

通过开展成盆、成烃与成藏研究,加强洼陷结构及演化、烃源岩生烃潜力与优选、控藏要素与目标优选等方面的研究,首次提出阳江—一统走滑断裂影响下的阳江东凹成盆模式。阳江东凹位于 NW 向阳江—一统走滑断裂带上,文昌组沉积期,该区先存的 NW 向、NEE 向断裂选择性活化,早期强伸展叠加后期两幕走滑拉分控制成盆(图 11)。文昌组二段沉积期,太平洋板块由 NW 向俯冲转变为 NW 向俯冲,导致右行剪切分量,NE 向右行右阶走滑断裂拉分成盆;同时,NW 向阳江—一统断裂带开始活化,限定形成了恩平 20 洼、恩平 21 洼沉积中心。文昌组一段沉积期,印澳板块与欧亚板块

碰撞在该区形成区域左行剪切分量,NW 向阳江—一统走滑断裂左行左阶走滑拉分成盆,沉积中心位于恩平 19 洼、恩平 20 洼。创新提出内源型富烃洼陷的烃源岩发育机制,认为恩平 20 洼、恩平 21 洼以盆内物源为主,欠补偿环境下多层序优质烃源岩叠合发育。文昌组沉积期,阳江东凹历经了早期(文昌组三段沉积期)强伸展叠加后期(文昌组二段—一段沉积期)两幕走滑拉分,恩平 20 洼均为裂隙中心、沉降中心和沉积中心。深大断裂岩浆活化使沉积水体富营养化,促进藻类勃发,可降低生、排烃门限,促进恩平 20 洼、恩平 21 洼生、排烃。建立了上下贯通、下输上堵的“张-扭联动式”控藏机理<sup>[38-39]</sup>,认为断裂在深层呈 NEE—EW 向,以张性输导为主,在中浅层呈 NW 向,以张扭封堵为主,源断耦合、差异控藏。研究认识一举突破了“浅小的阳江凹陷不具备继续勘探价值”的观点和“小洼寡烃”的传统认识,并指导在阳江新洼获得勘探重大突破,发现恩平 20-4、恩平 20-5、恩平 20-7 等 5 个油田<sup>[40-42]</sup>。

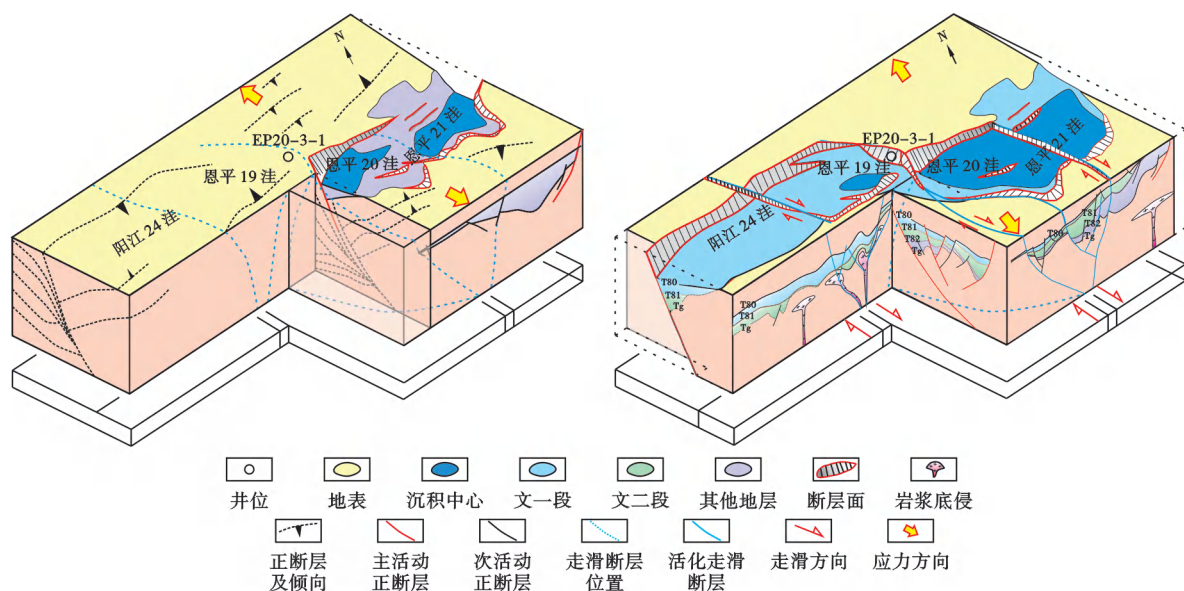


图 11 阳江东凹文昌组沉积期伸展-走滑联控成洼模式

Fig. 11 Extension-strike-slip joint-controlled depression model during the deposition period of Wenchang Formation in Yangjiang East sag

### 3.3.2 创新提出开平凹陷“拆离-变质核杂岩”型成盆机制,开平凹陷南带有望形成亿吨级油田群

开平凹陷为珠江口盆地珠二坳陷西侧的一个边缘凹陷,位于阳江—一统走滑断裂带南侧,构造极为复杂,水深在 200~600 m。凹陷油气勘探始于 1980 年,早期围绕大型构造圈闭勘探相继失利,始终见油不见(油)田,开平凹陷的生烃能力与勘探潜力一度遭到质疑<sup>[43]</sup>。

2020 年以来,逐渐认识到开平凹陷油气勘探的关键问题在于洼陷结构与烃源岩,并最终实现重要的认识转变。对开平凹陷洼陷结构的认识从早期的南断北

超型简单半地堑,转变为北断南超、受变质核杂岩强烈改造的低角度拆离型盆地(图 12)。对烃源岩的认识从早期认为开平凹陷文昌组二段、五段均发育半深湖—深湖亚相烃源岩,转变为烃源岩主要分布在文昌组三段、四段。创新提出南海拆离型盆地“拆离控盆-早洼晚坡-高温增热”的耦合强生烃机制,开平凹陷资源潜力大幅提升了近 2 倍。深化“源-断-盖”耦合控制富集成藏认识,源、储分析勘探方向由早期的北部洼中隆起带转向南部斜坡带。

2021—2022 年,落实开平 11-4 构造的探明地质储量,证实了开平凹陷的勘探潜力<sup>[44]</sup>。2023 年,加大

南向甩开勘探的力度,钻遇文昌组高有机质丰度湖相泥岩,有效烃源岩的展布范围不断南扩,发现开平 18-1 中型油气田,其主力油层恩平组的产油量超 1 000 t/d,

产气量超  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,打破了此前中国近海海域的古近系测试纪录,开平南带(包括开平 11-4 和开平 18-1 井区)有望形成亿吨级油田群。

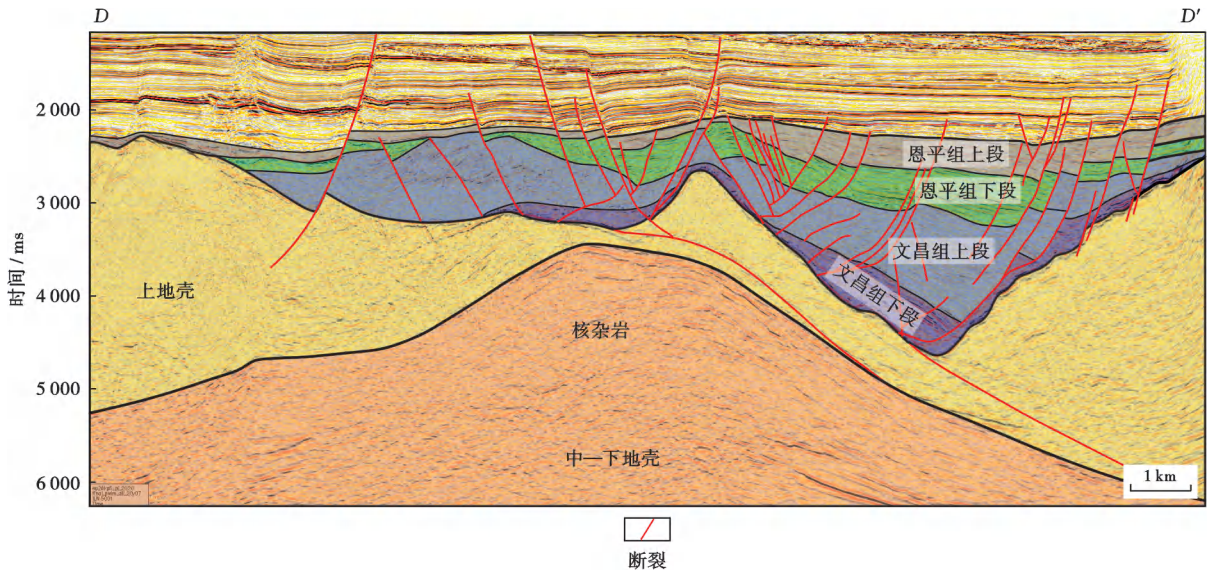


图 12 开平凹陷洼陷结构剖面示意(剖面位置见图 1)  
Fig. 12 Schematic of structural section of Kaiping sag

### 4 剩余资源潜力与勘探方向

油气资源评价是确定油气勘探方向、制定勘探规划部署方案的重要基础,是一项长期性、基础研究工作<sup>[45]</sup>。“十三五”(2015—2020 年)以来,随着勘探投入不断增加、理论认识不断提高和方法技术不断进步,为了及时反映盆地油气资源潜力变化,为油气资源发展战略和政策制定提供依据,中海石油(中国)有限公司深圳分公司开展了珠江口盆地新一轮油气资源评价工作。

#### 4.1 盆地资源潜力评价

在逐渐深化珠江口盆地构造演化和石油地质特征的基础上,研究关键评价参数取值,开展含油气系统研究,进行资源量计算,开展合理性、经济性以及分类分级等分析,指出未来发展前景,分凹陷、区带、层系和分品质客观评价珠江口盆地的油气资源潜力,明确珠江口盆地未来重点勘探方向(图 13)。

常用的油气资源评价方法包括成因法、统计法、类比法和特尔斐法。针对不同凹/洼陷、不同地区的油气勘探程度差异及资料掌握程度,应选择合适的方法进行评价<sup>[46-50]</sup>。评价的资源量包括总资源量和潜在资源量。其中,总资源量即地质资源量,是综合地质、地球物理与分析化验等资料,选择针对性评价方法得到的原始储藏油气量,主要通过成因法中的盆地模拟法计算得到,评价单元为凹/洼陷。潜在资源量是指针对有

利圈闭或油气田的邻近区块或层系,根据石油地质条件进行分析和类比,基于统计法中的圈闭法估算得到的油气量,评价单元为区带。

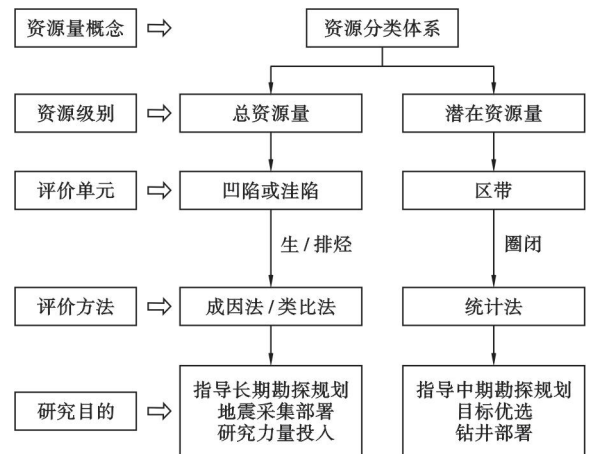


图 13 资源评价主要工作思路  
Fig. 13 Main working ideas of resource evaluation

关键参数的选取对资源评价结果具有重要影响。成因法的关键参数包括烃源岩的含量、有机质丰度、有机质类型、生烃动力学参数、热演化史参数和聚集系数等。创新应用地质统计与地球物理反演相结合,揭示了珠江口盆地三级层序格架下烃源岩的含量与展布以及有机质的丰度与类型。首次建立了珠江口盆地变地温场背景温度与 R。双重约束下的烃源岩热演化史。同时,基于有限空间—温压双控—近地质水介质的半

封闭半开放体系中烃源岩生、排烃物理模拟实验及产烃率图版,建立了珠江口盆地 4 类烃源岩生、排烃动力学模型。聚集系数主要基于成熟探区通过油藏规模序列法和盆地模拟法来综合分析获得<sup>[51]</sup>。圈闭法关键参数包括储层厚度、单储系数、充满度和成功率,均通过统计钻井资料来明确取值。低勘探程度区的关键参数取值主要采用类比法获得。

根据盆地浅水区基础地质特征及油气成藏地质规律,确定了盆地浅水区常规油气资源评价范围;综合考虑评价区内部构造、沉积体系、压力场、地层水特征和原油成因类型及其分布、油气运移等因素,基于盆地构造单元划分,将浅水区各洼陷文昌组边界确定为总资源量评价单元的闭合边界。将珠江口盆地浅水区划分

为 47 个评价单元,落实浅水区剩余资源量近  $70 \times 10^8$  t 油当量,剩余资源潜力大。

## 4.2 盆地有利勘探方向

### 4.2.1 富烃洼陷古近系、古潜山资源分布与有利勘探方向

珠江口盆地富烃洼陷是保障储量稳定的物质基础,近 10 年其新增探明储量占全盆地的 80% 以上,是盆地主要原油增储领域和寻找大中型油气田的重要方向。综合分析各洼陷的资源规模、探明储量等地质资料,在珠江口盆地浅水区共划分出 8 个富烃洼陷,自西向东依次为文昌 B 凹陷、文昌 A 凹陷、恩平 17 洼、番禺 4 洼、西江 24 洼、西江 30 洼、惠州 26 洼和陆丰 13 洼(图 14)。

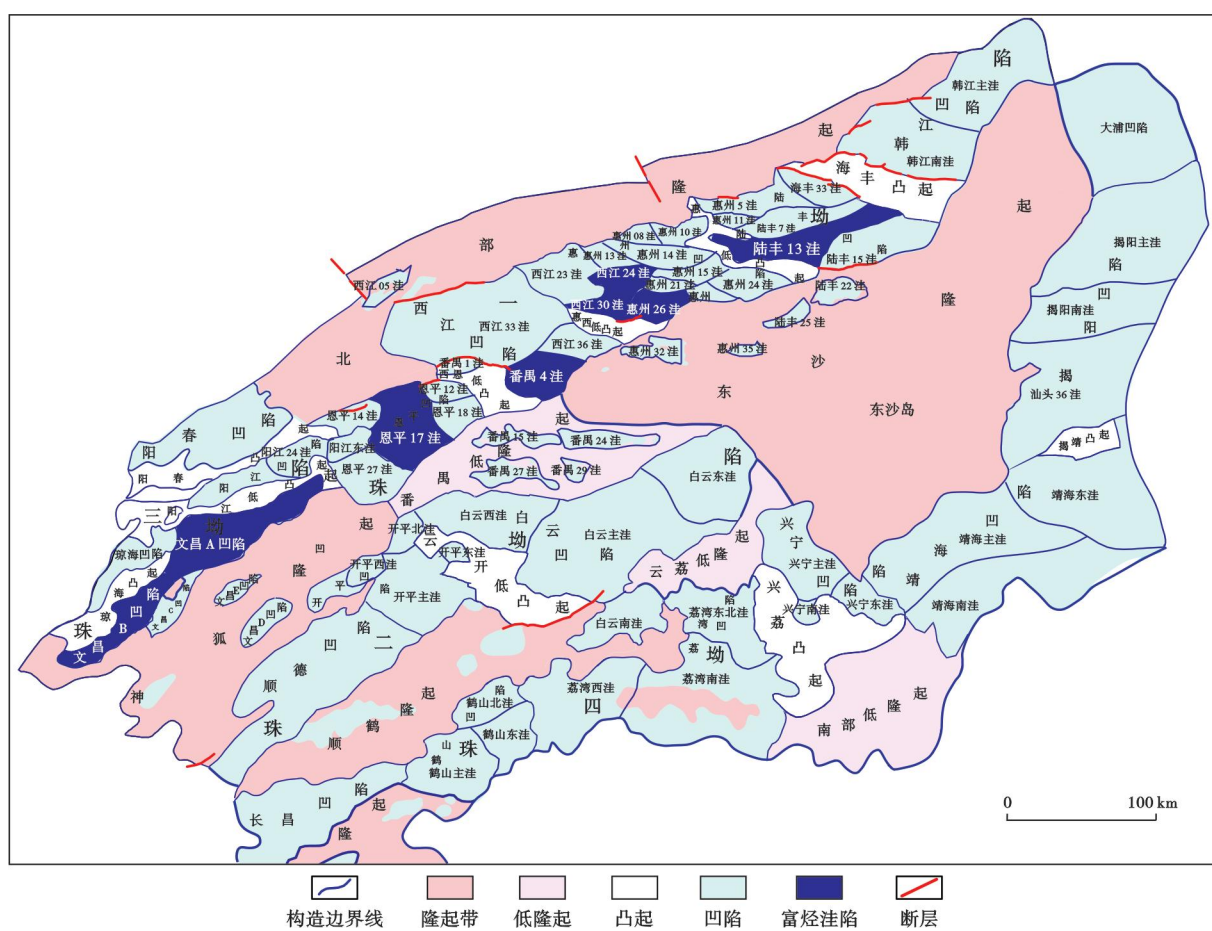


图 14 珠江口盆地浅水区富烃洼陷展布

Fig. 14 Distribution of hydrocarbon-rich sag in shallow water area of Pearl River Mouth Basin

资源评价结果显示,珠江口盆地浅水区富烃洼陷的油气总资源量近  $32 \times 10^8$  t 油当量,以石油资源为主(占比约为 90%)。其中,古近系、古潜山领域的总资源量近  $14 \times 10^8$  t 油当量,石油资源量占比近 85%。平面上,石油资源主要分布在惠州 26 洼、陆丰 13 洼和番禺 4 洼等地区,天然气资源主要分布在惠州 26 洼、文昌 A 凹陷、恩平 17 洼等地区(图 15)。

### 4.2.2 小型浅洼陷资源分布与有利勘探方向

珠江口盆地洼陷众多,前期勘探主要集中在富烃洼陷,浅水区新洼陷的勘探程度低,勘探领域广阔,是寻找大中型油气田的重要接替领域。基于近年来的研究认识与勘探成效,通过类比分析,预测了珠江口盆地浅水区新洼陷的资源量,并结合基础地质分析,指出浅水区原油领域新洼陷的近期勘探方向。

盆地模拟结果表明,珠江口盆地浅水区新洼陷的油气总资源量约为  $30 \times 10^8 \text{t}$  油当量,石油资源占比达 95%。平面上,阳江—统暗沙断裂带、惠陆地区的周缘新洼陷的原油资源最为丰富,资源量达  $25 \times 10^8 \text{t}$ ,占

全盆地新洼陷资源量的 80% 以上,且存在多个低勘探程度的新洼,结合石油地质条件、成藏演化及主控因素,提出陆丰 13 西北洼、开平东洼、西江 23 洼等新洼陷为近期新洼陷勘探的方向(图 16)。

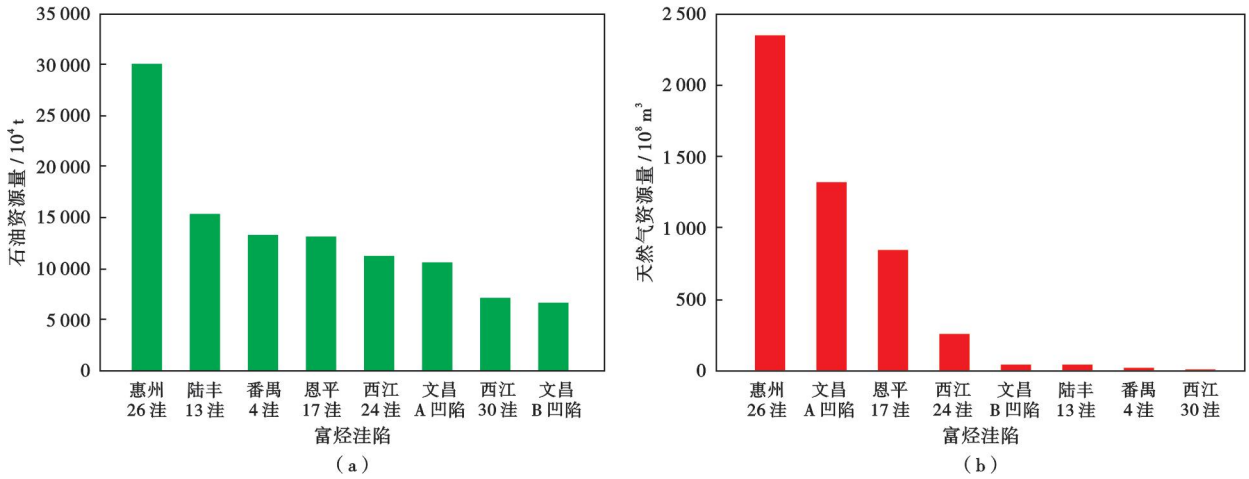


图 15 珠江口盆地浅水区富烃洼陷古近系、古潜山油气资源分布

Fig. 15 Hydrocarbon resources distribution of Paleogene and buried hill reservoirs in hydrocarbon-rich sags in shallow water area of Pearl River Mouth Basin

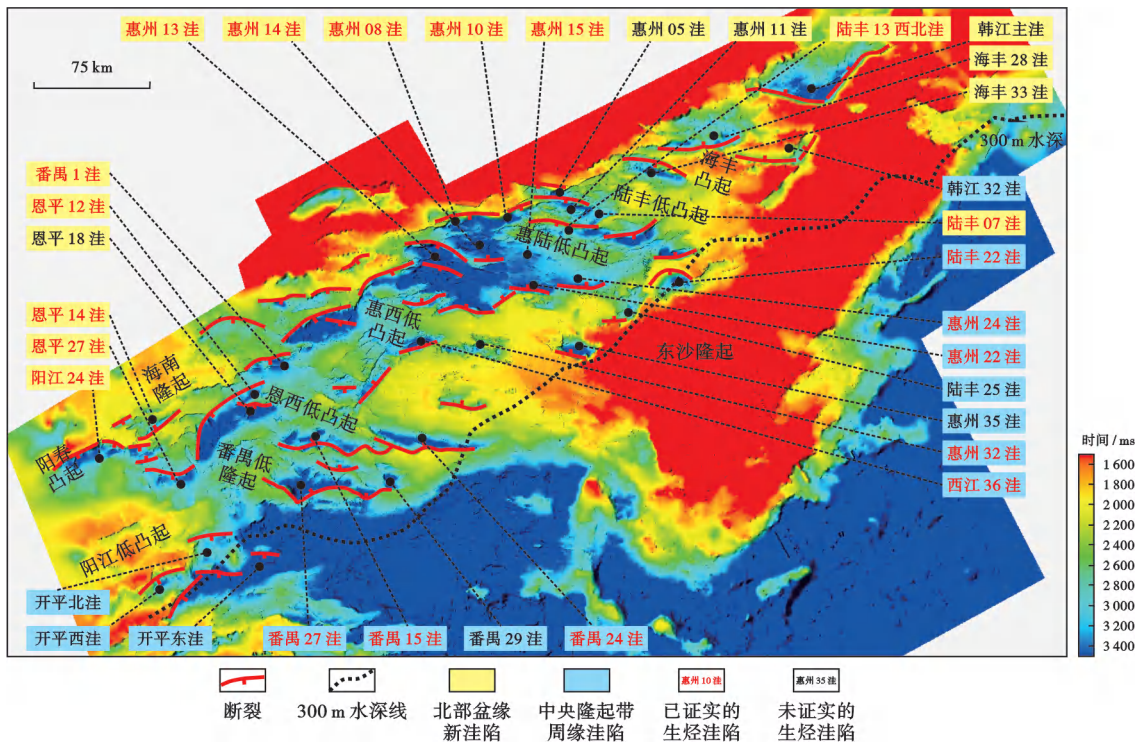


图 16 珠江口盆地浅水区新洼陷分布(以盆地东部为例)

Fig. 16 Distribution of new subsag in shallow water area of Pearl River Mouth Basin

## 5 结论

(1) 珠江口盆地油气资源丰富,尚处于勘探早—中期,盆地油气剩余勘探潜力巨大。近年来,珠江口盆

地在富烃洼陷古近系取得重大勘探进展。通过加强断裂转换带控藏作用精细研究,指导文昌 A 凹油气勘探实现规模突破;通过创新“早断输导、小型源-汇体系及转换带控砂,洼间隆控藏”认识,指导发现了陆丰南古近



系高产能油田群;建立扇三角洲—辫状河三角洲沉积体系勘探技术系列,推动了惠西南古近系陡坡带亿吨级油田群的发现;深化富砂层系储-盖组合及成藏研究,助力番禺 4 洼恩平组取得大中型油气田的勘探发现。

(2) 近年来,珠江口盆地在富烃洼陷古潜山领域取得重大勘探进展。创新建立中生代陆缘岩浆弧成岩-成山-成储-成藏模式,基于“断-岩-溶”联控潜山优质储层发育机制和湖相优质烃源岩油气兼生、晚期高效生气、宽窗强供、复合封盖成藏模式等新认识,首次在南海东部实现古潜山规模商业发现,开辟了古潜山勘探新阵地。

(3) 近年来,珠江口盆地在新洼陷领域取得重大勘探进展。阳江—一统暗沙隐伏走滑断裂带对洼陷成盆成烃具有控制作用。创新提出阳江东凹强伸展-弱走滑控盆控烃新机制,推动了阳江东—恩平北油田群的重大发现;创新提出开平凹陷“拆离-变质核杂岩”型成盆机制,开平南带有望形成亿吨级油田群。

(4) 资源评价结果显示,珠江口盆地浅水区富烃洼陷的油气总资源量近  $32 \times 10^8$  t 油当量,其中,古近系、古潜山总资源量近  $14 \times 10^8$  t 油当量,主要分布在惠州 26 洼、文昌 A 凹等地区;新洼陷油气总资源量约为  $30 \times 10^8$  t 油当量,石油资源占比达 95%,以阳江—一统暗沙断裂带周缘及惠陆地区周缘的新洼陷原油资源最为丰富。

### 参 考 文 献

- [1] 郑金云,高阳东,张向涛,等. 珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁[J]. 地球科学,2022,47(7):2374-2390.  
ZHENG Jinyun,GAO Yangdong,ZHANG Xiangtao, et al. Tectonic evolution cycles and Cenozoic sedimentary environment changes in Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science,2022,47(7):2374-2390.
- [2] 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 Hanzong, 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.
- [3] 张素芳,张向涛,张青林,等. 南海北部白垩系发育特征及构造意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2015,35(6):81-86.  
ZHANG Sufang,ZHANG Xiangtao,ZHANG Qinglin, et al. Characteristics of the Cretaceous in the northern South China Sea and tectonic implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2015,35(6):81-86.
- [4] 王梓颐,李洪博,郑金云,等. 珠江口盆地番禺 27 洼裂陷期构造演化及其对源-汇系统的控制[J]. 石油与天然气地质,2023,44(3):626-636.  
WANG Ziyi,LI Hongbo,ZHENG Jinyun, et al. Structural evolution and its control on source-to-sink system of Panyu 27 sag in Pearl River Mouth Basin during rifting[J]. Oil & Gas Geology,2023,44(3):626-636.
- [5] 舒誉,施和生,杜家元,等. 珠一坳陷古近系油气成藏特征及勘探方向[J]. 中国海上油气,2014,26(3):37-42.  
SHU Yu,SHI Hesheng,DU Jiayuan, et al. Paleogene characteristics in hydrocarbon accumulation and exploration direction in Zhu I depression[J]. China Offshore Oil and Gas,2014,26(3):37-42.
- [6] 李平鲁. 珠江口盆地新生代构造运动[J]. 中国海上油气(地质),1993,7(6):11-17.  
LI Pinglu. Cenozoic tectonic movement in the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology),1993,7(6):11-17.
- [7] 钟志洪,施和生,朱明,等. 珠江口盆地构造-地层格架及成因机制探讨[J]. 中国海上油气,2014,26(5):20-29.  
ZHONG Zhihong,SHI Hesheng,ZHU Ming, et al. A discussion on the tectonic-stratigraphic framework and its origin mechanism in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas,2014,26(5):20-29.
- [8] 任建业,庞雄,雷超,等. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示[J]. 地学前缘,2015,22(1):102-114.  
REN Jianye,PANG Xiong,LEI Chao, et al. Ocean and continent transition in passive continental margins and analysis of lithospheric extension and breakup process: implication for research of the deepwater basins in the continental margins of South China Sea[J]. Earth Science Frontiers,2015,22(1):120-114.
- [9] 米立军,张向涛,庞雄,等. 珠江口盆地形成机制与油气地质[J]. 石油学报,2019,40(S1):1-10.  
MI Lijun,ZHANG Xiangtao,PANG Xiong, et al. Formation mechanism and petroleum geology of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(S1):1-10.
- [10] 庞雄,郑金云,梅廉夫,等. 先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘陷特征及成因[J]. 石油勘探与开发,2021,48(5):1069-1080.  
PANG Xiong,ZHENG Jinyun,MEI Lianfu, et al. Characteristics and origin of continental marginal fault depressions under the background of preexisting subduction continental margin, northern South China Sea, China[J]. Petroleum Exploration and Development,2021,48(5):1069-1080.
- [11] 施和生,舒誉,杜家元,等. 珠江口盆地古近系石油地质[M]. 北京:地质出版社,2017.  
SHI Hesheng,SHU Yu,DU Jiayuan, et al. Petroleum geology of Paleogene in Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House,2017.
- [12] 中国海洋石油总公司. 海上凹陷生烃潜力评价规范: Q/HS 1068—2015[S]. 北京:中国海洋石油总公司,2015.  
China National Offshore Oil Corporation. The specification of hydrocarbon generation potential of depressions in offshore: Q/HS 1068-2015[S]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation,2015.
- [13] 胡圣标,龙祖烈,朱俊章,等. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. 石油学报,2019,40(S1):178-187.  
HU Shengbiao, LONG Zulie, ZHU Junzhang, et al. Characteristics of geothermal field and the tectonic-thermal evolution in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(S1):178-187.
- [14] LIU Entao, DENG Yong, LIN Xudong, et al. Cenozoic depositional evolution and stratal patterns in the western Pearl River Mouth Basin, South China Sea; implications for hydrocarbon exploration[J]. Energies,2022,15(21):8050.
- [15] 雷永昌,赵鹏,肖张波,等. 珠江口盆地陆丰凹陷陆丰 15 洼与 22 洼古近系文昌组源-汇系统与沉积演化[J]. 世界地质,2023,42(3):501-515.

- LEI Yongchang, ZHAO Peng, XIAO Zhangbo, et al. Source to sink system and sedimentary evolution of Paleogene Wenchang Formation in Lufeng 15 and 22 sags, Lufeng depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *World Geology*, 2023, 42(3): 501-515.
- [16] 卫哲, 李小平, 易浩, 等. 珠江口盆地东沙隆起混合沉积特征及勘探潜力[J]. *复杂油气藏*, 2022, 15(3): 37-43.
- WEI Zhe, LI Xiaoping, YI Hao, et al. Mixed sedimentary characteristics and exploration potential of Dongsha uplift in Pearl River Mouth Basin[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2022, 15(3): 37-43.
- [17] 张向涛, 史玉玲, 刘杰, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系文昌组优质湖相烃源岩生烃动力学[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1249-1258.
- ZHANG Xiangtao, SHI Yuling, LIU Jie, et al. Kinetics of high-quality lacustrine source rocks of Paleogene Wenchang Formation, Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1249-1258.
- [18] 舒梁锋, 张丽丽, 雷胜兰, 等. 珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲储层发育特征与主控因素及有利储层预测[J]. *石油科学通报*, 2022, 7(3): 309-320.
- SHU Liangfeng, ZHANG Lili, LEI Shenglan, et al. Reservoir sedimentary characteristics and reservoir prediction in the shelf margin delta of the Zhuhai Formation in the southern subsag of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(3): 309-320.
- [19] SUN Panke, JIANG Shiyi, ZHANG Lin, et al. Impacts of Sedimentation and Diagenesis on deeply buried reservoir quality of a rift basin: a case study of Wenchang Formation in the Lufeng depression, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 8625005.
- [20] 陶文芳, 葛家旺, 雷永昌, 等. 转换斜坡型辫状河三角洲沉积特征: 以珠江口盆地惠州凹陷始新统为例[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(5): 103-114.
- TAO Wenfang, GE Jiawang, LEI Yongchang, et al. Depositional characteristics of a relay ramp controlled braided deltaic system: a case study in the Eocene Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(5): 103-114.
- [21] 张月霞, 丁琳, 周凤娟, 等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系砂岩储层渗透率和埋深下限研究[J]. *海相油气地质*, 2023, 28(3): 311-322.
- ZHANG Yuexia, DING Lin, ZHOU Fengjuan, et al. Study on the lower limits of permeability and buried depth of Paleogene sandstone reservoirs in the Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2023, 28(3): 311-322.
- [22] 潘石坚, 刘伟新, 王华, 等. 南海珠江口盆地 Y 油田文昌组五段低渗透储层特征及物性控制因素[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(4): 71-79.
- PAN Shijian, LIU Weixin, WANG Hua, et al. Characteristics and physical property controlling factors of the low permeability reservoir of the 5th Member of Wenchang Formation for the Y oilfield in Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(4): 71-79.
- [23] 廖计华, 吴克强, 耳闻. 珠江口盆地白云凹陷深层储层特征与有效储层控制因素[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2454-2467.
- LIAO Jihua, WU Keqiang, ER Chuang. Deep reservoir characteristics and effective reservoir control factors in Baiyun sag of Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2454-2467.
- [24] 徐长贵, 范彩伟. 南海西部近海大中型油气田勘探新进展与思考[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(2): 13-25.
- XU Changgui, FAN Caiwei. New exploration progress and thinking of offshore large-medium-sized oil and gas fields in the western South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(2): 13-25.
- [25] 范彩伟, 李明, 李才, 等. 珠江口盆地文昌 A 凹陷西南部断裂转换带特征及其控藏作用[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 36-45.
- FAN Caiwei, LI Ming, LI Cai, et al. Characteristics of fault transfer zone in Southwest Wenchang A sag, Pearl River Mouth Basin and its role in hydrocarbon accumulation[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(5): 36-45.
- [26] 陈林, 范彩伟, 刘新宇, 等. 珠江口盆地西部文昌 A 凹陷油气富集规律与有利勘探方向[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(5): 14-23.
- CHEN Lin, FAN Caiwei, LIU Xinyu, et al. Hydrocarbon enrichment laws and favorable exploration directions of Wenchang A sag, western Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(5): 14-23.
- [27] 葛家旺, 朱筱敏, 张向涛, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷文昌组构造-沉积演化模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 308-322.
- GE Jiawang, ZHU Xiaomin, ZHANG Xiangtao, et al. Tectono-sedimentation model of the Eocene Wenchang Formation in the Lufeng depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 308-322.
- [28] 朱筱敏, 葛家旺, 吴陈冰洁, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷深层砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 69-80.
- ZHU Xiaomin, GE Jiawang, WU Chenbingjie, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of deep sandstone in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 69-80.
- [29] 代一丁, 牛子斌, 汪旭东, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素[J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 41-52.
- DAI Yiding, NIU Zicheng, WANG Xudong, et al. Differences of hydrocarbon enrichment regularities and their main controlling factors between Paleogene and Neogene in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 41-52.
- [30] 田立新, 施和生, 刘杰, 等. 珠江口盆地惠州凹陷新领域勘探重大发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(4): 22-30.
- TIAN Lixin, SHI Hesheng, LIU Jie, et al. Great discovery and significance of new frontier exploration in Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Petroleum exploration*, 2020, 25(4): 22-30.
- [31] 刘杰, 徐国盛, 温华华, 等. 珠江口盆地惠州 26-6 构造古潜山-古近系油气成藏主控因素[J]. *天然气工业*, 2021, 41(11): 54-63.
- LIU Jie, XU Guosheng, WEN Huahua, et al. Main factors controlling the Formation of buried hill-Paleogene reservoirs in 26-6 structure of Huizhou, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(11): 54-63.
- [32] 彭光荣, 温华华, 刘从印, 等. 珠江口盆地珠一坳陷浅层油气勘探实践及潜力探讨——以番禺 4 洼为例[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(3): 22-28.
- PENG Guangrong, WEN Huahua, LIU Congyin, et al. Practice of shallow oil and gas exploration in Zhu I depression of the Pearl River Mouth Basin: a case from Panyu4 sag[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(3): 22-28.
- [33] 张丽, 吴静, 蔡国富, 等. 珠江口盆地番禺 4 洼文昌组储层特征及主控因素[J]. *矿物岩石*, 2022, 42(4): 116-127.
- ZHANG Li, WU Jing, CAI Guofu, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of Wenchang Formation in Panyu-4 depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2022, 42(4): 116-127.

- [34] 田立新,刘杰,张向涛,等. 珠江口盆地惠州 26-6 大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J]. 中国海上油气,2020,32(4):1-11. TIAN Lixin, LIU Jie, ZHANG Xiangtao, et al. Discovery and accumulation pattern of HZ26-6 large-medium sized pan-buried hill oil and gas field in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 1-11.
- [35] 施和生,高阳东,刘军,等. 珠江口盆地惠州 26 洼“源-汇-聚”特征与惠州 26-6 大油气田发现启示[J]. 石油与天然气地质,2022,43(4):777-791. SHI Hesheng, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Characteristics of hydrocarbon source-migration-accumulation in Huizhou 26 sag and implications of the major Huizhou 26-6 discovery in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 777-791.
- [36] 高阳东,张向涛,张丽丽,等. 珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景[J]. 地球科学,2022,47(7):2317-2327. GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, ZHANG Lili, et al. Geological characteristics and tectonic settings of Mesozoic continental margin magmatic arc in Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2317-2327.
- [37] 蔡国富,张向涛,彭光荣,等. 南海北部阳江—统暗沙断裂带与新近纪岩浆活动[J]. 大地构造与成矿学,2021,45(1):40-52. CAI Guofu, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Neogene volcanism and tectonics along the Yangjiang-Yitong'an sha fault zone in the northern South China Sea margin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 40-52.
- [38] 占华旺,蔡国富,张志伟,等. 南海北缘古近纪断裂活动规律及控盆特征:以阳江东凹为例[J]. 大地构造与成矿学,2021,45(1):20-39. ZHAN Huawang, CAI Guofu, ZHANG Zhiwei, et al. Paleogene fault activity and Basin controlling characteristics in the northern South China Sea Margin—a case study of the eastern Yangjiang sag[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 20-39.
- [39] 刘欣颖,吴静,朱定伟,等. 珠江口盆地多期走滑构造与叠合型拉分盆地:以阳江东凹为例[J]. 大地构造与成矿学,2021,45(1):6-19. LIU Xinying, WU Jing, ZHU Dingwei, et al. Superimposition of strike-slip faults and pull-apart basins in the Pearl River Mouth Basin: a case study from the eastern Yangjiang sag[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 6-19.
- [40] 彭光荣,张向涛,许新明,等. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识[J]. 中国石油勘探,2019,24(3):267-279. PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, XU Xinming, et al. Important discoveries and understanding of oil and gas exploration in Yangjiang sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 267-279.
- [41] 田立新,张向涛,彭光荣,等. 珠江口盆地阳江凹陷石油地质特征及成藏主控因素[J]. 中国海上油气,2020,32(1):13-22. TIAN Lixin, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Petroleum geological characteristics and main controlling factors of the Yangjiang sag in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(1): 13-22.
- [42] 蔡国富,彭光荣,吴静,等. 珠江口盆地阳江凹陷始新统古湖泊环境与优质烃源岩发育模式[J]. 石油学报,2023,44(5):809-825. CAI Guofu, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Paleolacustrine environment and development pattern of high-quality source rock of Eocene in Yangjiang sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 809-825.
- [43] 杨海长,曾清波,纪沫,等. 珠江口盆地深水开平凹陷拆离型裂陷石油形成条件与勘探方向[J]. 石油学报,2023,44(6):933-947. YANG Haizhang, ZENG Qingbo, JI Mo, et al. Accumulation conditions and exploration direction of crude oil in detachment rift of Kaiping sag in deep water area of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 933-947.
- [44] 高阳东,彭光荣,陈兆明,等. 珠江口盆地开平凹陷深水古近系勘探重大发现及意义[J]. 石油学报,2023,44(7):1029-1040. GAO Yangdong, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, et al. Breakthrough and significance of deep-water Paleogene exploration in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1029-1040.
- [45] 田作基,吴义平,王兆明,等. 全球常规油气资源评价及潜力分析[J]. 地学前缘,2014,21(3):10-17. TIAN Zuoji, WU Yiping, WANG Zhaoming, et al. Global conventional oil and gas resource assessment and its potential[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 10-17.
- [46] 张林晔,李政,孔祥星,等. 成熟探区油气资源评价方法研究——以渤海湾盆地牛庄洼陷为例[J]. 天然气地球科学,2014,25(4):477-489. ZHANG Linye, LI Zheng, KONG Yangxing, et al. Study on evaluation method of petroleum resources in mature exploration area: taking Niuzhuang sag of Bohaiwan Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(4): 477-489.
- [47] 张宽. 中国近海油气资源评价述评及评价方法探讨[J]. 中国海上油气(地质),2001,15(4):229-235. ZHANG Kuan. A review of China offshore petroleum resources assessment and discussion on methods[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001, 15(4): 229-235.
- [48] 张宽,胡根成,吴克强,等. 中国近海主要含油气盆地新一轮油气资源评价[J]. 中国海上油气,2007,19(5):289-294. ZHANG Kuan, HU Gencheng, WU Keqiang, et al. The Latest national petroleum resources assessment for the main offshore petroleum basins in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(5): 289-294.
- [49] 童晓光,张光亚,王兆明,等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 地学前缘,2014,21(3):1-9. TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Global oil and gas potential and distribution[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 1-9.
- [50] 周庆凡,张亚雄. 油气资源量含义和评价思路的探讨[J]. 石油与天然气地质,2011,32(3):475-480. ZHOU Qingfan, ZHANG Yaxiong. A discussion on petroleum resource concepts and assessment approaches[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 474-480.
- [51] 朱俊章,朱明,石创,等. 珠江口盆地东部油气聚集系数求取[J]. 长江大学学报:自然科学版,2022,19(2):12-22. ZHU Junzhang, ZHU Ming, SHI Chuang, et al. The Calculation of the petroleum accumulation coefficient in eastern Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2022, 19(2): 12-22.

(收稿日期 2023-11-02 改回日期 2023-12-16 编辑 肖 飞)